



Les turbocompresseurs ABB

repoussent les limites de puissance et de rendement des moteurs

Esko Laustela

En 1924, le premier turbocompresseur de gaz d'échappement pour moteur Diesel de grande puissance sortait de l'usine suisse Brown Boveri de Baden; depuis, les turbocompresseurs ABB n'ont cessé de hisser la barre de la puissance et du rendement des moteurs. La nouvelle génération de turbocompresseurs TPS et TPL, mise sur le marché à la fin des années 90, poursuit cette tradition et introduit des innovations technologiques permettant de développer des moteurs encore plus performants tout en respectant une législation antipollution qui se durcit.

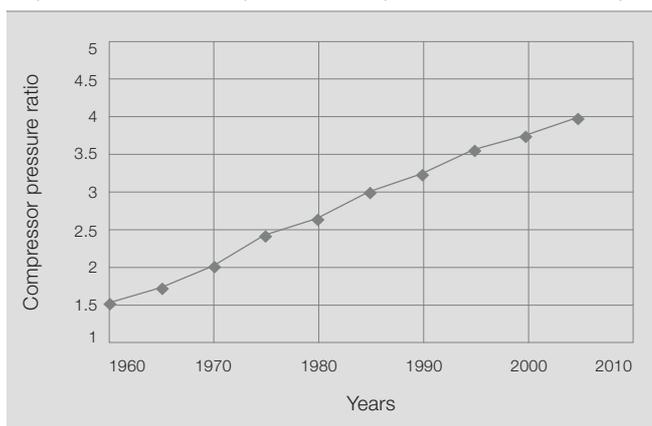
Les moteurs Diesel turbo-compressés («turbosuralimentés» ou «suralimentés par turbocompresseur») jouent un rôle clé dans l'économie mondiale. Source motrice principale ou auxiliaire de navires aussi différents que les superpétroliers et les ferries rapides, ils contribuent aux échanges commerciaux entre pays et aux flux de population. Mais la construction navale n'est pas le seul secteur à bénéficier des hauts rendements de ces machines; en effet, dans le monde entier, les centrales de production d'énergie, les locomotives et les véhicules non routiers de gros tonnage sont équipés de moteurs Diesel ou à essence turbo-compressés.

Des moteurs 4 fois plus puissants

En 2004, le marché mondial des moteurs Diesel turbo-compressés de plus de 500 kW s'élevait à environ 50 GW. Plus de la moitié de cette puissance motrice était destinée aux navires, un quart aux centrales d'énergie fixes et le restant à la traction et autres applications. Le succès du moteur Diesel dans chacun de ces secteurs est étroitement lié au turbo-compresseur qui peut multiplier par quatre sa puissance. Ainsi, 75% de la puissance du moteur dépendent de la fiabilité et des performances du turbo-compresseur **cf. encadré 1**.

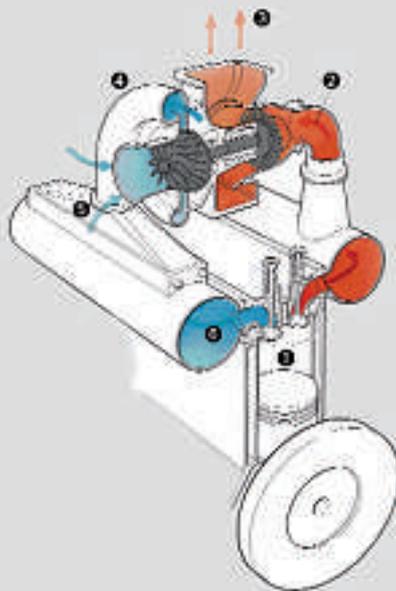
Le turbo-compresseur non seulement dope le rendement déjà très élevé des moteurs Diesel et à essence, mais profite à l'environnement. En diminuant la consommation, il réduit les rejets de gaz d'échappement et aide les exploitants à respecter une réglementation toujours plus sévère. Néanmoins, l'atout majeur du turbo-compresseur reste la formidable augmentation de puissance qui correspond environ au taux de com-

1 Evolution au cours des 45 dernières années du taux moyen de compression des turbo-compresseurs ABB pour moteurs à 2 et 4 temps



Moteur turbo-compresseur : comment ça marche ?

La puissance d'un moteur à combustion interne est fonction de la quantité d'air et de carburant injectée dans ses cylindres (1) et de sa vitesse de rotation. En introduisant une plus grande quantité d'air sous haute pression dans les cylindres, le turbo-compresseur dope la puissance du moteur.



Comme son nom l'indique, un turbo-compresseur de gaz d'échappement est actionné par les gaz d'échappement du moteur (2) dont la température est proche de 600°C. Ces gaz à grande vitesse sont dirigés sur les aubes d'une turbine (3) qui entraîne un rotor de compresseur (4) monté sur le même arbre. En tournant, ce rotor aspire l'air ambiant au travers d'un filtre-silencieux, le comprime et l'envoie via un post-refroidisseur (5) à l'admission d'air du moteur (6) qui l'injecte dans les cylindres.

Le turbo-compresseur peut multiplier par 4 la puissance d'un moteur. Ainsi, les performances du turbo-compresseur conditionnent 75% de la puissance du moteur.

pression de l'étage compresseur à plein régime du moteur. La figure 1 montre l'évolution du taux moyen de compression des turbo-compresseurs ABB ces 45 dernières années.

Génération TPS/TPL, le bond en avant

Au milieu des années 80, des études détaillées de marché révélèrent la nécessité d'une nouvelle technologie de turbo-compresseurs pour accompagner l'évolution des besoins des motoristes. Les séries VTR, VTC et RR, qui connurent un réel succès avec plus de 150 000 unités en service, avaient atteint leurs limites. La nouvelle génération de moteurs exigeait des taux de compression, des débits et des rendements supérieurs. Parallèlement, les exploitants demandaient plus de fiabilité, moins d'entretien et de maintenance, et une plus longue durée de vie.

Au début des années 90, ABB entreprit de développer des turbo-compresseurs plus compacts, plus légers et plus performants. Deux nouvelles gammes, TPS pour les moteurs de 500 à 3000 kW et TPL pour les applications à partir de 2500 kW jusqu'aux plus grosses puissances, furent conçues sur la planche à dessin.

Turbo-compresseurs TPS

Le TPS est une toute nouvelle génération de petits turbo-compresseurs robustes qui anticipent les besoins des moteurs Diesel et à essence haute vitesse et des petits moteurs à vitesse moyenne en cours de développement. Avec des performances nettement supérieures à celles des machines de taille et de masse comparables de la série RR, leur rendement dépasse de beaucoup ceux de la série VTC et des machines plus petites de la série VTR. Deux compresseurs différents ont été développés : la

version D pour des taux de compression jusqu'à 4,2 en régime continu maximum et la version E pour des taux de compression jusqu'à 4,5. Des débits d'air élevés sont assurés par un rotor à préaubage avec des aubes incurvées vers l'arrière sur la sortie ² qui garantissent également un domaine de travail étendu; des pointes de rendement supérieures à 84% peuvent ainsi être obtenues.

Pour la gamme TPS, ABB a développé une toute nouvelle turbine à flux mixte utilisable à la fois en régime à pression constante et en régime pulsé. La tuyère en couronne peut être livrée avec un revêtement spécial pour les carburants de moindre qualité. Un nouveau carter de palier refroidi à l'huile permet des températures d'entrée de turbine de 680°C maximum à charge constante.

Emissions polluantes et cycle Miller

Au début du nouveau millénaire, les moteurs Diesel ont fait d'importants progrès en termes de pression moyenne effective et de consommation de carburant. Au même moment, l'impact environnemental du trafic maritime, notamment la pollution émise par ces mêmes moteurs Diesel, faisait l'objet d'intenses études. Pour se conformer à une législation antipollution qui se durcit, les taux de compression des turbocompresseurs vont devoir être relevés.

Le « cycle Miller » – fermeture précoce ou tardive de la soupape d'admission – est une des solutions mises en œuvre par les constructeurs pour réduire les émissions de leurs moteurs. A puissance moteur et pression de suralimentation constantes, le remplissage des cylindres est réduit alors que la pression et la température y restent inférieures pendant tout le processus. Le cycle Miller est une des rares solutions envisageables pour un moteur à combustion interne si l'on veut réduire simultanément ses émissions de NO_x et sa consommation. Une pression de suralimentation beaucoup plus élevée est toutefois nécessaire pour réduire la température dans les cylindres du moteur pendant le cycle Miller.

ABB a livré plus de 12000 turbocompresseurs TPS depuis leur mise sur le marché à la fin des années 90.

TPS..-F

La montée en puissance spécifique des moteurs impose de réduire leurs émissions, ce qui a conduit la plupart des moteurs récents à inclure un « cycle Miller » sous une forme ou une autre ^{cf. encadré 2}. Pour ceux-ci et pour les moteurs futurs de conception

avancée, ABB a développé trois nouvelles séries. La première, TPS..-F33 ³, a été mise sur le marché en 2000/2001, suivie deux ans plus tard de la série TPS..-F32 et, en 2004, de la série TPS..-F31. Toutes basées sur la plate-forme TPS..-D/E, elles offrent respectivement des taux de compression maximum à pleine charge de 4,75, 5,0 et 5,2, avec un rotor de compresseur en aluminium. Quatre modèles couvrent les puissances moteur de 500 à 3 300 kW.

² Turbine et compresseur TPS..-E



³ Turbocompresseur TPS57-F33 en cours d'essai sur un moteur Diesel Wärtsilä W6L26



⁴ Tuyère d'admission à section variable d'un turbocompresseur TPS57 VTG



Les nouveaux étages de compresseur développés pour les TPS..-F affichent des débits supérieurs de 15% par rapport à un rotor classique de même diamètre. Cela a été atteint en adoptant la même démarche que pour le compresseur du TPL: au lieu d'ajuster la dimension des aubes selon les débits requis, la chambre de chaque turbocompresseur a été répartie en trois zones techniques, avec pour chacune d'elles des objectifs de performance individuels, afin d'optimiser la conception du compresseur dans les limites physiques de chaque zone.

Le TPS..-F était également le premier turbocompresseur ABB à technologie de recirculation, grâce à une fente de soutirage autour du rotor qui, tout en améliorant les écoulements, renforce la garde au pompage. Cette fente élargit le domaine de travail sans pénaliser le rendement.

Turbocompresseur TPS avec turbine à géométrie variable

Les besoins spécifiques du marché des moteurs Diesel et à essence ont également débouché, au milieu des années 90, sur une version du TPS avec turbine à géométrie variable (VTG).

Ce développement s'explique notamment par le succès croissant des moteurs Diesel à conduit d'échappement unique. Avec ce type de moteur, les turbocompresseurs classiques travaillent moins bien en régime à charge partielle avec, pour résultat, une mauvaise réponse aux fluctuations de charge et de fortes émissions de particules et de fumées.

Les moteurs à essence ont également fait d'énormes progrès en rendement et en pression moyenne effective (*pme*), élargissant les possibilités d'exploitation en haute altitude et

permettant la régulation du rapport air/carburant (A/C). Néanmoins, on ne pouvait pas simplement leur adjoindre un turbocompresseur traditionnel. Plusieurs solutions existaient – allant de l'installation d'une soupape de décharge (*wastegate*) ou d'un jeu de valves à l'ajustement du turbocompresseur – toutes présentant des inconvénients. Le marché était très demandeur d'un turbocompresseur adéquat pour moteurs à essence, surtout pour les puissances de 1000 kW à 3000 kW.

La turbine à géométrie variable ⁴ semblait la solution idéale pour les deux types de moteur. Outre qu'elle évite les pertes liées à la soupape de décharge, la géométrie variable offre plus de souplesse face aux conditions d'exploitation ou ambiantes changeantes. Une régulation précise du rapport air/carburant, appelée «régulation lambda», est obtenue avec une couronne d'aubes d'admission d'incidence variable qui permet de moduler la surface effective de la turbine sans chute importante de rendement. Le jeu des aubes orientables est pratiquement supprimé par des ressorts qui les plaquent contre la paroi opposée du carter de turbine.

Turbocompresseurs TPL

Le concept TPL est une plate-forme pour les gros moteurs Diesel et à essence modernes au-dessus de 2500 kW. Pour ceux-ci, ABB a développé une famille de turbines axiales à aubes de différentes longueurs et ne couvrant pas le domaine complet des débits volumiques. Une originalité du TPL est son nouveau palier à disque de butée en montage flottant. Deux étages distincts de compresseur centrifuge furent également développés pour couvrir tous les taux de compression exigés par les moteurs modernes. Les caractéristiques aérodynamiques du compresseur TPL, tout comme celles du compresseur TPS, sont optimisées en admission par un rotor à préaubage autorisant des débits d'air élevés et en sortie par des aubes incurvées vers l'arrière pour étendre le domaine de travail. Une panoplie de carters d'entrée de turbine, incluant des circuits de dérivation en option, furent développés pour pouvoir utiliser le TPL avec tous les systèmes de surcompression actuellement en service ⁵.

⁵ Turbocompresseur TPL80



⁶ Le ferry rapide Catalonia de la compagnie Buquebus Line, équipé de huit turbocompresseurs TPL65A sur ses quatre moteurs Caterpillar 3618, a battu le record de la traversée en surface de l'Atlantique en 1998.



⁷ Aubage à cordon de la turbine TPL...-A



⁸ Turbocompresseur TPL...-B



TPL...-A – pour moteurs quatre temps

La série TPL...-A répond aux besoins des moteurs Diesel et à essence quatre temps modernes de 2500 kW à 12500 kW, principalement utilisés comme moteurs principaux sur les petits navires ⁶ et comme moteurs auxiliaires sur les gros navires ou dans les centrales d'énergie fixes.

Deux étages compresseurs sont disponibles: l'un pour des taux de compression de 4,2, des débits spécifiques et des rendements élevés, et l'autre pour les taux de compression supérieurs allant jusqu'à 4,5. Des pointes de rendement dépassant 68% peuvent être obtenues. L'aubage des plus grosses turbines TPL...-A est cordonné ⁷ pour amortir les vibrations provoquées par le régime pulsé de nombreux moteurs quatre temps aujourd'hui en service. Pour les plus petites tailles, ABB a développé une turbine intégrée d'une seule pièce.

TPL...-B – pour doper les puissances des moteurs deux temps

Lancés en 1999, les turbocompresseurs TPL...-B visent en premier lieu le marché des gros moteurs Diesel deux temps modernes de la marine. Ils sont disponibles en cinq tailles pour les moteurs de 5000 à 25000 kW par turbocompresseur. En novembre 2004, trois unités du plus gros modèle de cette série, le TPL91-B ⁸, furent installées en Corée sur le plus puissant moteur à commande électronique du monde, le 12K98ME MANB&W, pour les essais officiels à pleine charge, à 69,6 MW (93360 CV) ⁹.

Les turbocompresseurs à pression constante pour moteurs deux temps ne produisant que de faibles pulsations à l'échappement, les conditions en entrée de turbine TPL...-B restent constantes. Cela permet de se passer du cordon amortisseur entre les aubes, améliorant de 2 à 3% le rendement déjà élevé de la turbine. La stabilité reste cependant assurée par la construction en semelle large de la turbine du TPL...-B.

Plus de 1100 machines TPL...-B ont été livrées à ce jour, représentant un total de 15 GW de puissance turbocompressée.

Turbocompresseur TPL...-C

Même si les turbocompresseurs des séries TPL...-A/B couvrent la plupart



des besoins, le marché des moteurs quatre temps demande toujours plus de puissance et des émissions encore plus réduites. Pour y répondre, ABB a développé la série TPL...-C qui conjugue de nouveaux composants, des technologies innovantes et une conception avancée. Outre ses avantages économiques et opérationnels, cette nouvelle génération est conforme aux seuils d'émissions de NO_x et de particules fixés notamment par l'Organisation maritime internationale et la Banque mondiale, grâce à une optimisation poussée de la combustion et du turbocompresseur.

Les turbocompresseurs TPL...-C répondent aux exigences des futurs moteurs Diesel et à essence quatre temps à vitesse moyenne de 3000 à 10000 kW par turbocompresseur. Les deux étages compresseurs de cette série sont de même conception que ceux de la série TPS...-F. Les étages compresseurs de la génération F augmentent l'efficacité, le taux de compression maximum et le débit spécifique, celui-ci étant accru de 15% pour un taux de compression de 4,5.

Des machines de haute technologie mises à rude épreuve

Les turbocompresseurs ABB naviguent sur les sept mers. Ils travaillent dans le désert australien, en Antarctique, dans des sous-marins au

fond des océans et jusqu'à 4000 m d'altitude. Les températures d'entrée d'air peuvent varier de +55°C à -50°C. Ils doivent fonctionner sans faille à des angles d'inclinaison extrêmes et supporter d'énormes fluctuations de charge sans que le compresseur ne pompe, alors que la turbine doit supporter des gaz d'échappement chauds et corrosifs provenant de tous les types possibles de gazole.

Les turbocompresseurs de gaz d'échappement ABB restent fiables et efficaces sous toutes ces conditions d'exploitation. La montée en flèche des prix du pétrole non seulement renforce le rôle traditionnel d'économiseur d'énergie des turbocompresseurs, mais oblige également les

moteurs Diesel à augmenter leurs taux de compression et leur rendement. Avec ses turbocompresseurs à la pointe de la technologie, ABB joue une part très active dans la réalisation de ce double objectif tout en réduisant l'impact environnemental du transport maritime.

Axes de développement pour l'avenir

L'augmentation continue du rendement des moteurs et des turbocompresseurs a toujours été le fruit d'une collaboration étroite et d'un échange d'informations entre ABB et les principaux constructeurs de moteurs. Cette collaboration définit les objectifs de développement et ne pourra que se renforcer face à une demande croissante pour des «systèmes intégrés turbocompressés» plutôt que pour des turbocompresseurs comme composants individuels. Deux axes de développement envisagés sont les composants turbocompresseurs adaptables et les turbocompresseurs à plusieurs étages. Fidèle à ses engagements, ABB fournira à ses clients les résultats de ses simulations détaillées chaque fois qu'elles contribueront à faire progresser la technologie des turbocompresseurs au profit des deux parties.

Il va sans dire que les efforts de développement doivent se poursuivre. Face à une réglementation internationale qui se durcit, les exploitants exigeront des moteurs Diesel toujours moins polluants. Et avec des coûts de carburant peu enclins à baisser, les constructeurs de moteurs et, donc, de turbocompresseurs se devront d'assurer la plus haute efficacité de ces «locomotives» de l'économie mondiale.

9 Essais à pleine charge chez le Coréen Hyundai Heavy Industries du moteur à commande électronique le plus puissant au monde, le 12K98ME MANB&W, avec trois turbocompresseurs TPL91-B (69,6 MW ou 93 360 CV)



Esko Laustela
ABB Turbo Systems Ltd.
Baden (Suisse)
esko.laustela@ch.abb.com