

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

– جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان

Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen –

Faculté de Technologie



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie industriel

Spécialité : Ingénierie de système

Par: Ghat Mohammed Nedjem Eddine & Baraka Imad Eddine

Thème

Etude de faisabilité de la récupération de chaleur fatale sur site industriel pour valorisation interne

Soutenu publiquement, le 11 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

Président	K. MEKAMCHA	MCB	UABB Tlemcen
Encadreur	H. KADRAOUI	MCB	UABB Tlemcen
Examineur	N. GAOUAR	MCB	UABB Tlemcen
Examineur	F. BENHACHEM	MCA	UABB Tlemcen

Année universitaire 2023-2024

Remerciements

Je remercie en premier lieu Dieu le tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour terminer ce travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Mr KADRAOUI Hicham, pour avoir encadré et dirigé ce travail ainsi que pour sa disponibilité, ses conseils et pour son soutien et sa patience.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à madame N.HERARSI pour son aide et de sa générosité.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury. Mr K. MEKAMCHA, d'avoir fait l'honneur de présider le jury et Mme F. BENHACHEM, Mme N. GAOUAR, pour avoir accepté d'examiner et apporter leur avis sur notre travail.

Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements à tous les enseignants du département de Génie industriel (Université de Tlemcen).

Enfin je souhaite exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont offert leur soutien et leur assistance.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect et mon amour éternel, à ces deux merveilleuses personnes qui ont toujours été à mes côtés pour illuminer mon chemin et m'encourager.

À mes chères sœurs : Marwa, Safa, Nour

À mes chers frères : Youcef et Islam

À tous mes amis : Salah, Krimou, Taher, et à tous ceux qui me sont chers.

*Ghiat Mohammed
Nedjem Eddine*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, qui ont toujours eu les soucis de mon avenir et qui m'ont comblé d'amour et d'affection.

- mon frère Siradj, et ma sœur Chaimaa et à toute ma famille.

- À ma grande mère et mes oncles.

- Je dédie également ce travail à mes amis proches Abderrahmen, Nadir, Ayoub, Mohammed, Walid, f.H. Rayhane

- À mes collègues en résidence universitaire Nedjm eddine imed hichem zine eddine Karim salah

- À toute la promotion GI 2019

Baraka Imad Eddine

Table des matières

Introduction Général	1
Chapitre 1 : Généralités sur les moteurs à combustion interne	2
1.1 Introduction aux MCI	3
1.2 Principe de fonctionnement	3
1.3 Architecture d'un moteur à combustion interne	4
1.3.1 Organes fixes.....	5
1.3.1.1 Bloc-moteur.....	5
1.3.1.2 Culasse	5
1.3.1.3 Carter	5
1.3.1.4 Joint de culas	5
1.3.2 Organes mobiles	6
1.3.2.1 Piston	6
1.3.2.2 Segments de piston	6
1.3.2.3 Axe de piston.....	6
1.3.2.4 Bielle.....	6
1.3.2.5 Arbre à cames.....	7
1.3.2.6 Soupape.....	7
1.3.2.7 Vilebrequin.....	7
1.4 Classifications des moteurs à combustion interne	8
1.4.1 Selon le type d'allumage	8
1.4.2 Selon le nombre de temps.....	8
1.5. Comparaison entre moteur Diesel et Essence	9
1.5.1 Fonctionnement	9
1.5.2 Combustibles.....	10
1.5.3 Rendement	10
1.6 Les groupes électrogènes.....	10
1.6.1 Les caractéristiques principales d'un groupe électrogène.....	11
1.6.2 L'utilisation des groupes électrogènes dans les sites industriels	11
1.6.3 La chaleur perdue dans les groupes électrogènes	12
1.7 Circuit de refroidissement.....	13
1.7.1 Refroidissement Par Air	13
1.8 Les pertes thermiques dans les MCI	14

1.9 La récupération des rejets thermiques dans les MCI.....	14
1.9.1 Turbocompression - Suralimentation	14
1.9.2 Cycle de Rankine	15
1.10 Conclusion	16
Chapitre 2 : La récupération de chaleur fatale pour valorisation interne	17
2.1 Introduction.....	18
2.2 Intérêt de la récupération et de la valorisation de la chaleur fatale.....	18
2.2.1 La réduction des factures énergétiques.....	18
2.2.2 La réduction des émissions de CO ₂	18
2.2.3 Le respect de l'environnement	19
2.2.4 Préservation des ressources naturelles.....	19
2.3 Les technologies de récupération de chaleur fatale.....	19
2.4 Les échangeurs de chaleur	19
2.4.1 Généralités	20
2.4.2 Les fluides caloporteurs.....	21
2.4.3 Les différents types des échangeurs de chaleur	21
2.4.3.1 échangeurs à plaques et cadres.....	21
2.4.3.2 échangeurs à coque et tubes	21
2.4.3.3 échangeurs à double tube	21
2.4.4 Catégorisation des échangeurs en fonction des configurations	21
2.4.4.1 Échangeur à caloducs	21
2.4.4.2 Échangeur à plaque ou échangeur compact	21
2.4.4.3 Échangeur tubulaire.....	22
2.4.4.4 Échangeur non métallique.....	22
2.5 Méthodes de transfert de chaleur	24
2.5.1 Transfert par Conduction	25
2.5.2 Transfert par convection	27
2.5.2.1 Calcul du coefficient d'échange par convection h	27
2.5.3 Transfert de chaleur par rayonnement	29
2.6 Technologie de la cogénération	30
2.6.1 Fonctionnement d'une installation de cogénération	30
2.6.2 Le rendement énergétique de la cogénération.....	32
2.7 Conclusion	33

Chapitre 3 : Analyse de la quantité de chaleur récupérable dans un MCI	34
3.1 Introduction.....	35
3.2 Mise en Place du Système	35
3.2.1 Concepts de base	35
3.2.2 Flux d'air.....	36
3.2.2.1 Ventilateur d'air	36
3.2.2.2 Le débit d'air	38
3.2.2.3 Calcul de la section transversale	38
3.2.2.4 Calcul de vitesse de l'air a la sortie	38
3.2.2.5 La circonférence de l'extrémité des pales.....	38
3.2.2.6 La vitesse de rotation de ventilateur	39
3.2.3 Le taux de transfert de chaleur	40
3.2.4 Le coefficient de transfert de chaleur convectif.....	40
3.2.4.1 Le nombre de Reynolds	41
3.2.4.2 Le nombre de Prandtl	41
3.2.4.3 La surface de contact A	42
3.2.4.4 La différence de température ΔT	42
3.2.5 Les pertes de charges ΔP_t	42
3.2.5.1 Calcul des pertes dynamiques	42
3.2.5.2 Calcul des pertes statiques	43
3.2.5.3 Calcul des pertes des charges linéaires.....	43
3.2.5.4 Calcul des pertes singulières	43
3.2.6 La puissance aéraulique	44
3.3 Quantité de chaleur récupérable.....	44
3.4 Le stockage d'air	45
3.5 L'automate programmable industriel	45
3.6 L'automatisation des systèmes	47
3.6.1 Cahier de charge.....	47
3.6.1.1 Contexte et objectif.....	47
3.6.2 Description de système actuel.....	47
3.6.2.1 Composants principaux.....	47
3.6.2.2 Fonctionnalités attendues.....	47
3.6.3 Exigence technique.....	48

3.6.3.1 Matérielles.....	48
3.6.3.2 Logiciels.....	48
3.6.4 Interface Utilisateur	48
3.6.5 Sécurité	48
3.7 GRAFCET Détaillé	48
3.7.1 Tables des entrées et des sorties	48
3.7.2 Étapes et Transitions.....	49
3.7.3 Schéma GRAFCET	49
3.8 La partie programmation sur TIA PORTAL	50
3.8.1 Simulation d'IHM	52
3.9 L'intérêt de ce travail réalisé avec TIA portal et l'IHM.....	56
3.9.1 L'automatisation avec TIA portal	56
3.9.1.1 Programmation du GRAFCET	56
3.9.1.2 Intégration des capteurs et actionneur	56
3.9.2 Simulation et interface homme-machine (IHM)	56
3.9.2.1 Interface utilisateur	56
3.9.2.2 Notification	57
3.9.2.3 Contrôle manuel	57
3.9.3 Résumé	57
3.10 Conclusion	58
Conclusion générale	59
Références bibliographiques	60

Liste des figures

Figure 1.1 : Représentation des éléments principaux constituant un moteur	4
Figure 1.2 : Représentation des éléments principaux constituant un MCI	4
Figure 1.3 : Principe de suralimentation par turbocompresseur	15
Figure 2.1 : Principe d'un échangeur à courant	20
Figure 2.2 : Mouvement d'air	22
Figure 2.3 : Transfert de chaleur	24
Figure 2.4 : Les trois modes de transfert de chaleur	25
Figure 2.5 : Transfert par conduction	26
Figure 2.6 : Principe de la cogénération	30
Figure 2.7 : Système de cogénération	31
Figure 2.8 : Exemple d'application de la cogénération	32
Figure 3.1 : Système de récupération de chaleur	36
Figure 3.2 : Système de refroidissement	37
Figure 3.3 : Ventilateur	37
Figure 3.4 : Transmission par courroie	39
Figure 3.5 : Cuves et réservoirs d'air comprimé	45
Figure 3.6 : Structure de système automatisé	45
Figure 3.7 : Schéma Grafcet	49
Figure 3.8 : La table des variables sous Tia Portal	50
Figure 3.9 : Grafcet avec le Plc Sim en mode run	50
Figure 3.12 : IHM développé par logiciel TIA PORTAL	52
Figure 3.13 : IHM en mode Start	52
Figure 3.14 : Entrain de remplissage de réservoir	53
Figure 3.19 : IHM en mode Stop	55

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Les 4 temps des deux moteurs essence et diesel	9
Tableau 1.2 : Combustible utilisé dans les deux moteurs	10
Tableau 2.1 : Valeurs de la conductivité thermique λ de certains matériaux.....	26
Tableau 3.1 : Caractéristique du moteur DEUTZ F4L912	37
Tableau 3.2 : Caractéristique d'air en condition normal.....	38
Tableau 3.3 : Les entrées et les sorties de système	48

Nomenclature

MCI	: Moteur à combustion interne
PLC	: Programmable logique contrôleur
QCR	: Quantité de chaleur récupérée
D	: Diamètre d'alésage.
S	: Course du piston.
R	: Rayon de la manivelle.
Lb	: Longueur de la bielle.
θ	: Angle Vilebrequin.
Vc	: Volume chambre de combustion
PMH	: Point Mort Haut.
PMB	: Point Mort Bas.
Q	: Débit
ω	: Vitesse angulaire de rotation du ventilateur
A	: Section transversal
V	: Vitesse d'air à la sortie
ΔP_t	: Pertes de charges totales
Pd	: Pertes de charges dynamiques
P_s	: Pertes de charges statiques
d_L	: Pertes linières (Pa)
d_s	: Pertes singulières
λ	: Coefficient de perte
L	: Longueur de cylindre
k	: Coefficient de perte de charge associé au coude
g	: Accélération due à la gravité
P_{aér}	: Puissance aéraulique
C	: Circonférence de l'extrémité des pales
r	: Rapport de transmission
N₂	: Vitesse de rotation de l'arbre moteur.
N₁	: Vitesse de rotation de l'arbre récepteur.
d_1	: Diamètre de la poulie motrice.

d_2	: Diamètre de la poulie réceptrice (ventilateur).
Q	: Taux de transfert de chaleur.
h	: Coefficient de transfert de chaleur convectif.
A	: Surface de contact entre le fluide et la surface.
ΔT	: Différence de température entre le fluide et la surface.
N_{UD}	: Nombre de Nusselt
K	: Conductivité thermique du fluide
D	: Diamètre caractéristique du cylindre
Re	: Nombre de Reynolds basé sur le diamètre du cylindre.
Pr	: Nombre de Prandtl du fluide(d'air).
C, m, n	: Coefficients empiriques dépendants des conditions spécifiques de l'écoulement et du fluide.
ρ	: Masse volumique d'air
μ	: Viscosité dynamique d'air
ν	: Viscosité cinématique d'air
α	: Diffusivité thermique d'air

Introduction générale

Introduction générale

Le défi énergétique auquel l'humanité est confrontée aujourd'hui est de réduire les émissions de CO₂ et progressivement de substituer les combustibles fossiles par d'autres sources d'énergie n'émettant pas de CO₂ (dites décarbonnées). Pour répondre à ce défi, il faut faire des économies d'énergie, utiliser des dispositifs plus efficaces et utiliser à grande échelle des sources d'énergie décarbonnées. Les principaux usages de l'énergie sont par ordre de consommation décroissante, la production d'énergie thermique, les transports et l'électricité. Les moteurs à combustion interne sont essentiellement utilisés pour la propulsion routier, maritime, et aérienne. Ils sont aussi utilisés pour des installations fixes (énergétiques) tels que les groupes électrogènes et les pompes. Les moteurs à combustion interne utilisent approximativement 1/3 de l'énergie chimique libérée après la combustion, les 2/3 sont des pertes. Alors les questions des rejets thermiques sont au cœur des préoccupations relatives au réchauffement climatique, à la pollution atmosphérique et aux risques sanitaires. Ainsi les acteurs du secteur se sont fixé comme objectif le développement de moteurs à haute performance énergétique et cela ne peut être possible que par des meilleures méthodes de conversion d'énergie ainsi que par la récupération des rejets thermiques. Le concept de la récupération de rejets thermique n'est pas un concept nouveau. Cependant il est aujourd'hui plus que jamais un des sujets les plus traités dans le cadre de l'optimisation de la conversion énergétique. Une grande attention est portée pour toutes les technologies qui permettent de récupérer l'énergie perdue par les gaz d'échappement, le système de refroidissement et du carburant imbrulé. Cette étude vise à étudier la faisabilité de récupérer les rejets thermiques dans les moteurs à combustion interne afin de l'utiliser pour d'autres procédés tels que le chauffage de bâtiments, le chauffage d'eaux sanitaires, etc.

Notre mémoire est structurée en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, Une présentation succincte du moteur à combustion interne a été effectuée.

Le chapitre suivant a été dédié à la présentation des échangeurs de chaleur et aux différentes méthodes de transfert de chaleur, y compris la technologie de cogénération.

Dans le troisième chapitre, nous avons abordé le système employé pour récupérer la chaleur dans un moteur à combustion interne, ainsi que les concepts utilisés pour évaluer la quantité de chaleur récupérée pour alimenter l'échangeur de chaleur.

CHAPITRE 1
GÉNÉRALITÉS SUR LES
Moteurs à combustion
Interne (MCI)

1.1 Introduction aux MCI

Les moteurs à combustion interne (MCI) sont des composants essentiels dans de nombreux domaines industriels et domestiques, principalement grâce à leurs capacités pour convertir l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique. Les MCI sont largement utilisés dans les transports terrestres, maritimes et aériens, où ils alimentent les moteurs des véhicules, des bateaux et des avions.

Un moteur thermique à combustion interne peut être vu comme un dispositif convertisseur d'énergie. Il permet la transformation de l'énergie thermique, qui est produite par la combustion d'un mélange de carburants et de comburant, en énergie mécanique motrice. Si la combustion se produit à l'intérieur d'un moteur, il est appelé moteur à combustion interne. Si l'énergie est transportée à l'extérieur du moteur par un fluide transporteur, comme dans le cas d'une turbine à vapeur, on parle de moteur à combustion externe.

1.2 Principe de fonctionnement

Le moteur à combustion interne convertit directement en énergie mécanique l'énergie thermique générée par la combustion d'un mélange de carburant et d'air. La production de l'énergie thermique commence par l'injection de carburant pulvérisé très fin qui sera ensuite mélangé à l'air dans le cylindre pour créer le mélange de carburant.

À ce stade de l'introduction dans le cylindre, le mélange gazeux à faible pression est utilisé pour effectuer l'opération d'admission. Si on l'incendiait à ce moment-là, il est nécessaire de le comprimer avant de pouvoir produire suffisamment de travail, c'est la phase de compression. Ensuite, le mélange de carburant comprimé est enflammé, ce qui entraîne une pression supplémentaire sur le piston. La pression est ensuite transférée en un effort moteur, ce qui entraîne le mouvement de rotation de l'arbre moteur grâce au mécanisme bielle-manivelle.

L'opération d'échappement se produit enfin lorsque les gaz brûlés sont évacués dans l'atmosphère avant qu'un nouveau mélange frais ne soit introduit dans le cylindre pour commencer un nouveau cycle. La grande majorité des moteurs à combustion interne fonctionne selon le cycle à 4 temps : Admission, Compression, Combustion et Échappement.

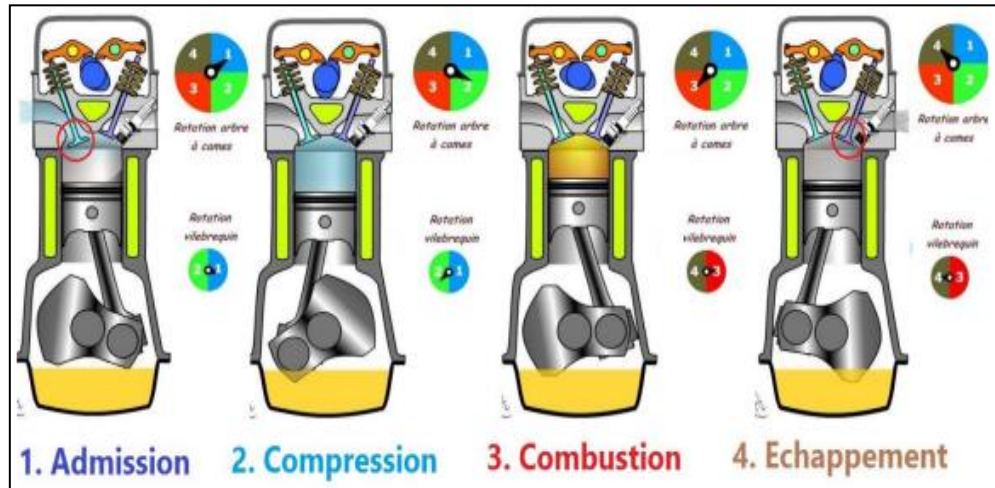


Figure 1.1 : Représentation des éléments principaux constituant un moteur

1.3 Architecture d'un moteur à combustion interne

La création d'un moteur à combustion interne représente un processus complexe visant à transformer l'énergie chimique contenue dans le carburant en mouvement mécanique. Cette procédure ingénieuse comprend diverses étapes, telles que la détermination précise des besoins spécifiques, le choix du type de moteur adapté à l'application envisagée, la configuration du moteur, la conception des chambres de combustion, l'élaboration des systèmes d'admission et d'échappement, la mise en œuvre du système de distribution, le développement des dispositifs de refroidissement et de lubrification, ainsi que l'intégration de composants électroniques pour optimiser les performances. La phase de tests rigoureux et d'ajustements est cruciale pour confirmer la conception et garantir l'efficacité, la puissance et la fiabilité du moteur.

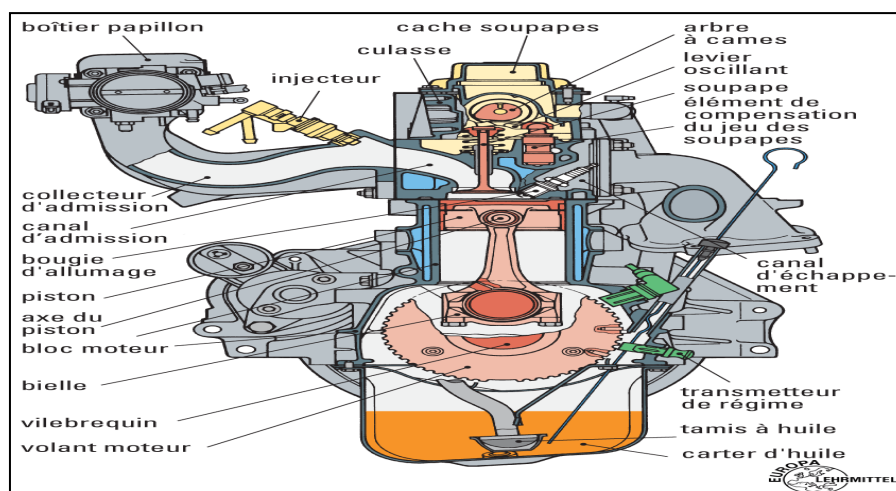


Figure 1.2 : Représentation des éléments principaux constituant un MCI

La connaissance des principaux organes d'un moteur à combustion interne est essentielle pour comprendre son fonctionnement. Les organes sont soit mobiles, soit fixes.

1.3.1 Organes fixes

1.3.1.1 Bloc-moteur

Le bloc-cylindres, également connu sous le nom de bloc-moteur, est la structure d'un moteur à pistons dont l'intérieur est usiné pour créer des cylindres ou des logements de chemises, dans le cas où le moteur est équipé de chemises rapportées. Le carter-moteur permet à l'eau de refroidissement de circuler librement. La partie supérieure du bloc est dressée pour former le plan de joint de la culasse, qui vient coiffer les cylindres [1].

1.3.1.2 Culasse

La culasse assure la fermeture des cylindres dans leur partie supérieure, constituant ainsi la chambre de combustion. Elle permet l'arrivée et l'évacuation des gaz, la mise en position des éléments de la distribution et de l'allumage, l'évacuation rapide de la chaleur. La culasse est obtenue par le moulage puis par usinage de la fonte ou d'alliage en aluminium.

Les contraintes mécaniques étant moins importantes dans une culasse par rapport au bloc-moteur, les constructeurs ont quasiment abandonné la fonte au profit de l'aluminium, en raison de sa légèreté et sa très bonne conductivité thermique. Un réseau de conduits d'eau et d'huile est pratiqué dans la culasse, l'étanchéité bloc-culasse est assurée par le joint de culasse [2].

1.3.1.3 Carter

C'est une cuvette en tôle emboutie qui abrite le vilebrequin et les têtes de bielle et qui contient la réserve d'huile de graissage. Il peut être en alliage léger moulé avec des nervures à l'extérieur pour assurer un bon refroidissement de l'huile échauffée par son passage dans le moteur. L'étanchéité entre le carter-moteur et le carter inférieur doit être parfaite. Elle est assurée par un joint plat en liège ou bien par un joint cylindrique, en caoutchouc synthétique ou en silicone, logé dans une gorge [2]

1.3.1.4 Joint de culas

Le joint de culasse est l'un des éléments les plus importants du moteur. Il doit :

- ✓ Assurer l'étanchéité au gaz entre chemise et culasse.
- ✓ Assurer l'étanchéité à l'eau vers l'extérieur entre culasse et bloc cylindre, vers le cylindre entre culasse et chemises. [3]

1.3.2 Organes mobiles

1.3.2.1 Piston

Le piston est l'organe qui, en se déplaçant dans le cylindre ou la chemise, transmet la poussée des gaz au vilebrequin par l'intermédiaire de la bielle. Il est en général moulé dans un matériau léger et d'une bonne conductivité thermique comme les alliages d'aluminium. La partie inférieure ou jupe du piston doit assurer le guidage à froid comme à chaud avec un minimum de frottement. Matériau léger et d'une bonne conductivité thermique comme les alliages d'aluminium.

Le piston se compose d'une tête ou culot dont le diamètre doit être inférieur à l'alésage du cylindre (dilatation thermique incluse). L'étanchéité est assurée par des segments [2]

1.3.2.2 Segments de piston

Les segments sont des anneaux brisés, de section carrée ou parallélépipédique. Ils doivent assurer des pressions radiales uniformes sur les parois du cylindre. Les segments pour moteur à 4 temps sont en général au nombre de trois [2] :

- ❖ Segment coup de feu : en plasma-céramique il doit réaliser la première étanchéité et résister aux températures et pressions élevées.
- ❖ Segment d'étanchéité : en fonte spéciale, il assure l'étanchéité inférieure de la chambre de combustion en évitant à l'huile de remonter.
- ❖ Segment racleur : en alliage de fonte, il évite les remontées d'huile tout en laissant un film d'huile permettant la lubrification

1.3.2.3 Axe de piston

L'axe de piston est une pièce cylindrique qui lie le piston à la bielle. Il permet le mouvement oscillatoire piston-bielle pendant la rotation du moteur. L'axe transmet à la bielle la force de pression que reçoit le piston pendant la phase d'expansion des gaz brûlés [2].

1.3.2.4 Bielle

La bielle est une pièce mécanique dont une extrémité est liée au piston par l'axe du piston et l'autre extrémité au maneton du vilebrequin. Elle permet la transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement circulaire continu du vilebrequin.

La bielle est en acier très résistant au nickel-chrome, parfois en acier mi-dur au carbone. On utilise également des bielles en alliage d'aluminium sur les moteurs poussés, en raison de sa légèreté [2].

1.3.2.5 Arbre à cames

Un arbre à cames est un dispositif mécanique permettant de transformer un mouvement rotatif en mouvement longitudinal. L'arbre à cames est une découverte du moyen âge pendant lequel il a été principalement utilisé dans les moulins à eau spécialisés dans le battage du fer ou le tannage du cuir (transformation du mouvement rotatif, issu de l'entraînement de la roue à aubes par l'eau, en mouvement longitudinal).

Aujourd'hui, l'arbre à cames est une pièce essentielle du moteur à combustion. L'arbre à cames, appelé également « arbre de distribution », commande l'ouverture des soupapes, en transformant le mouvement rotatif issu du moteur en mouvement longitudinal actionnant les soupapes. Il s'agit d'un arbre, entraîné par des pignons, une chaîne ou une courroie crantée. [5]

1.3.2.6 Soupape

La soupape est un bouchon métallique en acier au nickel, au chrome ou au tungstène qui ouvre et ferme les orifices d'admission et d'échappement pour permettre la compression, la combustion et l'évacuation des gaz brûlés. Elle est constituée d'une tige et d'une tête.

- ★ **La tige** : est reliée à la tête par un congé à grand rayon afin de réduire les contraintes et de renforcer la section dangereuse. La soupape est guidée par la tige lors de son mouvement rectiligne alternatif dans un guide qui est rapporté soit dans la culasse, soit dans le bloc.
- ★ **La tête** : qui est de forme tronconique, repose sur un siège par une partie conique pour garantir la fermeture et l'étanchéité de l'orifice d'admission ou d'échappement. Selon les différents types de moteurs, la tête peut être plate ou bombée avec un angle de siège égal à 30° ou 45°.

1.3.2.7 Vilebrequin

Le vilebrequin est un dispositif mécanique présent notamment sur les moteurs thermiques assurant la transmission de l'effort générée par l'explosion des gaz vers la boîte de vitesses.

En tant qu'élément principal du dispositif bielle-manivelle, il permet la transformation du mouvement linéaire rectiligne non uniforme des pistons en un mouvement continu de rotation [4].

1.4. Classifications des moteurs à combustion interne :

1.4.1 Selon le type d'allumage :

★ Moteur à allumage commandé (essence)

- La combustion du mélange air/essence est amorcée par l'étincelle d'une bougie d'allumage.
- Système d'allumage commandé
- Carburateur
- Injection directe d'essence

★ Moteur à allumage par compression (diesel)

- La combustion se produit lorsque le gazole est injecté sous pression dans de l'air fortement comprimé.
- Le mélange s'enflamme par auto inflammation, c'est-à-dire spontanément.

1.4.2 Selon le nombre de temps

★ 4 temps 2 tour/cycle

L'ensemble des phases qui se succèdent dans le moteur est appelé cycle, dans notre cas, le cycle est composé de quatre phases ou de temps :

1. Temps admission : aspiration d'air ou de mélange air-essence.
2. Temps compression : de l'air ou du mélange.
3. Temps combustion-détente : inflammation rapide du mélange provoquant une brusque montée en pression des gaz puis leur détente.
4. Temps échappement : évacuation des gaz brûlés

Il est observé que seul le temps moteur fournit de l'énergie, tandis que les trois autres temps sont résistants.

- En descendant, le piston provoque une diminution de la pression, ce qui encourage l'aspiration des gaz.
- Les gaz sont comprimés par le piston jusqu'à ce qu'ils ne prennent plus que la surface de la chambre de combustion (pression + chaleur)

★ 2temps (1tour/cycle)

Les moteurs à allumage commandé ou les moteurs Diesel à deux Temps peuvent être fabriqués, avec un cycle de combustion de deux temps. Les moteurs de cette catégorie ont un rendement inférieur à celui des moteurs à quatre temps, et la puissance d'un moteur à deux temps reste inférieure à la moitié de celle d'un moteur à quatre temps de taille similaire.

1.5. Comparaison entre moteur Diesel et Essence :

Nous comparerons ces deux moteurs en se basant sur : leurs mécanisme de fonctionnement (cycle à 4temps), leurs combustibles et leurs rendements

1.5.1 Fonctionnement

- **Moteur diesel**

Cycle	Fonction assurée dans le Moteur diesel	Composants mécaniques en fonctionnement
Admission	Aspiration d'air	Soupapes d'admission
Compression	Compression de l'air de 20 à 30 bars, provoquant un échauffement de l'ordre de 600°C	Piston dans la chambre de combustion
Combustion	Injection du combustible sous forte pression (100 à 300 bars) qui s'enflamme spontanément au contact de l'air	Injecteur
Échappement	Évacuation des gaz brûlés	Soupapes d'échappement

- **Moteur à essence**

Cycle	Fonction assurée dans le moteur essence	Composants mécaniques en fonctionnement
Admission	Aspiration d'un mélange air-essence	Soupapes d'admission carburateur ou injecteur pour le mélange
Compression	Compression du mélange de 8 à 12 bars, provoquant un échauffement d'environ de 300°C	Piston dans la chambre de combustion
Combustion	Allumage du mélange par étincelle électrique	Bougies d'allumage
Échappement	Évacuation des gaz brûlés	Soupapes d'échappement

Tableau 1.1 : Les 4 temps des deux moteurs essence et diesel [4].

1.5.2 Combustibles

Le fonctionnement distinct entre les moteurs à essence et diesel nécessite également des combustibles distincts. Chaque moteur a été développé en se basant sur les caractéristiques du carburant utilisé :

Essence	Diesel
Dans le moteur à essence le mélange ne sera valable que si la température de vaporisation de l'essence est voisine de la température de l'air ambiant. Par contre la température à laquelle l'essence s'enflamme dans l'air comprimé doit être la plus haute possible afin d'éviter l'auto-allumage puisqu'on comprime un mélange. Le taux de compression actuel est limité par cette condition.	Dans le Diesel le gazole n'est pas volatil à la température ordinaire. Ceci donne la force d'impact des gouttelettes à l'injection. La température à laquelle le gazole s'enflamme dans l'air comprimé doit être la plus basse possible. Il doit avoir des qualités d'auto-allumage c'est-à-dire s'enflammer le plus rapidement possible dans la chambre de combustion au moment de l'injection.

Tableau 1.2 : Le combustible utilisé dans les deux moteurs [4]

1.5.3 Rendement

Le rendement d'un moteur « à explosion » est la ration de la puissance mécanique restituée par rapport à la puissance thermique fournie par le carburant .Ce rendement est toujours majoré par le rendement de Carnot et ce dernier varie avec l'écart de température. Les rendements des montures à explosion peuvent donc être différents selon le type d'applications et de carburants considérés. Par exemple, les meilleures montures de série pour usage automobile ont des rendements pouvant atteindre 36% pour un moteur à essence à allumage commandé et 42% pour un moteur diesel, tandis que les meilleurs moteurs industriels à fioul lourd peuvent avoisiner 50% [5].

1.6 Les groupes électrogènes

Les groupes électrogènes sont des dispositifs autonomes capables de produire de l'électricité en cas de coupure d'alimentation. Leur utilisation est essentielle dans le secteur industriel où ils assurent la continuité de la production. Ces générateurs, généralement constitués d'un moteur thermique couplé à un alternateur, transforment l'énergie mécanique en énergie électrique. Il y a plusieurs catégories en fonction du poids, de la taille et du type de carburant. Il se compose généralement de trois grandes parties, à savoir :

- ★ La partie électrique
- ★ La partie mécanique
- ★ La partie commande

Le fonctionnement de ces groupes est basé sur trois éléments essentiels : le moteur

thermique, le générateur et l'armoire de commande. Les générateurs performants sont conçus pour fonctionner avec une variété de carburants, incluant l'essence, le diesel, le gaz, le GPL, les biocarburants, voire le mazout lourd dans le cas des moteurs thermiques. À la suite de la combustion du carburant, de l'énergie thermique est générée qui permet la rotation de la colonne du moteur. Le générateur est composé d'un rotor qui se déplace par le moteur, où il se déplace autour du stator, à travers ce mouvement génère un champ magnétique, le stator convertit le flux magnétique en électricité. L'armoire de commande est responsable du stockage des commandes de déclenchement et d'arrêt du groupe électrogène.

1.6.1. Les caractéristiques principales d'un groupe électrogène

Comme mentionné antérieurement, un groupe électrogène est un dispositif autonome conçu pour générer de l'électricité. Il se compose typiquement d'un moteur à combustion interne entraînant un alternateur, entre autres. Dans la suite, seront abordées les caractéristiques principales d'un groupe électrogène :

- **La puissance** : représente un élément crucial dans l'évaluation d'un groupe électrogène. Il s'agit de la puissance électrique produite, distincte de la puissance du moteur thermique. Les unités couramment utilisées pour mesurer cette puissance sont le Kilowatt (KW) et le kilovolt ampère (KVA), ce dernier étant la puissance apparente. La puissance en KW peut varier selon le facteur de puissance [6].
- **La fréquence**, exprimée en Hertz, est une mesure importante pour les groupes électrogènes. En Europe et dans le nord de l'Afrique, les groupes électrogènes fonctionnent généralement à une fréquence de 50 ou 60 Hertz [6].
- **Type d'énergie utilisée** : Cette caractéristique fait référence au carburant employé par le moteur thermique. Le diesel représente le carburant le plus répandu, tandis que certains groupes sont alimentés par du mazout lourd, principalement utilisé dans de grands ensembles. En revanche, le gaz est le moins utilisé [6].

1.6.2. L'utilisation des groupes électrogènes dans les sites industriels

- **Installations commerciales et industrielles**

De nombreuses installations commerciales comme les complexes hôteliers, les centres commerciaux, les immeubles de grande hauteur, les universités, les centres de calcul, les

hôpitaux, ainsi que les installations industrielles, les raffineries et les réseaux de chauffage urbain peuvent réduire les coûts d'exploitation par la mise en œuvre d'un système de production combinée de chaleur et d'électricité (cogénération) en utilisant du gaz naturel comme une source de combustible propre.

- **Serre**

Les installations de cultures sous serre utilisent aussi du gaz naturel avec un système de production combinée de chaleur et d'électricité (cogénération). Les groupes électrogènes au fournissent de l'électricité au réseau ou à l'éclairage électriques, de l'énergie thermique au chauffage des serres ainsi que du dioxyde de carbone comme engrais organique. Le CO₂ est recyclé à partir des gaz d'échappement du moteur.

- **Sites d'enfouissement**

La production naturelle de gaz de décharge, principalement constituée de méthane et de dioxyde de carbone, est due à la décomposition des déchets organiques dans les sites d'enfouissement. Dans le but de diminuer le taux de carbone, les sites d'enfouissement modernes captent ce gaz et l'exploitent comme combustible renouvelable dans des groupes électrogènes. Ces systèmes offrent à la communauté une alimentation électrique fiable et respectueuse de l'environnement.

- **Agriculture et traitement des aliments**

Le biogaz est utilisé comme combustible pour les groupes électrogènes en tant que sous-produit d'un grand nombre de procédés agroalimentaires, de transformation de certains produits alimentaires ou encore industriels. Ils ont été spécialement élaborés pour fonctionner avec du biogaz, ce qui permet de diminuer les coûts d'exploitation. La conception des groupes électrogènes à faible consommation vise à utiliser des biogaz dont la teneur en méthane varie considérablement, comme souvent le cas dans les applications biogaz.

1.6.3. La chaleur perdue dans les groupes électrogènes

Chaque groupe électrogène à moteur produit de la chaleur. Une fois que le moteur est démarré, La majeure partie de l'énergie du combustible est convertie en chaleur et perdue au profit atmosphère.

Environ 50% de toute l'énergie utilisée dans le moteur peut être récupérée sous forme de chaleur. C'est en fait une source d'énergie « gratuite », car elle ne nécessite aucun apport de carburant supplémentaire, mais peut récupérer une quantité énorme d'énergie.

La récupération de cette “chaleur perdue” a également pour effet d'augmenter l'efficacité totale du groupe électrogène d'environ 30% (puissance uniquement) à environ 80% (chaleur et électricité combinées). La chaleur récupérée peut être utilisée pour un large éventail d'utilisations domestiques, commerciales ou industrielles, y compris le chauffage urbain et l'eau chaude pour les constructions résidentielles, le chauffage de locaux commerciaux, chauffage de fonctionnement pour une large gamme d'applications industrielles, générer de l'électricité supplémentaire, en conjonction avec un moteur Stirling, ou même en faisant fonctionner un refroidisseur pour un refroidissement de confort.

1.7 Circuit de refroidissement

Le système de refroidissement des moteurs à combustion interne revêt une importance cruciale dans leur conception et leur fonctionnement. Deux principaux types de refroidissement sont largement utilisés : le refroidissement liquide et le refroidissement air/huile.

Le refroidissement liquide, une évolution des moteurs à refroidissement par air, offre une régulation plus constante de la température et nécessite une ingénierie moins complexe que le refroidissement par air. Toutefois, la simplicité d'utilisation du refroidissement liquide a parfois conduit à des simplifications dans la conception des systèmes, ce qui implique souvent une configuration où le liquide de refroidissement est introduit dans la partie inférieure du bloc moteur à l'avant et évacué par le haut [7].

1.7.1 Refroidissement Par Air

Le refroidissement par air représente une alternative pour refroidir les moteurs à combustion interne. Il repose sur l'utilisation de ventilateurs pour faire circuler l'air autour du moteur, permettant ainsi à la chaleur générée par le moteur d'être dissipée dans l'air ambiant. Bien que moins efficace que le refroidissement par liquide, cette méthode est plus simple et économique [7].

Dans les groupes électrogènes fixes, le processus de refroidissement par air est essentiel pour maintenir le moteur à une température optimale pendant son fonctionnement. Voici

les principales phases de ce processus :

- ✓ **Admission d'air** : Le système de ventilation du groupe électrogène aspire l'air ambiant.
- ✓ **Circulation de l'air** : Une fois aspiré, l'air circule à travers différentes parties du moteur, y compris le bloc moteur, les cylindres et les pistons.
- ✓ **Dissipation de la chaleur** : Pendant cette circulation, l'air absorbe la chaleur générée par le moteur. Cette chaleur est efficacement transférée grâce à la conception du moteur et à des composants tels que les ailettes de refroidissement.
- ✓ **Évacuation de l'air chaud** : Une fois la chaleur absorbée, l'air chaud est évacué à l'extérieur du groupe électrogène par le biais de grilles de ventilation ou d'évents.
- ✓ **Cycle continu** : Ce processus se répète continuellement pendant le fonctionnement du groupe électrogène, garantissant ainsi un refroidissement efficace du moteur.

Le refroidissement par air est souvent préféré dans les groupes électrogènes fixes en raison de sa simplicité, de sa fiabilité et de son coût relativement bas par rapport aux systèmes de refroidissement liquide. Cependant, il est crucial de dimensionner correctement le système de ventilation pour maintenir le moteur à une température optimale, en particulier dans des conditions de charge élevée ou dans des environnements chauds.

1.8. Les pertes thermiques dans les MCI

Dans les moteurs à combustion interne seul 1/3 de l'énergie de du carburant brûlé est converti en énergie utile. Le reste de l'énergie est dissipé sous forme de perte à travers les gaz d'échappement, les liquides de refroidissement et par convection comme par radiation à travers le bloc moteur. C'est approximativement 40% de l'énergie thermique qui est perdue à travers les gaz d'échappement [8]. Tandis que 25% de l'énergie sont perdus à travers les liquides de refroidissement.

1.9. La récupération des rejets thermiques dans les MCI

1.9.1. Turbo compression - Suralimentation

Un moteur à combustion interne à aspiration naturelle produit une grande quantité de chaleur rejetée dans les gaz d'échappement. On peut récupérer cette énergie perdue en utilisant un turbocompresseur. Un turbocompresseur, est un type de compresseur qui est entraîné par l'énergie des gaz d'échappement. L'autre type de compresseur de suralimentation est le

compresseur de suralimentation entraîné par le moteur même.

La turbo compression est la méthode la plus ancienne pour augmenter le rendement du moteur. Les turbocompresseurs utilisent l'enthalpie des gaz d'échappement pour faire tourner une turbine qui est connectée à un compresseur, afin d'augmenter la pression de suralimentation du moteur, d'augmenter le rendement volumétrique du moteur et donc les performances, en réduisant la consommation de carburant. Un turbocompresseur est un type de turbine à gaz où la chaleur et la pression dans les gaz d'échappement en détente sont utilisées pour augmenter la puissance du moteur en comprimant l'air qui entre dans les cylindres du moteur [9].

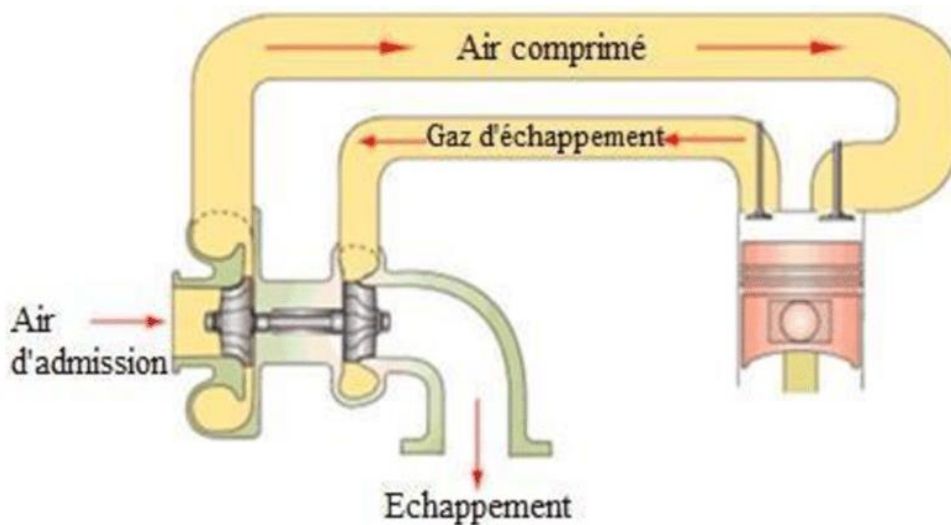


Figure 1.3 : Principe de suralimentation par turbocompresseur.

1.9.2. Cycle de Rankine

Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique moteur qui convertit la chaleur en travail mécanique. C'est le cycle thermodynamique le plus utilisé pour la génération d'électricité ou du travail mécanique. La chaleur est fournie extérieurement à une boucle fermée qui utilise l'eau comme fluide de travail. L'intérêt que présente le cycle de Rankine pour la récupération de rejets thermiques qui sont généralement à des températures peu élevées a conduit l'utilisation d'autre fluide ; principalement de fluides organique : ce cycle est alors appelé Cycle Organique de Rankine (ORC). D'autre part la bonne amélioration de rendement qu'il assure le cycle organique de Rankine présente aussi une grande souplesse et une très grande modulabilité. Ces caractéristiques favorisent son utilisation dans une multiplicité des applications et des formes dans la récupération de rejets thermiques [10].

1.10. Conclusion

En conclusion, les moteurs à combustion interne jouent un rôle crucial dans divers secteurs, notamment dans le domaine des générateurs électriques fixes. Leur efficacité opérationnelle dépend en partie de la mise en place d'un système de refroidissement adéquat, tel que celui décrit dans ce chapitre sur le refroidissement par air. Comprendre les principes de base du refroidissement par air dans le cadre des MCI revêt une importance capitale pour garantir leurs performances optimales et leur durabilité. Les prochains chapitres exploreront d'autres aspects essentiels de ces moteurs, en mettant en avant leurs avantages, leurs limites ainsi que les innovations émergentes qui façonnent l'avenir de cette technologie indispensable.

CHAPITRE 2
LA RÉCUPÉRATION DE CHALEUR
FATALE POUR VALORISATION
INTERNE

2.1. Introduction

La chaleur fatale correspond à des pertes thermiques engagées lors d'un processus industriel. Dans de nombreux procédés industriels, une grande quantité de chaleur est générée en tant que sous-produit, qui est rejetée dans l'environnement sans être utilisée. Ces pertes correspondent à un gaspillage énergétique.

Cette chaleur fatale perdue provient de diverses sources, notamment des systèmes de combustion, des opérations de refroidissement et d'autres processus de production. La valorisation de la chaleur perdue dans des procédés industriels ou au sein d'installations commerciales et institutionnelles est un gisement important d'économies d'énergie. En effet, la chaleur perdue a un coût non négligeable (achat de combustible, coût de production, etc.). Sa valorisation permet donc d'optimiser la productivité énergétique d'une organisation en réduisant les pertes de chaleur. Pour s'engager dans la transition énergétique, certaines entreprises mettent en place des solutions de récupération de la chaleur fatale.

2.2 Intérêt de la récupération et de la valorisation de la chaleur fatale

La récupération de la chaleur fatale conduit à deux axes de valorisation thermique complémentaires : une valorisation en interne, pour répondre à des besoins de chaleur propres à l'entreprise ; et une valorisation en externe, pour répondre à des besoins de chaleur d'autres entreprises, ou plus largement, d'un territoire, via un réseau de chaleur.

Au-delà du cadre réglementaire sur la décarbonation, la récupération de la chaleur fatale industrielle offre un certain nombre d'avantages significatifs aux industries. Voici les principaux.

2.2.1 La réduction des factures énergétiques

En exploitant la chaleur perdue, les industries peuvent réduire l'utilisation de leur dispositif de chauffage. De cette manière, elles peuvent réduire les dépenses associées à l'achat d'électricité. Ou de combustibles. L'engagement dans la récupération de la chaleur fatale permet aux entreprises et aux industries de réduire leurs coûts énergétiques et donc, de réaliser des économies financières substantielles à long terme.

2.2.2 La réduction des émissions de CO₂

L'une des principales raisons de valoriser la chaleur fatale réside dans son potentiel à réduire

les émissions de dioxyde de carbone (CO₂). En récupérant cette chaleur résiduelle pour le chauffage, la production d'électricité supplémentaire ou d'autres besoins, les entreprises contribuent à la lutte contre le changement climatique. En effet, l'engagement environnemental est de plus en plus attendu par les consommateurs mais aussi par les salariés et les investisseurs.

2.2.3 Le respect de l'environnement

La récupération de la chaleur résiduelle peut contribuer au respect de normes environnementales de plus en plus strictes. C'est notamment le cas pour les grosses industries soumises au marché du carbone. Les industries de plus petite taille ont intérêt à s'intéresser à leur efficacité énergétique dès maintenant. En effet, il y a fort à parier que la réglementation évolue et impose une diminution de leur empreinte carbone.

2.2.4 Préservation des ressources naturelles

La récupération de la chaleur fatale participe à la réduction de la pression sur les ressources naturelles finies (pétrole, gaz, charbon). Une démarche essentielle pour réduire sa dépendance aux énergies fossiles et assurer un approvisionnement durable pour les générations futures.

2.3 Les technologies de récupération de chaleur fatale

La chaleur de récupération peut être valorisée de deux manières différentes : soit sous forme de chaleur, soit, si les températures de la chaleur fatales sont suffisamment élevées, en cogénération (i.e. production de chaleur et d'électricité).

La majorité de ce processus de récupération s'effectue au moyen d'échangeurs de chaleur qui permettent un transfert d'énergie entre deux fluides. Ces échangeurs peuvent donc être de plusieurs types : gaz-gaz, liquide-liquide ou gaz-liquide. Leurs modalités d'installations ainsi que leur fonctionnement dépendent de la source de chaleur à récupérer ainsi que de la complexité des systèmes existants.

2.4. Les échangeurs de chaleur

Dans les entreprises industrielles, l'échangeur de chaleur joue un rôle crucial dans toute stratégie de gestion de l'énergie. Une grande partie (90 %) de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés.

Elles sont principalement employées dans les domaines de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans les domaines résidentiels et tertiaires (chauffage, climatisation, etc.). Pour une application spécifique, le choix d'un échangeur de chaleur est influencé par de nombreux paramètres tels que la température et la pression des fluides, les caractéristiques physiques et l'agressivité de ces fluides, ainsi que la maintenance. Il est clair que l'utilisation d'un échangeur bien conçu, bien dimensionné, bien fabriqué et bien utilisé permet d'améliorer le rendement et l'efficacité des procédés.

2.4.1 Généralités

L'échangeur de chaleur est un élément important dans un système de chauffage ou de refroidissement, que ce soit pour chauffer l'eau ou pour la climatisation. Il s'agit d'un dispositif qui permet de transférer l'énergie thermique (calorifique) entre les milieux sans les mélanger, et cette chaleur est transférée à travers un vecteur efficace pour une utilisation optimale de cette énergie [25].

Les deux circuits ne comportent aucun échangeur autre que la chaleur, car les deux milieux ou liquides sont séparés par un isolant qui empêche leur mélange. Cet isolant possède des propriétés qui lui permettent de transférer efficacement la chaleur, de sorte que le liquide chaud cède une partie de la chaleur qu'il contient au liquide froid et ne reçoit rien en retour cela permet de maintenir les propriétés physiques et chimiques (concentration, pression, éléments chimiques, etc.) de chaque milieu sans changer hormis sa température. Ou leur état [26].

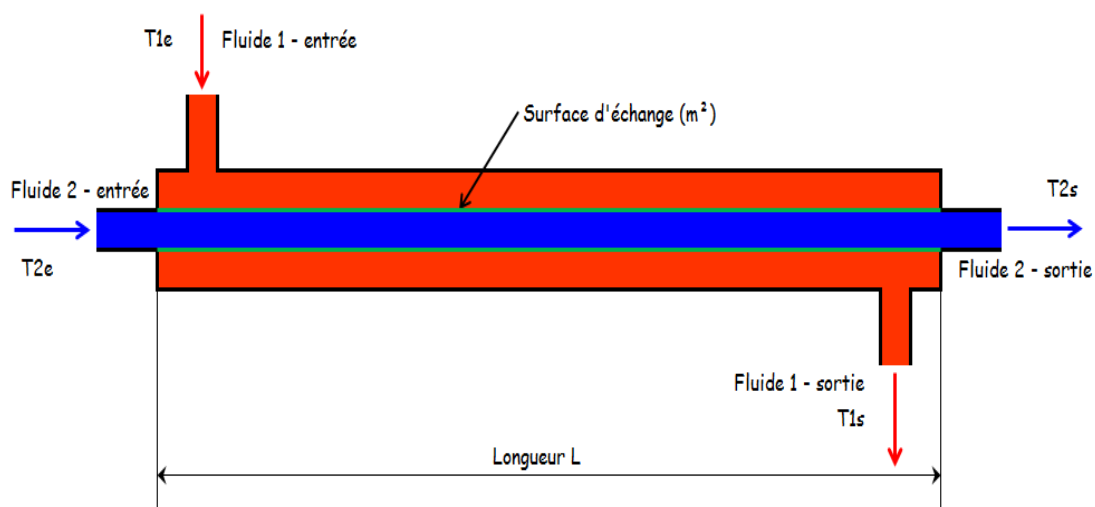


Figure 2.1 : Principe d'un échangeur à courant

2.4.2 Les fluides caloporteurs

Les fluides caloporteurs, employés pour le transfert thermique, incluent l'eau chaude, l'eau surchauffée, la vapeur, l'air chaud et l'huile thermique. Le choix de ces fluides varie en fonction de la taille de l'installation et des besoins spécifiques en production de chaleur.

2.4.3 Les différents types des échangeurs de chaleur

Il existe différents critères pour classer les types d'échangeurs de chaleur, et chacun d'eux a sa propre logique.

2.4.3.1 échangeurs à plaques et cadres

Ils sont constitués de plaques empilées avec des joints d'étanchéité entre elles, ce qui permet la circulation alternée des fluides chauds et froids [33].

2.4.3.2 échangeurs à coque et tubes

Ces dispositifs se composent d'une structure tubulaire intégrée dans un revêtement, permettant la circulation indépendante des fluides chaud et froid. Leur conception leur confère une résistance aux pressions et aux températures élevées [33].

2.4.3.3 échangeurs à double tube

Des échangeurs de chaleur basiques et abordables, constitués d'un tube intérieur et d'un tube extérieur, mais présentant des limitations d'efficacité et de taille à une grande échelle [33].

2.4.4 Catégorisation des échangeurs en fonction des configurations

2.4.4.1 Échangeur à caloducs

Cet échangeur est sélectionné pour transférer une puissance considérable tout en maintenant un écart de température minimal. Sa conception est à la fois économique et simple, même s'il peut être un peu encombrant, opérant silencieusement à un rythme modéré.

2.4.4.2 Échangeur à plaque ou échangeur compact

Un échangeur de chaleur à plaques est un dispositif qui comprend une série de plaques minces fabriquées à partir de matériaux tels que l'aluminium, l'acier inoxydable ou le plastique. Ces plaques sont agencées en couches superposées et sont espacées les unes des

autres. Pour assurer l'étanchéité entre les fluides circulant à l'intérieur de l'échangeur et éviter les fuites vers l'extérieur, un joint est placé autour du bord de chaque plaque. Ce joint assure une compression uniforme de l'ensemble de la plaque [34].

2.4.4.3 Échangeur tubulaire

L'échangeur de chaleur à tubes est un type d'échangeur de chaleur à calandre et à tubes. Le principe repose sur un faisceau de tubes disposés verticalement ou horizontalement au sein d'une enveloppe appelée calandre. L'échange thermique se produit entre deux fluides, l'un circulant à l'intérieur des tubes (fluide « primaire ») et l'autre circulant à l'intérieur de la calandre, entourant les tubes (fluide « secondaire »). Les fluides peuvent être de plusieurs types : gaz/gaz, liquide/liquide, liquide/gaz, etc.

2.4.4.4 Échangeur non métallique

Ces matériaux, étant non corrosifs, ne nécessitent pas de nettoyage obligatoire. Cependant, certains d'entre eux ne supportent pas des températures extrêmement élevées car ils ont tendance à se dilater. Par exemple, les plastiques ont généralement des diamètres réduits et sont sensibles aux chocs.

La conception et la construction jouent un rôle important dans le processus de sélection et de classification d'un échangeur de chaleur, car la taille et la forme diffèrent d'un échangeur à l'autre en fonction de l'application. La classification des échangeurs de chaleur peut être basée sur la façon dont l'air les traverse, car on en trouve deux types principaux « à flux croisés et à contre-courant » [24].

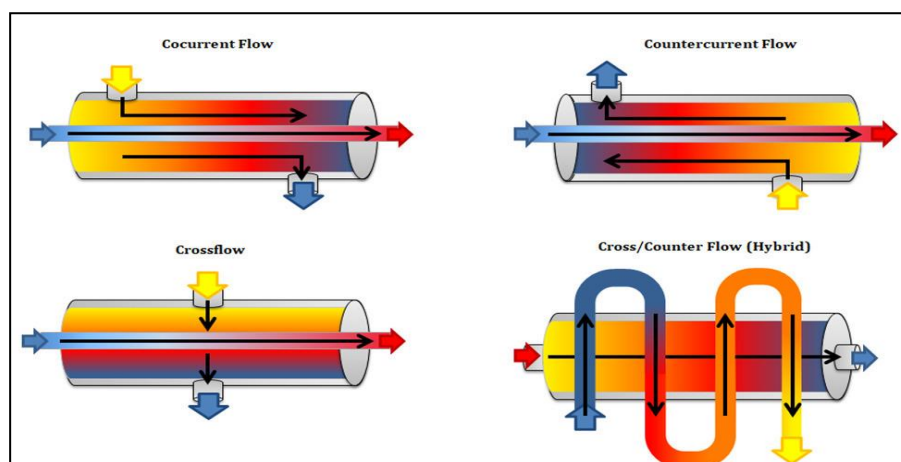


Figure 2.2. Mouvement d'air [20]

Les types d'échangeurs de chaleur varient en fonction de la variété des domaines d'applications dans lesquels ils fonctionnent, et cela est basé sur plusieurs facteurs, notamment : la température, la pression, la contraintes d'espace et la contraintes d'environnement

- **Efficacité du transfert de chaleur**

L'efficacité du transfert de chaleur est considérée comme le principal indicateur pour évaluer l'efficacité et la supériorité de l'échangeur de chaleur, car le taux de transfert de chaleur de ce dernier d'un milieu à un autre (eau, air ou gaz) est mesuré pour permettre de comparer entre les échangeurs et acquérir celui qui convient le mieux. Ce pourcentage peut être calculé comme suit :

$$E = \frac{\text{Taux de transfert de chaleur dans l'échangeur de chaleur}}{\text{Taux de transfert de chaleur maximal possible}} \quad (2.1)$$

$$E = \frac{q}{q_{\max}} \quad [27] \quad (2.2)$$

Nous pouvons également augmenter l'efficacité du transfert de chaleur à plus de 10% en utilisant des échangeurs de transfert de chaleur utilisant un flux de fluides dans des directions opposées. En raison de la caractéristique unique du transfert de chaleur fluide.

Les échangeurs de chaleur à contre-courant assurent un transfert de chaleur plus uniforme, qui est réparti uniformément sur la coque et le conduit de l'échangeur thermique, par rapport au flux parallèle. Comme le montre le graphique ci-dessous, le gradient de température est constant dans les fluides chauds et froids à contre-courant, indiquant idéalement un échange de chaleur constant sur toute la longueur du tube. Cependant, dans un écoulement parallèle, le gradient de température commence initialement à un rythme plus élevé, mais à mesure que le fluide se déplace le long du tube, le gradient de température diminue considérablement. Par conséquent, moins de transfert de chaleur et une efficacité moindre. Il existe des applications uniques qui nécessitent un transfert de chaleur instantané pour abaisser la température, et c'est là qu'un échangeur de chaleur parallèle peut obtenir d'excellents résultats.

L'efficacité du transfert de chaleur peut également être affectée par plusieurs facteurs, qui ont un impact sur l'échangeur de chaleur et son efficacité, notamment : les propriétés du fluide, la conception de l'échangeur de chaleur et la différence de température.

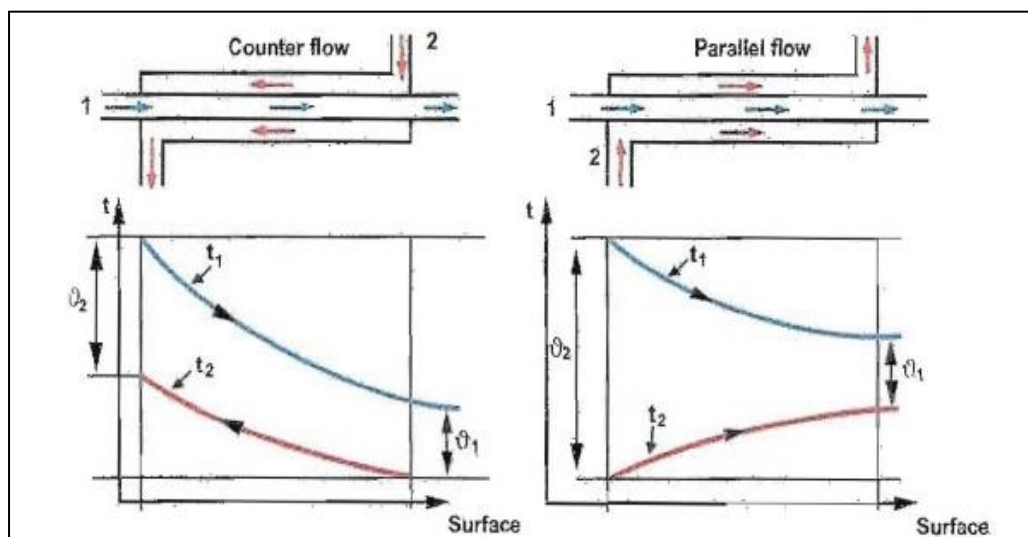


Figure 2.3. Transfert de chaleur

2.5. Méthodes de transfert de chaleur

Les trois méthodes de transfert de chaleur, à savoir la conduction, utilisée dans les solides, la convection, qui nécessite un flux, et le rayonnement électromagnétique, sont rares à fonctionner individuellement au sein d'un même système. Cependant, l'un d'entre eux est souvent le plus courant. L'échange thermique peut s'effectuer sans changement de phase, ce qui signifie que la substance reste dans son état initial qu'elle soit solide, liquide ou gazeuse (c'est ce qu'on appelle un système monophasé). L'échange de chaleur peut également se produire avec un changement de phase, généralement dans un système à deux étages dans un échangeur de chaleur. Dans ce cas, la chaleur contribue à modifier l'état physique de la substance.

L'échange d'énergie thermique dans un système monophasé est généralement appelé «chaleur sensible ». Le concept de base de l'anisotropie thermique sensible dans ce système est illustré, généralement désigné par l'abréviation « Δq » en joules (J). Elle est calculée par la différence de température à travers le système ($T_{\text{sortie}} - T_{\text{entrée}}$) avec une masse « m » en kilogrammes (kg) et une chaleur spécifique isobare « C_p » en (J/kg·K).

La formule générale de cet échange est :

$$\Delta q = m \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \quad (2.3)$$

Ensuite, le flux thermique « Φ » est exprimé en watts (W) grâce à l'échange thermique qui se produit sur une période de temps donnée :

$$\Phi = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \quad (2.4)$$

\dot{m} : Le débit massique de fluide [/s] ; c_p : Capacité thermique massique de fluide.

La puissance exprimée dans un seul système thermique est généralement utilisée pour calculer la puissance transmise ou reçue par un fluide donné dans son écoulement. Ces scénarios nécessitent bien entendu une source de froid autour et en contact avec le tuyau.

La puissance thermique conférée à un système donné peut également être exprimée en surveillant l'évolution de la température sur une période de temps spécifiée Δt (sec) [15] :

$$\Phi = \dot{m} \cdot c_p \cdot \frac{T_f - T_i}{\Delta t} \quad (2.5)$$

En peut défini L'échange thermique comme le transfert d'énergie d'une zone à une zone avec l'effet ou l'influence d'une différence de température et est soumis à un ensemble de lois physiques. Les trois modes de transfert de chaleur comprennent [13] :

- La conduction
- L'échange thermique par courant (Convection)
- Le rayonnement

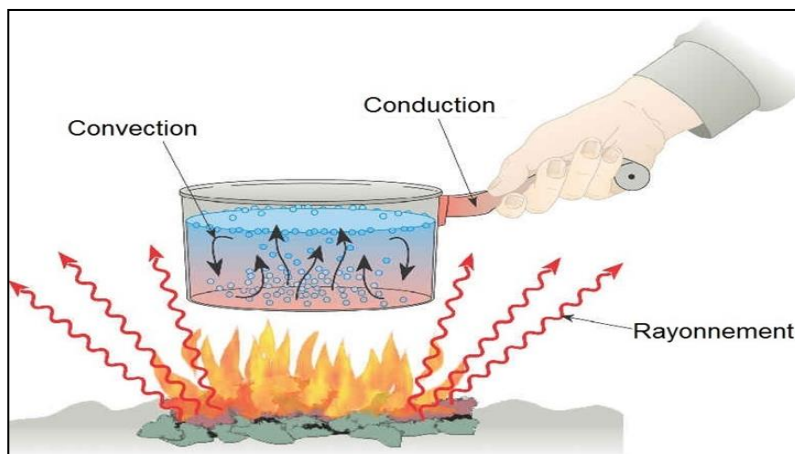


Figure 2.4. Les trois modes de transfert de chaleur [28]

2.5.1. Transfert par Conduction

La chaleur est transférée au sein d'un matériau opaque sans mouvement du matériau lui-même, sous l'influence des différences de température. La chaleur est transférée dans le corps par conduction par deux mécanismes différents : soit par les vibrations d'atomes ou de molécules, soit par des électrons libres [14].

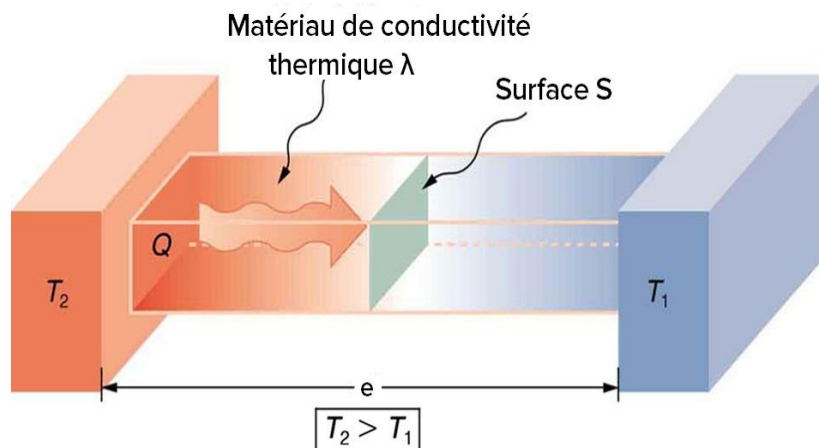


Figure 2.5. Transfert par conduction [29].

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\Phi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (2.6)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\vec{\Phi} = -\lambda S(x) \frac{dQ}{dt} \quad (2.7)$$

Φ : flux de chaleur transmis par conduction (**W**).

λ : Conductivité thermique du milieu (**W . m⁻¹ . K⁻¹**)

x : Variable d'espace dans la direction du flux (**m**).

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (**m²**).

On trouvera dans « le tableau 2.1 » les valeurs de la conductivité thermique λ de certains matériaux parmi les plus courants [11].

Matériau (W . m⁻¹ . C⁻¹)		Matériau (W . m⁻¹ . C⁻¹)	
Argent	419	Plâtre	0.48
Cuivre	386	Amiante	0.16
Aluminium	204	Bois (feuille-résineux)	0.12-0.23
Acier doux	45	Liège	0.044-0.049
Acier inox	15	Laine de roche	0.038-0.041
Glace	1.88	Laine de verre	0.035-0.051
Béton	1.4	Polystyrène expansé	0.036-0.047
Brique terre cuite	1.1	Polyuréthane (mousse)	0.030-0.045
Verre	1.0	Polystyrène extrudé	0.028
Eau	0.60	Air	0.026

Tableau 2.1 : les valeurs de la conductivité thermique λ de certains matériaux

2.5.2. Transfert par convection

Le phénomène de mobilité fait référence au processus de transfert de chaleur qui se produit dans les fluides en mouvement, qu'ils soient liquides ou gazeux, où la chaleur est transférée par le mouvement de molécules liquides entre des régions de températures différentes.

La mobilité peut se produire lorsque des couches de liquide ayant des températures différentes se chevauchent ou lorsqu'un liquide s'écoule sur une surface solide ayant une température différente de celle du liquide. Le processus de navigation est divisé en deux types principaux [14] :

- A) Mouvement libre (ou naturel) : Le mouvement du fluide dans ce type dépend principalement des différences de densité qui résultent des gradients thermiques.
- B) Mobilité forcée : Le mouvement du fluide dans ce type est provoqué par des forces externes telles que des ventilateurs et des pompes, ce qui entraîne des vitesses de déplacement du fluide élevées.
- C) La mobilité mixte : combine mobilité imposée et mobilité naturelle, et cette combinaison complique encore la question, car les relations mathématiques liant ces phénomènes sont de type mixte, comme nous l'avons vu précédemment.

Les lois de Newton déterminent la densité de la quantité de chaleur échangée entre une surface solide et un liquide en écoulement en fonction de la différence de température qui a provoqué cet échange. Ces lois expriment la relation suivante [14]:

$$\phi = h(T_p - T_\infty) \quad (2.8)$$

Où :

ϕ : Flux de chaleur transmis par convection (W).

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$).

T_p : Température de surface du solide ($^\circ C$).

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide ($^\circ C$).

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^{-2}).

2.5.2.1. Calcul du coefficient d'échange par convection h

- **En convection forcée**

Elle est indépendante de la différence de la température de la paroi et du fluide mais il dépend des 6 grandeurs suivantes :

U : Vitesse moyenne du fluide (m/s).

ρ : Masse volumique du fluide (Kg/m^3).

C_p : Chaleur spécifique à pression constante du fluide en ($J/Kg.K$).

μ : viscosité dynamique du fluide en ($Pa.s$) ou en ($Kg/m.s$).

λ : Conductivité thermique du fluide en ($W/m.K$).

D_h : Dimension caractéristique de la surface d'échange.

$$D_h = \frac{4S_p}{P_m} \quad (2.9)$$

✓ à l'intérieur du tube interne : $D_h = D_{int}$

✓ pour la section annulaire : $D_h = D_{int} - D_{ext}$

✓ pour une plaque plane : $D_h = L$ avec L : la longueur d'une plaque plane

S_p : Section de passage en (m^2).

P_m : Périmètre mouillé en (m).

À partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimension suivants :

$$Nu = \frac{hD_h}{\lambda} \quad \text{nombre de Nusselt} \quad (2.10)$$

$$Re = \frac{\rho h D_h}{\mu} \quad \text{nombre de Reynold} \quad (2.11)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad \text{nombre de Prandt} \quad (2.12)$$

Les résultats des recherches expérimentales étudiant le transfert thermique par mobilité dans un contexte donné sont généralement présentés sous la forme de relations mathématiques

$$h = \frac{N\mu}{D_h} \quad (2.13)$$

Le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide

$Re < 2000$: Écoulement laminaire.

$2000 < Re < 3000$: Écoulement intermédiaire.

$Re > 3000$: Écoulement turbulent.

Pr : Le nombre de Prandtl caractérise les propriétés thermiques du fluide.

Nu : Le nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

• En convection naturelle

Dans le transport libre normal, le fluide se déplace en raison de changements dans sa densité apparente, et ces changements résultent de l'échange thermique entre le fluide et la surface. Le fluide est déplacé grâce aux forces d'Archimède qui dépendent de la température du fluide.

La convection forcée est négligeable si :

$$\frac{Gr}{Pr^2} > 100 \quad (2.14)$$

$$Nu = c(GrPr)^n \quad (2.15)$$

$$\text{Convection Laminaire } Gr.Pr > 10^9 \Rightarrow n = \frac{1}{4} \quad (2.16)$$

$$\text{Convection Turbulent } Gr.Pr < 10^9 \Rightarrow n = \frac{1}{4} \quad (2.17)$$

2.5.3. Transfert de chaleur par rayonnement

Il s'agit d'un transfert d'énergie à distance entre deux objets, qu'ils soient connectés ou séparés par la matière, dans lequel l'énergie thermique de l'objet émetteur est convertie en énergie électromagnétique, qui est ensuite transmise et partiellement convertie en énergie thermique au niveau de l'objet récepteur. Un exemple en est l'énergie que nous recevons du soleil. En physique, chaque objet émet des particules appelées « photons ». Ces particules se déplacent à la vitesse de la lumière et transportent une énergie qui dépend de leur « longueur d'onde ».

Les photons sont émis par le corps dans toutes les directions, dont certains sont reçus par l'autre corps et peuvent être partiellement ou totalement absorbés. Bien entendu, des photons sont également émis par l'autre corps et une partie d'entre eux est reçue par le premier corps, ce qui reflète l'échange global d'énergie entre eux. La densité du flux thermique (rayonnement) émis par une surface de température T est calculée par la loi de Stefan-Boltzmann.

$$Q = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.18)$$

L'échange thermique résultant d'un rayonnement de grande longueur d'onde entre deux surfaces i et j , où chaque surface est à une température différente, est calculé par la relation

$$: \quad Q_{ij} = F_{ij} S_i \sigma (T_{si}^4 - T_{sj}^4) = F_{ji} S_j \sigma (T_{si}^4 - T_{sj}^4) \quad (2.19)$$

Où :

T_s : Température de la surface (K°) ;

F_{ij} : Facteur de forme entre les surfaces i et j ;

σ : Constante de Stéphane Boltzmann. ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} K/m^2 \cdot K^4$);

S : Superficie de la surface (m^2) ;

Q_{ij} : Flux de rayonnement à grande longueur d'onde entre les surfaces i et j .

2.6. Technologie de la cogénération :

La cogénération se caractérise par la production simultanée d'énergie thermique et électrique dans une seule usine. La chaleur restaurée se transforme en différents types d'énergie et l'électricité est produite par le mouvement mécanique de l'alternateur [12].

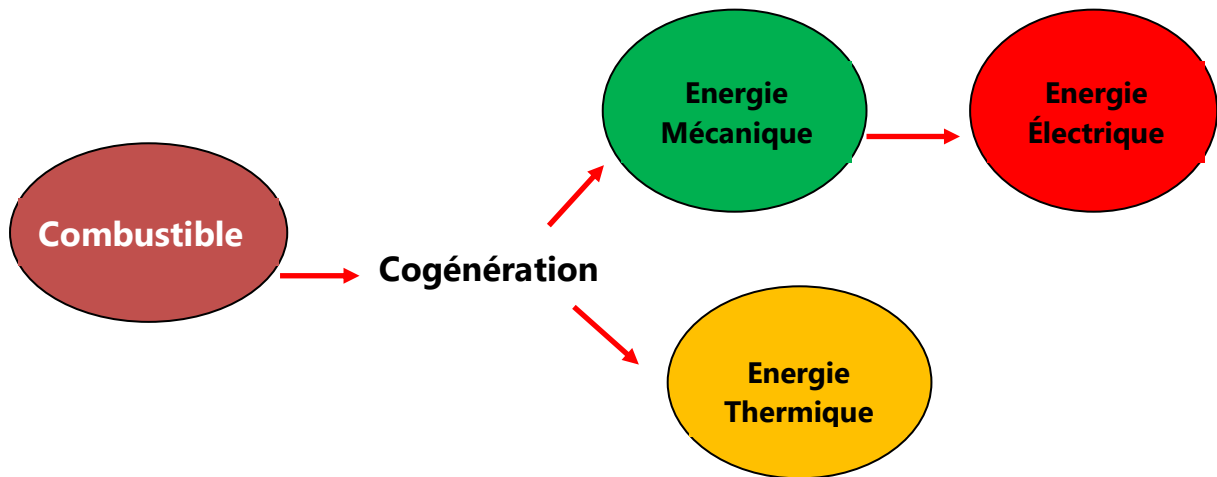


Figure 2.6. Principe de la cogénération

L'exploitation de la chaleur des gaz d'échappement et de l'eau de refroidissement permet la production d'eau chaude, qui est utilisée presque dans divers domaines, qu'ils soient industriels ou autres

2.6.1 Fonctionnement d'une installation de cogénération [32]

- ★ **La production d'énergie thermique :** La production d'énergie thermique dans une installation de cogénération consiste à alimenter l'installation avec un combustible, qui peut être du gaz naturel, de la biomasse, du biogaz ou un autre type de combustible en fonction des spécificités de l'installation. Ce combustible est ensuite brûlé dans une chambre de combustion pour libérer de l'énergie sous forme de chaleur.
- ★ **La génération d'énergie électrique :** La chaleur dégagée à cause de la combustion du combustible est utilisée pour chauffer de l'eau et la transformer en vapeur d'eau à haute pression. Cette vapeur est ensuite acheminée vers une turbine à vapeur. La force de la vapeur en mouvement entraîne la rotation de la turbine, qui est couplée à un alternateur électrique. La rotation de la turbine génère de l'électricité grâce à

l'alternateur qui est ensuite distribuée sur le réseau électrique ou utilisée localement.

- ★ **La récupération de la chaleur :** Après avoir traversé la turbine, la vapeur d'eau doit être refroidie et condensée pour être employée dans la création d'énergie.. C'est ici que la cogénération se distingue des centrales électriques traditionnelles : la chaleur résiduelle, qui serait normalement perdue sous forme de chaleur inutilisée dans une centrale électrique classique, est récupérée grâce à un échangeur de chaleur.
- ★ **Utilisation de la chaleur récupérée :** La chaleur récupérée grâce au récupérateur de chaleur peut être utilisée de diverses manières, en fonction des besoins spécifiques de l'installation et de son environnement. Parmi les utilisations possibles, on trouve : Le chauffage de bâtiments, tels que des habitations, des bureaux, ou des installations industrielles, la production d'eau chaude sanitaire. le chauffage de serres dans le secteur agricole, la production de froid grâce à des machines frigorifiques à absorption, pour des besoins de climatisation ou de réfrigération.

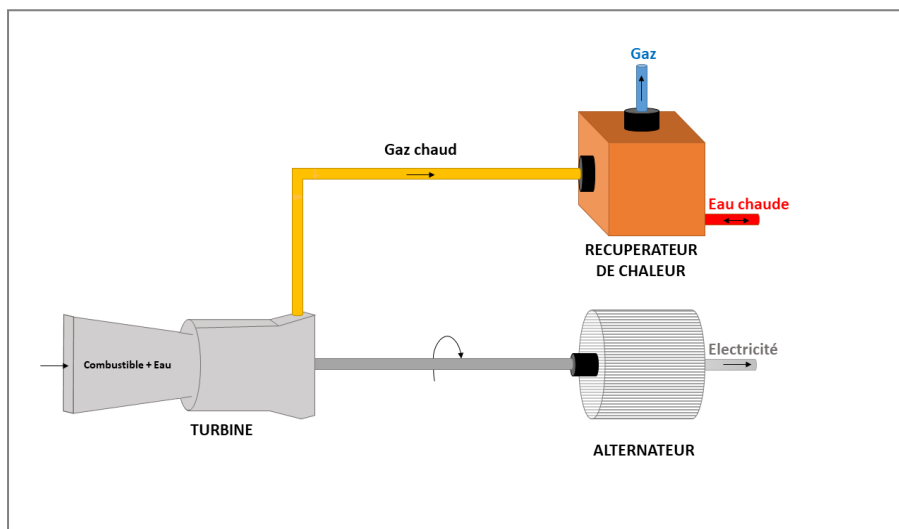


Figure 2.7. Système de cogénération

2.6.2 Le rendement énergétique de la cogénération

Le rendement énergétique de la cogénération se mesure par son efficacité à générer simultanément de la chaleur et de l'électricité à partir d'une seule source d'énergie, qu'il

s'agisse de combustibles fossiles ou renouvelables. Il est déterminé en comparant la production totale d'énergie à la consommation d'énergie nécessaire pour le processus. Cette approche vise à optimiser l'utilisation des ressources et à minimiser les pertes d'énergie, offrant ainsi une solution à la fois écologique et économique.

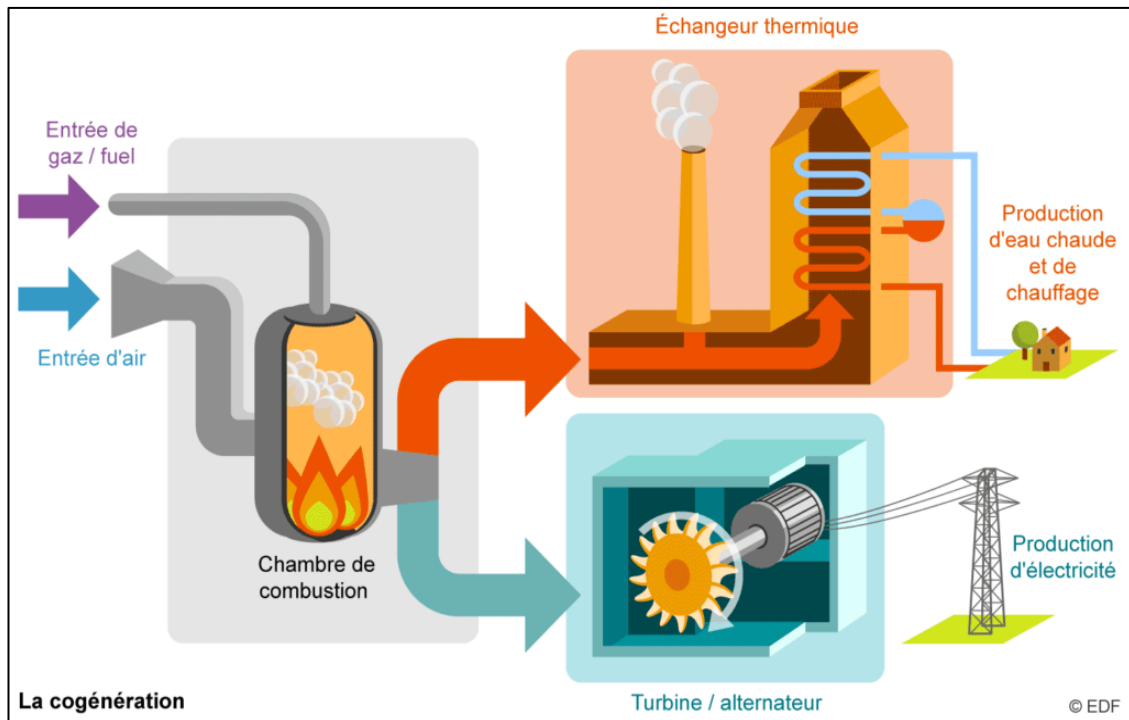


Figure 2.8. Exemple sur la cogénération

2.7. Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre est de définir les échangeurs de chaleur et son mécanisme de fonctionnement, avec ses différents types et domaines d'utilisation. La fonction principale de l'échangeur de chaleur consiste à transférer la chaleur d'un milieu à un autre sans les mélanger dans le but de chauffer ou de refroidir.

Il en existe trois méthodes différentes permettent le transfert de chaleur. (Conduction, Convection, Rayonnement). Nous avons étudié chaque mécanisme individuellement, car chaque mode a une formule spécifique pour le transfert de chaleur.

Tout cela consiste finalement à travailler avec la technologie de cogénération, qui nous aide à récupérer chaleur produite par différents moteurs et à la convertir en énergie mécanique ou électrique. Ainsi, nous avons pu comprendre les principes de la cogénération et son rendement et les éléments caractéristiques de ce système de cogénération.

CHAPITRE 3

Analyse de la quantité de chaleur récupérable dans un MCI

3.1 Introduction

Cette section présente une analyse sur de la capacité de récupération de chaleur dans les moteurs à combustion interne, en mettant l'accent sur les possibilités offertes par les systèmes de refroidissement par air. Alors que les moteurs à combustion interne restent largement employés dans différents secteurs industriels et des transports, il est devenu essentiel d'améliorer leurs performances globales. Une approche prometteuse pour améliorer son efficacité consiste à récupérer la chaleur perdue générée par le moteur et de la réutiliser de manière efficace. Dans ce chapitre, nous examinerons les techniques et les instruments qui permettent d'évaluer de manière précise la chaleur récupérable dans les systèmes de refroidissement par air des moteurs à combustion interne.

3.2 Mise en Place du Système

3.2.1 Concepts de base

Dans cette section, nous présenterons l'ensemble du système et son fonctionnement. Tout d'abord, il faut souligner l'objectif principal de ce système, qui est de récupérer l'air chaud du système de refroidissement du moteur, qui à son tour est de l'énergie gaspillée, qui doit être exploitée à travers un système de conduits pour alimenter l'échangeur thermique en chaleur. Ce système peut être utilisé dans des régions éloignées sans électricité, telles que les régions montagneuses ou les sites isolés non raccordés au réseau. Il représente une solution écologique et économique pour répondre aux besoins énergétiques de ces zones. De plus, la récupération de chaleur des systèmes de refroidissement de l'air contribue à réduire la dépendance à l'égard de sources d'énergie non renouvelables. De plus, la structure modulaire de ce système facilite son installation et sa maintenance, ce qui en fait une option séduisante pour les communautés éloignées qui aspirent à une autonomie énergétique. Finalement, cette approche novatrice propose une occasion de diminuer les dépenses énergétiques et d'améliorer la durabilité environnementale, prouvant ainsi son potentiel à être une solution pratique dans différents environnements.

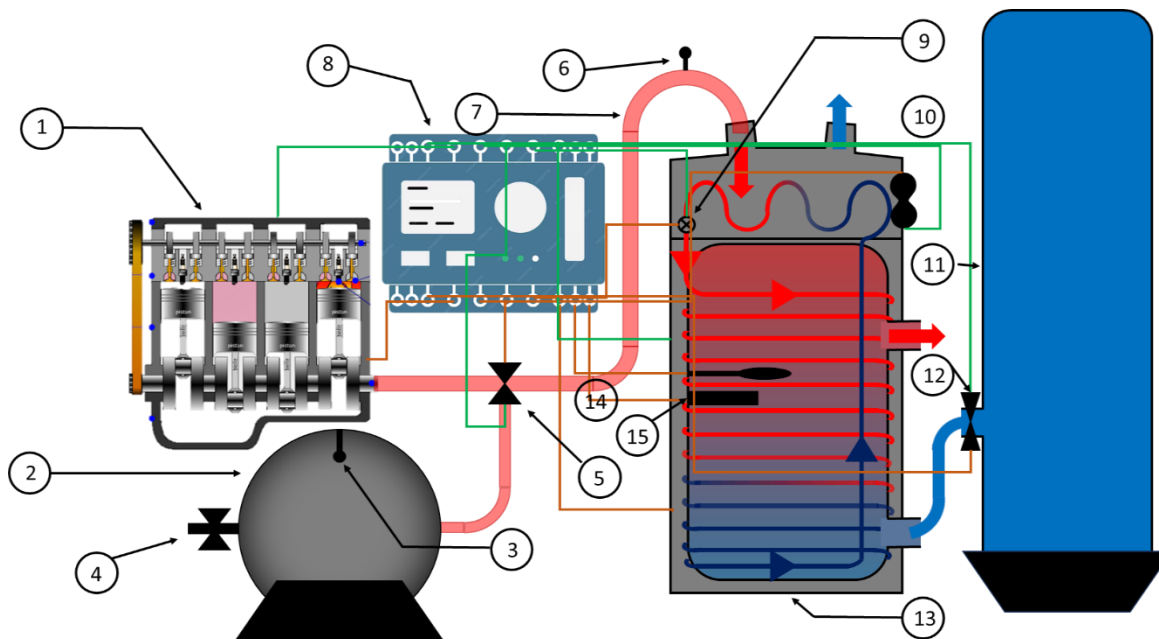


Figure 3.1 Système de récupération de chaleur

- | | |
|--|--|
| 1 : Moteur à combustion (générateur) | 8 : PLC |
| 2 : réservoir pour stocker la chaleur | 9 : compresseur |
| 3 : capteur de pression | 10 : ventilateur |
| 4 : vanne de évacuation (V2) | 11 : réservoir d'eau |
| 5 : vanne (V1) | 12 : vanne manuelle (V3) |
| 6 : capteur de gaz | 13 : échangeur de chaleur thermodynamique |
| 7 : tube de transfert de chaleur | 14 : capteur de température |
| 15 : capteur de niveau | |

3.2.2 Flux d'air

3.2.2.1 Ventilateur d'air

Le rôle principal d'un ventilateur est de débiter un volume d'air sous une certaine pression.

Caractéristique :

Q : Le débit

D : Le diamètre

ω : La vitesse angulaire de rotation du ventilateur

A : la section transversale

V : La vitesse d'air à la sortie

P_d : Les pertes de charges dynamiques

P_s : Les pertes de charges statiques

Nous prenons un cas dans la réalité d'un moteur à combustion interne de la marque Deutz F4L912 avec des dimensions réelles. En utilisant un moteur à combustion réel avec ses dimensions authentiques, nous nous assurons que nos résultats et nos conclusions sont ancrés dans la réalité et peuvent être extrapolés à des applications du monde réel.



Figure 3.2 système de refroidissement



Figure 3.3 Ventilateur

Type	Valeur
Puissance	35 KW
Vitesse de rotation en régime	500 tr /mi
Température de la culasse	573.15 K
Diamètre de la poulie motrice	15 cm
Diamètre de la poulie réceptrice (ventilateur)	23 cm
Langueur du cylindre canalisation	52 cm

Tableau 3.1 Caractéristique du moteur DEUTZ F4L912 [31]

- Caractéristique d'air en condition standard

($t = 25\text{ °C}$, $p = 1013,25\text{ hpa}$)

Type	Valeur
La densité ρ	1.225 Kg /m^3
La viscosité d'air μ	$1.81 \times 10^{-5}\text{ Pa}$
Le coefficient C	0.4
Le coefficient m	0.6
Le coefficient n	0.4
La conductivité thermique k	0.0257 w / (m.k)
La viscosité cinématique ν	$15 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$
La diffusivité thermique α	$24 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$

Tableau 3.2 Caractéristique d'air en condition standard

3.2.2.2 Le débit d'air

Pour calculer le débit d'air réalisé par un ventilateur circulaire on a besoin de plusieurs paramètres tel que la vitesse de rotation du ventilateur, la géométrie du ventilateur

Débit d'air = Section transversale \times Vitesse de l'air à la sortie

$$Q = A \times V \quad (3.1)$$

3.2.2.3 Calcule de la section transversale

La section transversale peut être déterminée en appliquant la formule pour calculer l'aire d'un cercle :

$$A = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (3.2)$$

$$d = 0.23\text{ m} \text{ donc } A = 0.041\text{ m}^2$$

3.2.2.4 Calcule de Vitesse de l'air à la sortie

Pour déterminer la vitesse de l'air à la sortie du ventilateur, il est possible d'utiliser la corrélation entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales du ventilateur et la vitesse de rotation du ventilateur (RPM). Cette corrélation est influencée par la géométrie du ventilateur et son mode de fonctionnement [17].

3.2.2.5 La circonférence de l'extrémité des pales

La circonférence de l'extrémité des pales est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$C = 2\pi \times R \quad (3.3)$$

Avec C est la circonférence de l'extrémité des pales et R est le rayon, $R = 11.5$ cm donc :

$$C = 72 \text{ cm}$$

3.2.2.6 La vitesse de rotation du ventilateur

Pour calculer la vitesse de rotation du ventilateur en utilise le rapport de transmission

$$r = \frac{N_2}{N_1} = \frac{d_1}{d_2} \quad (3.4)$$

Avec :

r : Le rapport de transmission (tr / min)

N_2 : Vitesse de rotation de l'arbre moteur (tr / min)

N_1 : vitesse de rotation de l'arbre récepteur

d_1 : Diamètre de la poulie motrice (mm)

d_2 : Diamètre de la poulie réceptrice (ventilateur) (mm)

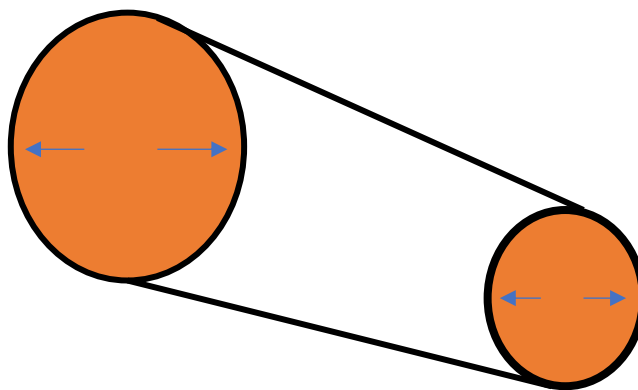


Figure 3.4. Transmission par courroie

La vitesse de rotation de l'arbre récepteur $N_1 = 500$ (tr / min) et le diamètre de la poulie motrice $d_1 = 15$ cm ,

La vitesse de rotation du ventilateur est de : $N_2 = 326$ tr/min

Il faut convertir la vitesse de rotation du ventilateur en mètres par seconde pour calculer la vitesse d'air :

$$\omega = \frac{2\pi \times N_2}{60} \quad , \text{ avec } \omega : \text{ la vitesse de rotation du ventilateur (rad /s)}$$

$$\omega = 34 \text{ rad/s}$$

➤ Calcule de la vitesse d'air à la sortie V

$$V = \frac{\omega}{c} \quad (3.5)$$

$$V = 47,2 \text{ m/s}$$

D'après les résultats précédentes en peut calculer le débit d'air Q

$$Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$$

Nous pouvons conclure que le ventilateur peut déplacer 2 mètres cubes d'air chaque seconde.

3.2.3 Taux de transfert de chaleur

Selon la loi de refroidissement de Newton Le taux de transfert de chaleur entre un fluide (comme l'air) et une surface est directement proportionnel à la différence de température entre le fluide et la surface. En termes mathématiques, cette relation peut être représentée par l'équation suivante :

$$Q = h \times A \times \Delta T \quad (3.6)$$

- Q : est le taux de transfert de chaleur (w)
- h : est le coefficient de transfert de chaleur convectif ($w/(m^2 \cdot K)$)
- A : est la surface de contact entre le fluide et la surface (m^2)
- ΔT : est la différence de température entre le fluide et la surface (K)

3.2.4 Le coefficient de transfert de chaleur convectif

Pour déterminer le coefficient de transfert de chaleur convectif (h), il faut choisir une corrélation empirique plus des paramètres spécifiques de notre système, tels que la vitesse de l'air, la température de la surface. Car le type de transféré de chaleur est un convection forcée autour de surfaces cylindriques en utilise La corrélation de Churchill-Bernstein et dans les cas des refroidissement d'air l'écoulement est turbulents dans les conduits donc :

$$h = \frac{k}{D} \times N_{UD} \quad (3.7)$$

Avec

- N_{UD} : Nombre de Nusselt (adimensionnel).
- K : Conductivité thermique du fluide ($W/m \cdot K$).
- D : Diamètre caractéristique du cylindre (m)

À température ambiante, la conductivité thermique de l'air change légèrement avec les changements de température et de pression. À pression normale et à une température de 25°C, la conductivité thermique de l'air est généralement d'environ 0,0257 ($W/m \cdot K$) [15] et le diamètre est de 0.23 m donc on peut déterminer le nombre de Nusselt N_{UD} .

$$N_{UD} = c \times Re^m \times Pr^n \quad (3.8)$$

- N_{UD} : est le nombre de Nusselt pour la convection autour du cylindre (adimensionnel).
- Re : est le nombre de Reynolds basé sur le diamètre du cylindre.
- Pr : est le nombre de Prandtl du fluide.(d'air)
- C , m , et n : sont des coefficients empiriques dépendants des conditions spécifiques de l'écoulement et du fluide.

Dans la relation Churchill-Bernstein, le symbole C désigne un coefficient pratique qui varie en fonction des conditions spécifiques d'écoulement et du fluide. Ce coefficient est employé pour ajuster la relation en tenant compte des particularités de l'écoulement près du cylindre. Pour un écoulement turbulent autour d'un cylindre:

- C varie généralement entre 0.2 et 0.4, selon le régime d'écoulement et la rugosité de la surface [16].
- Dans le contexte d'un flux d'air turbulent, les valeurs habituelles du coefficient m dans la corrélation de Churchill-Bernstein sont généralement observées dans une fourchette allant de 0,35 et 0,40 [17].

3.2.4.1 Le nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est représenté par l'équation suivant :

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} \quad (3.9)$$

Avec

ρ : La masse volumique d'air (kg/m^3),

V : La vitesse du fluide par rapport à l'objet (m/s),

D : Le diamètre caractéristique du cylindre (m),

μ : La viscosité dynamique d'air ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

D'après les données précédentes le calcul de Re donne $Re = 734729$

3.2.4.2 Le nombre de Prandtl

Le nombre de Prandtl est représenté par l'équation suivant :

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.10)$$

ν : est la viscosité cinématique d'air (m^2/s).

α : est la diffusivité thermique d'air (m^2/s)

Le nombre de Prandtl est $Pr = 0.63$, et par la suite on peut calculer le nombre de Nusselt: $N_{UD} = 1100$

Cela signifie que le coefficient de transfert de chaleur convectif (h) égale :

$$h = 131.5 \text{ w}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$$

3.2.4.3 La surface de contact A

Pour déterminer la surface de contact A il faut calculer le volume de cylindre canalisation :

$$A = \pi \times r^2 \times h \quad (3.11)$$

Avec : r : rayon de cylindre (m)

h : longueur de cylindre (m)

La surface de contact est $A = 0.022 \text{ m}^3$

3.2.4.4 La différence de température ΔT

$T_{\text{sortie}} = 573.15 \text{ K}$ (Température de la culasse en régime)

$T_{\text{entree}} = 298.15 \text{ K}$ (Température ambiante d'air)

Donc $\Delta T = 275 \text{ K}$

D'après les résultats précédents on peut calculer le taux de transfert de chaleur Q

$$Q = 795 \text{ w}$$

Le fait que notre système affiche un transfert de chaleur de 795 watts souligne une capacité thermique remarquable. Cette observation revêt une importance capitale car elle témoigne de l'efficacité adéquate du processus de transfert thermique.

3.2.5 Les pertes de charges (ΔP_t)

Le système de transport d'air par canalisation contient 3 couds avec une longueur de 6 m et un diamètre de 23 cm.

$$\Delta P_t = P_d + P_s \quad (3.12)$$

Avec :

P_d : Les pertes dynamiques (Pa)

P_s : Les pertes statiques (Pa)

3.2.5.1 Calcul des pertes dynamiques

$$P_d = \frac{\rho \times V^2}{2} \quad (\text{energie cinétique}) \quad (3.13)$$

Avec ρ : La masse volumique d'air (kg/m^3), V : La vitesse d'air (m/s)

$$P_d = 1364.5 \text{ Pa}$$

3.2.5.2 Calcul des pertes statiques

$$P_s = d_L + d_S \quad (3.14)$$

Avec :

d_L : Les pertes linéaires (Pa)

d_S : Les pertes singulières (Pa)

3.2.5.3 Calcul des pertes de charge linéaires

$$d_L = \lambda \times \frac{L}{D} \times P_d \quad (3.15)$$

L'équation $\lambda = 0.316 \times Re^{-0.25}$ est souvent employée pour estimer le coefficient de perte (λ) dans certains types de conduites. Elle repose sur des recherches empiriques et principalement appliquée aux tuyaux de diamètre moins élevé lorsque le flux est turbulent. Le coefficient de perte ($\lambda = 0.01$) et les pertes de charge linéaires et $d_L = 30.8 \text{ Pa}$

3.2.5.4 Calcul des pertes singulières

$$d_S = k \times \frac{v^2}{2g} \times 3 \quad (3.16)$$

d_S : La perte de charge singulière (Pa)

k : Le coefficient de perte de charge associé au coude

v : La vitesse de l'écoulement (m / s)

g : L'accélération due à la gravité (m / s²)

Dans une canalisation, un coude standard à un angle de 90 degrés pourrait présenter un coefficient de perte de charge K estimé entre 0,3 et 0,5 [18]. En va prendre la moyenne 0.4 et avec un nombre de coude égale 3 :

$$d_S = 136.2 \text{ Pa}$$

Selon l'équation (3.14) : $P_s = 167 \text{ Pa}$

D'après les résultats obtenus et l'équation (3.12) les pertes de charges totales ΔP_t sont données par : $\Delta P_t = 1531.5 \text{ Pa}$

L'analyse des pertes de charge dans le système a permis de déterminer que les pertes totales sont de **1531.5 Pa**. Cette mesure est conforme aux prévisions générales pour un coude standard de 90 degrés, avec un coefficient de perte de charge K estimé à 0.4. Par conséquent, nous pouvons conclure que les pertes de charge observées dans le système sont en accord avec les prévisions théoriques, ce qui confirme la validité des modèles de calcul utilisés dans notre analyse.

3.2.6 La puissance aéraulique

Il est essentiel de prendre en considération la puissance aéraulique lors de la planification et de l'utilisation des équipements de ventilation et de climatisation. Une circulation de l'air efficace peut significativement améliorer les performances globales du système tout en réduisant la consommation énergétique. Pour détermine la puissance aéraulique en utilise la relation :

$$P_{aér} = Q \times \Delta P_t \quad (3.17)$$

Avec :

$P_{aér}$: La puissance aéraulique (w)

Q : Débit d'air (L/ s)

ΔP_t : Les pertes de charge totales (Pa)

La puissance aéraulique est : $P_{aér} = 1217 W$

3.3. Quantité de chaleur récupérable

Suite à une analyse minutieuse, incluant des calculs précis et une évaluation détaillée des performances du système, nous avons obtenu un taux de transfert de chaleur de **795 watts**. Cette évaluation met en évidence la capacité du système à transmettre de manière efficace cette quantité de chaleur à l'échangeur thermique, De plus, la perte de charge nominale est de **1531.5 Pa**, ce qui est un indicateur important de la fluidité de la circulation de l'air du système. Une perte de pression excessive peut affecter l'efficacité globale du système.

$$QCR (\%) = \frac{Q}{P_{total}} \times 100 \quad (3.18)$$

La chaleur récupérable de notre système, évaluée à 795 watts, constitue environ **65 %** de la puissance totale de **1217 Watts**. Cela démontre la possibilité de capter une grande partie de l'énergie thermique perdue. Il est possible d'augmenter cette récupération de chaleur en optimisant et en améliorant le système, ce qui pourrait améliorer l'efficacité énergétique globale du système.

3.4. Le stockage d'air

Dans cette partie nous présenterons le système utilisé pour stocker l'air chaud récupéré. Le réservoir de stockage est équipé d'une excellente isolation pour minimiser les pertes de chaleur lors du piégeage de l'air chaud. Cette isolation peut être réalisée à l'aide de matériaux isolants extrêmement performants et placés le long des parois intérieures du réservoir. Des conduites adaptées sont utilisées pour conduire l'air chaud de la source de chaleur vers le réservoir isolé.

L'air chaud est conservé dans le réservoir jusqu'à ce qu'il soit nécessaire pour le chauffage des bâtiments, la production d'électricité ou d'autres processus qui nécessitent de la chaleur.



Figure 3.5 Cuves et réservoirs d'air comprimé [22].

3.5 L'automate programmable industriel (API)

Dans cette section nous avons présenté la partie automate et le langage de programmation utilisé. Selon l'analyse structurelle, il est possible de diviser tout système automatisé en trois parties principales :

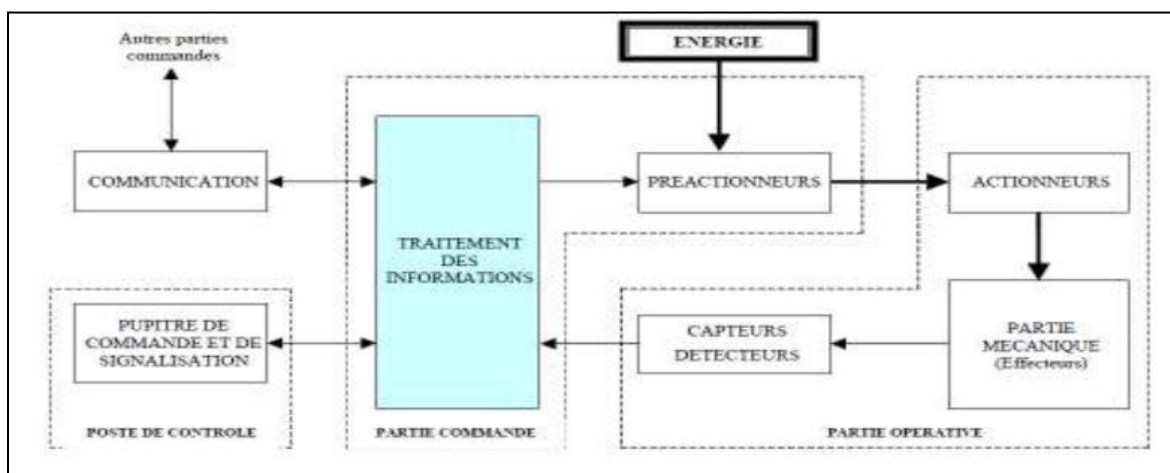


Figure 3.6 Structure de système automatisé [23].

➤ La partie opérative (PO)

La partie puissance, également connue sous le nom de partie visible du système, est responsable de la transformation de la matière d'œuvre entrante. Les éléments mécaniques, les actionneurs (vérins, moteurs), les pré-actionneurs (distributeurs et contacteurs) et les éléments de détection (capteurs, détecteurs) constituent son ensemble. Il est essentiel de fournir l'énergie (électrique, pneumatique et hydraulique) à la PO afin de réaliser les mouvements.

- **Les actionneurs**

Il s'agit d'un composant de la partie opérative qui reçoit une énergie "transportable" afin de la convertir en énergie "utilisable" grâce au système. Ils mettent en œuvre les instructions obtenues en intervenant sur le système ou son environnement. Un actionneur est un dispositif qui utilise de l'énergie comme matière d'œuvre et dont le but est de la convertir en énergie.

Ces actionneurs font partie de trois technologies différentes :

- a) Contacteurs pour moteurs électriques.
- b) Variateurs de vitesse pour moteurs électriques.
- c) Distributeurs pour vérins pneumatiques ou hydrauliques.

- **Les capteurs**

Les Capteurs offrent la possibilité de collecter des informations sur l'état de la matière d'œuvre et son évolution dans la partie opérative. Ils sont capables de repérer des phénomènes physiques dans leur environnement (déplacement, présence, chaleur, lumière, pression...), puis de convertir ces informations en une information codée qui peut être comprise par la partie de commande. Cela conduit à la conversion des variations des grandeurs physiques associées au fonctionnement de l'automatisme en signaux électriques par les capteurs.

- **La partie commande (PC)**

Elle transmet les instructions de fonctionnement à l'équipe opérationnelle. La commande des actionneurs est assurée par les pré-actionneurs, qui assurent le transfert d'énergie entre la source de puissance (réseau électrique, pneumatique...) et les actionneurs.

Le module de traitement des informations commande ensuite ces pré-actionneurs.

Le pupitre de commande (opérateur) lui transmet les instructions et les données de

La partie opérative transmises par les capteurs/détecteurs.

Selon ces instructions et son logiciel de gestion des tâches (intégré dans un automate programmable ou réalisé par des relais (on parle de logique câblée), elle va gérer les pré-

actionneurs et transmettre des informations au pupitre de signalisation ou à d'autres systèmes de commande et/ou de supervision.

➤ **Poste de contrôle**

Conçu à partir de pupitres de commande et de signalisation, il offre à l'opérateur la possibilité de contrôler le système (marche, arrêt, départ du cycle...). Il offre aussi la possibilité de voir les divers états du système en utilisant des voyants, un terminal de dialogue ou une interface homme-machine (IHM) [23].

3.6 L'automatisation de système

3.6.1 Cahier de charge

3.6.1.1 Contexte et Objectifs

- **Contexte** : Récupération de la chaleur perdue d'un groupe électrogène (moteur) pour chauffer de l'eau.
- **Objectifs** : Automatiser le transfert de chaleur, la gestion de la température et la pression dans les réservoirs.

3.6.2 Description du Système Actuel

3.6.2.1 Composants principaux :

- ✓ Groupe électrogène (moteur)
- ✓ Échangeur de chaleur thermodynamique
- ✓ Ventilateur
- ✓ Compresseur
- ✓ Réservoir (de l'échangeur, stockage de la chaleur, d'eau)
- ✓ Capteurs (gaz, température, niveau d'eau, pression, moteur)
- ✓ Vannes (V1, V2, V3)
- ✓ PLC (Automate Programmable Industriel)

3.6.2.2 Fonctionnalités Attendues

- ✓ Démarrage automatique du moteur et transfert de chaleur.
- ✓ Activation automatique du ventilateur et du compresseur.
- ✓ Gestion de la température de l'eau dans l'échangeur.
- ✓ Gestion de la pression et du stockage de chaleur dans le réservoir secondaire.

3.6.3 Exigences Techniques

3.6.3.1 Matérielles

- ✓ Moteur avec bouton-poussoir de démarrage.
- ✓ Capteurs : gaz, température, niveau d'eau, pression, moteur.
- ✓ Vannes électromécaniques (V1, V2, V3).
- ✓ Ventilateur et compresseur.
- ✓ PLC pour le contrôle et l'automatisation.

3.6.3.2 Logiciels

- ✓ Logiciel de programmation PLC.
- ✓ Interfaces HMI pour surveillance et contrôle.

3.6.4 Interface Utilisateur

- ✓ Tableau de commande avec bouton-poussoir pour démarrage/arrêt manuel.
- ✓ Écran de contrôle pour visualisation des paramètres (température, niveau d'eau, pression).

3.6.5 Sécurité

- ✓ Systèmes de détection et d'alarme pour surchauffe et surpression.
- ✓ Mécanismes de coupure automatique en cas de détection d'anomalie.

3.7. GRAFCET Détaillé

3.7.1 Tables des entrées et des sorties

Composons	Désignations
Dcy :	Bouton-poussoir de démarrage du moteur
Cg :	Capteur de gaz.
Ct :	Capteur de température
Cn :	Capteur de niveau d'eau.
Cp):	Capteur de pression (réservoir de stockage de chaleur).
m1 :	Capteur pour détection le démarrage de moteur
DM :	Démarrage du moteur.
AV :	Activation du ventilateur
AC :	Activation du compresseur.
OV1 :	Ouverture de la vanne V1.
OV2 :	Ouverture de la vanne V2.
OV3 :	Ouverture de la vanne V3.

Tableau 3.3 Les entrées et les sorties de système

3.7.2 Étapes et Transitions

Nous pouvons structurer les différentes étapes et transitions de notre système grâce à TIA Portal. Par exemple, détection de l'activation du moteur dès que le capteur de gaz détecte de l'air chaud, le ventilateur et le compresseur s'activent automatiquement. Chaque étape, de la détection initiale jusqu'à la régulation de la température et de la pression, a été programmée pour réagir précisément aux signaux des capteurs. Cela garantit que le système réagit rapidement et correctement à toute variation.

3.7.3 Schéma GRAFCET

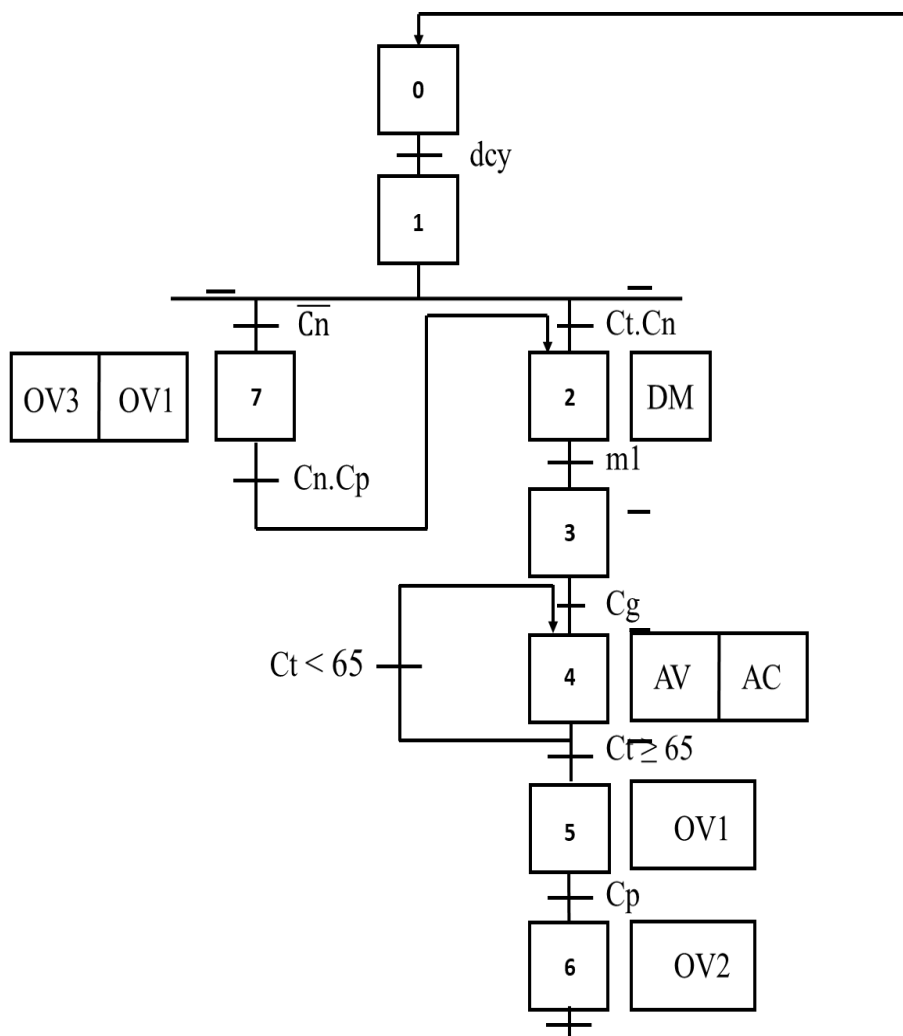


Figure 3.7 schéma Grafcet

3.8 La partie programmation sur TIA PORTAL

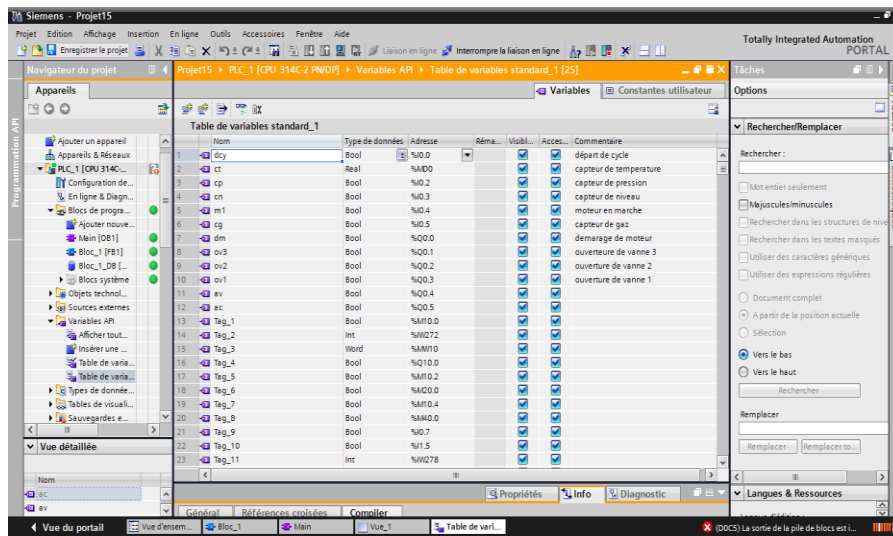


Figure 3.8 : La table des variables sous Tia portal

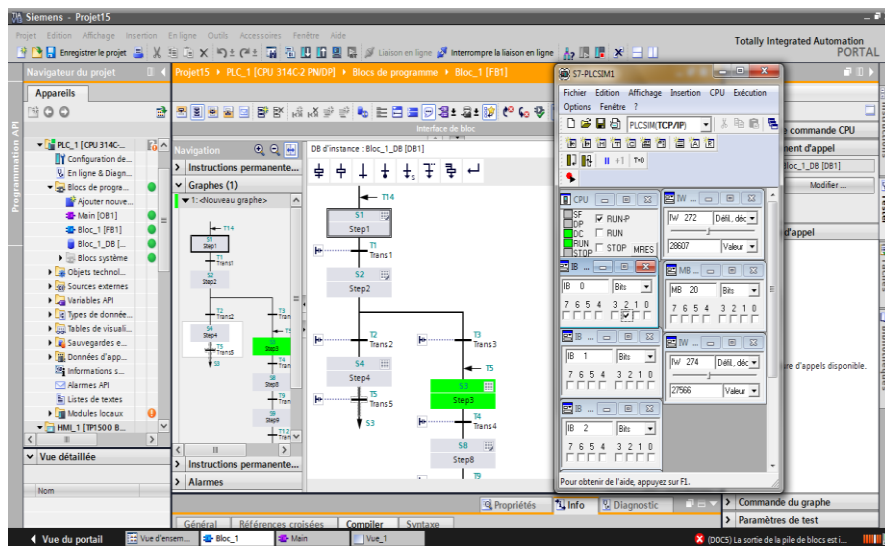


Figure 3.9 Grafcet avec le Plc Sim en mode run

- On a utilisée deux langage de programmation ladder sous le bloc ob 1 et grafcet sous le bloc fb1

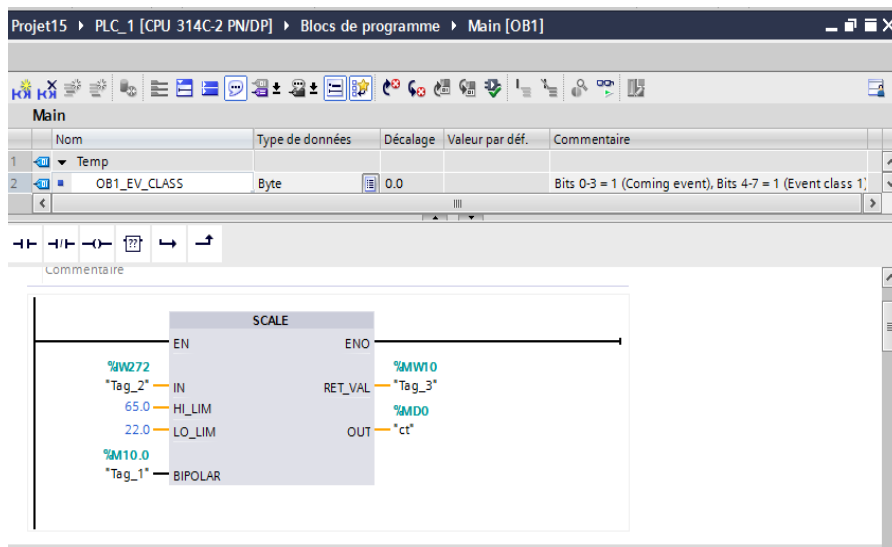


Figure 3.10

Bloc1 : on a utilisée scale pour commander la variation de température sachant que la température est variée entre 22c° et 65 c° (22c° la température initiale)

- Scale pour commander la variation de niveau d'eau dans le réservoir

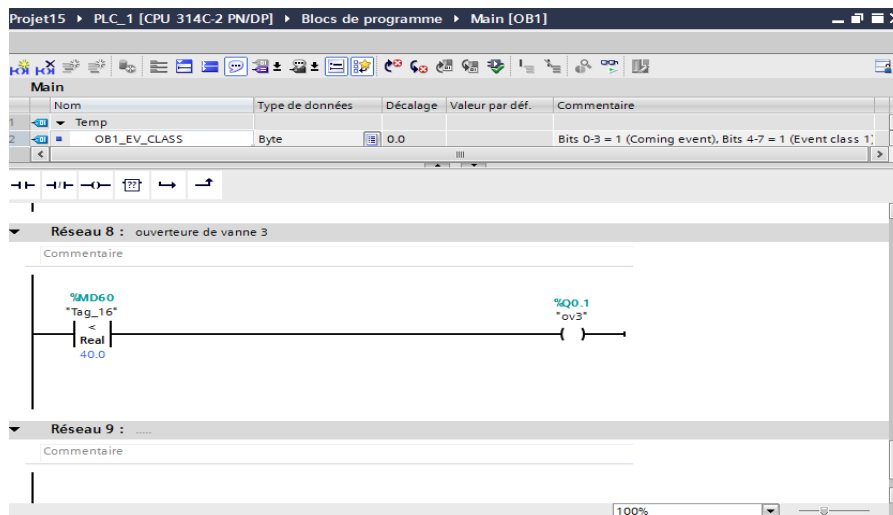


Figure 3.11

3.8.1 Simulation d'IHM

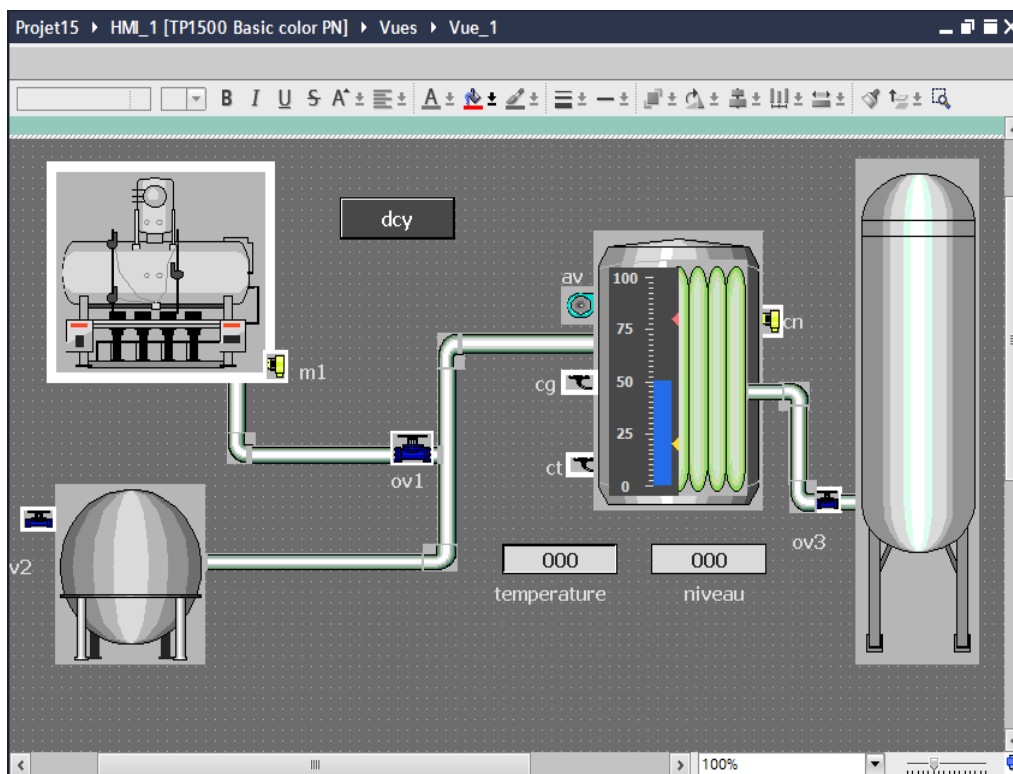


Figure 3.12 Ihm développé par logiciel TIA PORTAL

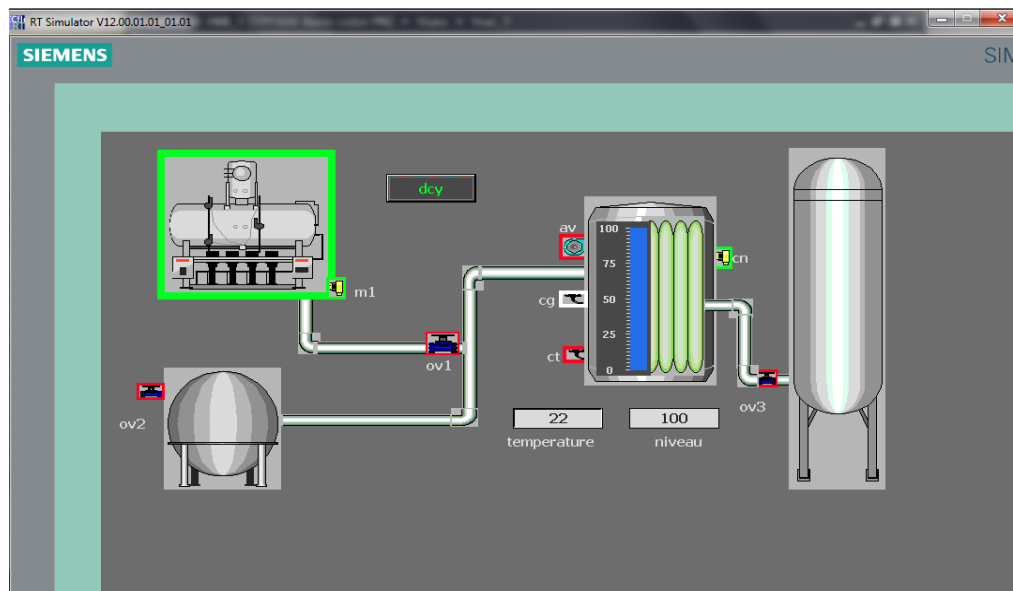


Figure 3.13 Ihm en mode Start

- Température initial 22 < au 65 donc ct désactivée

- Niveau d'eau 0 donc cn désactivée et donc la vanne 3 ouverte pour remplir le réservoir

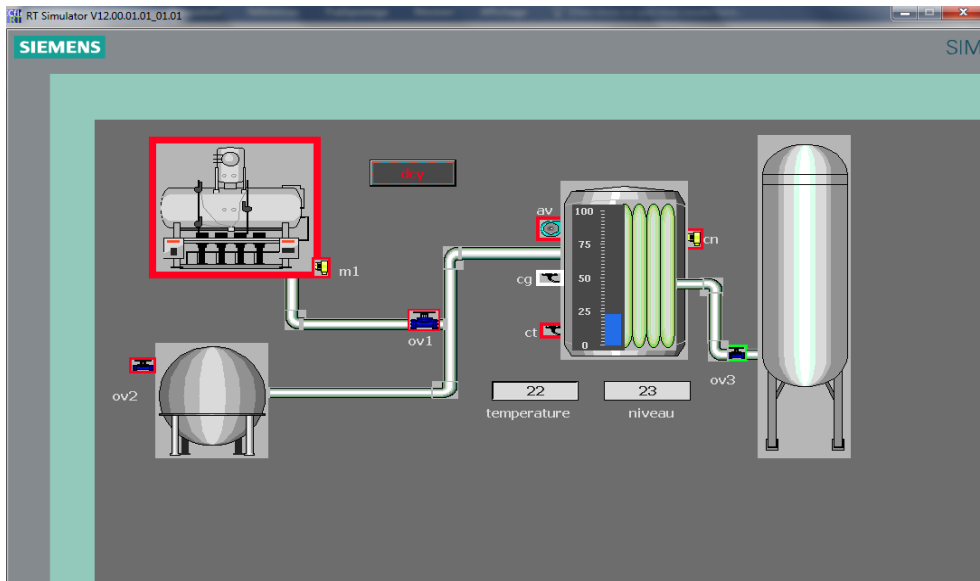


Figure 3.14 : Entrain de remplissage de réservoir

- Niveau plein cn active
- Température 22 ct désactivé
- Dm en marche m1 active

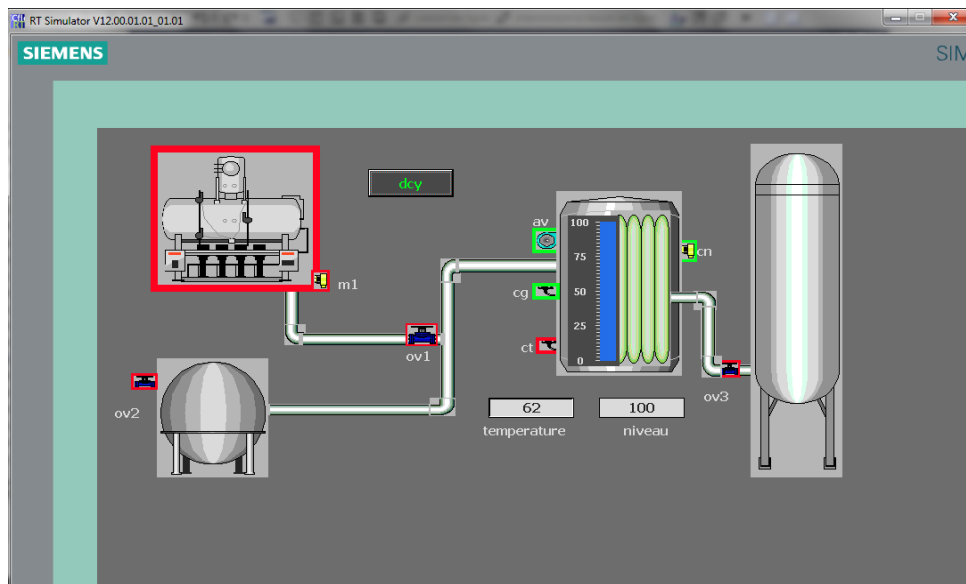


Figure 3.15

- Température augmente inférieur < 65 et cg active donc av et ac en marche

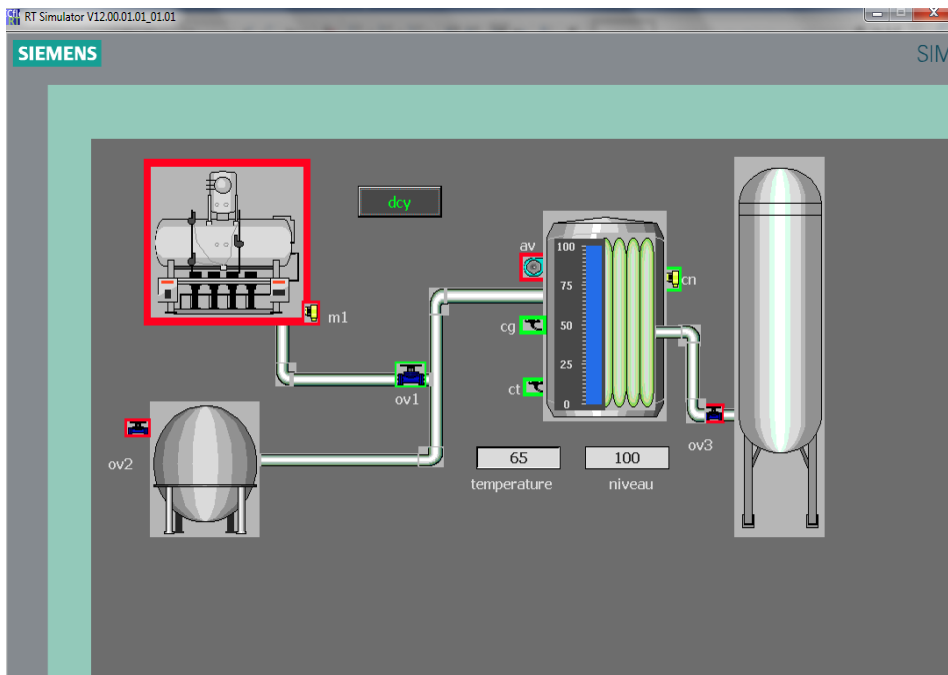


Figure 3.16

- Température = 65 ct active donc la vanne 1 ouverte
- Niveau de réservoir plein cn active

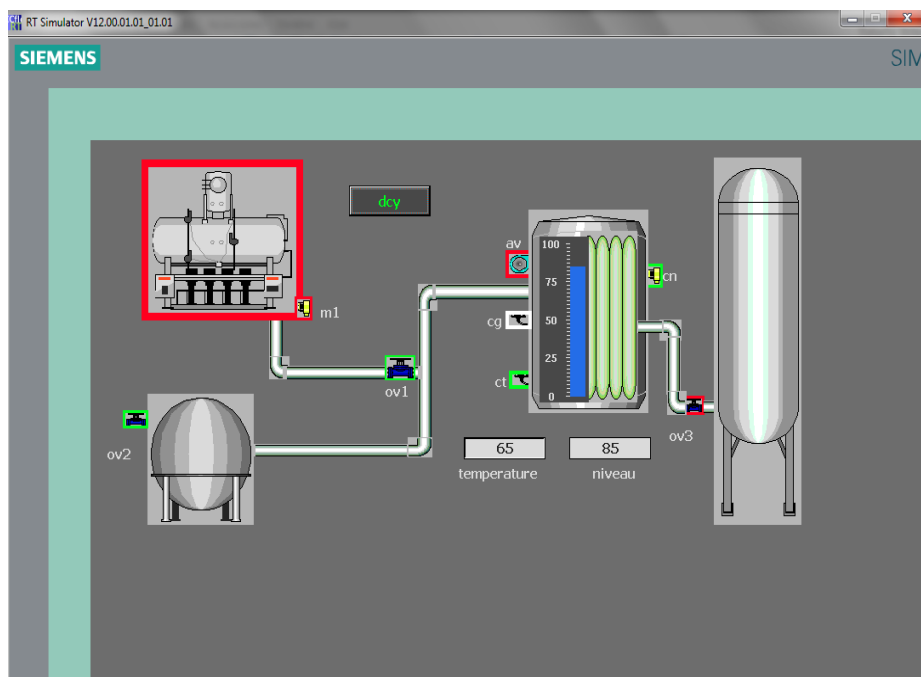


Figure 3.17

- Cp active donc la vanne 1 ouverte

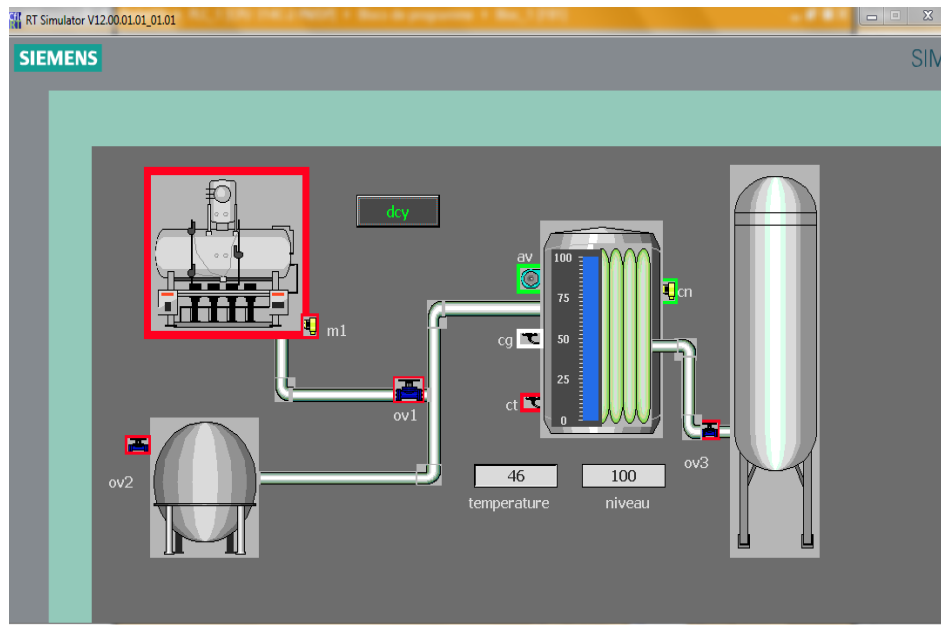


Figure 3.18

- Ihm en mode Start (dcy est renforcée) : Si la température inférieure au 65 dans ce cas c'est 46 C° et le niveau de réservoir supérieur au 40 dans ce cas le niveau est 100% av fonctionnent

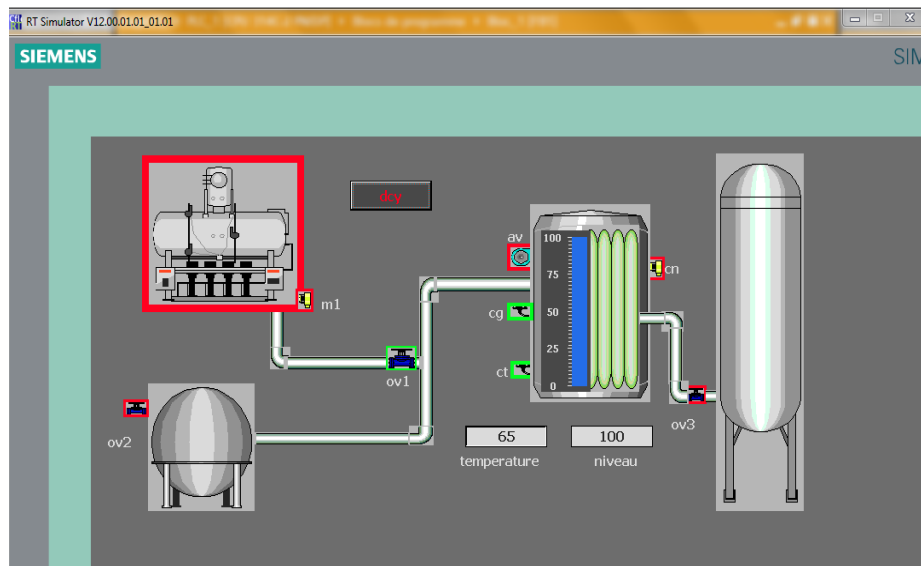


Figure 3.19 : Ihm en mode Start

- Le niveau est 100% Cn active
- La température égale 65 c° Ct active donc la vanne 1 ouverte

3.9. L'intérêt de ce Travail Réalisé avec TIA Portal et l'IHM

Dans ce travail, nous faisons appel à TIA Portal afin de programmer le GRAFCET et de créer l'IHM.

3.9.1 Automatisation avec TIA Portal

3.9.1.1 Programmation du GRAFCET :

Nous pouvons structurer les différentes étapes et transitions de notre système grâce à TIA Portal. Par exemple, détection de l'activation du moteur dès que le capteur de gaz détecte de l'air chaud, le ventilateur et le compresseur s'activent automatiquement. Chaque étape, de la détection initiale jusqu'à la régulation de la température et de la pression, a été programmée pour réagir précisément aux signaux des capteurs. Cela garantit que le système réagit rapidement et correctement à toute variation.

3.9.1.2 Intégration des Capteurs et Actionneurs :

Avec TIA Portal, l'intégration des capteurs (gaz, température, niveau d'eau, pression, et démarrage de moteur) et des actionneurs (ventilateur, compresseur, vannes) a été fluide. Le PLC peut ainsi communiquer efficacement avec tous ces composants, assurant un contrôle centralisé et cohérent du système.

3.9.2 Simulation et Interface Homme-Machine (IHM)

Créer l'IHM dans TIA Portal nous permis de rendre le système plus intuitif et interactif.

3.9.2.1 Interface Utilisateur :

L'IHM offre une interface claire où toutes les informations cruciales sont facilement accessibles. Les utilisateurs peuvent voir en temps réel les données de température, de niveau d'eau et de pression. Cela permet une surveillance continue du système, assurant que tout fonctionne comme prévu.

3.9.2.2 Notifications :

Les alarmes visuelles intégrées dans l'IHM sont essentielles pour la sécurité. En cas de détection de conditions anormales, comme une surchauffe ou une surpression aussi le niveau bas de l'eau, les opérateurs sont immédiatement alertés, permettant une intervention rapide.

3.9.2.3 Contrôle Manuel :

Bien que le système soit automatisé, l'IHM permet également un contrôle manuel. Cela offre une flexibilité supplémentaire, permettant aux opérateurs de prendre le relais en cas de besoin ou de faire des ajustements spécifiques.

3.9.3 Résumé

En résumé, travailler avec TIA Portal pour la programmation du GRAFCET et la création de l'IHM a été crucial pour le succès de ce projet. La plateforme a fourni les outils nécessaires pour une automatisation efficace et une interface utilisateur intuitive. La simulation dans l'IHM a permis de tester le système dans des conditions proches du réel, assurant ainsi que toutes les fonctionnalités répondent aux attentes. Cette approche intégrée non seulement elle a amélioré l'efficacité opérationnelle mais a également renforcé la sécurité et la facilité d'utilisation du système.

3.10 Conclusion

Après la description du système et l'étude de son fonctionnement, nous avons étudié l'automatisation du système à base de l'automate programmable industriel S7-300 pour la visualisation.

Dans ce chapitre, nous avons également élaboré une étude sur la supervision dont le but est de contrôler le déroulement du système. Cette étude nous a permis de mettre en place des outils de surveillance et de contrôle efficaces, assurant une gestion optimale et sécurisée du processus automatisé. Grâce à l'intégration de l'automate S7-300, nous avons pu améliorer la réactivité et la précision du système, réduisant ainsi les temps d'arrêt et les erreurs humaines.

De plus, l'utilisation de la supervision a permis de centraliser les informations pertinentes, facilitant ainsi la prise de décision rapide et informée par les opérateurs. Cette approche a non seulement optimisé le fonctionnement du système, mais a également renforcé la fiabilité et la robustesse de l'ensemble du processus.

En conclusion, l'automatisation et la supervision mises en place grâce à l'automate programmable industriel S7-300 ont démontré leur efficacité pour améliorer la performance globale du système. Ces améliorations ouvrent la voie à de futures optimisations et innovations dans le domaine de l'automatisation industrielle.

Conclusion générale

Ce projet nous a poussés à mobiliser l'ensemble de nos connaissances et compétences acquises tout au long de notre parcours universitaire. En affrontant les défis techniques et théoriques, nous avons pris conscience des obstacles quotidiens auxquels les ingénieurs sont confrontés dans leur travail. Cette étude sur la faisabilité de la récupération de l'énergie fatale dans MCI a été particulièrement instructive. Elle nous a incités à prendre des initiatives personnelles et à faire preuve de créativité pour proposer des solutions innovantes et efficaces. Les résultats obtenus ne sont pas seulement une validation de nos efforts, mais aussi une contribution significative à l'avancement et à l'optimisation des systèmes de récupération de chaleur fatale. Ces avancées ouvrent la voie à des pratiques industrielles plus durables et efficaces, alignées avec les objectifs contemporains de réduction de l'empreinte écologique.

Au-delà de l'étude théorique et pratique du système, nous avons également intégré une dimension d'automatisation en utilisant un automate programmable industriel S7-300. Grâce à l'outil de modélisation S7-GRAPH, nous avons pu concevoir des processus automatisés efficaces. La simulation effectuée avec le logiciel S7-PLCSIM nous avons eu l'opportunité de visualiser et confirmer la validité des résultats obtenus, garantissant ainsi la robustesse de nos solutions. Ce travail pratique a renforcé notre compréhension des systèmes automatisés et de leur application dans des contextes industriels réels.

Références bibliographiques

- [01] : H. M. Z, Thermo propulsion I.chapitre III- Moteurs thermiques.
- [02] : P. A, Moteurs alternatifs à combustion interne, Edition Masson, février 1987
- [03] : The Hands on Guide. (2001, January 1)
- [04] : Mahfoud Nadjiba thèse de magister ; modélisation thermodynamique d'un moteur à pistons : calcul des émissions de NOX. Université Constantine 2006
- [05] : Quelques caractéristiques techniques d'un groupe électrogène ! ", Site web "http://www.acheter-vendre-machines.fr/2008/05/quelques-caractristiques-techniquesdun.html", consulté le 14/04/2021 2:21pm
- [06] : Pierro, E. (2018). Moteur à combustion interne comprenant un circuit de refroidissement par liquide
- [07] : A. Riedacker et P. Girard : « Guide Biomasse Energie 2e Edition»
- [08] : A. Domingues et al. (2013). Analysis of vehicle exhaust waste heat recovery potential using a Rankine cycle. Energy 49, 71-85.
- [09] : A. MAHAMANE Valorisation des Rejets de Chaleur des Moteurs Diesel Marins, thèse de doctorat 2020-2021.
- [10] : O. BOUNEFOR ,Récupération de rejets thermiques dans les Moteurs à Combustion Interne, Rapport de la recherche bibliographique, 15 Décembre 2015.
- [11] : O. BULLIARD-SAURET, Étude expérimentale de l'intensification des transferts thermiques par les ultrasons en convection forcée, thèse doctorat, Juillet 2016.
- [12] : A. Sitraka, d'une centrale électrique a cogénération électrique électricité et chaleur a Madagascar, mémoire de fin d'étude , Aout 2006.
- [13] : S. Hemeir, Contribution à l'étude d'un capteur solaire plan à air destine aux applications de chauffage et de climatisations solaires, mémoire de Master, Université de Biskra, Juin 2012.
- [14] : N. BOULTIF, cours de 3ème année, Transfert de chaleur, (2017/2018).
- [15] : S.M.A.BEKKOUCHE, Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires, Université Abou- Bakr Belkaïd – Tlemcen, année (2008/2009).
- [16] : P.L Douglas, F.A. Dullien, & Spink, D.R. (1976). An investigation of the operating parameters of a low energy wet scrubber for fine particulates. Canadian Journal of Chemical Engineering, 54, 173-176
- [17] : Djanna, F., Rouger, N., Saury, D., Joubert, P., & Penot, F. (2023). Sensibilité de la stratification thermique de l'air à des conditions aux limites radiatives et à des variations géométriques dans une cavité en convection naturelle à haut nombre de

- Rayleigh. *Journal of Renewable Energy*.
- [18] : Graf, W.H., Ko, S.C., & Mansour, F. (1975). Drag coefficient of cylinders in turbulent flow; Drag coefficient and turbulence characteristics /S.C. Ko and W.H. Graf;
- [19] : Cleous, H.D., Christie, M.A., Moix, A., Smith, K.J., Roy, W., Clausen, E.C., & Martin, R.E. (2014). Transient Heating of Fins.
- [20] : Reiser, S., Horsch, M.T., & Hasse, H. (2015). Density of Methanolic Alkali Halide Salt Solutions by Experiment and Molecular Simulation. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 60, 1614-1628.

WEBOGRAPHIE

- [22] <http://www.edilivre.com/transferts-thermiques-cours-et-55-exercices-corrige>
- [23] <https://www.thomasnet.com/articles/process-equipment/all-about-air-to-air-heat-exchangers-what-you-need-to-know/>
- [24] <https://www.pre-heat.com/blog/types-air-to-air-heat-exchangers/>
- [25] <https://www.thermex.co.uk/news/blog/160-what-is-a-heat-exchanger>
- [26] <https://www.neonickel.com/technical-resources/applications/which-materials-are-the-best-for-a-heat-exchanger-application/>
- [27] <https://www.materialsciencejournal.org/vol9no1/design-and-analysis-of-a-heat-exchanger-network>
- [28] <https://jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques/>
- [29] http://kelian.clerc.free.fr/transf_thermique.html
- [30] <http://www.retscreen.net/manuel/retscreen>
- [31] <https://www.directindustry.fr/prod/deutz/product-5761-604184.html>
- [32] <https://www.calculcee.fr/article/fonctionnement-cogeneration/>
- [33] <https://www.micetcraft.com/fr/differents-types-dechangeurs-de-chaaleur/>
- [34] <https://www.arsopi-thermal.pt/fr/produits/échangeurs-de-chaaleur-a-plaques-et-joints/>

Résumé

Cette étude vise à évaluer la quantité de chaleur générée par le système de refroidissement à air d'un moteur à combustion interne, pouvant être récupérée et utilisée pour alimenter un échangeur de chaleur destiné au chauffage de l'eau. La méthode employée repose sur le principe de la cogénération, exploitant les concepts thermiques les plus avancés. Le système de récupération de chaleur a été intégré à une unité API pour assurer son automatisation et sa simulation a été réalisée à l'aide de Tia Portal. Cette solution permet de déterminer avec précision la quantité de chaleur récupérable et son potentiel de conversion en énergie utile. Les résultats de cette étude montrent une approche efficace pour maximiser la récupération de chaleur dans les MCI, contribuant ainsi à une meilleure efficacité énergétique et à une utilisation plus durable des ressources thermiques.

Mots clés : Chaleur fatale, moteur à combustion interne, cogénération.

ملخص

تتعلق هذه الدراسة بتقييم كمية الحرارة الناتجة عن نظام التبريد الهوائي لمحرك الاحتراق الداخلي، والتي يمكن استعادتها واستغلالها لتغذية مبادل حراري بغرض تسخين المياه. تعتمد الطريقة المستخدمة على مبدأ التوليد المشترك للطاقة، باستخدام مفاهيم حرارية متقدمة. تم دمج نظام استعادة الحرارة بوحدة API لتحقيق الأتوماتيكية الكاملة حيث تمت المحاكاة باستخدام Tia Portal.

تتيح النتائج المتحصلة تحديد كمية الحرارة التي يمكن استعادتها بفعالية وتحويلها إلى طاقة مفيدة. تقدم هذه الحلول مسارًا قابلاً للتطبيق لتحسين كفاءة الطاقة لمحركات الاحتراق الداخلي، من خلال زيادة استخدام الحرارة المهذرة وبالتالي تحسين الكفاءة العامة للنظام.

الكلمات المفتاحية: الحرارة المهذرة، محركات الاحتراق الداخلي، التوليد المشترك للطاقة.

Abstract

This study evaluates the amount of heat generated by the air cooling system of an internal combustion engine that can be recovered and utilized to power a heat exchanger for water heating purposes. The method employed is based on the principle of cogeneration, utilizing advanced thermal concepts. The thermal recovery system was integrated with an API unit for full automation and simulated using TIA Portal.

The results allow for the quantification of recoverable heat and demonstrate its efficient conversion into useful energy. This solution provides a viable pathway for optimizing the energy efficiency of internal combustion engines by maximizing the use of waste heat, thereby enhancing the overall system efficiency.

Keywords: Waste heat, internal combustion engines, cogeneration.