

## **Système d'humidification à air – la solution optimale pour réduire la consommation de carburant et contrôler les émissions**

**Par M. Anatoly Mezheritsky, ing.  
M.A.Turbo/Engine Ltd**

Le secteur de l'industrie maritime est l'un des plus grands consommateurs de combustibles fossiles au monde. Par exemple, deux sociétés dont le siège social se trouve en Colombie-Britannique, BC Ferries et Washington Marine Group à Vancouver, consomment à elles seules 154 millions de litres de combustibles fossiles chaque année, à un coût total de 64,6 millions de dollars. Par conséquent, le secteur de l'industrie maritime est responsable de près de 30 p. 100 des émissions de gaz à effet de serre (GES). Selon les essais de la Division de la recherche et des mesures des émissions (DRME) d'Environnement Canada (consultez le rapport n° 98-26711 de la DRME), un moteur principal du traversier de la Colombie-Britannique *Queen of New Westminster* émet 3,126 kilos de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) par tonne de carburant – l'équivalent des émissions de huit camions routiers. À partir de ces statistiques, on peut reconnaître l'importance de réduire la consommation de carburant et les émissions des moteurs diesel marins même de 1 p. 100. Les moteurs diesel, lesquels représentent actuellement la propulsion principale du transport des marchandises et le resteront pendant tout l'avenir prévisible, réalisent un incroyable rendement thermique qui se rapproche presque de la limite du rendement pondéral théorique. Une amélioration de 0,5 p. 100 dans le rendement du carburant, laquelle représentait des années d'efforts et des millions de dollars pour les fabricants, est maintenant occurrence quotidienne. De plus, les jours où l'efficacité supérieure était le seul critère de conception réussie d'un moteur sont définitivement révolus. **Aujourd'hui, le concept du moteur DOIT réunir efficacité optimale et faibles émissions. De façon générale, les technologies crédibles de contrôle des émissions ou les systèmes d'économie de carburant doivent être en mesure de réduire les coûts d'utilisation et les émissions de gaz d'échappement en même temps.** On nommera d'ailleurs une telle technologie de contrôle la technologie de contrôle des émissions et du carburant rentable.

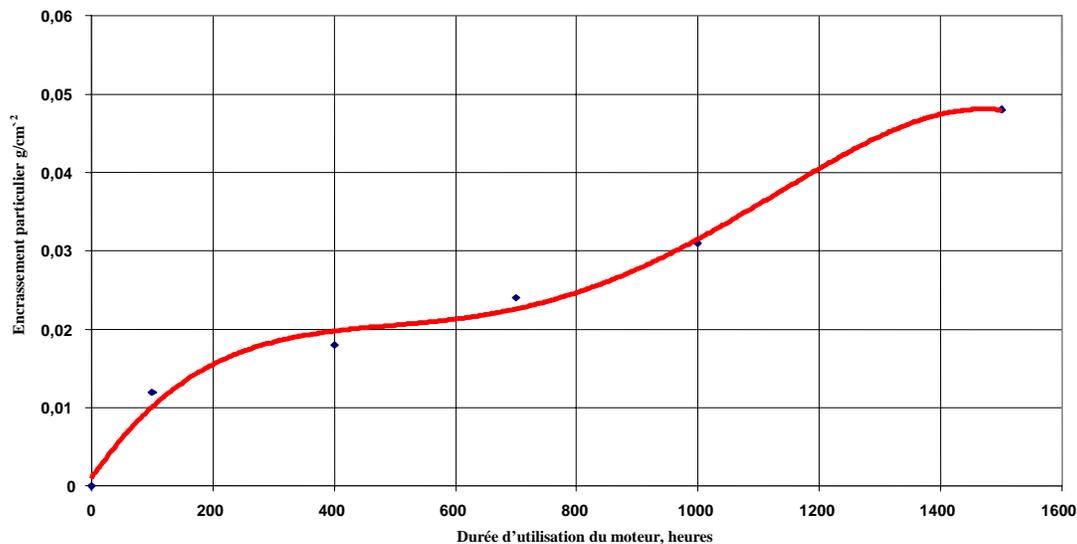
Comme vous le savez tous, l'Organisation maritime internationale (OMI) et la Environmental Protection Agency (EPA) réglementent les émissions d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), de matières particulaires (MP) et d'oxydes de soufre (SO<sub>x</sub>), mais pas les émissions de CO<sub>2</sub> ni la consommation de carburant. Pour se conformer à ces exigences, les fabricants de moteurs sont tenus d'utiliser différentes technologies de contrôle de NO<sub>x</sub> et de MP – l'injection d'eau directe, les convertisseurs catalytiques, la recirculation des gaz d'échappement, les additifs de carburant, l'émulsification du carburant et de l'eau, etc. – qui ont habituellement une incidence sur l'efficacité du moteur. Cependant, les équipementiers n'ont pas le choix – ils doivent utiliser une certaine forme de technologie de contrôle des émissions, peu importe son effet sur la consommation de carburant ou sur les frais d'utilisation. Par exemple, les technologies de contrôle des émissions après traitement, comme la réduction sélective catalytique (SCR), les filtres à particules et autres, n'assurent aucun avantage sur les coûts d'utilisation sauf la réduction des émissions. La recirculation du gaz d'échappement refroidi, l'injection d'eau directe et l'émulsification de carburant et de l'eau augmentent la consommation spécifique de carburant. Cela explique en partie la raison pour laquelle les moteurs construits après 1999 et qui utilisent une technologie plus avancée ont la même consommation de carburant, et même une consommation légèrement supérieure à celle des moteurs construits de 1990 à 1995. Voici des observations générales tirées de ces faits : dans un avenir plus rapproché, les fabricants de moteurs marins diesel ne peuvent pas contribuer à la réduction de consommation de carburant et ils ne le feront pas. C'est simple : il n'existe aucune technologie capable de réduire la

consommation de carburant (et par conséquent les émissions) des moteurs marins diesel, et aucune possibilité théorique d'en mettre une au point, avec réduction simultanée des émissions de NOx et de MP. **Ainsi, le seul moyen de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> émises par les moteurs diesel marins est de réduire la consommation de carburant opérationnelle.**

Beaucoup de facteurs influent sur la consommation de carburant opérationnelle, comme l'état de la coque et de l'hélice du navire, l'état des injecteurs de carburant, les températures de refroidissement et de l'eau de mer, l'usure du moteur, etc. Cependant, l'encrassement du moteur est l'un des facteurs les plus importants.

On sait très bien que pendant l'utilisation normale de moteurs diesels turbocompressés, il y a détérioration graduelle du rendement des moteurs. La principale cause de cela est l'encrassement des refroidisseurs d'air de balayage, des collecteurs d'admission d'air, des ports de balayage ou des soupapes d'aspiration ou d'échappement ainsi que des aubes du turbocompresseur (aussi appelées gaines d'aspiration d'air). On présente des exemples types d'encrassement des aubes du turbocompresseur et des ports d'échappement ou d'aspiration dans les tableaux 1, 2, 3, 4, 5, et 6. La croissance la plus intensive de la couche de dépôt a lieu dans les premières 500 à 700 heures d'utilisation (tableau 7). Au cours des 1 000 heures suivantes, l'épaisseur du dépôt augmente relativement lentement et se stabilise au bout d'environ 1 500 heures.

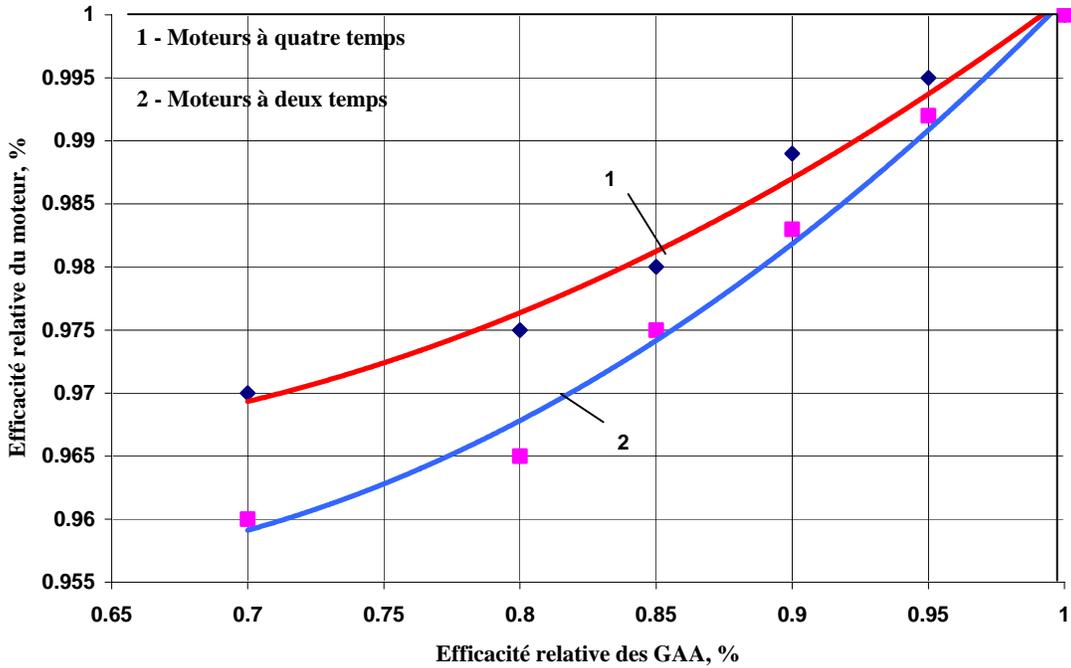
Rapport entre l'encrassement particulier et la durée d'utilisation



La vitesse d'encrassement et l'épaisseur des dépôts dépendent de nombreux facteurs tels que la conception du système d'aération de la salle des machines, l'état des moteurs, l'efficacité des filtres à air comburant, la conception particulière des turbocompresseurs et des refroidisseurs d'air, etc. Cependant, malgré ces facteurs, l'encrassement est une réalité inévitable de l'utilisation de moteurs marins.

L'utilisation avec turbocompresseurs, refroidisseurs d'air et ports de balayage encrassés réduit l'efficacité des gaines d'aspiration d'air, ce qui nuit considérablement au rendement opérationnel du moteur. Dans le tableau 8, on présente les résultats de calculs théoriques de l'efficacité relative des gaines d'aspiration d'air sur l'efficacité de la combustion du moteur.

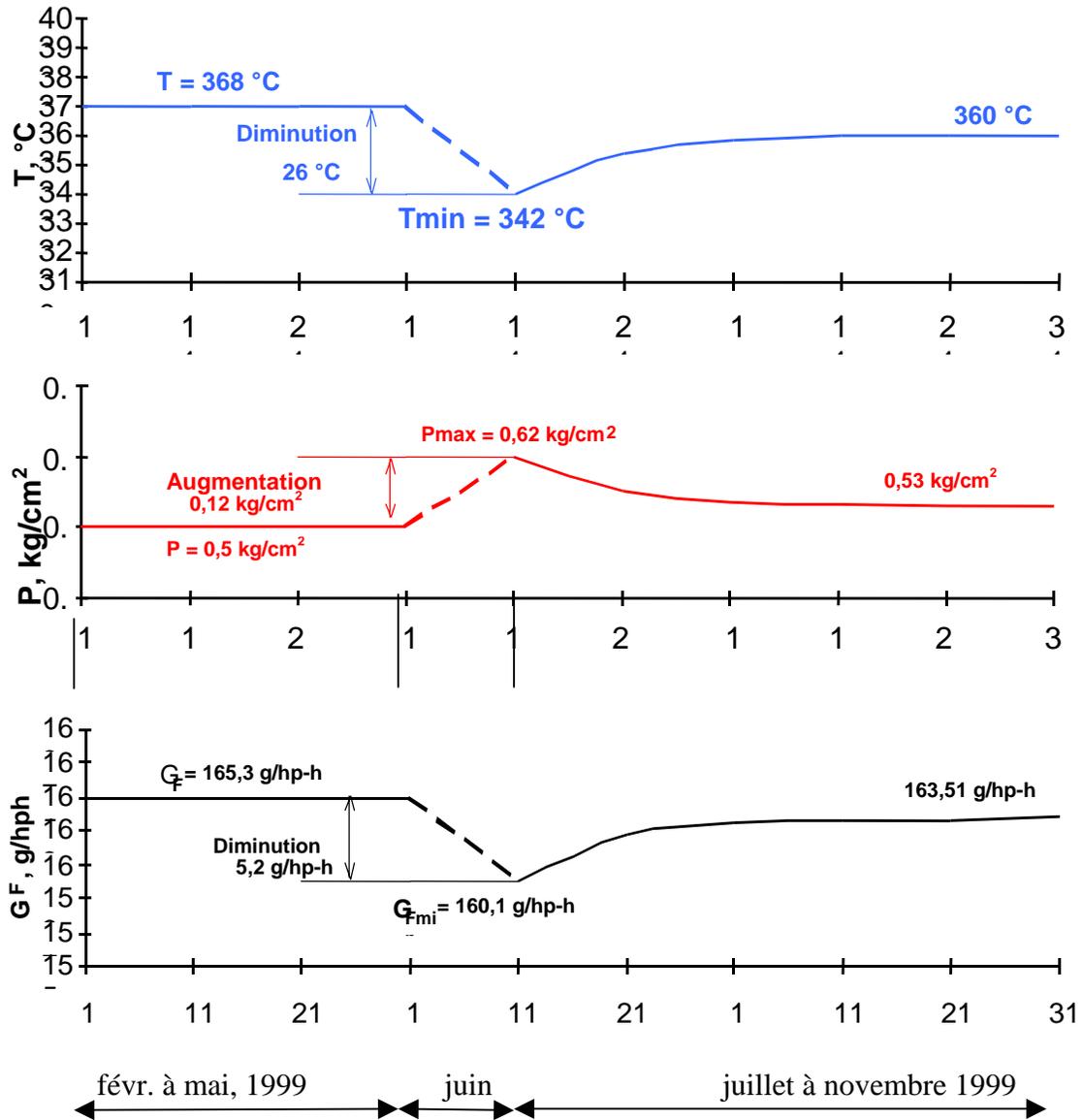
**Tableau 8. EFFET DE L'EFFICACITÉ DES GAA SUR L'EFFICACITÉ DU MOTEUR EN GÉNÉRAL**



Comme on peut le constater à partir de ce tableau, au bout de 2 800 heures d'utilisation, l'encrassement des gaines d'aspiration d'air réduit considérablement l'efficacité de combustion du moteur, d'environ 3 p. 100 pour les moteurs à quatre temps et de 4 p. 100 pour les moteurs à deux temps. Des essais spéciaux confirment ces données théoriques. Comme exemple type, on peut se référer à l'essai effectué par le fabricant sur le groupe électrogène diesel YANMAR 6 GL-DT 400 kW (tableau 9). Comme on peut le constater, avant le nettoyage du refroidisseur d'air, du collecteur d'admission d'air et du turbocompresseur, la pression d'admission d'air moyenne était de 0,5 kg/cm<sup>2</sup>, la température moyenne d'échappement était de 368°C et la consommation spécifique de carburant était de 168,3 g/hp-hr. Après le nettoyage du refroidisseur d'air, du turbocompresseur et du collecteur d'admission d'air, la pression d'admission d'air a immédiatement augmenté à 0,62 kg/cm<sup>2</sup> (une hausse de 24 p. 100). Par conséquent, la température du gaz d'échappement a chuté à 342°C, la consommation spécifique de carburant a baissé à 162.1 g/hp-hr ou de 3,7 p. 100.

Trois mois après le nettoyage, les dépôts se forment de nouveau, environ au même niveau qu'avant le nettoyage et, par conséquent, la pression d'air avec suralimentation a de nouveau chuté (à 0,53 kg/cm<sup>2</sup>), la consommation spécifique de carburant et la température du gaz d'échappement ont augmenté à 166,5 g/hp-hr et 360°C respectivement.

Tableau 9



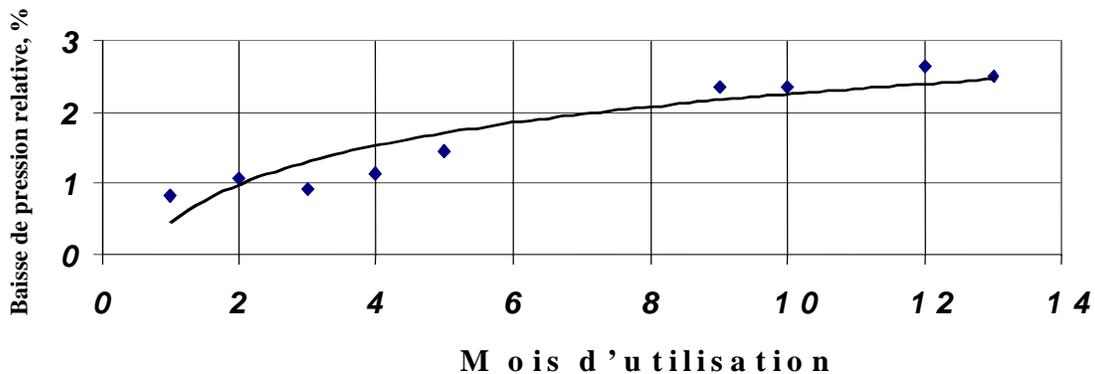
Rendement du moteur avant la révision  
(Les dépôts ne sont pas enlevés.)

Période de révision  
(enlèvement des dépôts du turbo, du refroidisseur, des ports d'admission d'air, etc.)

Données sur le moteur après la révision

Les essais effectués sur le moteur principal du «Queen of Coquitlam», de BC Ferry, secteur principal MAK, 6 000 HP @ 410 T/M (tableau 10) indiquent une tendance similaire. Comme on peut le constater, avant le nettoyage manuel des refroidisseurs d'air, des turbocompresseurs, des conduits de balayage, etc., les paramètres moyens du moteur principal étaient les suivants : consommation spécifique de carburant à 207,8 g/kW-hr, température du gaz d'échappement après les cylindres à 388°C, et pression d'admission à 12,7 lb/po<sup>2</sup>. Immédiatement après le nettoyage manuel, la pression d'admission est passée à 16,2 lb/po<sup>2</sup> (27,5 p. 100). En raison de la hausse de la circulation de l'air, la température du gaz d'échappement a chuté à 359°C (de 29°C) et la consommation spécifique de carburant est passée à 200,2 g/kW-hr (une baisse de 3,7 %). Toutefois, après une courte période d'utilisation, la pression d'admission s'est mise à baisser à cause de l'encrassement des refroidisseurs d'air et des turbocompresseurs, nuisant ainsi davantage au rendement du moteur.

Le tableau 11 illustre l'effet du temps d'utilisation sur la baisse de pression du refroidisseur d'air pour le moteur principal Wartsila 9R32D du traversier New Westminster. Comme on peut le constater, au cours d'une année d'utilisation, la baisse de pression relative a augmenté de 2,5 fois.



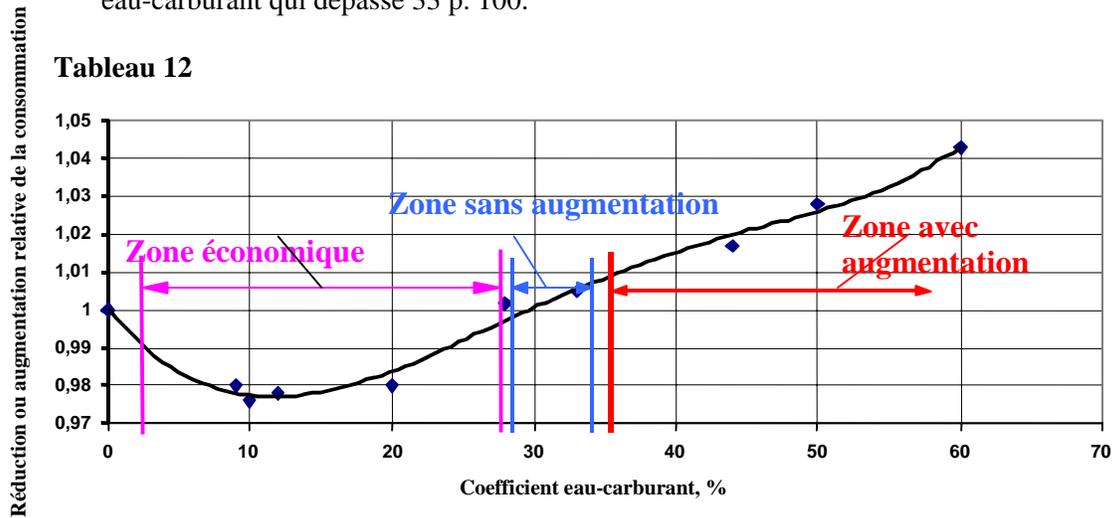
Ces exemples précis ne font que confirmer le fait bien établi que l'encrassement représente un sérieux problème opérationnel. Cependant, personne n'a les moyens d'effectuer la révision des moteurs tous les trois mois, ou même tous les six mois. **C'est pourquoi le système d'injection continue d'eau (CWI pour Continuous Water Injection) est le meilleur système et probablement la seule solution à ce problème.** De petites gouttes d'eau sous une pression de 90 à 120 lb/po<sup>2</sup> ainsi qu'une circulation d'air humide éliminent entièrement tous les dépôts des refroidisseurs d'air, des collecteurs d'aspiration, des soupapes d'aspiration, des aubes de turbocompresseurs, etc. Les refroidisseurs d'air et les turbocompresseurs sont maintenus propres en tout temps, assurant la bonne quantité de circulation d'air à la combustion. Cela entraîne donc les avantages suivants :

- bonne combustion, résultant en une économie de carburant de 2,5 à 4 p. 100;
- économies considérables sur les frais d'entretien;
- élimine les temps d'arrêt du moteur pour le nettoyage des refroidisseurs d'air et des turbocompresseurs.

**Le deuxième grand avantage du dispositif d'injection d'eau est que non seulement il réduit la consommation opérationnelle de carburant, mais il réduit également les émissions.** C'est un fait bien établi que la réduction de la température de la flamme est attribuée à la réduction de formation thermique de NOx. L'eau injectée diminue la température de combustion, réduisant ainsi l'émission de NOx. Cependant, l'injection d'eau a influé sur l'efficacité de combustion du moteur. Le tableau 12 illustre l'effet de l'injection d'eau sur l'efficacité de combustion du moteur. Le rapport entre l'efficacité et le coefficient eau-carburant peut se classer en trois zones.

- La zone numéro 1 économique a un coefficient eau-carburant allant jusqu'à 20 p. 100 et améliore l'efficacité du moteur d'au plus 1,5 p. 100.
- La zone numéro 2 sans augmentation de la consommation de carburant a un coefficient eau-carburant qui varie de 20 à 32 p. 100 sans changement à l'efficacité.
- La zone numéro 3 avec augmentation de la consommation de carburant a un coefficient eau-carburant qui dépasse 33 p. 100.

**Tableau 12**



Ces calculs théoriques ont été confirmés par des essais spéciaux sur les moteurs Cummins et Caterpillar, effectués par la DRME à leur banc d'essai à Ottawa. On présente les résultats des essais dans les tableaux 13 et 14. Comme on peut le constater, on a réalisé un maximum de 35 p. 100 de réduction de NOx, avec un coefficient eau-carburant de 40 p. 100 (tableau 13). Cependant, cette réduction maximale de NOx était accompagnée d'une hausse de consommation de carburant (fig. 14). À un coefficient eau-carburant de 20 p. 100, les essais avaient indiqué une hausse de l'efficacité de la combustion. On devrait souligner que les deux moteurs étaient propres sans aucun dépôt sur les composantes des gaines d'aspiration d'air. Par conséquent, l'avantage du système d'injection d'eau à long terme n'a pu être démontré au cours de ces essais.

Tableau 13

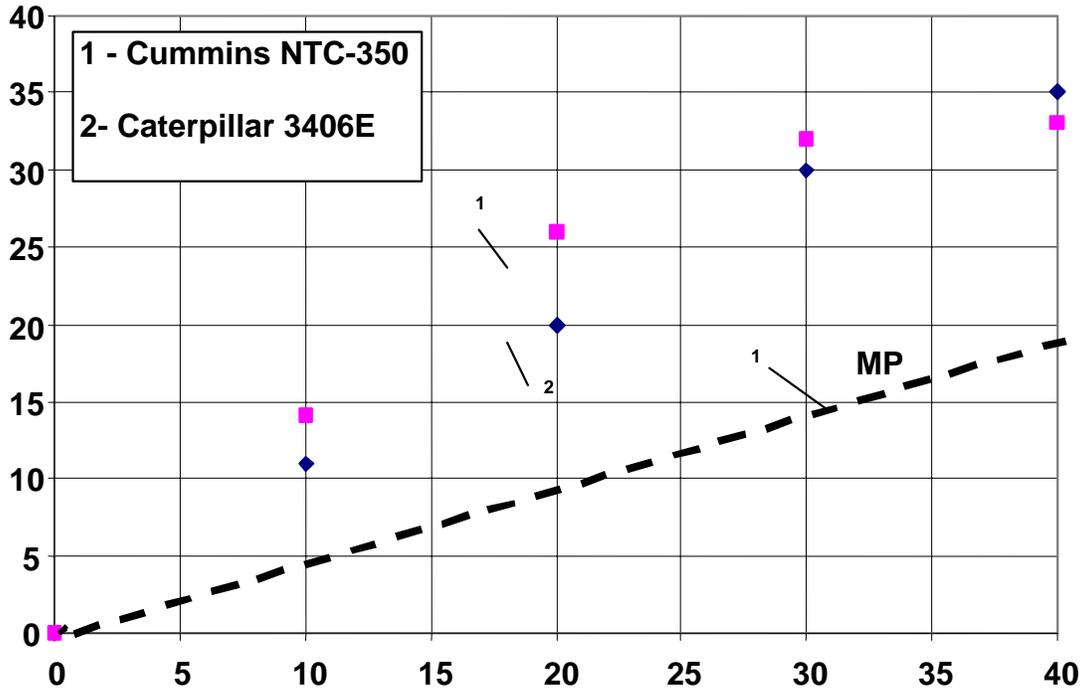
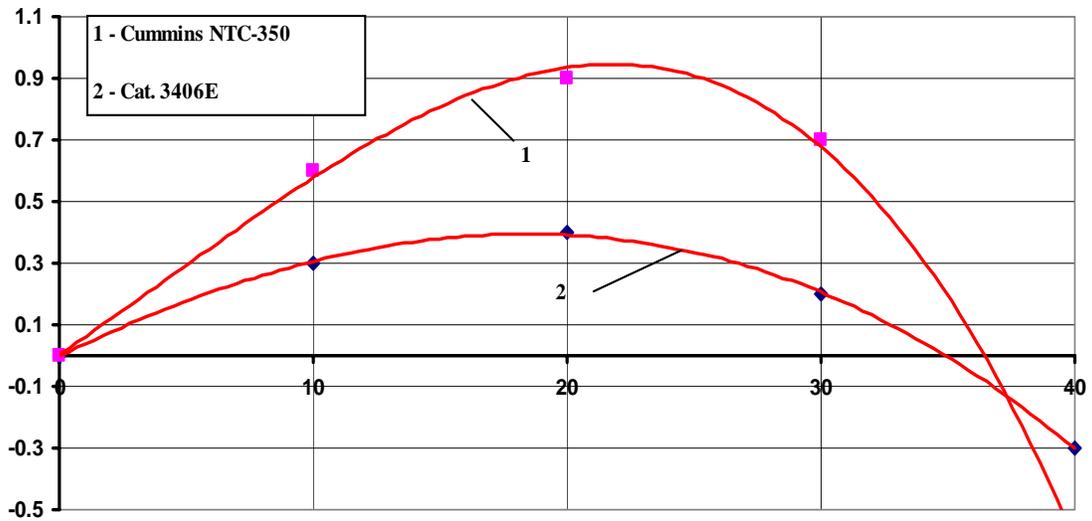


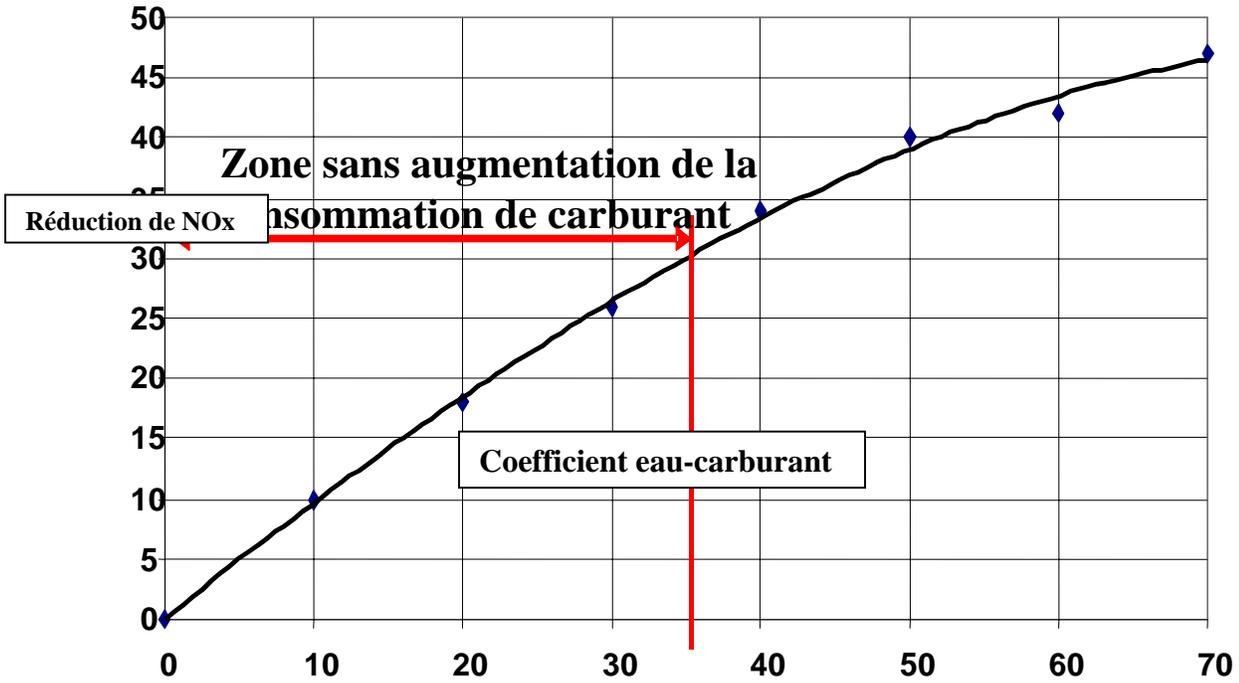
Tableau 14



De façon générale, les résultats présentés dans les deux derniers tableaux confirment les calculs théoriques indiqués auparavant dans le tableau 12.

Selon les calculs théoriques et ces essais, le coefficient eau-carburant jusqu'à 35 p. 100 ne devrait pas entraîner de hausse de consommation de carburant, mais peut réduire les émissions de NOx jusqu'à 30 p. 100 (fig. 15). Ainsi, le système d'humidification à air et CWI conçu par M.A.Turbo/Engine repose sur un coefficient eau-carburant de 25 à 35 p. 100.

Tableau 15.



Les essais les plus détaillés du systèmes d'humidification à air et CWI dans le cadre des opérations de navires réels ont été effectués par BC Ferries (traversier Queen of New Westminster, moteurs principal et auxiliaires), par SCX Inc de San Diego (traversier rapide Waverider), par Blue and Gold Fleet de San Francisco (traversier Oski) et par Gargill International SA (MV Bebedouro). Les tableaux 16, 17, 18 et 19 présentent certains résultats des essais effectués sur les moteurs auxiliaires Wartsila et Cat 3508. On peut constater la netteté des têtes de piston, des parois du cylindre, des ports d'échappement et d'admission, des aubes du turbocompresseur. Dans le tableau 20, on démontre l'effet de la chute de pression sur le refroidisseur d'air alors que dans les tableaux 21, 22, 23 et 24, on démontre l'effet sur la température du gaz d'échappement, sur les émissions spécifiques de NOx et sur les économies de carburant.

Tableau 20. Effet du temps d'utilisation sur la chute de pression dans le refroidisseur d'air. Moteur principal Wartsila 9R32D.

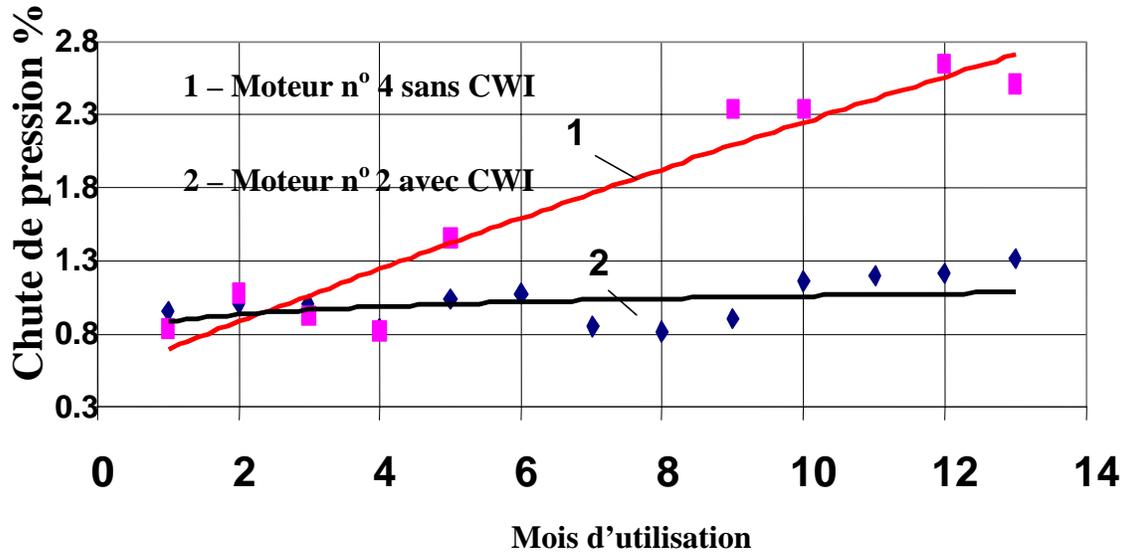


Tableau 21. Effet de l'injection d'eau sur la température du gaz d'échappement. Moteur principal Wartsila 9R32D

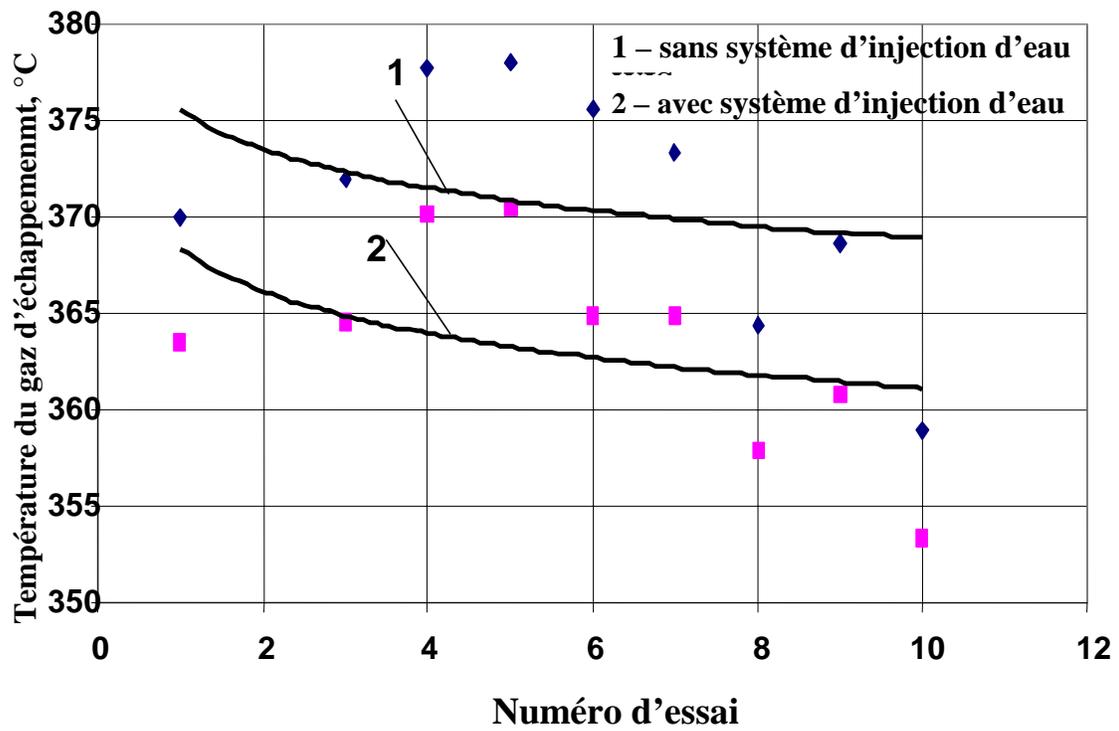


Tableau 22. Effet de l'injection d'eau sur les émissions spécifiques de NOx. Moteur auxiliaire Cat 3805

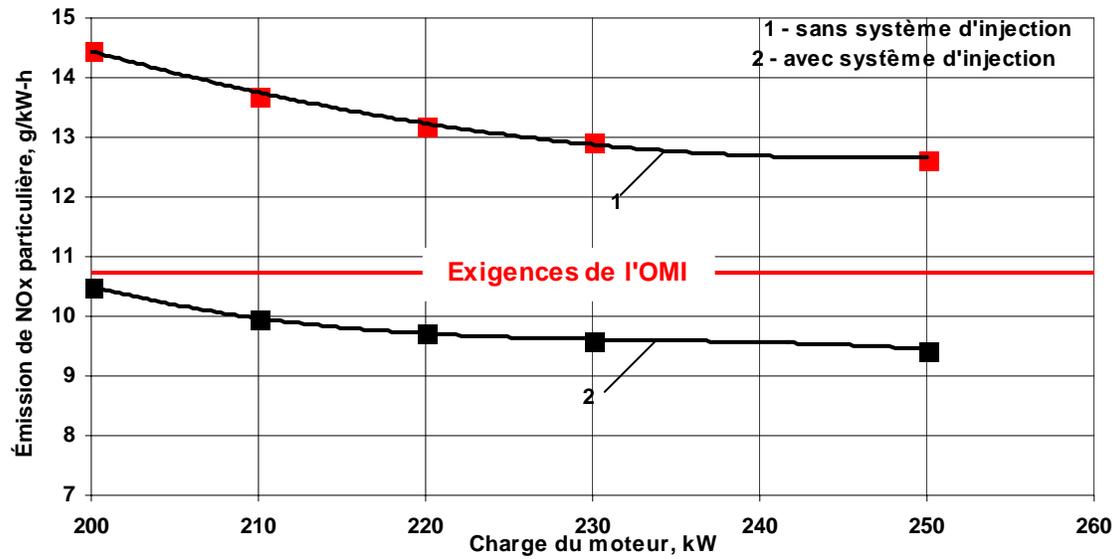
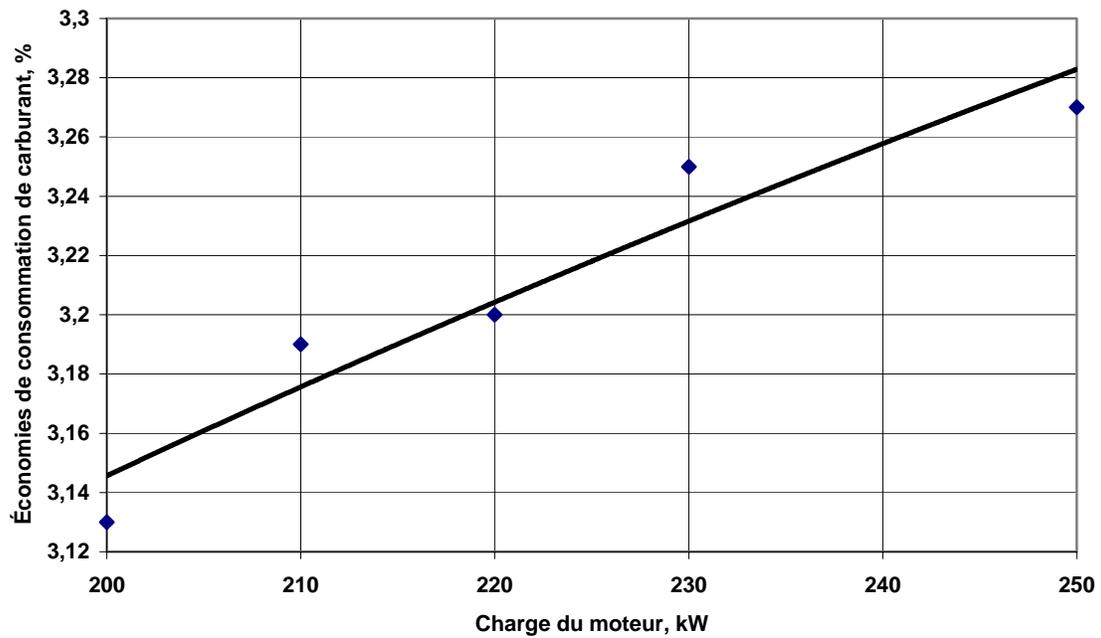
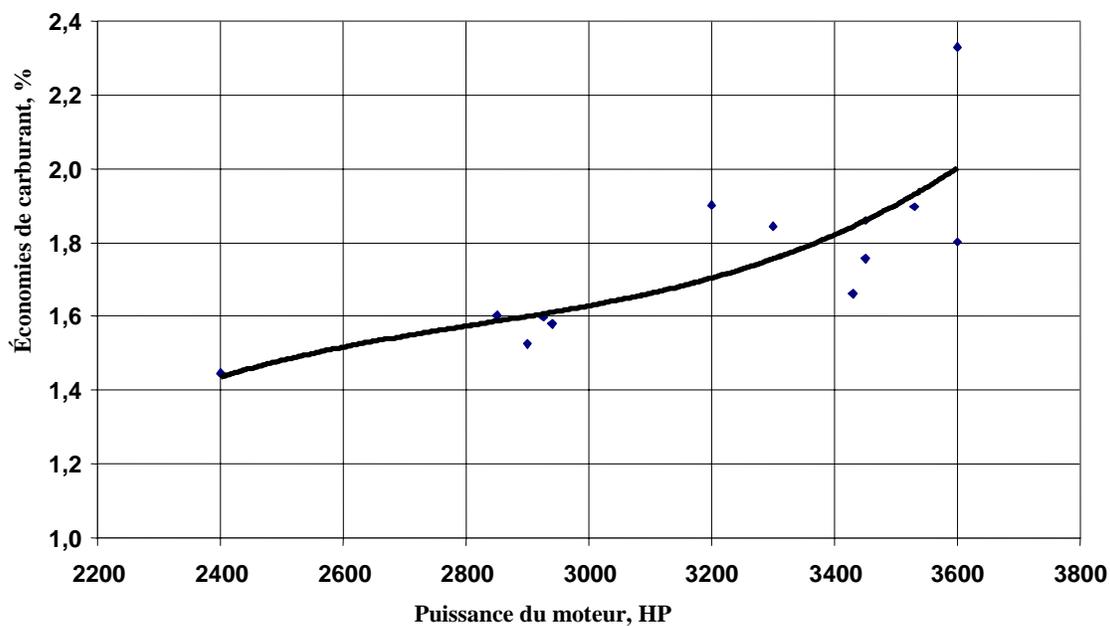


Tableau 23. Économies de consommation de carburant dues à l'injection d'eau. Moteur auxiliaire Cat 3805



**Tableau 25. Effet de l'injection d'eau. Moteur principal 9R32**



Les résultats de ces tests et les avantages du système d'injection d'eau conçu par M.A.Turbo/Engine peuvent se résumer comme suit.

- **Efficacité accrue du processus de combustion et réduction de la consommation de carburant allant jusqu'à 5 p. 100**
- **Réduction de formation de NOx jusqu'à 30 p. 100 et des émissions de fumée jusqu'à 20 p. 100**
- **Réduction de la température des gaz d'échappement jusqu'à 25°C**
- **Réduction de la température de pointe de la combustion**
- **Contrainte thermique réduite sur les composantes du moteur**
- **Prévention de l'accumulation de carbone sur les parois des cylindres, les turbocompresseurs, les refroidisseurs d'air, les soupapes d'admission, les collecteurs de balayage, etc.**
- **Augmentation de la période de révision**
- **Réduction de l'usure des cylindres**
- **Réduction des frais d'entretien allant jusqu'à 25 p. 100**