

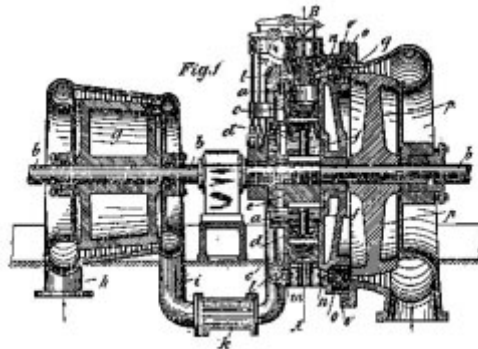
Le turbocompresseur et le turbo-compound

Les turbocompresseurs sont des compresseurs dynamiques entraînés par une turbine à gaz d'échappement. Plusieurs variantes de turbo-suralimentation ont été développées, dans un premier temps pour les moteurs d'aviation et marins et aussi, depuis quelques décennies, pour les moteurs automobiles: pression constante, impulsion, suralimentation à deux étages régulée ou non, régulation par soupape de décharge et turbo séquentiel. Les turbines récupèrent une fraction de l'énergie perdue dans l'échappement et sont un moyen pratique pour l'entraînement d'un compresseur dynamique à grande vitesse. De plus, la turbine peut être reliée au vilebrequin et transmettre la puissance grâce à la technique appelée " turbo-compound "

Introduction

Les bases du turbocompresseur sont présentées dans le dossier [la suralimentation](#). Ce dossier rentre plus en détail dans cette technologie et analyse les différents concepts du turbo-compound.

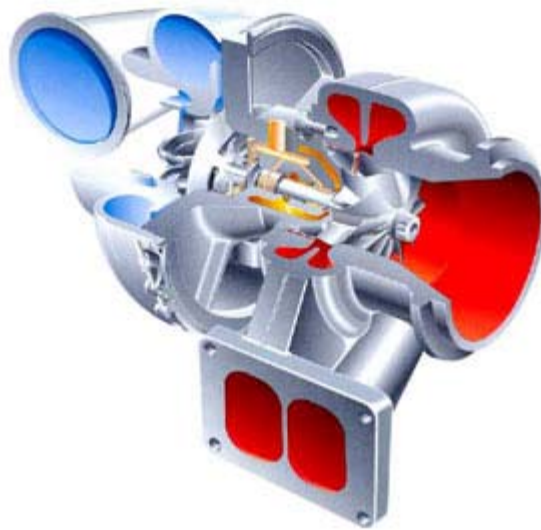
Plus de 35% de l'énergie libérée par la combustion du carburant est perdu dans l'échappement. Entre 1909 et 1915, Alfred Büchi a développé le premier turbocompresseur (ci-dessous) lorsqu'il était ingénieur responsable du développement des Diesel chez Sulzer à Winterthur, Suisse. Un de ses objectifs était la récupération partielle de cette énergie.



Les avantages de ce système en altitude par rapport à la suralimentation à entraînement mécanique (compresseur entraîné par le vilebrequin, dossier à venir) ont rapidement été reconnus de sorte que, en 1917, Auguste Rateau l'ait adapté à un moteur d'avion. Même si les aciers résistants aux températures élevées des gaz d'échappement générés par les moteurs à essence (supérieur à 950°C) n'étaient pas encore disponibles, dès 1939 les bombardiers B17 ont été équipés de turbocompresseurs General Electric, grâce à une soufflerie d'air froid sur la turbine.

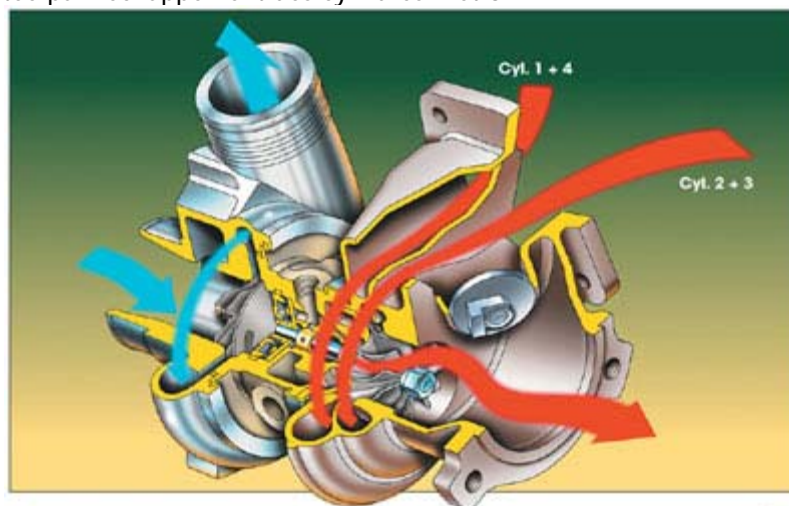
Dans cette même période, la "turbo-suralimentation" (telle qu'elle était alors appelée) a été testée sur les moteurs Diesel marins. Depuis cette date, les progrès accomplis sont tellement considérables qu'un moteur Diesel moderne n'est plus envisageable sans turbocompresseur. La pression moyenne effective des moteurs Diesel et à essence peut être multipliée par 2, 3, voire par 4 et certains moteurs turbo essence de compétition ont atteint des puissances de 670 kW (900 ch) par litre de cylindrée.

Le système twin scroll



Certains turbocompresseurs ont une volute de turbine à double entrée afin d'éviter les interférences entre les cylindres et mieux utiliser les ondes de pression du collecteur d'échappement. Les collecteurs d'échappements des moteurs 4 cylindres et 6 en ligne sont ainsi séparés en deux entrées.

Sur un moteur 4 cylindres en ligne, quand la soupape d'échappement du cylindre N° 3 s'ouvre, le cylindre N° 1 est pratiquement à la fin de son cycle d'échappement. Si les deux cylindres partageaient une tubulure commune, une contre-pression peut venir perturber le processus d'échappement du cylindre N°1. Avec un turbo Twin scroll, une entrée reçoit les gaz des cylindres 1 et 4 tandis que l'autre est alimentée par l'échappement des cylindres 2 et 3.



Turbine à double entrée
Twin scroll turbo



Turbocompresseur Twin scroll sur moteur Renault

[Cliquer pour agrandir](#)

Le même principe est utilisé sur les 6 cylindres en ligne, les échappements des 3 premiers cylindres et des 3 autres ayant chacun sa volute.

Sur les moteurs en V, deux turbocompresseurs sont souvent utilisés en parallèle, c.-à-d. un pour chaque rangée de cylindres. Comme deux petits turbocompresseurs ont moins d'inertie en rotation qu'un seul de plus grande taille, le temps de réponse est ainsi raccourci.

Le turbocompresseur séquentiel

Un turbocompresseur de grande dimension est nécessaire pour qu'un moteur délivre une puissance élevée. Cependant, pour une forte pression de suralimentation à bas régime, la turbine et le compresseur doivent être de petite taille.

Si le moteur est alimenté par deux turbocompresseurs en parallèle, un compromis peut être évité en orientant l'échappement de tous les cylindres vers seulement un seul turbocompresseur et en fermant l'autre par des volets dans les conduits d'échappement et d'admission en fonctionnement à bas régime.

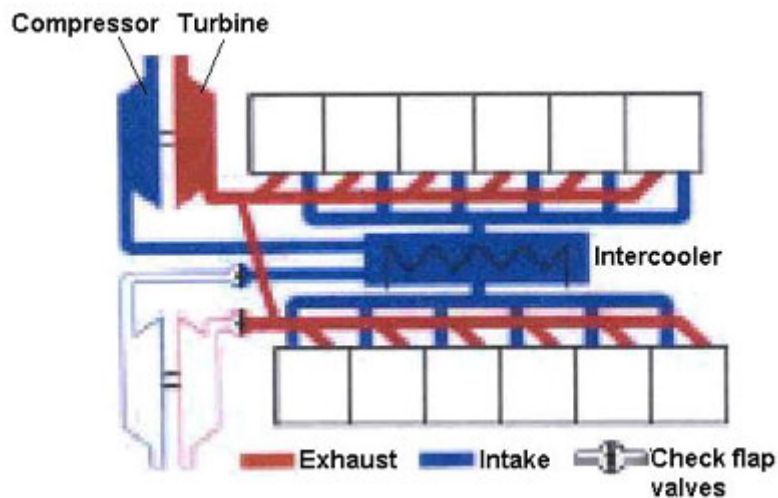
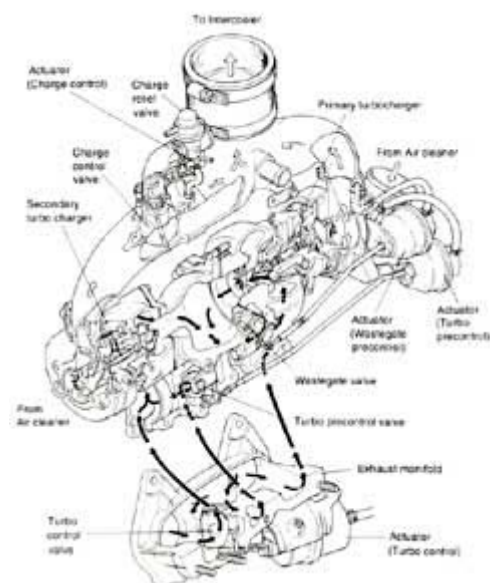


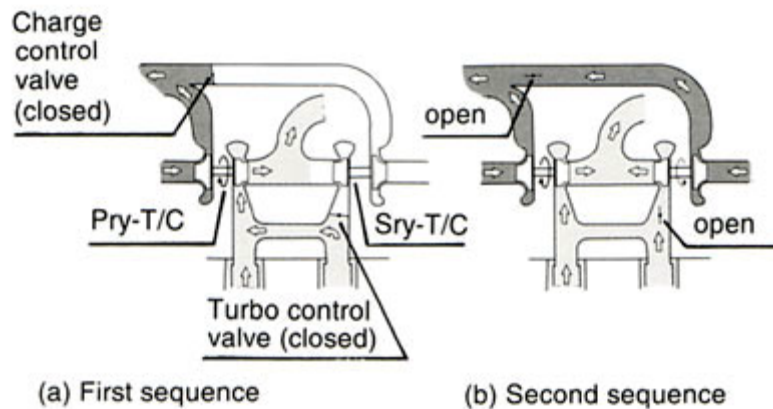
Image Colt-Pielstick

Le système turbocompresseur séquentiel est en grande partie employé sur les Diesel marins, mais Toyota (Supra), Mazda (RX7) et Porsche (959) semblent avoir été les seuls constructeurs de véhicules à moteur à le commercialiser. L'avantage d'une telle installation est l'élargissement de la plage de fonctionnement de la turbo-suralimentation. À faible régime, un seul turbocompresseur est en fonction, les conduits d'admission et d'échappement du second sont fermés par des volets.

Par exemple, le système Mazda utilise un petit turbocompresseur avec une roue de turbine de 51 millimètres de diamètre jusqu'à un régime moteur de 1500 t/mn. Au-delà de ce régime, la quantité des gaz d'échappement devient suffisante et les volets ouvrent les conduits d'un plus grand turbocompresseur, d'une roue de turbine de 58 millimètres de diamètre. Les deux turbocompresseurs sont ainsi actionnés en parallèle. Ce système séquentiel a été employé à partir de 1986 sur la 3ème version du moteur rotatif 13B de la Mazda RX7 afin d'améliorer la plage de fonctionnement relativement étroite des turbocompresseurs des années 80.



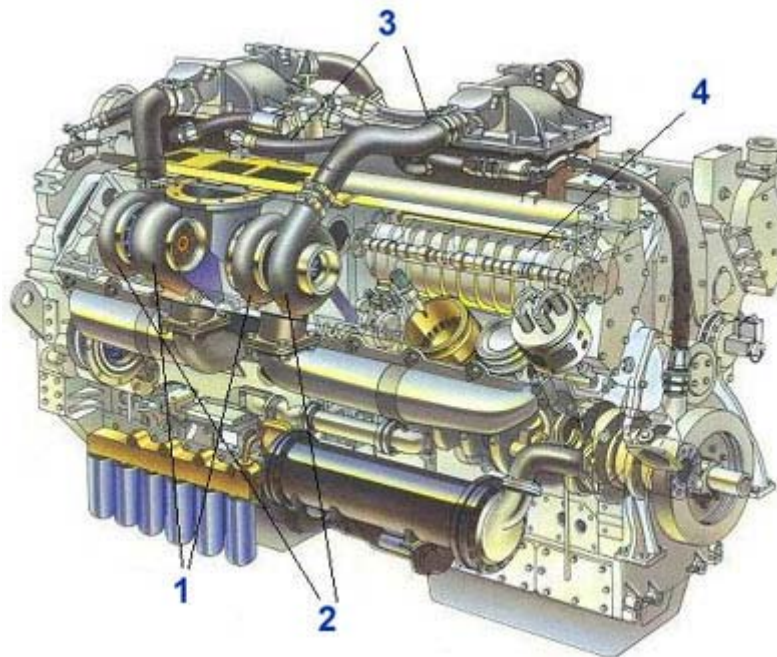
Basic mechanism of Sequential twin turbocharger



Le moteur 2,85 litres de 336 kW (450 ch) de la Porsche 959 a également utilisé un turbocompresseur séquentiel: <http://users.compaqnet.be/.../p959uk.html>

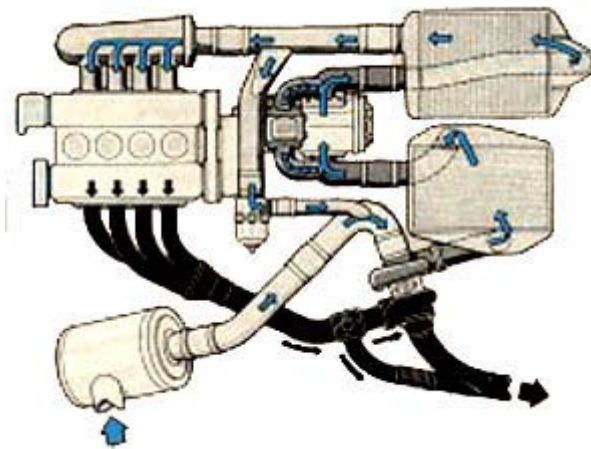
La suralimentation à deux étages (1/2)

Deux compresseurs peuvent être placés en série pour une pression de suralimentation et une puissance spécifique plus élevées, de même que pour améliorer le couple à très bas régime. Sur certains moteurs, un turbocompresseur souffle dans un compresseur mécanique. Cela a été le cas pour plusieurs moteurs d'avion à partir de la deuxième guerre mondiale et pour quelques Detroit Diesel 2 temps, par exemple. Le Detroit Diesel TI 16V 149 2 temps de 39 litres ci-dessous est alimenté par 4 turbocompresseurs en parallèle mais travaillant en série avec deux compresseurs volumétriques Roots. A faible charge, les compresseurs volumétriques sont court-circuités.



1 - Turbines, 2 - Compresseurs, 3 - Intercoolers, 4 - Compresseur Roots

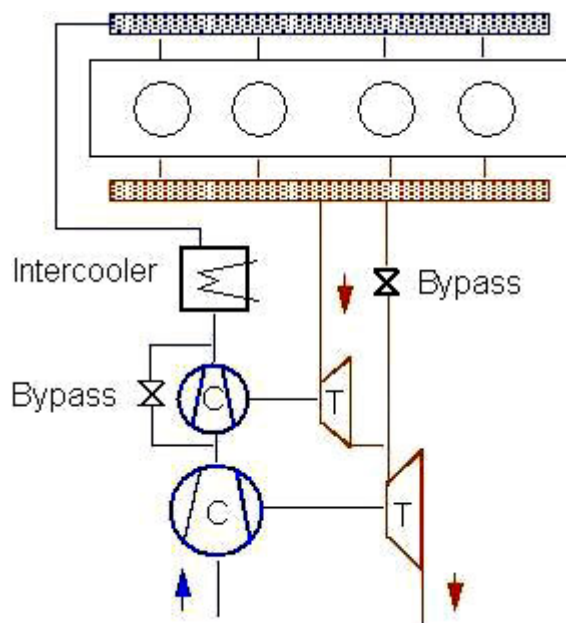
Lancia a aussi utilisé un tel montage avec un intercooler et un post-refroidisseur sur une Delta Integrale S4 de compétition (image ci-dessous). Le moteur de 1759 cm³ fournissait pas moins de 300 kW (400 ch) à 8000 t/mn.



La suralimentation à deux étages (2/2)

Les turbocompresseurs peuvent également être montés en série pour augmenter la pression de suralimentation. Cela a été réalisé sur quelques Diesel marins à puissance spécifique élevée, avec intercooler et post-refroidisseur, prévus pour propulser des hydrofoils, des bateaux rapides militaires et des sous-marins.

BorgWarner a développé, pour une utilisation automobile, un système de turbo-compression régulé à deux étages fonctionnant en combinaison avec un équipement à commande séquentielle. C'est un système différent de celui présenté précédemment à un seul étage, quelles que soient les conditions de fonctionnement.



À bas régime moteur, tant que le débit massique des gaz d'échappement reste faible, les clapets de dérivation restent complètement fermés et les gaz d'échappement sont orientés vers la petite turbine haute pression du 2ème étage. Le résultat est une élévation rapide et forte de la pression de suralimentation. Au fur et à mesure que le régime moteur augmente, les gaz sont progressivement orientés vers la plus grande turbine du 1re étage en ouvrant graduellement les clapets de dérivation.

Voir le très intéressant site internet: www.3k-warner.de/en/products/t_r2s.asp



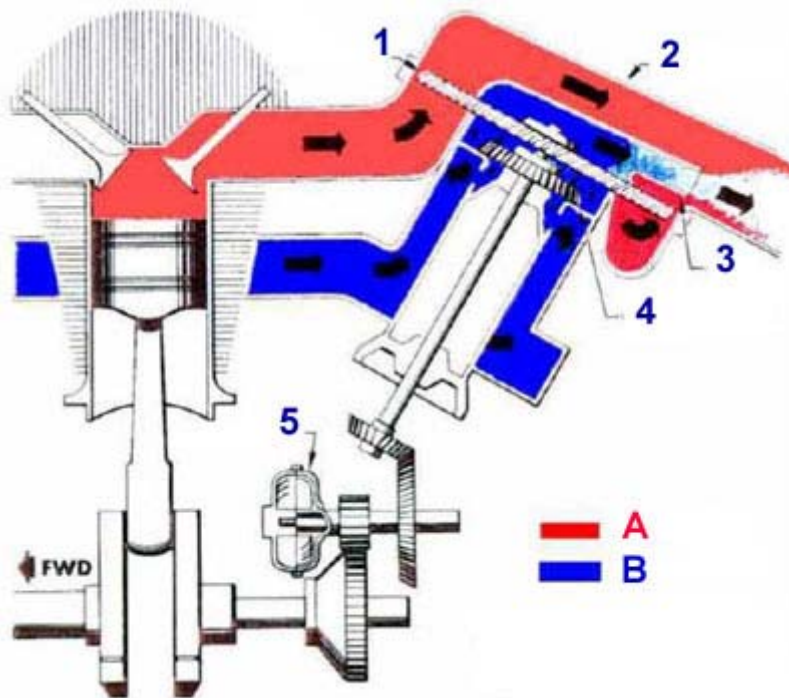
Moteur SSCM pour char AMX 40 exposé au Musée de Saumur (France): 12 cylindres, 970 kW (1300 ch)

Le turbo-compound mécanique (1/4)

Dans son édition de décembre 1941, la revue technique de Sulzer publia les performances obtenues avec un Diesel turbo-compound à pistons opposés, le 4 ZGA 19, dont la consommation spécifique de carburant était de 212 g/kW.h et son rendement nominal de 1020 kilowatts. Les grands et modernes 6 G 18 ont suivi, mais ces expériences se sont terminées peu après la seconde guerre mondiale en raison d'un manque de personnel. La turbine d'échappement de ces moteurs était reliée au vilebrequin, permettant la récupération d'une partie de la puissance perdue.

Puis, en 1953, le moteur Wright Turbocyclone à double rangés de 18 cylindres radiaux entra en service régulier sur la Superbe-Constellation et le DC 7. Cette version du Cyclone R-3350 a été améliorée par l'adjonction de 3 turbines d'échappement qui transmettaient leur puissance au vilebrequin par l'intermédiaire d'une double transmission à pignons et d'un accouplement hydraulique additionnel absorbant les vibrations de torsion. La consommation spécifique de carburant est passée de 282 à 231 g/kW.h, la puissance en altitude a été augmentée, de même que celle du décollage qui est passé de 2015 à 2460 kilowatts à 2900 t/mn.

Turbine de récupération de puissance Power Recovery Turbine (PRT)

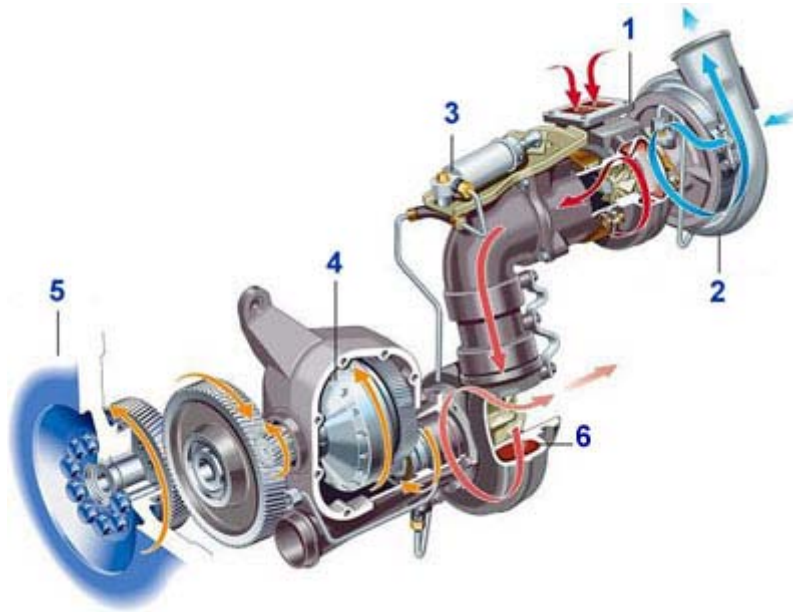


- 1 - Turbine **A** - **GAZ DECHAPPEMENT**
- 2 - Capot de turbine **B** - **AIR DE REFROIDISSEMENT**
- 3 - Obturateur de refroidissement
- 4 - Roue à aube de refroidissement
- 5 - Accouplement hydraulique

Les turbo-compounds commencent à apparaître sur le marché du poids-lourd. Une deuxième turbine est installée en série après la turbine du turbocompresseur, comme dans le cas de la turbosuralimentation à 2 étages, mais au lieu d'entraîner un compresseur, cette deuxième turbine est reliée au vilebrequin.

Une économie de carburant d'environ 3% est annoncée, ce qui semble bien marginal comparé au 22% obtenu par le Cyclone, mais reste néanmoins intéressant. Il apporte une nette amélioration de la puissance et du couple à bas régime, de même qu'une réduction du bruit de fonctionnement. Les constructeurs Caterpillar, Cummins, Komatsu et autres ont aussi annoncé des réductions de la consommation spécifique de carburant de plus de 5% sur des moteurs Diesel prototypes semblables.

Le turbo-compound mécanique (2/4)



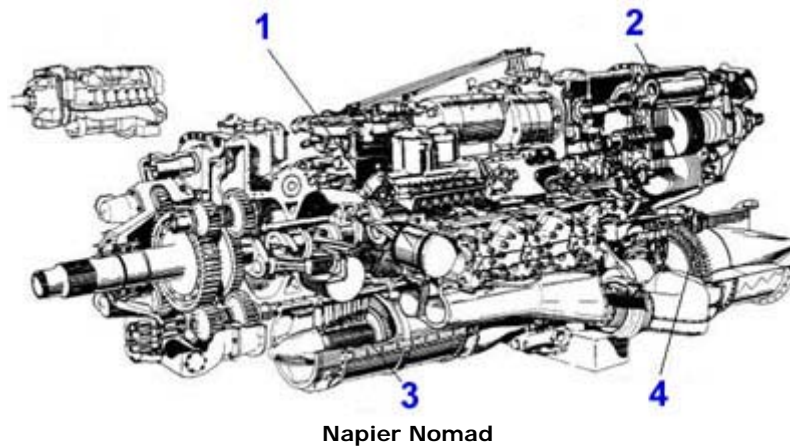
Turbo-compound mécanique sur moteur Scania 12 litres 6 cylindres en ligne 350 kW (470 ch)

- 1 - Turbocompresseur avec volute de turbine twin scroll
- 2 - Compresseur
- 3 - Actionneur de frein d'échappement
- 4 - Accouplement Hydrodynamique
- 5 - Volant moteur
- 6 - Turbo-compound

Seulement 1500 unités du premier moteur turbo-compound lancé sur le marché par Scania (DTC 11) ont été commercialisées entre 1991 et 1997. Le constructeur a reconnu avoir rencontré quelques problèmes techniques avec l'équipement d'injection électronique de carburant (EDC). Les plus récents 6 cylindres de 12 litres de Scania et de Volvo semblent promis à un meilleur avenir. Leurs deux turbines en série ont été sélectionnées pour améliorer la plage du régime d'utilisation du moteur et le confort de conduite. La turbine du turbo-compounds du moteur Volvo est du type axial et est située en ligne avec la 1ère turbine entraînant le compresseur, évitant ainsi le recours à une tubulure coudée.

En dessous d'approximativement 20% de charge, la turbine compound n'est pas opérationnelle; ces moteurs donnent donc leur meilleur sous fortes charges, quand la température et la pression des gaz d'échappement sont élevées.

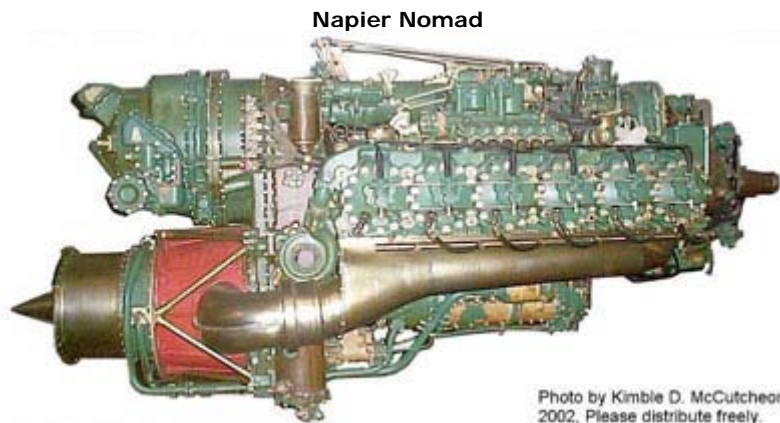
Le turbo-compound mécanique (3/4)



- 1 - Diesel 2 temps à 12 cylindres opposés
- 2 - Transmission CVT Beier
- 3 - Compresseur axial
- 4 - Turbine axiale

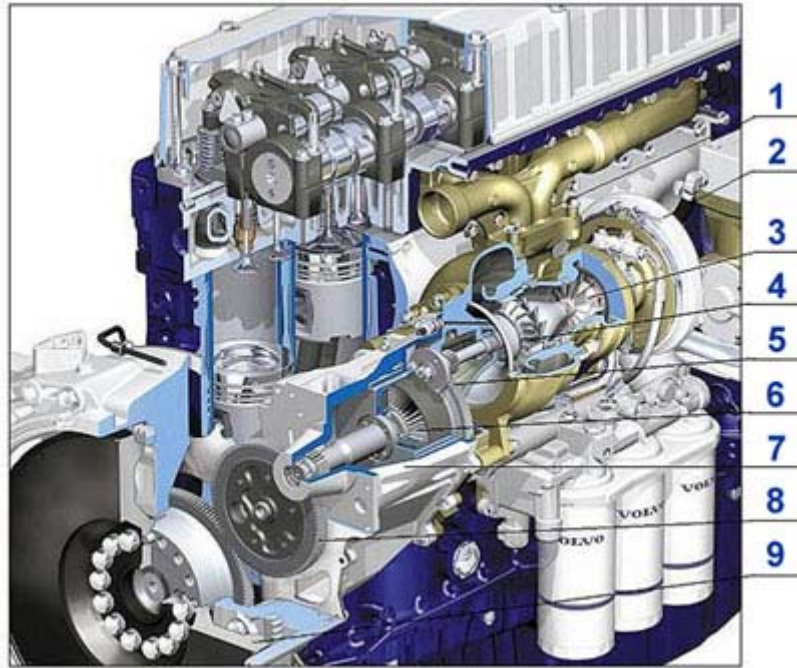
A haut régime moteur, une bonne turbine d'échappement développe plus de puissance que nécessaire pour comprimer la charge d'air. Par contre, à faible régime du vilebrequin, la situation opposée se produit. En conséquence, il est souhaitable de placer un type de transmission permettant un libre transfert de puissance entre le moteur et son turbocompresseur.

C'est ce qui a été fait en 1954 quand la société Napier a développé un Diesel 2 temps turbo-compound, le Nomad - qui n'a jamais été produit en raison de la concurrence des premiers turboréacteurs et de leur carburant alors bon marché. La solution Nomad était d'installer l'ensemble de la turbo-machine axiale sur le même axe et de le relier au vilebrequin par une transmission variable continue Beier.



Le turbo-compound mécanique (4/4)

Avec un tel concept, le vilebrequin peut fournir de la puissance à la turbine qui génère immédiatement de la pression de suralimentation pendant les charges de transition et à bas régime, alors qu'à régime et charge élevés, un excès significatif de puissance de la turbine peut être récupérée. Au moyen d'un variateur toroïdal, il apporterait une amélioration relativement facile au moteur de camion Volvo D12D de 370 kilowatts, car sa turbine compound axiale est sur le même axe que le turbocompresseur, et sa rotation est indépendante.



Volvo D12D Turbo-compound

- 1 - Admission de la turbine Twin scroll
- 2 - Compresseur centrifuge
- 3 - Turbine radiale du turbocompresseur
- 4 - Turbo-compound axial
- 5 - Réducteur
- 6 - Accouplement hydraulique
- 7 - Carter à moitié vide
- 8 - Réducteur final
- 9 - Volant moteur

Le turbo-compound électrique

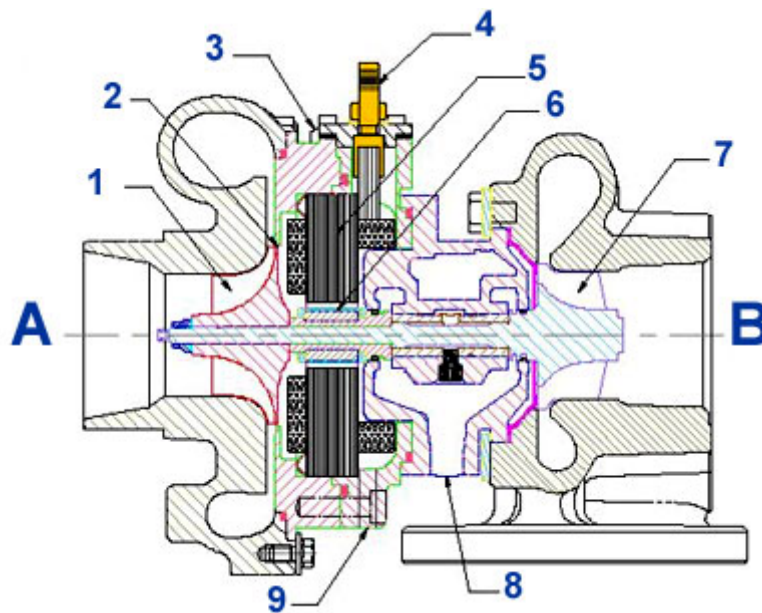


Les transmissions mécaniques à variation continue étant plutôt complexes et un rapport de réduction élevé étant nécessaire, des systèmes intégrant un petit moteur-générateur électrique à grande vitesse, couplé directement à l'axe d'un turbocompresseur, sont en cours de développement et devraient être bientôt lancés sur le marché, peut-être en 2005.

Par contre, la puissance requise pour utiliser tout le potentiel du turbocompresseur oblige les ingénieurs à développer ce moteur-générateur sous 42 volts, tension qui tarde à être appliquée dans l'automobile.



Turbocompresseur à assistance électrique Garrett



Système intelligent de suralimentation e-TurboTM, Garrett

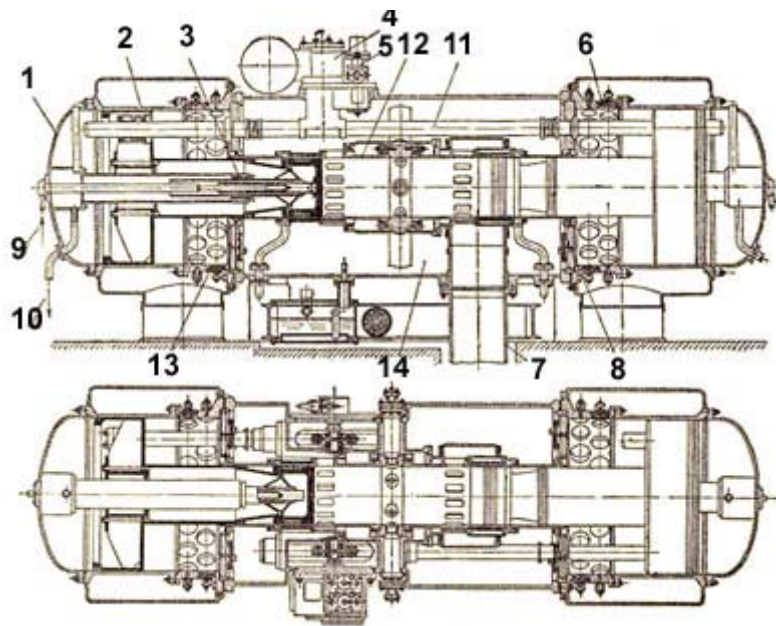
- 1 - Compresseur centrifuge
- 2 - Passage d'air de refroidissement
- 3 - Connexion au capteur de vitesse
- 4 - Branchement de puissance (3)
- 5 - Ensemble stator moteur/générateur
- 6 - Ensemble rotor à aimant permanent
- 7 - Turbine
- 8 - Entrée et sortie d'huile
- 9 - Sortie d'air de refroidissement (retour à l'admission)

A - ADMISSION D'AIR
B - SORTIE
ECHAPPEMENT

Une réduction de consommation de carburant de plus de 10% à 1800 t/mn entre 75% et 100% de charge a été obtenue par Caterpillar sur un moteur de camion. Voir :

- http://www.orau.gov/DEER/presentations/session4/12.%20Algrain_DEER_03.pdf
- <http://www.orau.gov/deer/DEER2002/Session8/Hopmann.pdf>
- <http://www.osti.gov/fcvt/deer2001/gerke.pdf>

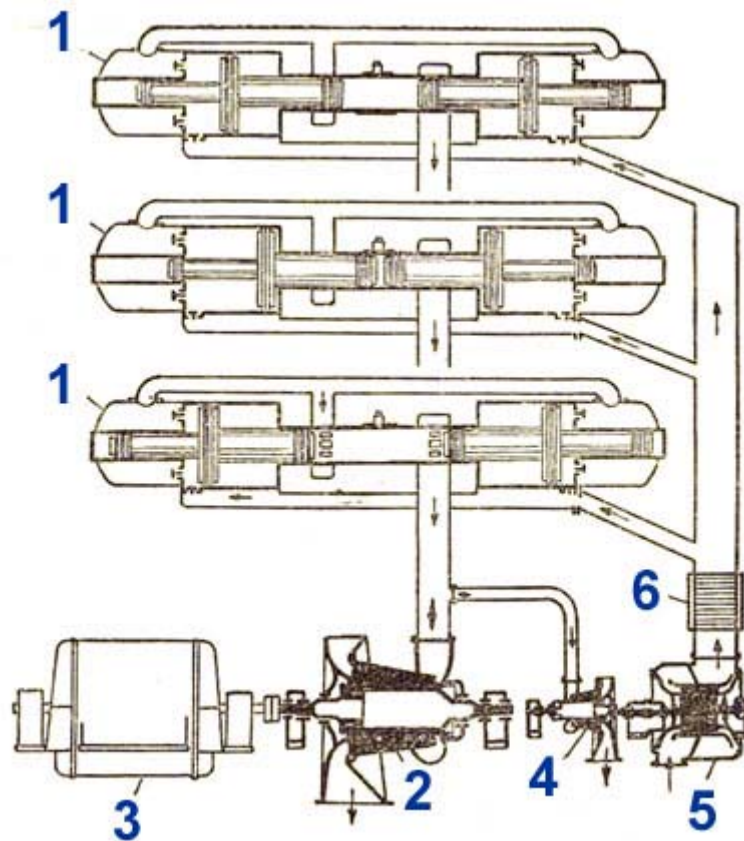
Les générateurs à gaz et le turbo-compound différentiel (1/2)



Générateur à gaz à pistons libres

- | | |
|--|---|
| 1 - Culasses d'amortissement | 8 - Soupapes de sortie du compresseur |
| 2 - Cylindres de compression | 9 - Entrée de l'huile de refroidissement des pistons |
| 3 - Joints du système de refroidissement des pistons | 10 - Sortie de l'huile de refroidissement des pistons |
| 4 - Unité de démarrage | 11 - Conduit d'air d'aération |
| 5 - Régulateur de pression des cylindres d'amortissement | 12 - Cylindre refroidi par eau |
| 6 - Soupapes d'admission du compresseur | 13 - Soupapes de sortie du compresseur |
| 7 - Echappement vers la turbine | 14. chambre d'évacuation de l'air |

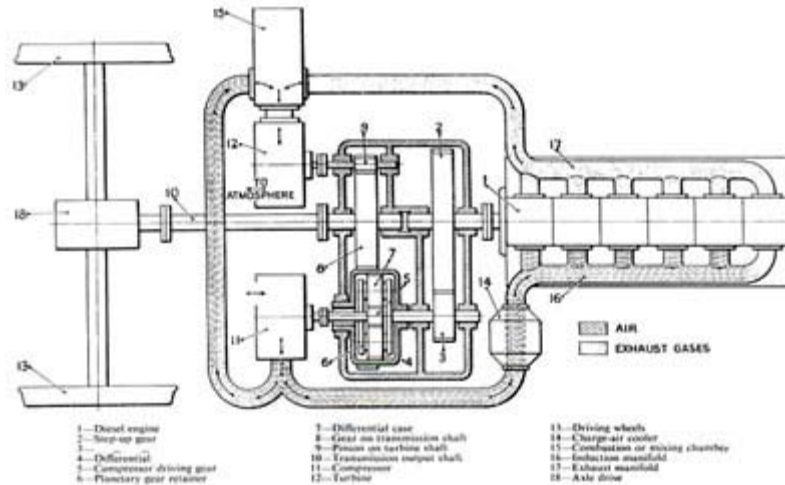
Un générateur de gaz est un moteur diesel 2 temps, de conception à pistons opposés à balayage, de préférence, qui est suralimenté à une pression tellement élevée que toute sa puissance est utilisée pour entraîner son propre compresseur. Habituellement, les pistons des Diesel sont intégraux, avec le plus grand diamètre du piston du compresseur comprimant également l'air dans les cylindres d'amortissement permettant une course de retour du piston pour la compression. Il n'est pas nécessaire de convertir le mouvement alternatif des pistons en mouvement rotatif et la bielle et le vilebrequin peuvent être supprimés. Un mécanisme (non montré) synchronise le mouvement des pistons opposés.



- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1 - Diesel-compresseur à pistons libres | 4 - turbine du turbocompresseur |
| 2 - turbine à gaz principale | 5 - compresseur du turbocompresseur |
| 3 - générateur | 6 - intercooler |

Les générateurs à gaz et le turbo-compound différentiel (2/2)

En raison de la pression d'admission extrêmement élevée, une puissance forte spécifique est récupérée de la turbine d'échappement. Sur le diagramme de la page précédente, le groupe-moteur est équipé d'un turbocompresseur et d'un intercooler et entraîne un générateur, mais ce concept a aussi été utilisé pour propulser des bateaux et des locomotives. En 1956, General Motors a construit un véhicule expérimental équipé d'un tel système de propulsion.



L'association d'une suralimentation différentielle et d'un turbocompound, placé entre le turbocompresseur d'un moteur Diesel et le générateur à gaz, peut être envisagée sur véhicule à roues motrices. Un compresseur centrifuge à deux étages est entraîné par un différentiel, un train d'engrenages et un accouplement hydraulique. Si le vilebrequin entraîne le porte-satellites d'un différentiel à pignons coniques, le couple du vilebrequin est réparti en 2 parts égales, d'un côté le compresseur et, de l'autre, l'arbre de sortie. Naturellement, un différentiel épicycloïdal à pignons droits peut aussi être employé à la place, permettant ainsi une distribution libre du couple entre le compresseur et l'arbre de sortie.

La turbine d'échappement est reliée à l'arbre de sortie. La totalité du moteur fonctionne alors comme un convertisseur de couple. Un problème connu est l'excès d'air comprimé lors du lancement du véhicule, mais l'air peut être dévié directement vers la turbine ou vers une turbine séparée.

Deux locomotives employant ce concept, dû au Docteur Leonhard Geislinger, ont été construites et ont assuré avec succès un transport régulier en Suède en 1955. Une chambre de combustion auxiliaire utilisait l'excès d'air. Frank Wallace, à l'université de Bath, a également publié plusieurs études sur le DCE (Differential Compound Engine) ou turbo-compound différentiel, mais il a apparemment ignoré les travaux précédents de Geislinger et a pensé que l'efficacité supérieure d'un compresseur centrifuge ne pourrait pas être exploitée avec un tel montage.

Avantages de la turbo-compression

- La puissance spécifique du moteur turbocompressé, en comparaison de sa cylindrée, de son poids et de ses dimensions hors-tout, est plus élevée que celle d'un moteur atmosphérique (technique appelée Downsizing).
- A puissance et vitesse moyenne équivalentes du piston, la cylindrée et le nombre de cylindres d'un moteur peuvent être diminués, réduisant de ce fait les pertes par frottement. En d'autres termes, si la pression efficace moyenne est augmentée, le pourcentage de la puissance perdue par friction par rapport à la puissance totale du moteur est réduit.
- Le turbocompresseur compense automatiquement la perte de densité de l'air en altitude. La puissance d'un moteur atmosphérique chute de plus de 6% tous les 500 mètres d'altitude. Cependant, la puissance de la turbine augmente avec l'altitude en raison d'une contre-pression réduite en sortie d'échappement. La turbine du compresseur tourne donc plus rapidement, fournissant approximativement la même pression à l'admission que celle qui aurait été générée au niveau de la mer, même si la pression atmosphérique est inférieure.
- La réserve de couple d'un moteur turbocompressé (couple maxi divisé par couple au régime nominal) peut atteindre plus de 35% au lieu de 7 à 15% avec un moteur atmosphérique.

Cela signifie que le moteur peut être réglé pour un couple et une puissance maximales constants sur une large plage de régimes. Un nombre plus faible de changements de rapports de boîte de vitesses sera donc nécessaire. Du fait de ce niveau de performance, le couple d'un moteur turbocompressé est souvent électroniquement limité pour ne pas excéder la capacité de la transmission.

- Le turbocompresseur est particulièrement bien associé au moteur Diesel car ce dernier peut résister à des pressions de compression élevées sans problèmes de détonation et de pré-allumage qui limitent le moteur à essence. Leur température d'échappement est également inférieure.
- Une partie de l'énergie contenue dans les gaz d'échappement est récupérée.
- Le turbocompresseur est aussi un silencieux supplémentaire.



La BMW Turbo 2002 était la première voiture de grande production à être équipée d'un moteur turbocompressé

Inconvénients de la turbo-compression

- Temps de réponse lors de brusques augmentations de charge
- Couple à bas régime et frein moteur faibles en raison d'une plus petite cylindrée comparée à celle d'un moteur atmosphérique de puissance équivalente.
- Le taux de compression doit être réduit pour rester dans les limites acceptables de pressions de fin de compression et de combustion. L'impact est plus néfaste sur les moteurs à essence en raison d'un taux de compression plus faible et du risque de cliquetis. Un taux de compression volumétrique plus bas réduit le rendement thermodynamique.
- Sur les moteurs à essence, le rapport air/essence doit être excessivement riche à pleine charge (entre 0,75 et 0,85) pour maintenir la température des gaz d'échappement en dessous des limites acceptables de la turbine. Les derniers turbocompresseurs supportent des températures de 1050°C avec des richesses du mélange de 0,9, mais leurs coûts de production sont plus élevés. (Les pots catalytiques ne fonctionnent seulement qu'avec un dosage de 1, mais comme les émissions ne sont pas mesurées à pleine charge, le mélange peut être enrichi pendant les phases de pleine charge pour abaisser les températures de combustion et d'entrée de la turbine).

- Complexité des circuits d'admission et d'échappement, de l'équipement intercooler, de la lubrification des paliers du turbocompresseur et de son refroidissement.



Moteur 2.0 turbo Saab

Pour en savoir plus :

- <http://www.3k-warner.de/en/products/index.asp>
- http://www.egarrett.com/technology/tech_index.jsp

Ci-dessous un site très intéressant sur la lubrification des moteurs turbocompressés :

- <http://www.performanceoiltechnology.com/syntheticoilandturboschargers.htm>

Autres sources :

- Leroy, J-L. & Grosshans G. New developments of turbo-compound Diesel engines. Inst. Mech. Engrs C123/86
- Wallace, F. J & al. The differential compound engine, Inst. Mech. Engrs Vol. 197A - 47/83
- Petrovsky, N. Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers, Moscow
- <http://www.jagweb.com/aj6eng/supercharge.html>
- <http://www.Dieselnet.com/tginfo/abstracts.html>

Auteur : François Dovat, rédacteur technique.