



Université du Québec
à Rimouski

Étude et conception d'un modèle mécanique d'hybridation pneumatique par assistance électrique d'un moteur diesel

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître en sciences appliquées (M. Sc. A.)

PAR

© **HAITHEM IBEN ABDALLAH**

Mars 2023

Composition du jury :

Noureddine Barka, président du jury, UQAR

Adrian Ilinca, Directeur de recherche, UQAR

Mohamed Yasser Hayyani, codirecteur de recherche, UQAR

Ali Feki, examinateur externe, Machinex

Dépôt initial le 21 novembre 2022

Dépôt final le 8 mars 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

DÉDICACES

À ma chère mère ZOHRA,

La flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur

À mon cher père AHMED,

L'homme de ma vie, que Dieu vous protège

À mon cher frère SOUFIEN,

*Mon soutien moral celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir
réussir*

À ma chère sœur, mon cher frère et à toute la famille

Que Dieu vous donne tout le bonheur du monde

REMERCIEMENTS

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, monsieur **Adrian ILINCA**. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.*

J'adresse mes sincères remerciements à monsieur Mohamed Yasser Hayyani, à monsieur Martini Fahed et à tous les professeurs, intervenants, et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire : Nouredine Barka et Ali Feki.

RÉSUMÉ

La production d'électricité dans les collectivités éloignées est un défi technique qui doit prendre en considération des exigences environnementales en termes d'émissions des GES et des coûts de la production. Les principales ressources utilisées dans ces zones sont les énergies renouvelables éoliennes et les génératrices diesel. Le fonctionnement de ces génératrices est souvent en faible charge caractérisée par des performances médiocres et des coûts d'exploitation et de production élevés.

Le but de ce mémoire est l'étude et la conception d'un modèle mécanique d'hybridation pneumatique d'un moteur diesel C15 par assistance électrique. Les résultats obtenus peuvent être utilisés pour déterminer le rendement optimal de générateurs diesel et de réduire la consommation des énergies fossiles dans le système énergétique des collectivités éloignées.

Pour cette raison, le projet de notre recherche est organisé en quatre principaux chapitres. Le premier est une revue de la littérature qui s'est intéressée au fonctionnement du moteur diesel à quatre temps. Dans la deuxième étape, nous avons étudié la suralimentation classique puis d'autres techniques modernes d'hybridation pneumatique dans l'objectif d'identifier les avantages et les inconvénients. Quant au troisième chapitre, nous avons exécuté la modélisation et la simulation de notre modèle d'hybridation pneumatique par assistance électrique d'un moteur diesel C15. Enfin, au quatrième chapitre, nous avons effectué la conception de deux configurations d'hybridation par assistance électrique pour choisir la meilleure d'entre elles pour un moteur diesel C15 de cylindrée 15,2 litres.

L'interprétation et l'analyse des résultats ont dévoilé une augmentation de la puissance de moteur diesel et du couple aussi, ainsi qu'une réduction significative des émissions des GES et de la consommation spécifique du carburant surtout pour les bas régimes de fonctionnement. Également, la conception mécanique en 3D des modifications à apporter au moteur diesel et les discussions de différents scénarios ont démontré la faisabilité technique de l'hybridation pneumatique par assistance électrique en toute sécurité.

Mots clés : [moteur diesel, hybridation pneumatique, assistance électrique, conception, étude, performances, modélisation]

ABSTRACT

Power production in distant communities represents a technical challenge because of environmental requirements regarding GHG emissions and production costs. The main resources used are renewable wind energy and diesel generators. However, the operation of these generators is often at low load with poor performance and high production and exploitation costs.

This dissertation aims to study and design a model for the pneumatic hybridization of a C15 diesel engine with electric assistance. The results can be used to optimize diesel generator performance and reduce fossil fuel penetration rate in the energy system of distant communities.

Our research project is presented through four main chapters. The first one is a literature review focused on the operation of the four-stroke diesel engine. In the second chapter, we studied conventional turbocharging and other modern pneumatic hybridization techniques to identify the advantages and disadvantages. In the third chapter, we modeled and simulated our electrically assisted pneumatic hybridization model of a C15 diesel engine. Finally, we designed two electrically assisted hybridization configurations to select the best one for a 15.2-liter C15 diesel engine.

The interpretation and analysis of the results revealed an improvement in diesel engine power and torque and a significant reduction in GHG emissions and specific fuel consumption, especially at low engine rpm. Also, the 3D mechanical design of the diesel engine modifications and the discussion of different scenarios showed the technical feasibility and the safety of electrically assisted pneumatic hybridization.

Keywords: [diesel engine, pneumatic hybridization, electric assistance, design, study, performance, modeling]

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ix
RÉSUMÉ.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
TABLE DES MATIÈRES.....	xv
LISTE DES TABLEAUX	xix
LISTE DES FIGURES	xxi
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xxv
LISTE DES SYMBOLES.....	xxvii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 CONTEXTE.....	1
1.2 LES COLLECTIVITES ELOIGNEES AU CANADA.....	3
1.3 OBJECTIFS	4
1.3.1 Objectif général.....	4
1.3.2 Objectifs spécifiques	4
1.4 QUESTIONS DE LA RECHERCHE.....	5
1.5 METHODOLOGIE	5
CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART SUR LE MOTEUR DIESEL ET son FONCTIONNEMENT	7
1.1 ASPECTS THEORIQUES DU MOTEUR DIESEL	7
1.2 LE CYCLE QUATRE TEMPS D'UN MOTEUR DIESEL	8
1.2.1 Admission.....	8
1.2.2 Compression	9
1.2.3 Injection, combustion et détente	9
1.2.4 Échappement.....	10

1.3	CYCLE THERMODYNAMIQUE DU MOTEUR DIESEL.....	12
1.3.1	Cycle de Carnot.....	13
1.3.2	Cycle diesel théorique	14
1.3.3	Cycle mixte	18
1.3.4	Cycle réel.....	18
1.4	LES COLLECTEURS D'ADMISSION ET D'ECHAPPEMENT.....	19
1.5	LES EMISSIONS D'ECHAPPEMENT DU MOTEUR DIESEL.....	21
CHAPITRE 2 TECHNOLOGIES DE SURALIMENTATION DU MOTEUR		
DIESEL.....		
2.1	GENERALITES	23
2.2	SURALIMENTATION DES MOTEURS DIESEL PAR UN TURBOCOMPRESSEUR CLASSIQUE.....	24
2.2.1	Turbine	26
2.2.2	Compresseur	28
2.3	TURBOGENERATEUR ELECTRIQUE (ELECTRIC TURBO COMPOUND - ETC)	30
2.3.1	Fonctionnement.....	30
2.3.2	Composantes du turbocompresseur électrique	32
2.3.3	Architecture du système ETC	33
2.3.4	Avantages de l'utilisation d'ETC.....	37
2.3.5	Inconvénients de l'utilisation de l'ETC.....	37
2.4	TURBO GARRETT	38
2.4.1	Comment fonctionne un système TURBO-GARRETT.....	38
2.4.2	Les composants d'un TURBO-GARRETT	40
2.4.3	Ligne de surtension du TURBO GARRETT	42
2.4.4	Données sur la carte-compresseur.....	44
2.4.5	Avantages d'un TURBO-GARRETT	47
2.4.6	Inconvénients d'un TURBO-GARRETT	48
2.5	COMPARAISON ENTRE LE TURBO-COMPOUND MECANIQUE ET LE ELECTRIC- TURBO COMPOUND (ETC).....	48
2.6	HYBRIDATION PNEUMATIQUE PAR ASSISTANCE ELECTRIQUE D'UN MOTEUR DIESEL	52
2.6.1	Présentation de la technologie	52

2.6.2 Suralimentation avec turbocompresseur accouplé à un moteur électrique	53
2.6.3 Suralimentation par compresseur électrique en série avec le turbocompresseur	54
CHAPITRE 3 MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'HYBRIDATION PNEUMATIQUE PAR ASSISTANCE ÉLECTRIQUE D'UN MOTEUR DIESEL C15	57
3.1 INTRODUCTION	57
3.1.1 Approche de simulation.....	57
3.1.2 Modélisation numérique GT-Power.....	58
3.2 CARACTERISTIQUES DU MOTEUR	58
3.3 DESCRIPTION DES SIMULATIONS	60
3.3.1 Modélisation du moteur diesel C15 turbocompressé.....	61
3.3.2 Modélisation du moteur diesel C15 suralimenté avec un compresseur électrique accouplé en série avec le turbocompresseur	62
3.4 ANALYSE DES RESULTATS ET INTERPRETATIONS	63
3.4.1 Puissance utile du moteur.....	63
3.4.2 Couple du moteur.....	65
3.4.3 Consommation spécifique	65
3.4.4 Consommation spécifique en fonction de puissance	66
3.4.5 Pression maximale dans les cylindres	67
3.4.6 Les émissions des GES	68
3.4.7 Rendement de moteur.....	69
3.5 CONCLUSION PARTIELLE	70
CHAPITRE 4 CONCEPTION MÉCANIQUE DE L'HYBRIDATION PNEUMATIQUE PAR ASSISTANCE ÉLECTRIQUE D'UN MOTEUR DIESEL C15	71
4.1 INTRODUCTION	71
4.2 MOTEUR DIESEL SURALIMENTE PAR TURBOCOMPRESSEUR ACCOUPLE A UN MOTEUR ELECTRIQUE	72
4.2.1 Un élément de transmission entre le moteur électrique et le turbocompresseur.....	72
4.2.2 Moteur électrique à deux arbres entre le turbo et le compresseur	74

4.3	MOTEUR DIESEL SURALIMENTE AVEC UN COMPRESSEUR ELECTRIQUE DE 7 KW EN SERIE AVEC LE TURBOCOMPRESSEUR	75
4.3.1	Super-chargeur électrique DURYEA	75
4.3.2	Adaptateur de raccordement du tuyau et le super-chargeur	77
4.3.3	Tuyau de circulation de fluide	77
4.3.4	La situation vibratoire de l'installation	78
4.3.5	Valve bypass	79
4.3.6	Conception mécanique 3D de la suralimentation par un super-chargeur électrique	80
4.4	ANALYSE DES RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS	81
	CONCLUSION GÉNÉRALE	85
	ANNEXES	87
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques du Moteur Caterpillar C15	59
Tableau 2. Tableau comparatif de deux solutions d'hybridation par assistance électrique.....	82

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Consommation mondiale de l'énergie en 2017 selon les ressources [3].....	2
Figure 2. Les principaux émetteurs des GES dans le monde [4].....	2
Figure 3. Carte des collectivités éloignées au Canada [5].....	3
Figure 4. Schéma structurel d'un moteur diesel [6].....	7
Figure 5. Moteur en temps d'admission [7].....	8
Figure 6. Moteur en temps de Compression [7].....	9
Figure 7. Moteur en temps de Combustion [7].....	10
Figure 8. Moteur en temps d'échappement [7].....	10
Figure 9. Conception de l'arbre à cames et les soupapes [8].....	11
Figure 10. Un cycle thermodynamique.....	12
Figure 11. Diagramme p-V et T-s du cycle de Carnot [9].....	13
Figure 12. Diagramme p-V du cycle diesel théorique.....	15
Figure 13. Diagramme p-V de cycle diesel mixte.....	18
Figure 14. Diagramme p-V de cycle Diesel réel.....	19
Figure 15. Schéma des collecteurs d'admission et d'échappement [10].....	20
Figure 16. Composition des gaz d'échappement des moteurs diesel [11].....	21
Figure 17. Schéma de suralimentation « classique » par turbocompresseur [10].....	25
Figure 18. Fonctionnement turbocompresseur classique [12].....	27
Figure 19. Vue schématique du turbogénérateur électrique, (Turbo-Electric Compound - ETC) [14].....	31
Figure 20. Installation d'un ETC sur une génératrice Diesel [16].....	32
Figure 21. Composantes du système « Electric-turbo Compound – ETC » [16].....	33

Figure 22. Montage d'un ETC sur un ICE turbocompressé [16].....	35
Figure 23. Section transversale du turbogénérateur [17].....	36
Figure 24. Vue schématique d'un TURBO-GARRETT [18]	39
Figure 25. Fonctionnement d'un système TURBO-GARRETT [18]	40
Figure 26. Les composants d'un Turbo-Garrett [18]	41
Figure 27. Vu éclatée d'un Turbo-Garrett [18].....	41
Figure 28. La carte du compresseur [19]	42
Figure 29. Compresseur Ported-Shroud pour les fortes charges [19]	43
Figure 30. Carte de fonctionnement d'un compresseur TURBO-GARRETT [21]	46
Figure 31. Le principe de fonctionnement du moteur turbo-compound mécanique [23].....	49
Figure 32. L'utilisation de l'ETC pour les moteurs des véhicules [24]	51
Figure 33. Schéma de la suralimentation avec une machine électrique couplée sur l'arbre du turbocompresseur [27].....	53
Figure 34. Schéma fonctionnel de la suralimentation par un compresseur électrique couplée en série avec le turbocompresseur du moteur diesel [27]	55
Figure 35. Moteur Caterpillar C15 — 6 cylindres — 4 temps [26]	59
Figure 36. La modélisation du moteur diesel C15 Caterpillar suralimenté par son turbocompresseur classique	62
Figure 37. Modélisation du moteur diesel C15 Caterpillar suralimenté avec un compresseur électrique de 7 kW en série avec le turbocompresseur	63
Figure 38. Variation de la puissance du moteur avec le régime	64
Figure 39. Variation de la puissance du moteur avec les 4 régimes	64
Figure 40. Variation du couple moteur en fonction du régime	65
Figure 41. Variation de la consommation spécifique de moteur en fonction du régime.....	66
Figure 42. Consommation spécifique en fonction de la puissance de moteur.....	67
Figure 43. Pression maximale dans les cylindres en fonction du régime.....	67
Figure 44. Les émissions des GES (concentration CO ₂) en fonction du régime	68

Figure 45. Les émissions des GES (concentration CO) en fonction du régime	69
Figure 46. Variation du rendement de moteur en fonction du régime	69
Figure 47. Moteur électrique à vitesse réglable avec l'accouplement à double arbre à 90 ° [33]	72
Figure 48. Conception mécanique 3D de la suralimentation par un élément de transmission entre le moteur électrique, le turbo et le compresseur	73
Figure 49. Moteur électrique spécial a deux arbres [34]	74
Figure 50. Conception mécanique 3D de la suralimentation par un moteur électrique à deux arbres entre le turbo et le compresseur.....	74
Figure 51. Super-chargeur électrique DURYEA [35].....	76
Figure 52. Carte du super-chargeur électrique DURYEA [35]	76
Figure 53. Adaptateurs de raccordement	77
Figure 54. Tuyau de circulation de fluide (durit).....	77
Figure 55. Support isolant anti-vibrations [36].....	79
Figure 56. Montage de la valve bypass [37]	80
Figure 57. Conception mécanique 3D de la suralimentation par un super-chargeur électrique en série avec le turbocompresseur du moteur diesel C15	81
Figure 58 - Annexe I. Caractéristiques du moteur diesel C15 (5 pages).....	87
Figure 59 - Annexe II. Mise en plan de la conception 3D sur SolidWorks pour la suralimentation par un élément de transmission entre le moteur électrique et le turbocompresseur	92
Figure 60 - Annexe III. Mise en plan de la conception 3D sur SolidWorks pour la suralimentation par un moteur électrique à deux arbres entre le turbo et le compresseur	93
Figure 61 - Annexe IV. Mise en plan de la conception 3D sur SolidWorks pour la suralimentation par un super-chargeur électrique en série avec le turbocompresseur du moteur diesel C15	94

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

TC	Turbo compresseur
TCE	Turbocompresseur électrique
CE	Compresseur électrique
GES	Gaz à effet de serre
PMB	Point mort bas
PMH	Point mort haut
PME	Pression moyenne effective
PPM	Partie par million (concentration)
ICE	Moteur à combustion interne
ETC	Electric Turbo Compound
TER	Récupération d'énergie thermique
SFC	Consommation spécifique de carburant
TG	Turbogénérateur
CO₂	Dioxyde de carbone
CAO	Conception assistée par ordinateur

LISTE DES SYMBOLES

<i>C</i>	Couple [N.m]
<i>C_p</i>	Capacité thermique isobare massique [J K ⁻¹ kg ⁻¹]
<i>C_v</i>	Capacité thermique isochore massique [J K ⁻¹ kg ⁻¹]
<i>C_y</i>	Cylindrée [<i>m</i> ³]
M	Masse des gaz d'échappement [kg]
N	Vitesse de rotation de vilebrequin [tr/min]
<i>p_{cy}</i>	Pression dans le cylindre [Pa]
p	Pression [Pa]
<i>Q_{chaud}</i>	Transfert thermique avec la source chaude [J]
<i>Q_{froid}</i>	Transfert thermique avec la source froide [J]
Q	Quantité de chaleur [J]
T	Température [K]
P	Puissance [W]
<i>T_{cy}</i>	Température de cylindre [K]
V	Volume [<i>m</i> ³]

π_{det}	Le taux de la détente d'une turbine
η	Rendement
Ω	Vitesse angulaire [rd/s]
m'	Débit massique d'air [kg /s]
P_c	La puissance du compresseur [W]
W_{com}	Travail du compresseur [J]
π_c	Le rapport de compression d'un compresseur
η_{ise}	Rendement isentropique
η_{mec}	Rendement mécanique
η_{TM}	Rendement total de la turbine
P_{cal}	La puissance calorifique du carburant [W]
m_c	La masse de combustible nécessaire [g]
CSE	La consommation spécifique effective [g/kWh]
γ	Coefficient polytropique
ΔE	La variation d'énergie de système [J]
W	Travail utile [J]

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 CONTEXTE

Dans le contexte mondial actuel, où la production de l'énergie propre est une préoccupation constante, la diminution de l'utilisation des énergies fossiles a un rôle important. Un des plus grands défis que doit relever notre société est de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) afin d'atténuer les changements climatiques et leurs effets sur la planète.

Les principales émissions de GES au Canada proviennent de l'utilisation de combustibles fossiles pour le transport, le chauffage et la production d'électricité dans les régions éloignées au moyen de génératrices diesel. Cette recherche cible la réduction de la consommation de carburant et les émissions de GES dans la production d'électricité sur un site minier isolé en appliquant l'hybridation pneumatique par assistance électrique. Plus spécifiquement, nous visons à prouver la faisabilité technique, économique et environnementale de cette solution technologique [1] [2].

Il faut mentionner que 81% de la consommation mondiale d'énergie en 2017 est d'origine fossile dans laquelle le pétrole représente 34%, suivi du charbon 26% (Figure 1). Ceci explique l'énorme quantité d'émissions de GES à l'échelle mondiale (Figure 2).

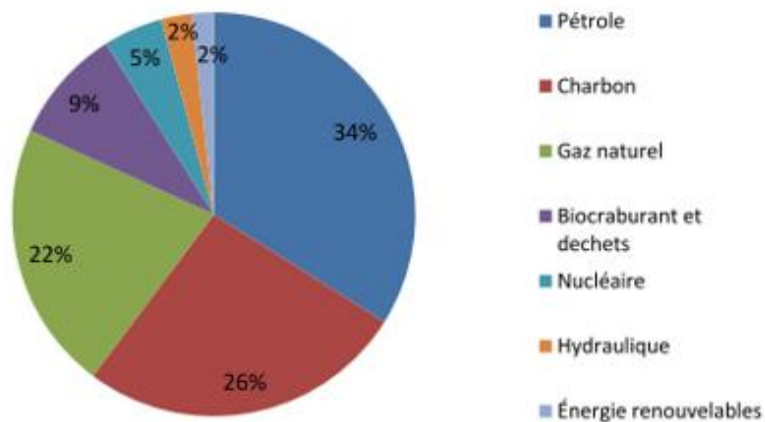


Figure 1. Consommation mondiale de l'énergie en 2017 selon les ressources [3]

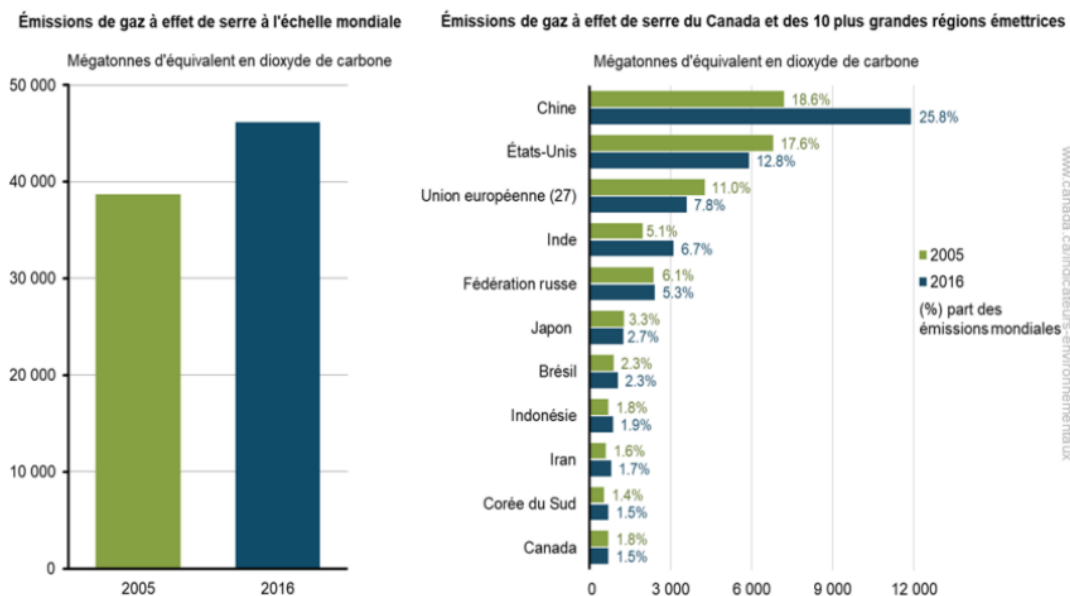


Figure 2. Les principaux émetteurs des GES dans le monde [4]

La nouvelle technologie de l'hybridation pneumatique a donné de bons résultats en termes de consommation et de performance des véhicules. Parmi ces technologies on peut citer la suralimentation par Turbocompresseur électrique (TEC), turbo Garrett et avec un

compresseur électrique couplé en série avec le turbocompresseur. Ceci prouve l'importance d'étudier ces nouveaux concepts de suralimentation afin de réduire la consommation du carburant, les émissions de gaz à effet de serre (GES) et améliorer les performances du moteur diesel grâce à l'hybridation pneumatique.

1.2 LES COLLECTIVITES ELOIGNEES AU CANADA

Selon les statistiques, il y a environ 200 000 Canadiens qui vivent dans 292 collectivités éloignées (Figure 3). La production de l'électricité dans ces zones est assurée essentiellement par des centrales fossiles qui utilisent le diesel comme carburant pour les groupes électrogènes (moteurs diesel) avec plus de 514 MW installés, suivi du gaz naturel et du fioul lourd de puissance installée qui dépasse le 100 MW. Cette production nécessite des coûts élevés et une grande consommation des énergies fossiles, qui provoque des émissions des GES dues à la combustion dans les moteurs et au transport des carburants jusqu'aux sites.



Figure 3. Carte des collectivités éloignées au Canada [5]

L'idée de la suralimentation consiste à suralimenter le moteur diesel à travers l'insertion d'une machine électrique en série avec le turbocompresseur pour fournir une

pression et un débit d'air optimal lorsque le moteur diesel fonctionne à bas régimes. Le but de cette technique est d'économiser le carburant, d'augmenter la puissance et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES).

1.3 OBJECTIFS

1.3.1 Objectif général

Le but de la présente recherche est l'étude et la conception mécanique d'un modèle d'hybridation pneumatique par assistance électrique d'un moteur diesel C15 afin de déterminer le potentiel de réduction de la consommation spécifique de carburant et des émissions de gaz à effet de serre ainsi que les nouvelles performances du moteur diesel.

1.3.2 Objectifs spécifiques

Pour atteindre l'objectif principal, nous avons établi des objectifs secondaires qui consistent à :

– Justifier les choix de technologies et les solutions d'hybridation pneumatique en évaluant les avantages et inconvénients des différentes techniques de la suralimentation des moteurs diesel à l'aide d'un turbocompresseur classique, un turbocompresseur électrique (TEC), un turbo Garrett et par assistance électrique.

– Étudier l'hybridation pneumatique par assistance électrique d'un moteur diesel. Modéliser et simuler par des outils informatiques (logiciel de simulation des moteurs thermiques GT-Power).

– Étudier en mode paramétrique la consommation spécifique de combustible en fonction de la pression à l'admission et du régime du moteur, déterminer la puissance optimale du moteur électrique qui permet d'avoir les meilleurs paramètres à l'admission (débit et pression d'air). Déterminer les performances et la faisabilité technique, économique et environnementale de cette solution.

– Conception mécanique 3D de la solution et des modifications à réaliser sur le moteur diesel C15. Conception assistée par ordinateur avec des outils informatiques (logiciel CAO 3D SolidWorks).

1.4 QUESTIONS DE LA RECHERCHE

- Quelles sont les différentes technologies d'hybridation pneumatique des moteurs diesel ?
- Quelle est la différence entre la suralimentation mécanique et électrique ?
- Quels sont les impacts de l'hybridation pneumatique par assistance électrique d'un moteur diesel sur les performances moteur ?
- Quelles sont les modifications à effectuer sur le moteur diesel pour la réalisation de l'hybridation pneumatique par assistance électrique d'un moteur diesel ?

1.5 METHODOLOGIE

Afin d'atteindre les objectifs souhaités, nous avons suivi les étapes suivantes, décrites dans les différentes sections du mémoire.

- Introduction générale :

Introduction générale, présentation générale de la problématique, contexte et objectifs de la recherche. Ensuite les questions de la recherche et la méthodologie à suivre.

- Chapitre 1 :

Décrit les aspects théoriques et le fonctionnement de moteur diesel ainsi quelques technologies récentes qui sont en relation avec le thème étudié. Également, nous présentons une étude des émissions du moteur diesel, des collecteurs d'admission et d'échappement.

- Chapitre 2 :

Une présentation théorique de la suralimentation d'un moteur diesel et quelques technologies utilisées dans ce domaine représente la première partie de ce chapitre. Ensuite, nous évaluons les différentes techniques de suralimentation des moteurs diesel à l'aide d'un turbocompresseur classique, un turbocompresseur électrique (TEC), par un turbo Garrett et par assistance électrique.

➤ Chapitre 3 :

Ce chapitre est réservé pour la modélisation et la simulation de l'hybridation pneumatique par assistance électrique d'un moteur diesel C15. Ceux-ci ont été effectuées à l'aide des outils informatiques (logiciel de simulation des moteurs thermiques GT-Power).

Les résultats et performances des deux scénarios (fonctionnement sans et avec assistance électrique), les analyses paramétriques des résultats, de la puissance et du couple du moteur, et également une analyse de la consommation spécifique du carburant, de la pression moyenne effective et des émissions des GES sont présentés à la fin de ce chapitre.

➤ Chapitre 4 :

Ce chapitre comprend une proposition de conception mécanique 3D des modifications à réaliser sur le moteur diesel C15 pour la solution choisie avec un dossier technique bien détaillé. (Conception assistée par ordinateur avec des outils informatiques : logiciel CAO 3D — SolidWorks).

Les discussions sur les différents scénarios pour l'application de l'hybridation pneumatique par assistance électrique d'un moteur diesel, ainsi que la description de la solution, le choix des pièces standard et les mécanismes mécaniques sont présentés à la fin de ce chapitre.

➤ Conclusion générale :

À la fin, une conclusion générale offre une interprétation et analyse de principaux résultats obtenus, ainsi que des suggestions de nouvelles perspectives.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART SUR LE MOTEUR DIESEL ET SON FONCTIONNEMENT

Dans ce chapitre, nous souhaitons effectuer une étude théorique du moteur diesel ainsi que le fonctionnement afin de bien comprendre les divers aspects liés à la problématique.

1.1 ASPECTS THEORIQUES DU MOTEUR DIESEL

Le moteur diesel est un moteur à combustion, ce qui signifie qu'il brûle le mélange carburant-oxygène à l'intérieur des cylindres. Sa vitesse de rotation est limitée par la quantité de carburant injectée dans les cylindres du moteur. Un moteur diesel ne nécessite pas de système d'allumage.

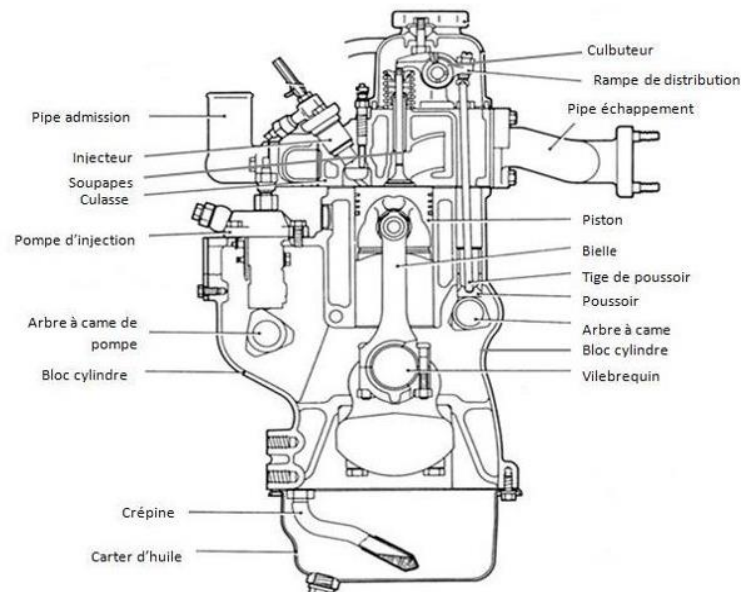


Figure 4. Schéma structurel d'un moteur diesel [6]

En effet, dans un moteur diesel, le carburant est injecté dans le cylindre lorsque le piston arrive au maximum de sa course de compression. Lorsque le carburant est injecté, il s'évapore et s'enflamme en raison de la chaleur créée par la compression de l'air dans le cylindre (Figure 4).

1.2 LE CYCLE QUATRE TEMPS D'UN MOTEUR DIESEL

Dans le cycle quatre temps le piston effectue quatre courses (admission, compression, combustion-détente et échappement). Par conséquent, il nécessite deux tours de vilebrequin, ou 720° de rotation du vilebrequin ($360^\circ \times 2$) pour terminer un cycle. Les quatre temps du moteur sont [7] :

1.2.1 Admission

Le cycle quatre temps commence par l'admission. Durant cette étape le mouvement de descente du piston du PMH vers le PMB augmente le volume dans le cylindre, la pression dans le cylindre diminue créant ainsi une dépression dans le cylindre ; l'air frais entre à travers les soupapes d'admission et la soupape d'échappement est fermée, ensuite la soupape d'admission se ferme quand le piston est proche de PMB (Figure 5).

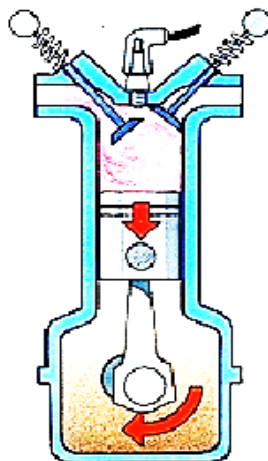


Figure 5. Moteur en temps d'admission [7]

1.2.2 Compression

Durant la course de compression, les soupapes d'échappement et d'admission sont fermées, et le piston remonte du PMB vers le PMH. En conséquence, le volume dans le cylindre diminue et la pression dans le cylindre augmente créant ainsi un réchauffement de l'air (Figure 6).

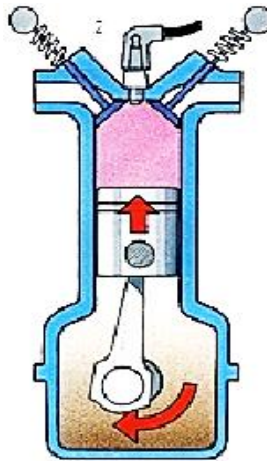


Figure 6. Moteur en temps de Compression [7]

1.2.3 Injection, combustion et détente

C'est le temps moteur pour créer un travail à partir de la combustion du mélange. La soupape d'échappement est fermée, la soupape d'admission est fermée et quand le piston est proche de PMH, la pression et la température de l'air accroissent et arrivent à des valeurs qui permettent au carburant injecté de s'auto-enflammer. Cette combustion crée une augmentation de pression dans le cylindre sur le piston qui descend du PMH vers le PMB (Figure 7).

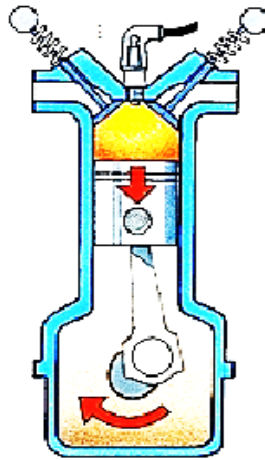


Figure 7. Moteur en temps de Combustion [7]

1.2.4 Échappement

Évacuer les gaz brûlés hors du cylindre :

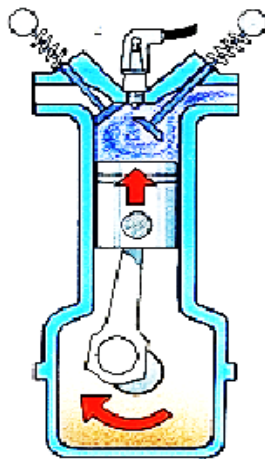


Figure 8. Moteur en temps d'échappement [7]

La soupape d'échappement s'ouvre quand le piston se trouve avant le PMB, la soupape d'admission est fermée, le piston remonte du PMB vers le PMH et le volume dans le cylindre

diminue. Ensuite les gaz brûlés sont chassés par le piston vers l'extérieur et finalement la soupape d'échappement se ferme quand le piston est proche de PMH (Figure 8).

➤ Remarque :

Concernant l'ouverture et la fermeture : les soupapes d'admissions et d'échappements sont commandées par la synchronisation de la rotation de l'arbre à cames avec le vilebrequin qui garantit le fonctionnement continu des soupapes (Figure 9).

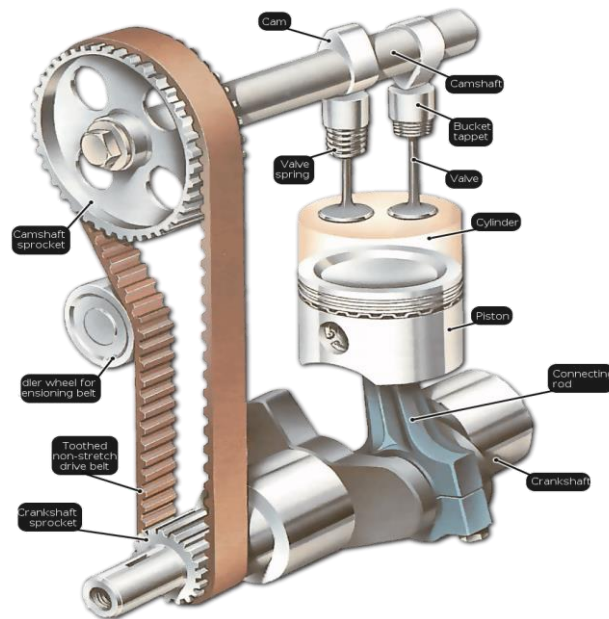


Figure 9. Conception de l'arbre à cames et les soupapes [8]

1.3 CYCLE THERMODYNAMIQUE DU MOTEUR DIESEL

Un cycle thermodynamique consiste en une série de processus thermodynamiques, qui se déroulent dans un ordre spécifique, et les conditions initiales sont restaurées à la fin des processus. Lorsque les processus du cycle sont tracés sur le diagramme p-V, ils forment une figure fermée, chaque processus étant décrit par sa propre courbe. La zone sous chaque courbe est le travail effectué à une certaine échelle. Au cours de chaque processus, le travail effectué au cours d'un cycle sera donné par l'aire du diagramme comme indiqué sur la Figure 10.

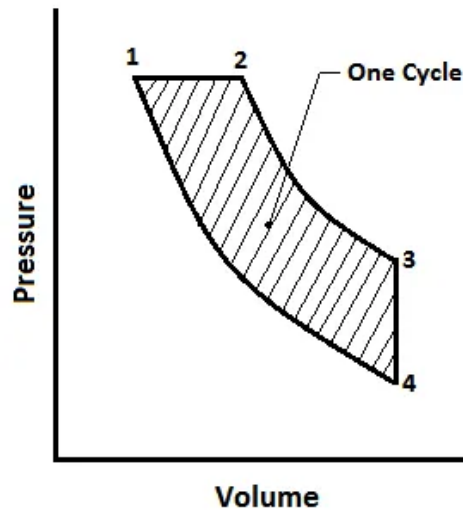


Figure 10. Un cycle thermodynamique

Les cycles thermodynamiques sont essentiels pour les systèmes de développement de puissance (tels que moteur à essence, moteur diesel, turbine à gaz, etc.). Ces moteurs utilisent un mélange de carburant et d'air pour leurs opérations. Étant donné que la masse de carburant utilisée, par rapport à la masse d'air, est très petite, on peut donc supposer que le mélange se comporte comme un gaz parfait [9].

Un cycle thermodynamique qui nécessite quatre courses de piston et deux tours complètes de la manivelle est appelé cycle à quatre temps. Mais un cycle qui ne nécessite qu'une course de piston et un tour de manivelle, est appelé cycle à deux temps. Lorsque l'air est supposé être la substance de travail à l'intérieur du cylindre du moteur, le cycle est appelé cycle d'air.

1.3.1 Cycle de Carnot

Ce cycle est conçu par Carnot qui fut le premier scientifique à analyser le problème du rendement d'un moteur thermique en ignorant ses détails mécaniques. Il a concentré son attention sur les caractéristiques de base d'un moteur thermique. Dans un cycle de Carnot, la substance de travail est soumise à une opération cyclique consistant en deux processus isothermes et deux processus adiabatiques. Le moteur développé par Carnot a de l'air (qui est supposé fonctionner comme un gaz parfait) comme substance active enfermée dans un cylindre, dans lequel se déplace un piston sans frottement (Figure 11).

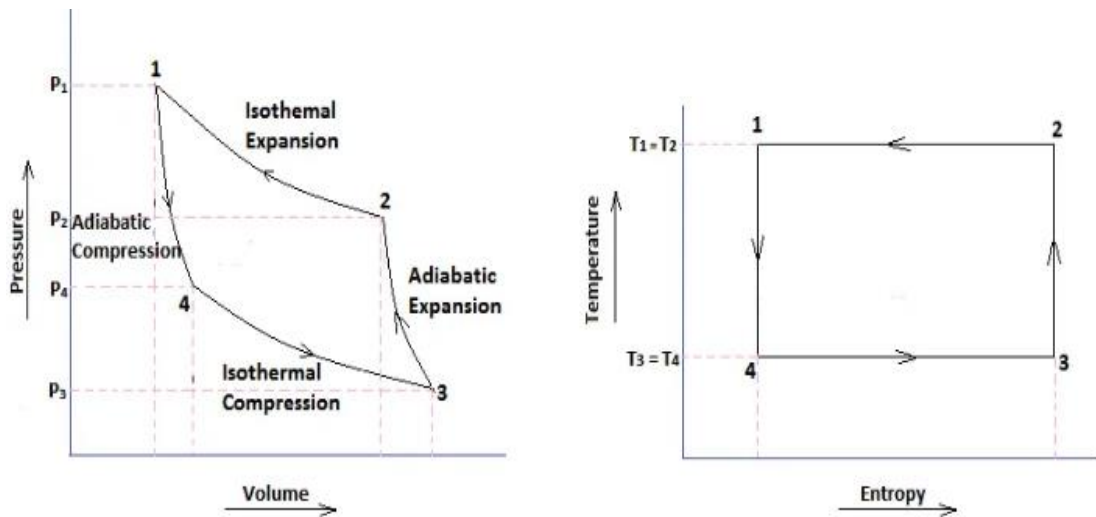


Figure 11. Diagramme p-V et T-s du cycle de Carnot [9]

Les parois du cylindre et du piston sont de parfaits non-conducteurs de chaleur mais le fond du cylindre est un parfait conducteur de la chaleur. Cependant, le fond du cylindre peut être recouvert, à volonté, par un capot isolant. Le moteur est supposé fonctionner entre deux sources de capacité infinie, une à une température plus élevée et l'autre à une température plus basse.

➤ Rendement du cycle de Carnot :

$$\eta_c = \frac{\text{énergie de sortie}}{\text{énergie entrée}} \quad (1 - 1)$$

1.3.2 Cycle diesel théorique

Le cycle diesel théorique inspiré du cycle de Carnot, il comprend deux adiabatiques réversibles (au cours duquel l'entropie du système étudié reste constante), une transformation isobare (pression constante) et une évolution isochore (volume fixe) (Figure 12).

❖ 0→1 : Aspiration du fluide à une pression isobare (P_a : atmosphérique) dans le cylindre de moteur diesel. Donc : $P_0 = P_1 = P_a$.

❖ 1→2 : Compression isentropique.

❖ 2→3 : Combustion isobare du fluide avec une augmentation du volume.

Donc : $P_2 = P_3$.

❖ 3→4 : Détente isentropique qui amène le volume à V_1 , mais à une pression P_4 supérieure à celle de l'atmosphère. Donc $V_1 = V_4$.

❖ 4→1 : Échappement isobare des gaz brûlés. Retour au point de départ 0.

Donc : $P_0 = P_1 = P_a$.

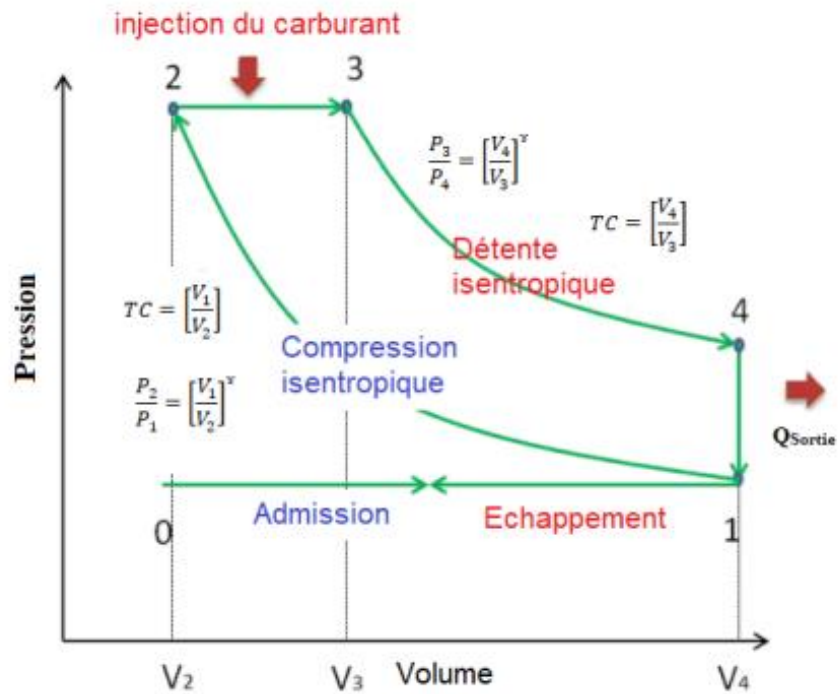


Figure 12. Diagramme p-V du cycle diesel théorique

Le bilan énergétique cycle thermodynamique du moteur diesel est le suivant :

➤ Le rendement théorique :

$$\eta_{Th} = \frac{\text{Travail utile } W \text{ (J)}}{\text{Chaleur fournie } Q_{23} \text{ (J)}} \quad (1 - 2)$$

L'application du premier principe de la thermodynamique, la variation d'énergie de système s'écrit :

$$\Delta E = W + Q_{23} + Q_{41} \quad (1 - 3)$$

η_{Th} : Le rendement théorique

W : Travail utile (J)

ΔE : La variation d'énergie de système (J)

Q : Quantité de chaleur fournie (J)

Le rendement thermodynamique :

$$\eta_{Th} = 1 - \frac{Q_{41}}{Q_{23}} \quad (1 - 4)$$

Avec

$$Q_{41} = m c_v (T_4 - T_1) \quad (1 - 5)$$

Et

$$Q_{23} = m c_p (T_3 - T_2) \quad (1 - 6)$$

Donc

$$\eta_{Th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{T_4 - T_1}{(T_3 - T_2)} \quad (1 - 7)$$

Avec

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (1 - 8)$$

T : La température (K)

m : Masse du gaz dans les cylindres (kg)

C_p : Capacité thermique isobare massique ($J K^{-1} kg^{-1}$)

C_v : Capacité thermique isochore massique ($J K^{-1} kg^{-1}$)

γ : Coefficient polytropique

Q : Quantité de chaleur fournie (J)

➤ La consommation spécifique effective CSE (g/kWh) :

C'est la qualité de la transformation de l'énergie dans le moteur diesel. Cette grandeur est inversement proportionnelle au rendement moteur. C'est la masse de combustible nécessaire pour la production d'un kWh d'énergie :

$$CSE = \frac{m_c}{E_c} \quad (1 - 9)$$

CSE : La consommation spécifique effective (g/kWh)

m_c : La masse de combustible nécessaire (g)

E_c : L'énergie de combustible (kWh)

➤ La puissance effective (P_e) :

$$P_e = C_e \Omega_{rot} \quad (1 - 10)$$

P_e : Puissance développée au niveau de l'arbre moteur (W)

C_e : Le couple effectif (N.m)

Ω_{rot} : La vitesse angulaire (rad/s)

➤ Rendement global :

$$\eta_g = \frac{P_e}{P_{cal}} \quad (1 - 11)$$

P_e : La puissance effective (W)

P_{cal} : La puissance calorifique du carburant (W)

1.3.3 Cycle mixte

Le développement de la combustion dans un moteur diesel n'est pas tout à fait similaire à celui décrit dans le cycle théorique du diesel, qui est isobare (pression constante). Un autre cycle décrivant plus précisément le phénomène de combustion a été développé : le cycle mixte. Pendant ce cycle, la combustion se produit en deux étapes : la première est une combustion isochore (un volume constant et un accroissement de pression) et la seconde isobare (une pression constante avec un accroissement de volume) (Figure 13).

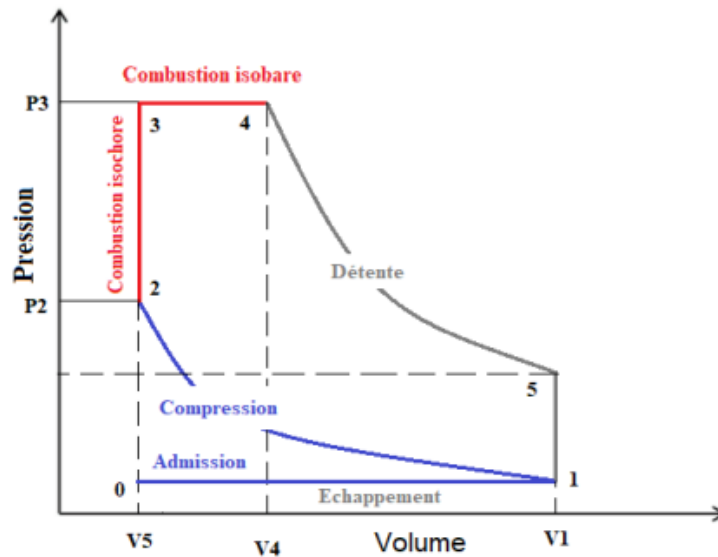


Figure 13. Diagramme p-V de cycle diesel mixte

1.3.4 Cycle réel

Le cycle thermodynamique théorique d'un moteur diesel est élaboré sur la base d'hypothèses visant à contourner les complexités des problématiques étudiées. Parmi les hypothèses développées dans l'étude du cycle diesel, on cite la considération de fluide comme un gaz parfait et la réversibilité des transformations que subit le fluide au cours du cycle.

De même, on tient compte de la constance de la température de l'air entrant dans les cylindres ainsi que de l'absence d'échange thermique entre le gaz en combustion et les parois des cylindres aux moments de la détente.

Cependant, ces hypothèses ne sont pas entièrement réelles car les résultats expérimentaux ne sont pas identiques aux performances évaluées théoriquement. Par conséquent, il est intéressant d'étudier le cycle réel en prenant les mesures sur des prototypes pour bien identifier les défauts de conception, les différences avec les estimations théoriques afin de minimiser les pertes et améliorer la conception (Figure 14).

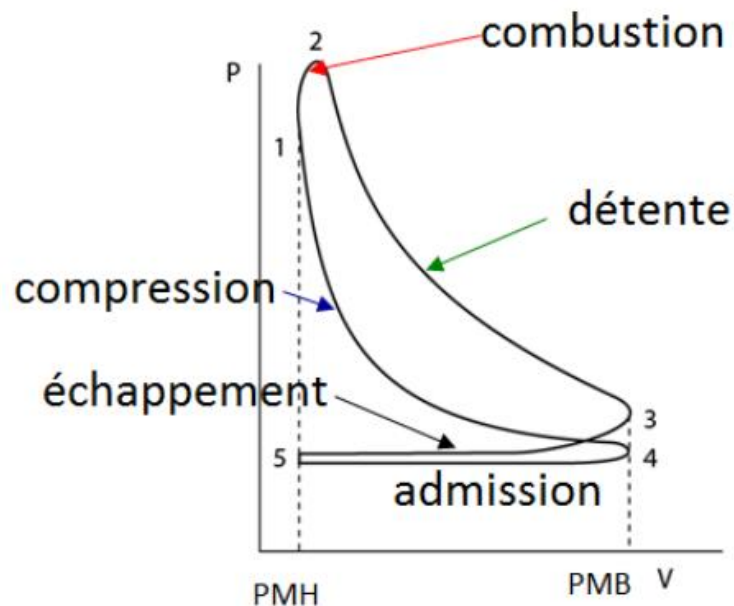


Figure 14. Diagramme p-V de cycle Diesel réel

1.4 LES COLLECTEURS D'ADMISSION ET D'ÉCHAPPEMENT

Le collecteur d'admission est également nommé répartiteur. Il fait partie de la ligne d'air d'un moteur thermique, c'est-à-dire d'un moteur à combustion. Le rôle du collecteur d'admission est de distribuer l'air admis dans le moteur sur la totalité des cylindres pour exécuter une combustion totale du carburant dans chacun d'eux. L'air peut provenir

directement de l'extérieur du moteur, avec ou sans filtrage, ou être mélangé avec du gaz d'échappement refroidi grâce à une vanne de type EGR (dispositif de recirculation des gaz d'échappement). Le collecteur d'admission s'installe entre le filtre à air et la culasse du moteur (Figure 15).

Le collecteur d'échappement va récupérer les gaz d'échappement au niveau du moteur. Ainsi, c'est une pièce particulièrement solide qui est construite avec des matériaux très résistants. En effet, elle doit pouvoir résister à des températures allant jusqu'à 800 °C. Pour un moteur diesel suralimenté, le collecteur d'échappement permet aux gaz brûlés de s'échapper dans le turbocompresseur.

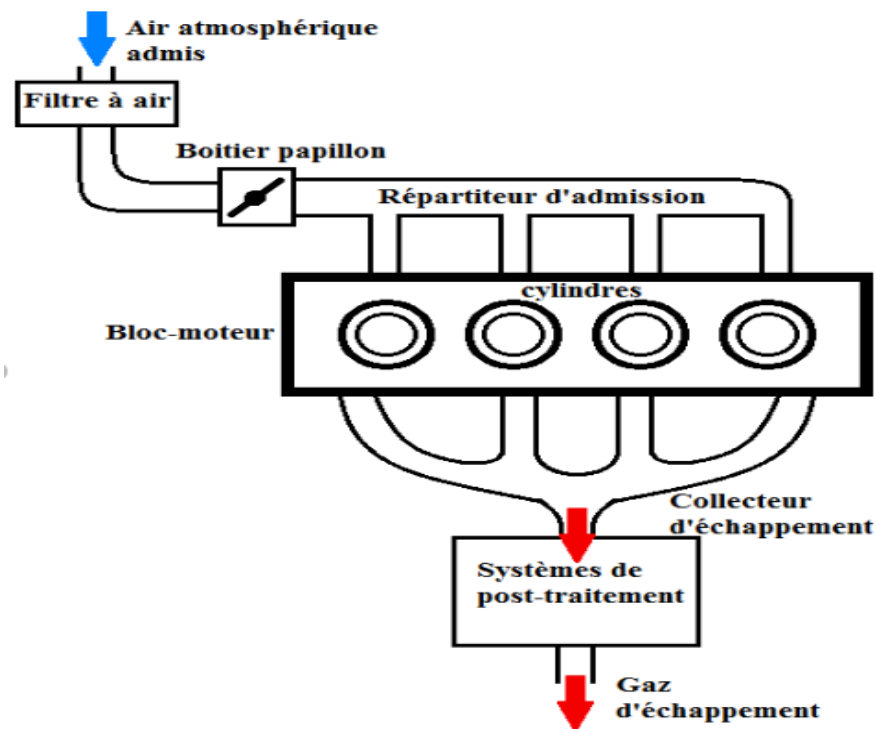


Figure 15. Schéma des collecteurs d'admission et d'échappement [10]

1.5 LES EMISSIONS D'ÉCHAPPEMENT DU MOTEUR DIESEL

Les gaz d'échappement d'un moteur diesel sont les gaz produits par un moteur à combustion interne de type diesel, ainsi que toutes les particules qu'ils contiennent. Sa composition peut varier en fonction du type de carburant ou du taux de consommation, ou encore du régime de fonctionnement du moteur diesel.

Si on estime le carburant totalement composé d'hexadécane, la réaction de combustion interne d'un moteur diesel dans la chambre de combustion peut être décrite par la relation de la combustion de l'hexadécane, soit :



« Les gaz d'échappement diesel sont un cancérigène du groupe 1, qui cause le cancer du poumon et a une association positive avec le cancer de la vessie. Pour cela, il est nécessaire de chercher des solutions et de nouvelles technologies (comme l'hybridation pneumatique) pour réduire les émissions des gaz cancérigènes du moteur diesel en question, ainsi les émissions des gaz à effet de serre GES » [11] (Figure 16).

Espèce	Composition moyenne des gaz d'échappement des moteurs diesel (Reif 2014) [17]	Composition moyenne des gaz d'échappement des moteurs diesel (Merker, Teichmann, 2014) [18]	Première composition d'échappement du moteur diesel (Hartenstein, 1895) [19]	Composition des gaz d'échappement du moteur diesel (Khair, Majewski, 2006) [20]	Composition des gaz d'échappement du moteur diesel (diverses sources)
	Pourcentage de masse	Pourcentage de volume	Pourcentage de volume	(Volume?) Pourcentage	
Azote (N ₂)	75,2%	72,1%	-	~ 67%	-
Oxygène (O ₂)	15%	0,7%	0,5%	~ 9%	-
Dioxyde de carbone (CO ₂)	7,1%	12,3%	12,5%	~ 12%	-
Eau (H ₂ O)	2,6%	13,8%	-	~ 11%	-
Monoxyde de carbone (CO)	0,043%	0,09%	0,1%	-	100 à 500 ppm [21]
Oxyde d'azote (NO _x)	0,034%	0,13%	-	-	50 à 1 000 ppm [22]
Hydrocarbures (HC)	0,005%	0,09%	-	-	-
Aldéhyde	0,001%	n / A	-	-	-
Particules (sulfate + substances solides)	0,008%	0,0008%	-	-	1 à 30 mg · m ⁻³ [23]

Figure 16. Composition des gaz d'échappement des moteurs diesel [11]

CHAPITRE 2

TECHNOLOGIES DE SURALIMENTATION DU MOTEUR DIESEL

2.1 GENERALITES

Parmi les grands buts de la présente recherche est la réduction de la consommation du carburant et l'optimisation des performances de fonctionnement du moteur diesel comme l'augmentation de la puissance avec la même consommation du combustible.

La puissance du moteur (P) est proportionnelle au couple (C) développé et à la vitesse de rotation (Ω). Pour augmenter cette puissance, au moins l'un de deux paramètres ci-bas doit être amélioré.

$$P = C \times \Omega \quad (2 - 1)$$

Le premier scénario c'est l'augmentation de la vitesse de rotation du moteur ce qui réclame des modifications au niveau des pièces mobiles comme les pistons, les bielles, le vilebrequin et les organes en mouvement. Le système d'injection, lui aussi, doit être plus rapide et plus puissant pour maintenir une bonne combustion sans retarder l'injection. Toutes ces modifications sont pratiquement impossibles en raison du surdimensionnement des pièces mécaniques nécessitées par ce scénario et du coût très élevé de cette solution.

Le deuxième scénario est l'augmentation du couple moteur, qui est proportionnelle à la pression moyenne effective du cycle (PME) et le volume du cylindre du moteur, donnés par l'équation suivante :

$$C = \text{PME} \times C_y \times \frac{1}{4\pi} \quad (2 - 2)$$

Donc

$$P = \text{PME} \times C_y \times \frac{1}{4\pi} \times \Omega \quad (2 - 3)$$

PME : La pression moyenne effective du cycle (Pa)

C_y : Cylindrée (m^3)

P : La puissance du moteur (W)

C : Le couple moteur (N.m)

Ω : La vitesse de rotation (rad/s)

Puisqu'on ne peut pas modifier l'encombrement du moteur, la solution la plus avantageuse pour obtenir une meilleure puissance du moteur sans surdimensionner la cylindrée est l'augmentation de la pression moyenne effective du cycle (PME) c'est-à-dire accroître la quantité d'air admis dans le cylindre. Ainsi, la suralimentation et l'hybridation pneumatique sont des solutions pour augmenter la puissance et l'efficacité des moteurs diesel.

2.2 SURALIMENTATION DES MOTEURS DIESEL PAR UN TURBOCOMPRESSEUR CLASSIQUE

Une augmentation de l'admission d'air dans les cylindres peut être assurée par une hybridation pneumatique qui utilise souvent des sources d'énergie externes. L'exemple le plus simple d'hybride pneumatique est la suralimentation classique au moyen d'un turbocompresseur qui récupère l'énergie cinétique des gaz d'échappement et les convertit en énergie mécanique pour comprimer l'air à l'admission. (Figure 17).

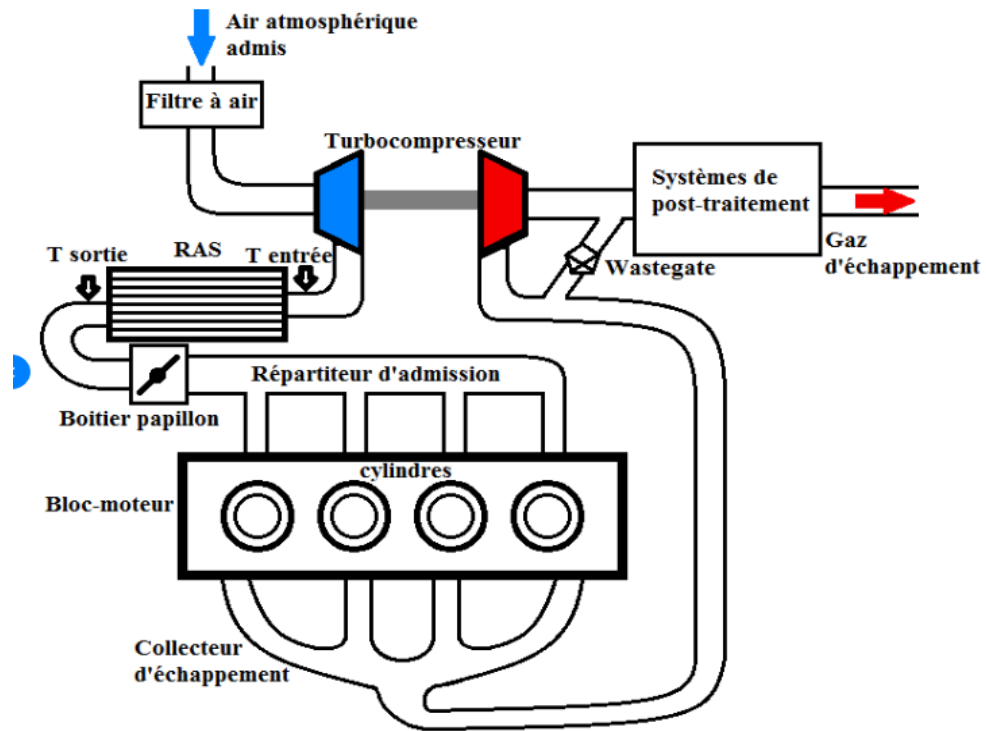


Figure 17. Schéma de suralimentation « classique » par turbocompresseur [10]

Lors du temps moteur, la combustion du carburant se transforme en énergie mécanique et en énergie thermique sous forme de gaz d'échappement. La quantité d'énergie qui se trouve dans les gaz d'échappement est exprimée par les relations suivantes :

$$Q_e = (1 - \eta)Q_{tot} - Q_p = MC_v(T_e - T_a) \quad (2 - 4)$$

Q_e : La quantité d'énergie qui se trouve dans les gaz d'échappement (J)

η : Le rendement de cycle thermodynamique

Q_{tot} : Quantité d'énergie totale créée après la combustion (J)

Q_p : Perte de chaleur dans les parois (J)

M : Masse des gaz d'échappement (kg)

C_v : Capacité thermique isochore massique ($J K^{-1} kg^{-1}$)

T_a : Température des gaz d'admission (K)

T_a : Température des gaz d'échappement (K)

2.2.1 Turbine

C'est un mécanisme sous forme d'une turbine qui assure la transformation de l'énergie cinétique des gaz d'échappement en un travail mécanique de rotation dans le cas d'un moteur diesel. Cette énergie est utilisée pour faire tourner la roue du compresseur à travers un arbre reliant les deux roues.

Les caractéristiques de la turbine sont souvent définies par une cartographie qui donne le débit massique de gaz ou le rendement global de la turbine en fonction du taux de détente des gaz d'échappement pour plusieurs régimes (vitesses de rotation). Ces différentes variables sont très importantes à la fois lors du choix d'un point de fonctionnement de la turbine et lors du choix de la bonne turbine pour un moteur particulier.

Le calcul du rendement total de la turbine est en fonction du rendement mécanique et du rendement isentropique :

$$\eta_{TM} = \eta_{mec} \times \eta_{ise} \quad (2 - 5)$$

η_{TM} : Rendement total de la turbine

η_{ise} : Rendement isentropique

η_{mec} : Rendement mécanique

Le rendement fournit des informations sur la puissance totale récupérée par la turbine à partir de la puissance thermodynamique dans les gaz. Le taux de la détente d'une turbine est exprimé par :

$$\pi_{\text{det}} = \frac{p_1}{p_2} \quad (2 - 6)$$

π_{det} : Le taux de la détente d'une turbine

p_1 : Pression d'entrée de la turbine (Pa)

p_2 : Pression de sortie de la turbine (Pa)

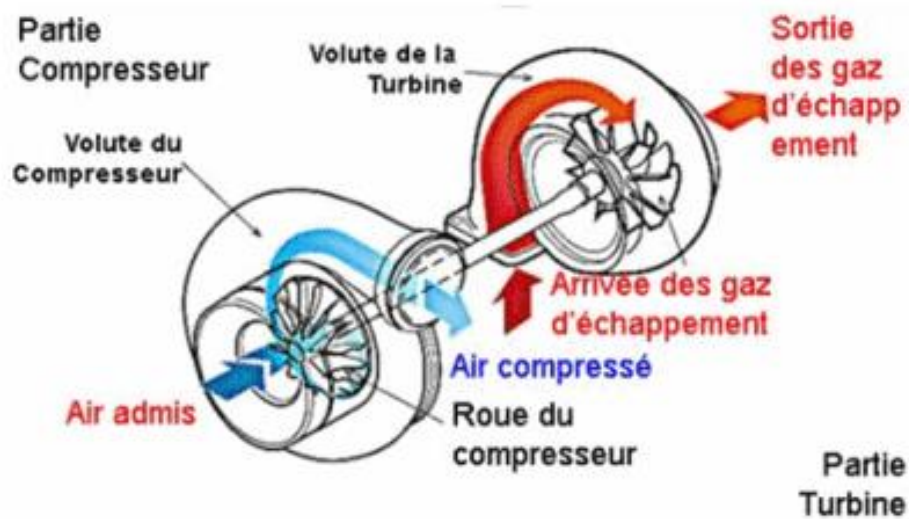


Figure 18. Fonctionnement turbocompresseur classique [12]

2.2.2 Compresseur

Le compresseur est le deuxième composant d'un turbocompresseur (Figure 18). C'est un mécanisme qui assure la suralimentation des cylindres en air comprimé grâce à l'énergie mécanique de rotation de la roue du compresseur qui tourne à grande vitesse. Il est caractérisé par une cartographie qui représente les courbes du rapport de compression en fonction des débits massiques ou volumiques réduits à des vitesses et rendements fixes. La lecture de la cartographie d'un compresseur permet d'identifier les limites de débit maximal (à un rendement maximal 65%) qui sont à l'extrémité droite de la cartographie ainsi que la limite de pompage qui est à l'extrémité gauche. Cette cartographie est indispensable dans le choix du turbocompresseur convenable pour un moteur. En effet, le choix du turbocompresseur se fait par un calcul des besoins du moteur aux différents régimes ainsi que le calcul des paramètres du rapport des pressions et des débits volumiques ou massiques de l'air traversant le turbo. Les points de fonctionnement du moteur seront ensuite projetés sur le diagramme afin de connaître leurs positions dans le diagramme.

Un turbocompresseur est bien adapté à un moteur lorsque ces points de fonctionnement se trouvent dans la zone centrale du diagramme sans qu'ils soient dans la zone de pompage. En fait, ce phénomène de pompage se produit dans les compresseurs centrifuges lorsqu'on atteint les compressions maximales avec des débits minimaux. Deux niveaux de pression se forment dans la zone d'entrée (basse pression) et la zone de sortie d'air (haute pression) provoquant l'inversion de l'écoulement de l'air vers l'arrière du compresseur. Cette situation est caractérisée par une instabilité à cause des fluctuations entre débit et pression ce qui peut endommager le compresseur [13].

Le rapport de compression est exprimé par :

$$\pi_c = \frac{p_4}{p_3} \quad (2 - 7)$$

π_c : Le rapport de compression d'un compresseur

p_3 : Pression d'entrée du compresseur (Pa)

p_4 : Pression de sortie du compresseur (Pa)

En appliquant le premier principe de la thermodynamique, le travail et la puissance du compresseur sont exprimés par :

$$W_{\text{com}} = C_p(T_4 - T_3) \quad (2 - 8)$$

W_{com} : Travail du compresseur (J)

T_3 : Température d'entrée du compresseur (K)

T_4 : Température de sortie du compresseur (K)

C_p : Capacité thermique isobare massique ($\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$)

$$P_C = m'_{\text{air}} C_p(T_4 - T_3) \quad (2 - 9)$$

P_C : La puissance du compresseur (W)

T_3 : Température d'entrée du compresseur (K)

T_4 : Température de sortie du compresseur (K)

C_p : Capacité thermique isobare massique ($\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$)

m'_{air} : Débit massique d'air (kg s^{-1})

Cependant, la suralimentation classique reste insuffisante à cause du flux des gaz d'échappement, qui est dépendant du régime du moteur. Ainsi, notre étude se focalise sur l'utilisation d'une énergie externe pour augmenter la pression de l'air d'admission et atteindre la pression optimale de l'hybridation.

Ceci justifie la récupération et l'utilisation d'autres solutions d'énergie pour assurer une hybridation optimale, comme l'assistance pneumatique à travers une source externe. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser un turbocompresseur électrique qui est alimenté par de l'énergie provenant des sources renouvelables ou régénératives. Nous allons compléter une étude théorique des technologies de suralimentation d'un moteur diesel à l'aide d'un turbocompresseur électrique (TEC), par un turbo Garrett et avec un compresseur électrique couplé sur le turbocompresseur (assistance électrique).

Cette étude comparative nous a permis de choisir la meilleure solution (technologie de suralimentation) en identifiant les points forts ainsi que les inconvénients.

2.3 TURBOGENERATEUR ELECTRIQUE (ELECTRIC TURBO COMPOUND - ETC)

2.3.1 Fonctionnement

L'utilisation du flux de gaz d'échappement avec un turbogénérateur électrique (Electric Turbo Compound - ETC) est appliquée à cette technologie. Sur ce mécanisme, le flux de gaz d'échappement est utilisé pour faire tourner l'alternateur. L'installation ETC est conçue pour empêcher la production d'un effet de contre-pression qui perturbe les performances du moteur. Ce mécanisme a été choisi sur la base d'une étude bibliographique qui avait été effectuée précédemment sur le mécanisme d'utilisation du débit des gaz d'échappement sur plusieurs véhicules [14]. De ce fait, le mécanisme ETC est le plus apte à être développé sur les véhicules de tourisme de petites capacités. Le processus de transfert de puissance sur ETC utilise un mécanisme d'engrenage avec un rapport de 2/1 pour augmenter la rotation d'entrée du générateur (Figure 19).

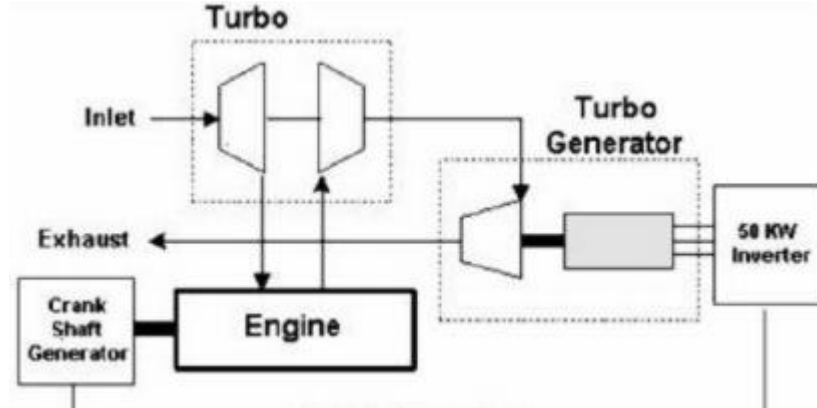


Figure 19. Vue schématique du turbogénérateur électrique, (Turbo-Electric Compound - ETC) [14]

D'après le résultat du test, le courant de charge est de 1,25A à 1,48 A à un régime moteur de 850 tr/min à 2 000 tr/min. C'est un nombre assez faible par rapport au système de charge normal, qui est de 6,23A à 8,1 A à un régime moteur de 1 200 tr/min à 2 000 tr/min. Néanmoins, pour l'utilisation de l'énergie perdue, ce nombre est beaucoup plus prometteur pour être développé à l'avenir. D'après le résultat de cette recherche, on sait que l'installation du mécanisme ETC peut être une solution pour l'utilisation d'énergie gaspillée du véhicule sur le flux de gaz d'échappement, même si la quantité de flux générée est faible [15].

Le fonctionnement de ETC, basé sur l'utilisation de la chaleur des gaz d'échappement sous forme de récupération d'énergie thermique (TER), a suscité un intérêt majeur en raison de son potentiel dans les moteurs à combustion interne (moteur diesel). La récupération d'énergie utile, par exemple sous la forme d'énergie électrique à partir de la chaleur résiduelle des gaz d'échappement du moteur, pourrait bénéficier sous la forme d'une économie directe de carburant ou d'une augmentation de l'énergie électrique disponible pour les systèmes auxiliaires (Figure 20).

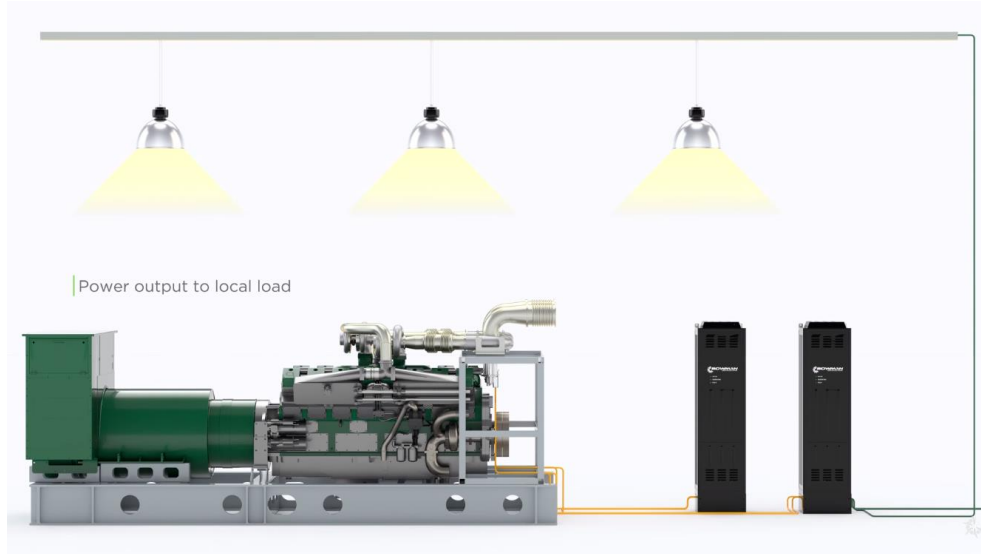


Figure 20. Installation d'un ETC sur une génératrice Diesel [16]

Le système «Electric-Turbo Compound – ETC » est presque identique à un système mécanique. La différence est que l'énergie du mouvement se transforme en énergie électrique produite par les générateurs électriques à grande vitesse. Elle est appelée turbine électrique lorsque la position de la turbogénératrice est séparée du turbocompresseur. Mais dans certaines conditions, la plupart des générateurs électriques sont placés au même endroit que le turbocompresseur. Cette configuration s'appelle un turbogénérateur.

2.3.2 Composantes du turbocompresseur électrique

Dans le système Electric-Turbo Compound (ETC), une turbine est couplée à un générateur (turbogénérateur). Elle est située dans le flux de gaz d'échappement d'un moteur pour récupérer l'énergie thermique des gaz d'échappement et la convertir en énergie électrique. Un exemple de système ETC est celui où un turbogénérateur est situé en aval d'une turbine de turbocompresseur d'un moteur à combustion interne (ICE). La puissance générée par le système ETC peut être utilisée pour alimenter un réseau électrique ou alimenter des charges électriques locales telles que des auxiliaires de moteur (Figure 21).



Figure 21. Composantes du système « Electric-turbo Compound – ETC » [16]

Les systèmes ETC sont disponibles dans le commerce pour les groupes électrogènes stationnaires et à un stade avancé de développement pour les applications automobiles en tant que solution pour améliorer l'efficacité énergétique des moteurs à essence et diesel en récupérant l'énergie thermique des gaz d'échappement.

2.3.3 Architecture du système ETC

2.3.3.1 Description d'un système ETC sur un moteur diesel turbocompressé

Le système ETC est généralement situé en aval d'une turbine de turbocompresseur d'un moteur à combustion interne ICE. Les gaz d'échappement se dilatent d'abord à travers la turbine du turbocompresseur, puis à travers la turbine du ETC, qui entraîne un alternateur à grande vitesse générant ainsi un courant continu ou alternatif. Dans les groupes électrogènes, cette puissance supplémentaire est ajoutée à la puissance de sortie du générateur

primaire, augmentant ainsi l'efficacité du système. Pour les applications automobiles, l'ETC deviendrait le générateur principal utilisé pour alimenter les systèmes auxiliaires du véhicule. Un moteur à combustion interne ICE équipé d'un système ETC peut atteindre des améliorations SFC (consommation spécifique de carburant) de l'ordre de 4 à 7 % [17].

2.3.3.2 Impact de l'ETC sur un ICE turbocompressé

Afin de récupérer l'énergie des gaz d'échappement après la turbine du turbocompresseur (TC), il est nécessaire de créer une étape de détente supplémentaire qui augmente la contre-pression du moteur (Figure 22). Cela se traduit par l'effet suivant :

- Changement de point de fonctionnement de la turbine du turbocompresseur : l'augmentation de la contre-pression du moteur oblige à réadapter la turbine du turbocompresseur en changeant la roue de turbine.

- Réduction de la puissance du moteur : les pistons doivent fournir plus de travail pour pousser l'échappement hors du cylindre, ce qui diminue légèrement la puissance du vilebrequin du moteur.

- Réduction de l'efficacité volumétrique : un peu plus de gaz d'échappement sont piégés dans le cylindre pendant le balayage, ce qui laisse moins d'espace pour que l'air frais puisse entrer.

- Cependant, la puissance produite par le système ETC fait plus que compenser cette perte de puissance dans le moteur et fournit donc une amélioration globale de l'efficacité du système.

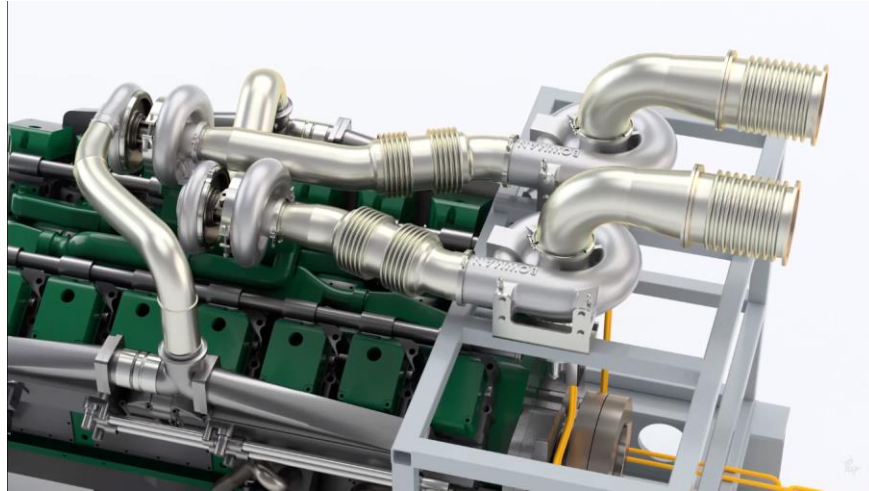


Figure 22. Montage d'un ETC sur un ICE turbocompressé [16]

2.3.3.3 Turbogénérateur

Le turbogénérateur est un composant du système ETC conçu pour pouvoir récupérer l'énergie thermique des gaz d'échappement du moteur diesel et produire de l'énergie électrique. L'énergie électrique générée peut être utilisée pour allumer et charger les composants électriques, et peut également être réutilisée pour augmenter la puissance du moteur. L'utilisation de turbogénérateurs comme activateur supplémentaire peut augmenter l'efficacité énergétique des moteurs de 3 à 10 %. Ce mécanisme est très adapté aux petits moteurs, car la faible perte d'énergie de ce mécanisme électrique ne nécessite pas un taux de gaz d'échappement élevé comme le mécanisme mécanique de turbo-compression. La puissance générée par le mécanisme du turbo est proportionnelle à celle du flux de gaz d'échappement. L'impact de l'installation du turbocompresseur électrique est analysé en comparant la quantité d'énergie générée à la puissance de base du moteur, obtenue à partir du couple.

Le turbogénérateur (TG) comprend une turbine et un alternateur. La turbine se compose généralement d'une roue de turbine, d'aubes directrices de tuyère (NGV) et de la volute. La

roue de turbine peut être axiale ou radiale et peut être couplée directement à un alternateur à grande vitesse, ce qui donne une machine compacte et efficace (Figure 23).

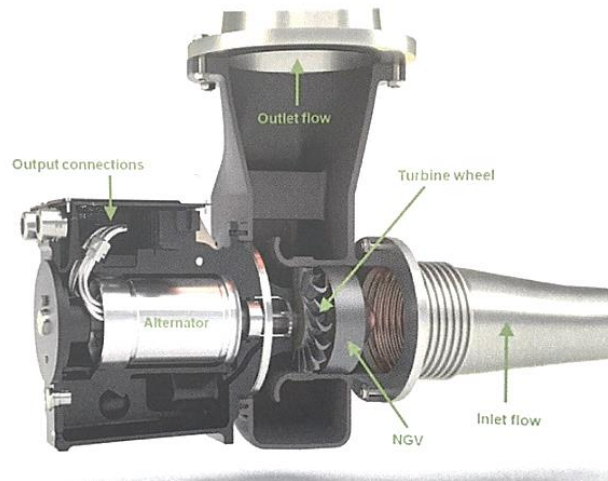


Figure 23. Section transversale du turbogénérateur [17]

Bien que la technologie standard des turbogénérateurs ne soit pas nouvelle [brevet TG, 1923], le développement de la technologie des turbogénérateurs à grande vitesse est relativement moderne, avec un développement important au cours des années 1990. Les défis associés aux turbogénérateurs à grande vitesse sont :

- Les contraintes et la chaleur générées dans le rotor de la machine électrique en raison des vitesses de rotation élevées.
- Dynamique du rotor du système de turbogénérateur.
- Production en série d'équipements de turbine bon marché, mais fiables, robustes et très efficaces pour les gaz d'échappement chauds.

2.3.4 Avantages de l'utilisation d'ETC

- Améliore l'efficacité globale du moteur diesel, y compris les coûts d'achat du carburant et aide à réduire la quantité de carburant brûlé.

- Typiquement 4 à 7 % de consommation de carburant et d'émissions de carbone en moins pour les groupes électrogènes diesel et gaz.

- Densité de puissance et capacité de sortie accrues avec une meilleure efficacité énergétique.

- Le coût de la production d'électricité par récupération de la chaleur perdue est nettement inférieur à celui de la combustion de plus de carburant, même avec des bas prix du diesel.

- Aide les économies en développement dont les infrastructures électriques ne sont pas fiables ou sont insuffisantes.

- Donne aux fournisseurs d'électricité indépendants (IPP), aux sociétés de location d'électricité et aux OEM de générateurs (fabricants d'équipement d'origine) un avantage concurrentiel et une part de marché potentiellement accrue.

- Le système Electric-Turbo Compound (ETC) peut améliorer la récupération d'énergie des gaz d'échappement dans le moteur à combustion interne (ICE).

- L'utilisation du système ETC est plus avantageuse dans les cycles à grande vitesse, car le moteur fonctionne à des charges et à des vitesses élevées.

2.3.5 Inconvénients de l'utilisation de l'ETC

- Les coûts initiaux pour l'installation et la construction entraînent une dépense supplémentaire pour les entreprises.

- La nécessité de mettre à jour les turbomachines existantes et la rectification du moteur diesel entraîne des coûts supplémentaires et peut prendre du temps.

- Il y aura un poids supplémentaire pour ajouter un système ETC à un moteur diesel.

- Les défis des turbogénérateurs à grande vitesse tels que les contraintes élevées dans les rotors, la génération de chaleur de la machine électrique et la dynamique du rotor du système de turbogénérateur.

- Au point fixe de fonctionnement ICE, l'ETC n'est pas avantageux par rapport à un turbocompresseur conventionnel avec un dimensionnement de turbine approprié [17].

2.4 TURBO GARRETT

2.4.1 Comment fonctionne un système TURBO-GARRETT

La puissance du moteur est proportionnelle à la quantité d'air et de carburant qui peut pénétrer dans les cylindres. Toutes choses étant égales par ailleurs, les gros moteurs font circuler plus d'air et produisent ainsi plus de puissance. Si nous voulons simplement que notre plus gros moteur produise plus de puissance, notre objectif final est d'aspirer plus d'air dans le cylindre. En installant un turbocompresseur Garrett, la puissance et les performances d'un moteur peuvent être considérablement augmentées (Figure 24).

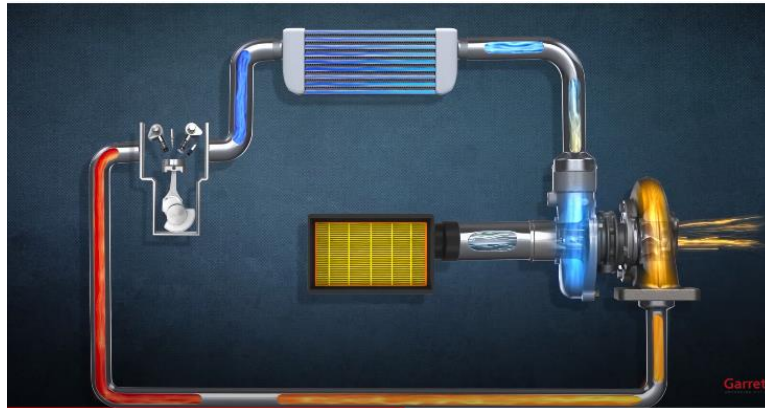


Figure 24. Vue schématique d'un TURBO-GARRETT [18]

Alors, comment un turbocompresseur fait-il entrer plus d'air dans le moteur ? Regardons d'abord le schéma (Figure 25). L'air ambiant passe à travers le filtre à air (non illustré) avant d'entrer dans le compresseur (1). L'air est ensuite comprimé, ce qui augmente la densité de l'air (masse/unité de volume) (2). De nombreux moteurs turbocompressés ont un refroidisseur d'air de suralimentation (ou refroidisseur intermédiaire) (3) qui refroidit l'air comprimé pour augmenter encore sa densité et pour augmenter la résistance à la détonation. Après avoir traversé le collecteur d'admission (4), l'air pénètre dans les cylindres du moteur, qui contiennent un volume fixe. Étant donné que l'air est à une densité élevée, chaque cylindre peut aspirer une masse d'air accrue. Un débit massique d'air plus élevé permet un débit de carburant plus élevé (avec un rapport air/carburant similaire). La combustion de plus de carburant entraîne la production de plus de puissance pour une taille ou une cylindrée donnée. Une fois le carburant brûlé dans le cylindre, il est expulsé pendant la course d'échappement du cylindre dans le collecteur d'échappement (5). Le gaz à haute température continue ensuite vers la turbine (6). La turbine crée une contre-pression sur le moteur, ce qui signifie que la pression d'échappement du moteur est supérieure à la pression atmosphérique. Une chute de pression et de température se produit (expansion) à travers la turbine (7), qui exploite l'énergie des gaz d'échappement pour fournir la puissance nécessaire pour entraîner le compresseur [18].

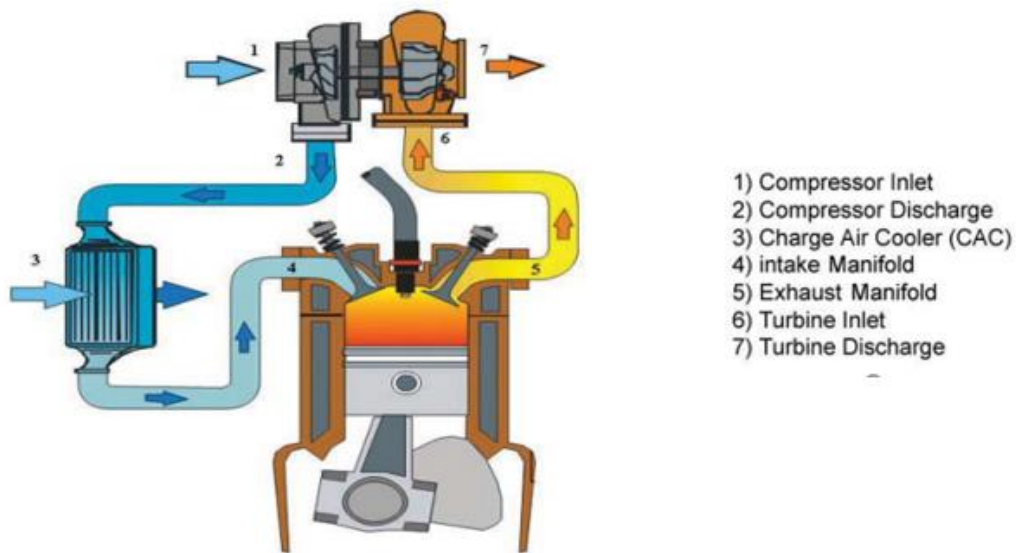


Figure 25. Fonctionnement d'un système TURBO-GARRETT [18]

2.4.2 Les composants d'un TURBO-GARRETT

Les composants principaux du turbo-Garrett sont les suivants : boîtier de compresseur, boîtier de la turbine, boîtier central, assemblage tournant (CHRA), roue de compresseur, assemblage de roue de turbine (roue et arbre), plaque arrière, système de roulements, entrée d'huile et sortie d'huile (Figure 26 ; Figure 27).

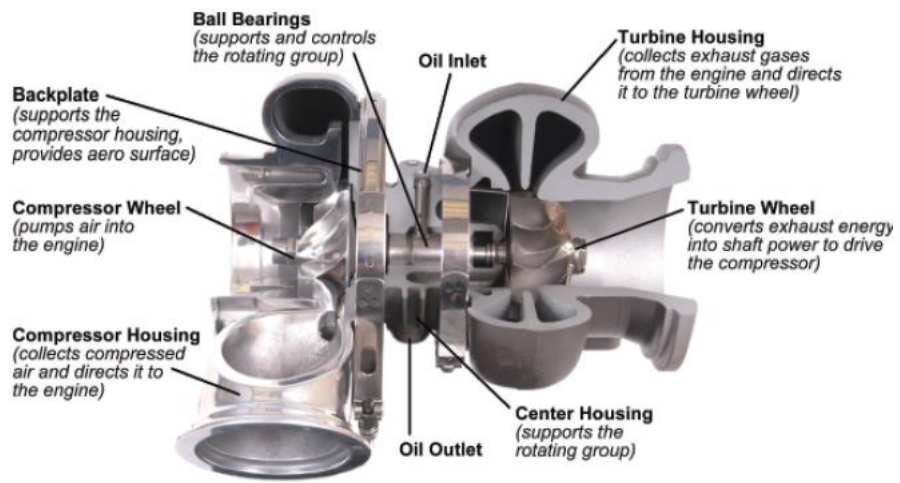


Figure 26. Les composants d'un Turbo-Garrett [18]



Figure 27. Vu éclatée d'un Turbo-Garrett [18]

2.4.3 Ligne de surtension du TURBO GARRETT

Le pompage (*surge line*) est la limite gauche de la carte du compresseur. L'opération à gauche de cette ligne représente une région d'instabilité d'écoulement. Cette région est caractérisée par une suralimentation légère, fluctuante et des « hurlements » du compresseur. Un fonctionnement continu dans cette région peut entraîner une défaillance prématurée du turbo en raison d'une forte charge de poussée.

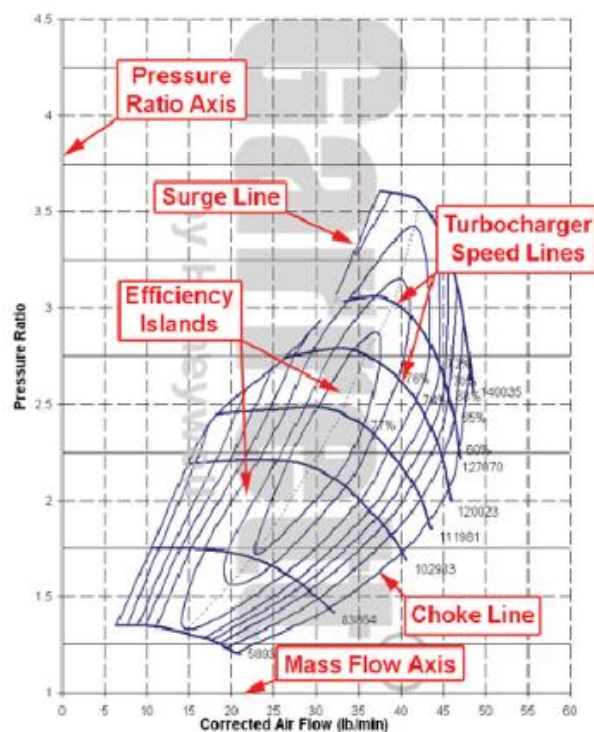


Figure 28. La carte du compresseur [19]

Le pompage est le plus souvent ressenti et plus dommageable sous charge. Cela peut être une indication que le compresseur est trop grand. Le pompage est également couramment ressenti lorsque la manette des gaz est rapidement fermée après la suralimentation. Cela se produit parce que le débit massique est considérablement réduit lorsque l'accélérateur est fermé, mais le turbo continue de tourner et de générer une suralimentation. Cela entraîne immédiatement le point de fonctionnement à l'extrême gauche de la carte du compresseur

(Figure 28). Le pompage diminuera une fois que la vitesse du turbo ralentira suffisamment pour réduire la suralimentation et ramener le point de fonctionnement dans la région stable. Cette situation est généralement résolue en utilisant une soupape de décharge (BOV) ou une soupape de dérivation. Un BOV fonctionne pour évacuer la pression d'admission dans l'atmosphère afin que le débit massique diminue en douceur, en gardant le compresseur hors du pompage. Dans le cas d'une vanne de dérivation de recirculation, le flux d'air est recyclé vers l'entrée du compresseur.

Un compresseur Ported-Shroud (Figure 29) est un équipement incorporé dans le boîtier du compresseur [19]. Il fonctionne pour déplacer la ligne de pompage plus vers la gauche en permettant à un certain flux d'air de sortir de la roue par l'orifice pour empêcher le pompage de se produire. Cela fournit une plage d'opération supplémentaire et permet d'utiliser un compresseur plus grand pour des besoins de débit plus élevés sans risquer de faire fonctionner le compresseur dans une condition dangereuse de pompage. La présence du carénage à orifices a généralement un impact négatif mineur sur l'efficacité du compresseur. La ligne d'étranglement (*choke line*) est la limite droite de la carte du compresseur.

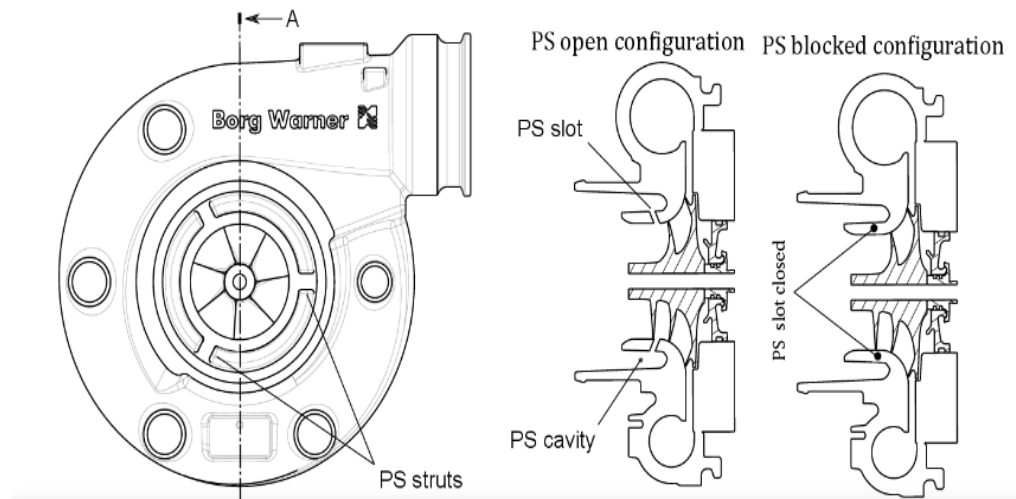


Figure 29. Compresseur Ported-Shroud pour les fortes charges [19]

Pour les cartes Garrett, la ligne d'étranglement est généralement définie par le point où l'efficacité tombe en dessous de 58 %. En plus de la chute rapide de l'efficacité du compresseur au-delà de ce point, la vitesse du turbo approchera ou dépassera également la limite autorisée. Si le fonctionnement réel ou prévu dépasse cette limite, un compresseur plus puissant est nécessaire. Les lignes de vitesse du turbocompresseur illustrent les paramètres de fonctionnement à une vitesse de rotation constante. La vitesse de rotation pour les points entre ces lignes peut être estimée par interpolation. Lorsque la vitesse du turbo augmente, le rapport de pression augmente et/ou le débit massique augmente. Les lignes de vitesse turbo sont très proches les unes des autres à l'extrême droite de la carte. Une fois qu'un compresseur fonctionne au-delà de la limite d'étranglement, la vitesse du turbo augmente très rapidement et une condition de survitesse du turbo est très probable. Les îlots d'efficacité sont des régions concentriques sur les cartes qui représentent l'efficacité du compresseur à n'importe quel point de la carte. La plus petite île près du centre de la carte est l'île d'efficacité la plus élevée ou maximale. Au fur et à mesure que les anneaux s'éloignent de cette zone, l'efficacité diminue jusqu'à ce que les limites de pompage et d'étranglement soient atteintes.

2.4.4 Données sur la carte-compresseur

Dans cette section, les méthodes de calcul du débit massique et de la pression de suralimentation nécessaire pour atteindre un objectif de puissance sont présentées. Ces données seront ensuite utilisées pour choisir le compresseur et le turbocompresseur appropriés. Avoir un objectif de puissance en tête est une partie essentielle du processus. En plus d'être nécessaire pour calculer le débit massique et la pression de suralimentation, un objectif de puissance est nécessaire pour choisir les bons injecteurs de carburant, la pompe à carburant et le régulateur, ainsi que d'autres composants du moteur. L'estimation du débit massique d'air et des pressions de suralimentation sont essentielles pour atteindre une cible de puissance [20].

Les informations suivantes doivent être connues pour compléter l'analyse : la puissance du moteur diesel, la cylindrée du moteur, le régime maximal et les conditions ambiantes (température et pression barométrique).

D'autres paramètres doivent être estimés à partir des valeurs typiques des moteurs :

- Rendement volumétrique du moteur. Les chiffres typiques pour le rendement volumétrique maximal se situent entre 95 % et 99 % pour les têtes modernes à 4 soupapes, et entre 88 % et 95 % pour les conceptions à 2 soupapes. Si la courbe de couple du moteur est disponible, nous pouvons l'utiliser pour estimer le rendement volumétrique à différents régimes moteurs. Sur un moteur bien réglé, le rendement volumétrique culminera au pic de couple, et ce nombre peut être utilisé pour mettre à l'échelle le rendement volumétrique à d'autres régimes moteurs. Un moteur à 4 soupapes aura généralement un rendement volumétrique plus élevé sur une plus grande partie de sa plage de régimes qu'un moteur à 2 soupapes.

- Température du collecteur d'admission. Les compresseurs à haut rendement donnent des températures de collecteur plus basses. Les températures du collecteur des configurations à refroidissement intermédiaire sont généralement de 38 à 55 degrés C, tandis que les valeurs sans refroidissement intermédiaire peuvent atteindre 80 à 150 degrés C.

- Consommation spécifique effective de carburant (BSFC). BSFC décrit le débit de carburant requis pour générer chaque kWh. Les valeurs générales de BSFC pour les moteurs à essence turbocompressés vont de 304 g/kWh à 365 g/kWh et plus.

Un BSFC inférieur signifie que le moteur nécessite moins de carburant pour générer une puissance donnée. Des carburants de course et un réglage agressif sont nécessaires pour atteindre le bas de la gamme BSFC décrite ci-dessus. Pour l'équation ci-dessous, nous diviserons BSFC par 60 pour convertir des heures en minutes. Pour tracer le point de fonctionnement du compresseur, il faut calculer d'abord le débit d'air :

$$W_a = P \times \frac{A}{F} \times \frac{BSFC}{60} \quad (2 - 10)$$

- W_a : Débit d'air (g/min)
- P : La puissance kW
- A/F : Rapport air/carburant
- Les unités de BSFC sont « g/(kWh) »
- $BSFC/60$: Consommation spécifique effective de carburant = (g/kWh) /60 (pour convertir des heures en minutes).

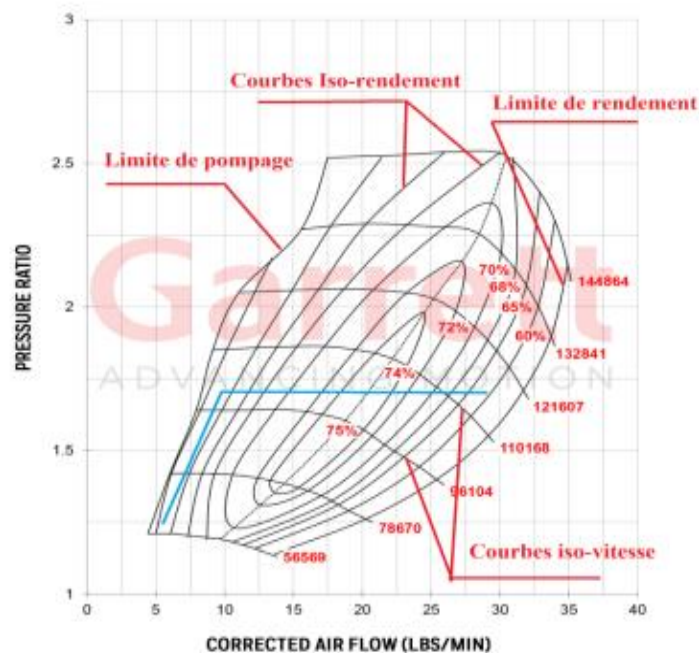


Figure 30. Carte de fonctionnement d'un compresseur TURBO-GARRETT [21]

Sachant que le débit d'air et le rapport de compression sont connus, le recours aux graphiques de compression (Figure 30) de différents turbocompresseurs Garrett sera la solution pour déterminer celui qui est le mieux adapté au moteur. Le turbocompresseur

Garrett est équipé d'une « wastegate ». C'est une valve qui contrôle le débit des gaz d'échappement traversant la turbine et qui permet au moteur de fonctionner en mode suralimenté ou non suralimenté par le turbocompresseur.

2.4.5 Avantages d'un TURBO-GARRETT

Le turbocompresseur peut être utilisé avec des moteurs à essence ou diesel. Les turbocompresseurs pour moteurs diesel, en particulier, présentent leurs propres avantages. Ils peuvent être utilisés sur à peu près n'importe quel type de moteur diesel. L'avantage fondamental de leur utilisation est d'obtenir plus de puissance pour la même taille de moteur.

Lorsqu'un moteur est équipé d'un turbocompresseur, il est plus petit et plus léger qu'un moteur produisant la même puissance sans turbocompresseur. Ainsi, un moteur diesel turbocompressé offre souvent une meilleure économie de carburant. Les constructeurs automobiles utilisent souvent un moteur beaucoup plus petit équipé par un turbocompresseur. Par exemple, ils utilisent un V6 turbocompressé au lieu d'un V8, ou un moteur avec quatre cylindres turbocompressés au lieu d'un V6.

C'est là que le turbo Garrett obtient un autre gros avantage. Lorsqu'ils fonctionnent bien, ils peuvent économiser du carburant ! Et comme ils brûlent du carburant avec plus d'oxygène, ils brûlent souvent le carburant plus proprement, ce qui produit moins de pollution atmosphérique. Cela fait d'un moteur à turbocompresseur un choix écologique également.

Le turbo Garrett a une plus grande densité de puissance et il est plus efficace. Fondamentalement, un turbocompresseur est connecté à un moteur pour lui donner plus de puissance. Cela permet aux moteurs plus petits de produire plus de puissance et de couple qu'ils ne le créeraient normalement [22].

2.4.6 Inconvénients d'un TURBO-GARRETT

L'augmentation de la puissance, malgré une meilleure efficacité de la combustion, signifie une production supplémentaire d'énergie accompagnée par une quantité supplémentaire de carburant, au même régime moteur.

L'économie de carburant assurée par les turbocompresseurs n'est pas toujours aussi bonne et efficace à tous les régimes de fonctionnement du moteur. En fonction de leur utilisation, l'économie de carburant dépend d'un moteur à l'autre. Des technologies hybrides alternatives, qui font appel à des sources externes d'énergie, permettent d'améliorer ces résultats.

Un autre inconvénient est la fiabilité. Lorsque vous ajoutez un turbocompresseur au moteur, vous ajoutez une autre couche de complexité mécanique à un moteur ordinaire. Les chances de bris sont plus élevées et l'entretien est plus exigeant. Ceci, ajouté au coût du turbocompresseur lui-même, augmentent le prix d'achat et d'opération d'un moteur turbocompressé. L'augmentation de la température et de la pression de fonctionnement des cylindres, et des charges mécaniques en général, accélère la défaillance des pièces [22].

2.5 COMPARAISON ENTRE LE TURBO-COMPOUND MECANIQUE ET LE ELECTRIC-TURBO COMPOUND (ETC)

Le turbo-compound mécanique est une technologie assez ancienne pour améliorer la puissance et l'efficacité des moteurs à pistons et ont fait l'objet d'un accroissement d'attention au cours des dernières années. Il utilise une turbine pour récupérer l'énergie des gaz d'échappement, comme un turbocompresseur classique. Plutôt que d'utiliser cette énergie pour entraîner un compresseur, elle est utilisée pour ajouter directement de la puissance à l'arbre de sortie du moteur. Thermodynamiquement, c'est un moteur à cycle combiné. Le moteur à pistons est le premier cycle et le deuxième cycle est une turbine à gaz. Un cycle combiné est capable d'atteindre un rendement thermodynamique plus élevé. Les

anciens moteurs turbo-compound accouplaient mécaniquement la turbine à l'arbre de sortie du moteur. La nouvelle génération de moteurs turbo-compound utilise la turbine pour produire de l'électricité, qui peut ensuite être utilisée de plusieurs façons (Figure 31).

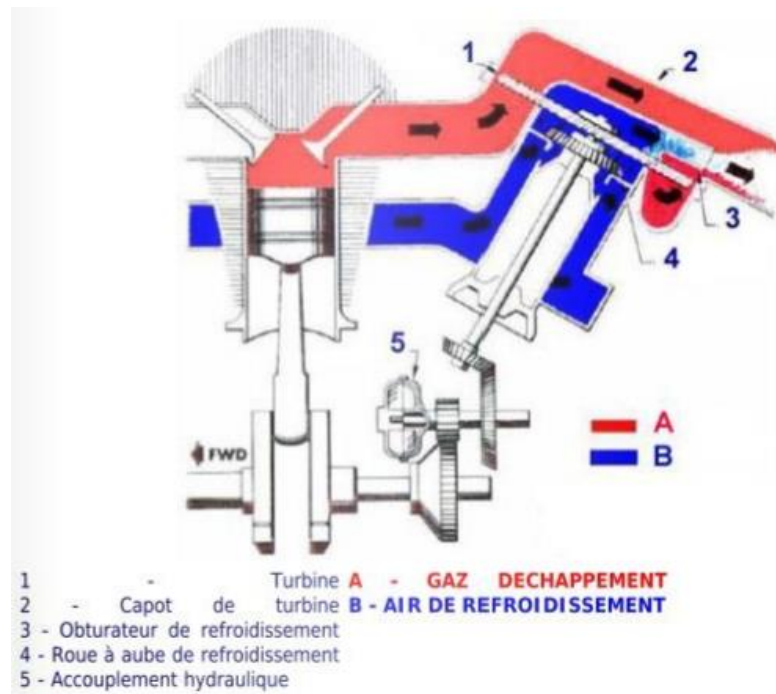


Figure 31. Le principe de fonctionnement du moteur turbo-compound mécanique [23]

Une limitation de la composition mécanique du turbo est qu'à faible puissance du moteur, la contre-pression causée par la turbine peut en fait réduire l'efficacité du moteur et l'intégralité de la combustion, entraînant une augmentation des émissions. Le turbo-compound mécanique réduit toujours l'efficacité du moteur lui-même. À haute puissance, la turbine récupère plus d'énergie qu'elle n'en perd, ce qui entraîne un gain d'efficacité net. À faible puissance, cela s'inverse et réduit l'efficacité. Surmonter cela peut nécessiter des valeurs de diversion, ajoutant encore plus de complexité.

Le système Electro-Turbo Compound (ETC) peut éviter les complexités des transmissions à variation continue et les problèmes de contre-pression en utilisant la turbine alimentée par les gaz d'échappement pour générer de l'électricité.

Depuis 2014, les voitures de Formule 1 utilisent l'ETC combiné à un compresseur électrique sur le compresseur d'admission. Lorsque le moteur tourne à haute puissance, l'énergie excédentaire des gaz d'échappement est utilisée pour produire de l'électricité. Cela peut être utilisé pour alimenter le turbocompresseur, ajouter de la puissance aux roues ou charger une batterie, selon les besoins. Lorsque le moteur ne génère pas suffisamment de puissance ou de pression des gaz d'échappement pour alimenter le turbo, l'alimentation de la batterie est utilisée pour maintenir le turbo en rotation, empêchant tout décalage du turbo lorsque la demande de puissance augmente.

L'ETC commence également à être utilisé pour les gros moteurs commerciaux, pour les véhicules lourds et pour les groupes électrogènes à essence et diesel. La simplicité accrue de l'ETC par rapport au turbo-compound mécanique signifie qu'il devient beaucoup plus attrayant pour ces applications. Alors qu'il était autrefois difficile pour les véhicules d'utiliser toute l'énergie électrique produite, l'hybridation fait qu'elle est aujourd'hui facilement utilisable. L'un des leaders de cette technologie, Bowman Power, a appliqué l'ETC à des moteurs tels que CAT, Cummins, INNIO et Wärtsilä (Figure 32).



Figure 32. L'utilisation de l'ETC pour les moteurs des véhicules [24]

Les moteurs thermiques les plus performants sont les centrales électriques à cycle combiné avec une turbine à gaz délivrant les pertes du premier cycle à un deuxième cycle de turbine à vapeur. Ils atteignent des rendements de plus de 60 %. Ceux-ci fonctionnent bien à des puissances de plusieurs MW, mais les coûts d'investissement élevés les rendent non rentables à des tailles plus petites. ETC ne peut pas égaler ces rendements, mais il est compatible avec des groupes électrogènes beaucoup plus petits, généralement dans la gamme 150 kW-2,5 MW où il peut augmenter le rendement des moteurs à pistons diesel et à essence de 4 à 7 %. La limite supérieure s'applique aux moteurs plus anciens ou moins puissants, tandis que 4 % sont encore réalisables pour les moteurs turbocompressés modernes. Pour la plupart des installations de groupes électrogènes, l'ETC n'augmente pas réellement le coût par kW du système puisque l'augmentation de la puissance compense le coût supplémentaire. Combiné avec l'amélioration de l'efficacité énergétique, cela signifie un système beaucoup plus économique. «L'ETC est une technologie éprouvée, avec 22 millions d'heures de fonctionnement sur 800 systèmes», a déclaré Mike Essex, responsable marketing de Bowman Power. «Notre troisième génération d'ETC, lancée en 2017, a réduit les coûts de

50 % et est maintenant utilisée pour les gaz de décharge, le traitement des eaux usées, le marché de la location et d'autres secteurs. Nous travaillons sur un programme de développement qui apportera une nouvelle réduction des coûts » [25].

L'efficacité accrue d'un moteur équipé d'ETC se traduira évidemment par moins d'émissions de CO₂. L'impact sur les autres émissions peut être encore plus dramatique. L'augmentation de la contre-pression sur les cylindres réduit les courts-circuits de carburant (fuite de méthane). Bowman a démontré une réduction de 32 % des émissions d'hydrocarbures non brûlés pour un générateur à essence. Cela peut avoir des implications dramatiques pour les émissions de gaz à effet de serre (GES) puisque le méthane est 30 fois plus puissant comme GES que le CO₂. D'autres polluants qui affectent la qualité de l'air peuvent également être réduits, tels que les particules (suie, cendres et aérosols), les oxydes d'azote (NO_x), les oxydes de soufre et le monoxyde de carbone. Bien que ceux-ci soient émis à peu près au même taux par unité de combustible brûlé, ils sont inférieurs par rapport à l'énergie produite. L'ETC est une technologie attrayante pour les gros moteurs alternatifs, car elle peut augmenter considérablement l'efficacité et la densité de puissance avec seulement une petite augmentation du coût et de la complexité. L'ETC pourrait devenir aussi courant que la turbo-compression sur les moteurs modernes [25].

2.6 HYBRIDATION PNEUMATIQUE PAR ASSISTANCE ELECTRIQUE D'UN MOTEUR DIESEL

2.6.1 Présentation de la technologie

Malgré l'évolution et l'avancement qu'a connus le turbocompresseur classique, celui-ci conserve certains inconvénients tels que des temps de réponse relativement élevés en régime transitoire et un rendement fiable, notamment à bas régime. Parmi les solutions d'amélioration, on cite l'hybridation pneumatique par assistance électrique. Le principe consiste à tirer parti des caractéristiques d'un moteur électrique, principalement son couple et sa vitesse élevés, ainsi que son faible temps de réponse. La nouvelle configuration augmente la pression à l'admission du moteur à bas régime sans dépendre du débit des gaz

d'échappement. Dans la littérature, cette technique a rendu le moteur plus économe en énergie avec une augmentation du couple et de la puissance, notamment à bas régime. De même, il a réduit la consommation de carburant jusqu'à 10 %. Un autre avantage de cette méthode est la récupération d'énergie des gaz d'échappement grâce à la réversibilité des machines électriques. Le moteur devient un alternateur lorsque la valeur de pression maximale est dépassée en récupérant l'énergie existante dans les gaz d'échappement évacués par la sortie des turbocompresseurs conventionnels [26].

2.6.2 Suralimentation avec turbocompresseur accouplé à un moteur électrique

Dans cette architecture, le rotor de la machine électrique est solidaire à l'axe entre la turbine et le compresseur (Figure 33). Lorsque le moteur thermique fonctionne à bas régime, le turbocompresseur classique n'est pas capable de fournir une pression de suralimentation suffisante à cause du faible flux des gaz d'échappement. Dans ce cas, la machine fonctionne comme un moteur afin de fournir un couple supplémentaire au turbocompresseur pour pomper plus d'air sous pression [26].

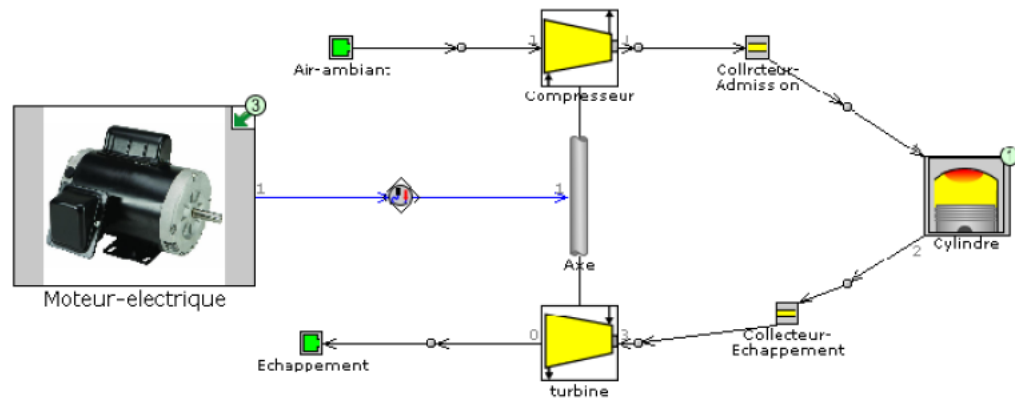


Figure 33. Schéma de la suralimentation avec une machine électrique couplée sur l'arbre du turbocompresseur [27]

Ce mode de fonctionnement permet aussi de diminuer le temps de réponse transitoire lors des transitions vers des régimes plus élevés. Lorsque le régime moteur est élevé, on atteint la pression de suralimentation demandée pour le bon fonctionnement du moteur et on risque de la dépasser. La machine électrique va basculer vers un mode générateur créant ainsi un couple résistant sur l'arbre du turbocompresseur qui limite la vitesse de rotation tout en assurant la pression de suralimentation demandée pour un bon fonctionnement du moteur. L'énergie électrique récupérée peut être stockée dans des accumulateurs qui seront ensuite utilisés par des récepteurs électriques de véhicules ou par la même machine électrique en mode moteur. D'après Lee et al. [28], cette configuration a rendu la réponse du turbocompresseur plus rapide en régime transitoire. De même, Alshammari et al. [29] a utilisé cette même configuration sur un moteur Ford Focus, Ecoboost de 1,5 litre de cylindrée et les résultats ont montré une diminution du temps de réponse de 25 % par rapport aux turbocompresseurs traditionnels [29]. En plus, la puissance a été améliorée de 15,4 % et la consommation de 1,4 %. Valeo a développé une gamme de compresseurs électriques qui ont permis de réduire la consommation jusqu'à 10 % [30].

Toutefois, la machine électrique de ce montage est sollicitée par des contraintes thermiques élevées, ce qui nécessite un système de refroidissement efficace pour maintenir une température de fonctionnement normale. Autre inconvénient de cette configuration est l'augmentation de l'inertie du turbo compresseur à cause de l'inertie supplémentaire du rotor de la machine électrique ce qui nécessite plus de puissance pour le faire tourner [31].

2.6.3 Suralimentation par compresseur électrique en série avec le turbocompresseur

Avec le turbocompresseur classique, on ajoute un compresseur entraîné par un moteur électrique (Figure 34). L'intégration du compresseur dans le circuit d'admission d'air a permis d'augmenter la pression de suralimentation. Une diminution du temps de réponse en régime transitoire est remarquée ainsi qu'une amélioration des performances du moteur au niveau de la puissance et de la consommation du carburant. L'inconvénient de cette

architecture dans le cas d'une voiture est la nécessité de produire l'électricité à travers le moteur thermique. Lors de la production d'énergie en sites isolés, cette énergie peut être fournie par un système de stockage d'excès d'énergie électrique d'origine renouvelable.

Cette solution est facile à réaliser sans modification importante du moteur diesel et avec un faible encombrement, contrairement au scénario de la suralimentation avec une machine électrique couplée sur l'arbre du turbocompresseur.

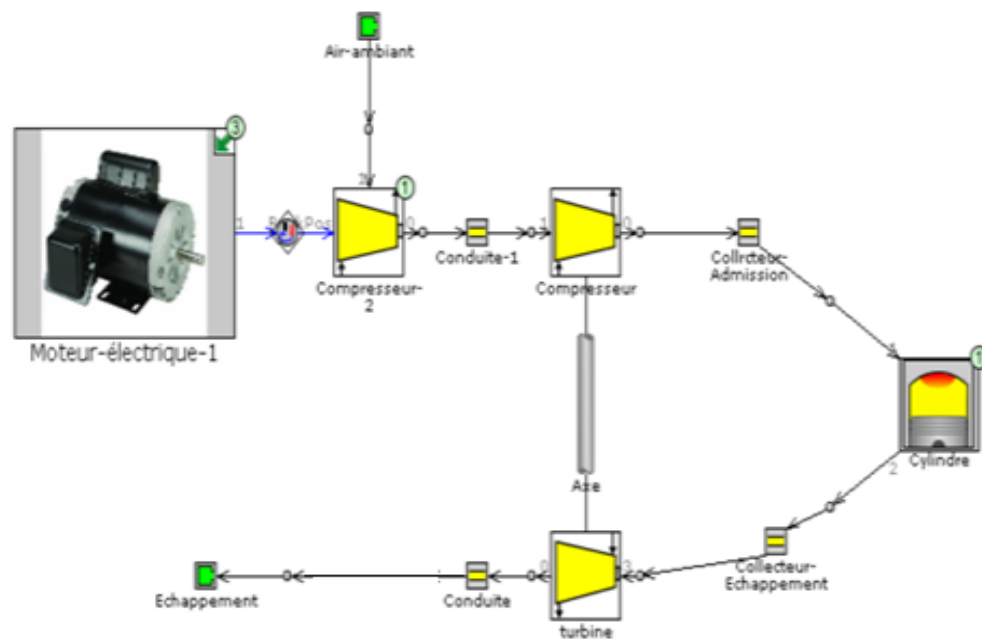


Figure 34. Schéma fonctionnel de la suralimentation par un compresseur électrique couplée en série avec le turbocompresseur du moteur diesel [27]

CHAPITRE 3

MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'HYBRIDATION PNEUMATIQUE PAR ASSISTANCE ÉLECTRIQUE D'UN MOTEUR DIESEL C15

3.1 INTRODUCTION

Le but principal de ce chapitre est d'étudier et de construire un modèle numérique pour simuler l'hybridation pneumatique par assistance électrique d'un moteur diesel turbocompressé. Les simulations avec GT-Power permettent de déterminer l'influence des changements des paramètres à l'entrée du moteur sur l'augmentation des performances et le gain de consommation spécifique du carburant, tout en assurant une protection de toutes les composantes du moteur diesel C15 et du système d'hybridation.

Dans ce chapitre, nous jugeons aussi les avantages et les inconvénients de la suralimentation classique afin de justifier le recours à d'autres solutions comme l'assistance par un compresseur électrique. Pour cela, nous avons choisi une méthode qui consiste tout d'abord à modéliser un moteur diesel suralimenté par son turbocompresseur existant à l'aide du logiciel de simulation des moteurs thermiques GT-Power. Les résultats de cette simulation sont ensuite comparés aux résultats de la simulation du même moteur diesel suralimenté par un compresseur électrique en série avec le turbocompresseur classique. Cette étude comparative nous a permis de mettre en évidence l'impact de la suralimentation électrique sur les performances ainsi que ses limites et ses inconvénients.

3.1.1 Approche de simulation

Évaluer et mesurer les performances techniques d'un moteur diesel en environnement réel avec des prototypes de test est coûteux et même difficile à réaliser. En effet, les essais réels sur les moteurs diesel ne permettent pas une variation précise, sur des larges plages de

fonctionnement des paramètres d'opération et ils nécessitent des investissements matériels pour disposer d'équipements et d'outils innovants de diagnostic et d'extraction des résultats. Dans ce cas, l'approche la plus efficace pour relever ces défis consiste à effectuer des simulations à l'aide d'outils informatiques, qui permettent des ajustements faciles des paramètres d'opération ainsi que l'évaluation de l'ajout éventuel d'équipements ou capteurs. Ceci permet d'étudier et évaluer les performances du moteur avant une implantation et validation expérimentale coûteuse sur un banc d'essai réel. Ces simulations donnent des résultats proches à ceux du système réel rapidement et à une fraction du coût, ce qui permet de concevoir les solutions et configurations optimales avant de les tester expérimentalement.

3.1.2 Modélisation numérique GT-Power

Lorsque le programme est lancé, une fenêtre vide s'affiche. On peut créer un « nouveau modèle » en cliquant sur « Ressources », puis sur « Modèle ».

La construction d'un modèle numérique GT-Power nécessite le choix de l'un des modèles existants dans la bibliothèque de logiciel dans laquelle figurent tous les modèles pouvant être utilisés pour la simulation. On doit alors glisser les objets requis de la bibliothèque de modèles vers l'espace de travail.

On doit saisir les paramètres spécifiques à chaque objet utilisé pour assurer le bon fonctionnement du modèle créé et obtenir des résultats de simulation concrets et proches autant que possible de la réalité.

Il faut aller à la barre d'outils et cliquer sur l'onglet « Link » pour établir la connexion entre les composants du modèle.

3.2 CARACTERISTIQUES DU MOTEUR

Moteur industriel CAT C15 Caterpillar - 6 cylindres en ligne, 4 temps, injection directe, turbocompresseur, refroidisseur intermédiaire, unité de commande électronique (ADEM™ A4), système de carburant MEUI haute pression (Figure 35).

La puissance de moteur Caterpillar C15 est 410 kW à une vitesse de rotation du vilebrequin de 1800-2100 tr/min. Le moteur est conforme aux normes d'émission Tier 3 (US EPA) et Stage IIIA (exigences de l'Union européenne) en utilisant la technologie avancée de réduction des émissions de combustion (ACERT). Elle couvre 4 systèmes pour réduire la toxicité des gaz d'échappement et couvre : système de carburant, processus de combustion du carburant, système d'admission d'air propre et mise en place d'un système électronique de contrôle et de gestion. Plus de caractéristiques dans le Tableau 1 (Figure 58 - Annexe I).



Figure 35. Moteur Caterpillar C15 — 6 cylindres — 4 temps [26]

Tableau 1. Caractéristiques du Moteur Caterpillar C15

Nombre de cylindres	6
Alésage du cylindre, mm	137,2
Course du piston, mm	171,4
Cylindrée, L	15,2

Taux volumétrique de compression	18/1				
Puissance de sortie, kW (ch)	328 (446)	354 (481)	403 (548)	433 (589)	444 (603)
Consommation spécifique de carburant, g/(kW*h) à 1 800 tr/min à 100 % de puissance	217,5	—	227,7	—	—
Vitesse du vilebrequin, tr/min	1800-2100				
Régime de ralenti, tr/min — maximum, pas plus — minimum, pas moins	2310 700				
Turbine	Turbocompresseur avec système de refroidissement air-air				
Générateur de charge	24 V, 60 A				
Dimensions, mm (LxlxH)	1782x821x1229				
Poids (kg)	1469 (poids sec)				

3.3 DESCRIPTION DES SIMULATIONS

Dans cette étape, nous allons réaliser la modélisation du moteur diesel C15 Caterpillar suralimenté par son turbocompresseur classique puis la modélisation du même moteur diesel suralimenté avec un compresseur électrique de 7 kW (9,5 hp) en série avec son turbocompresseur classique.

Les principales performances analysées par modélisation et simulation sont : la puissance du moteur, le couple, la consommation spécifique du carburant, les émissions des

GES et la pression maximale dans les cylindres. La pression d'admission du turbocompresseur classique du moteur est la seule variable à l'entrée, d'où l'utilisation d'un compresseur électrique dans le second scénario qui donne une pression de 2 bars. Par contre, avec un moteur diesel normal, l'admission est de 1 bar, soit la pression atmosphérique.

Les résultats des deux scénarios sont regroupés dans le même graphique afin de mieux distinguer les écarts et l'évolution des performances du moteur diesel C15. Les régimes de fonctionnement sont choisis de 900 à 2300 tr/min, dont, les conditions initiales du régime fournies par l'utilisateur sont semblables aux conditions de fonctionnement réel d'un moteur de mêmes caractéristiques. Les conditions ambiantes de température et pression sont fixées respectivement à 300 K et 1 bar.

De plus, la couleur rouge représente la modélisation du moteur diesel C15 Caterpillar suralimenté par son turbocompresseur classique, et la couleur verte représente la modélisation du moteur diesel suralimenté avec un compresseur électrique de 7 kW en série avec son turbocompresseur classique.

3.3.1 Modélisation du moteur diesel C15 turbocompressé

La modélisation de notre moteur diesel C15 Caterpillar suralimenté par son turbocompresseur classique, à 4 temps avec 6 cylindres et de cylindrée totale 15.2 litres, donne le schéma suivant. Les conditions ambiantes de température et pression sont fixées respectivement à 300 K et 1 bar (Figure 36).

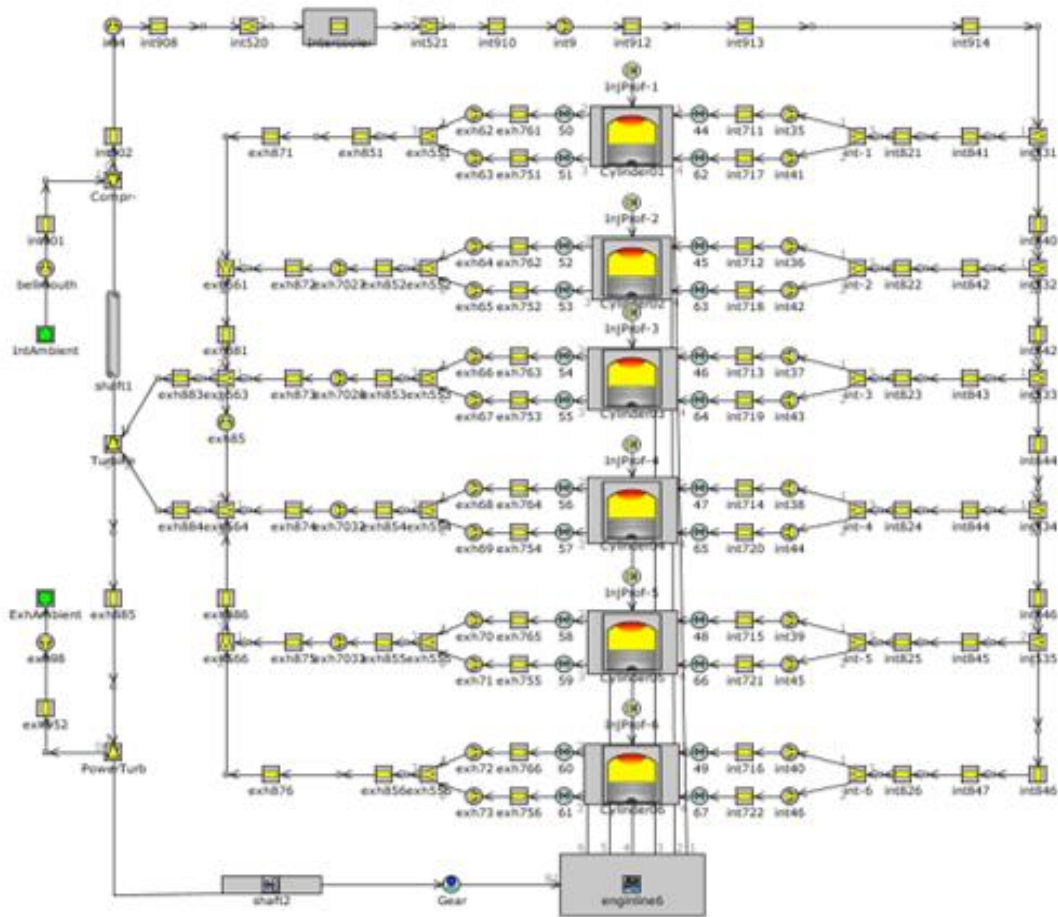


Figure 36. La modélisation du moteur diesel C15 Caterpillar suralimenté par son turbocompresseur classique

3.3.2 Modélisation du moteur diesel C15 suralimenté avec un compresseur électrique accouplé en série avec le turbocompresseur

La modélisation de moteur diesel C15 Caterpillar suralimenté par un compresseur électrique de 7 kW en série avec son turbocompresseur classique, à 4 temps avec 6 cylindres et de cylindrée totale 15.2 litres, donne le schéma suivant. Les conditions ambiantes de température et pression sont fixées respectivement à 300 K et 1 bar (Figure 37).

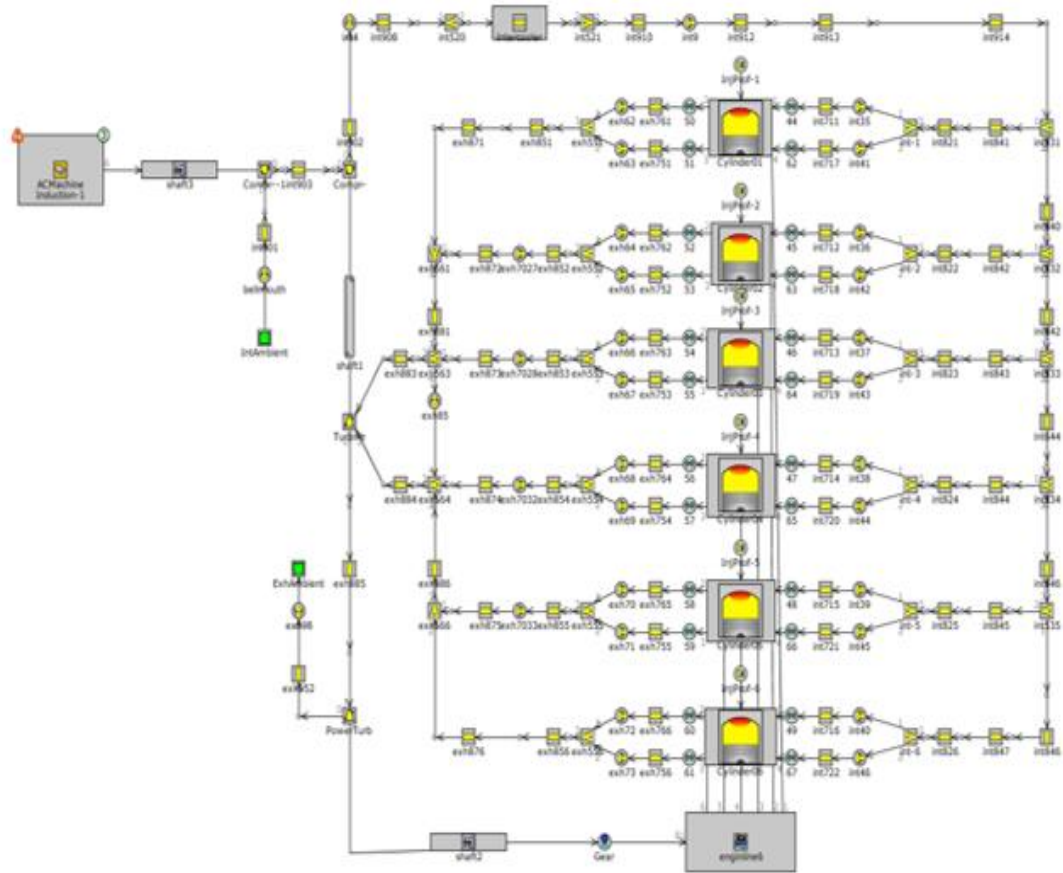


Figure 37. Modélisation du moteur diesel C15 Caterpillar suralimenté avec un compresseur électrique de 7 kW en série avec le turbocompresseur

3.4 ANALYSE DES RESULTATS ET INTERPRETATIONS

3.4.1 Puissance utile du moteur

Dans la Figure 38 ci-dessous, on présente les variations de la puissance des deux configurations en fonction du régime du moteur diesel.

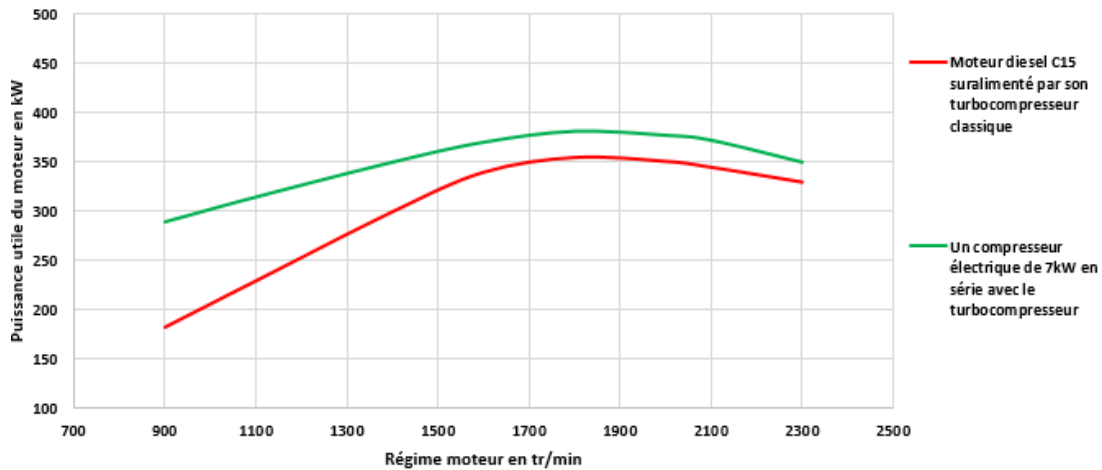


Figure 38. Variation de la puissance du moteur avec le régime

Dans la Figure 39, ci-dessous, on présente les variations de la puissance des deux configurations en fonction du régime du moteur diesel pour 4 régimes.

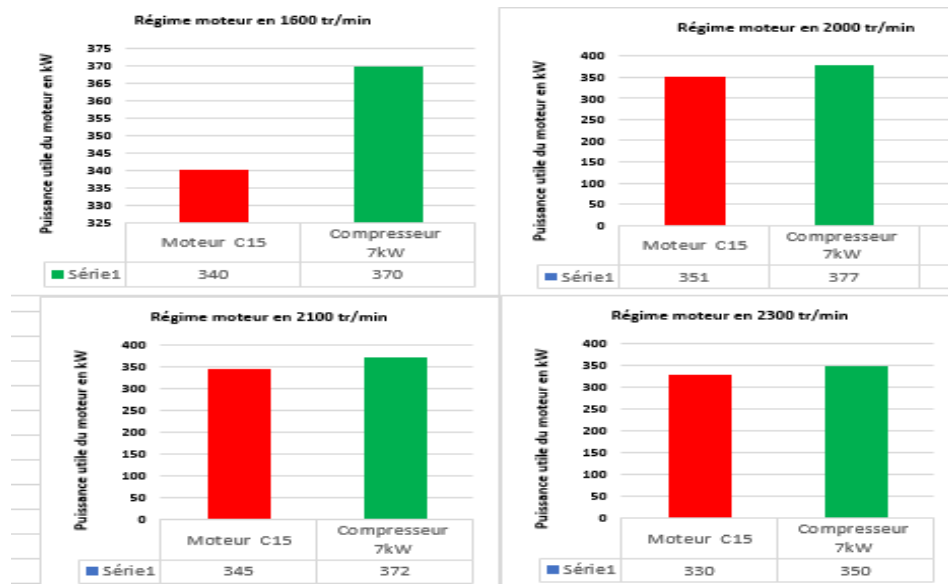


Figure 39. Variation de la puissance du moteur avec les 4 régimes

On note (Figure 38) que la différence entre les valeurs de puissance utile du moteur diesel est importante pour les deux configurations, surtout à bas régime (50 % d'augmentation) grâce à la puissance fournie par le moteur électrique au compresseur. À haut

régime et à pressions de suralimentation constantes, il ne sert à rien d'utiliser le moteur électrique parce qu'on a déjà de bonnes valeurs de puissance utile du moteur diesel. Cependant, le moteur électrique peut passer en mode alternateur pour récupérer de l'énergie électrique.

3.4.2 Couple du moteur

Nous remarquons aussi une augmentation significative du couple moteur grâce à la suralimentation par assistance électrique. En effet, le moteur atteint des valeurs de couple sensiblement plus élevées à des bas régimes (Figure 40).

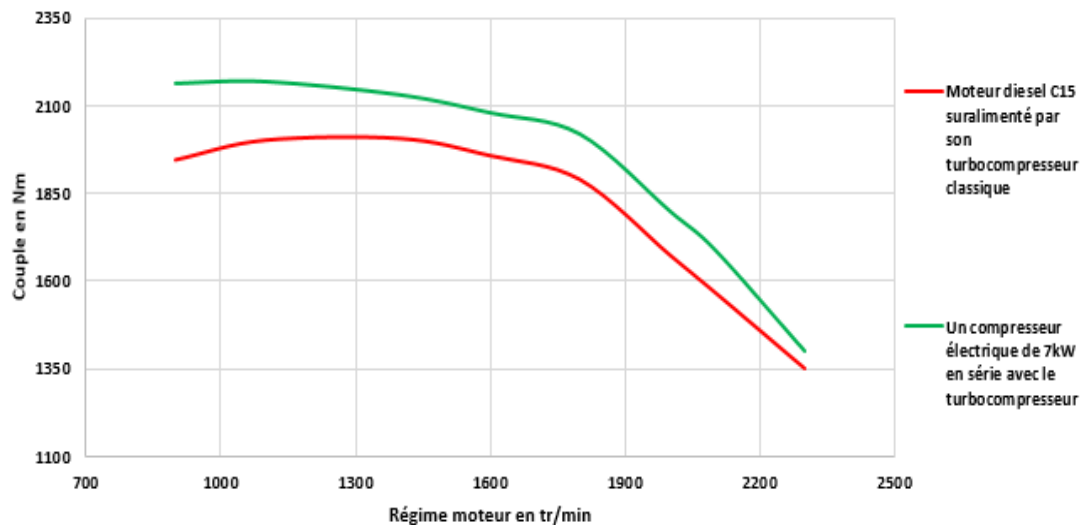


Figure 40. Variation du couple moteur en fonction du régime

3.4.3 Consommation spécifique

La suralimentation par assistance électrique entraîne un gain significatif à la consommation spécifique de carburant (g/kWh) pour tous les régimes de fonctionnement du moteur. La Figure 41 montre la différence de consommation spécifique entre le moteur de

base et la nouvelle configuration avec assistance électrique, nous remarquons presque 10 % de réduction de consommation spécifique du carburant.

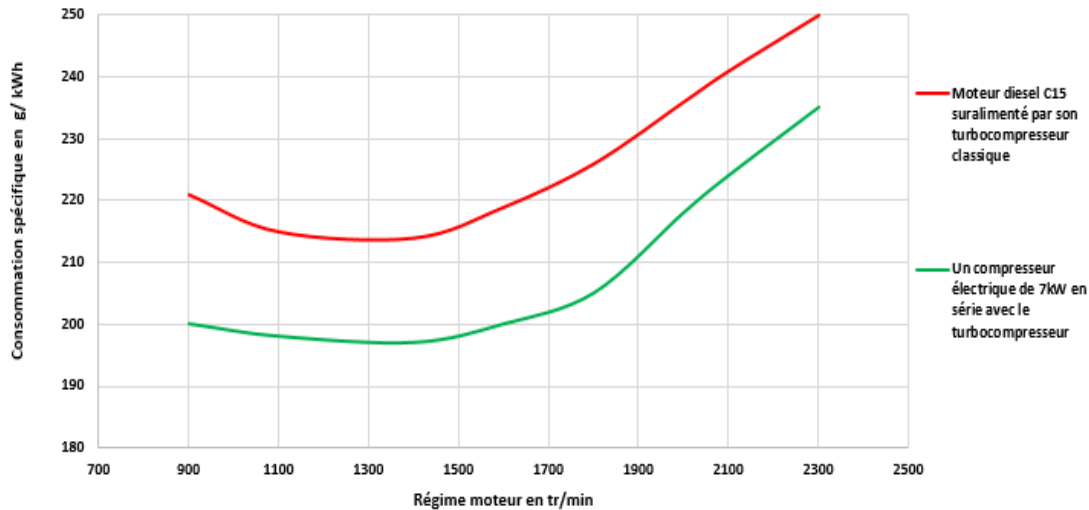


Figure 41. Variation de la consommation spécifique de moteur en fonction du régime

3.4.4 Consommation spécifique en fonction de puissance

Jusqu'à 370 kW de puissance de moteur, la consommation spécifique ne dépasse pas le 200 g/kWh pour la suralimentation du moteur diesel avec le compresseur électrique de 7 kW. Par contre on ne peut pas dépasser les 350 kW de puissance pour le moteur diesel turbocompressé classiquement avec une grande consommation spécifique supérieure de 215 g/kWh et elle peut attendre 250 g/kWh (Figure 42).

Donc on constate que l'ajout du compresseur électrique en série avec le turbocompresseur classique du moteur diesel C15 donne un préférable gain de consommation spécifique en fonction de la puissance.

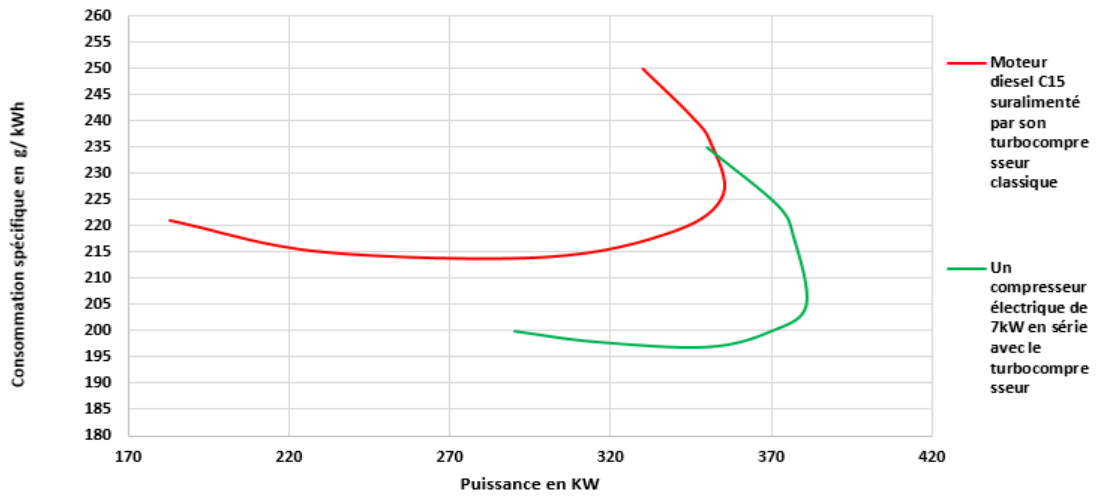


Figure 42. Consommation spécifique en fonction de la puissance de moteur

3.4.5 Pression maximale dans les cylindres

Dans la Figure 43, ci-dessous, on présente les variations de la pression maximale dans les cylindres en fonction du régime du moteur diesel.

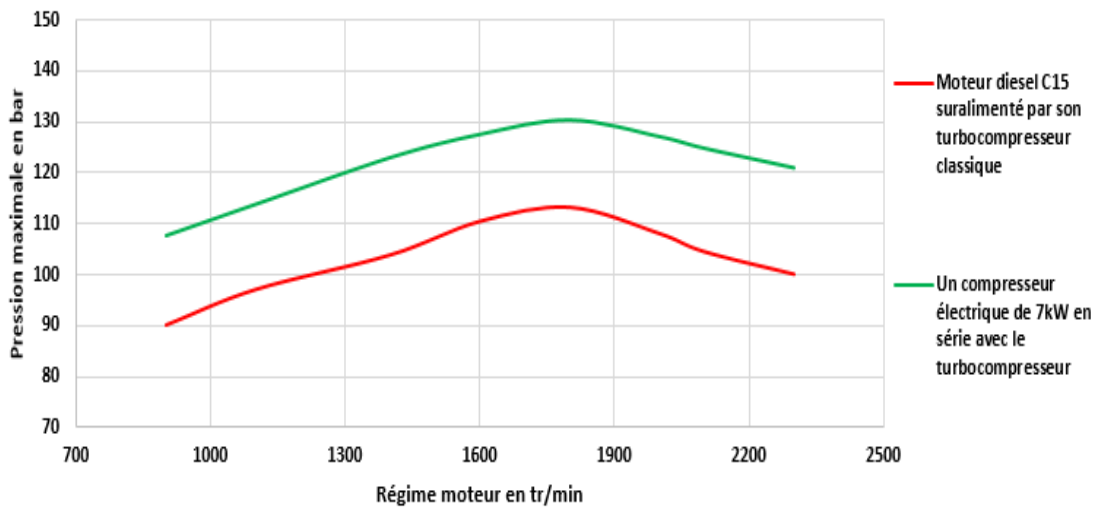


Figure 43. Pression maximale dans les cylindres en fonction du régime

La pression à l'intérieur de la chambre de combustion augmente lorsqu'on augmente la pression d'admission. La pression maximale à ne pas dépasser est de l'ordre de 180 bar [32], et dans notre simulation les cylindres sont toujours en sécurité pour tous les régimes de fonctionnement, ce qui explique le bon choix du compresseur électrique de 7 kW.

La simulation sur GT-Power des variations de la pression maximale dans les cylindres en fonction du régime du moteur diesel est très importante pour la sécurité des machines (le moteur diesel C15 et le système d'hybridation) et l'espace de travail aussi.

3.4.6 Les émissions des GES

La Figure 44 et la Figure 45, ci-dessous, présentent les variations des émissions des GES (concentration CO₂ et CO) en fonction du régime du moteur diesel. Il y a une baisse importante surtout à bas régime (environ 30 %) et environ 15 % pour les autres régimes.

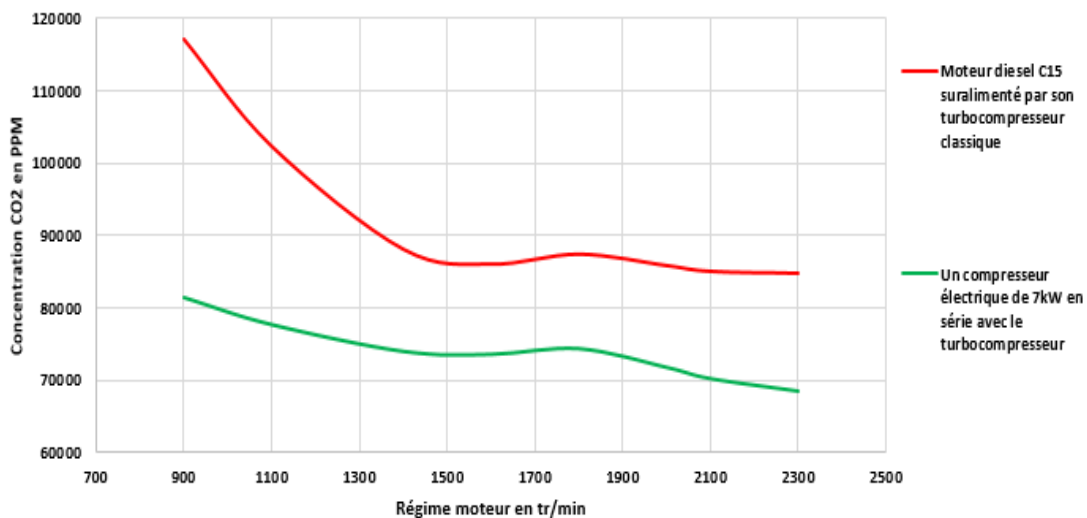


Figure 44. Les émissions des GES (concentration CO₂) en fonction du régime

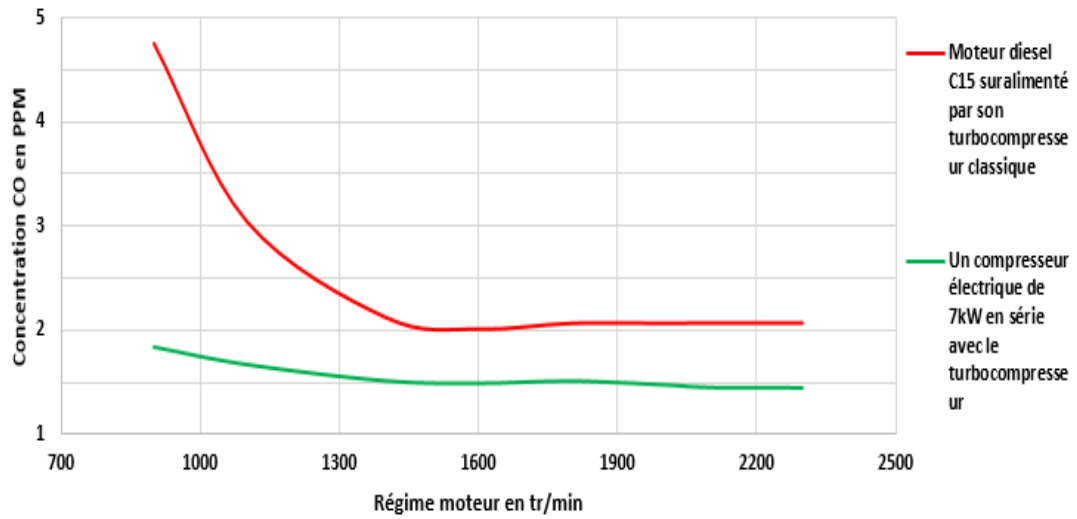


Figure 45. Les émissions des GES (concentration CO) en fonction du régime

3.4.7 Rendement de moteur

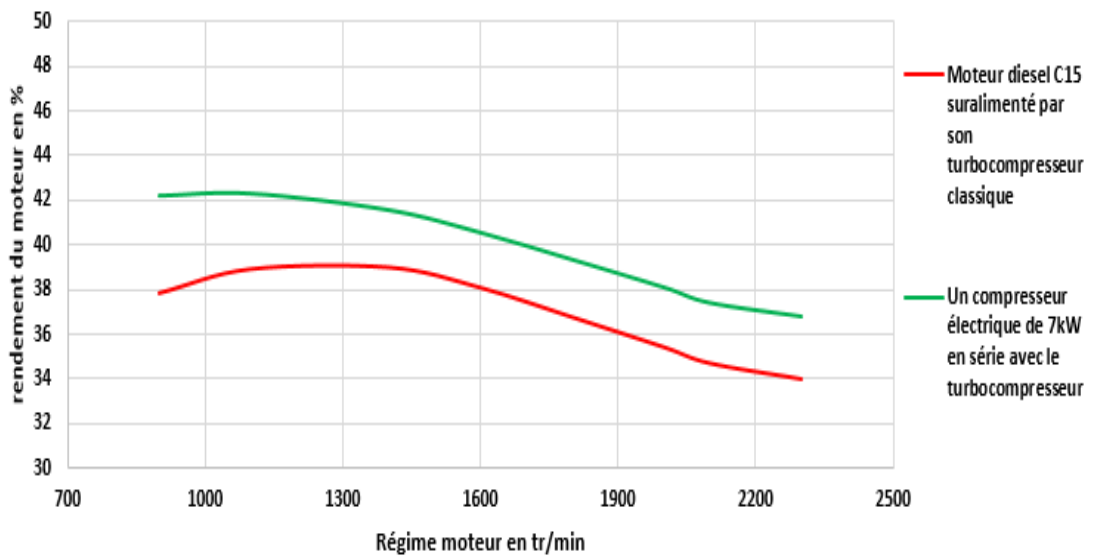


Figure 46. Variation du rendement de moteur en fonction du régime

La suralimentation par assistance électrique entraîne une augmentation significative du rendement de moteur diesel C15 pour tous les régimes de fonctionnement. La Figure 46, montre la différence du rendement de moteur de base et la nouvelle configuration avec assistance électrique, presque 6.6 % d'accroissement moyen et environ 10.5 % à bas régime.

3.5 CONCLUSION PARTIELLE

Avec les hypothèses étudiées et les simulations GT-Power réalisées, nous avons constaté que l'hybridation d'un moteur diesel Caterpillar C15 avec un turbocompresseur classique est insuffisante, notamment à bas régime, ce qui nécessite la suralimentation par assistance électrique, qui a permis d'améliorer la puissance utile, le couple du moteur en plus de réduire la consommation du carburant et les émissions des GES tout en conservant la même cylindrée (15,2 L).

Les variations de la pression maximale dans les cylindres en fonction du régime du moteur diesel montrent que l'assistance électrique pour l'hybridation pneumatique d'un moteur diesel C15 suralimenté par son turbocompresseur classique est une bonne solution pour optimiser les performances du moteur diesel tout en maintenant la sécurité des machines utilisées et l'espace d'exploitation.

Pour le fonctionnement en sécurité sur tous les régimes moteurs, la pression maximale d'admission du turbocompresseur classique du moteur diesel C15 est environ de 2 bar, car la pression maximale dans les cylindres du moteur diesel à ne pas dépasser est de l'ordre de 180 bar [32].

Dans le prochain chapitre, nous présentons la conception préliminaire du système permettant cette hybridation pneumatique par assistance électrique. Cette conception mécanique 3D sera éventuellement implantée dans un banc d'essai.

CHAPITRE 4

CONCEPTION MÉCANIQUE DE L'HYBRIDATION PNEUMATIQUE PAR ASSISTANCE ÉLECTRIQUE D'UN MOTEUR DIESEL C15

4.1 INTRODUCTION

La conception mécanique consiste à choisir et dimensionner des pièces et des structures tout en considérant des contraintes techniques, environnementaux, ainsi que la fréquence d'utilisation et les charges en opération.

Une simulation numérique nécessite des outils appropriés (logiciels CAO - SolidWorks) et des connaissances pour observer le comportement des matériaux. Pour obtenir une conception mécanique de très haute qualité, les critères suivants doivent être respectés :

- Comprendre et analyser le fonctionnement de systèmes mécaniques.
- Effectuer de nombreuses tâches entourant la conception technique de divers composants et systèmes mécaniques (dimensionnement et tolérances fonctionnelles).
- Effectuer des dessins techniques en 2D et en 3D en utilisant des logiciels de conception assistée par ordinateur.
- Évaluer la faisabilité et estimer les coûts de projet de conception.
- La qualité, la durée de vie de la solution, la sécurité et les performances.
- Les modifications minimales possibles à réaliser.

4.2 MOTEUR DIESEL SURALIMENTE PAR TURBOCOMPRESSEUR ACCOUPLE A UN MOTEUR ELECTRIQUE

Afin de réaliser cette solution technique (Figure 33), le turbocompresseur du moteur diesel C15 doit être remplacé par un système électromécanique dans lequel le turbo et le compresseur sont générés par un moteur électrique à vitesse réglable pour contrôler la pression d'admission.

Ici, nous sommes face à deux scénarios, soit l'utilisation d'un élément de transmission entre le moteur électrique et le nouveau turbocompresseur ou l'insertion d'un moteur électrique à vitesse réglable à deux arbres de sortie entre le turbo et le compresseur.

4.2.1 Un élément de transmission entre le moteur électrique et le turbocompresseur

L'accouplement permet de relier l'arbre de moteur électrique à celui de turbocompresseur (en deux pièces) qu'il doit entraîner, afin de transmettre la puissance mécanique du moteur sans modification de vitesse. Il existe des accouplements rigides, flexibles ou élastiques. Par exemple, l'accouplement élastique a l'avantage de corriger les défauts d'alignement et d'amortir les chocs et les vibrations (Figure 47).



Figure 47. Moteur électrique à vitesse réglable avec l'accouplement à double arbre à 90 °
[33]

« L'accouplement à une durée moyenne de vie de 10 000 heures. La vitesse en entrée est permise jusqu'à 3000 tr/min. Les températures admissibles pour un bon fonctionnement des renvois d'angle oscillent entre -18 °C et +80 °C (0 °F et 170 °F). Le montage et le contrôle soignés nous permettent de limiter le bruit des renvois d'angle même aux vitesses maximales » [33].

Pour plus d'explications sur la solution technique de l'utilisation d'un élément de transmission entre le moteur électrique, le turbo et le compresseur, la Figure 48 illustre une conception mécanique 3D sur SolidWorks. Étant donné que toutes les pièces utilisées sont standard, aucune cotation fonctionnelle n'est nécessaire.

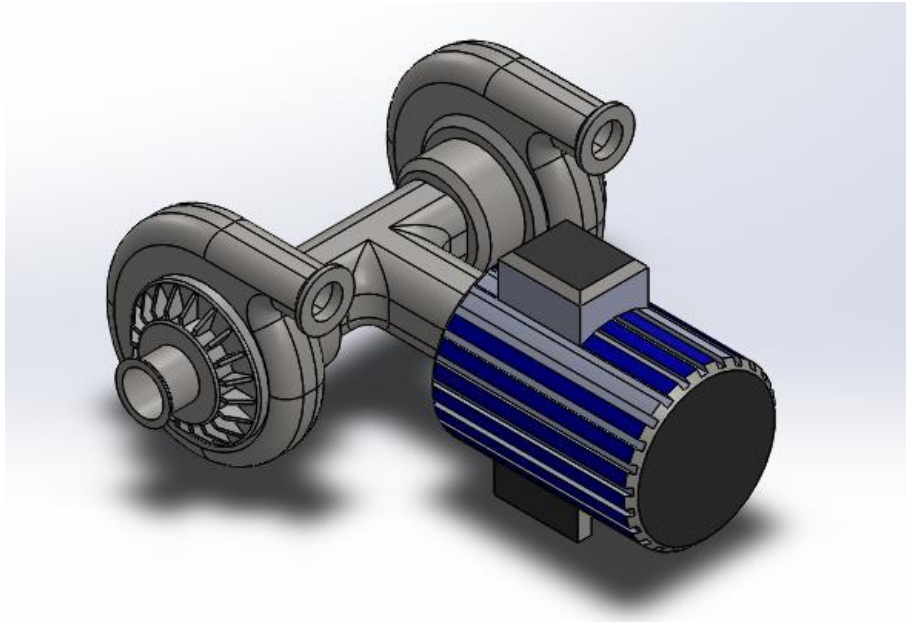


Figure 48. Conception mécanique 3D de la suralimentation par un élément de transmission entre le moteur électrique, le turbo et le compresseur

Cette solution est très coûteuse, car nous avons également besoin d'une nouvelle turbine et un nouveau compresseur avec le moteur électrique à vitesse réglable et l'accouplement à double arbre. Aussi le poids augmente significativement avec le nouveau système mécanique. La haute température de l'emplacement de l'installation peut, elle-aussi, causer des contraintes supplémentaires à l'implantation réelle.

4.2.2 Moteur électrique à deux arbres entre le turbo et le compresseur

En général c'est la même idée que le scénario précédent, mais au lieu de l'accouplement de l'arbre du moteur électrique à celui de turbocompresseur (en deux pièces), on utilise directement un moteur électrique spécial, à deux arbres de sortie pour le turbo et le compresseur (Figure 49).



Figure 49. Moteur électrique spécial a deux arbres [34]

Pour plus d'explications sur la solution technique de l'utilisation directe d'un moteur électrique spéciale a deux arbres de sortie, la Figure 50 illustre une conception mécanique 3D sur SolidWorks. Étant donné que toutes les pièces utilisées sont standard, aucune cotation fonctionnelle n'est nécessaire.

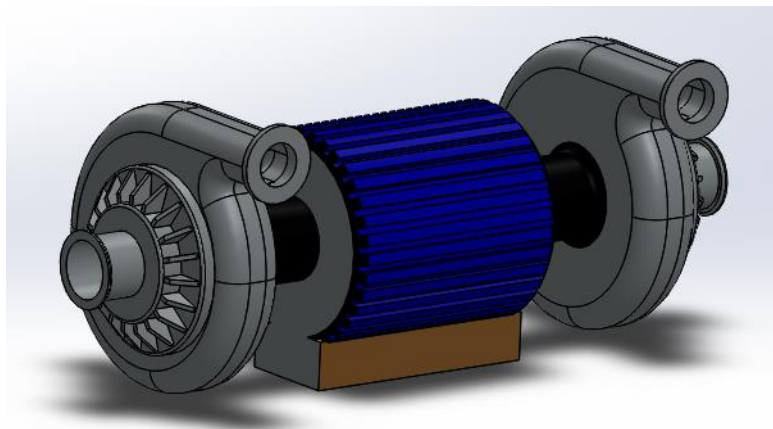


Figure 50. Conception mécanique 3D de la suralimentation par un moteur électrique à deux arbres entre le turbo et le compresseur

Cette solution est très coûteuse, car nous avons également besoin d'une nouvelle turbine et un nouveau compresseur avec le moteur électrique spécial à deux arbres de sortie à vitesse réglable. Aussi le poids augmente avec le nouveau système mais moins que dans la solution avec un élément de transmission. La haute température de l'emplacement de l'installation peut causer des contraintes supplémentaires à l'implantation réelle.

4.3 MOTEUR DIESEL SURALIMENTE AVEC UN COMPRESSEUR ELECTRIQUE DE 7 KW EN SERIE AVEC LE TURBOCOMPRESSEUR

Afin de réaliser cette solution technique (Figure 34), un compresseur électrique (super-chargeur électrique) doit être ajouté en série avec le turbocompresseur du moteur diesel C15.

Ici, nous sommes confrontés à un scénario plus simple :

- Nous gardons le turbocompresseur et le filtre d'admission d'air du moteur diesel C15.
- D'autre part, un super-chargeur électrique, des adaptateurs de raccordement et des tuyaux de circulation d'air sont installés entre le filtre d'admission, le compresseur électrique et le turbocompresseur du moteur diesel C15.

4.3.1 Super-chargeur électrique DURYEA

Après une recherche sur le marché des compresseurs électrique, on a trouvé le super-chargeur électrique DURYEA avec un moteur de puissance 9,5 hp (7 kW) et 600 A, qui marque un bon rendement, ainsi la flexibilité vu qu'il peut être monté sur les moteurs diesel ou à essence en combinaison avec un turbocompresseur (Figure 51).

Les avantages du super-chargeur électrique DURYEA :

- ✓ Élimination du turbo-Lag pour les gros moteurs.
- ✓ Utilisable sur tout moteur à essence ou diesel et toute cylindrée.

- ✓ Facile et rapide à installer et à désinstaller.
- ✓ Faible encombrement proportionnellement à d'autres solutions (très compacte).
- ✓ Des performances élevées à 12 volts sont désormais possibles (Figure 52).
- ✓ Aucun changement majeur du moteur diesel, en fonction de la quantité de suralimentation requise.
- ✓ Une unité fournit jusqu'à 2 bars.



Figure 51. Super-chargeur électrique DURYEA [35]

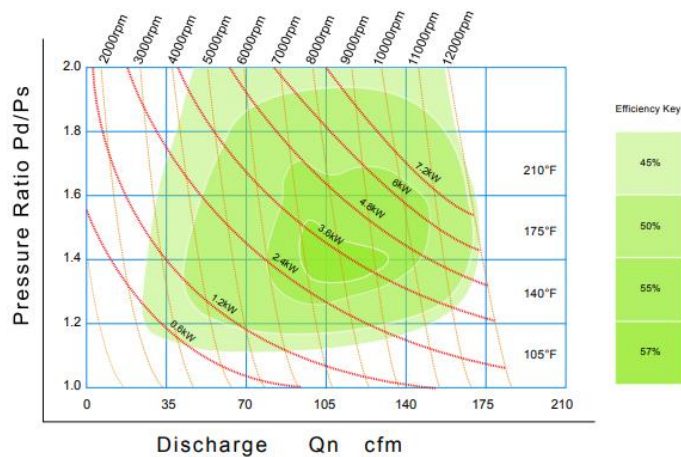


Figure 52. Carte du super-chargeur électrique DURYEA [35]

4.3.2 Adaptateur de raccordement du tuyau et le super-chargeur

Coude à tête prismatique avec 4 vis pour le fixer sur le super-chargeur de côté et cylindrique de l'autre côté pour le raccordement avec le tuyau de circulation d'air (Figure 53).



Figure 53. Adaptateurs de raccordement

4.3.3 Tuyau de circulation de fluide

C'est un tuyau flexible fixé par des colliers de serrage. Son rôle est tout simplement d'acheminer l'air entre le turbocompresseur, le super-chargeur électrique et le filtre d'admission du moteur afin d'améliorer les performances du moteur diesel. La durit est un tube en caoutchouc renforcé de toile dans un premier temps, puis de nappes textiles ou métalliques de plus en plus complexes au fur et à mesure de l'évolution des techniques (Figure 54).



Figure 54. Tuyau de circulation de fluide (durit)

Une durit est constituée au minimum d'une couche intérieure de caoutchouc assurant l'étanchéité, d'une couche de toile centrale assurant la résistance à la pression et la conservation de la forme, et d'une couche extérieure assurant la protection mécanique et la résistance aux agressions : ozone, rayons ultraviolets, produits chimiques tels des huiles et solvants, colliers de serrage, frottements d'autres pièces, etc.

4.3.4 La situation vibratoire de l'installation

Sans un bon contrôle des vibrations, un équipement coûteux peut tomber en panne plus rapidement, produire des résultats inexacts et même faire du bruit. Les vibrations causées par les moteurs, les ventilateurs et d'autres équipements, font subir à certaines installations des niveaux de vibration aigus et dommageables.

La réduction des vibrations fait plus que simplement éliminer une nuisance : elle peut également aider à prévenir une variété de problèmes, tels que :

- Le desserrage des boulons, des vis et d'autres accessoires : les installations qui négligent le contrôle des vibrations peuvent requérir plus de temps et d'argent pour l'entretien typique.
- Perturbation ou dommages à l'équipement sensible : l'équipement sensible peut produire des résultats inexacts et tomber en panne plus rapidement lorsqu'il est soumis à des vibrations incontrôlées.
- Pertes de production et inefficacités énergétiques : l'équipement soumis aux vibrations peut subir des charges plus importantes et tomber en panne plus rapidement, entraînant une consommation énergétique accrue et de temps d'arrêt supplémentaire [36].

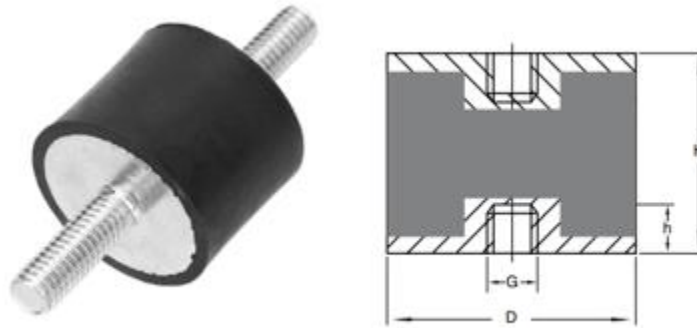


Figure 55. Support isolant anti-vibrations [36]

Les supports isolants anti-vibrations se composent d'un corps cylindrique en caoutchouc avec des plaques d'acier solidement collées aux deux extrémités. Chaque plaque a un trou central fileté pour la fixation du super-chargeur électrique. La plaque d'acier supérieure est boulonnée au pied ou à la plaque de base de la machine et la plaque d'acier inférieure est fixée sur le moteur diesel C15, avec un boulon à expansion (Figure 55).

4.3.5 Valve bypass

D'après les résultats de la simulation GT-Power, le moteur diesel turbocompressé C15 ne fonctionne bien qu'avec les hauts régimes. Par contre, aux bas régimes, l'assistance électrique par un super-chargeur électrique à l'admission du turbocompresseur du moteur diesel C15 est indispensable pour améliorer les performances du moteur.

Afin de réduire la consommation de diesel et d'électricité, une valve bypass est nécessaire pour ce scénario. Les valves bypass sont bien utilisés dans l'hybridation auto comme Audi.

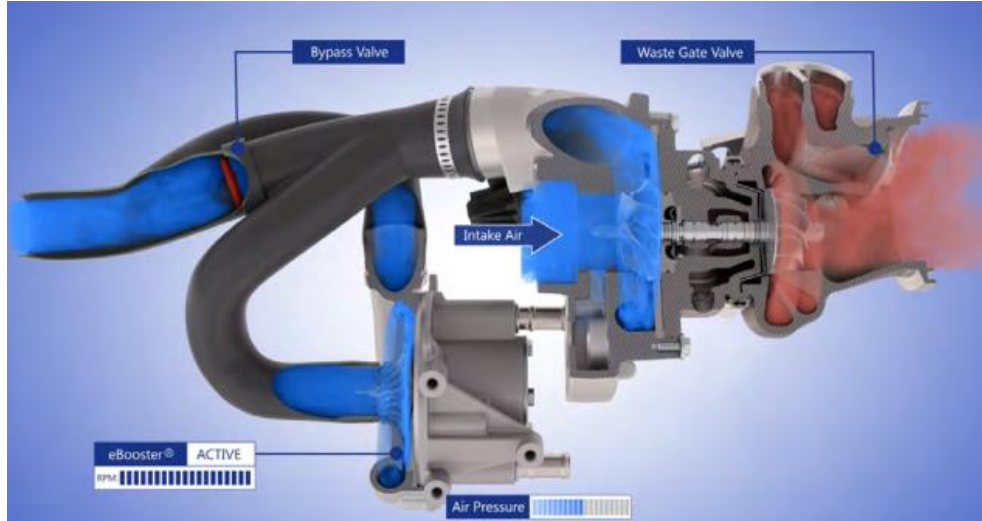


Figure 56. Montage de la valve bypass [37]

La Figure 56 décrit le montage de la valve bypass, qui permet de circuler l'air venant du turbocompresseur vers la chambre de combustion, ou pour combiner une pression d'air additif grâce au compresseur électrique et renforcer la pression moyenne effective entrant dans la chambre de combustion. Cette valve bypass joue un rôle très important dans la commutation entre le mode électrique et mécanique de suralimentation, sert à protéger le compresseur électrique et la flexibilité du système ou encore pour que le compresseur reste toujours indépendant.

4.3.6 Conception mécanique 3D de la suralimentation par un super-chargeur électrique

Pour plus d'explications sur la solution technique de l'insertion d'un compresseur électrique (super-chargeur électrique) en série avec le turbocompresseur du moteur diesel C15, la Figure 57 illustre une conception mécanique 3D sur SolidWorks. Étant donné que toutes les pièces utilisées sont standard, aucune cotation fonctionnelle n'est nécessaire.

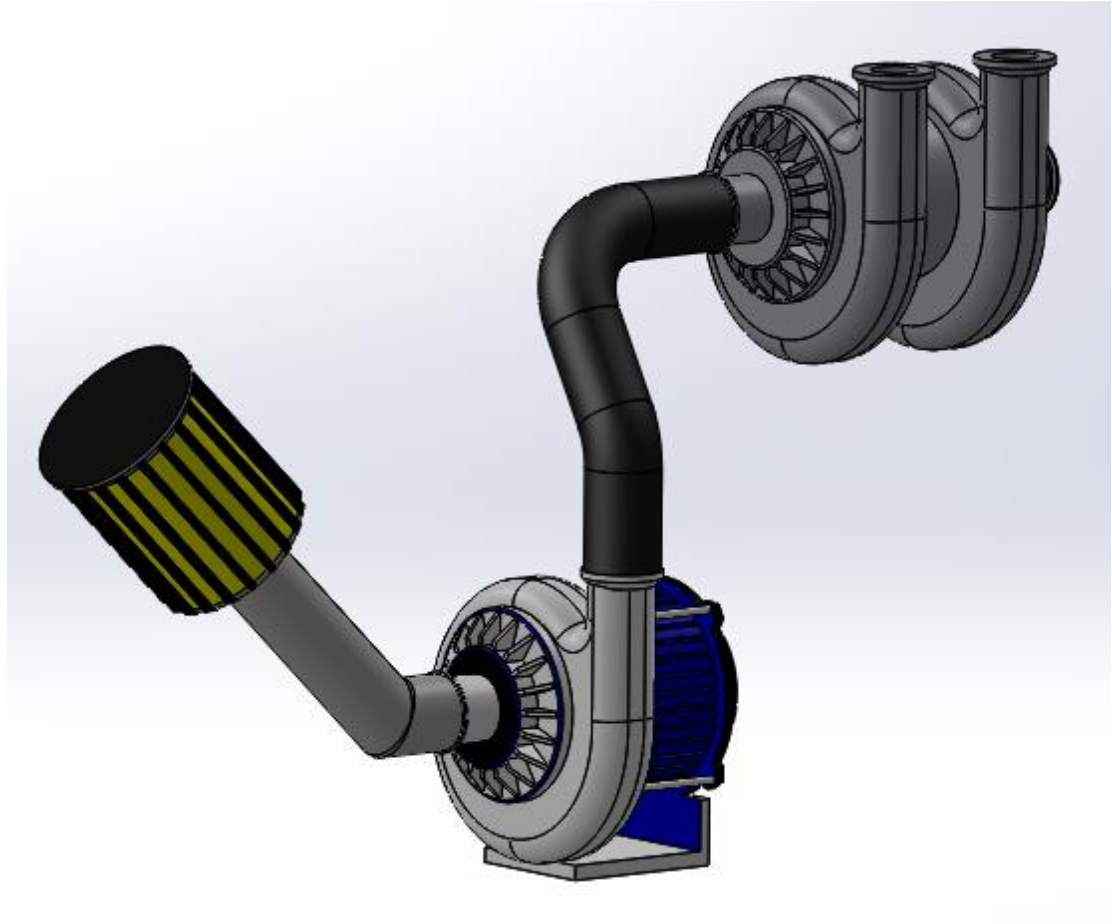


Figure 57. Conception mécanique 3D de la suralimentation par un super-chargeur électrique en série avec le turbocompresseur du moteur diesel C15

4.4 ANALYSE DES RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Puisque la différence entre les deux solutions techniques est bien importante surtout avec les données du tableau comparatif suivant (Tableau 2) on peut dire que l'hybridation pneumatique par assistance électrique, avec la suralimentation par un compresseur électrique en série avec le turbocompresseur du moteur diesel est la meilleure solution pour l'hybridation pneumatique.

L'utilisation d'une machine électrique à l'admission augmente la vitesse de rotation du compresseur et également la vitesse de rotation du turbo afin d'évacuer le maximum de gaz brûlant dans la chambre de combustion, donc plus d'optimisation des performances du moteur diesel.

Tableau 2. Tableau comparatif de deux solutions d'hybridation par assistance électrique

	Machine électrique couplée sur l'arbre du turbocompresseur	Compresseur électrique en série avec le turbocompresseur
Pression à l'admission	+	+++
Encombrement	XX	+
Coût de fabrication	XX	--
Puissance de moteur	+	+++
Réduction GES	+	++
Consommation spécifique de Diesel	+	++
Sécurité d'installation	--	+
Poids	XX	--
Température et vibrations	XX	++
Durée de vie prévue	--	++
Faisabilité et flexibilité	+	+++
Légende : + bonne performance ; X mauvaise performance ; - acceptable.		

L'idée de ce projet vient des difficultés rencontrées par les communautés éloignées pour produire de l'électricité avec une qualité et un coût relativement raisonnable. Ensuite, pour réduire les émissions de GES, une source d'énergie renouvelable, comme l'énergie éolienne, peut être utilisée pour produire de l'électricité pour le moteur électrique. De plus, dans le but de réduire les coûts initiaux de production et d'installation de ce système d'hybridation pneumatique par assistance électrique, l'énergie électrique générée par le générateur C15 peut être utilisée avec l'installation d'un redresseur, d'un filtre électrique et de batteries de stockage d'énergie pour alimenter le moteur électrique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le premier objectif principal de notre recherche est l'étude et le développement d'un modèle numérique sur GT-Power pour la simulation de l'hybridation pneumatique d'un moteur Diesel C15 suralimenté par son turbocompresseur classique et de comparer les résultats obtenus avec la simulation du même moteur, mais avec une assistance électrique à l'admission du turbocompresseur pour déterminer l'influence de cette technique sur la réduction de la consommation du combustible et l'amélioration des performances du moteur diesel.

D'après les simulations réalisées, nous avons constaté que la suralimentation du moteur diesel Caterpillar C15 avec un turbocompresseur classique est insuffisante, notamment à bas régime. Ceci justifie la suralimentation par assistance électrique. L'utilisation de l'hybridation pneumatique avec un compresseur électrique permet :

- La réduction de la consommation spécifique du carburant (environ 10 %).
- L'augmentation de la puissance utile du moteur (presque 50 % à bas régime).
- L'augmentation du couple moteur (approximativement par 10 %).
- Une réduction de 10 % des émissions des GES sur tous les régimes.
- L'augmentation significative du rendement de moteur avec presque 6.6 % d'accroissement moyen et environ 10.5 % à bas régime.

Le deuxième but du projet est la conception mécanique et la discussion des scénarios techniques pour réaliser cette hybridation pneumatique par une assistance électrique d'un moteur diesel C15. La suralimentation par compresseur électrique (super-chargeur

électrique) en série avec le turbocompresseur classique du moteur diesel montre un progrès technique et une efficacité à l'installation par rapport aux autres solutions.

La suite de ce travail de recherche est la mise en place d'un banc d'essai pour valider expérimentalement les résultats de l'implantation réelle de la solution proposée. Pour ce faire, la prochaine étape sera une visite chez un partenaire industriel afin de finaliser la conception de la solution et sa mise en opération.

ANNEXES

Figure 58 - Annexe I. Caractéristiques du moteur diesel C15 (5 pages)

Accueil > Moteurs > Moteurs
Caterpillar > Moteur Caterpillar C15



Moteur Caterpillar C15

Moteur industriel CAT C15 ACERT fabriqué par Caterpillar (USA) - 6 cylindres en ligne, 4 temps, injection directe, turbocompresseur, refroidisseur intermédiaire, unité de commande électronique (ADEM™ A4), système de carburant MEUI haute pression.

Puissance moteur Caterpillar C15 – 446-603 CV à une vitesse de rotation du vilebrequin de 1800-2100 tr/min. Le moteur est conforme aux normes d'émission Tier 3 (US EPA) et Stage IIIA (exigences de l'Union européenne) en utilisant la technologie avancée de réduction des émissions de combustion (ACERT). Elle couvre 4 systèmes pour réduire la toxicité des gaz d'échappement et couvre :

- Système de carburant;
- processus de combustion du carburant ;
- système d'admission d'air propre;
- mise en place d'un système électronique de contrôle et de gestion.

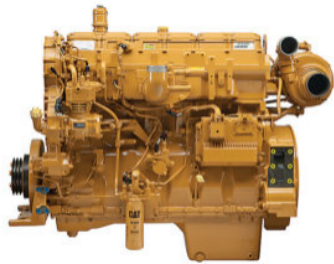
Le moteur C-15 est conçu pour être utilisé sur les machines agricoles, les plates-formes de forage, les broyeurs/broyeurs, les moissonneuses-batteuses, les compacteurs/rouleaux, les compresseurs, les équipements de construction, les grues, les broyeurs, les défonceuses, les équipements industriels généraux, les groupes hydrauliques, les équipements d'irrigation, chargeurs / porteurs, équipements miniers, engins de terrassement, équipements de pavage d'asphalte, pompes, excavatrices / draglines et trancheuses. En outre, le C-15 a été installé sur des bus, des camions et des tracteurs routiers de constructeurs automobiles américains bien connus tels que Kenworth, Peterbilt, Freightliner.

Caractéristiques

Nombre de cylindres	6				
Configuration	en ligne				
Ordre de tir	1-5-3-6-2-4				
Alésage du cylindre, mm	137,2				
Course du piston, mm	171,4				
Cylindrée, cc	15,2				
Ratio de compression	18:1				
Mode de fonctionnement du moteur *	UN	B	C	ré	E
Puissance de sortie, kW (ch)	328 (446)	354 (481)	403 (548)	433 (589)	444 (603)
Vitesse du vilebrequin, tr/min	1800-2100				

Régime de ralenti, tr/min — maximum, pas plus — minimum, pas plus	2310 700				
Consommation spécifique de carburant, g/(kW*h) à 1 800 tr/min à 100 % de puissance	217,5	—	227,7	—	—
Consommation d'huile spécifique pour les déchets, pas plus de g/(kW*h)	0,487				
Filtres à huile	plein débit avec élément filtrant remplaçable				
Pompe à carburant	basse pression				
Filtres à carburant — nettoyage grossier — nettoyage fin	séparateur de qualité supérieure, 2 microns				

Turbine	Turbocompresseur avec système de refroidissement air-air
Système de refroidissement	Système de refroidissement à circuit unique pour la chemise d'eau du moteur
Volume du système de refroidissement, litres	21,9 (sans volume de remplissage du radiateur)
Pompe à eau	pompe à eau centrifuge à engrenages
Générateur de charge	24 V, 60 A
Dispositif de démarrage	démarrateur électrique, 24 V
Dimensions, mm (LxlxH)	1782x821x1229
Poids (kg)	1469 (poids sec)



IND - Mode A (fonctionnement continu) - le mode de fonctionnement continu du moteur dans des conditions difficiles, lorsque le moteur fonctionne à la puissance maximale et à la vitesse maximale jusqu'à 100% du temps de travail, sans interruption ni réduction de charge périodique.

Mode IND - B - mode de fonctionnement du moteur, dans lequel la puissance et (ou) la vitesse de rotation diminuent périodiquement par rapport à la valeur maximale (la durée de fonctionnement à pleine charge ne dépasse pas 80% du temps de fonctionnement total)

Mode IND - C (mode intermittent) - fonctionnement du moteur avec une augmentation périodique de la puissance et (ou) de la vitesse jusqu'aux valeurs maximales (la durée de fonctionnement à pleine charge ne dépasse pas 50% du temps de fonctionnement total)

Mode IND - C (mode intermittent) - fonctionnement du moteur avec une augmentation périodique de la puissance et (ou) de la vitesse jusqu'aux valeurs maximales (la durée de fonctionnement à pleine charge ne dépasse pas 50% du temps de fonctionnement total)

Mode IND - D - mode de fonctionnement du moteur, dans lequel une augmentation périodique de la puissance jusqu'à la valeur maximale est autorisée (la durée de fonctionnement à pleine charge ne dépasse pas 10% du temps de fonctionnement total)

Le mode IND - E est un mode dans lequel la puissance maximale est requise pendant une courte période de temps pour le démarrage ou en cas de surcharge soudaine. Pour un fonctionnement d'urgence où le niveau de puissance normal n'est pas suffisant (le temps de fonctionnement à pleine charge ne dépasse pas 5 % du temps de fonctionnement total).

Fonctionnement du moteur :

- la construction robuste prolonge la durée de vie et réduit les coûts de possession et d'exploitation ;
- large gamme de révolutions de travail;
- Les options d'entraînement de prise de force offrent un accès flexible à l'alimentation auxiliaire pour les pompes et autres équipements.

Faible entretien:

- consommation de carburant réduite;
- l'intervalle minimum de nettoyage du DPF (5000 heures) et les intervalles de vidange d'huile de 250 ou 500 heures réduisent les coûts d'exploitation.

Gestion avancée du moteur :

- Système de contrôle ADEM A4 - Allumage intégré, contrôle du régime moteur, fonctions de protection et de contrôle, y compris calage d'injection variable avec détection de cliquetis. Le système a amélioré l'interface utilisateur, l'affichage, les commandes d'arrêt et les diagnostics.

Figure 59 - Annexe II. Mise en plan de la conception 3D sur SolidWorks pour la suralimentation par un élément de transmission entre le moteur électrique et le turbocompresseur

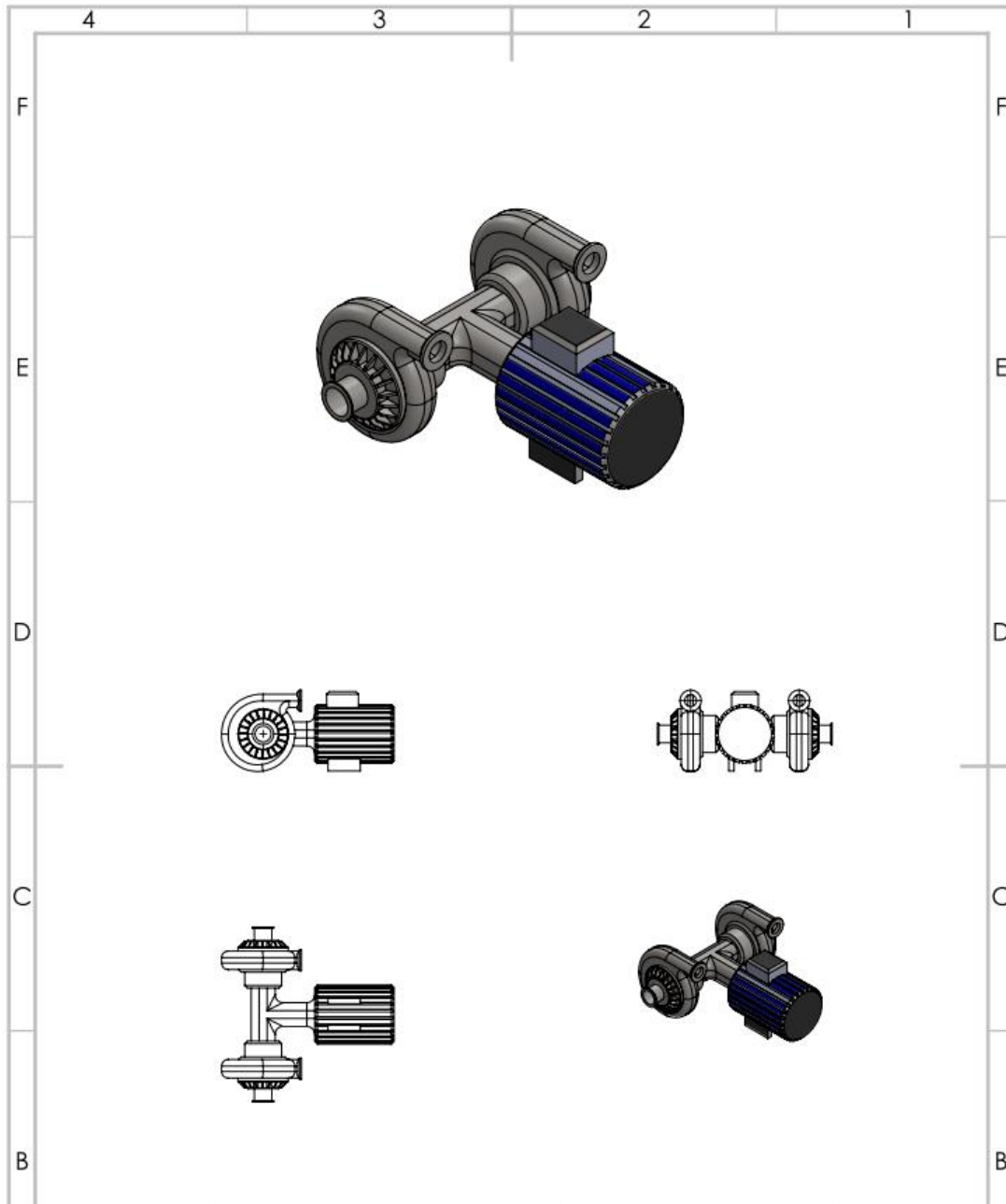


Figure 60 - Annexe III. Mise en plan de la conception 3D sur SolidWorks pour la suralimentation par un moteur électrique à deux arbres entre le turbo et le compresseur

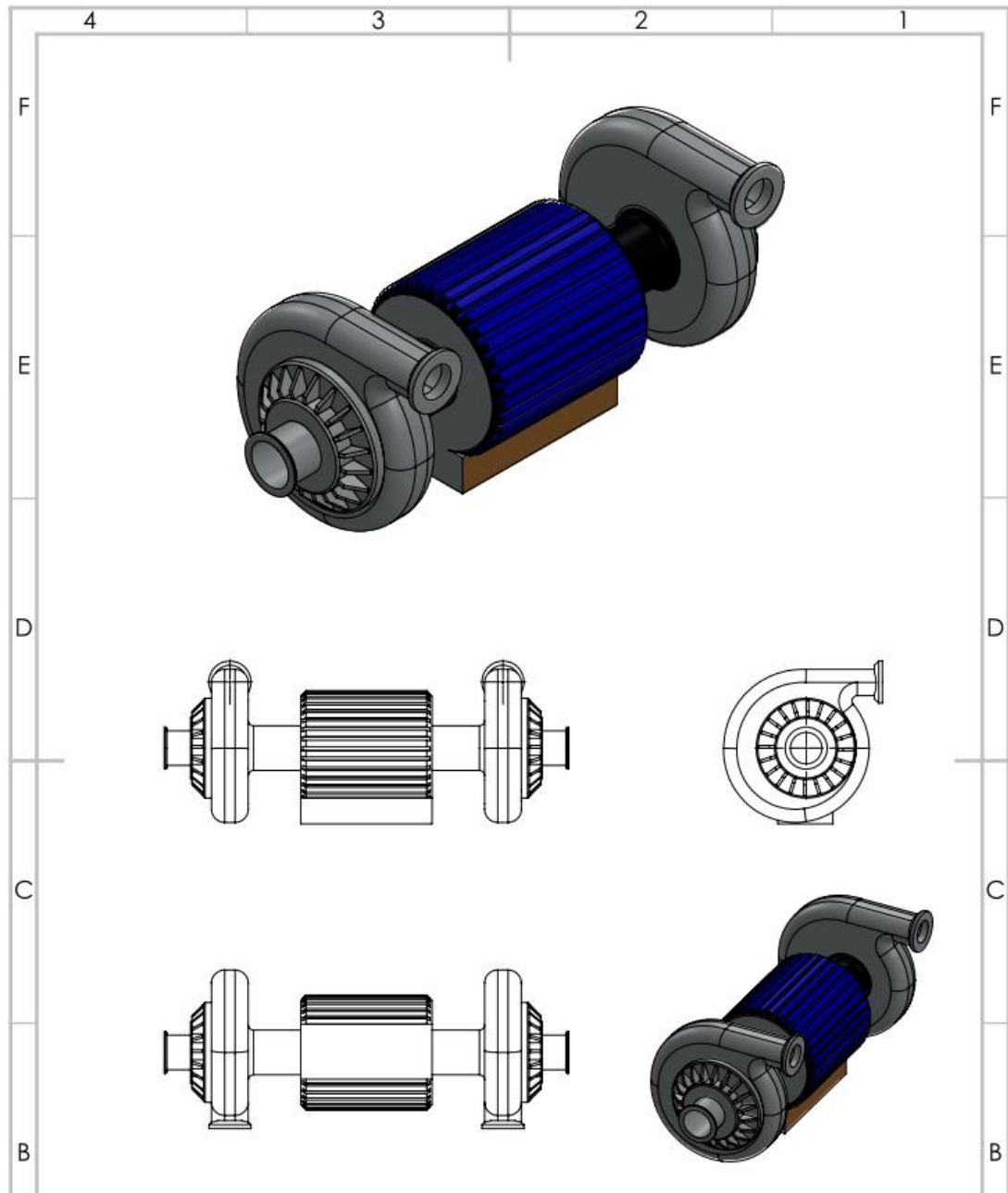
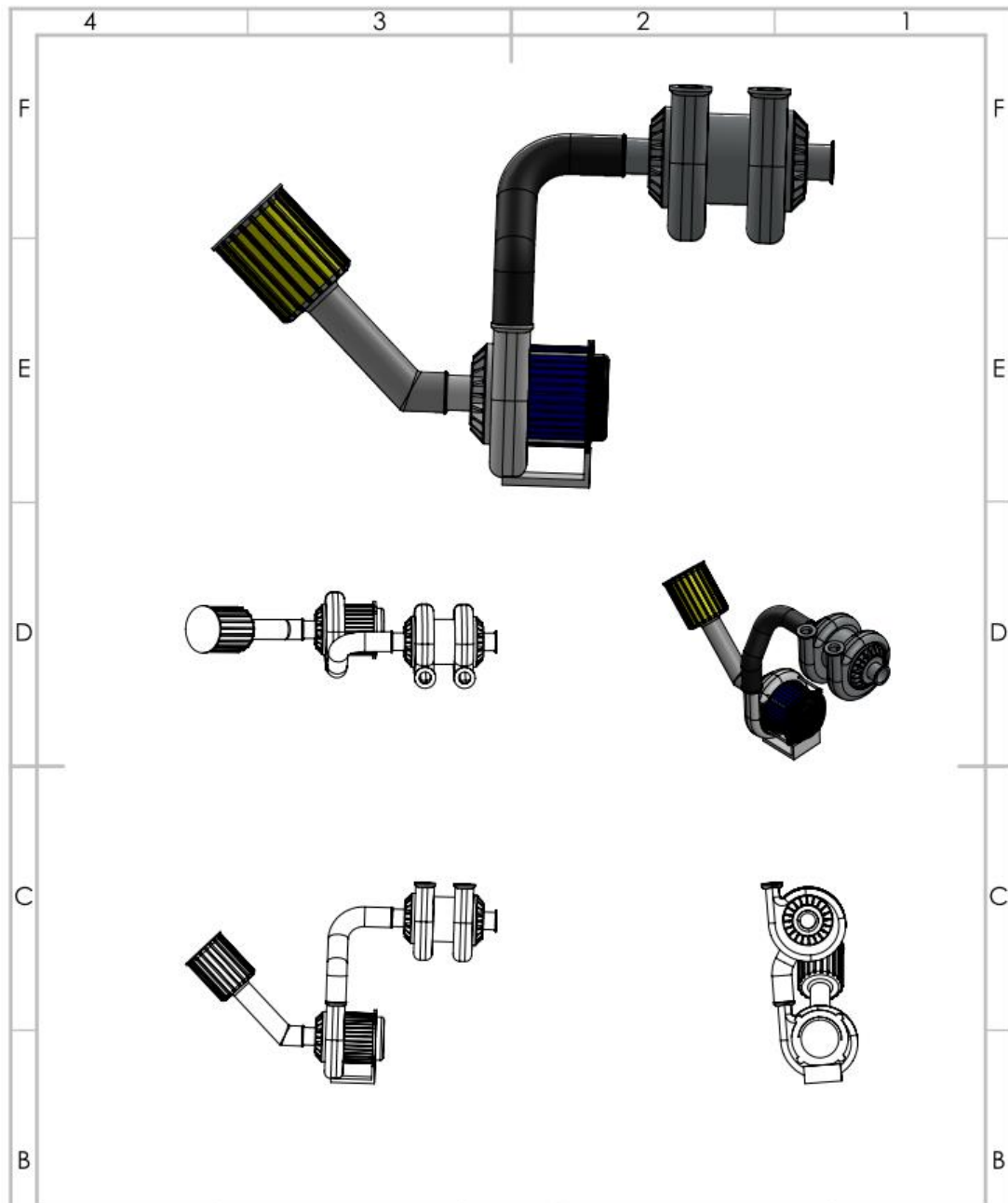


Figure 61 - Annexe IV. Mise en plan de la conception 3D sur SolidWorks pour la suralimentation par un super-chargeur électrique en série avec le turbocompresseur du moteur diesel C15



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. ILINCA, "Hybridation pneumatique des moteurs diesel, description du projet de recherche," 2021.
- [2] H. Ibrahim, R. Younès, T. Basbous, A. Ilinca, and M. Dimitrova, "Optimization of diesel engine performances for a hybrid wind–diesel system with compressed air energy storage," *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 3079-3091, 2011.
- [3] International-Energy-Agency. "Global energy consumption." <https://www.iea.org/>
- [4] Government-of-Canada. Indicateurs environnementaux [Online] Available: <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/andemissions-gaz-effet-serre-echelle-mondiale.html>
- [5] Government-of-Canada. L'Atlas du Canada - Base de données sur l'énergie dans les collectivités éloignées [Online] Available: <https://atlas.gc.ca/rced-bdece/fr/index.html>
- [6] Terre-net. "Structure d'un moteur diesel." <https://www.terre-net.fr/materiel-agricole/tracteur-quad/article/structure-d-un-moteur-diesel-207-100802.html>
- [7] F. Roby, "Chapitre 16. Les progrès asymptotiques des moteurs thermiques," in *Vers la voiture sans pétrole?*: EDP Sciences, 2021, pp. 197-226.
- [8] Une-Voiture-International. "L'arbre à cames en tête : Le moteur - L'ouverture et la fermeture des valves." <https://www.unevoiture.com/rudiments/le-moteur-l-ouverture-et-la-fermeture-des-valves>
- [9] S. M, "LIST OF DIFFERENT TYPES OF THERMODYNAMIC CYCLES." [Online]. Available: <https://www.theengineerspost.com/thermodynamic-cycle/>
- [10] E. Haddad, "Modélisation zéro-D des écoulements à l'admission d'un moteur à combustion interne.: Application au boîtier papillon et au refroidisseur d'air suralimenté," École centrale de Nantes, 2016.
- [11] stringfixer, "Composition des gaz d'échappement selon diverses sources." [Online]. Available: https://stringfixer.com/fr/Diesel_exhaust
- [12] Fiches-auto. "Turbo : Fonctionnement turbo-compresseur classique." <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-728-fonctionnement-du-turbo.php>
- [13] N. Cappelaere, "Evaluation des termes temporels permettant de décrire les transitoires rapides d'un turbocompresseur de suralimentation automobile," Paris, ENSAM, 2016.
- [14] A. M. Noor, R. C. Puteh, S. Rajoo, U. M. Basheer, M. H. M. Sah, and S. H. S. Salleh, "Simulation Study on Electric Turbo-Compound (ETC) for Thermal Energy Recovery in Turbocharged Internal Combustion Engine," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 799, p. 895, 2015.

- [15] E. Alwi, B. Amin, and W. Afnison, "Electric turbo compounding (ETC) as exhaust energy recovery system on vehicle," *GEOMATE Journal*, vol. 19, no. 71, pp. 228-234, 2020.
- [16] B. P. G. Ltd, "What is Electric Turbo Compounding (ETC) technology?," ed, 2016.
- [17] HandWiki, "Engineering, Electric turbo compound." [Online]. Available: https://handwiki.org/wiki/Engineering:Electric_turbo_compound
- [18] J. K. Miller, *Turbo: real world high-performance turbocharger systems*. CarTech Inc, 2008.
- [19] S. Sharma, J. García-Tíscar, J. M. Allport, S. Barrans, and A. K. Nickson, "Effects of ported shroud casing treatment on the acoustic and flow behaviour of a centrifugal compressor," *International Journal of Engine Research*, vol. 21, no. 6, pp. 998-1011, 2020.
- [20] D. J. Muelaner, "Turbo-Compoudage, Comment l'électrification insuffle une nouvelle vie à une ancienne technologie de moteur à pistons."
- [21] GARRETT-MOTION-INC. "GT2560R Turbocharger : Compressor Map & Exhaust Flow Chart." <https://www.garrettmotion.com/fr/racing-and-performance/performance-catalog/turbo/gt2560r/>
- [22] Long-Island-Turbo, "Inc, America's leading resource for turbocharger rebuilding, re-manufacturing and replacements." [Online]. Available: <https://liturbo.com/turbocharger-advantages-and-disadvantages>.
- [23] D. Francois, "Le turbocompresseur et le turbo-compound," vol. 1, pp. 1-16. [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/fr/document/view/16520252/le-turbocompresseur-et-le-turbo-compound>
- [24] S. Abuelsamid, "Garrett Electric Turbochargers Headed To Production In 2021." [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/samabuelsamid/2019/10/17/garrett-electric-turbochargers-headed-to-production-in-2021/?sh=55b11c48180a>
- [25] Dr.Jody.Muelaner, "Turbo-Compounding : How electrification is breathing new life into an old reciprocating engine technology.." [Online]. Available: <https://www.engineering.com/story/turbo-compounding>
- [26] S. K. Arshad-Ali, "Suitability of Hybrid Electric Powertrains with Electric Turbocharger," 2015.
- [27] S. Ayadi, "Étude et développement d'un modèle numérique pour la simulation de l'hybridation pneumatique du moteur diesel à l'aide d'un moteur électrique," Université du Québec à Rimouski, 2020.
- [28] W. Lee, E. Schubert, Y. Li, S. Li, D. Bobba, and B. Sarlioglu, "Overview of electric turbocharger and supercharger for downsized internal combustion engines," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 36-47, 2016.
- [29] M. Alshammari, N. Xypolitas, and A. Pesyridis, "Modelling of electrically-assisted turbocharger compressor performance," *Energies*, vol. 12, no. 6, p. 975, 2019.
- [30] Equipementier-automobile, "compresseur-suralimentation-electrique." [Online]. Available: www.valeo.com/fr/compresseur-suralimentation-electrique/.
- [31] M. Alshammari, F. Alshammari, and A. Pesyridis, "Electric boosting and energy recovery systems for engine downsizing," *Energies*, vol. 12, no. 24, p. 4636, 2019.

- [32] P. Eilts, C.-P. Stoeber-Schmidt, and R. Wolf, "Investigation of extreme mean effective and maximum cylinder pressures in a passenger car diesel engine," SAE Technical Paper, 0148-7191, 2013.
- [33] seditec, "Renvois d'angle Série 2000." [Online]. Available: <http://seditec.fr/fr/renvois-dangle-series-2000-et-4000-inverseurs-mecaniques/43-renvois-d-angle-serie-2000-et-4000-inverseurs-mecaniques.html>.
- [34] wnmotor, "Série yz Double CA triphasé de l'arbre moteur électrique pour la Machinerie métallurgique et Crane." [Online]. Available: https://fr.made-in-china.com/co_wnmotor/product_Yz-Series-Double-Shaft-Three-Phase-AC-Electric-Motor-for-Metallurgical-Machinery-and-Crane_esnyrnyu.html.
- [35] Duryéa-Technologies, "DURYEA 12 VOLT ELECTRIC SUPERCHARGER." [Online]. Available: <https://duryeatechnologies.com/duryea-electric-supercharger/#12V-electric-supercharger-FAQs>.
- [36] eaton, "Dispositifs de suspension d'isolation des vibrations." [Online]. Available: <https://www.eaton.com/ca/fr-ca/catalog/support-systems/vibration-isolation-hangers.html>.
- [37] B. Hu, J. W. Turner, S. Akehurst, C. Brace, and C. Copeland, "Observations on and potential trends for mechanically supercharging a downsized passenger car engine: a review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 231, no. 4, pp. 435-456, 2017.

