

Le moteur 165 kW 1.8 I 5V - étoile parmi les moteurs turbo essence d'Audi

Le moteur turbo 1.8 I-5V, caractérisé par son « haut plateau de 280 Nm » dans une plage allant de 2200 jusqu'à 5500 à t/min, produisant une puissance maximale de 165 kW, représente la version la plus performante de cette motorisation, ce qui convient parfaitement à l'image d'une voiture de sport qui est la nouvelle Audi S3.

Avec une puissance de 125 CV/litre, cet agrégat atteint des performances au litre dépassant de nombreuses voitures sports pur-sang. La base de ce développement était la dernière d'évolution du moteur turbo 1.8 I-5V avec un couple de 210 Nm et une performance de 110 kW. Celui se trouve en série dans l'AUDI A3 depuis fin 1998.

Ce descriptif retrace les modifications nécessaires pour d'une part répondre aux charges thermiques et mécaniques très élevées, et d'autre part satisfaire au cahier de charges de qualité Audi. En outre nous regarderons les modifications du moteur qui furent nécessaires pour répondre aux exigences de développement thermodynamiques et pour réaliser les objectifs fixés.

1. Introduction

Des moteurs turbocompressés ne sont pas seulement une tradition dans le département sport d'Audi, mais constituent également une gamme des moteurs à carburateur ne pouvant plus être ignorée depuis bientôt deux décennies. Tout a commencé avec le moteur 5 cylindres avec une cylindrée de 2,2 l et sa technologie de 2 soupapes par cylindre, sans échangeur air-air. Dix ans plus tard, un nouveau moteur 5 cylindres, doté de la technologie à 4 soupapes par cylindre et d'un refroidissement air-air à vu le jour. L'étape suivante dans l'évolution des moteurs turbo chez Audi était marquée par l'arrivée du 1.8 l en 1995, avec l'apparition du 4 cylindres en ligne à technologie 5 soupapes. Dans les modèles Audi A3 et A4, cette motorisation confortable et sportive fournit une puissance nominale de 110 kW avec un couple de 210 NM entre 1750 et 4600 t/min.

Par la suite, nous allons examiner les critères de développement nouveau moteur 1.8 - 5 VT-165 kW de façon plus détaillée et explicite.

2. La conception du moteur

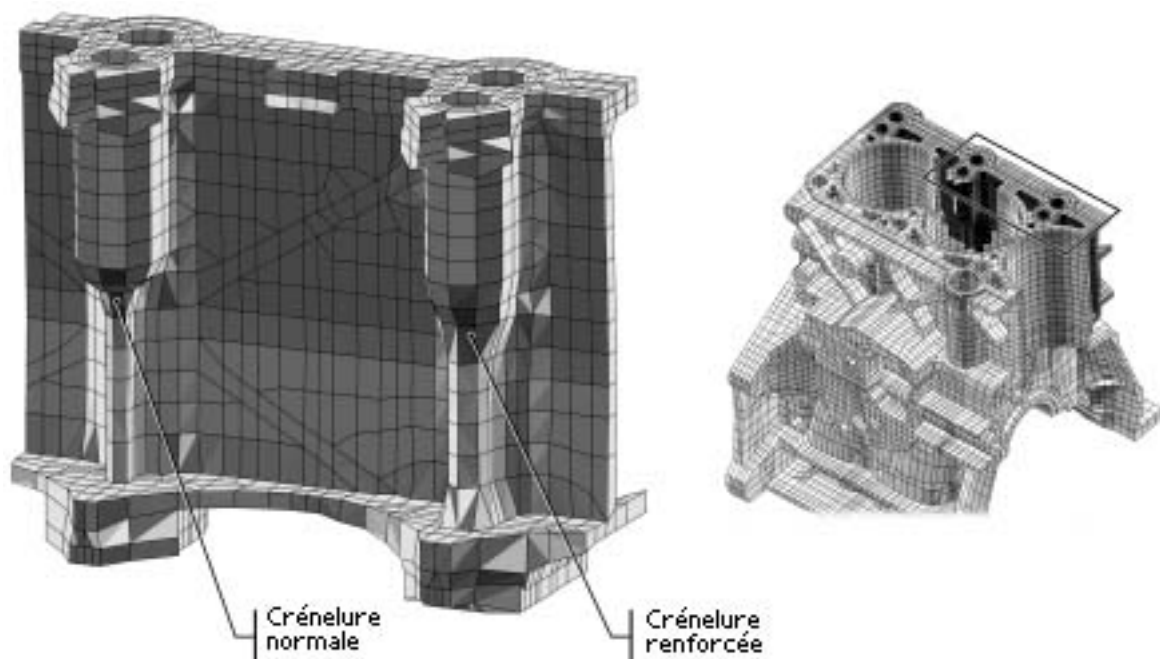
La base de la version 165 kW est le moteur 110 kW de l'AUDI A3, dans sa dernière version de développement, utilisée depuis le milieu de l'année 1998. Ci-joint un aperçu des caractéristiques techniques du moteur 165 kW.

Cylindrée	cm ³	1781
Perçage/course	mm	81/86,4
Relation perçage/course		1,07
Diamètre de soupape (E/A)	mm	27/30
Courses de soupape (E/A)	mm	7,67/9,30
Temps d'ouverture (pour 1mm course)		
DO	°KW après PMH	8
FO	°KW après PMB	18
DF	°KW avant PMH	18
FF	°KW avant PMB	38
Compression		8,9
Combustible	ROZ	98/95
Puissance nominale		kW 165
avec un régime de	t/min	5900
Couple	NM	280
avec un régime de	t/min	2200 - 5500
Performance spécifique	kW/dm ³	92,64
Pression moyenne maximale	bar	19,8
Régime de rupture (souple)	t/min	6800
Poids de moteur	kg	142

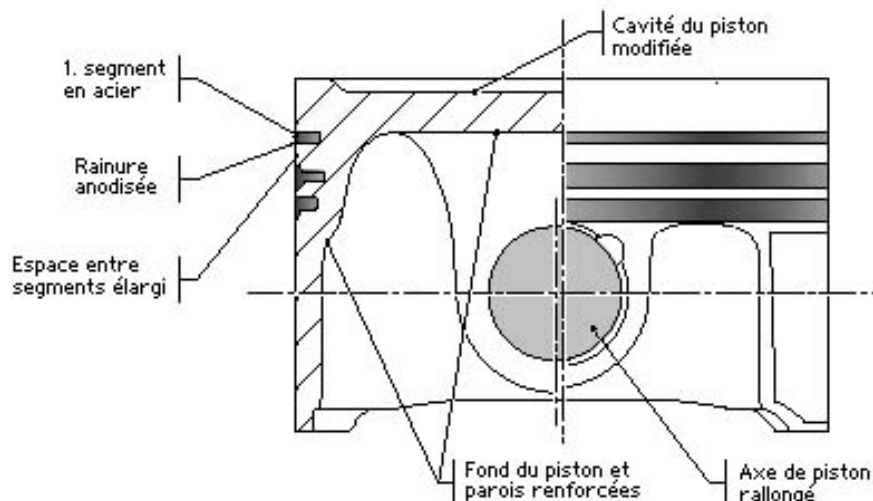
2.1 Bloc moteur

Les objectifs de fonctionnement en continu des motorisations des modèles « S » chez Audi correspondent à ceux de toutes les autres motorisations. En plus, des nombreux tests à hauts régimes sont effectués, avec des températures extérieures très élevées, permettant de garantir la durée de vie de ces moteurs dans des conditions thermiques défavorables.

Les fortes surcharges thermiques et mécaniques ont nécessité l'apport de quelques modifications au moteur de base et à la culasse. Pour mieux intercepter les forces générées par la pression de cylindre accrue, avec des pressions de combustion de plus de 100 bar, il a été nécessaire de renforcer les crénelures dans le carter des cylindres de manière optimisée. L'image ci-dessous montre cette la modification. Le vilebrequin et des bielles se sont montrés à la hauteur de ces surcharges. Les paliers des bielles ont cependant été remplacés par des modèles renforcés côté vilebrequin. Le comportement vibratoire modifié du vilebrequin a conduit à une adaptation du mélange de caoutchouc des amortisseurs de vibrations du bloc moteur.



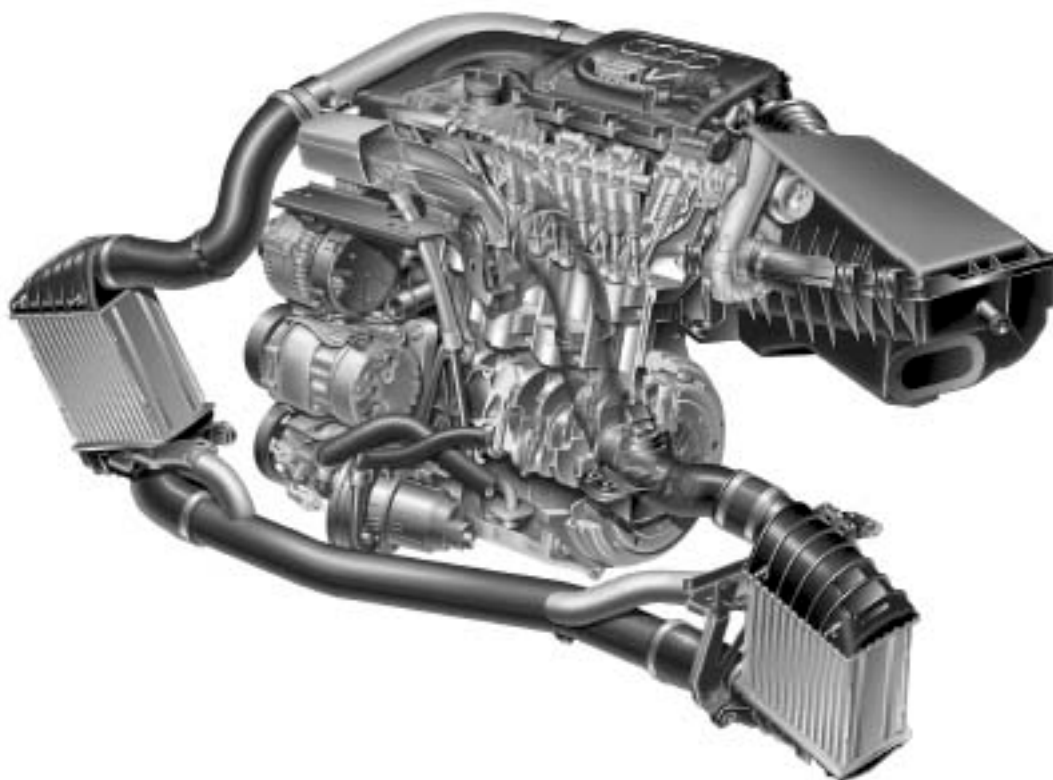
Des modifications significatives ont toutefois été mises en oeuvre pour le groupe de pistons. A part la modification de la cavité de piston visant l'abaissement de la compression de 9,5:1 à 8,9:1, le fond du piston et la paroi ont été renforcés. En plus, la partie arrière de la rainure du 1^{er} segment a été renforcée et rendu plus dure par anodisation, puis l'espace entre les segments a été augmentée de 0,5 mm. Le matériel utilisé pour le piston est un alliage très résistant aux températures, éprouvé et efficace.



Sur la tête de cylindre 5 soupapes, les modifications portent sur le flux du liquide de refroidissement au niveau des puits de bougie, afin de compenser l'augmentation de température dans ce secteur. Pour d'éviter l'ouverture des soupapes d'échappement sous la pression accrue des gaz d'échappement, elles ont été dotées d'un ressort renforcé. L'aération du carter a été optimisée de manière fonctionnelle, servant en même temps d'aération du bloc central et de la tête. Des nombreux composants annexes ainsi qu'une grande partie du bloc moteur ont été repris du modèle 110 kW.

2.2 Côté admission

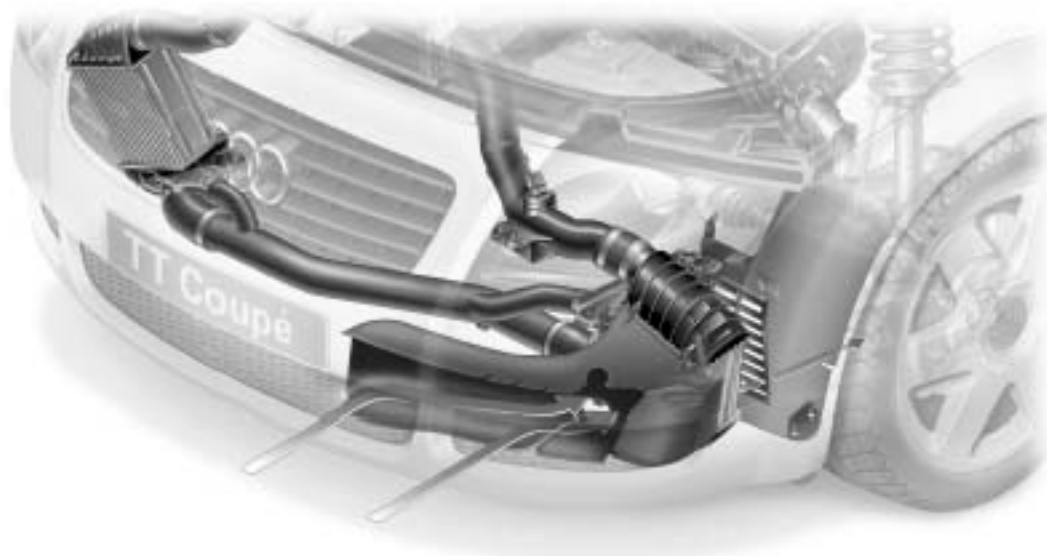
Le côté admission détermine dans une mesure non insignifiante la consommation en pleine charge, le niveau de performance et les caractéristiques de reprise d'un moteur turbocompressé. De ce fait, il était important d'arriver à un degré de rendement de l'échangeur air-air très élevé, tout en minimisant les volumes des conduits et en réduisant les pertes de flux. Lors de la phase de conception, il apparaît rapidement que le refroidissement avec le seul échangeur air-air du moteur de base était insuffisant. Les caractéristiques du moteur modifié avaient généré un volume d'air maximal de presque 700 kg/h avec une pression de charge maximale de 2.0 bar, et une température maximale de 140°C en sortie du turbocompresseur. Moyennant des recherches approfondies dans la soufflerie climatisée et à l'aide de plusieurs modèles, il a été développé un refroidissement air-air extrêmement efficace. L'image suivante montre la conduite d'air de compressé du filtre à air jusqu'à la rampe d'injection.



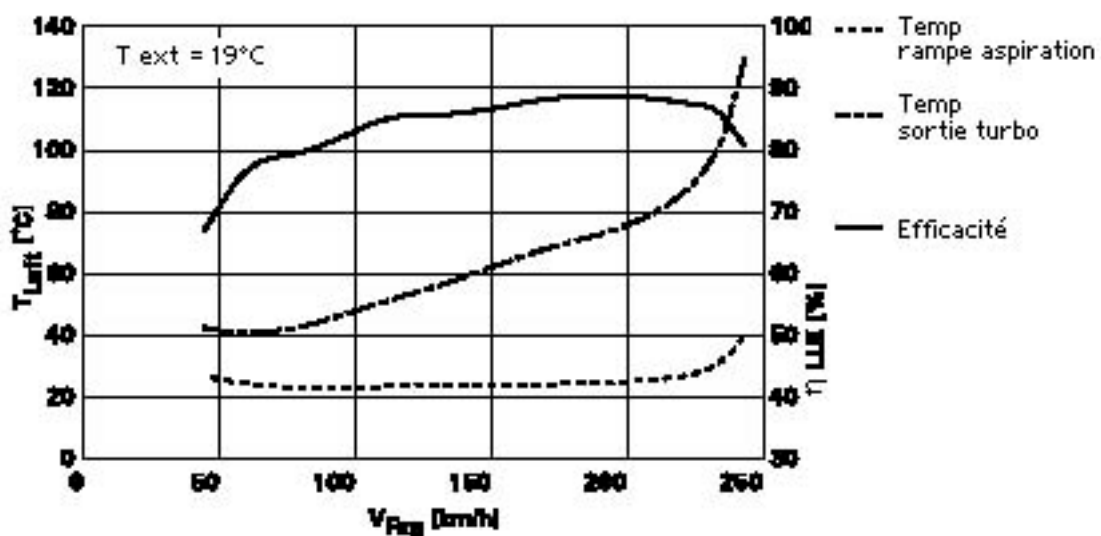
A causes des exigences mécaniques et thermiques élevées dans le circuit d'air jusqu'au premier échangeur d'air, les durites d'air ont été réalisées en technologie de silicone extrudée avec un tissu de fibres incorporé.

Au niveau de la conception, le collecteur d'admission ne différencie pas de la variante de base. En raison du concept du double échangeur air-air, il a été nécessaire de déplacer uniquement le l'unité de gestion du carburant avec son papillon. Le canal d'entrée de type Tumble et les temps de d'ouverture et fermeture en entrée et en sortie ont été repris du moteur de base.

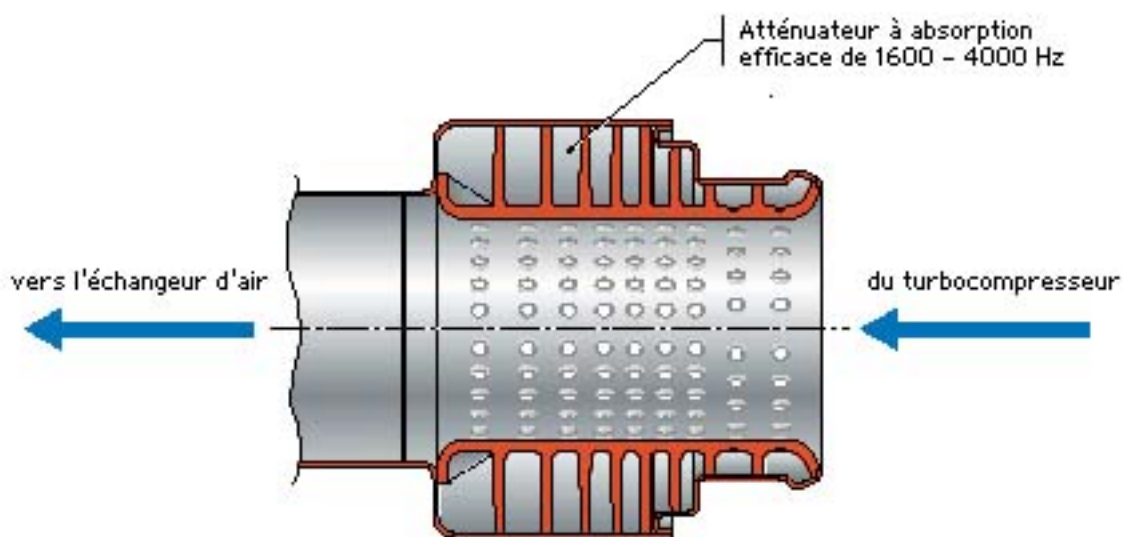
Afin de se retrouver avec une face avant peu modifiée par rapport à l'A3 de base, le pare-chocs avant de la S3 a été dessiné de façon à véhiculer l'air vers les échangeurs, situés de chaque côté devant les habillages de roues, non seulement à travers les ouvertures extérieures, mais aussi à travers les deux autres ouvertures centrales du pare-chocs. L'évacuation de l'air de refroidissement se fait à travers des rainures dans chaque habillage de roue. L'extraction de cet air chaud est accentuée par le tourbillon crée par les roues en mouvement. L'image suivante montre l'installation des deux échangeurs montés en série à l'exemple d'une Audi TT, de concept identique.



L'image suivante démontre de manière impressionnante la qualité du refroidissement d'air d'admission. Elle indique la variation de température de l'air d'admission depuis le filtre à air jusqu'au papillon. Sur la ligne correspondante au 6^{ème} rapport, à une vitesse de 220 km/h, la température d'air dans la canalisation d'admission ne dépasse jamais de plus de 10°C la température ambiante! A la vitesse maximale de 243 km/h, l'échauffement s'élève à seulement 21°C, ce qui correspond toujours à un rendement des échangeurs d'air de plus de 80% !



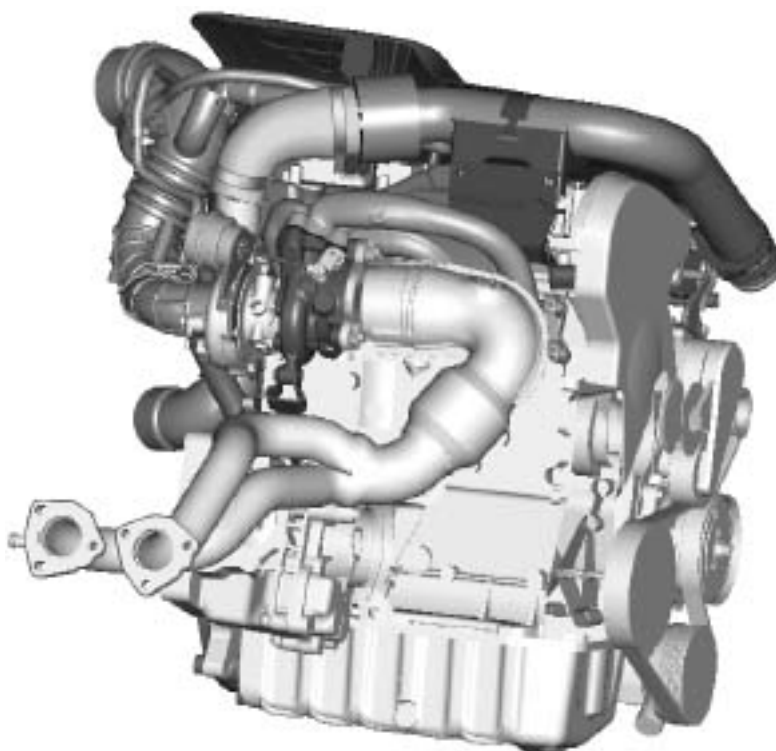
Outre le concept d'échangeur air-air mentionné, le côté admission dispose d'une particularité. Un atténuateur à absorption, implanté dans le conduit d'air comprimé, immédiatement en sortie du turbo. Il élimine de manière efficace les fortes pulsations de pression, qui se montraient très désagréables dans le comportement acoustique du moteur. L'efficacité de cet atténuateur large bande se trouve dans une plage de fréquences de 1600 à 4000 Hz.



2.3 Côté échappement

Le côté échappement est, comme sur le moteur de base, orienté vers la paroi de séparation avec l'habitacle. L'espace disponible est limité en haut par le caisson d'eau, et à droite et à gauche par les émetteurs du circuit de freinage, en fonction de la version volant à gauche ou à droite.

Le développement de l'ensemble des collecteurs gaz d'échappement/turbocompresseur illustré dans l'image suivante, était particulièrement difficile. Outre les aspects thermodynamiques, il était question d'assurer le comportement en cas d'accident, et de garantir le raccordement robotisé du collecteur primaire d'échappement, du turbocompresseur et du collecteur secondaire au moment de la fabrication.



La position de l'échappement, du côté abrité du moteur, ensemble avec l'énorme dissipation énergétique au-dessus du turbocompresseur, nécessitait forcément un refroidissement bien orienté. A travers plusieurs buses NACA, intégrées dans le compartiment moteur, l'air froid est emmené dans cette partie depuis le bas. En plus, à travers une ouverture active au-dessus du radiateur d'eau, l'air de refroidissement circule entre le capot et l'habillage décoratif du moteur en direction des collecteurs du gaz d'échappement. De plus, il a été renoncé aux protections thermiques habituelles des collecteurs d'échappement. En lieu et place, les éléments sensibles à la température dans la périphérie des collecteurs et du turbocompresseur, ont été protégés par des habillages thermiques.

2.3.1 Collecteurs d'échappement

Au début, les ingénieurs d'Audi favorisaient un collecteur tubulaire. Ce dernier ne pouvait cependant pas être réalisé dans la forme nécessaire et ne correspondait pas aux attentes thermodynamiques et mécaniques. Il était donc développé en fonte d'acier. Comme matière était utilisée un alliage NiSiCr 3552, également connu sous la désignation « D5 », laquelle excelle par sa solidité à sa résistance particulièrement élevée aux fissures. À l'aide de calculs de variation de charge et des vérifications au banc d'essai, il a été déterminé la géométrie et les raccordements des différents éléments. L'image suivante montre le tracé des conduits vu par-dessus. Pour pouvoir exploiter les impulsions des gaz d'échappement, le diamètre des conduits a été réduit au maximum. Le diamètre intérieur se trouve aux alentours de 28 mm. La solution idéale, c'est-à-dire une jonction 4 en 1 peu avant l'entrée de turbine, ne pouvait pas être réalisée avec le brin du cylindre 3, pour des raisons d'encombrement. Des essais n'ont cependant pas démontré un quelconque inconvénient de ce compromis.

Pour éviter le vrillage des brides de raccordement, le raccord côté échappement a été coupé entre chaque cylindre et équipé des trous oblongs, permettant de le faire glisser le long de la culasse. Les brins des conduits sont renforcés entre eux par des palmures et aux extrémités.

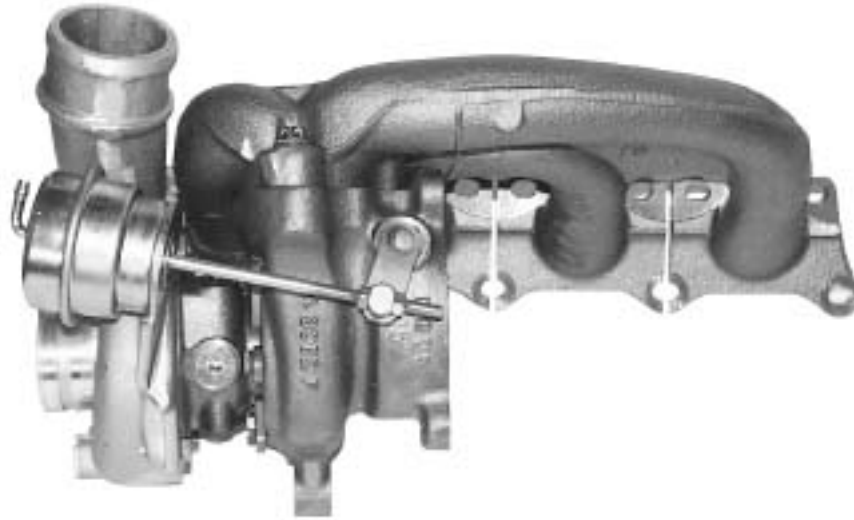


2.3.2 Turbocompresseur

Comme attendu, le turbocompresseur a été forcément un des points majeurs du développement. Il était nécessaire de faire cohabiter une bonne reprise, une rapide augmentation du couple, et un bon rendement, tout en restant dans la plage de la puissance nominale.

Dans tous les moteurs essence turbocompressés d'Audi se trouvent actuellement des turbines de la société 3K-Warner. Le moteur de base utilise un turbocompresseur refroidi par eau de la série K03 avec un compresseur 2072 GAA et une turbine 5.8.8 à flux sortant radial. Dès le début du développement, il était clair qu'on avait besoin des turbines et des compresseurs plus importants, et qu'il sera nécessaire de s'orienter vers la gamme K04. De plus, l'objectif était d'employer une turbine avec flux sortant axial, puisque les débits nettement supérieurs pouvaient causer des problèmes sur les modèles à flux sortant radial. Le flux sortant axial pouvait être réalisé en développant un coude primaire, qui réoriente le flux des gaz d'échappement d'environ 120°, puis les injecte par 2 voies dans la turbine.

Le résultat de ce développement est le turbocompresseur très compact représenté dans l'image suivante, de type K04 2275 ECD 5.8.2, auquel le corps de turbine a encore une fois réduite d'environ 20 mm par rapport à celui du K03 du V6-Biturbo. À l'aide de calculs de flux tridimensionnels, les contours intérieurs du corps de la turbine ont été optimisés dans le secteur de la Waste Gate, de telle sorte qu'on pouvait obtenir une diminution de la contrepression des gaz d'échappement devant turbine jusqu'à 300 mbar. La matière du corps de turbine correspond à celui du collecteur d'échappement.



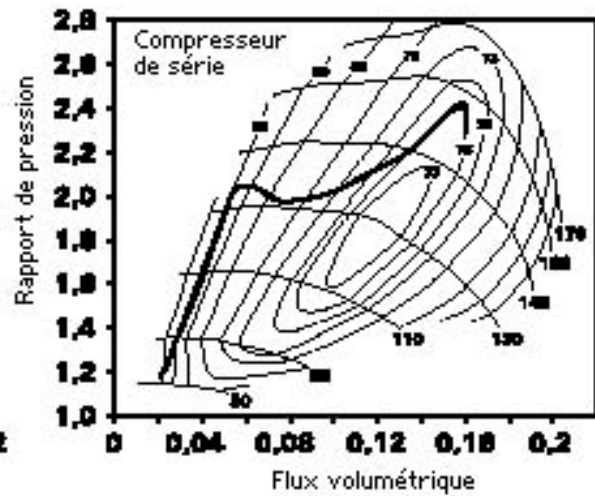
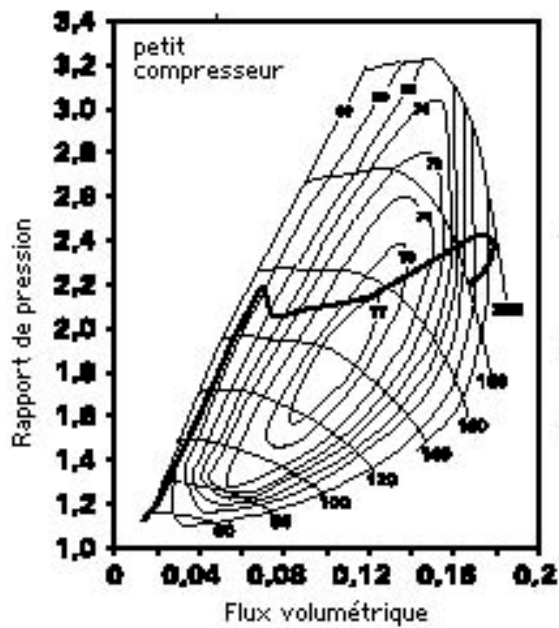
En partant des nombreux calculs et tests au banc d'essai pour déterminer les caractéristiques du turbocompresseur, nous allons essayer de vous donner un aperçu du processus de conception du compresseur. Nous allons comparer le compresseur tel qu'il était entré plus tard en série, et une des nombreuses alternatives avec un compresseur plus petit. Les plus importants critères de jugement étaient:

- Augmentation de couple statique
- Augmentation de couple dynamique
- Situation de la courbe d'exploitation du moteur dans le diagramme du compresseur par rapport à l'efficacité et au régime de la turbine.

Le petit compresseur disposait d'une augmentation du couple statique un peu plus rapide, avec pour conséquence que les 280 NM étaient disponibles d'environ 100 t/min plus tôt par rapport à la version plus grande.

Dans l'augmentation de couple dynamique, le petit compresseur ne pouvait toutefois pas en tirer un avantage, bien que doté d'un plus faible moment d'inertie de masse. Ceci était dû au régime plus élevé nécessaire au petit compresseur pour arriver à la pression de charge de consigne. A 2500 t/min, le besoin de régime était supérieur à 10%, et à 5000 t/min, la valeur avoisinait les 20% par rapport au grand compresseur.

La comparaison des deux diagrammes caractéristiques ci-dessous montre très clairement que le petit compresseur est trop faible pour les débits de masse d'air supérieurs à 5000 t/min. Le rendement dans la plage de la puissance nominale se trouve en dessous de 60 %, ce qui impliquerait une énorme contre-pression des gaz d'échappement avant la turbine et une température en sortie du compresseur nettement trop élevée. Le niveau de régime est déjà si élevé à hauteur de la mer, qu'une compensation d'altitude ne pouvait pas être réalisée sans courir le danger de surrégimes. Le compresseur de série par contre affiche dans cette plage un rendement de plus de 75% et le niveau de régime offre une marge de manoeuvre assez conséquente pour une compensation d'altitude.



2.4 Traitement des gaz d'échappement



Le moteur dispose d'une pompe à air secondaire lié au moteur qui, à travers une galerie dans la tête de culasse, injecte de l'air frais dans la tubulure d'échappement.

Le propulsion quatre exige un catalyseur à deux voies. Les deux monolithes en métal (300 cpsi) ont une longueur de 150 mm et un diamètre de 93 mm. Comme revêtement est utilisé un mélange de platine, palladium, et de rhodium, dans des proportions 1:14:1.

Le véhicule correspond aux valeurs limites des gaz d'échappement suivant les Normes EURO EU III-D. La conception du collecteur secondaire en sortie du turbocompresseur permet l'intégration pot catalytique primaire, ce qui permet de remplir les conditions d'antipollution très restrictifs.

2.5 Gestion du moteur

En tant que gestion de moteur, il a été installé le système ME 7.5 de la société Robert Bosch. Ce système, avec gestion électronique du papillon, offre une structure de fonctionnement orientée vers le couple, c.-à-d. toutes les fonctions influençant le couple sont résumées et coordonnées. Il en résulte une demande de couple, traduit à travers tous les organes opérationnels disponibles comme l'ouverture du papillon, la temps d'injection, les angles d'allumage et la pression du turbocompresseur (Position de la Waste-Gate).

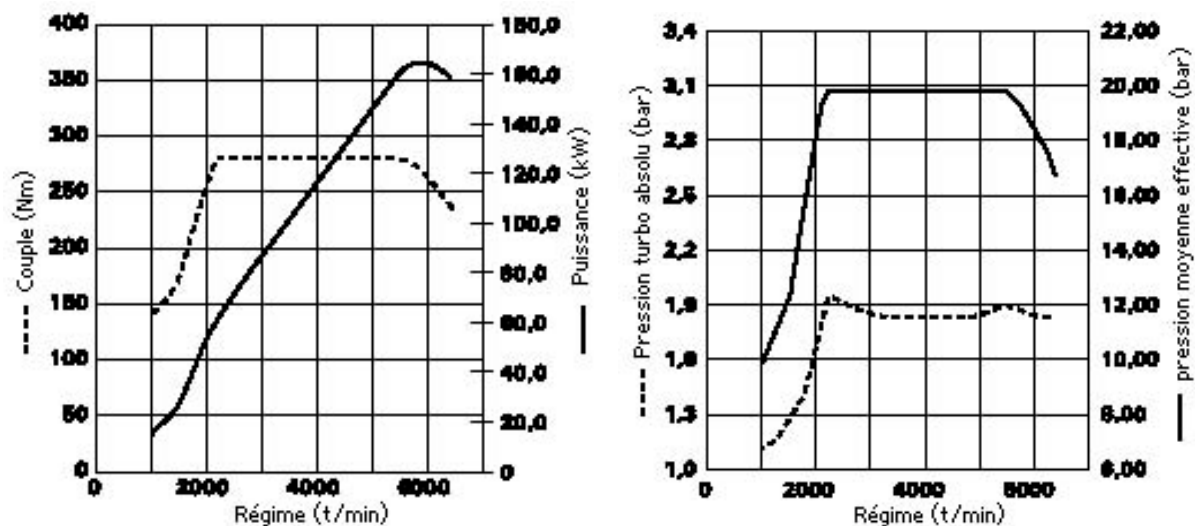
Parmi les multiples fonctionnalités, nous allons seulement examiner ceux particulièrement intéressantes pour un moteur à turbocompresseur.

- Le couple demandé par le conducteur est réalisé à partir de la combinaison la plus optimisée entre l'ouverture du papillon et la pression de suralimentation du turbocompresseur.
- Lors d'un fonctionnement dynamique à charge partielle, le papillon peut d'abord être ouvert au-delà de la section stationnaire nécessaire, afin de favoriser la montée en régime du turbo
- A partir d'une intervention de la gestion du moteur nécessaire pour cause de cliquetis, il est possible de déterminer la qualité du carburant. Lors d'une utilisation de carburant à faible valeur en octane, la pression de suralimentation est modifiée pour obtenir le meilleur compromis entre couple et consommation d'essence.

3. Résultats

3.1 Comportement en pleine charge

La courbe de couple en pleine charge illustré ci-après du S3 montre une augmentation très rapide du couple. De 2200 t/min à 5500 t/min, le couple maximal de 280 Nm est disponible. La puissance nominale de 165 kW est atteinte dès 5900 t/min. La performance spécifique réalisée de 125 CV/litres, représente une valeur extraordinaire parmi les moteurs de série.



La pression de moyen effective résultante s'élève à presque 20 bar. Dans le secteur autour de 2200 t/min, on atteint une pression suralimentation absolue de plus de 1.9 bar.

3.2 Performances

Avec le 1.8l-5VT-165 kW décrit ci-dessus, est né un moteur capable d'unir un couple élevé lors des faibles régimes avec une puissance nominale considérable, aboutissant ainsi à une très large plage d'utilisation très. Les modèles S3 construits entre 1998 et 2001 disposent de la même gestion moteur que la version 165 kW, le couple a toutefois été limité à 270 Nm et la performance à 154 kW.

4. Conclusion

Avec cette motorisation haut de gamme employée dans la S3 et dans le TT, il est apparu un agrégat qui malgré sa performance spécifique très élevée dispose d'une grande disponibilité dans l'utilisation quotidienne. En raison de ses caractéristiques de couple, il est possible d'adapter une conduite plutôt fainéante en ce qui concerne la nécessite de passage des rapports. La consommation d'essence se trouve à une place étonnante, normalement occupée par des véhicules à plus faible motorisation.