

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : État de l'art de la climatisation automobile

Introduction	1
I.1-Historique de l'industrie automobile et avènement de la climatisation automobile.	2
I.1.1-Historique de l'industrie automobile.	2
I.1.2-Historique de la climatisation automobile	3
I.2-Utilisation et maintenance d'une climatisation automobile	4
I.2.1-Utilisation	4
I.2.2-Entretien	5
I.2.3-Dépannage	5
I.2.4-Evolution	5
I.3-Impact énergétique et environnementale de la climatisation automobile	5
I.3.1-Diffusion de la climatisation	6
I.3.2-Surconsommation du carburant	7
I.3.3-Surémission de polluants réglementés(CO,HC,NOX et particules..)	8
I.3.4-Pertes de fluides frigorigènes	9
Conclusion	11

Chapitre II : Fonctionnement d'un système de climatisation automobile

Introduction	12
II.1-Généralité sur un climatisation automobile	12
II.1.1-Effet d'une température défavorable dans l'habitacle sur l'être humain	13
II.1.2-Fluides frigorigènes	15
II.1.3-Etat de réfrigérant R134a dans le cycle de climatiseur	15
II.1.4-Réfrigérant et couche d'ozone	16
II.1.5- Réfrigérant et effet de serre	17
II.1.6-Huile frigorigène	17
II.2- Fonctionnement d'un système de climatisation automobile	18
II.2.1-Principe de fonctionnement	18
II.2.2-Les différents processus de cycle thermodynamique	20
II.2.2.1-Compression	20
II.2.2.2-Condensation	21
II.2.2.3-Détente	21
II.2.2.4-Vaporisation	21
II.2.3-Circuit thermodynamique	22
II.2.3.1-Rôle des éléments de système de climatisation	22
Conclusion	29

Chapitre III : La régulation d'une climatisation automobile

Introduction	30
III.1-Présentation du système de climatisation automobile	30
III.2-Composants du système	32
III.2.1-Capteur de température de l'air extérieur	32
III.2.2-Capteur de température de l'air climatisé	32
III.2.3-Capteur de température de l'air de l'habitacle	33
III.2.4-Capteur de rayonnement solaire	33
III.2.5-Capteur d'embouage	34
III.2.6-Capteur antigivre	34
III.2.7-Groupe mélangeur	35
III.2.8-L'électro ventilateur	35
III.2.9-Déclencheurs volets	36
III.2.9.1-Déclencheurs des installation traditionnel	36
III.2.9.2-Déclencheurs montés sur la nouvelle installation	36
III.2.10-Filtre anti pollen	36
III.2.11-Radiateur réchauffeur	37
III.2.12-Réchauffeur supplémentaires PTC	37
III.2.13-Réchauffeur autonome supplémentaire	38
III.2.14-Panneau de commande de l'installation	38
III.3-Les organes mécaniques de régulation	39
III.3.1-Thermostat	40
III.3.2-Pressostat multi niveau	40
III.4-Régulation de base	41
III.4.1-Thermostatique	41
III.4.2-Pressostatique	41
III.5-Fonctionnement de base	42
III.5.1-Demande de température maximale	42
III.5.2-Demande de température minimale	43
III.5.3-Demande de DEFROST	44
III.6-Schéma électrique du banc d'essai	46
Conclusion	47

Chapitre IV : Etude d'un système de climatisation automobile sur un banc d'essai ET450

Introduction	48
IV.1-Description de l'appareil	49
IV.1.1-Composition de l'appareil	49
IV.1.2-Composants de l'appareil	50
IV.1.3-Première mise en service	54
IV.1.4-Remplissage de système	54
IV.2-Essais et résultats	56
IV.2.1-Partie expérimentale	56
IV.2.2-Les tableaux de résultats et les calculs	56
IV.2.2.1-Ventilateur au 1 ^{er} étage	57

IV.2.2.2-Ventilateur au 2 ^{ème} étage	60
IV.2.2.3-Ventilateur au 3 ^{ème} étage	61
IV.2.3-Interprétation	62
IV.2.4-Conclusion	62
Conclusion	63
Conclusion générale	
Bibliographie	

Liste de figures

Chapitre I

Figure I.1 : évaluation de nombre de véhicules climatisés de parc de véhicule léger français 7

Figure I.2 : évolution du taux d'équipement neufs en climatisation automobile 7

Chapitre II

Figure II.1 : Températures régnant dans un véhicule 12

Figure II.2 : les courbes de confort 13

Figure II.3 : Effets d'une température défavorable dans l'habitacle 14

Figure II.4 : diagramme d'état du réfrigérant R134a pour un climatiseur automobile 16

Figure II.5 : Réfrigérant et effet de serre 17

Figure II.6: Exemple de cycle thermodynamique idéal dans
le diagramme enthalpique de Molier 20

Figure II.7: processus de compression 20

Figure II.8 : processus de condensation 21

Figure II.9 : Processus de détente et vaporisation 22

Figure II.10: représentation des différents organes constituant une climatisation automobile 22

Figure II.11 : présentation de compresseur 23

Figure II.12 : coupleur électromagnétique 24

Figure II.13 : compresseur a disque en nutation 25

Figure II.14 : représentation de condenseur 26

Figure II.15 : présentation interne d'un déshydrateur 27

Figure II.16 : présentations d'un évaporateur 28

Chapitre III

Figure.III.1: conditionner l'air de l'habitacle du véhicule 30

Figure.III.2:les composants de calculateur 31

Figure III.3 : Valeurs de résistance prises par le capteur de température extérieure 32

Figure III.4 : Graphique des valeurs de résistance des capteurs de
Température de l'air climatisé 33

Figure III.5 : capteur de l'air 33

Figure III.6 : capteur de rayonnement solaire	34
Figure III.7 : radiateur	37
Figure III.8 : réchauffeur	38
Figure.III.9 :- Schéma global d'un véhicule équipé d'un réchauffeur autonome supplémentaire	38
Figure.III.10 : Panneau de l'installation d'air conditionné avec commandes manuelles	39
Figure.III.11 : Panneau de l'installation d'air climatisé avec commandes électroniques	39
Figure.III.12: Panneau de l'installation d'air climatisé avec commandes électroniques et système DUAL-ZONE	39
Figure.III.13: thermostat.	40
Figure III.14 : Pressostat à quatre niveaux sur le filtre déshydrateur	41
Figure.III.15: Schéma électrique de la régulation thermostatique	42
Figure.III.16: Schéma électrique de la régulation Pressostatique	42
Figure.III.17: demande de température maximale	43
Figure. III.18 : Demande de température minimale	44
Figure.III.19: Demande de DEFROST	45

Chapitre IV

Figure. IV.1 : Banc d'essai ET450	49
Figure. IV.2 : vue de face de Banc d'essai ET 450	50
Figure. IV.3 : vue de dos de banc d'essai ET450	50
Figure. IV.4 : vue latérale de banc d'essai ET450	51
Figure. IV.5 : compresseur de climatiseur ET450	52
Figure. IV.6 : unité de commande de climatiseur ET450	54
Figure. IV.7 : les composants de cycle frigorigène	55
Figure. IV.8 : les composants de cycle électrique	56
Figure. IV.9: Diagramme du 1 ^{er} étage de ventilation	57
Figure. IV.10. : Diagramme de 2eme étage de ventilation	60
Figure. IV.11:. Diagramme de 3ème étage ventilation	61

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Surconsommation	8
Tableau I.2: Les émissions moyennes des polluants mesurée	8

Chapitre IV

Tableau IV.1: Etage de commutation de manocontacteur	53
Tableau IV.2: Présentation des éléments d'erreur	55
Tableau IV.3: Ventilation en 1 ^{er} étage (lent)	56
Tableau IV.4: Ventilation en 2 ^{ème} étage (moyenne)	56
Tableau IV.5: Ventilation en 3 ^{ème} étage (rapide)	57
Tableau IV.6: Résultat de 1 ^{er} étage de ventilation	59
Tableau IV.7: Résultat de 2 ^{ème} étage de ventilation	60
Tableau IV.8: Résultat de 3 ^{ème} étage de ventilation	61

Nomenclature

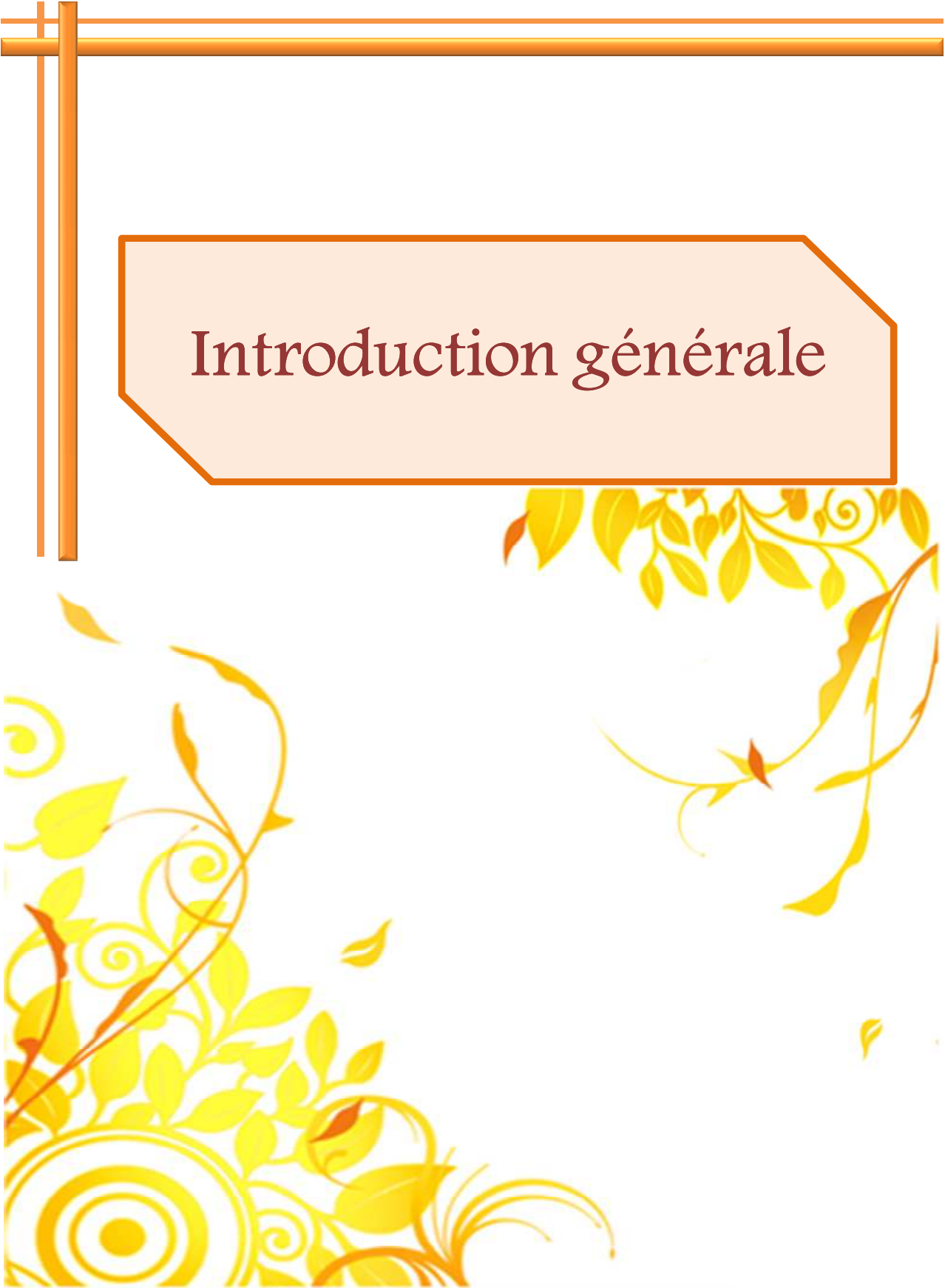
symboles	signification	unités
c_p, c_v	Capacité calorifique spécifique	kJ/kgK
ε	Coefficient de performance	/
η_g	Efficacité du compresseur	/
η_m	Rendement mécanique	/
k	Exposant adiabatique	/
h	Enthalpie spécifique	kJ/kg
$\dot{m}_k$	Débit massique du fluide frigorigène	kg/s
p_i	Pression au point de mesure i	bar
P	Puissance interne du compresseur	W
P_{AB}	Puissance de sortie	W
P_k	Puissance de propulsion du compresseur	W
P_{ZU}	Puissance d'entrée	W
$\square \square \Psi$	Taux de compression du compresseur	/
Q	Puissance spécifique	kJ/kg
$\dot{Q}_0$	Capacité frigorifique de l'installation	W
$\dot{Q}_{ab}$	Chaleur de sortie	W
$\dot{Q}_K$	Puissance frigorifique de l'installation	W
$\dot{Q}_{ZU}$	Chaleur d'entrée	W
ρ_K	Densité du fluide frigorigène	kg/m^3
R	Constante spécifique gaz	kJ/kgK
s	Entropie spécifique	kJ/kgK

Caractéristiques techniques de band essai ET450

Condenseur (refroidisseur)

Capacité frigorifique max.6.6 kW
Fluide frigorigène R134a
Débitmètre:10-95 L/h
Manomètre: BP -1... 9 bars
 HP-1... 24 bars
Alimentation..... 380Vca, triphasé, 16A
 Interne 12 Vcc

Dimensions principales
(l x h x p) 800 x 1300 x 1200 mm
Poids: env. 80 kg

The slide features a decorative design with orange lines and floral patterns. A horizontal orange line runs across the top, and a vertical orange line runs down the left side. A light orange rectangular box with a dark orange border is positioned in the upper left. The background is white with yellow and orange floral patterns, including leaves and swirls, located in the bottom left and right corners.

Introduction générale

Introduction générale :

La production du froid est un secteur très important, il pèse au total 15 % de la consommation de l'énergie électrique dans le monde. Il couvre une large variété d'application : le bâtiment, la conservation des aliments, le transport, etc. Le fonctionnement de la quasi totalité des systèmes actuels est basé sur le principe thermodynamique qui consiste à utiliser l'énergie thermique produite par le changement de phase (liquide/gaz) d'un fluide spécifique appelé fluide frigorigène. Ce dernier, est l'élément essentiel dans le fonctionnement, sa spécification dépend des contraintes de l'application comme la plage de température de son utilisation, son degré de toxicité, son rendement énergétique ainsi que le coût de sa fabrication.

Le but de cette étude étant l'analyse de la technologie d'application la climatisation automobile, d'une part, de présenter le principe de fonctionnement de la climatisation automobile :

- Principe thermodynamique
- Principe électrique (régulation).

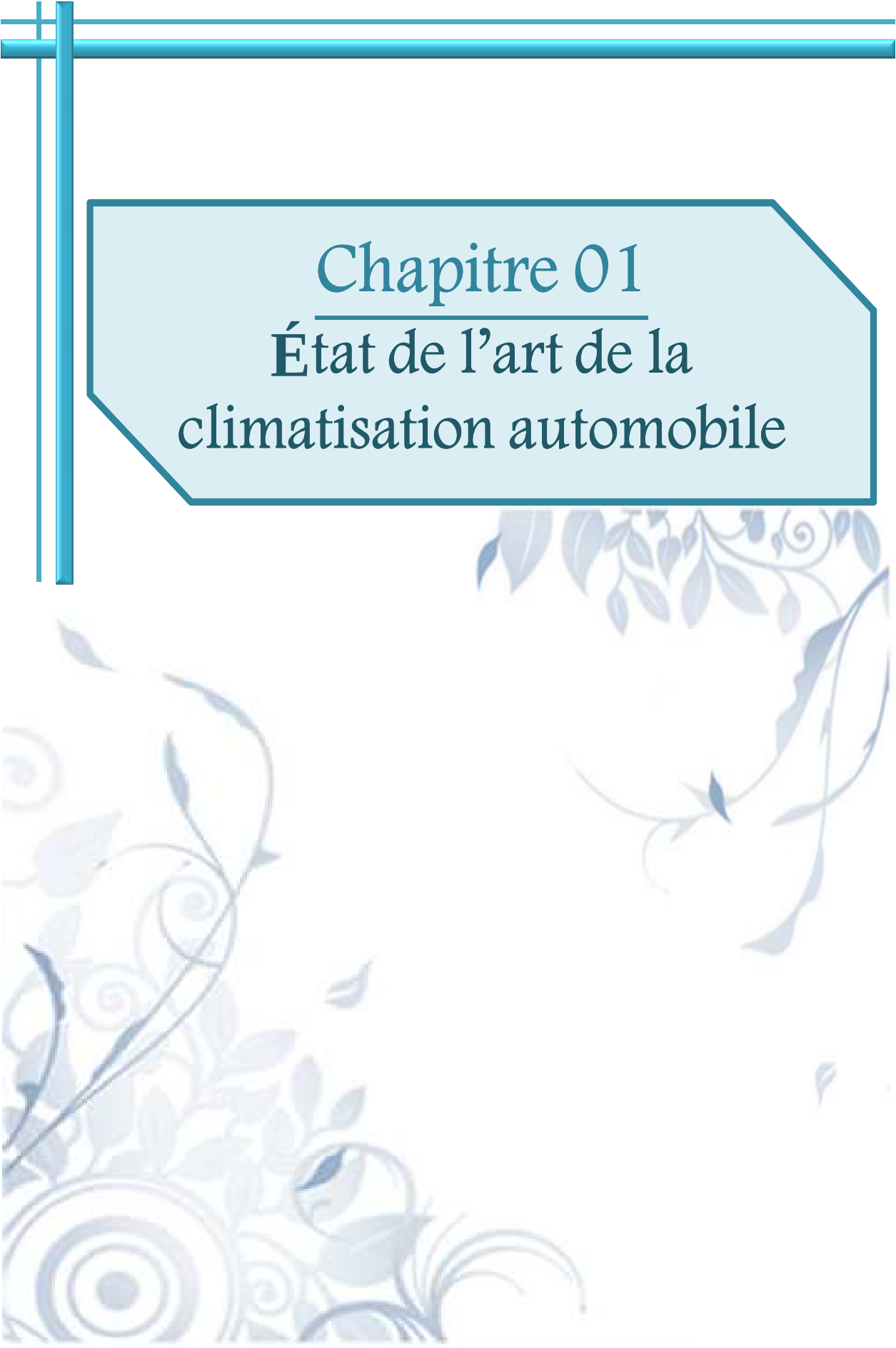
Et d'autre part montre une expérience dans banc essai ET 450 unité d'exercice air conditionné pour automobile.

Dans le premier chapitre, nous présenterons l'histoire de l'industrie automobile et l'avènement de la climatisation automobile et les différentes périodes de développement de cette technologie. Dans les chapitres suivants nous étudierons les différents principes de fonctionnement de la climatisation automobile.

Le chapitre numéro 2 est dédié à l'étude la description d'un système de climatisation automobile après une analyse de cycle thermodynamique et les différents organes constituant ce cycle. Ensuite nous ferons une expérience sur un banc essai ET450 pour automobile doté d'un cycle frigorifique et utilisant le fluide frigorigène R134a.

Le chapitre numéro 3 nous présentera la chaîne de régulation d'une climatisation automobile, et le principe de fonctionnement des composants de ce système et en fin le schéma électrique de banc essai.

Le dernier chapitre nous ferons une expérience sur un banc essai ET450 pour automobile doté d'un cycle frigorifique et utilisant le fluide frigorigène R134a.

The page features decorative blue lines in the top left corner, consisting of a vertical line and two horizontal lines. A light blue rectangular box with a dark blue border and a clipped top-right corner contains the chapter title. The bottom of the page is decorated with faint, stylized blue floral and leaf patterns.

Chapitre 01

État de l'art de la climatisation automobile

Introduction :

Dans un véhicule automobile, nous disposons habituellement :

- du chauffage.
- de l'aération.

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

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

La mesure climatique cumulative comprend : la température, l'humidité et le mouvement de l'air, ainsi que les radiations thermiques.

Une bonne connaissance théorique et pratique d'un système de climatisation est nécessaire pour pouvoir intervenir correctement, soit au cours de la première installation, soit à l'occasion de l'entretien périodique ou encore lors d'une intervention de maintenance suite à une anomalie constatée.

La climatisation est un système permettant de maintenir l'atmosphère d'un milieu à une pression, un degré d'humidité et une température choisis.

L'air conditionné est un air auquel on a affecté une température et un degré d'humidité déterminés.

L'hygrométrie détermine le degré d'humidité dans l'air atmosphérique.

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

I.1-Historique de l'industrie automobile et avènement de la climatisation automobile :

I.1.1- Historique de l'industrie automobile :

Le premier véhicule automobile fonctionnel a été inventé en 1769 par Joseph Cugnot sous le nom de fardier de Cugnot mais il faut attendre la deuxième moitié du XIX^e siècle et les progrès liés à la révolution industrielle pour que les véhicules automobiles personnels se développent et prennent finalement leur nom actuel d'automobile. La naissance de l'automobile s'est faite par l'adaptation

d'une machine à vapeur sur un châssis autonome mais des problèmes techniques et sociaux ont retardé son développement. L'encombrement de la chaudière, les matériaux inadaptés aux hautes pressions et les châssis supportant mal les vibrations furent les principaux obstacles techniques et la dangerosité perçue et réelle de ces engins sur les routes à l'époque a conduit à des législations contraignantes, comme le Locomotive Act au Royaume-Uni.

L'aventure automobile a commencé en France, où les premières expériences réussies ont eu lieu en 1873. Un tel succès qu'en 1895 environ 350 automobiles circulaient déjà sur le territoire français, contre 75 en Allemagne et seulement 80 aux États-Unis. C'était une époque où on ne parlait pas vraiment de fabricants de voitures, mais plutôt de carrossiers. En France, ils ont su tourner la page de la somptuosité décorative, qui avait fait leur réputation au XVIII^e siècle, et ont appris à jouer avec les nouveaux codes esthétiques.

L'histoire de la voiture a fait naître et vivre différents métiers. À ce moment de l'histoire, construire une voiture était une affaire collective dans lesquels carrossiers, mais aussi charrons, serruriers, malletier, selliers-garnisseurs, bourreliers, plaqueurs et peintres étaient impliqués ensemble. Tout était fait sur mesure, des carrosseries qui s'adaptaient aux châssis, en passant par les sièges ou les bagages arrimés à l'arrière pour les premiers voyages.

Deux facteurs vont contribuer à son développement : le revêtement progressif des routes en ville puis en campagne afin de faciliter l'usage des bicyclettes et des voitures, et le développement de nouvelles méthodes de production (taylorisme, fordisme), qui mènent à la première voiture de grande série, la Ford T. Celle-ci pose définitivement l'empreinte de l'automobile sur la société du XX^e siècle. Les innovations se succèdent ensuite, mais sans changement fondamental conceptuel. Les grandes lignes de l'automobile de série actuelle sont tracées par Lancia en 1922 avec la Lambda à carrosserie autoporteuse et suspension avant indépendante, Chrysler en 1934 avec la Air flow qui introduit l'aérodynamique dans l'automobile de série, Citroën et le développement de la Traction Avant à partir de 1934, puis l'introduction des freins à disque sur la DS en 1955, ou encore par Porsche et la boîte de vitesses à synchroniseurs coniques de la 356.

Le développement du marché a connu son rythme le plus rapide lors de l'engouement pour la voiture des "années folles" puis fut fortement marqué par les crises, comme le krach de 1929 et la Seconde Guerre mondiale. Celles-ci redistribuent les cartes de l'industrie en favorisant les regroupements, et provoquent le retour en grâce des petites automobiles, l'apogée de ce phénomène étant atteinte en Allemagne dans les années 1950 avec les microvoitures telles l'Isetta. Cette sortie de

crise est aussi le début des Trente Glorieuses, période marquée dans tous les secteurs de l'automobile par un grand essor, qui se traduit par une augmentation du choix, de la production et de l'accession à l'automobile, via l'ouverture du recours au crédit dans les années 1960. Cette croissance de la production, mais aussi de la taille des voitures, de leur vitesse, est stoppée net par le premier choc pétrolier. Celui-ci, conjugué à la hausse de l'insécurité routière, aura des conséquences à long terme sur la relation entre l'automobile et la société, conduisant en particulier à une forte vague de réglementation sur la vitesse autorisée. Les aspects sociaux (écologie, sécurité routière) deviennent des enjeux importants dans la conception des automobiles à la fin de XX^e siècle, conduisant à une nouvelle vague d'innovations dont le downsizing et surtout la motorisation hybride lancée sur la Toyota Prius (1997) puis la Honda Insight (1999).

I.1.2-Historique de la climatisation automobile :

Pour le rafraîchissement des boissons, les civilisations grecques et égyptiennes utilisaient l'effet d'évaporation de l'eau à travers les vases et les jarres poreux.

C'est au XIX^{ème} siècle que sont apparues les premières machines frigorifiques à compression de fluide.

- 1834 : Jacob PERKINS, de Londres, construit la première machine de réfrigération à compression mécanique avec de l'éther comme réfrigérant ;
- 1859 : le Français Ferdinand CARRE réalise la première installation industrielle (machine à absorption d'eau + NH₃);
- 1930 : grâce à l'étude théorique du chimiste belge Frédéric SWARTS, le grand essor de l'industrie du froid s'installe, avec la mise au point par une société américaine d'un nouveau fluide frigorigène « (R12) ».
- 1939 : Première climatisation automobile sur une Packard puis sur des Chrysler
- 1953 : Climatisation chez General Motors : compresseur frigorifique entraîné par le moteur, évaporateur analogue à celui des réfrigérateurs domestiques situé dans l'espace qui sépare les sièges arrière du coffre à bagages.
- 1957 : Brevet pour un système d'aération et de ventilation à l'abri des courants d'air, Mercedes-Benz
- 1975 : Directive CEE prévoyant le gel de la production des CFC R 11 et 12 et la réduction de leur Utilisation dans les aérosols de 30 % par rapport à 1976
- 1987 : Protocole de M ONTREAL signé par 31 pays, réglementant la production et la vente des CFC.

- 1989 : Conférence internationale de NAIROBI : de nombreux pays se rallient au protocole et au calendrier des réductions de production (arrêt total prévu fin de 1999).
- 1991 : Saab 9000 2.3 Turbo, première voiture à utiliser le R134a
- 1993 : Equipement de la plupart des nouveaux systèmes d'air conditionné en R134a pour la fin 1993.
- 1994 : Remplacement du CFC R-12 par R-134 : directive européenne et Accord de Montréal fixant Les dates pour l'arrêt total de la production et de la consommation de R12.
- 1999 : Interdiction totale de vente de CFC R12 à partir du 31 décembre
- 2000 : Depuis le 31/12/2000, les distributeurs de réfrigérant ont interdiction totale de vente de CFC R12.
- 2006:Limitation du taux de fuite de la boucle froide (40g/an pour simple boucle et 60 g/an pour double boucle).
- 2006 : Interdiction de l'utilisation du R-134a à partir de 2008 pour les nouveaux types et 2017 pour tous les types de véhicule.
- 2010 : Au 1 janvier 2010, pour l'ensemble du parc de climatisation existant, limitation du taux de rechargement en HCFC vierge à une valeur maximale de 2,5%. [2]

I.2-Utilisation et maintenance d'une climatisation automobile :

I.2.1-Utilisation :

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

I.2.2-Entretien :

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

I.2.3-Dépannage :

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

- ✚ le manque de fluide frigorigène dans l'installation.

✚ la mauvaise tension de la courroie du compresseur.

Ces deux pannes sont bénignes et rapidement réparables.

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

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

I.2.4-Evolution :

Les climatisations «haut de gamme» sont entièrement automatisées: l'affichage de la température désirée sur un écran digital provoquera le fonctionnement et la régulation permanente de la température dans l'habitacle.

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

I.3-Impact énergétique et environnemental de la climatisation automobile :

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

Bien que les constructeurs européens, japonais et coréens aient signé un accord important avec la Commission européenne sur la réduction volontaire des émissions de CO₂ de leurs véhicules, avec un objectif d'émission moyenne pondérée par les ventes de 140 grammes par km sur le cycle d'homologation MVEG en 2008, il convient de noter que les procédures européennes de mesure des consommations et des rejets de CO₂ ne prennent pas en compte le fonctionnement des auxiliaires, notamment celui de la climatisation.

L'essor de cet équipement, reconnu comme étant très consommateur d'énergie et employant un fluide frigorigène à fort potentiel de réchauffement de l'atmosphère, a conduit l'ADEME à mettre en place une série d'actions d'évaluation de son impact énergétique et

environnemental. Elles comportent notamment l'étude du taux d'équipement des véhicules, l'analyse des effets sur la consommation de carburant, ainsi que sur les rejets de polluants réglementés à l'échappement, la caractérisation des niveaux de fuite en fluide frigorigène, puis l'estimation des rejets de gaz à effet de serre de l'ensemble des véhicules climatisés.[1]

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

I.3.1-Diffusion de la climatisation :

Le taux d'équipement des véhicules neufs a cru en France de moins de 15 % en 1995 à plus de 60 % en l'an 2000. Ce mouvement, amorcé par une diffusion en série sur les véhicules haut de gamme et milieu de gamme et en option par offres promotionnelles (... jusqu'à la clim. à 1 € !...) pour des véhicules de taille moindre, se maintiendra dans les prochaines années. Cette expansion dans les ventes annuelles se poursuit actuellement avec une pénétration de ce système, en France comme en Europe, de l'ordre de 70 % pour 2003. Une saturation progressive, selon une "loi en S", illustrée dans le graphique ci-après est attendue : selon toute vraisemblance le taux d'équipement s'établira au-delà de 90 % à compter de l'an 2010, atteignant les niveaux de diffusion observés depuis quelques années au Japon et aux États-Unis.

Cette diffusion dans les ventes induit une conséquence directe : la proportion du parc climatisé croît de manière significative

La perspective d'évolution effectuée par l'ADEME, selon les hypothèses actuelles de croissance du parc automobile français et selon la "loi de diffusion" présentée plus haut, conduit à une évaluation de plus de 20,7 millions d'unités dans le parc en 2010 (2 véhicules en circulation sur 3 seront alors climatisés !) puis de 30,5 millions de véhicules équipés à l'horizon 2020, soit près de 88 % (près de 9 véhicules sur 10 équipés), comme l'illustre le graphique suivant.

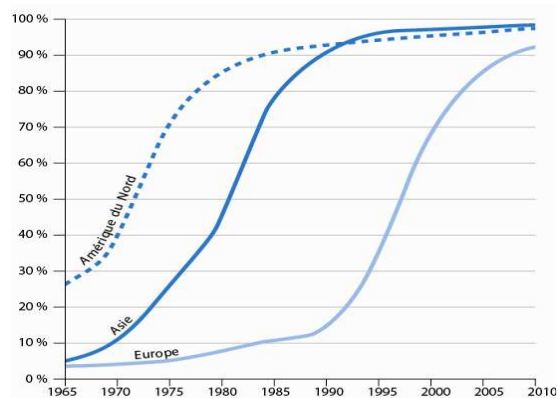


Figure I.1 : évolution du taux d'équipement neufs en climatisation automobile.[1]

I.3.2-Surconsommation de carburant :

Afin d'étudier l'effet sur la consommation de carburant de l'utilisation de la climatisation automobile, l'ADEME a mis en place au cours des dernières années deux campagnes d'essais sur des véhicules représentatifs du marché et poursuit actuellement son évaluation avec la mise en place d'une nouvelle campagne de mesures. Les tests conduits en 1997 auprès de l'UTAC portaient sur 20 véhicules ; ils faisaient suite aux premières évaluations, menées en 1996, qui avaient révélé des surconsommations importantes (cf. [synthèse ADEME, réf. 2471 – juillet 1996](#)).

Tableau I.1 : Surconsommation de carburant.[2]

Surconsommation en l/100 km (entre parenthèses variation en %)			
	Cycle urbain (ECE)	Cycle extra-urbain (EUDC)	Cycle mixte (MVEG)
Essence (moyenne 10 véhicules)	+ 3,1 (+ 31 %)	+ 0,9 (+ 16 %)	+ 1,7 (+ 23 %)
Diesel atmosphérique	+ 2,4 (+ 26 %)	+ 0,7 (+ 12 %)	+ 1,3 (+ 19 %)
Diesel suralimenté (turbo Diesel)	+ 4,0 (+ 43 %)	+ 1,5 (+ 28 %)	+ 2,5 (+ 36 %)
Ensemble des Diesel (moyenne 10 véhicules)	+ 3,2 (+ 35 %)	+ 1,1 (+ 20 %)	+ 1,9 (+ 27 %)

T extérieure = 30°C, T consigne = 20°C, essai sur cycle NMVEG cf. Dir. 98/69.

Les constats généraux sur la deuxième campagne de mesures sont une surconsommation moyenne plus élevée que lors de la 1^{ère} campagne (en partie due au durcissement du cycle MVEG), un resserrement des valeurs de surconsommations pour l'essence et Diesel (autour de 3,2 l/100 km en urbain), ainsi que la confirmation des mauvaises performances des Diesel suralimentés. De même, on peut noter que les surconsommations sont nettement plus élevées pour la partie urbaine que pour la partie extra-urbaine du cycle MVEG.

I.3.3-Surémission de polluants réglementés (CO, HC, NOX et particules) :

Les résultats exposés ci-après ont été obtenus par mesures sur banc à rouleaux, sur les bases modifiées de la directive 98/69 (cycle MVEG modifié supprimant les 40 premières secondes de ralenti à froid). Si les valeurs obtenues sont, dans l'ensemble, plus élevées que lors de la 1^{ère} campagne (du fait de la soviétisation du cycle d'essais), les tendances observées (notamment en relatif) se confirment avec une augmentation des polluants CO, NO_x pour l'essence et des polluants NO_x, Particules pour les Diesel.

On pourra retenir les impacts figurant dans le tableau ci-après selon le polluant, le type de motorisation et la partie du cycle d'essais considérés:

Tableau I.2 : Les émissions moyennes de polluants mesurée.[3]

	CO	HC	NO _x	Particules
Essence				
Urbain	+ 17 %	~ 0	+ 74 %	–
Extra-Urbain	+ 75 %	~ 0	+ 51 %	–
Diesel				
Urbain	- 30 %	- 24 %	+ 47 %	+ 60 %
Extra-Urbain	- 28 %	- 23 %	+ 27 %	+ 32 %
T extérieure = 30 °C, T consigne = 20 °C, essai selon Directive 98/69 – nouveau cycle MVEG.				
Émissions moyennes de polluants mesurés en g/km				
Écart en % entre essai climatisation en marche et sans climatisation				

I.3.4-Pertes de fluides frigorigènes

Les systèmes d'air conditionné automobile possèdent un inconvénient fort, de par leur conception, en termes de rejets de gaz à effet de serre :

- ils utilisent des fluides frigorigènes (HFC : hydro- fluorocarbone), dont les rejets possèdent un impact très fort sur l'accroissement de l'effet de serre : le pouvoir de réchauffement global (PRG ou GWP pour Global Warning Potential) de l'HFC "R134a", actuellement utilisé en climatisation auto- mobile, est de 1300 ce qui signifie que 1 kg de ce HFC émis à l'atmosphère a autant d'effet que 1,3 tonne de CO₂
- les contraintes d'implantation sous capot suppo- sent l'emploi d'éléments de liaisons flexibles, sources de problèmes non négligeables de porosité et de perméabilité, ainsi que d'étanchéité non parfaite aux raccords ;
- l'entraînement du compresseur de la climatisation par le moteur thermique implique, pour maintenir le fluide en circuit fermé, l'emploi d'un joint tournant, source d'une grande partie des pertes de fluide.

Cette conception architecturale impose une maintenance rapprochée et entraîne l'utilisation et le maniement de grandes quantités de fluide frigorigène (production, récupération, recyclage et élimination).

Afin de permettre une meilleure compréhension des natures des émissions fugitives de fluides frigorigènes et d'offrir la possibilité de hiérarchiser les responsabilités de différents composants, puis de proposer des axes de limitation, un ensemble d'actions visant à caractériser les émissions liées aux fuites des systèmes de climatisation a été mis en place par l'ADEME.

Ainsi, une évaluation des niveaux de rejeté des composants "flexibles" et "raccords" d'une part, du "compresseur mécanique de climatisation" d'autre

Au vu des résultats sur la surconsommation et les surémissions de polluants induites par la climatisation, l'efficacité énergétique de la boucle de réfrigération doit être améliorée; à titre d'exemple, nous pouvons noter qu'un compresseur à pilotage externe optimisé devrait permettre de réduire la surconsommation jusqu'à un facteur 2. Par ailleurs, compte tenu des fuites de fluide frigorigène R134a sur tout le cycle de vie d'un système d'air conditionné, des actions doivent être menées pour les limiter et pour étudier de nouveaux fluides frigorigènes à bas potentiel de réchauffement global de l'atmosphère.

Ainsi, il importe de mettre en œuvre au plus tôt deux types d'action.

- D'une part, des actions de recherche visant à :
 - améliorer l'efficacité énergétique du système d'air conditionné ;
 - réduire la puissance frigorifique demandée par une optimisation de la thermique du véhicule et par un pré-conditionnement actif ou passif à l'arrêt;
 - renforcer l'étanchéité des circuits fonctionnant à l'HFC R134a ;
 - mettre au point et développer des systèmes fonctionnant avec de nouveaux fluides frigorigènes (hydrocarbures, CO₂, mélanges HFC/ CO₂...).
- D'autre part, des actions à caractère réglementaire :
 - réglementation et création d'une filière de récupération performante pour les climatisations actuelles au R134a ;

- développement d'une méthodologie de mesures en vue de la prise en compte réglementaire de la consommation énergétique de la climatisation dans les procédures d'homologation des nouveaux véhicules.

En ce sens, et en continuité avec les actions d'évaluation présentées dans cette brochure et détaillées dans l'ouvrage La climatisation automobile, l'Agence participe actuellement à de nouveaux travaux correspondants aux axes précités comme :

- apport du pilotage externe du compresseur,
- climatisation dans les cas des véhicules hybrides,
- évaporateur à haut rendement,
- pré-conditionnement du véhicule,
- climatisation réversible fonctionnant au CO₂,
- étude de mélanges de fluides frigorigènes HFC et CO₂,
- méthodologie de mesure de la consommation de la climatisation,
- réflexion au niveau européen sur le maintien de la filière R134a,
- mesures en usage réel sur véhicules instrumentés.

Les résultats de ces travaux feront partie d'une nouvelle synthèse qui intégrera les données d'une prochaine campagne d'essais véhicules [3].

Conclusion :

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

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

The slide features a decorative header with two horizontal green lines and a vertical green line on the left. A light green, rounded rectangular box with a dark green border contains the chapter title. The background is white with faint, light green floral and leaf patterns in the bottom left and right corners.

Chapitre 02

Fonctionnement d'un système de climatisation automobile

Introduction

Les véhicules automobiles sont de véritables pièges à chaleur dont l'origine est:

- La présence des conducteurs et des passagers
- La forme du véhicule
- Les calories dégagées par le moteur
- Les conditions climatiques variables
- Les caractéristiques de la ventilation

La chaleur, ainsi que l'humidité (hygrométrie) engendrent des conséquences plus ou moins graves:

- Baisse de la vigilance et comportement de conduite dégradé.
- Très forte diminution de la notion de confort.

II.1-Généralités sur une climatisation automobile :

L'être humain se sent à l'aise à une température et une humidité de l'air ambiant données ; il éprouve alors une sensation de confort. Le confort, considéré comme composant de la sécurité active, joue un rôle important pour une aptitude à la conduite inaltérée.

La "climatisation automobile" exerce une influence directe sur le conducteur, sur une conduite sans fatigue, sur la sécurité de conduite.

Une température agréable dans l'habitacle dépend de la température régnant à l'extérieur et d'un débit d'air suffisant.

Même un système de ventilation et de chauffage moderne ne parvient que de manière insatisfaisante à assurer ce confort à des températures extérieures élevées.

Températures régnant dans un véhicule de catégorie moyenne pour : Temps de conduite 1 h Température extérieure 30 °C Rayonnement solaire s'exerçant sur le véhicule		
Zone	avec climatiseur	sans climatiseur
Tête	23 °C	42 °C
Thorax	24 °C	40 °C
Pieds	28 C	35 C

Figure II.1 : Températures régnant dans un véhicule.[1]

- En cas de rayonnement solaire important, notamment, l'échange de l'air réchauffé de l'habitacle ne peut avoir lieu qu'avec de l'air à température ambiante.
- Sur le chemin menant de la prise d'admission au diffuseur d'air, il se produit généralement un réchauffement supplémentaire de plusieurs degrés.
- L'ouverture d'une glace ou du toit ouvrant pour obtenir un climat agréable s'accompagne généralement de courants d'air ou d'autres désagréments tels que bruit, gaz d'échappement, pollen.

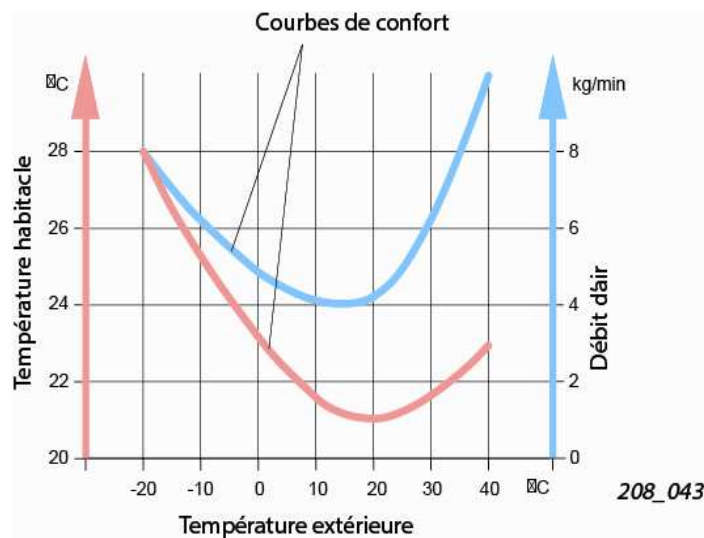


Figure II.2 : les courbes de confort.[2]

II.1.1-Effets d'une température défavorable dans l'habitacle sur l'être humain :

Des études scientifiques de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) ont prouvé que l'aptitude à la concentration et le pouvoir de la réaction diminuent fortement en cas de stress.

La chaleur est une forme de stress. La meilleure température pour le conducteur se situe entre 20 et 22 °C. Cela correspond à la plage climatique A, la zone de confort. Un rayonnement solaire intense sur le véhicule peut faire monter la température à l'intérieur de la voiture de plus de 15 °C au-dessus de la température extérieure – au niveau de la tête notamment.

C'est là que l'effet de la chaleur est le plus dangereux.

La température du corps augmente, la fréquence cardiaque s'accélère. Une transpiration plus forte en est également un signe. Le cerveau ne reçoit pas suffisamment d'oxygène. Nous sommes dans la zone B du stress climatique.

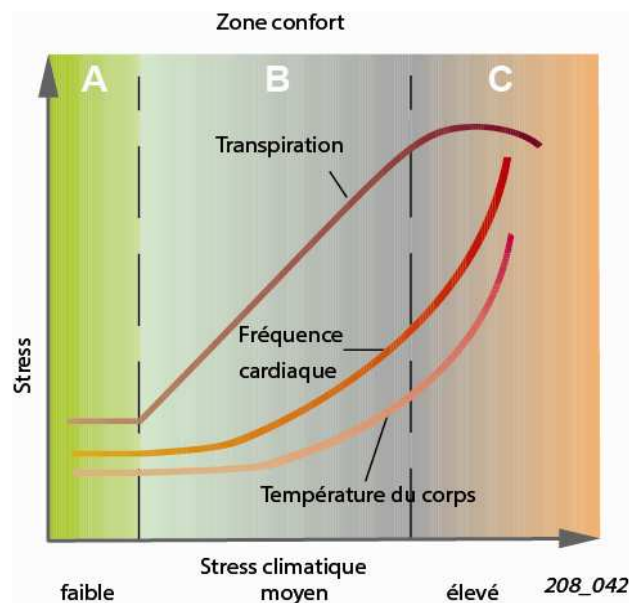


Figure II.3 : Effets d'une température défavorable dans l'habitacle.[3]

La zone C représente déjà pour le corps humain un stress difficilement supportable. La branche de la médecine étudiant les conditions du trafic reconnaît le “stress climatique” comme étant indubitablement une affection.

Des études prouvent qu’une augmentation de la température de 25 à 35 °C provoque une diminution de la perception sensorielle et de l’aptitude combinatoire de l’ordre de 20 %. On estime que cette valeur équivaut à un taux d’alcoolémie de 0,5 pour mille.

En vue de réduire ces contraintes, voire de les exclure totalement, on a mis au point le climatiseur, un système créé en vue de garantir à l’homme une température agréable – et qui de surcroît épure et déshydrate l’air.

A l’aide du climatiseur, il est possible de générer au niveau des buses de sortie d’air des températures très fortement réduites par rapport à des températures extérieures élevées.

Et cela vaut que le véhicule soit arrêté ou roule.

Un effet technique secondaire, aussi important toutefois que l’abaissement de la température, est l’absorption de l’humidité de l’air et l’épuration de l’air qui l’accompagne. Les filtres à pollen et à charbon actif sont des facteurs complémentaires d’assainissement. Cet “air propre” est particulièrement bénéfique aux personnes souffrant d’allergies.

II.1.2-Fluides frigorigènes

Le réfrigérant à bas niveau d'ébullition utilisé pour les climatiseurs automobiles est un gaz. A l'état gazeux, il est invisible, sous forme de vapeur et de liquide, il est incolore, comme l'eau.

Les réfrigérants ne doivent pas être mélangés entre eux et seul celui prescrit pour le système de conditionnement d'air respectif doit être utilisé. Pour les climatiseurs automobiles, la vente du réfrigérant R12 est, en Allemagne, interdite depuis 1995 et, à partir de juillet 1998, il ne sera plus autorisé non plus d'effectuer le remplissage d'un climatiseur avec du R12. Sur les climatiseurs de voiture actuels, le réfrigérant R134a est le seul utilisé.

- Le R134a – un hydrofluorocarbure, ne possède pas, comme le réfrigérant R12, d'atomes de chlore responsables, lors de leur décomposition, de l'endommagement de la couche d'ozone de l'atmosphère terrestre.
- La courbe de pression de vapeur du R134a s'apparente fortement à celle du R12. La puissance frigorifique est obtenue comme dans le cas du R12. Pour les climatiseurs dont le remplissage avec du R12 n'est plus autorisé, le passage au R134a est possible avec un kit de reconversion (retrofit).

Les systèmes reconvertis n'atteignent plus leur puissance frigorifique initiale.

En fonction des conditions de pression et de température dans le circuit de réfrigérant, le réfrigérant est gazeux ou liquide.

II.1.3-Etat du réfrigérant R134a dans le cycle d'un climatiseur

En complément de la courbe de pression de la vapeur, le cycle du réfrigérant renseigne, en plus du bilan énergétique, sur les changements d'état du réfrigérant sous l'effet de la pression et de la température et son retour à l'état initial. Le graphique est un extrait du diagramme d'état du réfrigérant R134a pour un climatiseur automobile. Les valeurs absolues diffèrent en fonction des besoins frigorifiques du type de véhicule. Le contenu énergétique est important pour la conception d'un climatiseur. Il indique l'énergie nécessaire au fonctionnement du processus (chaleur de l'évaporateur, chaleur du condenseur) en vue d'atteindre la puissance frigorifique prévue.

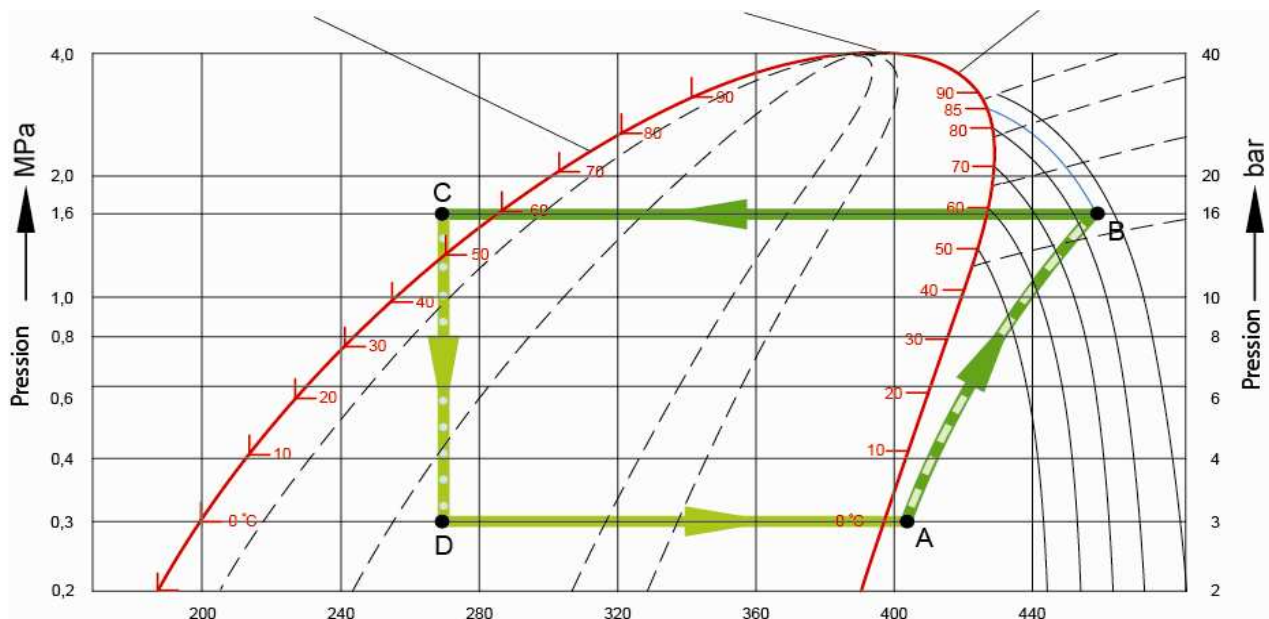


Figure II.4 : diagramme d'état du réfrigérant R134a pour un climatiseur automobile.[4]

II.1.4-Réfrigérant et couche d'ozone

L'ozone protège la surface terrestre du rayonnement ultraviolet par absorption de la majeure partie de ces rayons.

Les rayons ultraviolets décomposent l'ozone (O_3) en molécule d'oxygène (O_2) et un atome d'oxygène (O). Les atomes et molécules d'oxygène d'autres réactions combinent à nouveau pour former de l'ozone.

Ce processus se déroule dans l'ozonosphère, couche de la stratosphère, à 20 à 50 km d'altitude.

Un réfrigérant CFC tel que le R12 contient du chlore (Cl). En cas de manipulation incorrecte, la molécule de R12 – légère que l'air – monte jusqu'à la couche d'ozone.

Sous l'action du rayonnement ultraviolet, un atome de chlore du CFC est libéré et réagit avec l'ozone. L'ozone est alors décomposé et on obtient une molécule d'oxygène (O_2) et du monoxyde de chlore (ClO), qui réagit ultérieurement avec

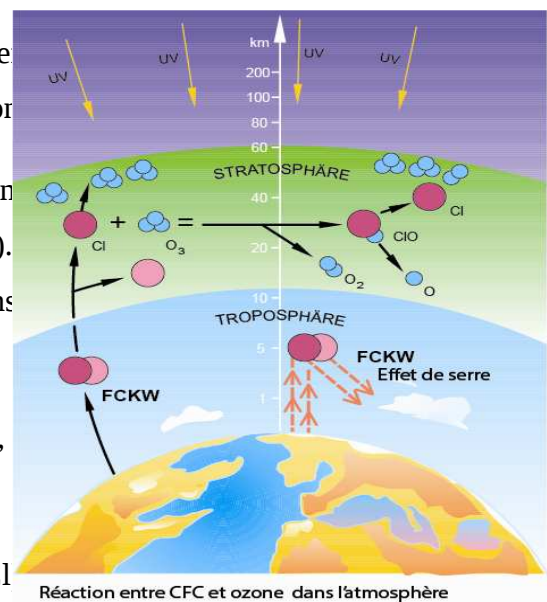


Figure II.5 : Réaction entre cfc et l'ozone dans l'atmosphère. [5]

l'oxygène et le chlore (Cl). Ce cycle peut se répéter jusqu'à 100 000 fois.

II.1.5-Réfrigérant et effet de serre :

Le rayonnement solaire est réfléchi à la surface de la terre sous forme de rayonnement infrarouge. Mais les gaz en trace –dont le principal est le CO₂– réfléchissent ces ondes dans la troposphère.

Il s'ensuit un réchauffement climatique – l'effet de serre. Les CFC sont les principaux responsables de l'augmentation croissante de la concentration de gaz en trace.

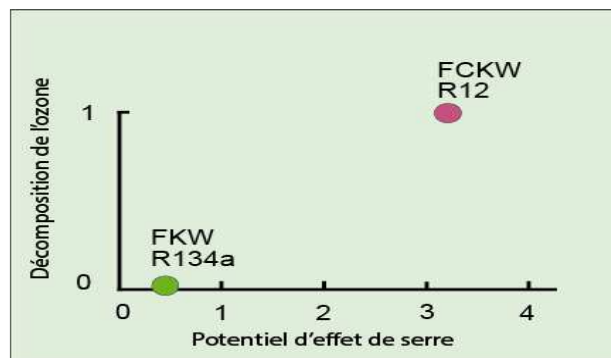


Figure II.6 : Réfrigérant et effet de serre. [6]

1 kg de R12 provoque le même effet de serre que 4000 t de CO₂.

Le R134a ne contribue que très peu à l'effet de serre. Son potentiel de décomposition de l'ozone est pratiquement nul.

II.1.6-Huile frigorigène

On a besoin pour la lubrification de l'ensemble des pièces mobiles du climatiseur d'une huile spéciale – l'huile frigorigène –, exempte d'impuretés telles que soufre, cire et humidité.

Elle doit être compatible avec le réfrigérant étant donné qu'elle se mélange en partie avec lui et circule dans le circuit de réfrigérant et ne doit pas non plus être agressive pour les étanchements du système.

L'utilisation d'autres huiles n'est pas autorisée car elles risqueraient de provoquer un plaquage de cuivre, une cokéfaction et la formation de résidus. Il s'ensuivrait une usure prématurée et une destruction des éléments mobiles.

Une huile synthétique spéciale est utilisée pour le circuit de réfrigérant rempli de R134a. Elle ne doit être utilisée qu'avec ce réfrigérant étant donné qu'elle n'est pas miscible avec les autres. L'huile frigorigène ne peut également être adaptée qu'à un type de compresseur donné.

Huile frigorigène pour R134a

Désignation : PAG = polyalkylène-glycol

Propriétés :

-  solubilité élevée avec le réfrigérant
-  bon pouvoir lubrifiant
-  exempte d'acide
-  fortement hygroscopique (absorbe l'eau)
-  non miscible avec d'autres huiles

Remarque

Cette huile ne doit pas être utilisée dans les anciens climatiseurs remplis de réfrigérant R12 étant donné qu'elle n'est pas compatible avec ce type de réfrigérant.

II.2-Fonctionnement d'un système de climatisation automobile :

II.2.1-principe de fonctionnement :

La climatisation ou la réfrigération consiste à absorber de la chaleur dans le volume à traiter, en l'occurrence l'habitacle de la voiture. Le climatiseur fonctionne comme un réfrigérateur domestique à compression. Un fluide frigorigène spécifique, qui change d'état (gazeux ou liquide) et de pression dans les différentes zones du circuit, génère un phénomène de transfert de chaleur (Fig. II.3).

Pour comprendre le principe physique de fonctionnement, on peut suivre sur (la figure II.3) le parcours du fluide frigorigène en partant du compresseur. Le fluide frigorigène à l'état gazeux est comprimé donc s'échauffe ; il peut atteindre par exemple 90° C mais tout dépend de ses propriétés physiques. Sorti du compresseur, le gaz arrive dans le condenseur où il rencontre à travers cet échangeur la source chaude, sa température baisse (désurchauffe) par exemple jusqu'à 45°C (la source chaude est plus froide que le fluide), puis il se liquéfie.

Deux phénomènes de transfert de chaleur sont alors mis en jeu : un abaissement de température qui représente environ 15% de l'énergie totale échangée dans le condenseur et une

quantité de chaleur échangée grâce à la chaleur latente de liquéfaction. En effet, au cours du changement d'état (gaz / liquide), le fluide va céder de la chaleur à température constante (45°C).

Suivant le dimensionnement de l'échangeur (condenseur), le fluide entièrement liquide peut perdre quelques degrés (par exemple de 45°C à 40°C). Le fluide frigorigène liquide passe à travers un détendeur, sa pression chute (par exemple de 20 bars à 2 bars), ce qui provoque une baisse de température brutale du fluide (-10°C) et une évaporation partielle. A ce stade le fluide frigorigène constitue un mélange de gaz et de liquide (gouttelettes). En contact avec la source froide (à travers l'évaporateur), le fluide va bouillir (évaporation : transformation en gaz) en absorbant de la chaleur à température constante (-3°C : surchauffe ; le fluide est plus froid que la source froide). L'évaporation représente plus de 80% de l'énergie mise en œuvre pour capter de la chaleur à la source froide, le reste provient de la détente du fluide. En sortant de l'évaporateur, le gaz est aspiré par le compresseur et le cycle se poursuit.

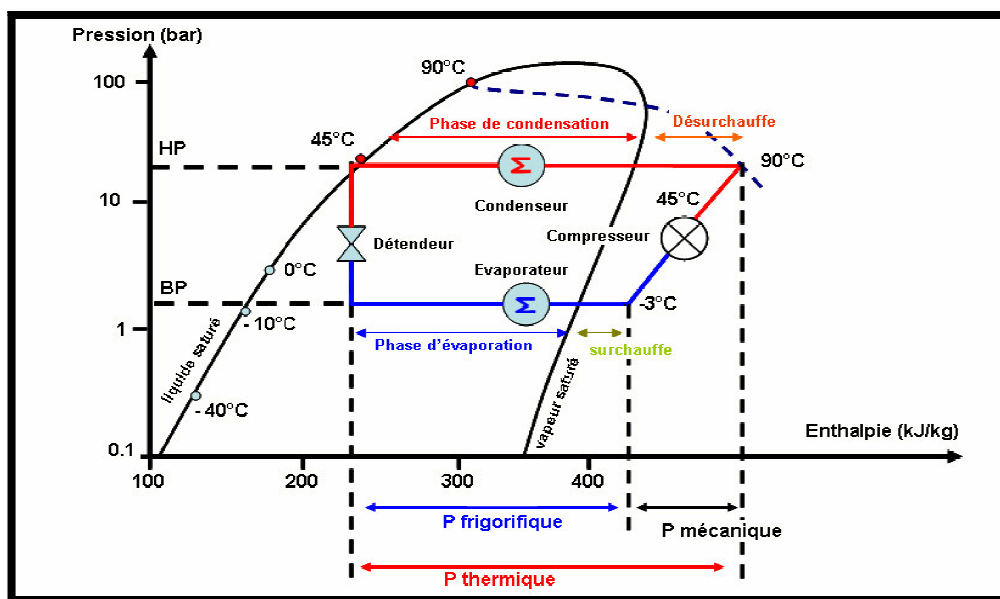


Figure II.7: Exemple de cycle thermodynamique idéal dans le diagramme enthalpique de Molier[7]

II.2.2-Les différents processus de cycle thermodynamique :

II.2.2.1-Compression :

La compression est une transformation isentropique : le point de sortie est situé sur l'isobare et l'isentrope. Pendant la compression, le fluide absorbe une quantité d'énergie équivalente au travail fourni par le compresseur :

$$W = H_2 - H_1 \text{ (kJ/kg)}$$

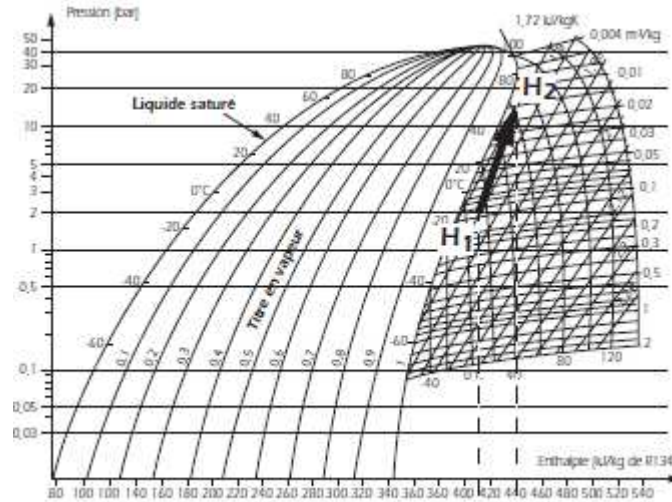


Figure II.8: processus de compression.[8]

II.2.2.2-Condensation :

La condensation est une transformation isobare. A la sortie du condenseur, le fluide est juste saturé (100% liquide) et reste à la même température pendant cette transformation. Son rôle est d'évacuer la chaleur prise à l'évaporation et la chaleur due au travail de compression.

La quantité de chaleur évacuée est :

$$Q_C = H_2 - H_3 \text{ (kJ/kg)}$$

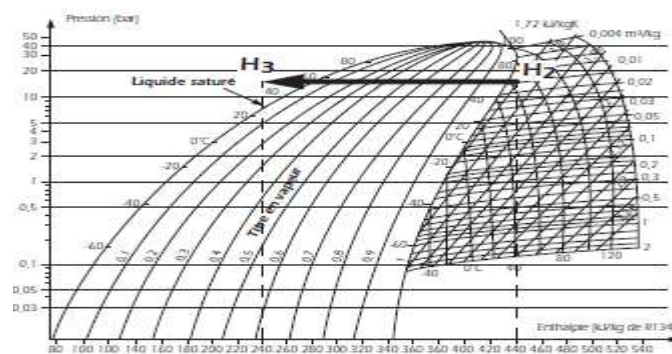


Figure II.9 : processus de condensation.[9]

II.2.2.3-Détente :

La détente se produit sans échange de chaleur. C'est une transformation isenthalpique. La détente diminue la pression. Une partie du fluide s'est vaporisée lors de cette transformation. Dans notre cas, on obtient un mélange 40% vapeur/60% liquide en sortie détendeur.

II.2.2.4-Vaporisation :

L'évaporation a pour rôle essentiel d'absorber la chaleur.

Pour pouvoir réaliser l'évaporation, le fluide va capter l'énergie de l'air ambiant à l'habitacle véhicule.

L'énergie ou chaleur absorbée est dans l'exemple :

$$Q_V = H_1 - H_4 \text{ (kJ/kg)}$$

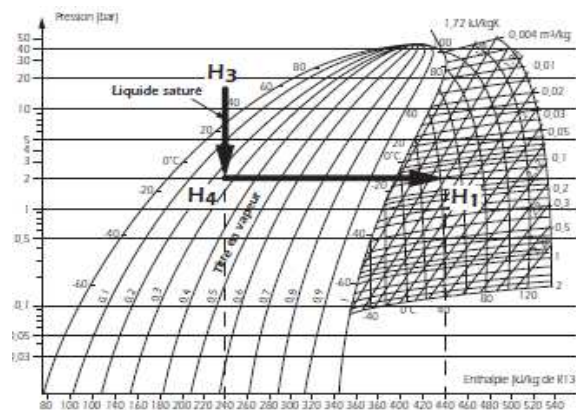


Figure II.10 : *Processus de détente et vaporisation.*[10]

II.2.3- circuit thermodynamique :

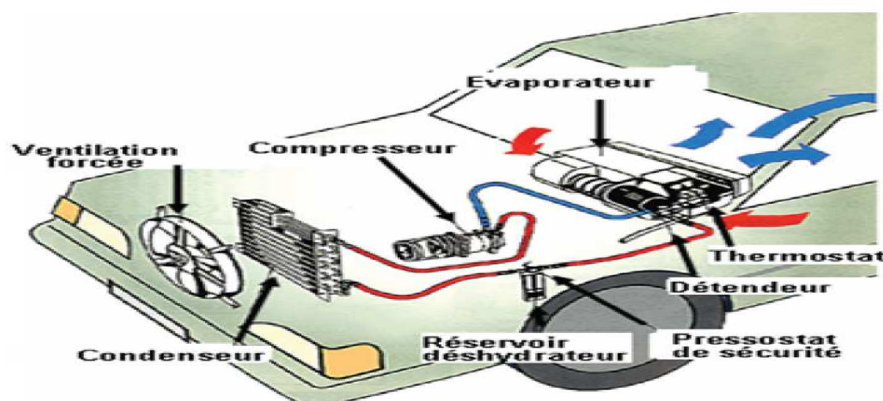


Figure II.11: *représentation des différents organes constituant une climatisation automobile.*[11]

II.2.3.1-rôle des éléments de système de climatisation :

Un système de climatisation est composé de:

- ❖ Un circuit fermé contenant
 1. un liquide frigorigène R 134a
- ❖ 4 éléments de base:
 2. Compresseur
 3. Condenseur
 4. Détendeur
 5. Évaporateur
- ❖ Éléments complémentaires
 6. Déshydrateur
 7. Thermostat+Sonde
 8. Pressostat

1-Compresseur :

Les compresseurs équipant les systèmes de conditionnement d'air automobiles sont des compresseurs volumétriques lubrifiés.

Ils ne fonctionnent que lorsque le climatiseur est en circuit, cette opération .tant commandée par un coupleur électromagnétique.

Le compresseur élève la pression du réfrigérant, dont la température augmente.

Sans cette élévation de pression, une détente ultérieure et donc le refroidissement du réfrigérant dans le climatiseur ne seraient pas possibles.

Pour la lubrification, il est fait appel. Une huile frigorigène spéciale dont environ 50 % restent dans le compresseur tandis que le reste circule avec le réfrigérant dans le circuit.

Une soupape de securit, de surpression, généralement montée sur le compresseur, protège le système en cas de pression excessive.

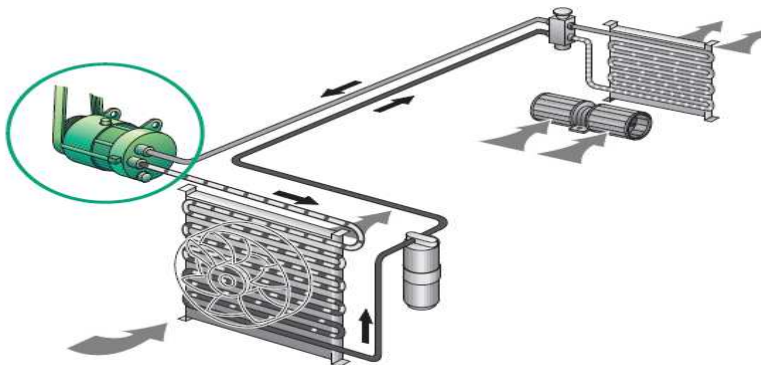


Figure II.12 : présentation de compresseur.[12]

✓ Processus de compression :

Le compresseur aspire via l'évaporateur du réfrigérant froid, gazeux et a basse pression.

L'état gazeux est "vital" pour le compresseur, car le réfrigérant liquide ne peut pas être comprimé et détruirait le compresseur (à la façon d'un coup de bélier sur le moteur).

Le compresseur comprime le réfrigérant et le refoule sous forme de gaz chaud en direction du condenseur (coté haute pression du circuit de réfrigérant).

Le compresseur constitue ainsi l'interface entre les cotés basse et haute pression du circuit de réfrigérant.

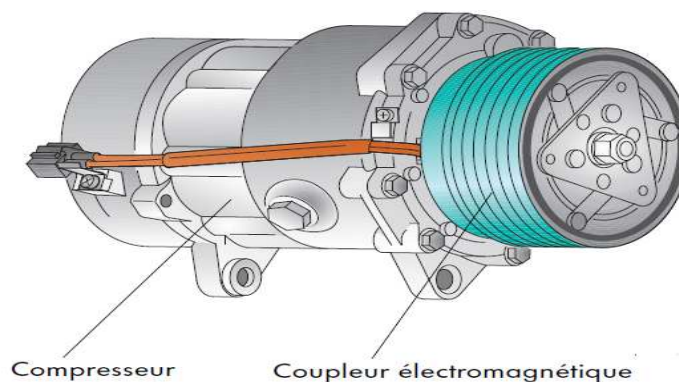


Figure II.13 : coupleur électromagnétique.[13]

✓ Fonctionnement du compresseur

Les compresseurs des climatiseurs fonctionnent selon différents principes :

- ✚ compresseur à piston
- ✚ compresseur spiral
- ✚ compresseur à palettes
- ✚ compresseur a disque en nutation

Nous traiterons ici le compresseur, disque en nutation.

Le mouvement rotatif de l'arbre d'entraînement est converti par le disque en nutation en un mouvement axial = course des pistons.

Suivant le type, il peut s'agir de 3 à 10 pistons centrés autour de l'arbre d'entraînement.

A chaque piston est assigné une soupape d'admission/de pression.

Ces dernières s'ouvrent/se ferment automatiquement selon la cadence de fonctionnement.

Le climatiseur est conçu pour le régime maximum du compresseur.

La puissance du compresseur dépend à son tour du régime-moteur.

Des différences de régime du compresseur de 0 à 6000/min peuvent alors se produire.

Cela influe sur le remplissage de l'évaporateur et donc la puissance frigorifique du climatiseur.

En vue d'une adaptation aux différents régimes du moteur, à la température ambiante ou aux températures à l'intérieur de l'habitacle sélectionnées par le conducteur au besoin de réfrigération donc -, on a mis au point des compresseurs à régulation de puissance à volume variable.

Cette variation du volume s'effectue par modification de l'angle du disque en nutation.

Sur le compresseur à volume constant, l'adaptation au besoin frigorifique est réalisée par mise en et hors circuit périodique. L'aide du coupleur électromagnétique.

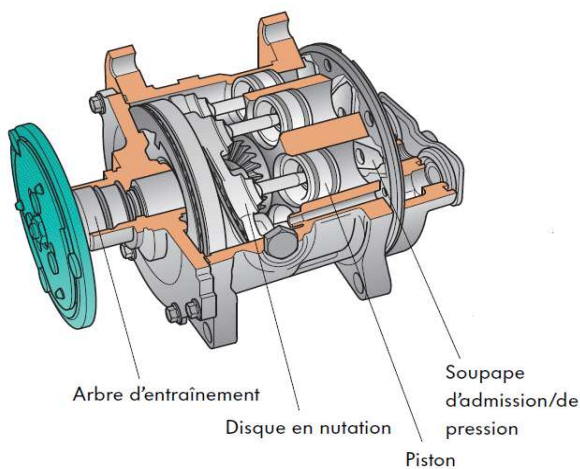


Figure II.14 : compresseur à disque en nutation.[14]

2-Condenseur :

Le condenseur constitue le "radiateur" du climatiseur.

✓ Constitution du condenseur

Il est constitué d'un tube en forme de serpentín et garni de lamelles. Cela permet d'obtenir une surface de refroidissement importante et une bonne transition de chaleur.

Le condenseur est, après mise en circuit du climatiseur, refroidi par le ventilateur de radiateur en vue d'assurer la circulation dans le circuit de réfrigérant. Il est toujours monté en amont du radiateur.

Cela permet d'augmenter le rendement du condenseur.

L'échange de chaleur dans le condenseur s'effectue par refroidissement de l'air. Le refroidissement est obtenu par le vent du à la marche du véhicule et le ventilateur du radiateur

Ainsi que, suivant la version, par un ventilateur supplémentaire. Le ventilateur se met généralement à tourner lorsque l'on met le climatiseur en circuit. L'action du contacteur de pression constitue une exception ; dans ce cas, la mise en circuit est temporisée et a lieu selon une pression donnée.

Des impuretés au niveau du condenseur réduisent le débit d'air, ce qui peut avoir des influences néfastes sur le pouvoir réfrigérant comme sur le refroidissement du moteur.

✓ **Fonctionnement**

Du réfrigérant chaud sous forme gazeuse, a une température se situant entre 50 et 70 °C, rentre par le haut du condenseur.

Les tubes et ailettes du condenseur absorbent la chaleur. De l'air extérieur frais est dirigé au dessus du condenseur, il absorbe la chaleur et le réfrigérant gazeux est refroidi.

Lors du refroidissement, le réfrigérant se condense a une température donnée et passe a l'état liquide. Il s'écoule sous forme liquide par le bas du condenseur.

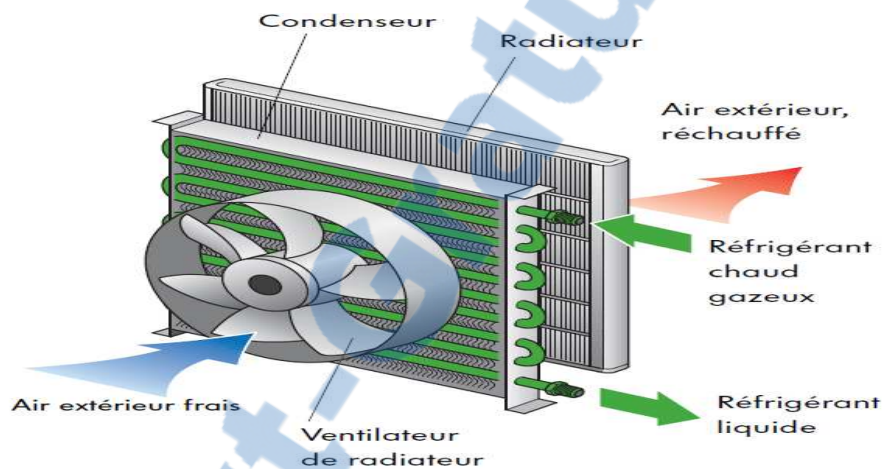


Figure II.15: représentation de condenseur.[15]

3-Réservoir de liquide et déshydrateur :

Le réservoir de liquide sert, dans le circuit de réfrigérant équipé d'un clapet de détente, de vase d'expansion et de réservoir de réfrigérant.

En cas de conditions de services différentes telles que sollicitation due a la chaleur au niveau de l'évaporateur et du condenseur, régime du compresseur, la quantité de réfrigérant pompée dans le circuit varie.

Le réservoir de liquide est incorporé dans le circuit en vue de compenser ces variations.

Le déshydrateur se charge de la liaison chimique de l'humidité qui a pénétré dans le circuit de réfrigérant durant le montage.

Suivant la version, il peut absorber de 6 a 12 g d'eau. La quantité absorbée dépend de la température. Elle augmente lorsque la température baisse. Les particules métalliques provenant du compresseur, des impuretés venant du montage et autres s'y déposent également.

✓ **Fonctionnement**

Le réfrigérant liquide en provenance du condenseur pénètre latéralement dans le réservoir. Il y est collecté, traverse-le déshydrateur et s'écoule en passant par le tube montant en un flux continu, sans interruption et exempt de bulles, en direction du clapet de détente.

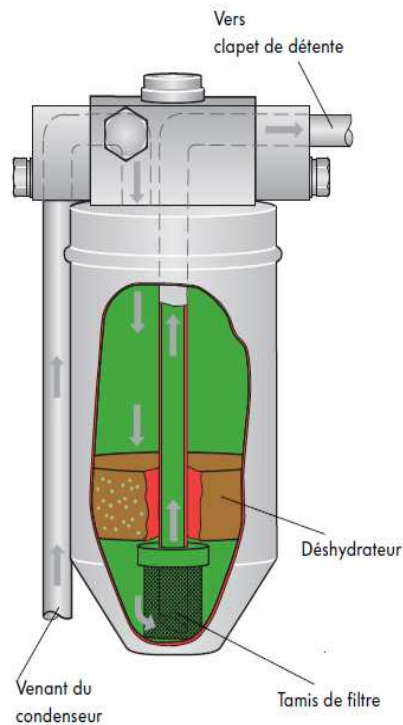


Figure II.16 : présentation interne d'un déshydrateur.[16]

4-Evaporateur

L'évaporateur fonctionne selon le principe d'un échangeur de chaleur.

Il fait partie du système de climatisation monté dans le caisson d'eau. Lorsque le climatiseur est en circuit, la chaleur de l'air circulant entre les ailettes de l'évaporateur froid est absorbée. Cet air est alors refroidi, séché et nettoyé.

✓ **Fonctionnement**

Le réfrigérant libéré par le clapet de détente est détendu dans l'évaporateur, qui se refroidit alors fortement.

Il est transformé en gaz par ébullition.

Lors de l'ébullition dans l'évaporateur, les températures sont nettement inférieures au point de congélation de l'eau.

Le réfrigérant prélève dans son environnement la chaleur nécessaire à l'évaporation dans l'air traversant l'évaporateur.

Cet air "refroidi" est acheminé dans l'habitable.

L'humidité de l'air refroidi se dépose dans

L'évaporateur aux endroits où la température est inférieure au point de rosée, ce qui revient à dire qu'il se condense. De l'eau de condensation est produite.

L'air est "séché".

Le climat dans l'habitable s'en trouve optimisé et l'on obtient rapidement un air sain.

Les particules en suspension contenues dans l'air se déposent elles aussi avec l'humidité sur l'évaporateur.

L'évaporateur "épure" aussi l'air.

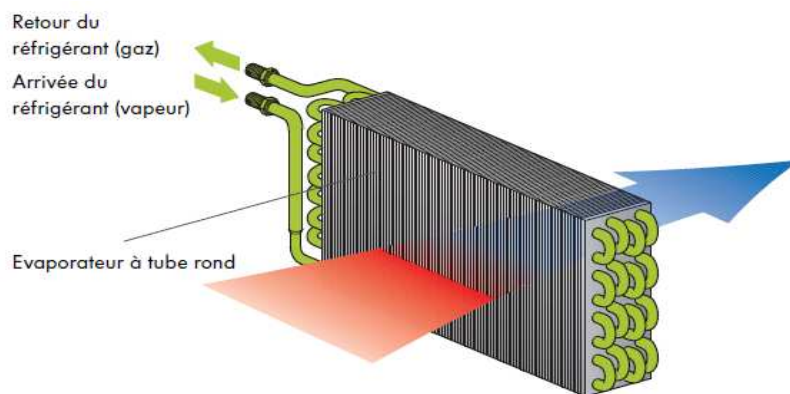
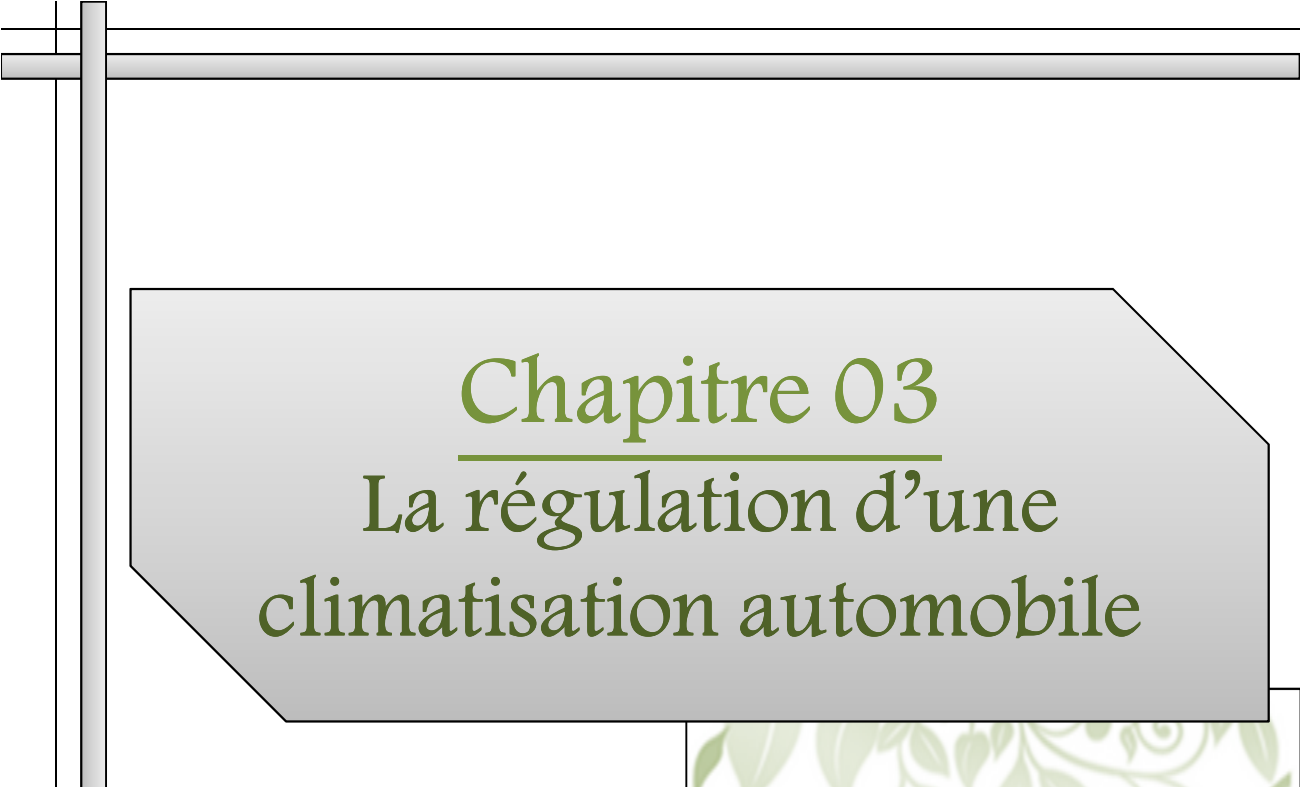


Figure II.17 : présentations d'un évaporateur.[17]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une description d'un système de climatisation automobile. Le principe de son fonctionnement si le même que celui du réfrigérateur «transformation de température de liquide » à l'aide des différents organes.

D'autre part, cette partie de notre mémoire nos a permis de connaitre les différents processus de climatisation et comme passer en revue les différents types des organes disponible qui sert a réaliser les besoin de climatiseur et assurer le bon déroulement des étapes de refroidissement.



Chapitre 03

La régulation d'une climatisation automobile



Introduction :

La régulation est essentielle pour les circuits frigorifiques et permet de nombreuses actions nécessaires au fonctionnement de système. La régulation peut également compenser un certain nombre de mauvais fonctionnements liés à la conception ou à la mise en œuvre de ces circuits. Toutefois l'objectif principal est d'adapter au plus proche la production aux besoins.

Le système mis en œuvre pour la régulation est constitué principalement :

- ❖ D'un capteur (température, pression, etc....).
- ❖ D'un régulateur.
- ❖ D'un organe de réglage.

Le capteur va mesurer la grandeur à contrôler et envoyer l'information au régulateur.

Le régulateur compare l'information avec le point de consigne. Le résultat de cette comparaison est appelée écart ou bien erreur. Le régulateur va appliquer un algorithme de régulation à l'erreur afin de transmettre un signal à l'organe de réglage dont la fonction est d'agir sur capacité dans le but de corriger l'erreur.

L'organe de réglage peut être une vanne de réglage, un compresseur, etc.

III.1-présentation de système de climatisation automobile :

Offrir aux occupants du véhicule un confort thermique optimum, par une régulation électronique, prenant en compte les diverses perturbations climatiques que peut subir l'air de l'habitacle.

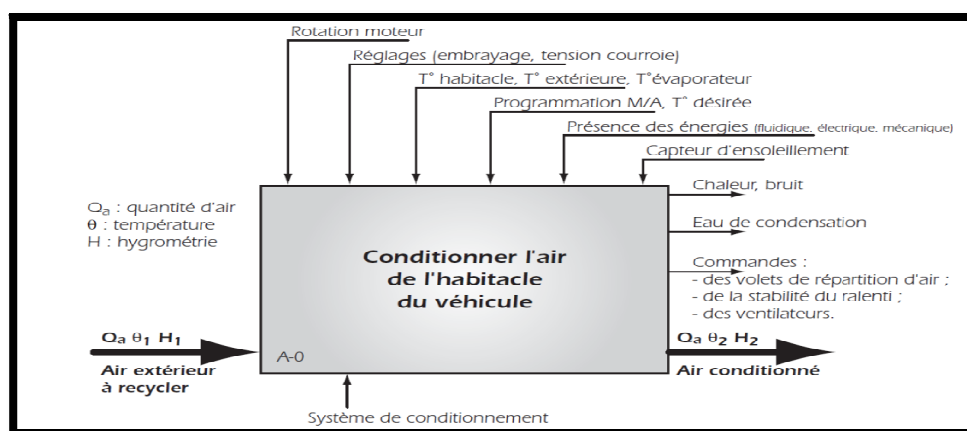


Figure.III.1: conditionner l'air de l'habitacle du véhicule [1].

Le système d'air conditionné à régulation automatique permet d'ajuster automatiquement le point de fonctionnement désiré par l'utilisateur.

L'ensemble du système agit sur :

- Le débit d'air ;
- La température de l'air ;
- Le recyclage de l'air à l'intérieur du véhicule ;
- La répartition aéraulique au sein de l'habitacle.

La température désirée ainsi que le degré d'hygrométrie sont obtenus par mixage d'air froid et d'air chaud.

L'air froid est fourni par le système de réfrigération et l'air chaud par l'aérotherme du circuit de chauffage de l'habitacle monté sur le circuit de refroidissement du moteur.

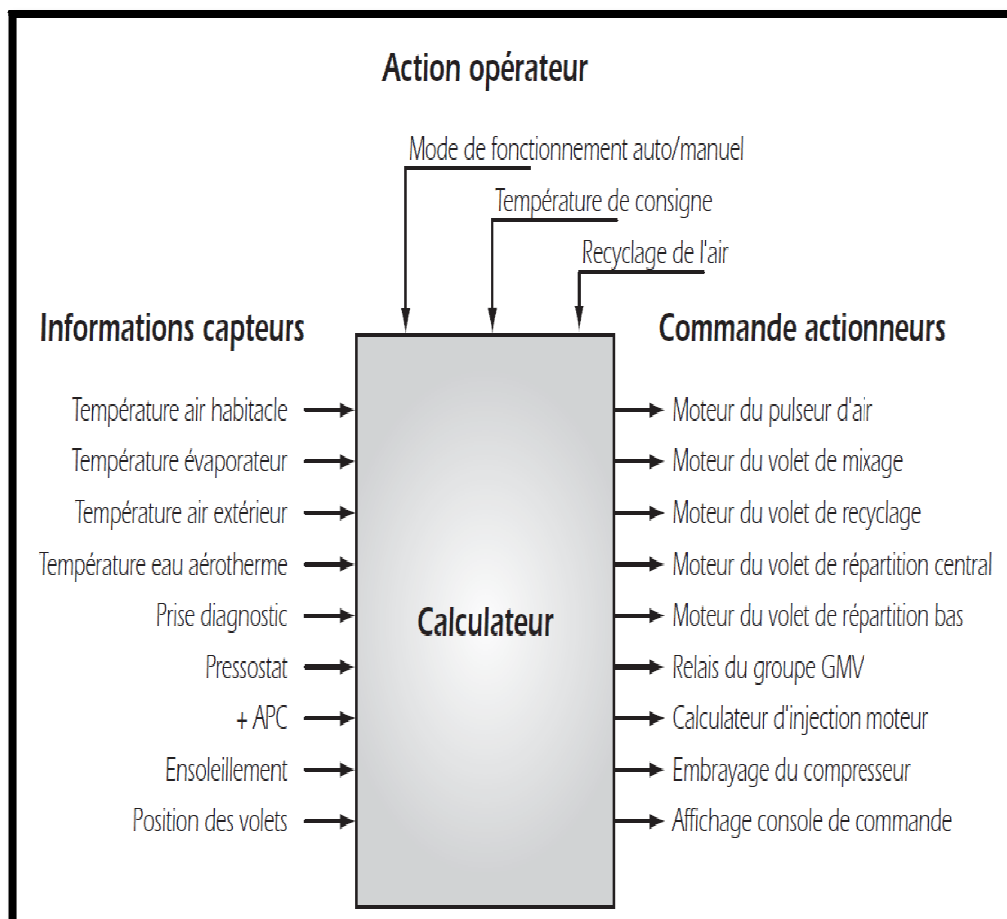


Figure.III.2:les composants de calculateur [1]

III.2-Composants du système:

III.2.1-Capteur de température de l'air extérieur :

✓ Description

Le capteur est du type NTC peut être relié, en fonction du type de véhicule, soit directement au dispositif de gestion du climatiseur, soit à la ligne CAN par le nœud de la porte du conducteur

✓ Caractéristiques :

Le capteur, du type NTC, se distingue par une plage de fonctionnement de -40°C à 80°C et fournit les valeurs de résistance suivantes lorsque la température varie.

✓ Mise à jour de la mesure :

Le système de gestion électronique contrôle la valeur de résistance du capteur et met à jour la lecture de la température dans les cas suivants :

- température relevée supérieure à celle mémorisée. La mise à jour se produit uniquement si la vitesse du véhicule est supérieure ou égale à 30 km/h et si le relèvement persiste au moins pendant une minute ;
- température relevée inférieure ou égale à celle mémorisée. La mise à jour se produit immédiatement.

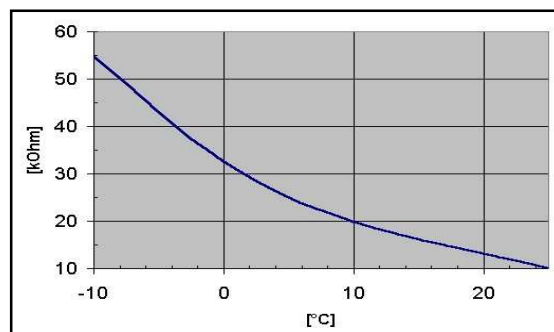


Figure III.3 : Valeurs de résistance prises par le capteur de température extérieure [2]

III.2.2-Capteur de température de l'air climatisé :

Il peut y avoir soit quatre, soit deux capteurs de l'air climatisé selon que l'installation de climatisation est étudiée de manière à ce qu'elle fasse ou non la distinction entre la zone du conducteur et celle du passager en ce qui concerne la gestion des paramètres climatiques.

Dans tous les cas, les capteurs sont du type NTC et sont installés à proximité des bouches d'aération. Leur plage de fonctionnement est comprise entre -40° et 100°C .

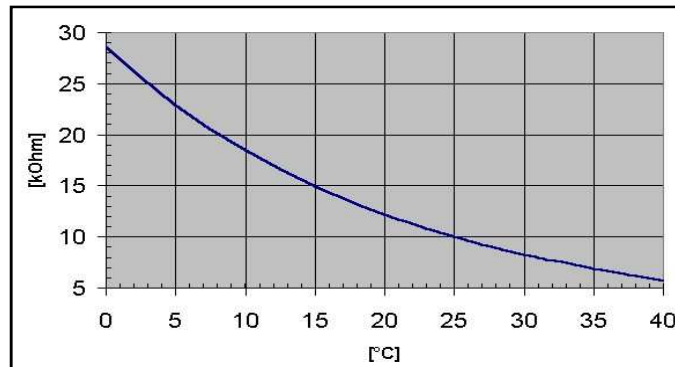


Figure III.4 : Graphique des valeurs de résistance des capteurs de température de l'air climatisé [3]

III.2.3 Capteur de température de l'air de l'habitacle

Le capteur de température de l'air de l'habitacle est généralement intégré dans le tableau de bord et se compose d'un capteur du type NTC accompagné d'un petit électro ventilateur qui assure une circulation minimale de l'air de manière à ce que le dispositif ne mesure pas uniquement le volume d'air qui stagne dans le conteneur du capteur.

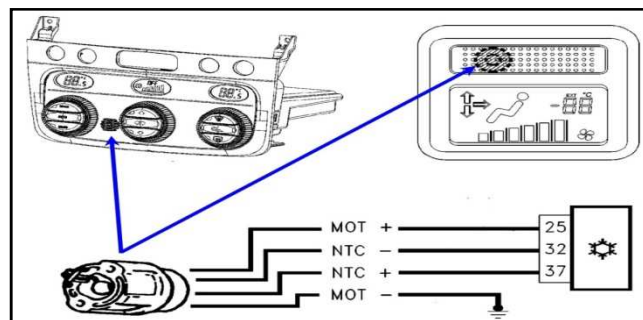


Figure III.5 : capteur de l'air [4]

✓ Caractéristiques :

La caractéristique résistance/température du capteur NTC est identique à celle qui se rapporte au capteur de température de l'air climatisé.

Le ventilateur installé sur le capteur est du type brushless à six aubes. Sa vitesse de rotation, qui s'élève à 3.600 ± 600 tours/mn, crée une vitesse de circulation de l'air de 2 m/s.

III.2.4-Capteur de rayonnement solaire :

Le capteur de rayonnement solaire se compose en général de deux photodiodes qui relèvent l'intensité de la lumière solaire côté conducteur et passager.

La photodiode est alimentée (+5V) et donne l'indication de l'intensité lumineuse sous la forme de courant.

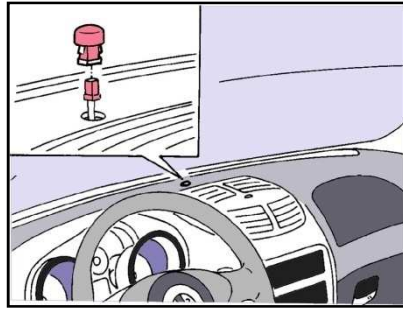


Figure III.6 : capteur de rayonnement solaire[5]

✓ **Fonctionnement**

La photodiode se compose d'un joint à semi-conducteur dont la polarisation est inverse. La lumière solaire qui frappe le joint fournit l'énergie nécessaire aux électrons pour vaincre la polarisation inverse et pour passer ensuite de la cathode à l'anode.

Si l'on mesure l'intensité de ce courant, on obtient donc l'évaluation de l'énergie solaire.

III.2.5-Capteur d'embouage :

Le rôle du capteur d'embouage est de contrôler le niveau de dépôt de vapeur d'eau sur la surface interne du pare-brise et, éventuellement, d'orienter de manière opportune et automatique le flux d'air pour rétablir la visibilité du conducteur.

✓ **Fonctionnement**

Le capteur évalue par une technique à infrarouge la réflexion sur le pare-brise. En pratique, un émetteur d'infrarouges éclaire une petite zone tandis qu'un récepteur mesure la partie qui est réfléchiée par la vitre.

Cette mesure est ensuite transformée en un signal PWM qui informe, parallèlement la durée de l'impulsion, le dispositif de commande électronique de l'indice d'embouage de la vitre.

- ❖ La période du signal PWM est de 80 ms.
- ❖ La tension d'alimentation admise est comprise entre 10 V et 16 V.
- ❖ La température de service est située entre -20 °C et 70 °C.

III.2.6-Capteur antigivre:

Il y a un capteur antigivre sur les installations munies d'un compresseur à cylindrée fixe. En effet, dans ce cas, le compresseur ne contrôle pas directement la pression au niveau de l'aspiration.

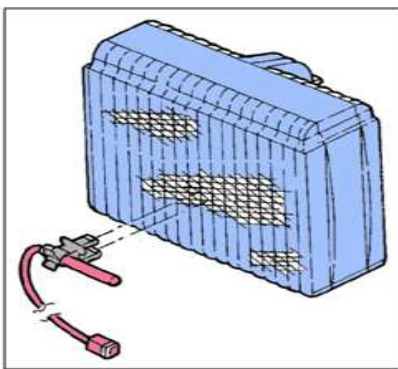
✓ **Criticité:**

Si le refroidissement de l'évaporateur est trop important, cela peut provoquer la congélation du dépôt de vapeur d'eau sur les ailettes en aluminium. Ce givre risque de limiter l'efficacité de l'installation de climatisation et d'endommager non seulement l'évaporateur mais aussi le compresseur suite à la présence d'une pression trop importante dans le circuit d'aspiration.

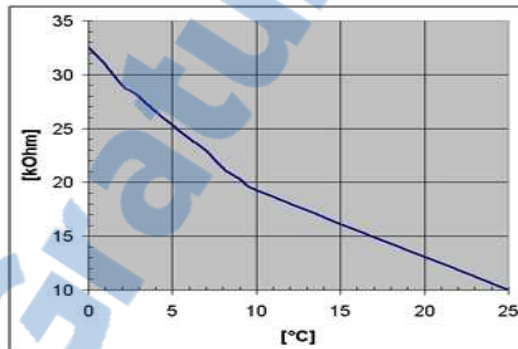
✓ **Fonctionnement**

L'unité électronique, à travers les valeurs de résistance relatives à ce capteur du type NTC, désenclenche, si nécessaire, le joint électromagnétique.

La plage de fonctionnement est comprise entre -5 et 20 °C.



Capteur antigivre.



Valeurs de résistance lorsque la température de l'évaporateur varie.

III.2.7-Groupe mélangeur:

Le flux d'air qui provient de l'extérieur du véhicule ou de la recirculation converge vers le groupe mélangeur. C'est dans ce dispositif qu'a lieu l'ensemble du traitement climatique de l'air et sa distribution par les bouches d'aération de l'habitacle.

Dans le groupe, il y a donc : l'évaporateur, le radiateur, le filtre anti pollen, les capteurs de température de l'air mélangé, etc.

Remarque

Le nombre et la position des volets de mélange/distribution présentent quelques différences en ce qui concerne les systèmes munis d'une différenciation

RIZONE de la climatisation

III.2.8-L'électro ventilateur :

L'électro ventilateur se compose d'un moteur alimenté en courant continu sans balais (brushless) commandé par une unité électronique de puissance qui reçoit les commandes transmises par le dispositif de gestion du climatiseur sous la forme d'un signal PWM.

III.2.8.1 Caractéristiques :

L'absence de balais et de collecteur permet :

- ✚ de limiter les inerties et l'usure ;
- ✚ d'éviter les pertes électriques et mécaniques du collecteur ;
- ✚ d'augmenter la fiabilité, la puissance et l'accélération ;
- ✚ de réduire le bruit et la consommation

III.2.9-Déclencheurs volets :

La gestion du déplacement des volets de mélange et de distribution de l'air est entièrement confiée aux moteurs électriques.

III.2.9.1 Déclencheurs des installations traditionnelles :

Sur les installations traditionnelles, ces déclencheurs électriques se composent de moteurs électriques en courant continu qui agissent sur la position des volets par le biais d'un goujon d'entraînement. Le contrôle de la position prise par le volet dans ce cas peut être effectué soit par la différence de courant d'absorption du moteur une fois qu'il est en fin de course, soit par un potentiomètre solidaire de l'axe du volet.

III.2.9.2 Déclencheurs montés sur les nouvelles installations :

Sur les dernières installations, les déclencheurs se composent de moteurs pas à pas qui agissent sur la position des volets par le biais des accouplements de démultiplication. Dans ce cas, le contrôle de la position est intrinsèque de la commande digitale des déclencheurs et il suffit de contrôler le courant d'absorption pour vérifier la présence d'obstacles éventuels.

III.2.10-Filtre anti pollen :

L'air qui entre dans l'habitacle, après l'évaporateur, traverse un élément filtrant qui joue deux rôles :

- filtre à particule pour bloquer les poussières et le pollen ;
- filtre à charbons actifs pour retenir les agents polluants présents dans l'air.

La fonction du filtre à charbons actifs est également de réduire les mauvaises odeurs provoquées par le dépôt d'humidité qui se crée en général sur l'évaporateur.

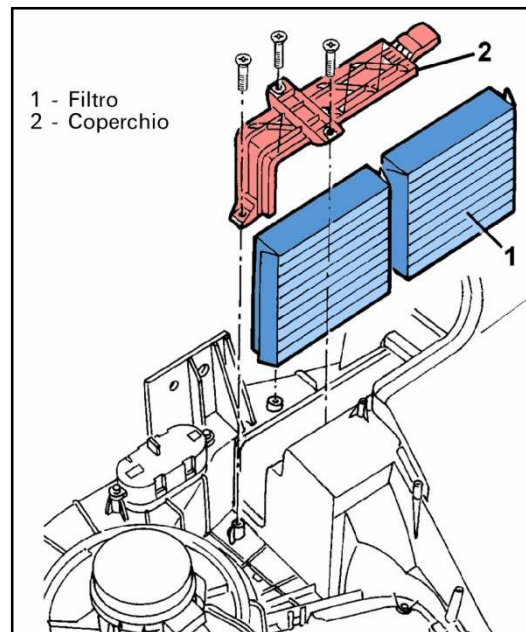
✓ **Caractéristiques :**

- grande capacité de filtration

Le filtre retient plus de 50% des particules dont les dimensions sont comprises entre 0,5 et 1 micron, plus de 80% de celles mesurant entre 1 et 1,5 micron, et plus de 98% de celles qui dépassent 2 microns.

➤ Facilité de remplacement

Le filtre est inséré dans un logement auquel on peut facilement accéder en ne démontant qu'un couvercle de protection.



Filtre anti pollen et bride de fixation.

III.2.11-Radiateur réchauffeur :

Pour réchauffer l'air déshumidifié par l'évaporateur, on utilise le liquide de refroidissement du moteur. Ce liquide, après être passé dans un radiateur placé après l'évaporateur, réchauffe l'air et l'amène à la température requise par le système.

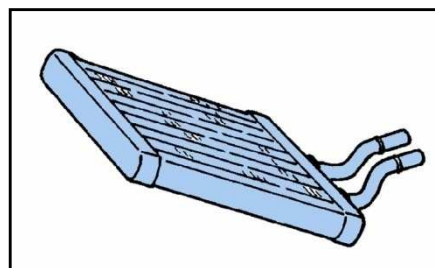


Figure III.7 : radiateur [6]

III.2.12-Réchauffeur supplémentaire P.T.C. :

Il se compose d'une résistance de 700 Watts qui peut être ajoutée, sur les véhicules JTD, pour réchauffer plus rapidement l'habitacle. Il ne peut se déclencher que quand le moteur est en mouvement (régime > 700 tours/mn).

Tension au connecteur **A** : 33% de la puissance maximale.

Tension aux connecteurs **B** et **C** : 66% de la puissance maximale

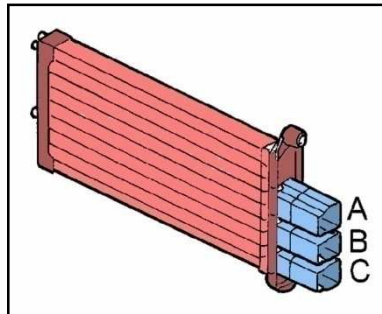


Figure III.8 : réchauffeur [6]

III.2.13-Réchauffeur autonome supplémentaire :

Les véhicules modèles 2.4JTD peuvent être équipés de ce dispositif dont le rôle est d'accélérer le réchauffement du liquide de refroidissement du moteur lorsque la température extérieure est particulièrement basse.

Ce dispositif réchauffe l'eau à l'aide d'une flamme alimentée par le carburant fourni par une électropompe réservée à cet effet.

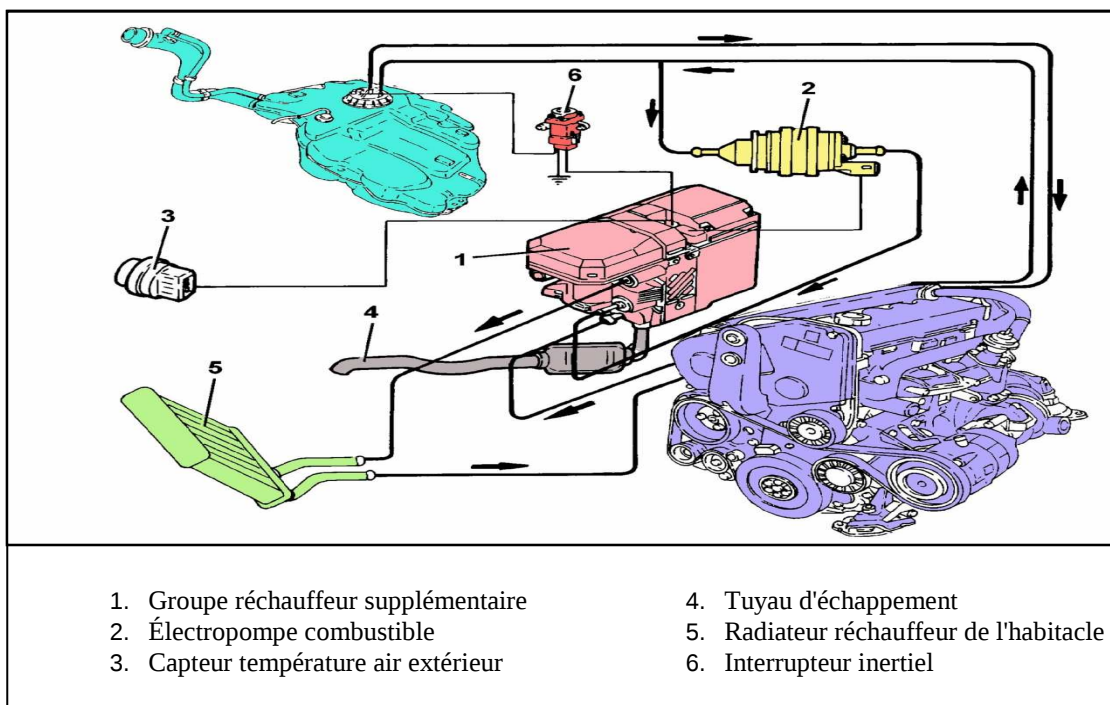


Figure.III.9-Schéma global d'un véhicule équipé d'un réchauffeur autonome supplémentaire [7]

III.2.14-Panneaux de commande de l'installation :

Le panneau de commande de l'installation du climatiseur dépend du type de l'installation et de ses composants. Par exemple, une installation où les volets de mélange/distribution sont commandés manuellement pourra être dotée du panneau représenté sur la figure III.5 tandis qu'une installation de climatisation automatique pourra être équipée des panneaux représentés sur la figure III.6 et III.7.

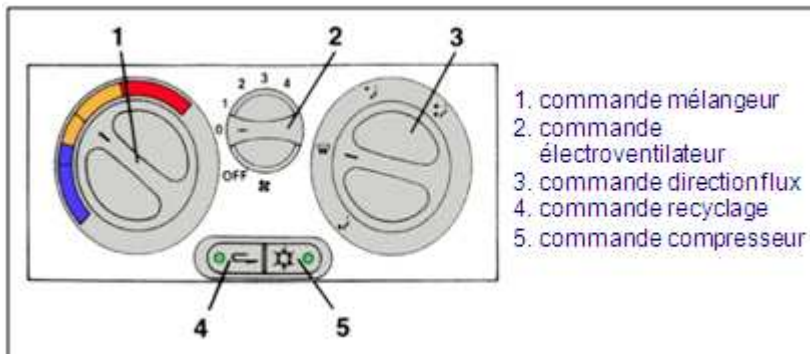


Figure.III.10 : Panneau de l'installation d'air conditionné avec commandes manuelles [8]

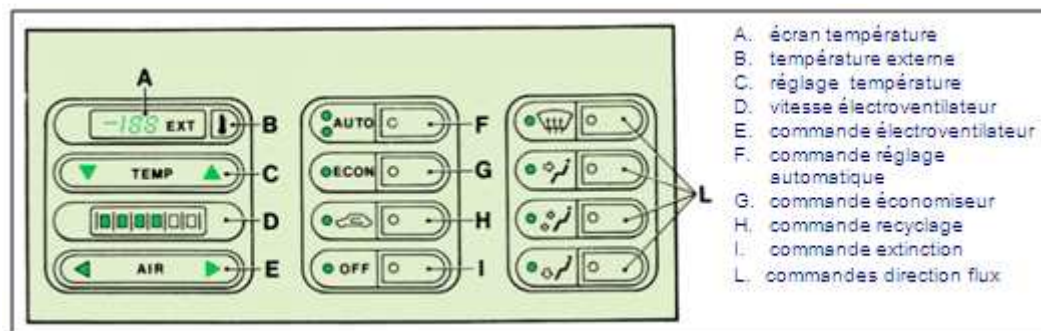


Figure.III.11 : Panneau de l'installation d'air climatisé avec commandes électroniques [8]



Fig.III.12: Panneau de l'installation d'air climatisé avec commandes électroniques et système DUAL-ZONE [8]

III.3-Les organes mécaniques de régulation :

Les organes mécaniques de régulation sont un grand classique des installations frigorifiques. Certains de ces appareils ont une conception éprouvée depuis plusieurs décennies. Ils peuvent être utilisés dans un rôle de sécurité ou de la régulation.

On distingue les appareils dédiés à la sécurité ou la régulation en fonction du point de consigne pour l'action donnée. Ainsi un appareil dont le point de coupure porte le nom d'appareil à arrêt constant : il est généralement destiné à la sécurité. En revanche, lorsque le point de consigne est l'enclenchement, on appelle l'appareil à départ constant et on l'affecte généralement à la régulation.

Les appareils de sécurité peuvent être à réarmement automatique ou manuel. Dans ce dernier cas, il faudra une action manuelle pour désarmer l'accrochage mécanique de contact électrique.

III.3.1 Thermostat :

Un thermostat est un système permettant de maintenir un appareil à une température relativement stable et peut être utilisé pour les applications telles que :

- Réguler la température de milieu à réfrigérer.
- Contrôler la fin d'un dégivrage.
- Contrôler la température de refoulement
- Réguler la température

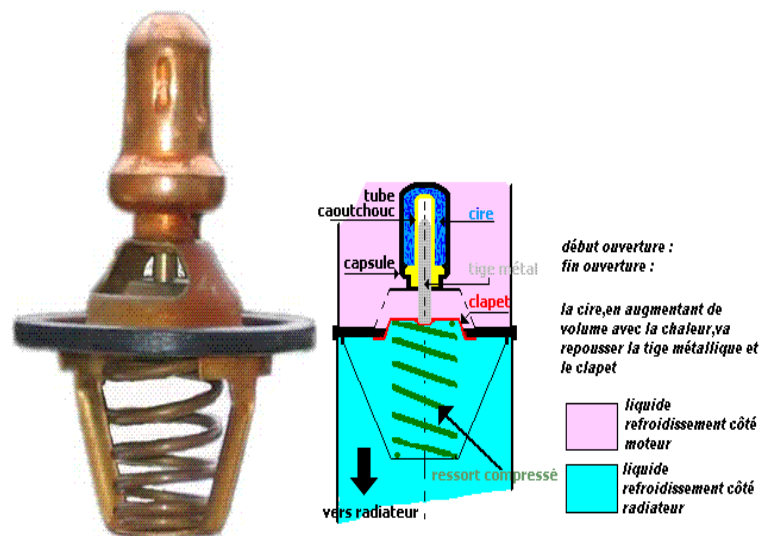


Figure.III.13: thermostat. [9]

III.3.2-Pressostat multi niveau:

La fonction du pressostat multi niveau est de contrôler la haute pression à l'intérieur du circuit frigorifique. C'est pour cette raison qu'est monté à proximité du filtre un accumulateur déshydrateur sur le conduit de haute pression provenant du compresseur.

✓ **Fonctionnement en cas de pression minimale et maximale**

Le pressostat contrôle principalement la pression minimale et maximale du fluide réfrigérant. En effet, la présence d'une pression trop basse peut indiquer qu'il n'y a pas de fluide dans le circuit. Par contre, si la pression est trop haute, cela peut indiquer que le circuit est obstrué suite, par exemple, à une congélation de l'évaporateur ou à une panne de la cylindrée variable du compresseur.

Dans ces cas extrêmes, le pressostat commande les dés enclenchement immédiat du joint électromagnétique.

✓ **Fonctionnement en cas de pression intermédiaire**

Par ailleurs, le pressostat contrôle également le déclenchement des électro ventilateurs de refroidissement du condensateur en fonction de la pression du fluide réfrigérant. Si le véhicule est muni soit d'un seul ou de deux ventilateurs, soit d'un ventilateur à une ou deux vitesse(s), il y aura un pressostat à trois ou quatre niveaux.

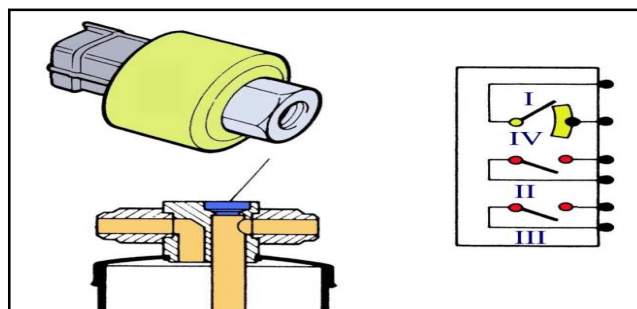


Figure III.14 : Pressostat à quatre niveaux sur le filtre déshydrateur[10]

III.4-Régulation de base :

Les principes ci-dessous sont la base de la régulation frigorifique. Les réglages énoncés ci-après possèdent un grand nombre de variantes afin de diminuer les inerties, d'anticiper les actions...

III.4.1-Thermostatique :

Il s'agit de la régulation la plus simple et la plus utilisée. Le thermostat enclenche et coupe le compresseur afin de maintenir le poste frigorifique à la température désirée. La ventilation peut être mise en marche forcée ou associée au compresseur (voir figure)

III.4.2-Pressostatique:

La régulation Pressostatique s'apparente à la régulation thermostatique. Toutefois, on va utiliser la relation pression température pour régler le pressostat.

Le point coupure correspondra à la température d'évaporation en fin de cycle et le point de ré-enclenchement sera la température de l'habitable (voir figure)

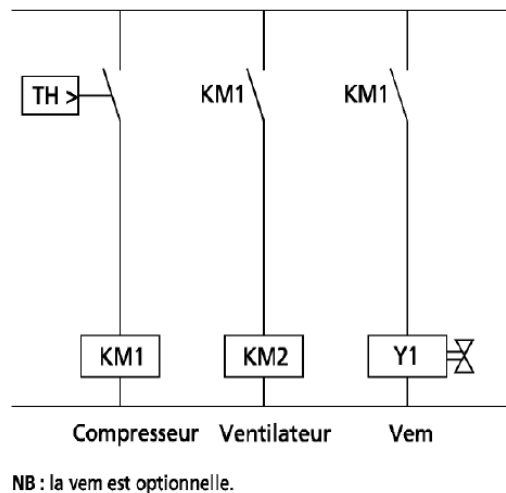


Figure.III.15:Schéma électrique de la régulation thermostatique [11]

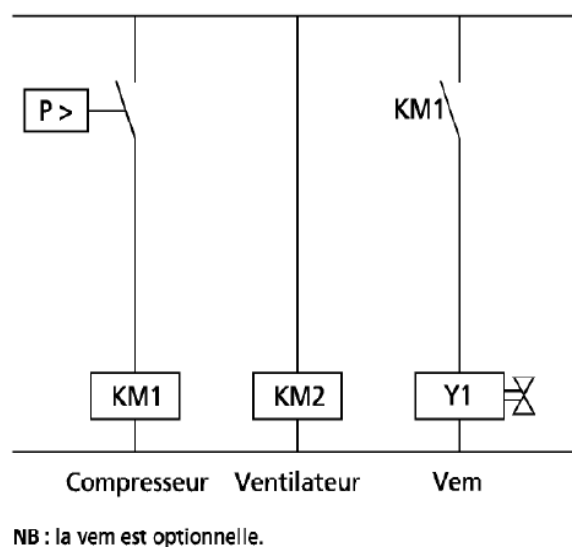


Figure.III.16:Schéma électrique de la régulation Pressostatique [11]

III.5-Fonctionnement de base:

III.5.1-demande de température maximale :

Quand la température requise est supérieure ou égale à 28 °C, l'unité électronique déclenche la procédure de chaleur maximale qui consiste à mélanger les flux comme reporté sur le schéma, à

refermer le volet de recirculation et à orienter le flux vers le plancher. La vitesse du flux et son orientation peuvent également être réglées manuellement ; dans ce cas, il n'est pas contrôlé par le dispositif de commande.

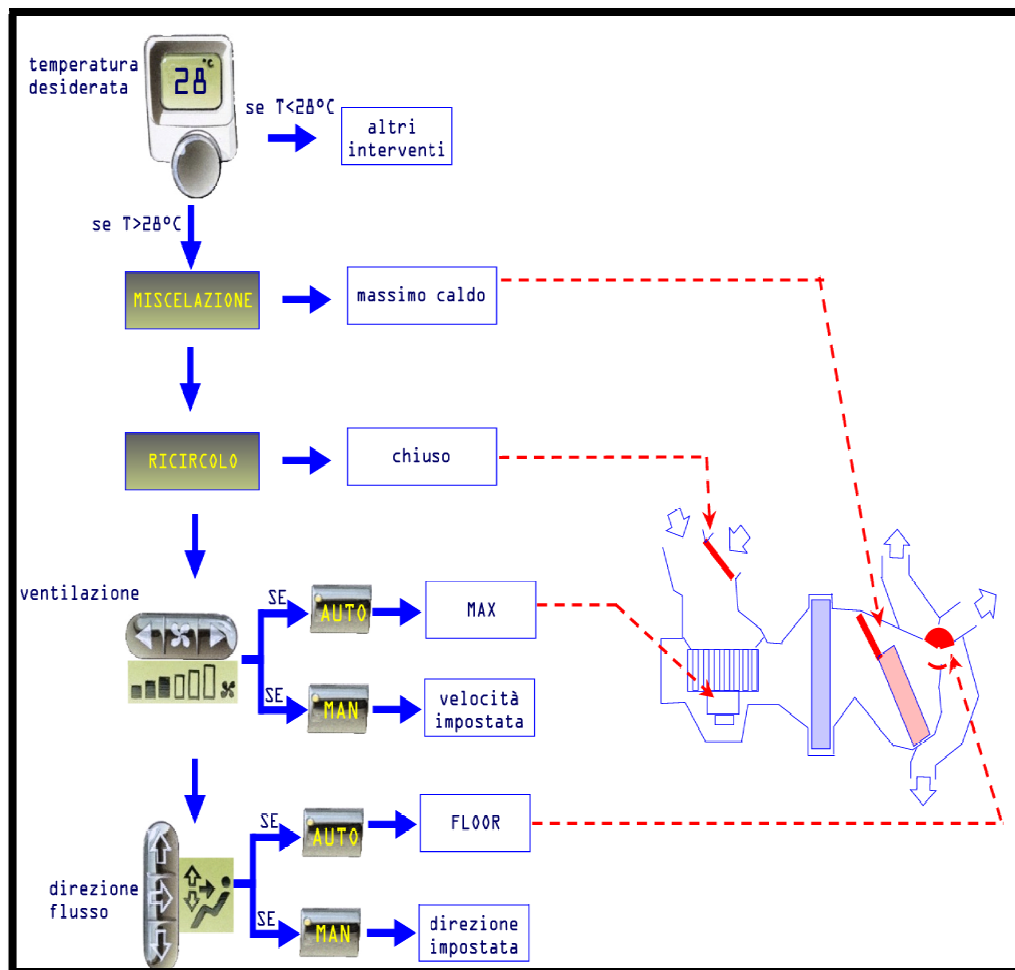


Fig.III.17: demande de température maximale [12]

III.5.2-Demande de température minimale :

Quand la température requise est inférieure ou égale à 16 °C, l'unité électronique de contrôle déclenche la procédure de froid maximal.

Cette procédure consiste à mélanger le flux sans le faire passer par l'élément réchauffant, à ouvrir le volet de recyclage, à régler la vitesse maximale de l'électro ventilateur et à envoyer le flux d'air aux bouches centrales.

Dans ce cas également, la vitesse du flux et la direction peuvent être réglées manuellement.

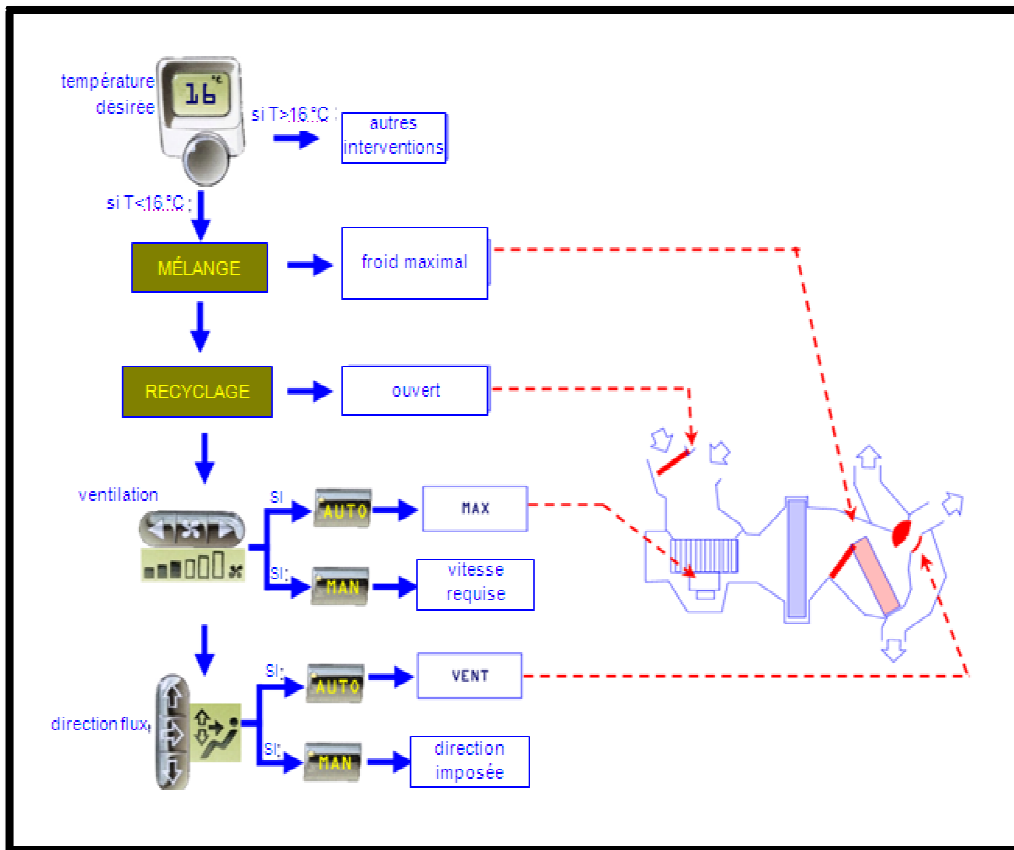


Fig. III.18 : Demande de température minimale [12]

III.5.3-Demande de DEFROST:

Dès que la fonction de désembuage rapide du pare-brise est activée, l'unité électronique déclenche la procédure de *defrost*.

Cette procédure consiste à donner le maximum de chaleur au flux d'air, à fermer le volet de recirculation et à envoyer le flux d'abord vers le plancher (FLOOR) puis vers le pare-brise (DEF). La vitesse du flux d'air est réglée en fonction de la température interne et externe de l'habitacle.

En effet, la différence entre ces deux températures est un indice du degré d'humidité relative présente dans l'habitacle.

Le système est capable de désembuer 60% du pare-brise et 20% des vitres latérales en cinq minutes.

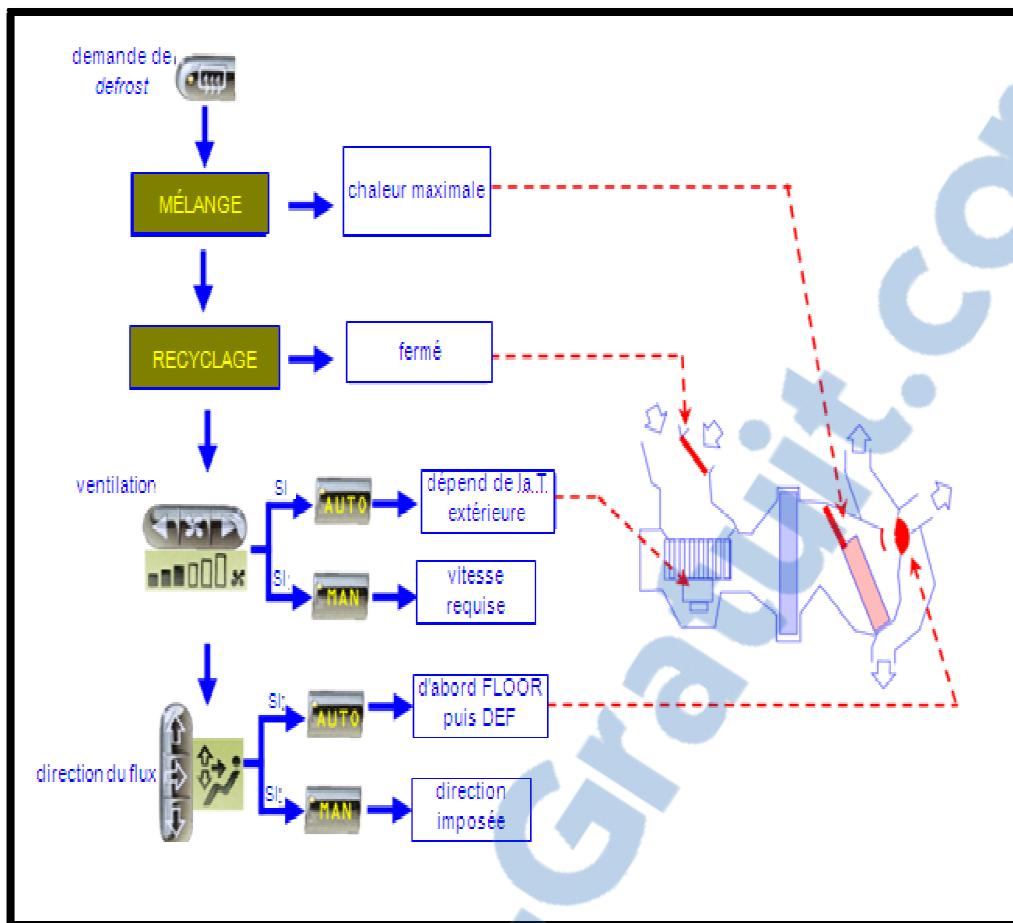
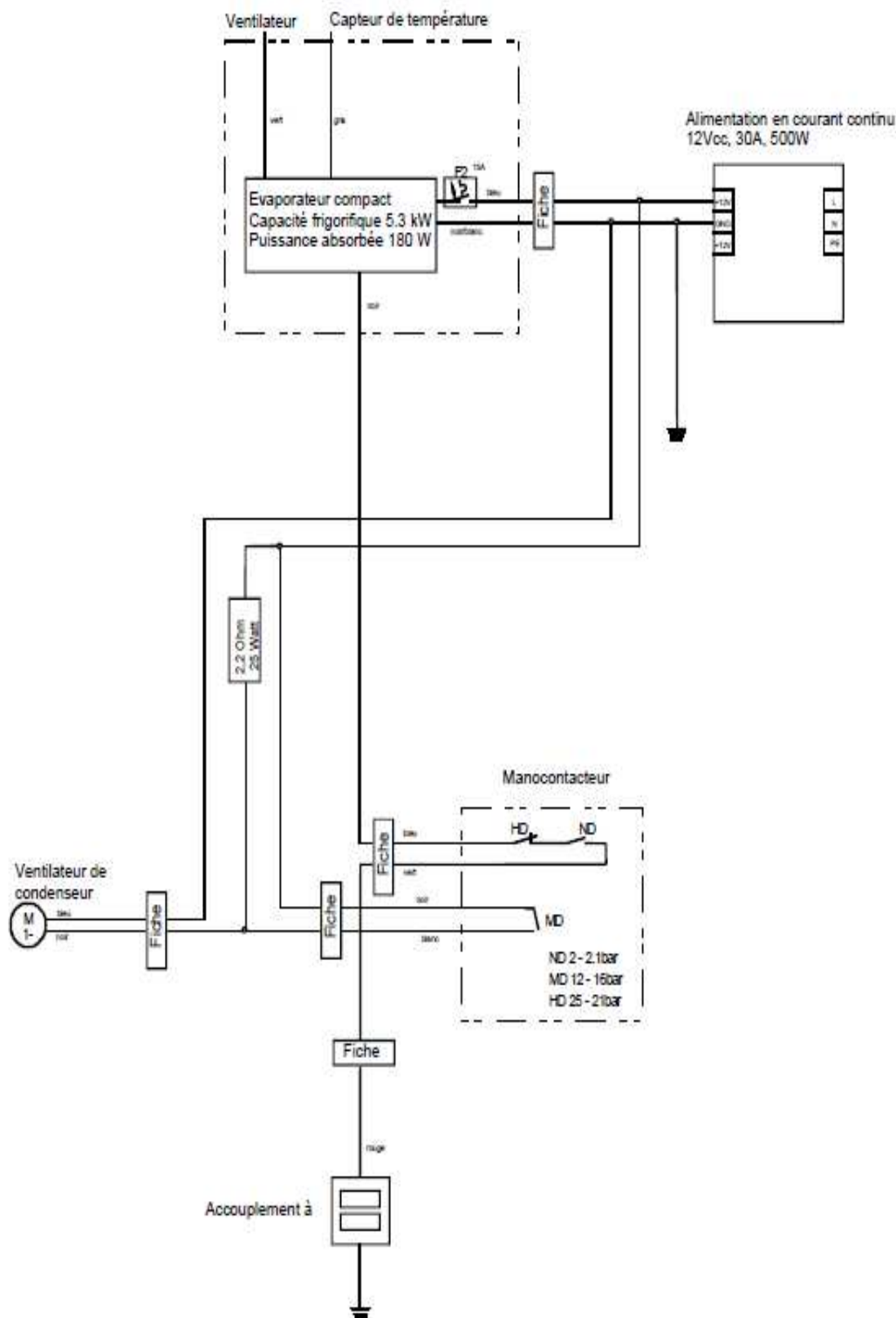


Fig.III.19: Demande de DEFROST [12]

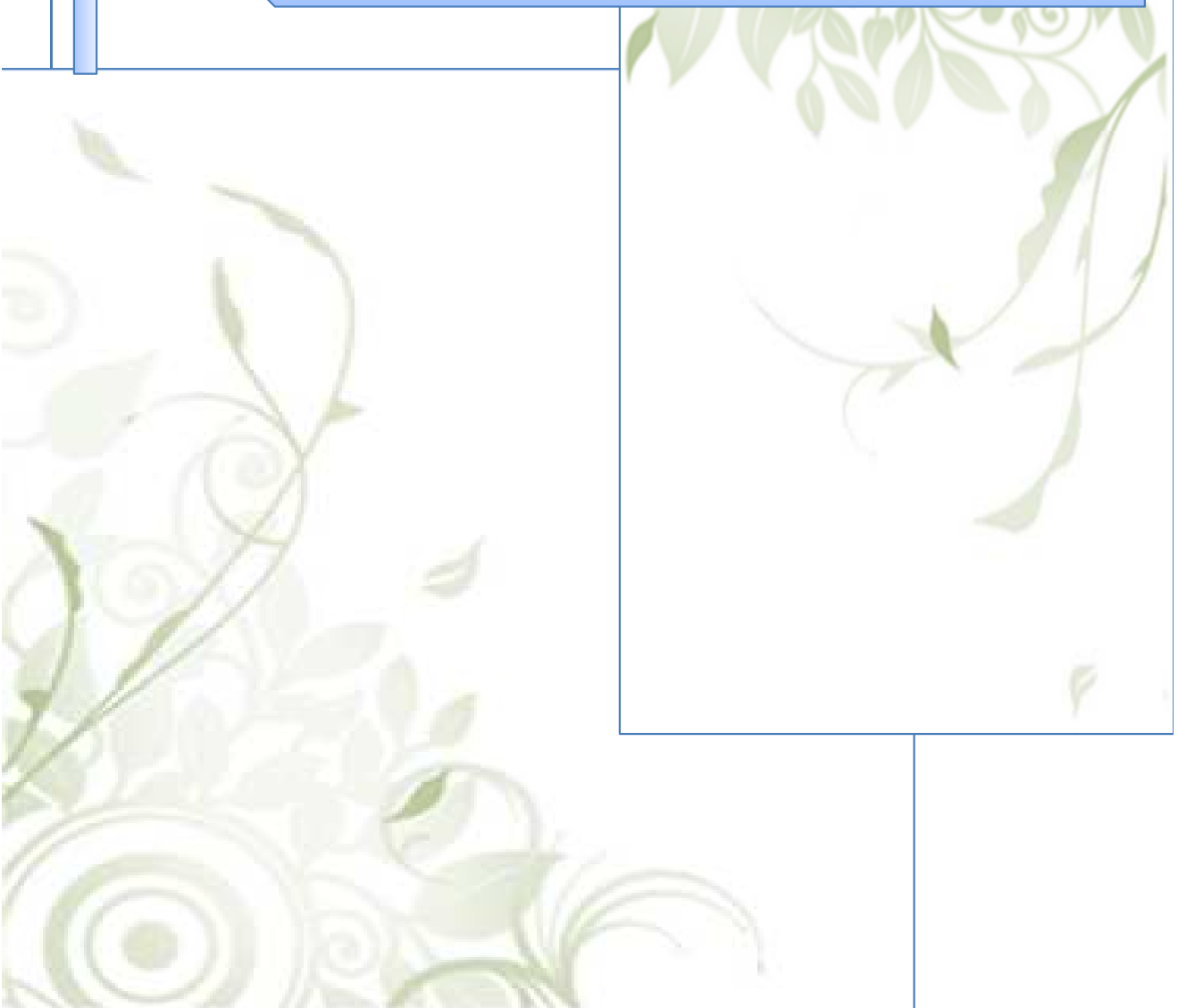
III.6-Schéma électrique de banc d’essai :



Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la chaîne de régulation d'une climatisation et le fonctionnement du système. Nous avons détaillé les différents composants et les organes de régulation qui nous permettront la découverte du climatiseur. Ce dernier ne fonctionne que si l'ensemble des composants du système fonctionnent correctement. En cas de défaillance d'un composant, les pressions de fonctionnement peuvent se trouver modifiées et entraîner un endommagement ultérieur du système et du moteur et pour éviter tout ces problèmes, des dispositifs de surveillance ont été implantés dans le système de climatisation.

Chapitre 4
Etude d'un systeme de
climatisation automobile
sur banc d'essai ET450



Introduction :

Les installations de climatisation on pour véhicule servent à refroidir l'habitacle du véhicule. Elles fonctionnent la plupart de temps selon le principe de circulation d'air et aspirent l'air à refroidir hors de l'habitacle. L'air froid produit dans l'installation de climatisation est transporté dans l'habitacle au moyen d'un ventilateur.

Sur le banc d'essai ET 450, le circuit frigorifique produisant l'air froid comporte un compresseur, un condenseur avec ventilateur e t un évaporateur comme refroidisseur d'air avec un ventilateur à trois niveaux et une soupape de détente. Tous les composants de l'installation sont des éléments utilisés couramment dans la technique automobile. Ainsi, l e refroidisseur d'air avec ventilateur à trois niveaux e st pourvu de bouches de ventilation d'habitacle typiques. Ce qui permet d'être très proche de la pratique.

Sur le banc d'essai, on travaille avec une alimentation classique de véhicules de 12VDC. Même la fonction de la serrure de contact a été réalisée pour la mise sous tension de l'installation. Un moteur électrique entraîne le compresseur par le biais d'une courroie de distribution et d'un accouplement magnétique.

Le nombre de tours par minute du moteur et donc du compresseur est réglé en continu à l'aide d'un convertisseur de fréquence, afin de simuler l'entraînement par le moteur du véhicule.

Des grandeurs caractéristiques importantes comme la pression, la température, le débit et la puissance absorbée du compresseur sont affichés. Une particularité réside dans l'intégration de 8 panes activables.

L'installation est particulièrement bien adaptée à la formation des mécaniciens automobiles.

La documentation didactique bien structurée expose les principes de base et guide l'étudiant pas à pas dans la réalisation des essais.



Figure. IV.1 : Banc d'essai ET450 [1]

IV.1-Description de l'appareil :

IV.1.1-Composition de l'appareil :

- Châssis mobile(1)
- Unité de commande (2) avec
- Boîtier de commande verrouillable comprenant le man contacteurs pour les éléments d'erreur (3)
- Interrupteur d'arrêt d'urgence (4)
- Affichage de l'intensité de courant du moteur (5)
- Affichage de la température (6) et commutateurs pour T1, T2, T3 et T4 (7)
- Affichage de la vitesse de rotation du compresseur (8) et potentiomètre (9)
- Clé de contact (10) avec lampe témoin (11)
- Boîtier de commande (12) avec interrupteur général (13)
- Evaporateur compact (14) avec soupape de détente, évaporateur et soufflante à trois étages
- Interrupteur à trois étages pour la commande du ventilateur(15)
- Câble de raccordement au réseau (16).

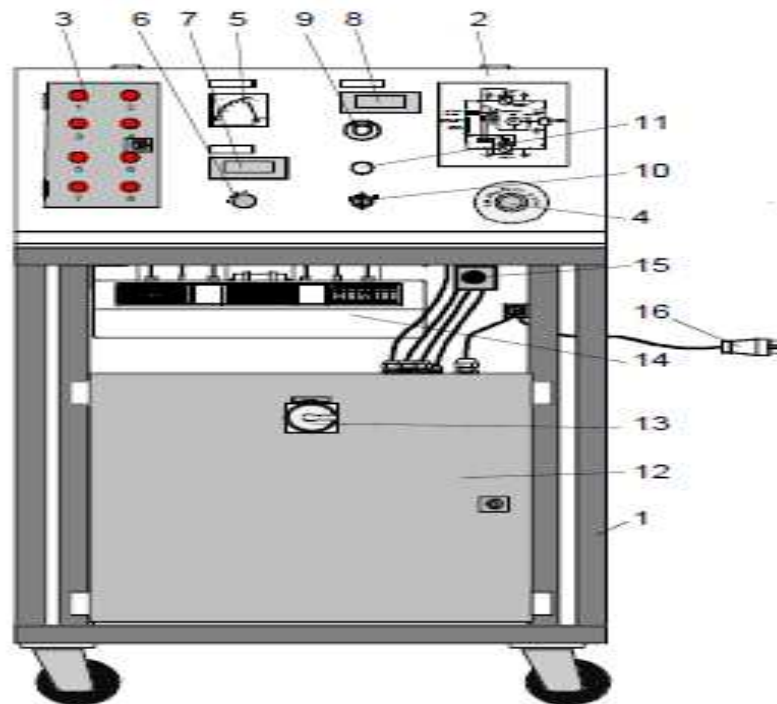


Figure. IV.2 : vue de face de Banc d'essai ET 450 [2]

✓ **Vue de dos :**

- Débitmètre à flotteur(17)
- Manomètre pour côté aspiration(18) et côté refoulement(19)
- Robinet de régulation du débit (20) pour élément d'erreur n 8 (dérivation entre côté refoulement et aspiration)
- Verre-regard pour fluide frigorigène (21)
- Déshydrateur-filtre (22)
- Manocontacteur à trois étages (23)

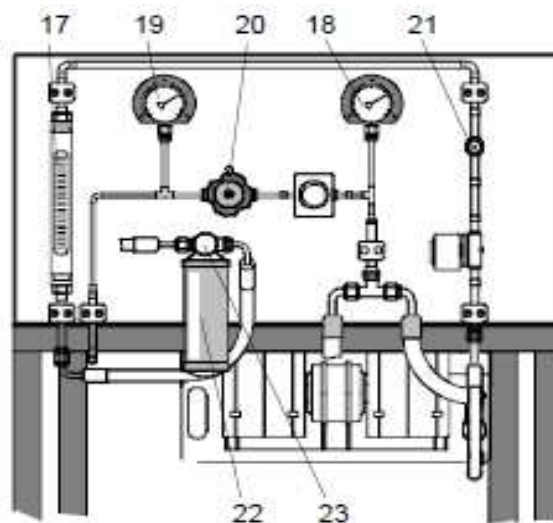


Figure. IV.3 : vue de dos de band d'essai ET450 [3]

✓ **Vue latérale :**

- Evaporateur compact(14) avec ventilateur (14a)
- Moteur électrique à vitesse réglée (24)
- Compresseur(25) avec accouplement à aimant (26) bridé
- Déshydrateur-filtre (22)
- Condenseur avec ventilateur (27)
- Unité de commande(12)

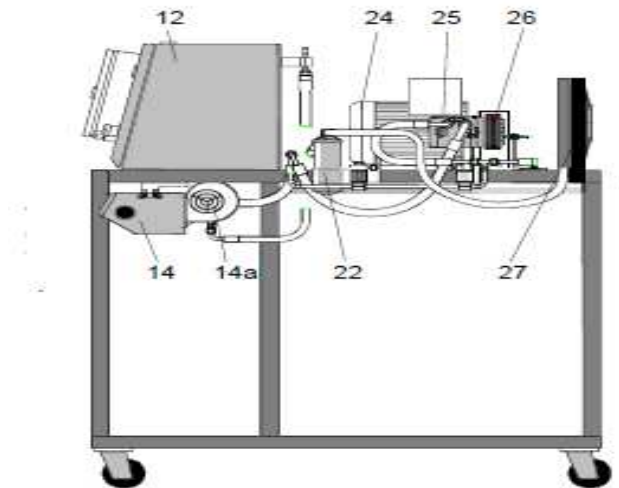


Figure. IV.4 : *vue latérale de banc d'essai ET450 [4]*

IV.1.2-Composants :

1-Compresseur :

Le moteur électrique (1) transmet son couple de rotation au compresseur (3) par l'intermédiaire d'une courroie trapézoïdale et d'une poulie à gorge pour courroie trapézoïdale (2), ainsi que d'un accouplement à aimant (non visible). L'accouplement à aimant est actionné automatiquement en fonction de l'état de marche.

Raccordements du compresseur

- . bleu côté aspiration(4)
- rouge côté refoulement(5)

Eléments d'erreur

- L'élément d'erreur n 8 simule un compresseur défectueux, à savoir un défaut d'étanchéité entre le côté aspiration et le côté refoulement.
- L'élément d'erreur n 1 simule un relais défectueux pour l'accouplement à aimant.

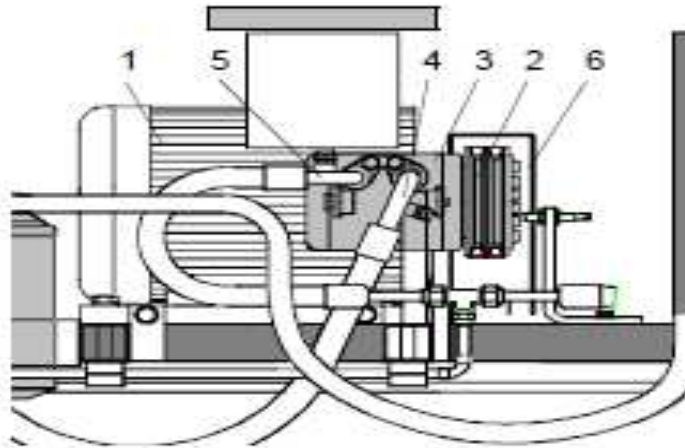


Figure. IV.5 : *compresseur de climatiseur ET450 [5]*

2-Evaporateur

- L'installation est équipée d'un évaporateur intégré avec soupape de détente et soufflante tel que ceux utilisés en technique automobile. Un interrupteur rotatif commande la vitesse de rotation de la soufflante et par conséquent le flux d'air des buses de sortie.
- Un capteur de température situé dans le flux d'air sortant de l'évaporateur compact veille à une commutation de l'accouplement à aimant du compresseur en dessous d'une température déterminée.
- Eléments d'erreur
- L'élément d'erreur n 4 simule une soufflante défectueuse
- L'élément d'erreur n 5 simule un capteur de température défectueux au niveau de l'évaporateur
- L'élément d'erreur n 7 simule une soupape de détente obstruée

3-Condenseur

- Le condenseur de véhicule typique est un condenseur à ailettes avec soufflante pour un meilleur refroidissement.
- Eléments d'erreur
- L'élément d'erreur n 3 simule une soufflante défectueuse

4-Manocontacteur :

Tableau IV.1 : étages de commutation du Manocontacteur [6]

Degré	Point de mise en circuit	Point de mise hors circuit
BP	2.1 bars	2 bars
MP	16 bars	12 bars
HP	20.5 bars	26 bars

Manocontacteur avec relais à 3 étages comprenant les étages de commutation suivants:

- La BP et la HP commutent l'accouplement à aimant.
- La BP empêche une exploitation de l'installation en dessous d'une pression de remplissage minimale, la MP commute le ventilateur de refroidisseur, la HP protège l'installation d'une pression de service trop élevée.
- Eléments d'erreur
- L'élément d'erreur n 6 simule un man contacteur défectueux (pas de passage de courant).

5-Unité de commande:

- Serrure de contact (1) avec lampe témoin (2) pour l'allumage:
- Position arrêt: installation à l'arrêt
- Position allumage: installation prête à l'utilisation
- Position démarrage: "démarrage" du moteur électrique
- Réglage de la vitesse de rotation (3) avec affichage (4) en t/min
- Affichage de la température (5), les températures
 - ❖ T1 - T4 sont affichées en fonction de la position du bouton rotatif (6):
 - ❖ T1 Température côté aspiration du compresseur
 - ❖ T2 Température côté refoulement du compresseur
 - ❖ T3 Température sortie du condenseur
 - ❖ T4 Température sortie de soupape de détente
- Affichage du courant d'entrée du moteur électrique (7)
- Interrupteur rotatif pour vitesse de rotation de soufflante d'évaporateur (8)
- Eléments d'erreur 1-8 (9), description en annexe
- Actionner l'interrupteur d'arrêt d'urgence (10) en cas de danger. Le déverrouiller en tirant le bouton

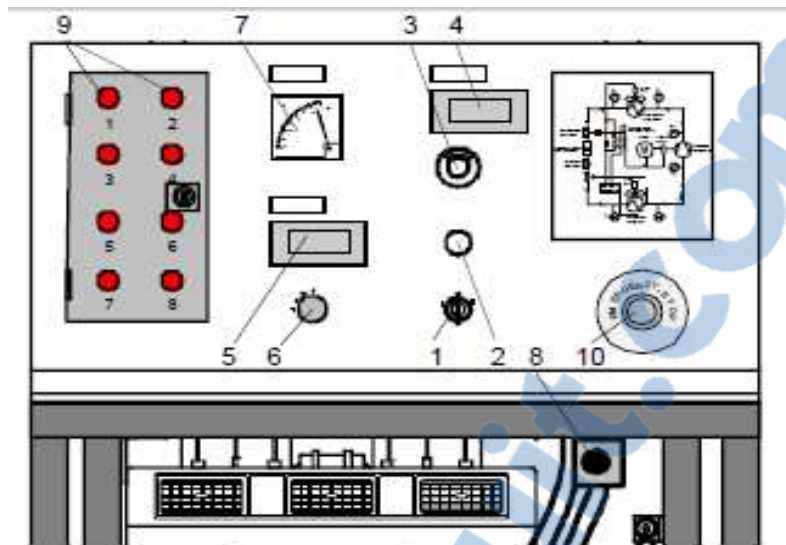


Figure. IV.6 : *unité de commande de climatiseur ET450 [7]*

IV.1.3-Première mise en service :

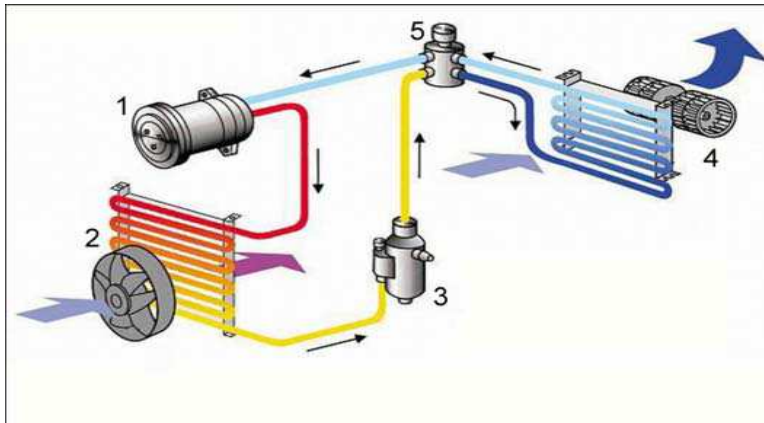
- L'appareil est livré rempli. D'abord, faire le plein fluide frigorigène R134a
- Raccorder l'appareil au réseau 380V triphasé, 16A.
- Déverrouiller le bouton d'arrêt d'urgence et mettre l'interrupteur principal en position ON
- L'appareil est prêt à fonctionner et l'installation est mise sous tension en tournant la clé de contact

IV.1.4-Remplissage du système :

Remplir le système au niveau du raccord d'aspiration du compresseur (bleu) à l'aide d'un poste de remplissage courant en technique automobile (non compris dans la fourniture) lorsque le compresseur et la soufflante sont en marche, jusqu'à ce que le débitmètre ne présente plus de soufflure

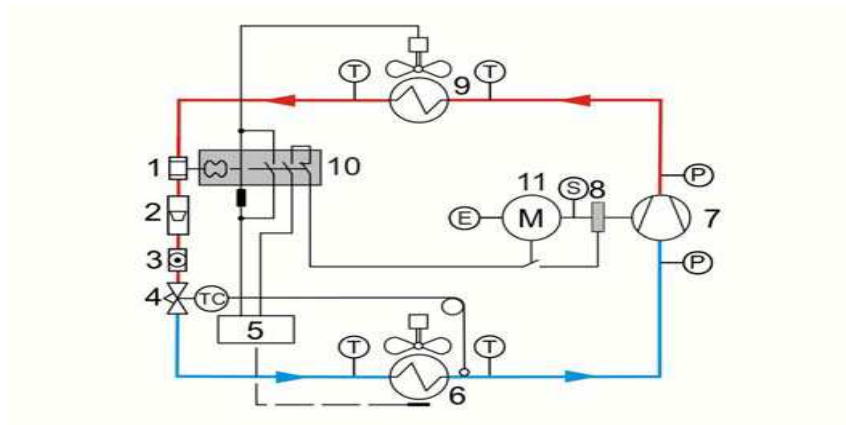
Tableau IV..2 : représentation des éléments d'erreur [8]

Panne n°	Description de la panne	Effet	Possibilité de contrôle
1	Accouplement à aimant défectueux	la pompe ne génère plus de pression, car l'accouplement à aimant n'accouple pas.	Débrancher la fiche bleue de l'accouplement à aimant , contrôler la tension de 12V.
2	Manocontacteur défectueux, le manocontacteur central ne s'ouvre pas	le ventilateur du condenseur ne s'arrête pas	ne pas débrancher la fiche noir/blanc du manocontacteur et contrôler la tension de 12V
3	Ventilateur du condenseur défectueux	T ₂ augmente, le ventilateur du condenseur est arrêté.	débrancher la fiche bleu/noir du ventilateur de condenseur, contrôler la tension de 12V.
4	Ventilateur d'évaporateur du tableau de bord défectueux	la pression côté aspiration p ₁ diminue, T ₁ baisse.	Débrancher la fiche blanche au dos de l'évaporateur compact, contrôler la résistance.
5	Capteur de température de l'évaporateur défectueux	l'accouplement à aimant relâche .	Débrancher la fiche gris/gris-rouge, contrôler la tension de 12V.
6	Manocontacteur défectueux	l'accouplement à aimant relâche.	Débrancher la fiche rouge/noir du manocontacteur, contrôler la tension.



1 compresseur, 2 condenseurs avec ventilateur ,3 filtre/sécheur, 4 refroidisseur d'air avec ventilateur à trois niveaux, 5 soupape détente; **rouge: haute pression gazeuse**, **jaune: haute pression liquide** **bleu: basse pression liquide**, **bleu clair: basse pression gazeuse**

Figure. IV..7 : les composons de cycle frigorigène [9]



1 filtre/sécheur, 2 débitmètre, 3 voyant, 4 soupape de détente, 5 armoie de commande, 6 évaporateur, 7 compresseur, 8 accouplement magnétique 9 condenseur, 10 pressostat combiné, 11 moteur; rouge: haute pression bleu: basse pression

Figure. IV.8 : les composons de cycle électrique [9]

IV.2-Essais et résultats :

IV.2.1-Partie expérimentale :

- Mettre l'installation en marche en tournant la clé de contact et régler la vitesse de rotation du compresseur n (tr/min)
- Attendre jusqu'à ce que les affichages de pression et de température soient constants
- Refaire la même expérience avec les trois étages de ventilateur (faible, moyen et rapide)
- Remplir le tableau pour chaque résultat obtenu.

IV.2.2-Les tableaux de résultat et les calculs :

Tableau. IV.3 : ventilation en 1^{er} étage (lent)

N (tr/min)	1000	1200	1400	1600	1800	2000
P (1/4) Aspiration	2	1.9	1.8	1.75	1.75	1.5
P (2/3) Refoulement	12.5	14	15	15.8	16.5	17.5
T1	5.9	5.7	5.5	5.4	5.4	5.7
T2	49.9	52.1	55.4	58.4	60.8	63.1
T3	46.8	48.5	49.9	51.1	52.1	53.2
T4	10.9	11.1	11.2	11.3	11.5	11.6
Débit volumique v	48	55	62	66	69	72

Tableau IV.4: ventilation en 2^{ème} étage

N (tr/min)	1000	1200	1400	1600	1800	2000
P (1/4) Aspiration	2.1	1.8	1.6	1.55	1.4	1.35
P (2/3) Refoulement	15	15.5	15.75	16.5	17	17.5
T1	6.7	6.5	6.1	6.5	6.5	6
T2	56.8	55.6	57.7	59.9	61.6	63.3
T3	49.5	49.9	50.6	51.4	51.7	52.6
T4	12.1	12.0	12.0	12.2	12.3	12.4
Débit volumique v	50	59	69	70	72	74

Tabl
eau
IV..5
:
vent
ilati
on
3^{ème}
étag
e

N (tr/min)	1000	1200	1400	1600	1800	2000
P (1/4) Aspiration	2.2	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2
P (2/3) Refoulement	12	13	14	14.5	15	15.5
T1	4.1	5.1	6.2	6.3	5.8	5.6
T2	44.9	49.4	53.1	56	57.8	60.6
T3	40	43.4	45	46.5	46.7	48.4
T4	11.6	11.7	11.9	11.7	11.7	11.7
Débit volumique v	48	58	63	66	68	69

IV.2
.2.1
:
Ven
tilat
eur
au
1^{er}
étag
e :

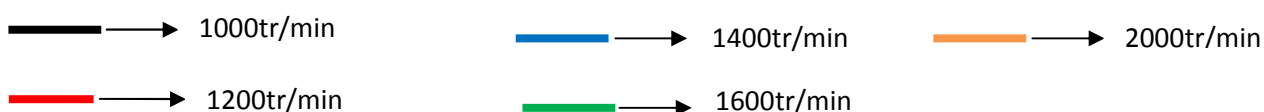
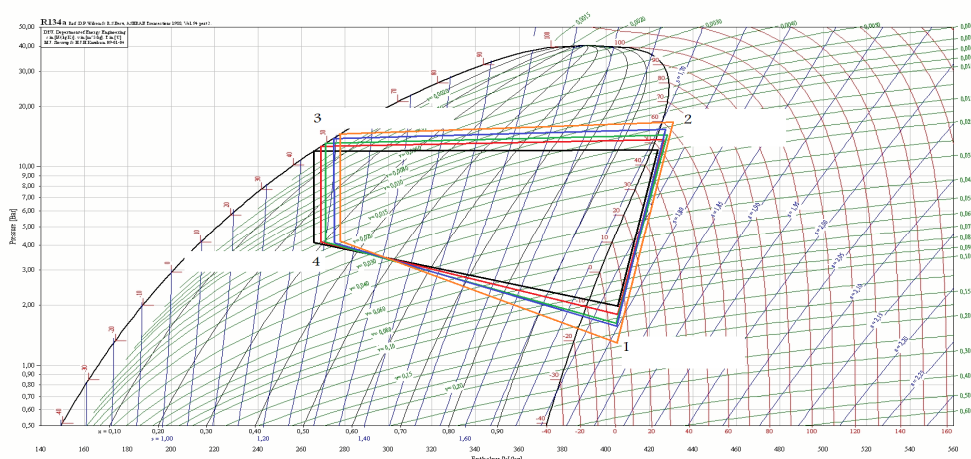


Figure. IV.9: Diagramme du 1^{er} étage de ventilation

Exemple de calcul :

$$h_1=407 \text{ kJ/kg} \quad h_2=425 \text{ kJ/kg} \quad h_3 = h_4=265 \text{ kJ/kg}.$$

✓ Capacité frigorifique :

La capacité frigorifique spécifique q_0 est la différence d'enthalpie entre l'entrée d'évaporateur et l'état après l'évaporateur :

$$q_0 = h_1 - h_{3/4} \quad (1)$$

$$q_0 = 407 - 265 = 142 \text{ kJ/kg}$$

La densité massique du fluide frigorigène R 134 a :

$$\rho_k = 1.22 \text{ kg/dm}^3$$

Le débit volumique :

$$\dot{V}_K = 48 \text{ l/h}$$

Le débit massique du fluide frigorigène $\dot{m}_k$ se calcule comme suit:

$$\dot{m}_k = \rho_k \cdot \dot{V}_K \quad (2)$$

$$\dot{m}_k = 1.22 \cdot 0.013 = 0.016 \text{ kg/s}$$

La capacité frigorifique est alors:

$$\dot{Q}_0 = \dot{m}_k \cdot q_0 \quad (3)$$

$$\dot{Q}_0 = 0.016 \cdot 142 = 2.3 \text{ KW}$$

✓ Coefficient de performance :

Pour calculer le coefficient de performances réelles, la capacité frigorifique spécifique et l'énergie du compresseur spécifique sont nécessaires:

$$q_0 = 142 \text{ kJ/kg}.$$

$$W_{tats} = 18 \text{ kJ/kg}$$

Le coefficient de performance réel est obtenu par:

$$\varepsilon_{tats} = q_0 / W_{tats} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{tats} = 142 / 18 = 7.88.$$

✓ Energie du compresseur spécifique :

L'énergie du compresseur spécifique est la différence enthalpique entre l'entrée et la sortie du compresseur se rapportant à un kilogramme de fluide frigorigène:

$$W_{tats} = h_2 - h_1. \quad (5)$$

$$W_{tats} = 425 - 407 = 18 \text{ kJ/kg}$$

✓ Puissance frigorifique spécifique :

La puissance frigorifique de l'installation se calcule à partir de la différence d'enthalpie des états 2 et 3/4:

$$q_k = h_2 - h_{3/4} \quad (6)$$

$$q_k = 425 - 265 = 160 \text{ kJ/kg.}$$

✓ **Taux de compression du compresseur :**

Le taux de compression est obtenu à partir des deux pressions mesurées:

$$\psi = \frac{p_{2/3}}{p_{1/4}} \quad (7)$$

$$\Psi = 12.5/2 = 6.25$$

✓ **Puissance frigorifique du fluide moteur :**

$$q_0 = h_{3/4} - h_2 \quad (8.1)$$

$$q_0 = 425 - 265 = 160 \text{ kJ/kg.}$$

$$\dot{Q}_k = q_0 \cdot m_k = 160 \cdot 0.016 = 2.56 \text{ kW} \quad (8.2)$$

✓ **Rendement :**

Le rendement est le rapport entre la puissance frigorifique et l'énergie dépensée, c.-à-d. la puissance de propulsion du compresseur. La puissance de propulsion s'élève:

$$p_k = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \quad (9)$$

$$p_k = 380 \cdot 4.5 \cdot \sqrt{3} \cdot 0.9 = 2.665$$

*-I est le courant de phase et peut être lu sur l'indicateur.

Le rendement est calculé comme suit:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_k}{p_k} \quad (10)$$

$$\eta = 0.96$$

Tableau IV.6: résultat 1^{ère} étage de ventilation :

Vitesse de Compresseur (tr/min)	1000	1200	1400	1600	2000
Capacité frigorifique $Q_0(\text{kw})$	2.3	2.67	2.83	2.79	3.14
Coef de performance ε_{tats}	7.88	11.95	5.86	4.70	5.60
Energie de compresseur $W_{tats}(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$	18	12	23	27	23
Puissance specifique $q_k(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$	160	155.5	158	154	152
Puissance frigorifique $\dot{Q}_k(\text{kw})$	2.56	2.79	3.31	3.85	3.64

Rendement	0.96	0.94	0.93	0.87	0.87

IV.2.2.2 Ventilateur au 2^{ème} étage :

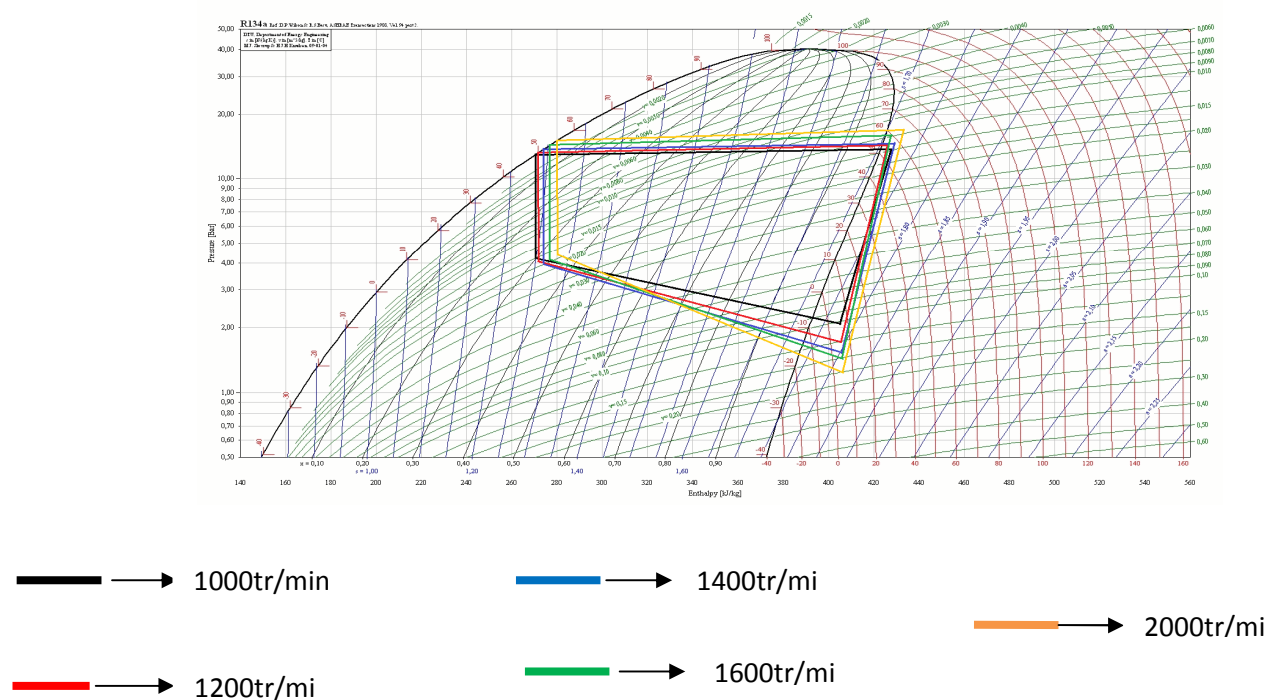


Figure. IV.10. : Diagramme de 2eme étage de ventilation

Tableau IV.7 : Résultat de 2^{ème} étage de ventilation :

Vitesse de Compresseur (tr/min)	1000	1200	1400	1600	2000
Capacité frigorifique $Q_0(kw)$	2.28	2.65	3.10	3.13	3.26
Coef de performance ε_{tats}	6.42	7.82	6.33	9.62	5.90
Energie de compresseur $W_{tats}(\frac{kJ}{kg})$	21	17	21	16	22
Puissance specifique $q_k(\frac{kJ}{kg})$	156	150	154	148	152

Puissance frigorifique $Q_k(kw)$	2.49	2.85	3.54	3.40	3.8
Rendement η	0.93	0.96	0.99	0.95	0.91

IV.2.2.3-ventilateur au 3^{ème} étage

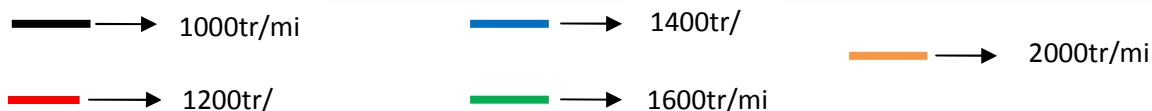
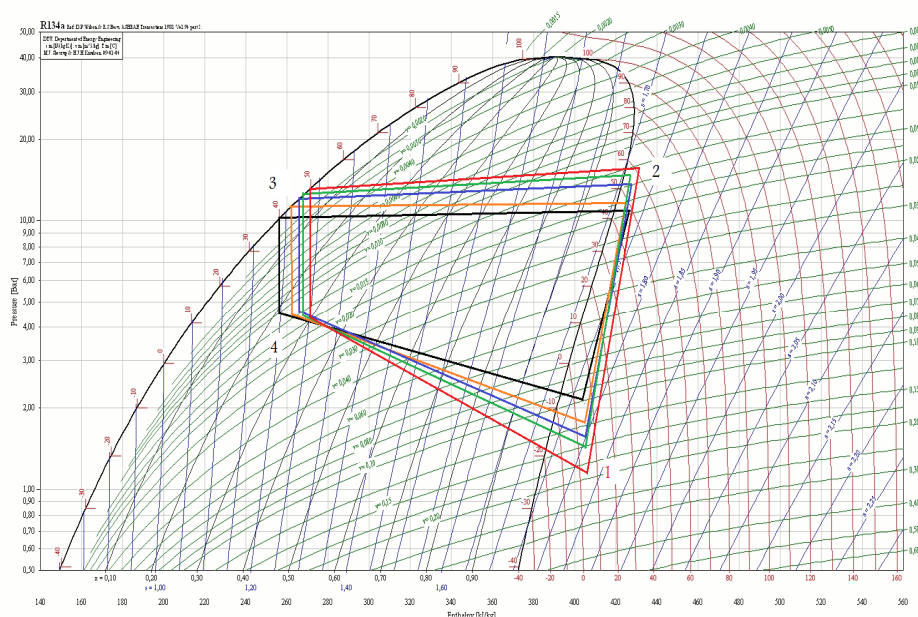


Figure. IV.11: Diagramme de 3^{ème} étage ventilation

Tableau IV.8 : résultat 3^{ème} étage de ventilation :

Vitesse de Compresseur (tr/min)	1000	1200	1400	1600	2000
Capacité frigorifique $Q_0(kw)$	2.27	2.83	3.01	3.04	3.10
Coef de performance ε_{tats}	6.08	7.2	6.40	6.18	5.32
Energie de compresseur $W_{tats}(\frac{kJ}{kg})$	23	20	22	22	25
Puissance specifique $q_k(\frac{kJ}{kg})$	171	164	163	158	158

Puissance frigorifique $Q_k(\text{kw})$	2.73	3.11	3.42	3.47	3.63
Rendement η	0.92	0.95	0.96	0.97	0.94

IV.2.3-Interprétation :

D'après le tableau des résultats ;

Pour les trois étages de ventilation a chaque augmentation de vitesse de compresseur la pression d'aspiration diminue et du refoulement augmente.

D'après le tableau de calculs ;

Pour le 1^{er} étage : Lorsque la vitesse de ventilation est faible ainsi que celle de rotation du compresseur est égale à 1000tr/min ; le rendement sera idéal. Le rendement décroît lorsque la vitesse augmente.

Pour le 2^{ème} étage : Lorsque la vitesse de ventilation est moyenne est les vitesses de rotation de compresseur est aussi moyenne entre (1200 jusqu'au 1600tr/min) le rendement sera bon .Ce dernier décroît lorsque la vitesse est inferieur à 1200tr/min ou bien supérieur à 1600tr/min.

Pour le 3^{ème} étage : Lorsque la vitesse de ventilation est rapide et celle de rotation du compresseur est grande (1600..2000tr/min) le rendement est bon. Ce dernier décroît lorsque la vitesse de rotation du compresseur est inferieur à 1600tr/min.

IV.2.4-Conclusion :

Pour l'obtention d'un rendement idéal et pour que notre système sera efficace il faut que l'énergie dépensée et la puissance frigorifique de fluide moteur seront équivalent ou bien presque équivalent et pour cela la seul méthode pour résoudre ce problème c'est de régler les deux vitesses de ventilation et de la rotation de compresseur en même rythme de fonctionnement.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait une étude expérimentale sur un système de la climatisation qui s'appelée « Climatiseur ET450 » qui fonction comme celle qui se trouve dans les véhicules. Cette étude sert a basé sur les différents paramètres thermodynamique et ces caractéristique. Après avoir défini ces différents paramètres on a utilisé des équations pour analyser les différents résultats. Cette analyse montre qu'il ya un grand changement de refroidissement à chaque étage de ventilation et nouvelle vitesse de compression. Elle nous facilite de connaitre les opérations qui influent sur le système et comment nous pouvons les éliminer pour l'obtention d'un très bon rendement sans perte d'énergie et avoir un déroulement juste et efficace.

Conclusion générale

Conclusion générale:

L'étude de système de climatisation automobile, nous a permis de connaître et maîtriser les différents types, organes et les cycles de partie thermodynamique et régulation. Elle nous permet aussi de définir les paramètres et les différents points que nous pouvons trouver et le traiter.

L'étude expérimentales sur le banc d'essai ET450 que nous avons fait elle nous permet de connaître comment on obtient un système de climatisation efficace avec un rendement idéal. Elle nous aide aussi de savoir les étapes suivies par les constructeurs pour la réalisation de climatisation automobile.

En fin, après de définir ces différentes conditions, il devient possible d'envisager que, dans quelques années, la climatisation automobile a connu une grande évaluation et est devenue plus utilisable dans tout le monde. Toutes ces raisons concourent à inciter à étudier les possibilités actuelles et dans un futur proche de l'utilisation de la climatisation automobile.

Nous concluons par dire que notre travail permettra aux étudiants des promotions à venir, d'avoir une meilleure idée sur la climatisation automobile et des différents procédés thermodynamiques et régulation.

Bibliographie :

Chapitre n°01 :

[1] : Ademe , agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

[2] : SSp 208 la climatisation automobile

[3] : SSp 208, la climatisation automobile

Chapitre n°02 :

[1] : Programme autodidactique 208, la climatisation automobile .page 8

[2] : Programme autodidactique 208, la climatisation automobile .page 12

[3] : Programme autodidactique 208, la climatisation automobile .page 17

[4] : Programme autodidactique 208, la climatisation automobile .page 6

[5] : Programme autodidactique 208, la climatisation automobile .page 28

[6] : Programme autodidactique 208, la climatisation automobile .page 27

[7] : Technologie automobile, confort et sécurité. Climatisation

[8] : Monsieur Daniel MUGNIER –docteur –ingénieur en énergétique et expert en climatisation / chauffage

[9] : Stéphane BARBUSSE et Laurent GAGNEPAIN, « La climatisation automobile impact énergétique et environnemental » rapport d'étude ADEME, Mai 2003.

[10] : Lebouc Afef, Allab Farid, Fourier Jean Marc et Yonnet Jean Paul "Réfrigération magnétique " Technique de l'ingénieur, 2005

[11] : Système de chauffage et climatisation

[12] : SSp 208 la climatisation automobile .page 23

[13] : SSp 208 la climatisation automobile. Page 24

[14] : SSp 208 la climatisation automobile. page 25

[15] : SSp 208 la climatisation automobile. page 26

[16] : SSp 208 la climatisation automobile. page28

[17] : SSp 208 la climatisation automobile. page 29

Chapitre n°03 :

[1] : Technologie automobile, confort et sécurité. Climatisation, page 8

[2] : Technologie automobile, confort et sécurité. Climatisation, page 10

[3] : Système de chauffage et climatisation, page 48

[4] : Système de chauffage et climatisation, page 49

[5] : ASSOCIATION CONFORT REGULATION, guide la régulation pour le chauffage et la climatisation ,1973

[6] : Système de chauffage et climatisation, page 55

[7] : Gérard CHANCEL, Initiation a la régulation ,1985

[8] : Système de chauffage et climatisation, page 78

[9] : Système de chauffage et climatisation, page 19

[10] :Fadil Ayad, modélisation et caractérisation expérimentale de climatisation automobile fonctionnant de R134a

[11] Martin Dareés, « Climatisation écologique » projet le 2 avril 2011.

[12] : Régulation et automatisme de système de climatisation

Chapitre n°04 :

[1] Instruction pour expérience, ET 450 Unité d'exercice air conditionné pour automobile, « GENT, Hambourg »

[2] Instruction pour expérience, ET 450 Unité d'exercice air conditionné pour automobile, « GENT, Hambourg »

[3] Instruction pour expérience, ET 450 Unité d'exercice air conditionné pour automobile, « GENT, Hambourg »

- [4] Instruction pour expérience, ET 450 Unité d'exercice air conditionné pour automobile, « GENT, Hambourg »
- [5] Reserve a l'usage interne VOLKSWAGEN AG, Wolfsburg. Définition technique 12/1998.
- [6] Martin Dareés, « Climatisation écologique » projet le 2 avril 2011.
- [7] Martin Dareés, « Climatisation écologique » projet le 2 avril 2011.
- [8] Instruction pour expérience, ET 450 Unité d'exercice air conditionné pour automobile, « GENT, Hambourg »
- [9] Reserve a l'usage interne VOLKSWAGEN AG, Wolfsburg. Définition technique 12/1998.

