

Conception et réalisation d'un système de lubrification indépendant pour turbos : le « TC-LUBE ».

Ing. B. HENNEBERT
Ir L. DOCQUIER
ISICHt Mons

Cet article présente le TC-LUBE : un équipement créé par la société DSi, active dans la conception d'équipements de mesure destinés à l'étude des moteurs et des lubrifiants. Ce TC-LUBE permet de lubrifier les turbocompresseurs indépendamment de leur moteur, en vue d'en étudier l'usure et la consommation d'huile. Il est pour cela équipé d'un dispositif de chauffage de l'huile du turbo, avec une régulation de la température d'huile, et d'un asservissement de la pression d'huile.

Mots-clefs : Turbocompresseur, recherche et développement, lubrification indépendante, consommation d'huile, usure

This article presents the TC-LUBE : an equipment created by DSi company, which offers measurement equipments dedicated to the development of engines and lubricants. This TC-LUBE is used to lubricate turbochargers independently from their engine, in order to study wear and oil consumption of the turbos. Therefore, it is equipped with a turbo oil heating system, with temperature and pressure regulation of the turbo oil.

Keywords : Turbocharger, research and development, independent lubrication, oil consumption, wear

1. Introduction

Cet article présente la conception et la réalisation du TC-LUBE, un équipement développé par la société DSi et qui permet une lubrification indépendante des turbocompresseurs.

Il débutera par une brève présentation de cette société, suivie du contexte dans lequel le projet TC-LUBE a vu le jour. Les différents types de mesures envisagés avec ce produit et deux autres équipements de mesure, directement liés au projet, seront également présentés.

Puis sera exposé l'organe fondamental du projet, le turbocompresseur, souvent abrégé par « turbo » : son principe de fonctionnement et les contraintes qu'il subit. Ensuite seront approfondis les principes des mesures envisagées avec le TC-LUBE sur le turbo.

Le développement sera enfin véritablement abordé, avec le cahier des charges du projet, le schéma de fonctionnement et les raisons pour lesquelles celui-ci a été adopté, ainsi que l'architecture de la machine « TC-LUBE » et des explications concernant la disposition des différents éléments.

Pour terminer, nous verrons l'automatisation du système de lubrification. Une fois accouplé au turbo, il en assure une lubrification adéquate et indépendante du reste du moteur, avec un asservissement de la pression et une régulation de la température d'huile.

2. La société DSi

Le projet TC-LUBE a été lancé en juin 2009 au sein de la société Delta Services Industriels, en abrégé DSi. Celle-ci est située dans le zoning industriel de Tournai-Ouest et propose, à la vente comme à la location avec services, des équipements de mesure destinés au développement et à l'étude des moteurs et des lubrifiants, avec la particularité d'exploiter la radioactivité pour la réalisation de ces mesures. DSi compte aujourd'hui une quinzaine de personnes, installées dans un bâtiment équipé de trois cellules d'essais moteurs, d'un atelier de montage des équipements et d'un laboratoire de radiochimie.



Figure 1 : le « DSi Engine Test Center »

3. Le projet TC-LUBE

3.1. Les origines du projet

A une époque où nous prenons conscience de la valeur de l'énergie et de l'importance du respect de l'environnement, les constructeurs automobiles s'attèlent à améliorer les performances et à réduire les émissions et l'impact environnemental des moteurs thermiques.

Ainsi, des technologies comme l'injection directe essence, le filtre à particules diesel, et bien entendu la suralimentation, sont en plein essor ; et

les turbos, qui équipaient déjà la majorité des véhicules diesel, se généralisent également sur les moteurs à essence, en parallèle avec le « downsizing » (réduction de la cylindrée) des moteurs.

Le turbo est donc plus que jamais un organe essentiel du moteur, et un énorme intérêt est porté à son développement ainsi qu'à l'amélioration de ses performances. Le TC-LUBE a été développé par DSi afin de répondre aux demandes d'un de ses partenaires et de clients désireux à la fois d'affiner l'étude des turbos, notamment au niveau de l'usure, ainsi que celle de la consommation d'huile des moteurs, à laquelle participent les turbos. L'ambition était également de proposer un produit au rapport prix/performances rivalisant avec des équipements similaires développés par certains concurrents, notamment allemands.

Le TC-LUBE allait devoir permettre, de par la lubrification indépendante, d'adapter deux autres équipements de mesure déjà au catalogue de DSi pour cibler spécifiquement les turbos : la chambre TLA, utilisée pour la mesure d'usure de pièces, et le C-LUBE, qui permet de mesurer la consommation d'huile.



*Figure 2 : la Chambre TLA
(mesure d'usure de pièces)*



*Figure 3 : le C-LUBE
(mesure de consommation d'huile)*

3.2. Le turbo

Un turbo est un organe que l'on peut trouver à proximité du collecteur d'échappement sur un moteur dit « turbo » ou « turbocompressé » :

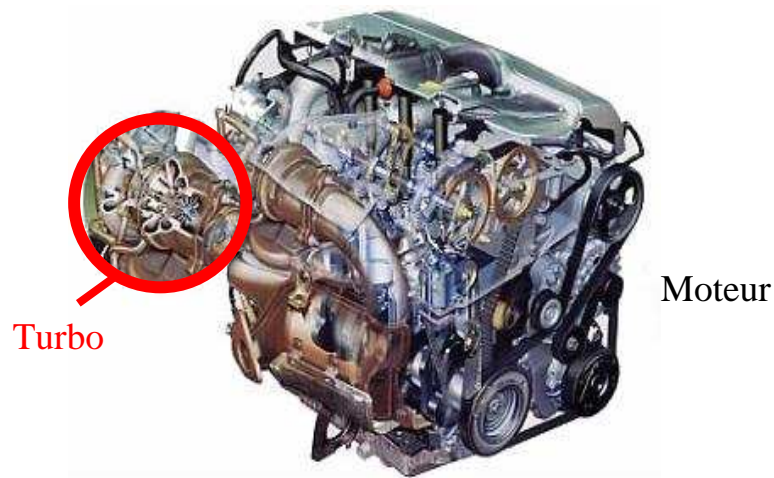


Figure 4 : le turbo sur un moteur [4]

Lorsque les gaz d'échappement sont évacués du moteur, ils possèdent encore un capital énergétique important, à la fois sous forme d'énergie calorifique et d'énergie cinétique (gaz chauds et mobiles).

Le principe du turbocompresseur est de récupérer cette énergie « gratuite » et de la réutiliser pour pré-comprimer les gaz d'admission et déboucher ainsi sur un meilleur remplissage des cylindres, et donc de meilleures performances du moteur.

Pour ce, le turbo est composé d'un stator enfermant un rotor constitué de trois éléments : deux roues dynamiques - une de turbine côté échappement et une de compresseur côté admission - ainsi qu'un axe qui les relie.

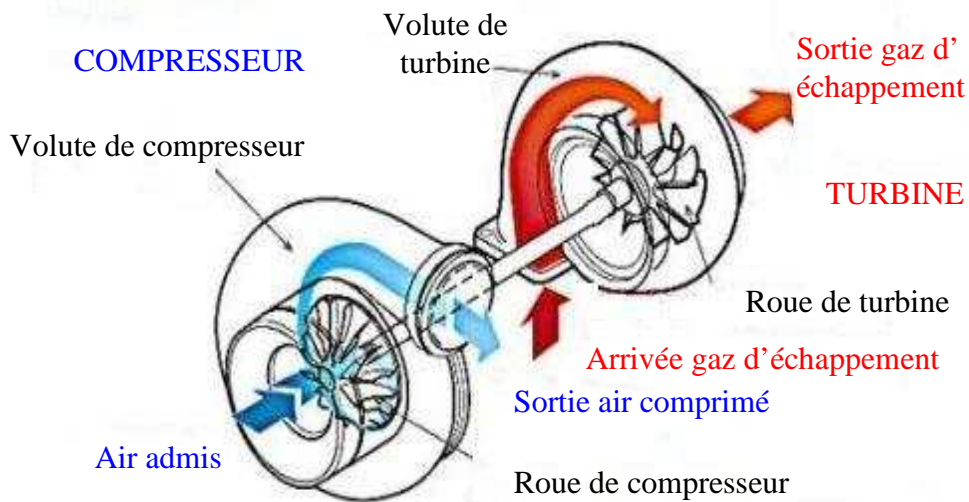


Figure 5 : le principe de fonctionnement du turbo [3]

Lors de leur sortie du moteur, les gaz d'échappement entraînent la roue dynamique de turbine et lui cèdent ainsi une partie de leur énergie. La roue dynamique de compresseur étant liée mécaniquement, via l'axe, à celle de turbine, elle va entraîner les gaz d'admission et les pré-comprimer, leur restituant ainsi une partie de l'énergie perdue par les gaz d'échappement.

Le turbo est un organe assez « délicat » :

- Au niveau thermique : côté échappement, les gaz sortent à des températures pouvant dépasser 800°C sur les moteurs diesel et 1000°C sur les moteurs à essence, tandis qu'à quelques centimètres, côté admission, passent les gaz d'admission à température ambiante. Soit un important gradient thermique au sein du turbo.
- Au niveau mécanique : en fonctionnement, l'axe, les roues dynamiques et les butées tournent à des vitesses extrêmement élevées, pouvant atteindre jusqu'à 250 000 tr/min sur des turbos poussés, et s'usent donc de par leur mouvement. Les roues dynamiques doivent être parfaitement équilibrées et sont réalisées dans des matériaux particuliers : alliages à base de nickel pour la roue de turbine, et d'aluminium pour celle

de compresseur (légers et résistants à la chaleur). L'axe du turbo doit être efficacement lubrifié pour en limiter l'usure : le palier qui est utilisé pour supporter cet axe du turbo est spécifique et est appelé « palier flottant », ainsi une bague vient se placer entre le palier turbo et l'axe en lui-même, ce qui garantit une bonne lubrification aux hauts régimes caractéristiques du turbo.

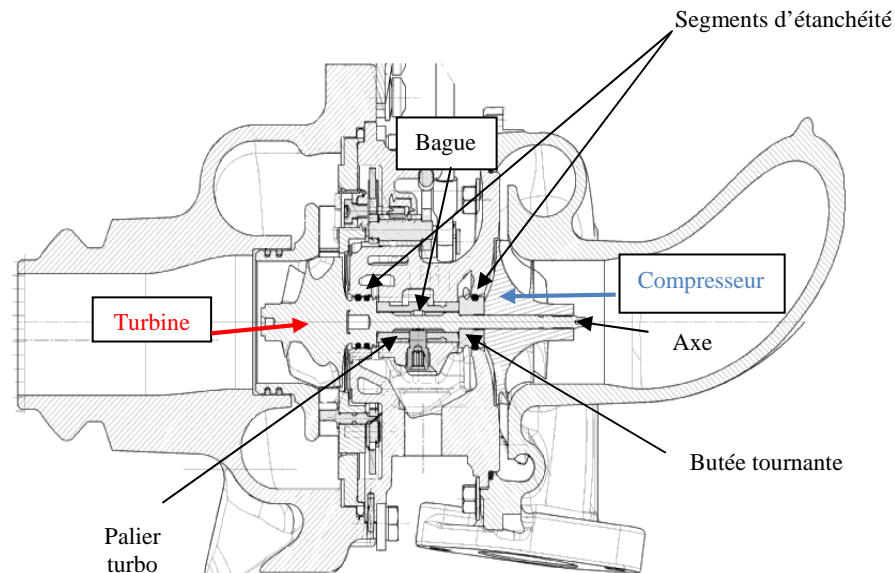


Figure 6 : la lubrification du turbo

L'étanchéité entre le circuit de lubrification et les volutes de compresseur et de turbine est assurée par des segments d'étanchéité. Mais au fil du temps, ceux-ci s'usent et perdent de leur étanchéité. Dans certaines zones, où la pression d'huile est plus importante que celles des gaz d'admission ou d'échappement (soumis à des effets dynamiques), ce manque d'étanchéité peut entraîner un passage d'huile vers la volute correspondante, et donc une consommation d'huile (qui passe vers la ligne d'échappement en fin de cycle moteur).

3.3. Les principes de mesures [1]

Le turbo soumis à étude est accouplé au TC-LUBE, qui en assure une lubrification indépendante du reste du moteur. Les conduites « d'origine » d'arrivée et de retour d'huile au turbo sont bouchées, et des raccords adaptés pour lier le turbo au TC-LUBE. Les autres organes du moteur restent bien entendu lubrifiés normalement, par l'huile du moteur.

- Principe de la mesure d'usure du turbo :

Au préalable, le turbo est démonté et les pièces soumises à étude sont dites « activées » : au moyen d'un cyclotron, une fine couche (de l'ordre de quelques dizaines de microns) d'isotopes radioactifs émettant des rayonnements est créée sur la surface d'usure des pièces selon un profil d'activation défini.

Le turbo est ensuite remonté, placé sur son moteur et mis en fonctionnement. Sa lubrification est assurée par le TC-LUBE et une chambre TLA est placée dans ce circuit d'huile (en parallèle, car la chambre est équipée de sa propre pompe).

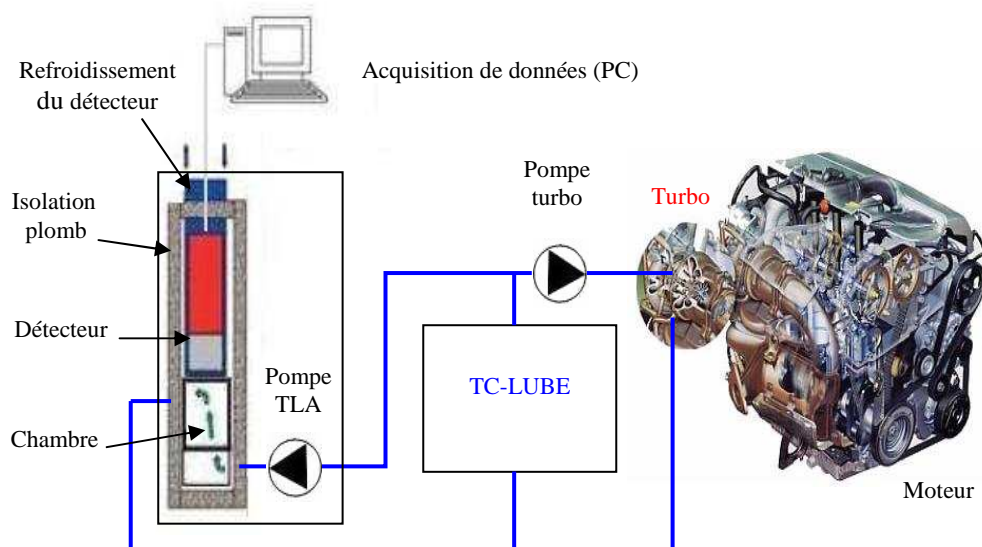


Figure 7 : le principe de la mesure d'usure du turbo

Lorsque la pièce activée s'use, les particules radioactives désolidarisées sont emportées par l'huile du système indépendant. Elles vont ainsi circuler dans la chambre TLA, face à laquelle est placé un détecteur. La mesure consiste à suivre l'évolution de l'activité dans cette chambre : connaissant le rapport entre le volume d'huile total du circuit indépendant et le volume d'huile présent dans la chambre ainsi que le profil d'activation de la pièce activée, l'évolution de l'activité dans la chambre peut être interprétée en termes d'usure de cette pièce. La chambre et le détecteur sont placés dans une colonne d'anneaux de plomb les isolant de l'activité ambiante de façon à ce que le détecteur ne mesure que l'activité de la chambre.

- Principe de la mesure de consommation d'huile du turbo :

Au niveau de la mesure de consommation, le TC-LUBE assure toujours la lubrification indépendante du turbo et le C-LUBE est placé dans la ligne d'échappement du moteur.

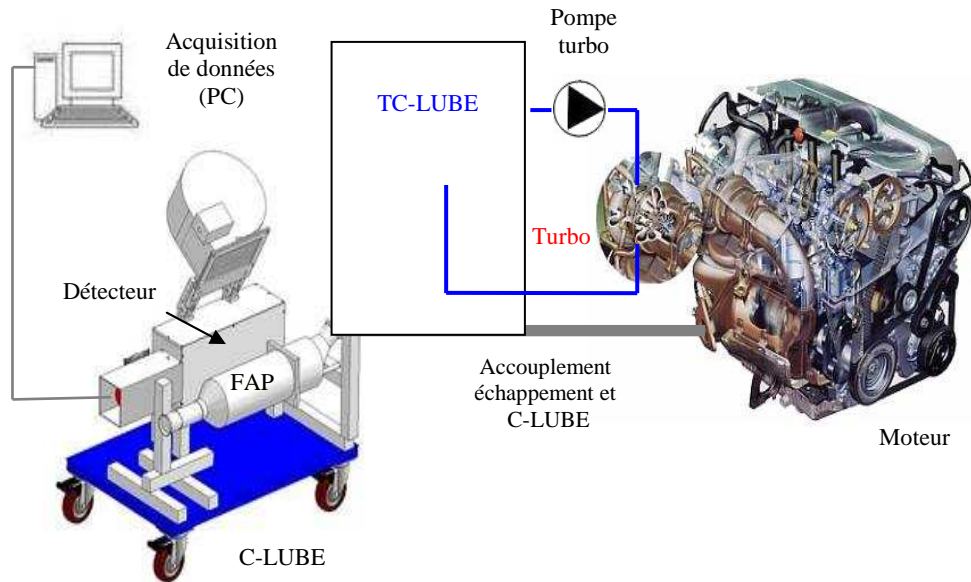


Figure 8 : le principe de la mesure de consommation d'huile du turbo

C'est cette fois l'huile du système indépendant elle-même qui est rendue radioactive (la mesure simultanée de l'usure et de la consommation n'est donc pas envisageable). Pour cela, une faible quantité de radio-traceur est ajoutée à l'huile (environ 0,01% de la masse, ce qui ne modifie pas ses propriétés) en veillant à ce que le mélange soit homogénéisé (barbotage) avant de commencer les mesures.

Dès lors, en fonctionnement, si le turbo consomme de l'huile, les particules radioactives passent vers la ligne d'échappement où elles sont piégées dans le filtre à particules FAP du C-LUBE. La mesure consiste à suivre, grâce au détecteur, l'évolution de l'activité dans le FAP : après un étalonnage préalable, la hausse d'activité dans le FAP peut être interprétée en termes de consommation d'huile. La lubrification indépendante du turbo par le TC-LUBE autorise de ne cibler que le turbo, ce qui diffère d'une mesure de consommation classique pour laquelle est mesurée la consommation d'huile globale du moteur.

4. Le développement du TC-LUBE

4.1. Le dispositif de mise sous pression et à température de l'huile turbo

Deux points fondamentaux figuraient au cahier des charges du TC-LUBE :

- Au niveau de la pression d'huile, réaliser un asservissement pour « copier la lubrification d'origine du turbo ». Celle-ci est assurée par la pompe à huile du moteur, et suivant les différentes conditions de fonctionnement (charge, régime), la pression d'huile délivrée varie au niveau du turbo selon une certaine cartographie. Le TC-LUBE allait devoir s'adapter à ces différentes conditions de fonctionnement pour respecter cette cartographie.
- Au niveau de la température d'huile, DSi souhaitait qu'elle soit un paramètre fixe lors des mesures, réalisées en phases stabilisées. Le TC-LUBE allait devoir s'adapter à toute taille de turbo et simuler des conditions de lubrification à froid comme en surchauffe (jusqu'à 150°C). Il est à noter qu'un turbo en fonctionnement chauffe l'huile qui le lubrifie de par l'exposition aux hautes températures des gaz d'échappement.

Pour parvenir à cela, le TC-LUBE est équipé des composants suivants, permettant la mise sous pression, le chauffage et le refroidissement de l'huile turbo.

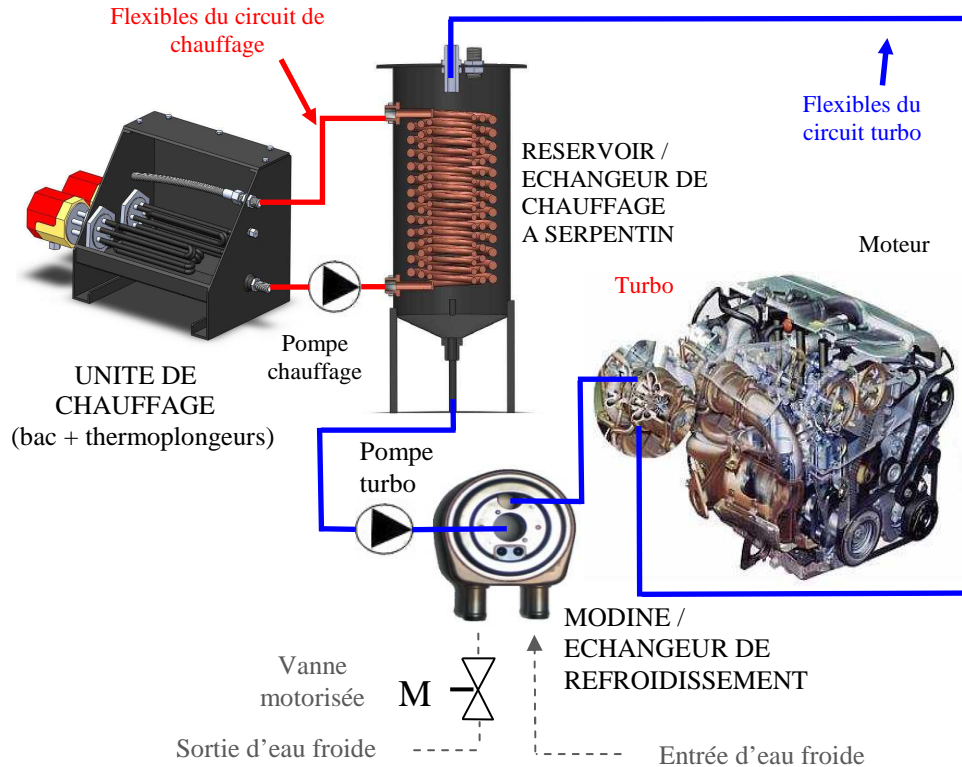


Figure 9 : le dispositif de mise sous pression et à température de l'huile turbo

La circulation et la mise sous pression de l'huile du turbo sont assurées par la pompe turbo, et cette huile peut être :

- chauffée lors de son passage dans le réservoir par contact avec le serpentin dans lequel circule, grâce à la pompe de chauffage, de l'huile thermique, elle-même chauffée par l'unité de chauffage (bac contenant des thermoplongeurs : résistances chauffantes immergées dans un bain d'huile).
- refroidie lors de son passage dans la modine (échangeur de refroidissement), dans laquelle circule de l'eau froide venant d'un circuit extérieur et dont le débit est contrôlé par la vanne motorisée.

Ce système indirect de chauffage, via l'échangeur, de l'huile turbo a été choisi car il représentait le moyen le plus économique et le plus simple de

chauffer l'huile sans la dégrader. En effet, si elle était chauffée par un contact direct avec les thermoplongeurs - dont la température en surface dépasse allègrement les 250°C - elle brûlerait et il s'y formerait des résidus solides abrasifs qu'il est inacceptable d'envoyer au turbo.

Les déperditions calorifiques de tous les composants, y compris les flexibles, ont été calculées afin de chiffrer le besoin de puissance de chauffage pour atteindre la température maximale d'huile turbo voulue de 150°C dans toutes les configurations du système (avec présence de la chambre TLA lors des mesures d'usure), et donc de choisir les thermoplongeurs et de dimensionner le serpentín du réservoir / échangeur.

Ce dernier constitue la pièce maîtresse du TC-LUBE et assure différentes fonctions :

1. Le serpentín constituant l'échangeur assure bien entendu le transfert de chaleur entre l'huile thermique et l'huile turbo et permet à cette dernière d'atteindre les 150°C souhaités lorsque les thermoplongeurs sont à pleine puissance et la pompe de chauffage à plein débit. Il est constitué de trois tuyaux de cuivre enroulés en spirales concentriques et reliés en parallèle : cette architecture a été choisie pour sa simplicité de réalisation et pour limiter la vitesse de l'huile thermique à l'intérieur des tuyaux afin d'éviter tout problème d'érosion.
2. Pour la bonne réalisation des mesures d'usure et de consommation, un minimum d'activité par unité de volume est nécessaire afin que les détecteurs puissent fournir des résultats fiables. Mais d'un autre côté, une activité importante est nocive pour la santé. Le réservoir a donc été conçu pour minimiser le volume d'huile turbo, de façon à trouver un bon compromis entre ces deux points.
3. Enfin, nous avons vu que si le « manque » d'étanchéité des segments peut engendrer le passage d'huile vers les volutes dans des zones où celle-ci est en surpression par rapport aux gaz, il peut se produire le phénomène inverse côté turbine. Ainsi, les gaz d'échappement dans la volute de la turbine, en surpression par rapport au circuit d'huile turbo,

viennent s'y dissoudre. En immobilisant l'huile suffisamment longtemps lors de son passage, le réservoir lui permet de dégazer pour garder une lubrification efficace du turbo. Le couvercle du réservoir est équipé d'un raccord-cheminée pour l'évacuation des gaz, qui peuvent être renvoyés vers le carter comme c'est le cas pour une lubrification classique.

En ce qui concerne la modine, différents modèles peuvent être utilisés selon la puissance de refroidissement voulue (fonction du type d'essais à réaliser et de la puissance calorifique apportée par le turbo à l'huile lors de ces essais).

Les pompes utilisées sont des pompes volumétriques à engrenages. Chacune est entraînée par un moteur asynchrone supportant le corps de pompe.

4.2. La machine « TC-LUBE »

Tous ces composants sont rassemblés sur un chariot, formant ainsi le TC-LUBE.

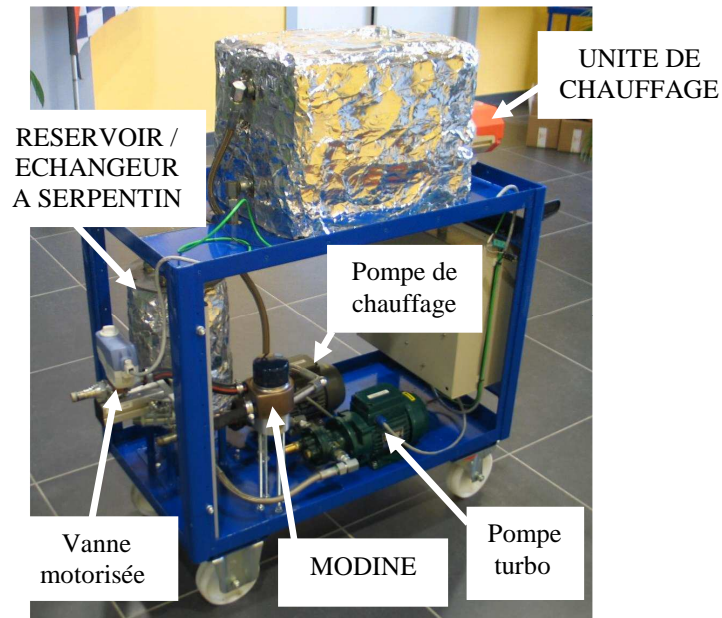


Figure 10 : vue de profil avant du chariot (version prototype)

Le retour d'huile du turbo vers le réservoir ne doit générer qu'un minimum de pertes de charge afin d'éviter de mettre le turbo en surpression, ce qui risquerait de l'abîmer. C'est la raison pour laquelle le réservoir est installé au niveau bas du chariot : le retour d'huile se fait ainsi en descente, selon un écoulement naturel, comme sur un vrai moteur où l'huile retourne vers le carter en dessous du turbo. L'entrée d'huile au niveau du turbo est également équipée d'un limiteur de pression avec retour d'huile vers le réservoir afin de protéger le turbo.

Les pompes de chauffage et turbo, devant aspirer l'huile respectivement du bac et du réservoir, ont également été installées au niveau inférieur, sous ceux-ci, afin d'éviter tout problème de cavitation.

La modine est surmontée d'un filtre à huile destiné à protéger le turbo.

Le bac a lui été disposé au niveau supérieur, ce qui facilite son remplissage. Lui et le réservoir sont entourés d'isolant thermique afin de diminuer la consommation énergétique du TC-LUBE.

A l'arrière du chariot se trouve le coffret électrique dans lequel sont rassemblés tous les composants permettant le fonctionnement de la machine.



Figure 11 : vue de profil arrière du chariot (version commercialisée)

Toutes les commandes sont disposées sur la porte du coffret, ce qui évite de devoir l'ouvrir pour contrôler le TC-LUBE (mises en marche et arrêts des pompes, changements des consignes de température,...).

Le coffret comprend les variateurs de fréquence de commande des pompes, les composants de commande tout ou rien (TOR) des thermoplongeurs ainsi que les protections (disjoncteurs).



Figure 12 : l'intérieur du coffret électrique

4.3. L'accouplement du TC-LUBE au turbo

L'accouplement du TC-LUBE au turbo est réalisé en cellule d'essais.

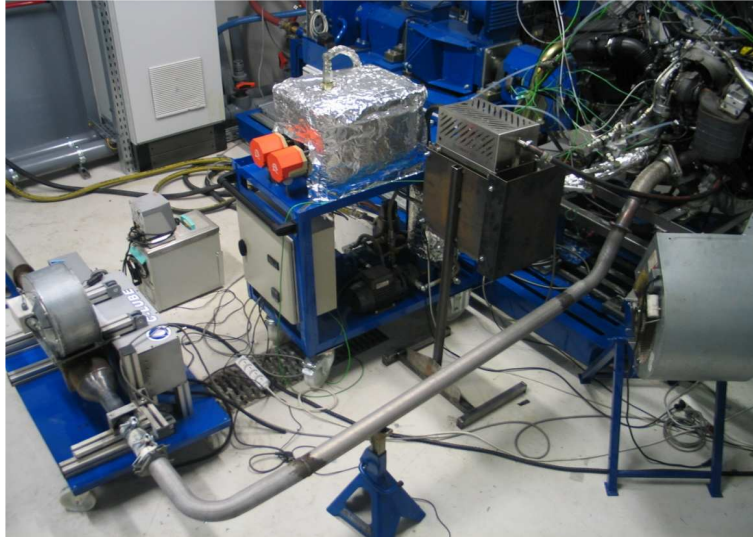


Figure 13 : le TC-LUBE dans la cellule lors d'une mesure de consommation d'huile

Avec la disposition suivante :

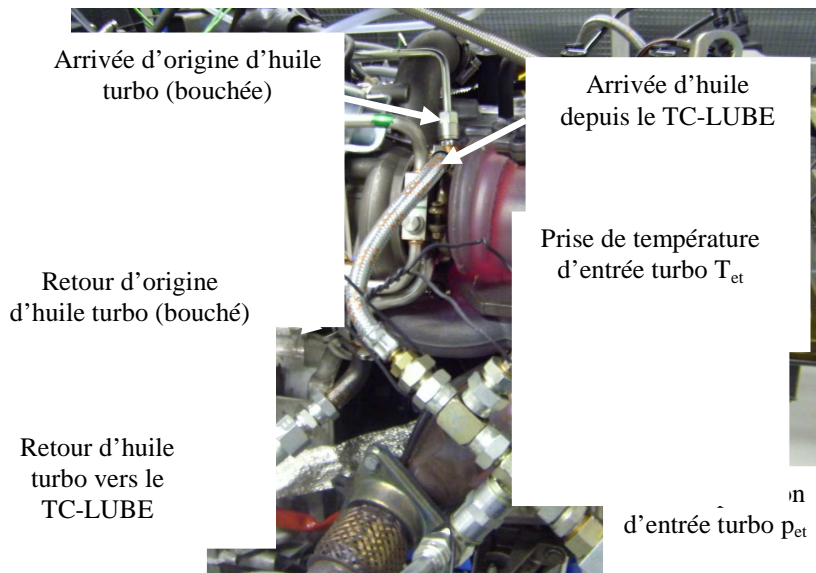


Figure 14 : l'accouplement du TC-LU

4.4. L'automatisation du TC-LUBE

- L'asservissement de pression d'huile :

Au préalable, des essais sont réalisés sur le moteur non accouplé au TC-LUBE afin de repérer dans le circuit d'huile une pression d'huile p_c pratiquement identique à la pression d'entrée turbo p_{et} . Une fois le système accouplé, c'est cette pression p_c qui sert de consigne de pression d'entrée du turbo p_{et} . Le schéma d'asservissement de pression est le suivant :

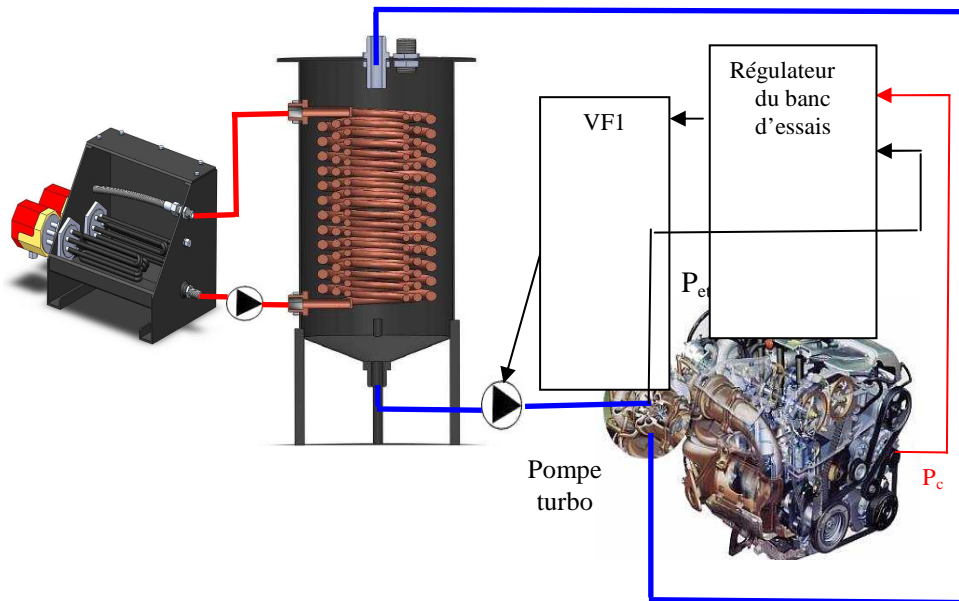


Figure 15 : l'asservissement de la pression d'huile turbo

Le régulateur du banc relève la pression d'entrée turbo (p_{et}) et la compare à la pression de consigne (p_c). En fonction du résultat, il joue sur le régime de la pompe turbo via le variateur de fréquence VF1, afin de mettre sous pression l'entrée du turbo et d'égaliser p_{et} à p_c avec des écarts inférieurs à 5% en phases stabilisées.

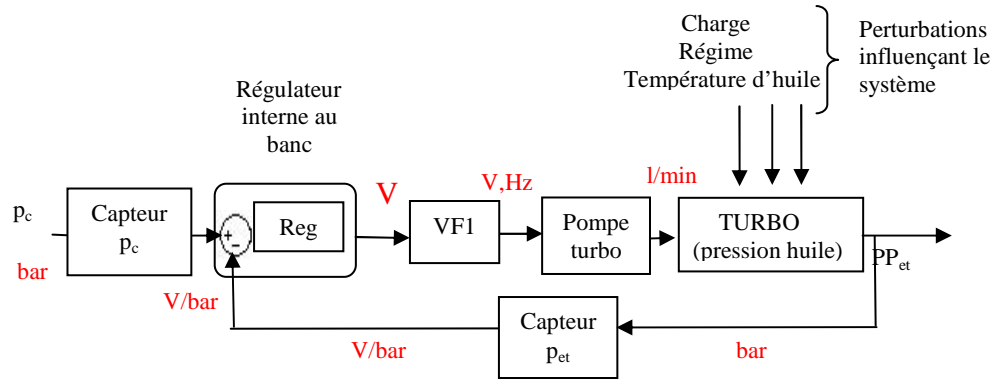


Figure 16 : le schéma fonctionnel de l'asservissement de la pression d'huile turbo

- La régulation de température d'huile :

Un thermocouple capte la température d'entrée du turbo T_{et} et la communique au régulateur (équipé d'un réglage de consigne) à deux sorties qui est intégré au TC-LUBE.

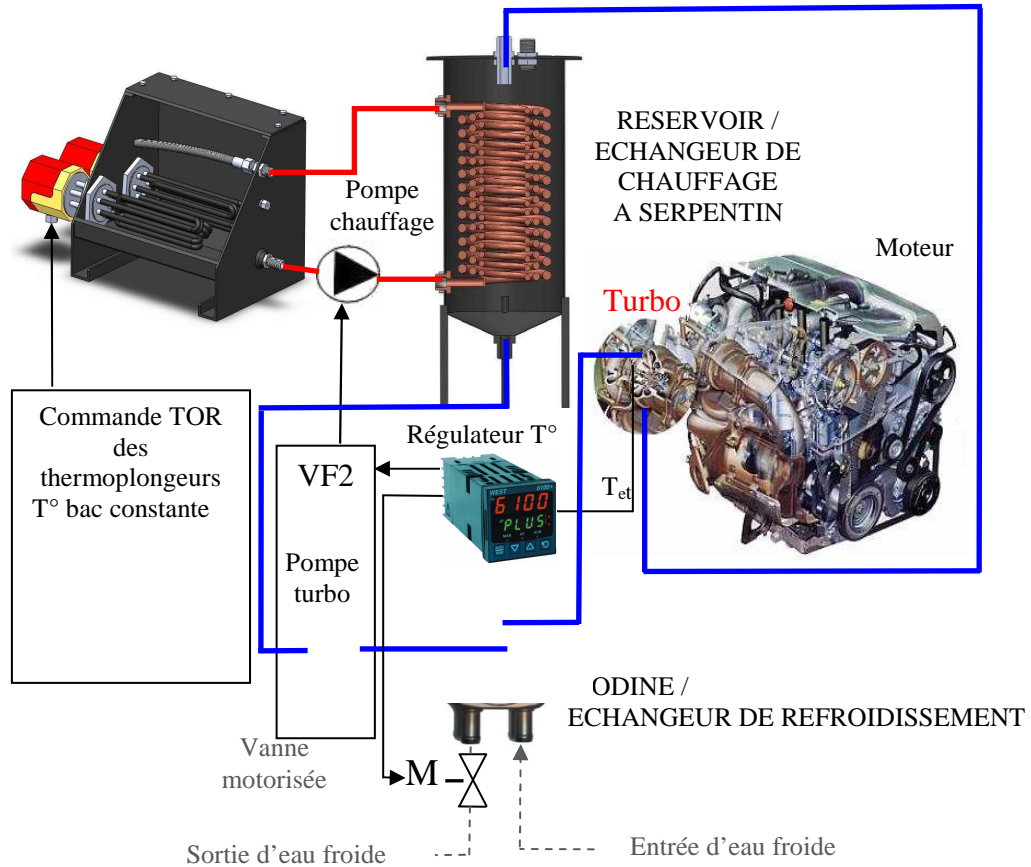


Figure 17 : la régulation de température d'huile turbo

En fonction de la comparaison entre la consigne entrée T_c et la valeur de température mesurée T_{et} , le régulateur commande :

- Soit le réchauffage de l'huile turbo en commandant le variateur de fréquence VF2, jouant ainsi sur le débit de la pompe de chauffage, et donc sur la puissance calorifique apportée par l'échangeur à serpentin à l'huile turbo.

- Soit le refroidissement de l'huile turbo en commandant la vanne motorisée, faisant ainsi varier le débit d'eau froide dans la modine, et donc la puissance calorifique prélevée à l'huile turbo.

Ce dispositif permet d'atteindre la température de consigne d'huile turbo avec une précision inférieure à $0,2^{\circ}\text{C}$ en phases stabilisées.

Schéma fonctionnel de la régulation de température :

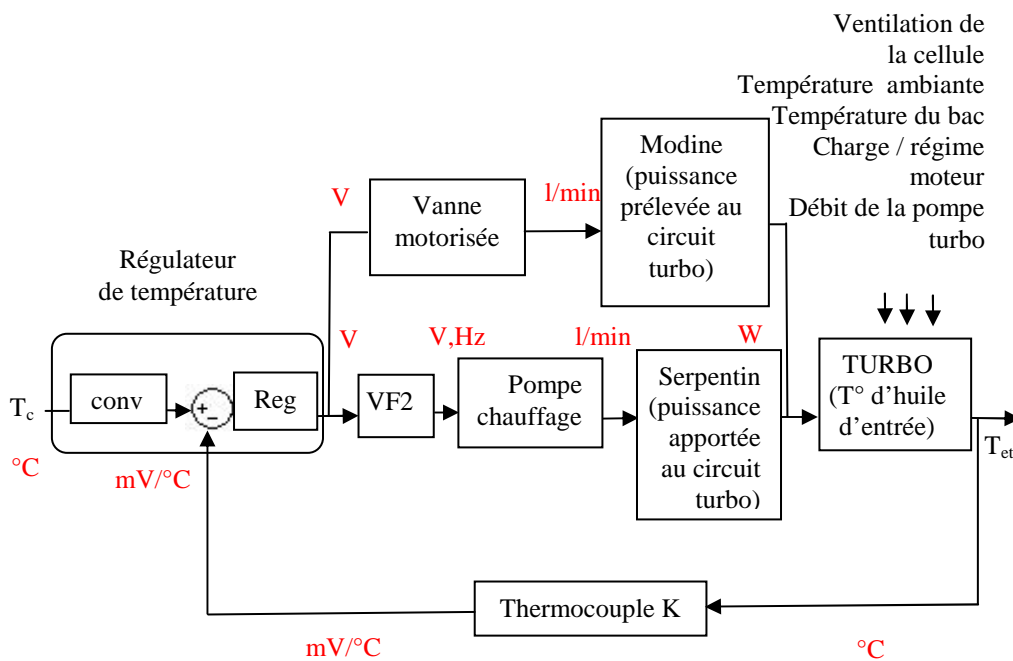


Figure 18 : le schéma fonctionnel de la régulation de température d'huile turbo

5. Conclusion

Avec déjà de nombreuses heures passées en cellules d'essais et de petits perfectionnements apportés au fur et à mesure, le TC-LUBE se révèle aujourd'hui comme une machine fiable et performante.

Deux exemplaires ont déjà été construits : le prototype, qui reste chez DSI pour des essais moteurs en interne et des locations occasionnelles, ainsi qu'un second exemplaire, vendu à un développeur de lubrifiants.

DSi assure à présent la promotion du TC-LUBE, au même titre que pour les autres équipements : les échos lors des locations ainsi que lors des salons démontrent un intérêt certain pour cette machine, ce qui devrait mener à la production de nouveaux exemplaires dans le futur.

6. Sources

[1] DSi, *INNOVATIVE TOOLS TO SPEED UP YOUR RESEARCH & DEVELOPMENT (ENGINES, LUBRICANTS, AFTER-TREATMENT SYSTEMS, DEVELOPMENT & TESTING*, « Test center for engines & lubricants », « Oil Consumption », « Wear Measurement (TLA) », DSi sprl, Tournai, 2007.

[2] HENNEBERT B., *CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME DE LUBRIFICATION INDEPENDANT POUR TURBOS : LE « TC-LUBE »*, pp.7 à 8, pp. 11 à 12, pp. 18 à 24, pp. 104 à 108, pp. 110 à 114, Tournai, 2010.

[3] *FLAT 4 EVER*, schéma du turbo, page consultée en 2010
<http://www.flat4ever.com/technologie-moteurs-turbo-part-t31234.html>

[4] *Renault*, la technologie CAMLESS, page consultée en 2010,
<http://www.planeterenault.com/car-5018-Renault+La+technologie+CAMLESS.html>