



10ème cycle de conférences

Utilisation rationnelle de l'énergie dans les moteurs à combustion interne et environnement



La suralimentation dans les moteurs à combustion interne

Hamid Lahjaily, Renault, Direction Conception et Technologies

Michel Toussaint, CNAM, chaire de Turbomachines



10ème cycle de conférence Cnam / SIA, Paris 10 mars 2009

1



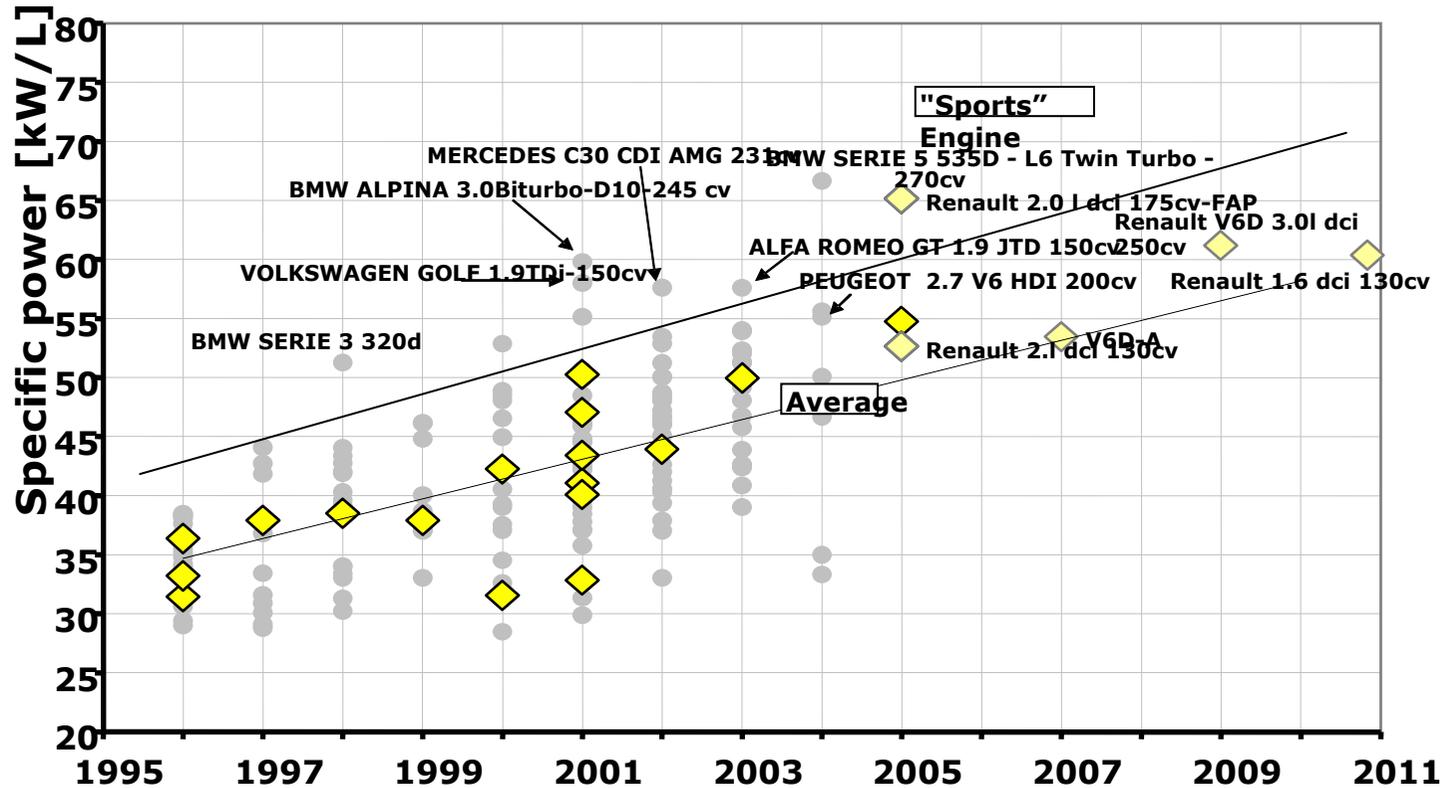
Plan de la conférence

- **Intérêt et enjeux de la suralimentation**
- **La suralimentation par les turbocompresseurs**
 - Fonctionnement du compresseur
 - Le pompage des compresseurs
 - Fonctionnement de la turbine
- **La suralimentation et la dépollution**
- **La suralimentation à double étage**
- **Conclusion**
- **Questions / Réponses**

Intérêt et enjeux de la suralimentation

- **Course à la puissance**
- **Consommation : Downsizing**
- **Dépollution**
- **Agrément de conduite : Brio**
- **Fiabilité : Densité d'énergie**

Les besoins en performance spécifique



Augmentation continue des puissances spécifiques tant en essence qu'en Diesel

+15 kW/L en 10 ans en Diesel (+40 % / 1995 !!)

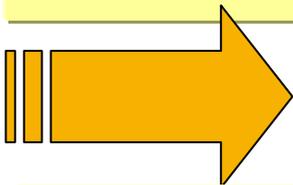
+10 kW/l en 10 ans en Essence (+16%/1995)

Augmentation continue des couples spécifiques

+60 Nm/L en 10 ans en Diesel (+66 % / 1995 !!)

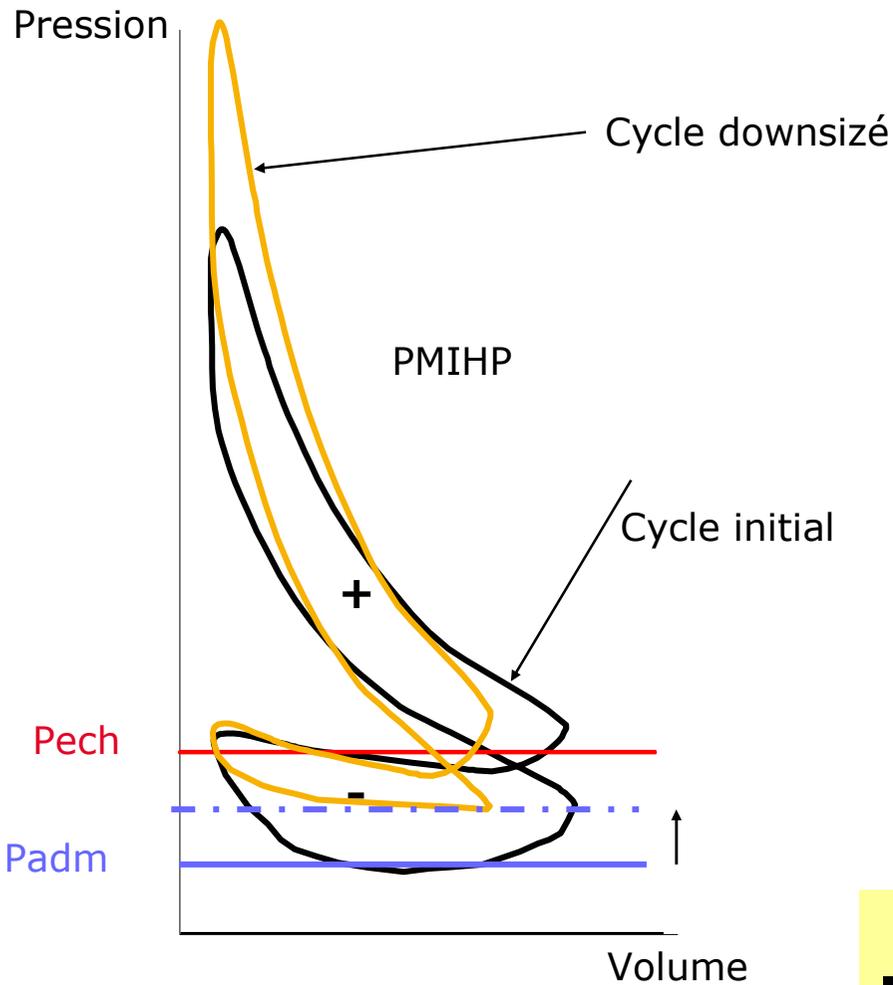
Les besoins de réduction de consommation

- **Engagement CAFE de l'ACEA (Corporate Average Fuel Economy)**
 - **140g/km en 2008**
 - **120g/km en 2012 (-30% par rapport à 2000)**
 - **Règlementation Europe : 130 g/km en 2015.**
- **Labelling CO2**
- **Incitations Fiscales : Bonus/Malus**
- **Prix du pétrole**



- **Downsizing : Réduire la cylindrée des moteurs et suralimenter**

Le cycle moteur essence et downsizing

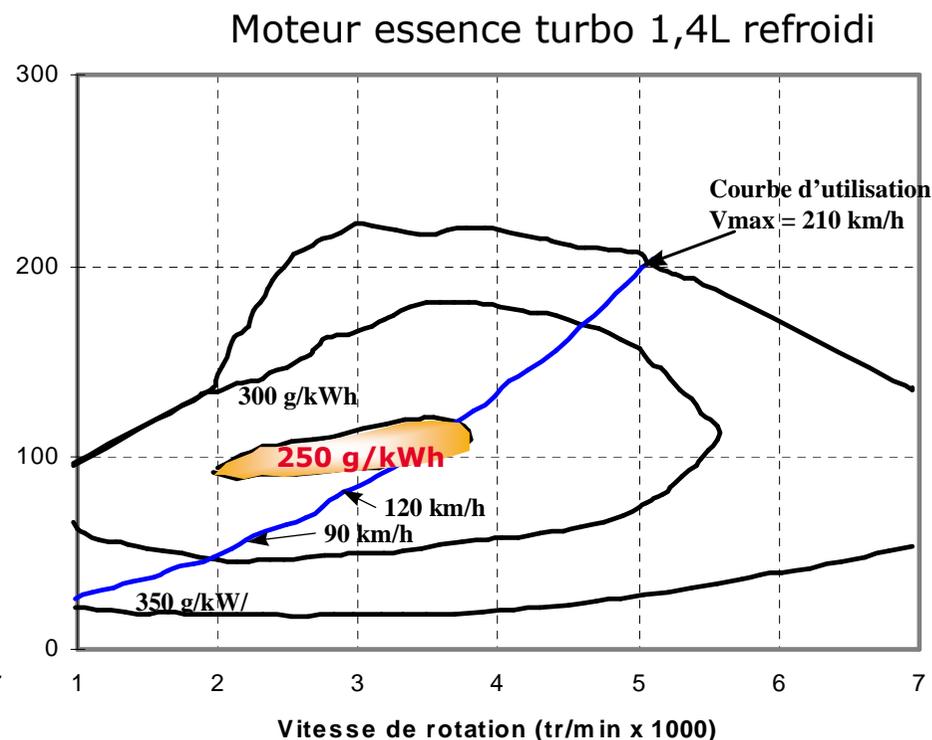
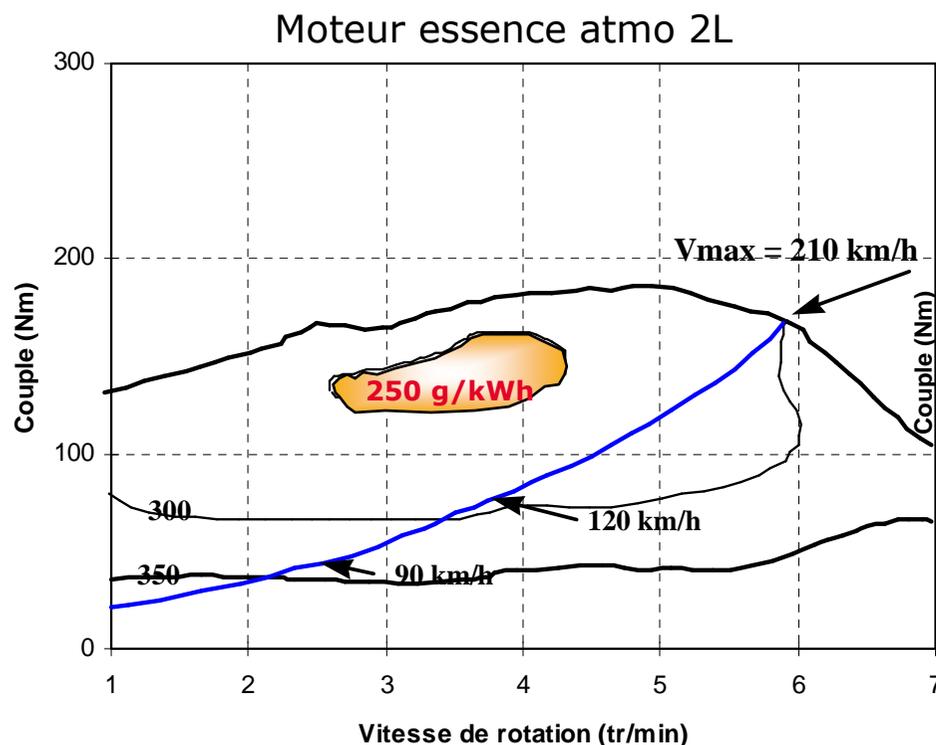


Augmentation des pressions cylindre

Réduction du vannage à l'admission

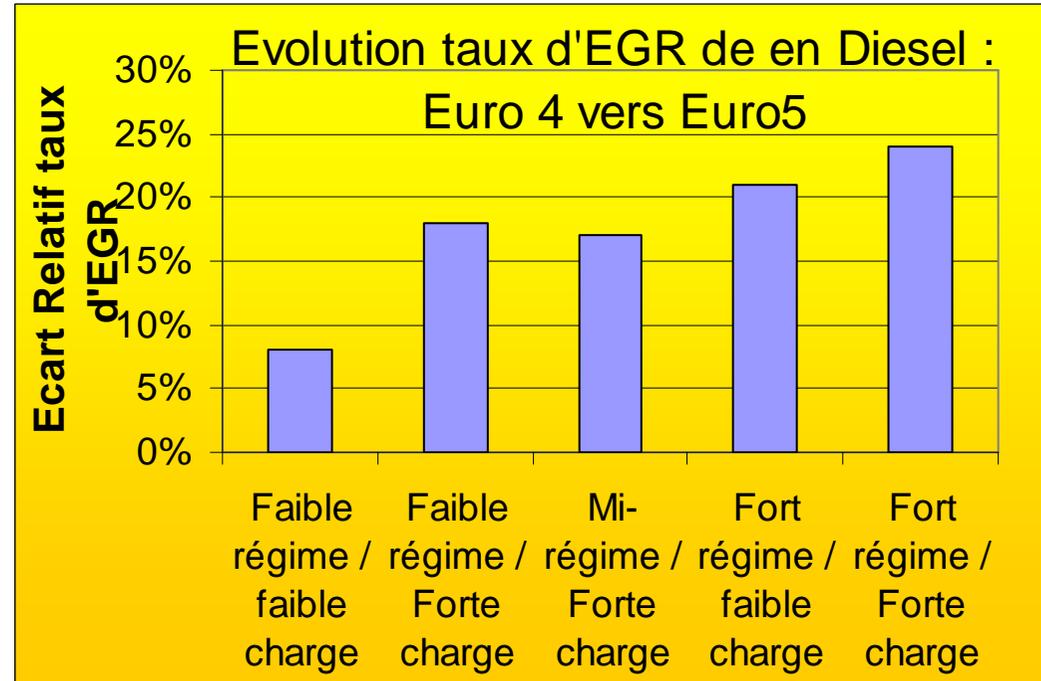
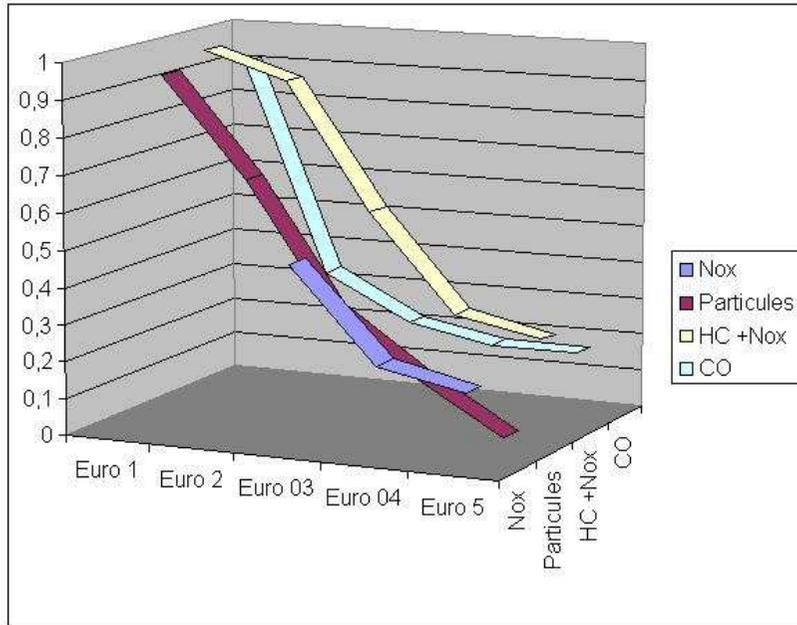
Gain de conso par la diminution de la $PMIBP < 0$

Une illustration sur les courbes d'utilisation



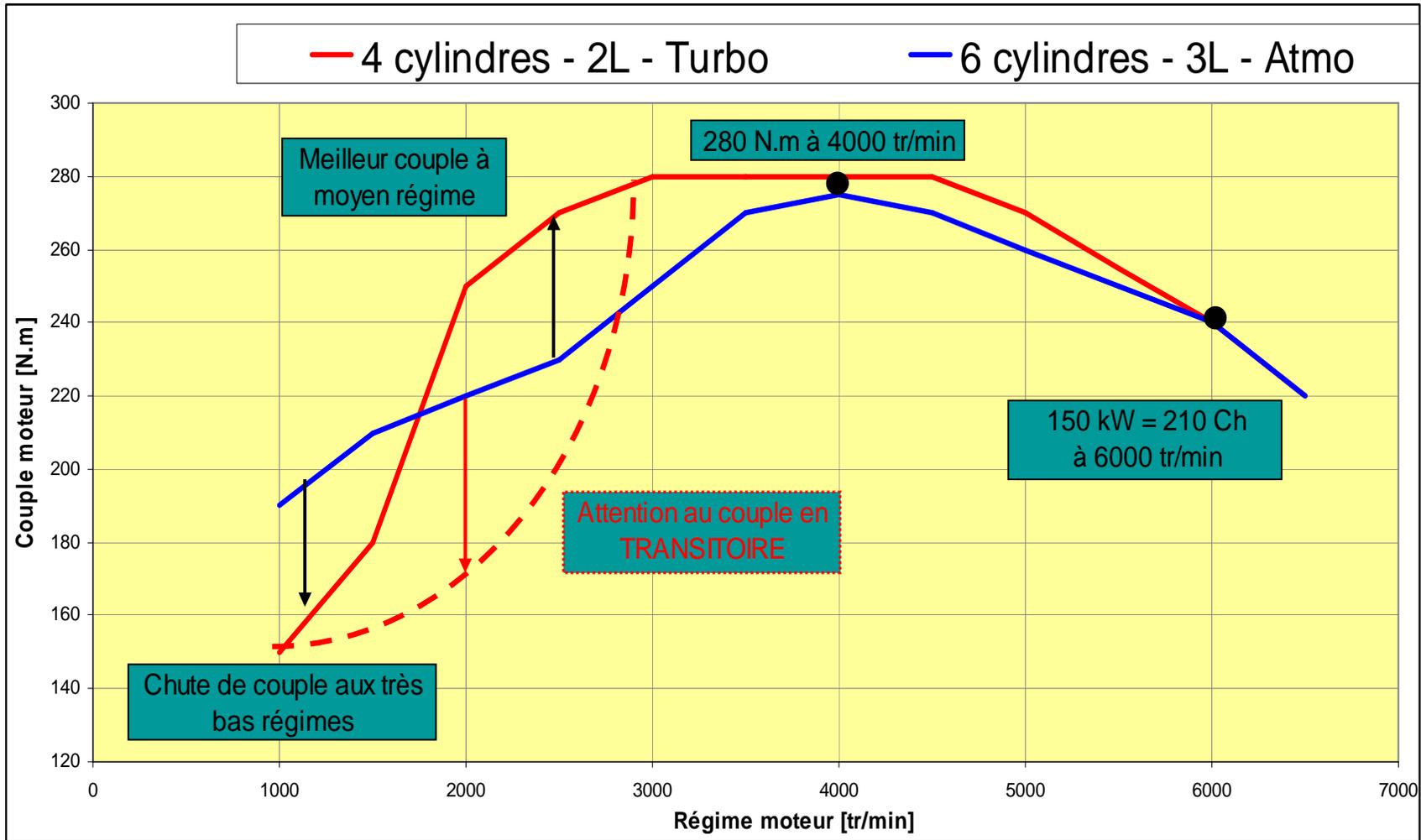
	Atmo 2L	Turbo 1.4L
90 km/h	325 g/kWh	290 g/kWh
120 km/h	300 g/kWh	260 g/kWh
Vmax	300 g/kWh	320 g/kWh

Les besoins de dépollution



**Diesel : système d'injection, combustion du type homogène,
FAP, Nox trap, **forts taux EGR****

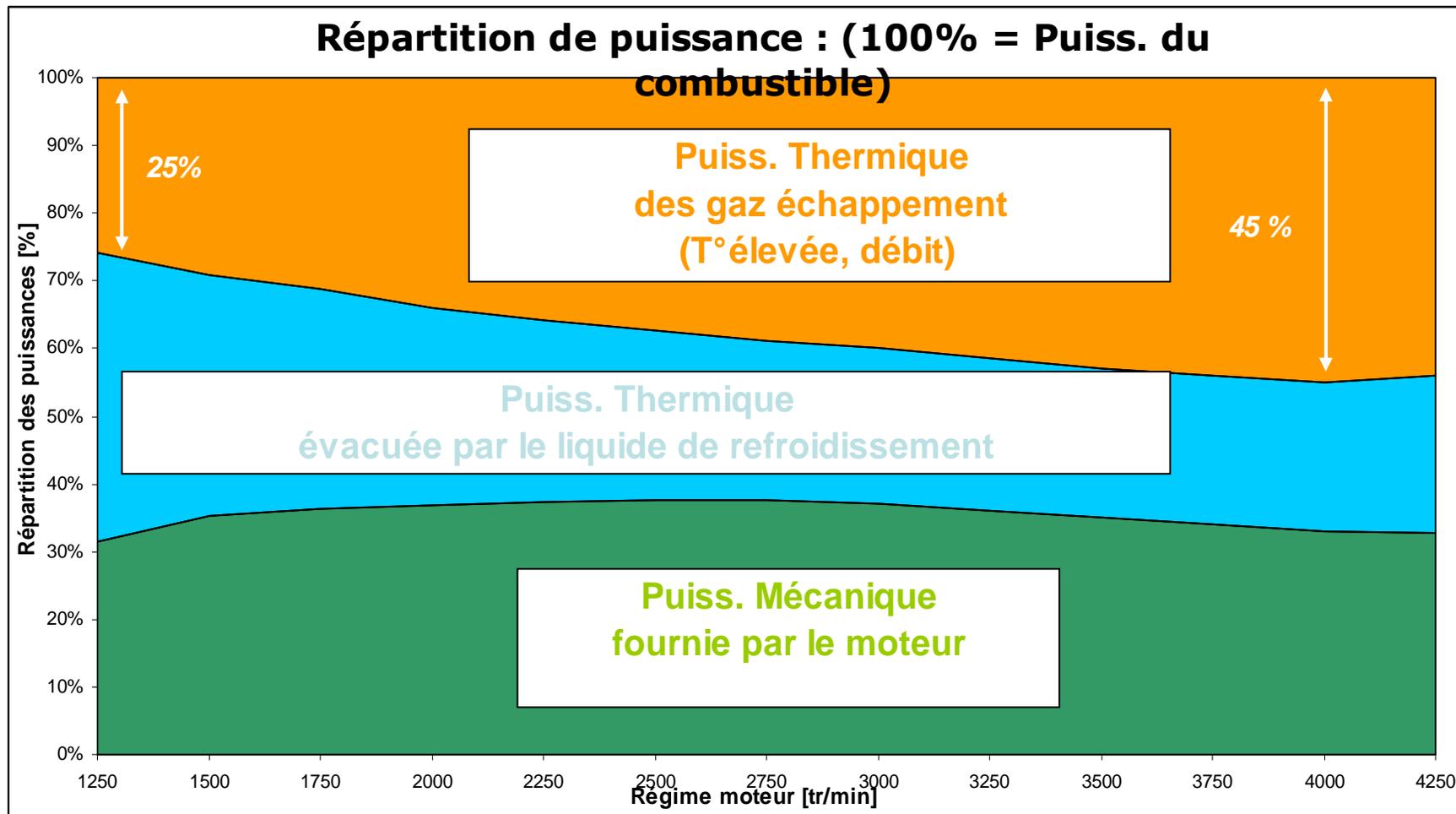
Downsizing et Brio



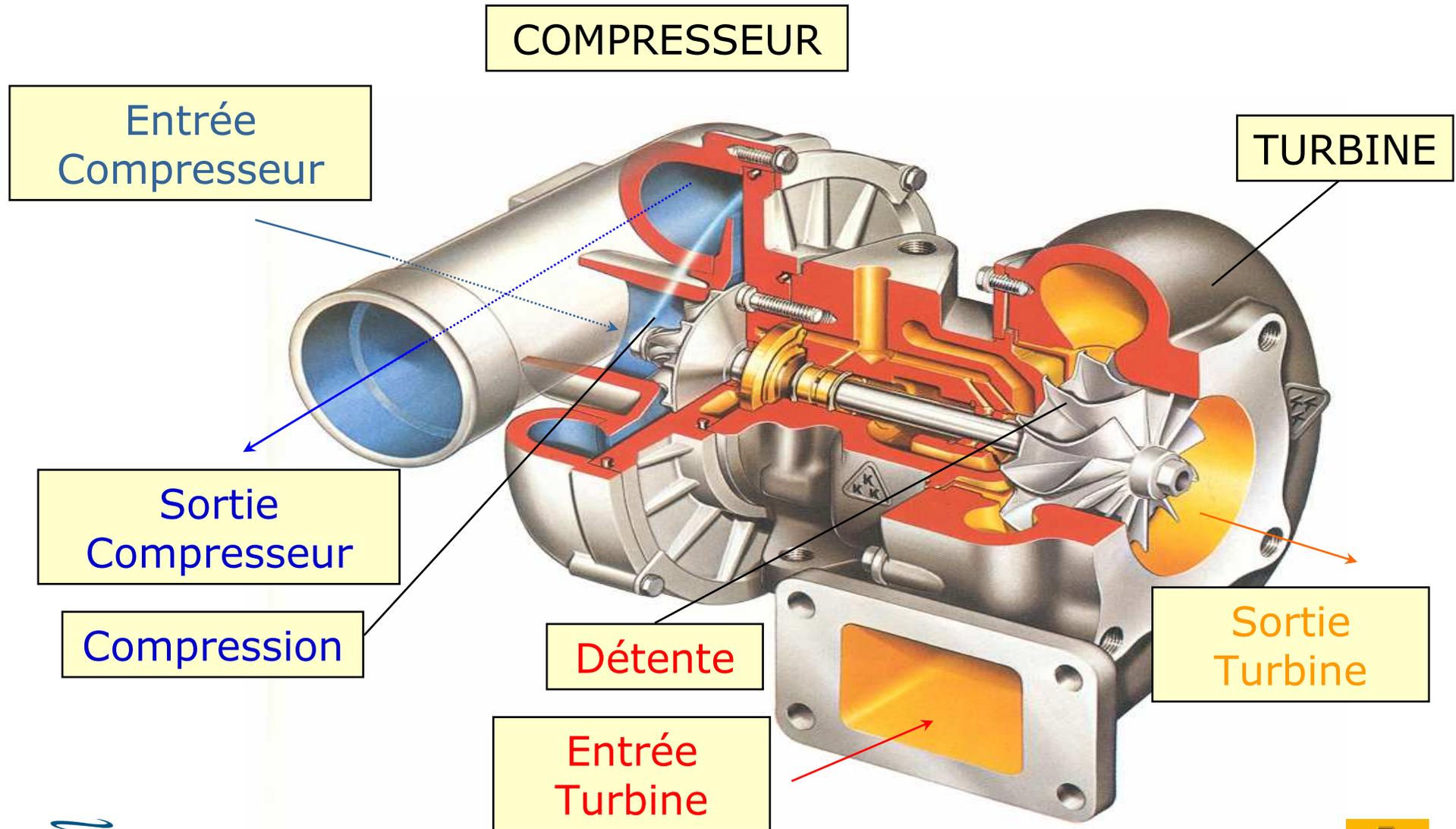
La suralimentation par les turbocompresseurs

Le Compresseur

Intérêt du turbocompresseur

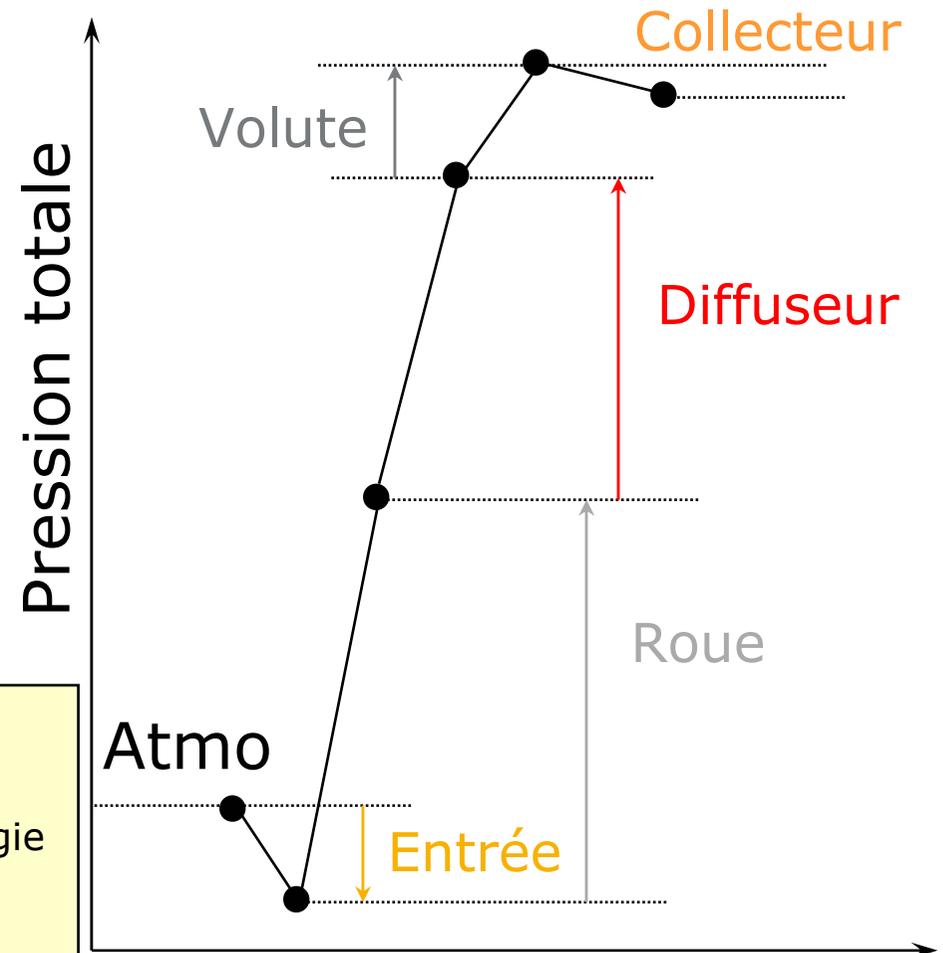
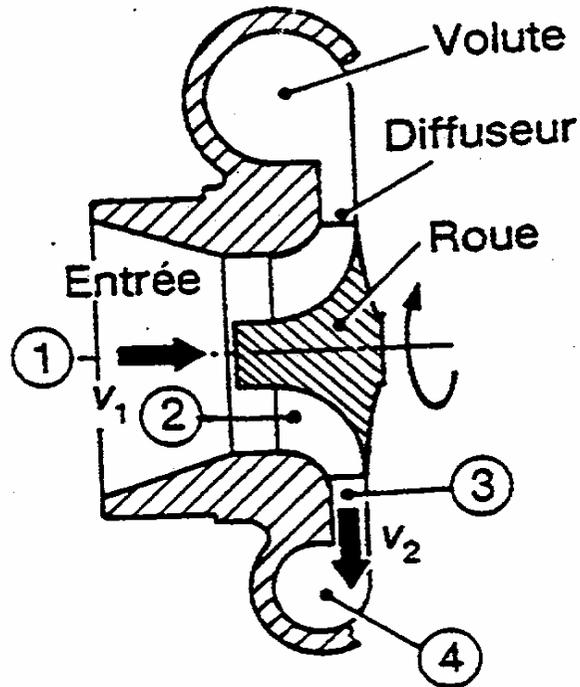


Le Turbocompresseur



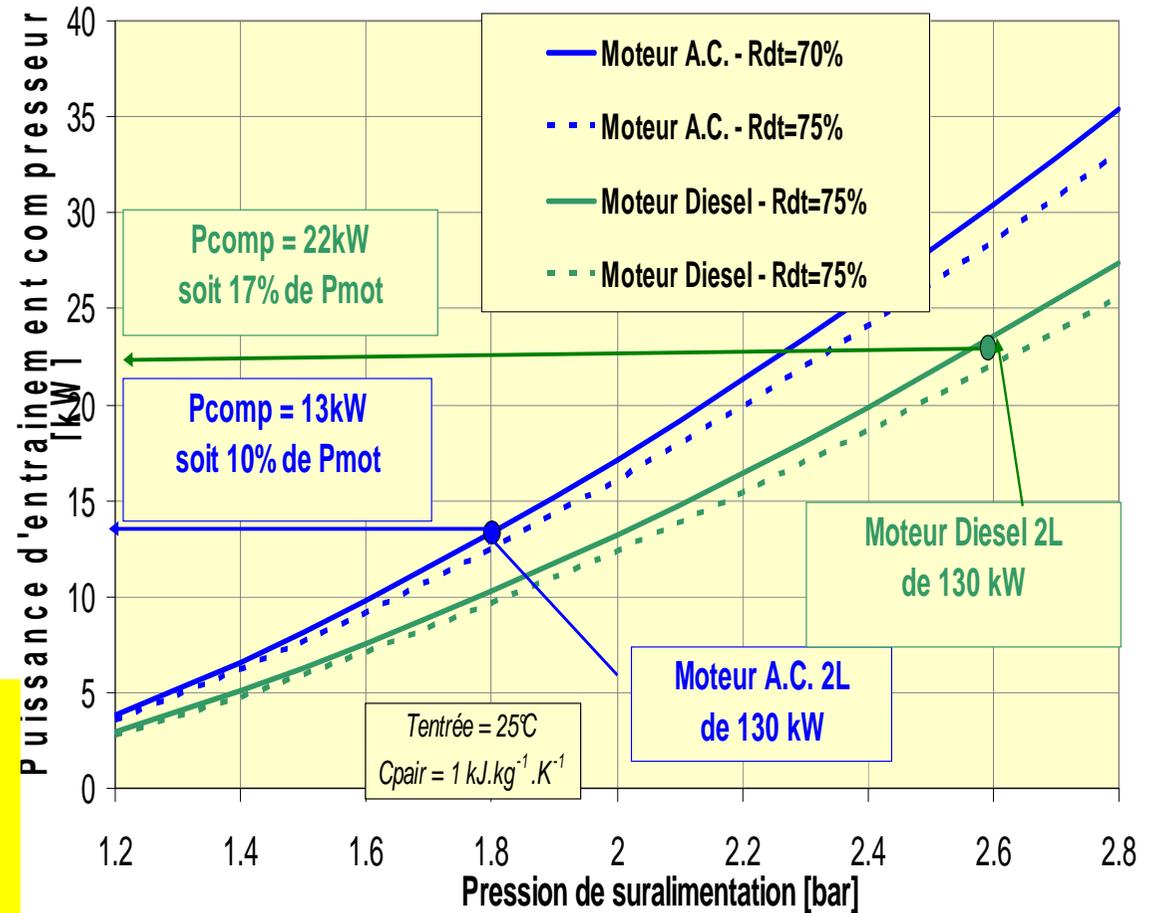
10ème cycle de conférence Cnam / SIA, Paris 10 mars 2009

Le Compresseur - Description



- L'**Entrée** : collecte les gaz issus du filtre à air
- La **Roue** : apporte l'énergie au fluide
- Le **Diffuseur** : assure la transformation de l'énergie due à la vitesse du fluide en énergie de pression
- La **Volute** : collecte l'ensemble des gaz comprimés et les dirige vers le moteur
- Le **Collecteur** : dirige les gaz vers la sortie

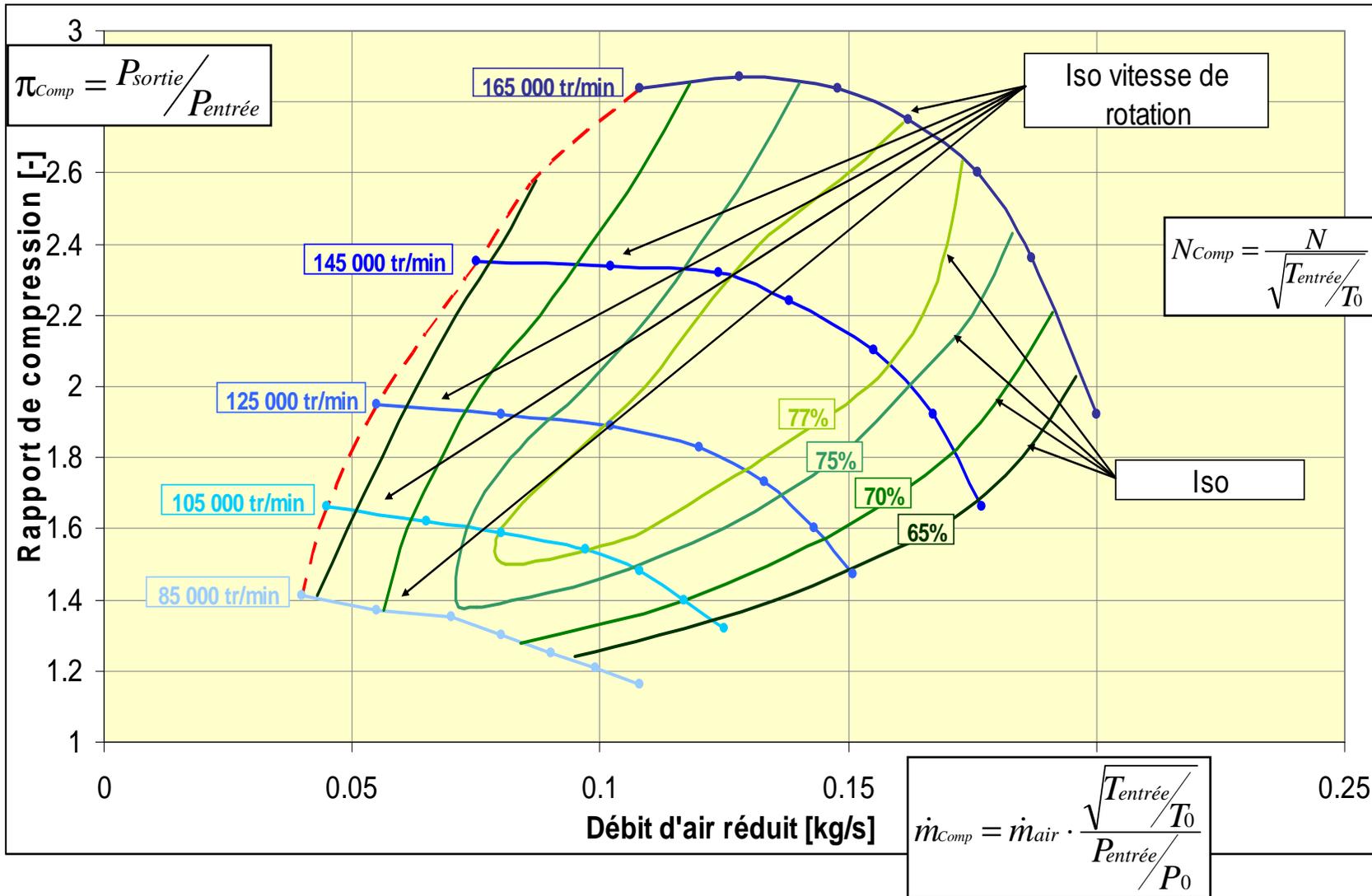
Compresseur – Puissance d'entraînement



Diesel : 17% de la puissance à l'arbre
 Essence : 13% de la puissance à l'arbre

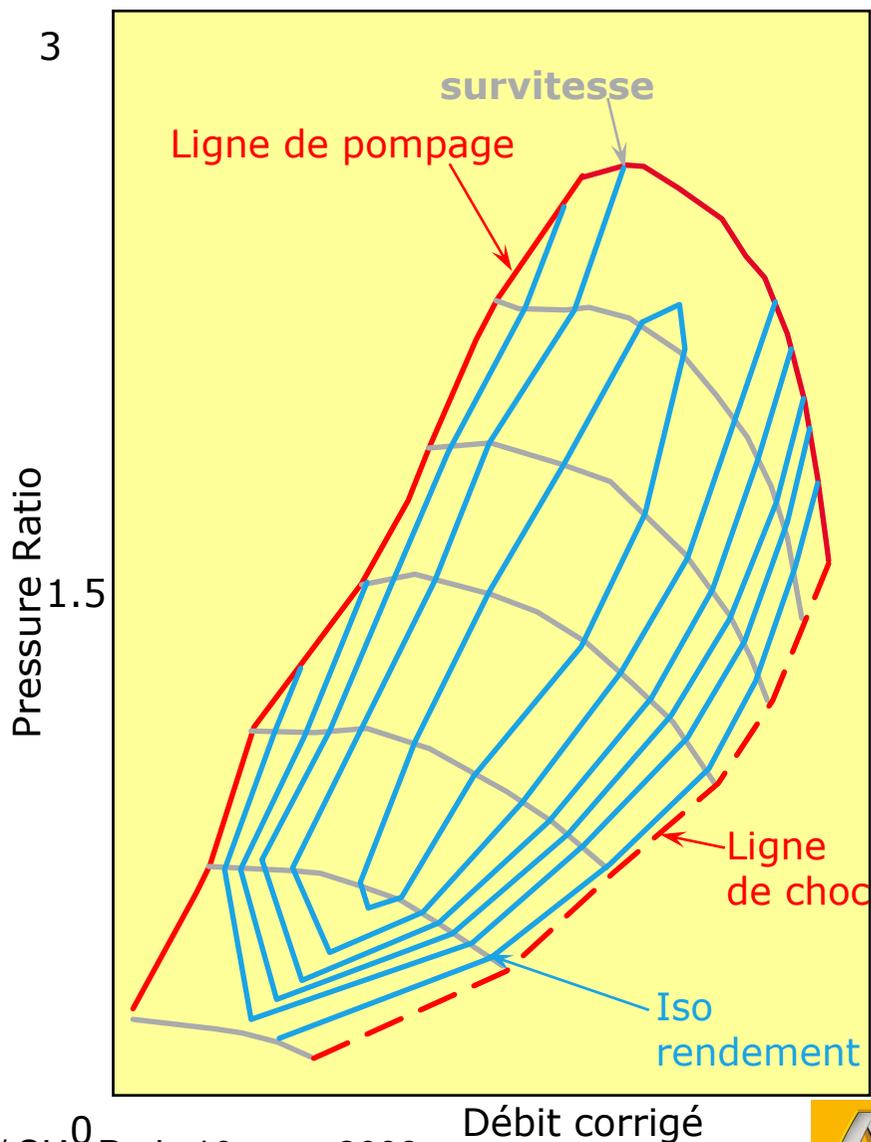
Facteur d'ordre 1 : le besoin en air.
Diesel : 1kW = 1.4 g/s **Essence : 1 kW = 1 g/s**

Compresseur – Caractéristiques d'utilisation



Limites du champ compresseur

- La largeur de champ d'un compresseur est définie par les débits à la ligne de pompage (surge line) à gauche et la ligne de choc (ou vitesse maxi) à droite
- la ligne de choc représente la ligne de débit maxi (rend = 65 %)
- la ligne de vitesse maxi une limite mécanique liée à la fatigue des aubages : elle est donnée par le fournisseur
- la ligne de pompage est définie quand le compresseur devient instable causant bruits et instabilités moteur



La suralimentation par les turbocompresseurs

Le pompage des compresseurs

Tout compresseur (turbomachine)
rencontre à faible débit une zone de
"non fonctionnement" fortement
instationnaire et dangereuse.
C'est la *zone de pompage*.

Le pompage se manifeste par une instabilité
aérodynamique de l'écoulement interne,
affectant l'entité

compresseur - circuit associé.

Cette instabilité survient lors de tentative de
fonctionnement à

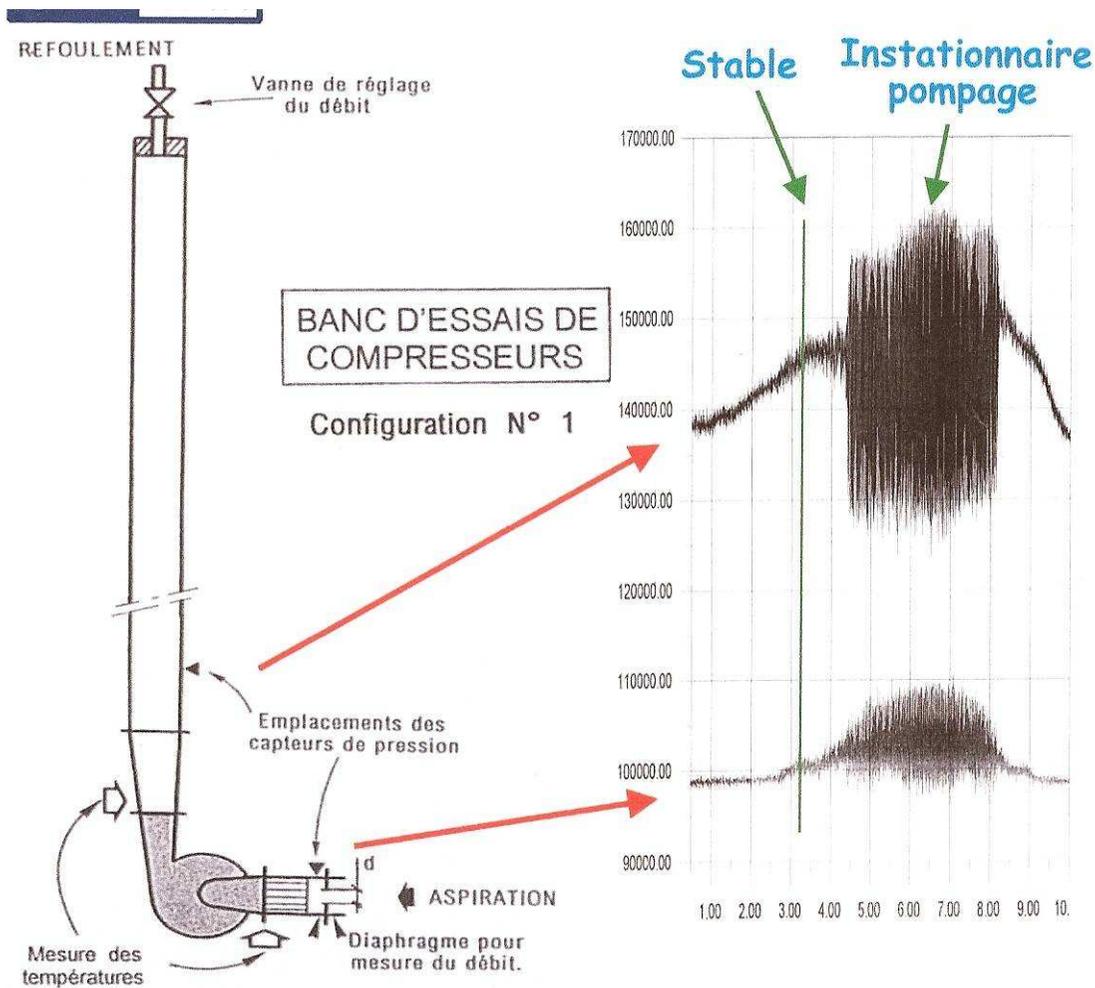
trop faible débit
du compresseur.

Lorsque le débit diminue, la pression délivrée par le compresseur résulte de 2 effets:

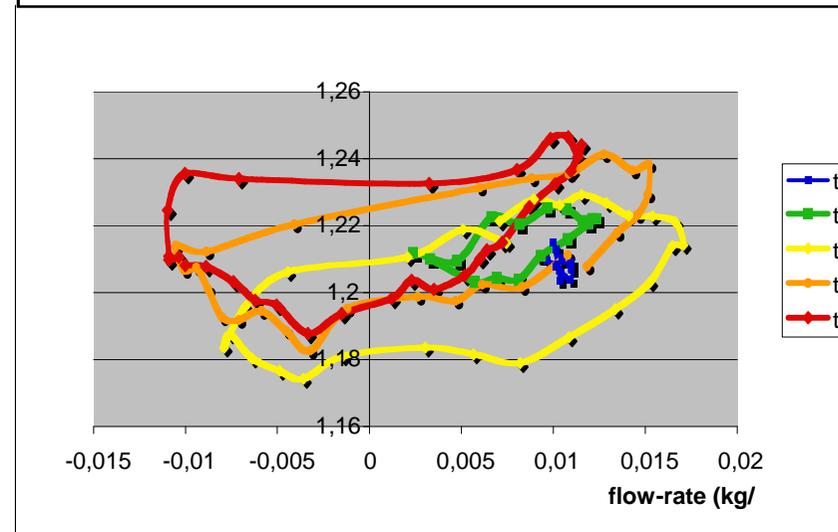
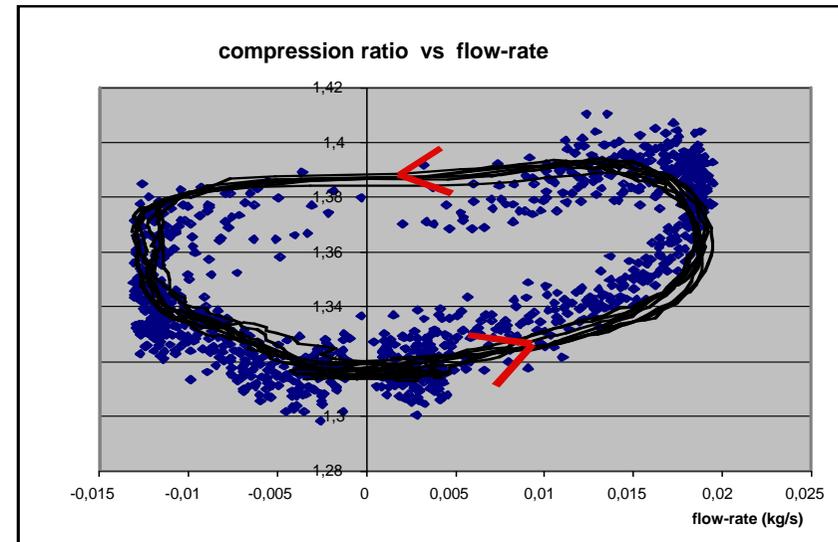
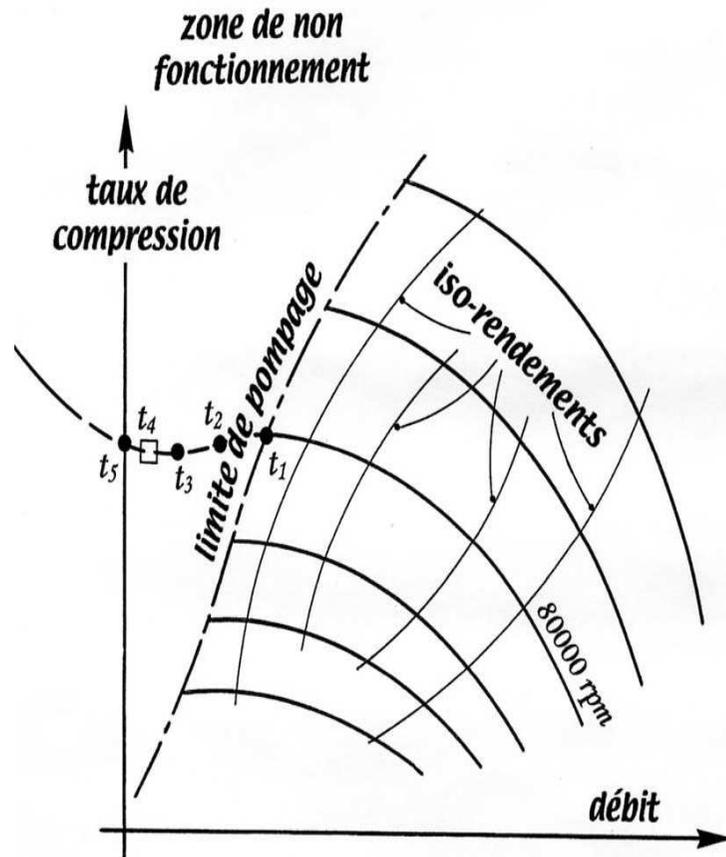
- 1) Le travail augmente (théorème d'Euler)
- 2) des recirculations internes apparaissent et les pertes augmentent.

Au point de taux de compression maximum, l'augmentation des pertes compense l'augmentation d'énergie.

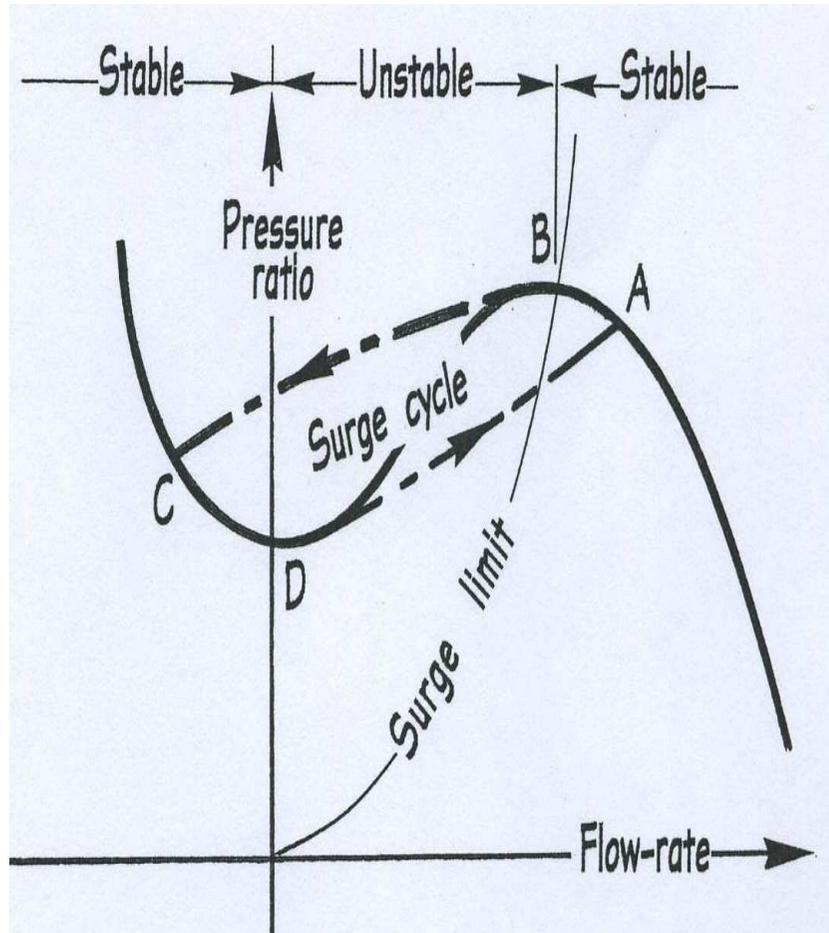
Au delà de ce point, l'énergie apportée par le rotor ne suffit plus à contrer l'augmentation des pertes et le taux de compression diminue.



Le "décrochage aérodynamique" des aubages (à incidence élevée) provoque une inversion du débit interne depuis le refoulement (haute pression) vers l'aspiration (basse pression). Il en résulte d'importantes fluctuations de débit et de pression. Si l'ensemble moteur-turbocompresseur est amené à fonctionner dans cette plage, des instabilités seront ressenties par le conducteur et les passagers du véhicule, instabilités pouvant être préjudiciables à l'ensemble propulsif.



La position de la ligne de pompage et l'amplitude des instationnarités de pression et de débit dépendent du circuit associé au compresseur.



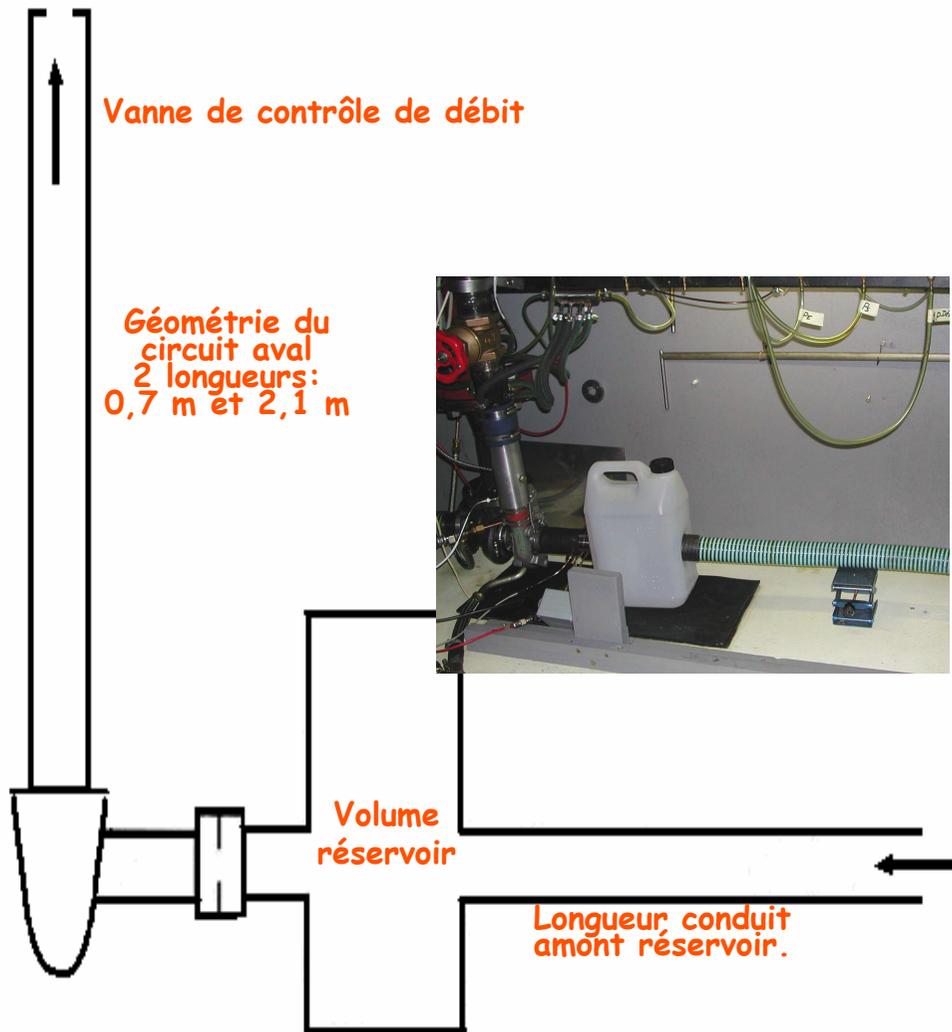
Les tentatives de fonctionnement dans la zone de pompage, se traduisent par:

- des vibrations importantes
- des fluctuations de pressions très instationnaires
- une température qui augmente fortement et ne se stabilise jamais
- un bruit intense émis par le compresseur
- une détérioration de la machine et de son circuit associé.

Banc d'essais de Turbochargeurs



Influence de la géométrie amont sur les caractéristiques au pompage des compresseurs



	Longueur conduit amont réservoir (mm)	Volume réservoir (dm ³)
AR1	440	2
AR2	700	2
AR3	1000	2
AR4	440	5
AR5	700	5
AR6	1000	5
AR7	440	20
AR8	700	20
AR9	1000	20

Quelques résultats expérimentaux.

Influence du volume amont sur l'amplitude et la fréquence des instationnarités.

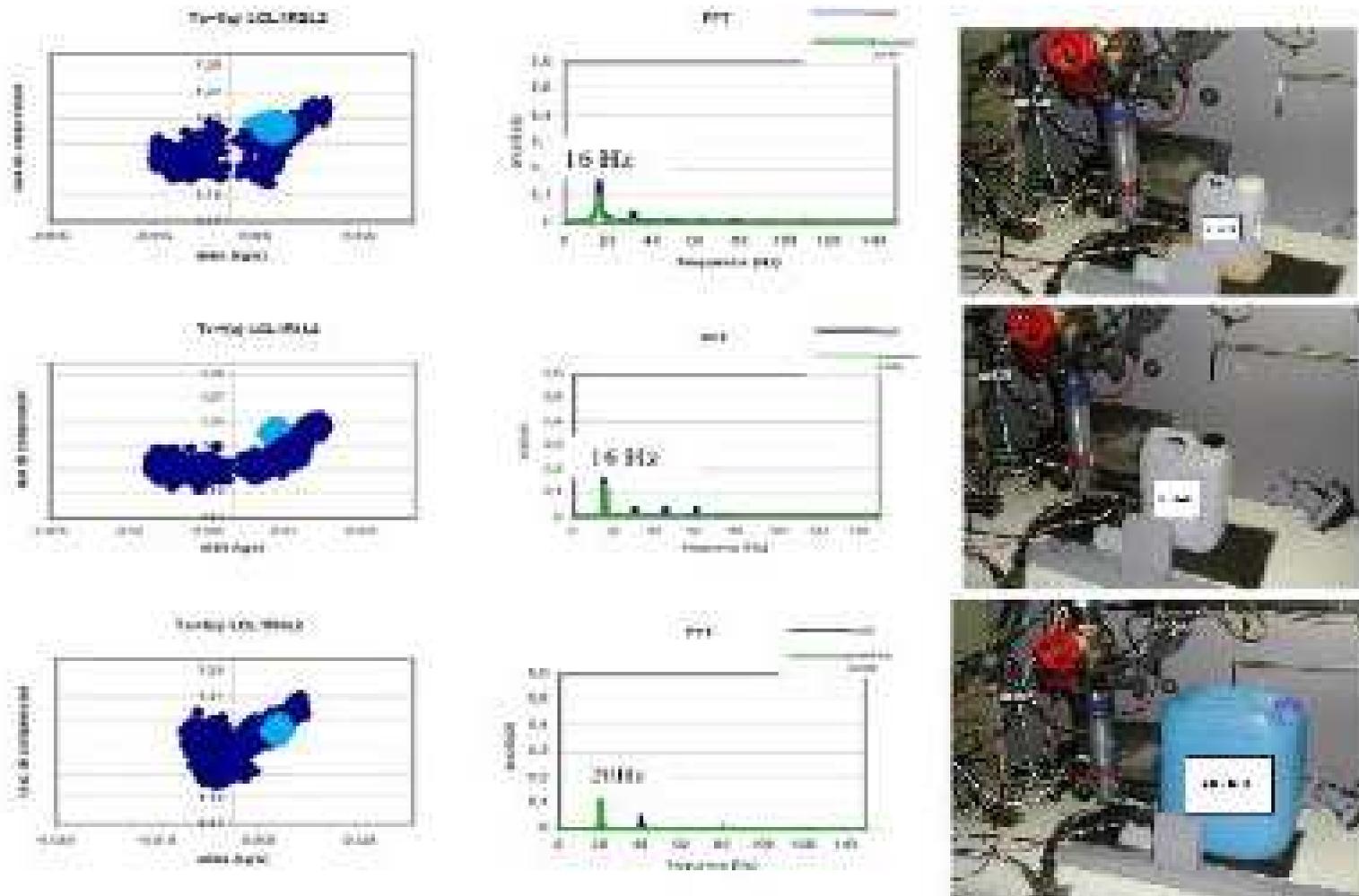
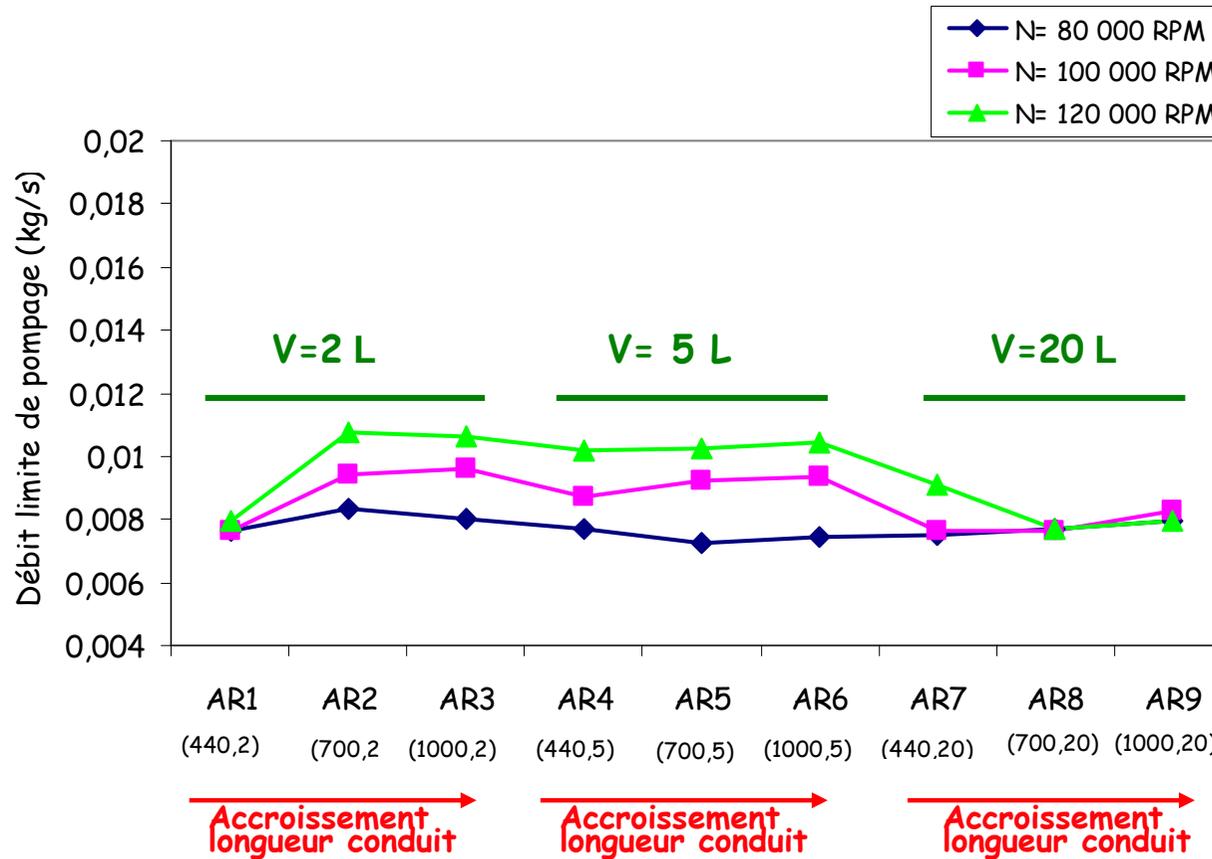


Figure 5) Courbes caractéristiques et analyses spectrales FFT pour 3 valeurs du volume amont.

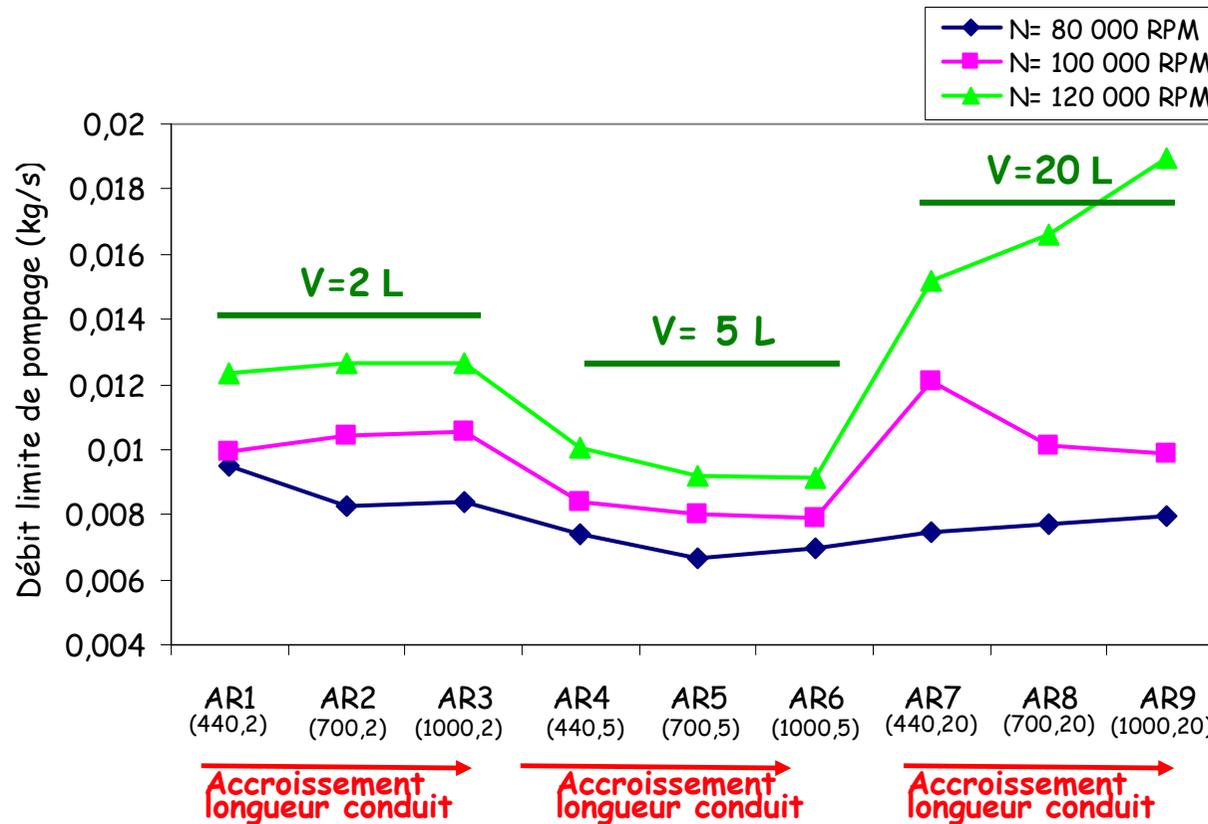
INFLUENCE DU CIRCUIT AMONT SUR la limite de pompage



Longueur circuit aval = 0,7 m

Effet combiné du volume du réservoir et de la longueur de conduit associé sur la limite de pompage

Influence du circuit amont sur la limite de pompage.

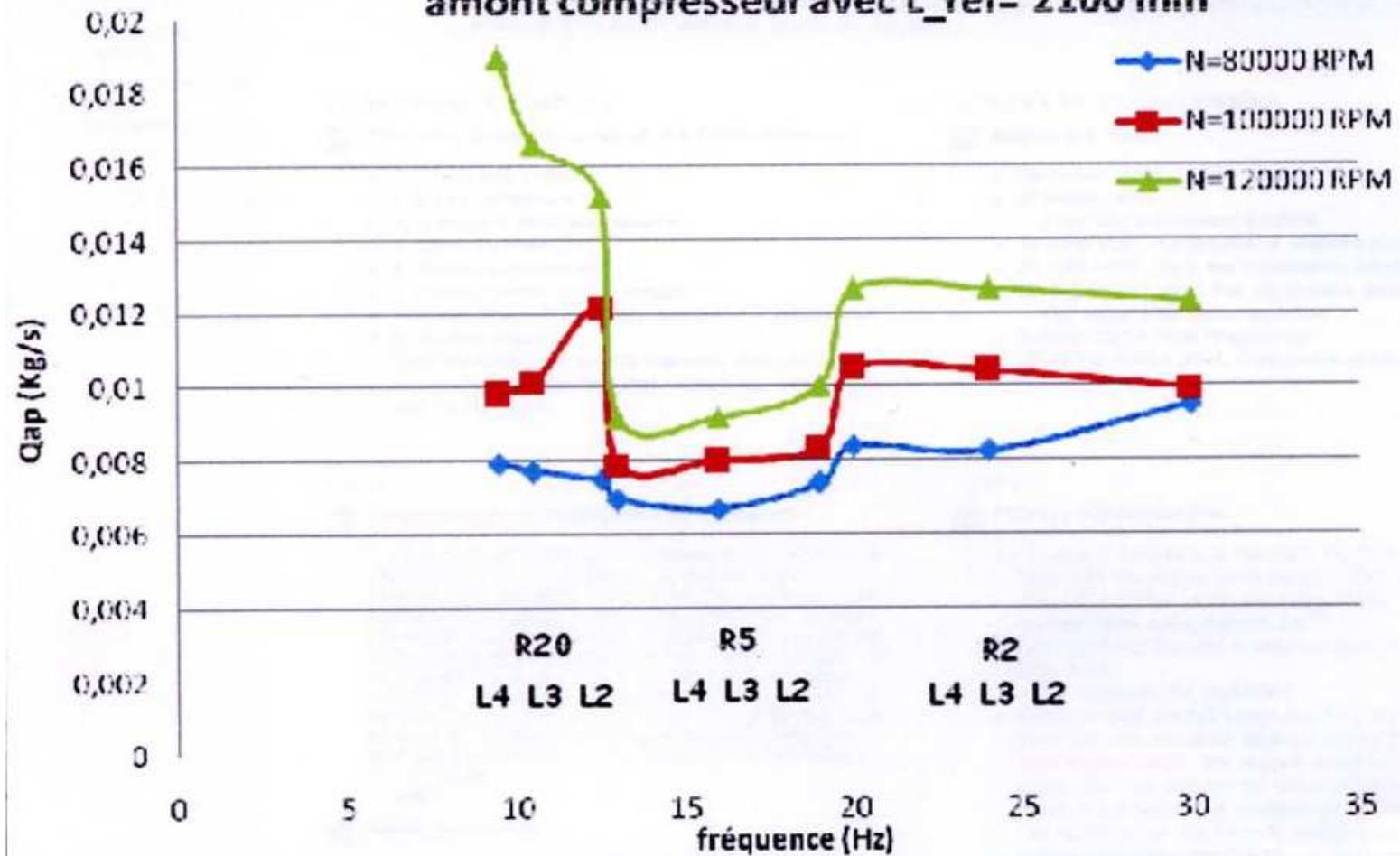


Longueur circuit aval = 2,1 m



Interaction entre la longueur aval et la géométrie du circuit amont

Débit limite pompage fonction des fréquences propres circuits amont compresseur avec $L_{ref} = 2100$ mm



Conclusions actuelles sur les essais en pompage des compresseurs.

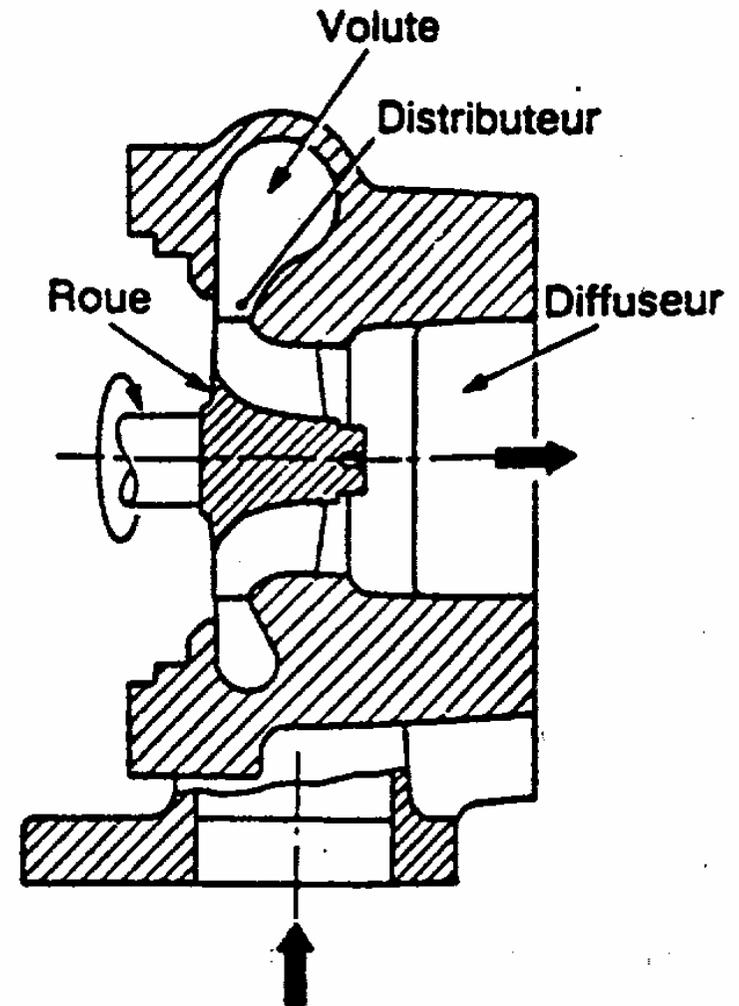
- Influence effective de la géométrie du circuit d'admission sur les caractéristiques du pompage d'un compresseur.
- Corrélation entre accord acoustique circuit amont-circuit aval et la limite de pompage.
- Cet accord acoustique ne semble pas affecter les caractéristiques en pompage établi.
- L'étude de l'influence prépondérante de la géométrie du circuit refoulement, actuellement en cours, permettra une analyse plus complète des caractéristiques en pompage des compresseurs.

La suralimentation par les turbocompresseurs

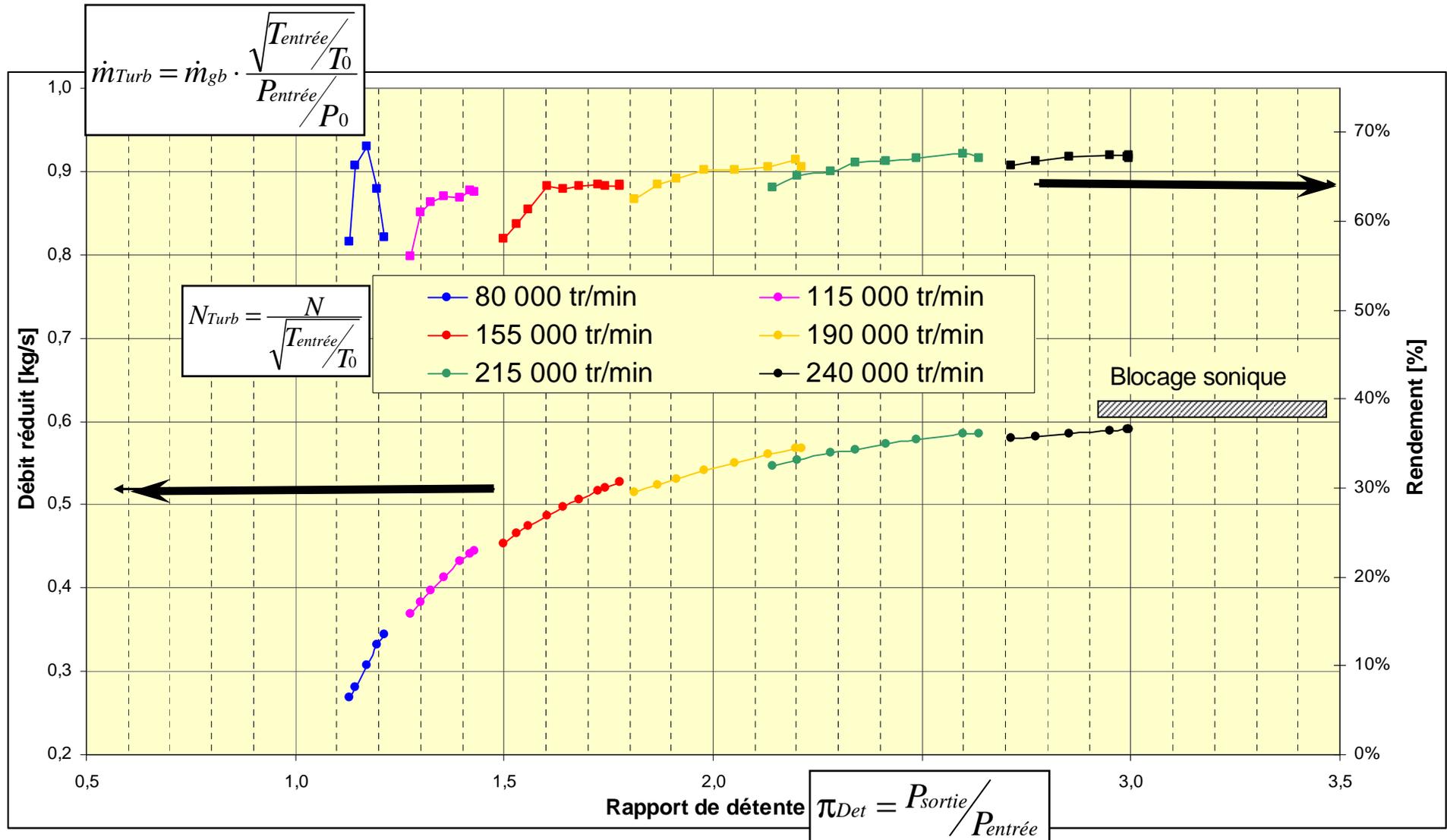
La turbine

La Turbine- Description

- La **Volute** met en vitesse les gaz issus du moteur et les dirige vers le distributeur
- La **Distributeur** oriente le flux gazeux vers les pales de la roue (peut être à géométrie variable => contrôle du rapport de détente)
- La **Roue** reçoit et récupère l'énergie des gaz d'échappement (chauds et sous pression)
- Le **Diffuseur** assure la transition des gaz vers les conduits d'échappement (ou vers le système de dépollution)

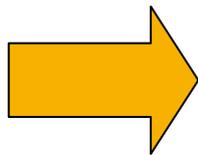


Turbine – Caractéristiques d'utilisation



Adaptation des turbines

- La turbine se comporte comme une tuyère
- **Caractéristique [Débit, Rapport de détente] =
courbe unique (indépendante de la vitesse de rotation)**



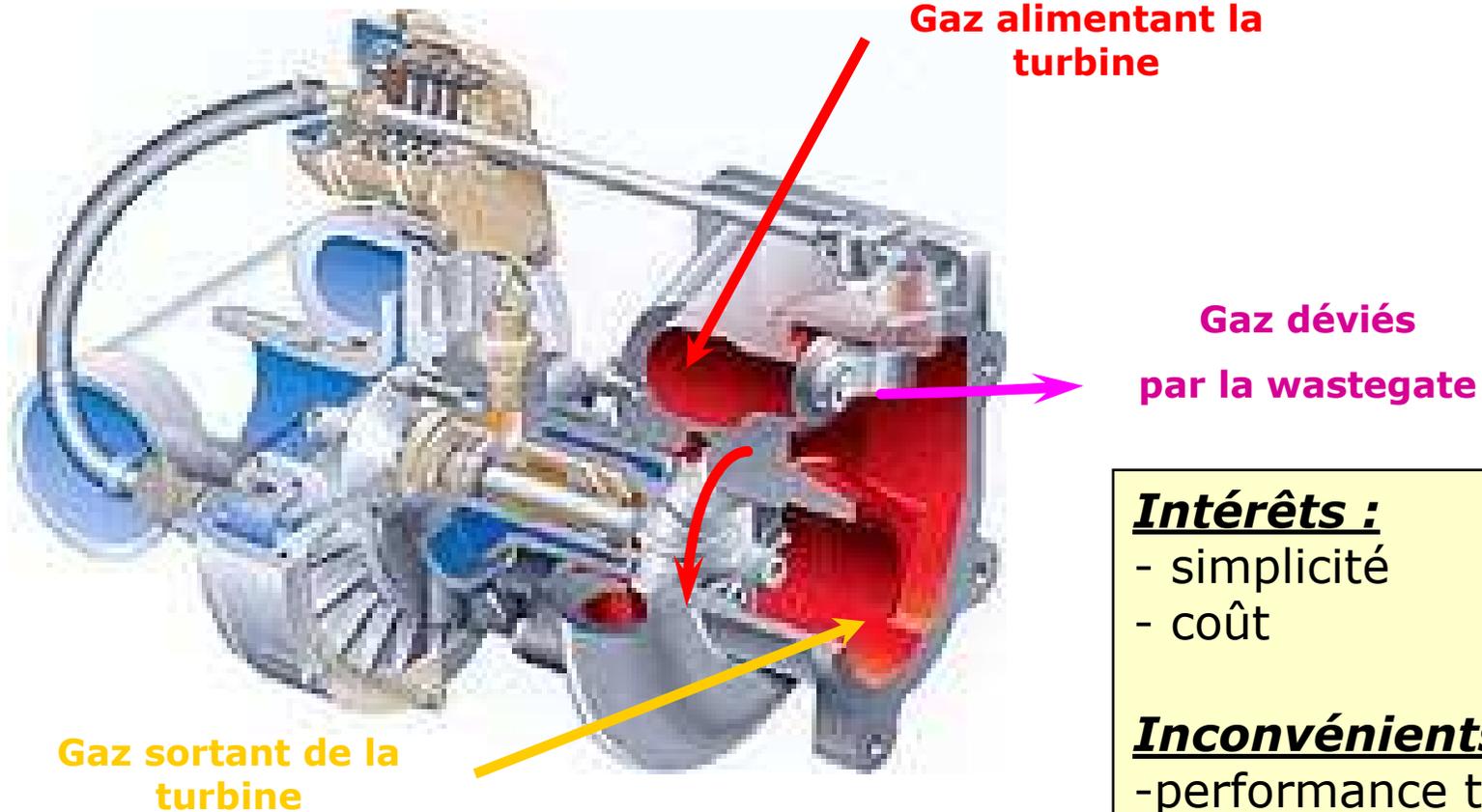
**Comment adapter le débit moteur
variant fortement avec la vitesse de
rotation du moteur ?**

En faisant varier le débit traversant
la turbine

Grâce à une vanne permettant
de « by-passer » la turbine
=> Turbine à « waste-gate »,
dite à géométrie fixe

En faisant varier la
caractéristique de la turbine
Grâce à un distributeur de gaz
=> Turbine dite « à géométrie
variable »

Turbine – Géométrie Fixe



Gaz sortant de la turbine

Gaz alimentant la turbine

Gaz déviés par la wastegate

Intérêts :

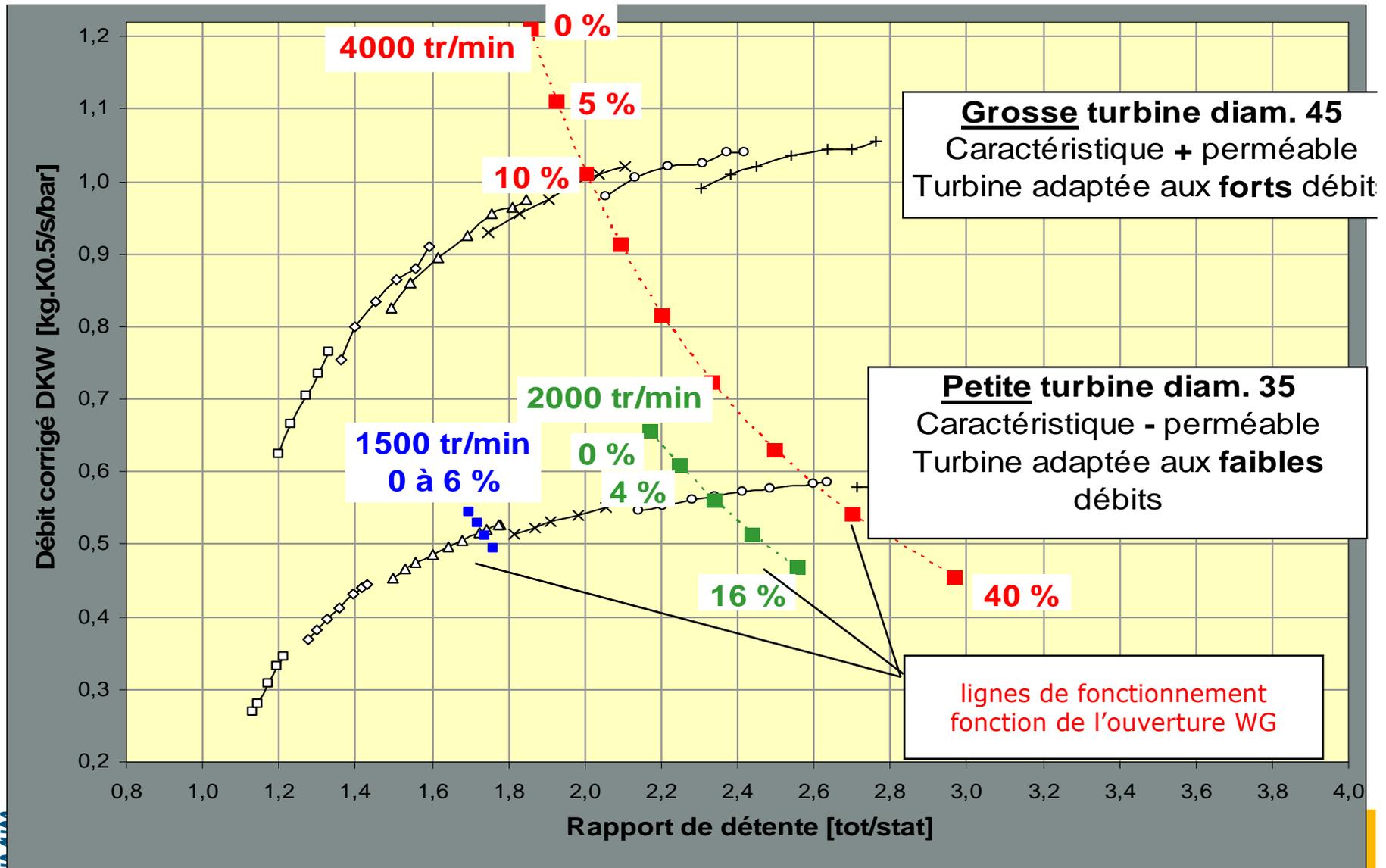
- simplicité
- coût

Inconvénients :

- performance turbine limitée à bas régimes ou hauts régimes
- Étanchéité de la waste gate

- **Waste gate :**
- **Permet de contrôler le niveau de suralimentation,**
- **De by-passer l'entrée de la turbine,**
- **De choisir des petits turbos adaptés aux bas régime et d'éviter la survitesse à haut régime.**

Turbine – Géométrie Fixe



Grosse turbine diam. 45
 Caractéristique + perméable
 Turbine adaptée aux forts débits

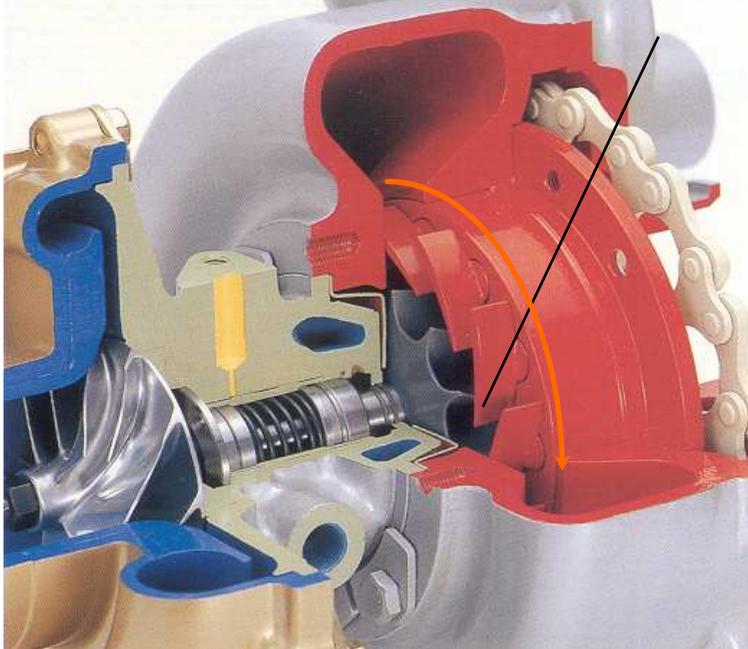
Petite turbine diam. 35
 Caractéristique - perméable
 Turbine adaptée aux faibles débits

lignes de fonctionnement
 fonction de l'ouverture WG

Turbine – Géométrie Variable

- Plusieurs caractéristiques Débit/Rapport de détente,
- La turbine doit être « adaptée » pour tous les débits moteur, => Le « by-pass » n'est plus nécessaire,
- Il suffit de positionner la turbine sur la géométrie adaptée

Ailettes d'entrée (ou distributeur)
=> permettant de réorienter
les vecteurs vitesse gaz / vitesse
pales



ailerres **fermées**

ailerres **ouvertes**

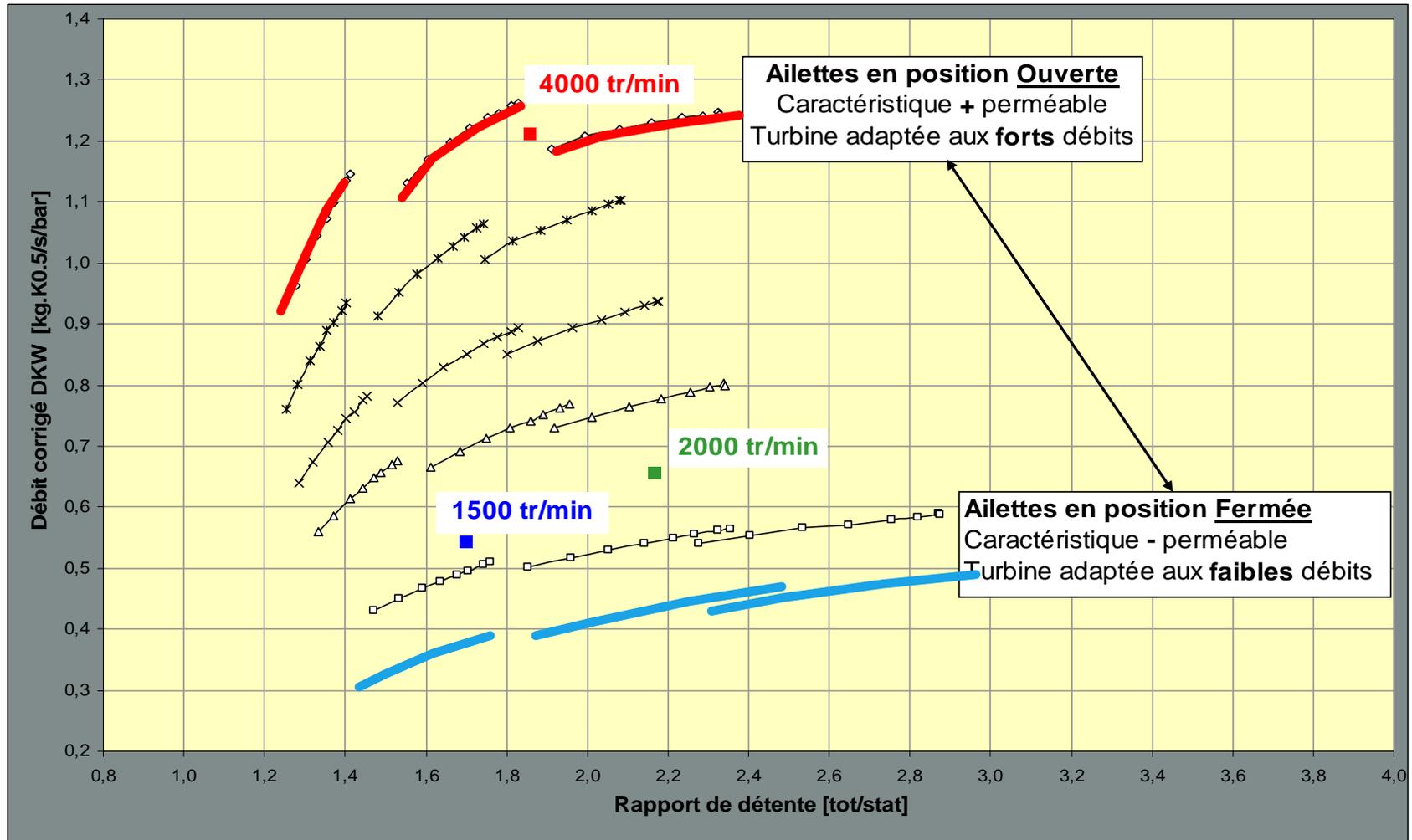
Intérêts :

- optimisation du triangle des vitesses / N turbo
=> gains de perfos / TGF
- variation de la section efficace

Inconvénients :

- mécanisme complexe et coûteux
- fiabilité (encrassement, tenue ailettes)
- MAP difficile (pilotage non linéaire,...)

Turbine – Géométrie Variable



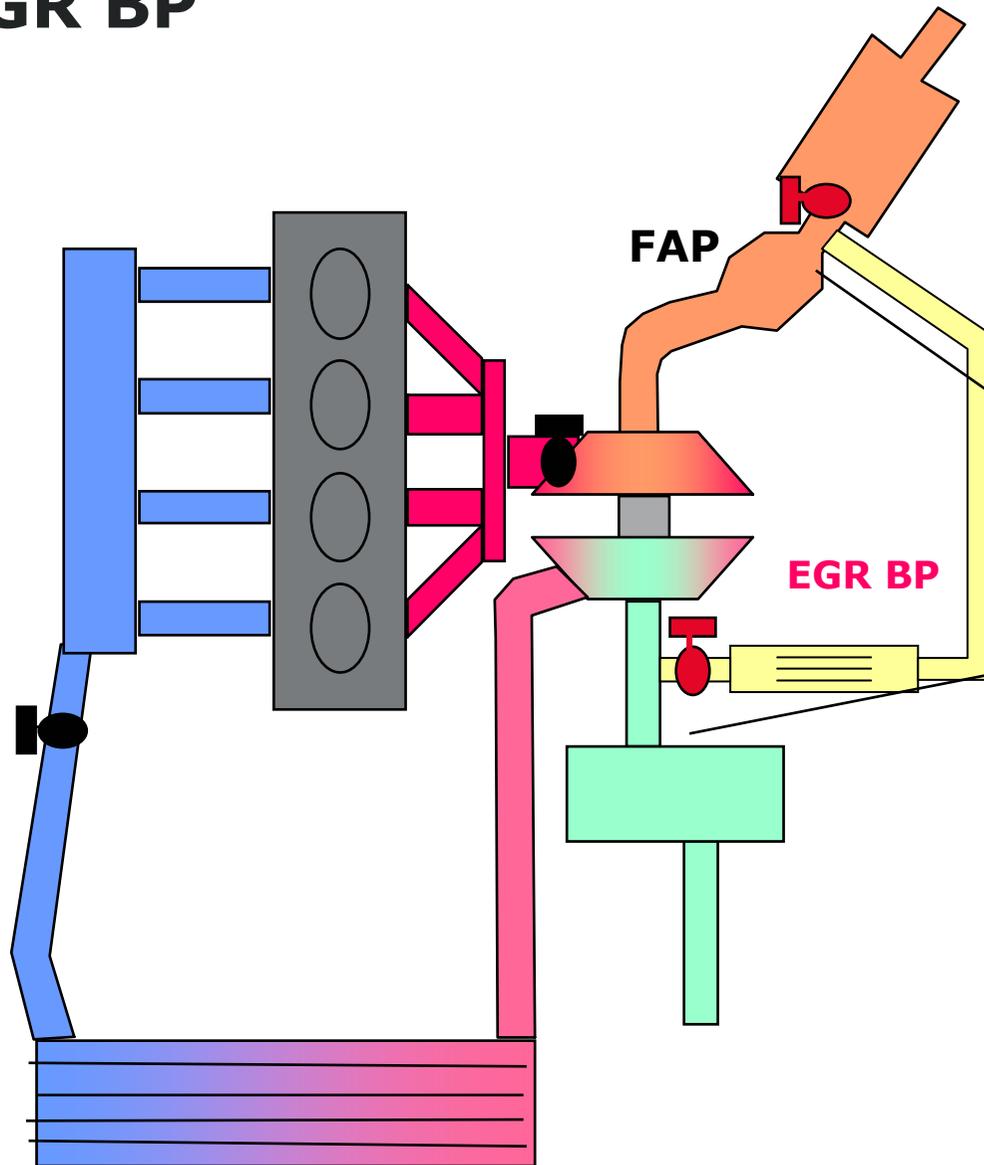
La dépollution : Les circuits d'EGR

Les besoins de dépollution

- **Actuellement Euro 4**
- **Passage à Euro 5**
- **Puis Euro 6**

En Diesel :
Nécessité d'utiliser des gaz brûlés recirculés (EGR) à l'admission pour réduire les émissions de Nox.

EGR BP

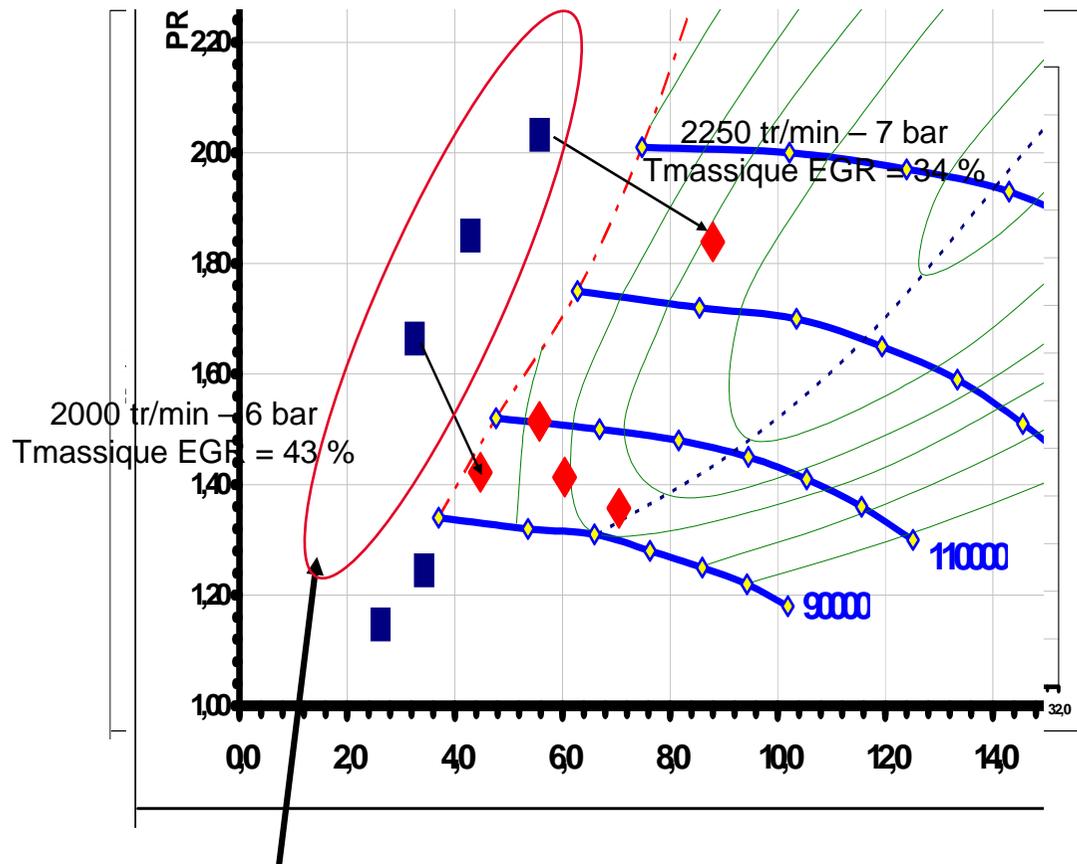


De l'aval turbine (FAP) vers l'amont compresseur

- Faible couplage EGR / Sural
- Taux d'EGR régulé par
 - Volet à l'échappement (après FAP)
 - Vanne EGR

■ **$Dp_{EGR} = CPE - PAVC$**

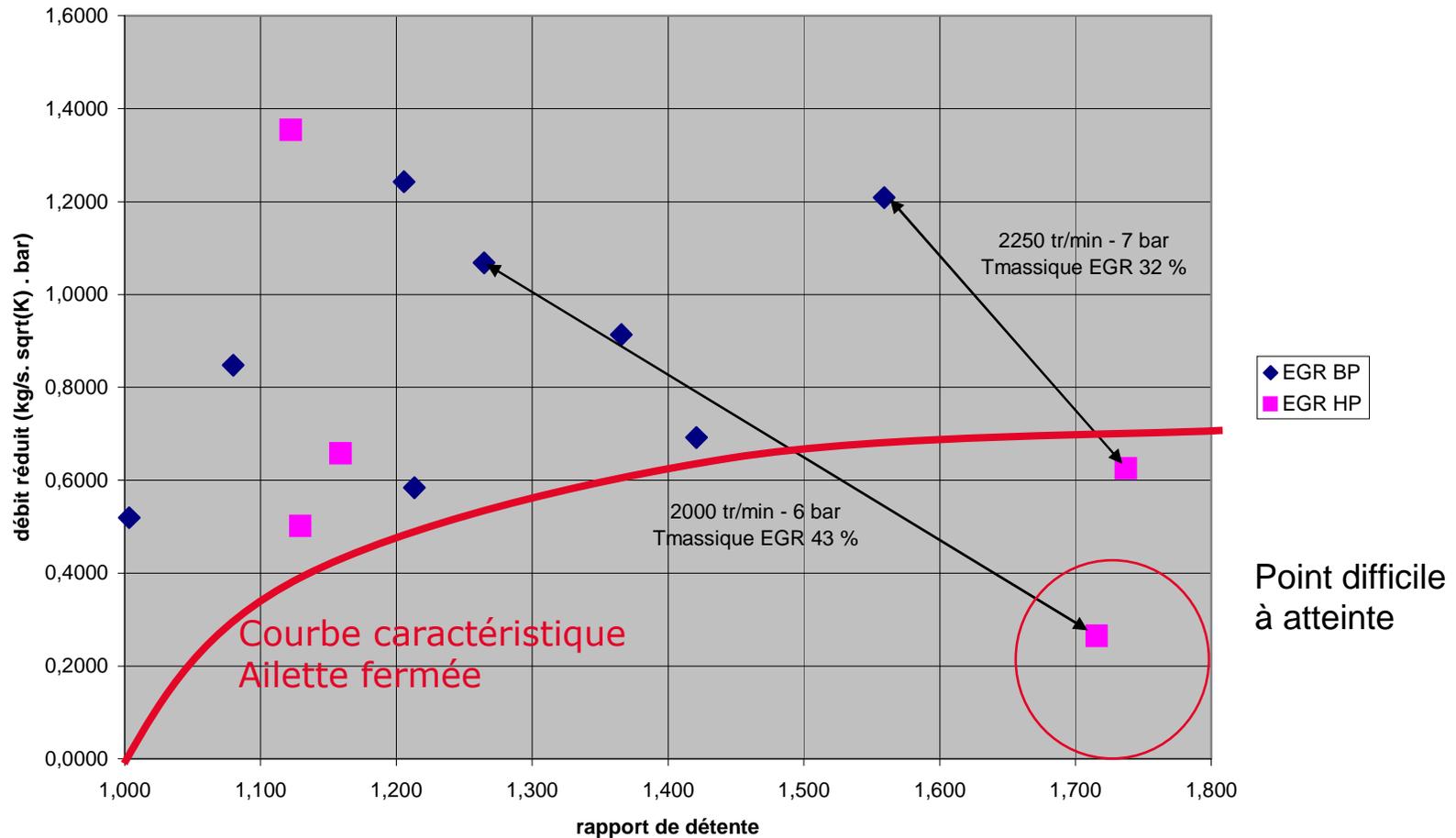
Impact des architectures sur le fonctionnement du compresseur



Points dans la zone de pompage en EGR HP

Impact des architectures sur le fonctionnement de la turbine

Evolution des points dans le champs TGV (Euro 5)



La suralimentation à double étage

Double turbo

Les développements en double sural Diesel

- **BMW série 5 /X5 (3L) sortie 2004 : séquentielle série**

- 210 kW => 70kW/L
- 580 N.m => 193 N.m/L

- **BMW série 3 (2L) sortie 2006 : séquentielle série**

- 150 kW => 75 kW/L
- 400 N.m => 200 N.m/L

- **PSA (2,2 L) sortie 2006 : séquentielle parallèle**

- 130 kW => 59 kW/L
- 400 N.m => 182 N.m/L

- **Mercedes (2,2 L) sortie à venir: séquentielle série**

- 150 kW => 68 kW/L
- 500 N.m => 227 N.m/L

- **Huyn dai (2,2 L) sortie à venir: séquentielle série**

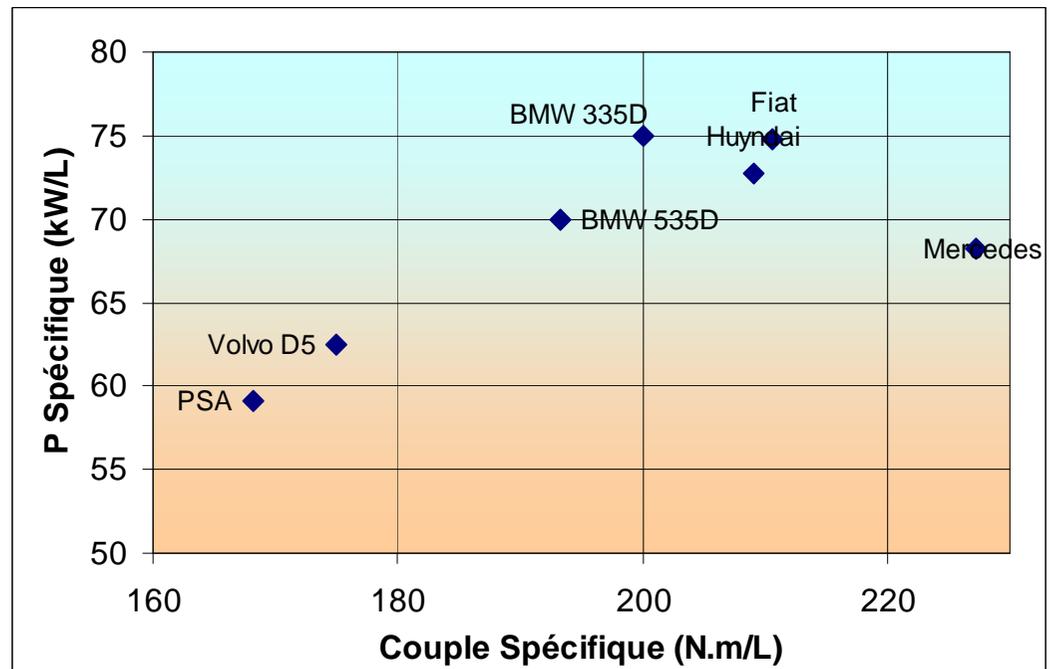
- 160 kW => 72 kW/L
- 460 N.m => 209 N.m/L

- **Fiat (1,9 L) sortie 2008**

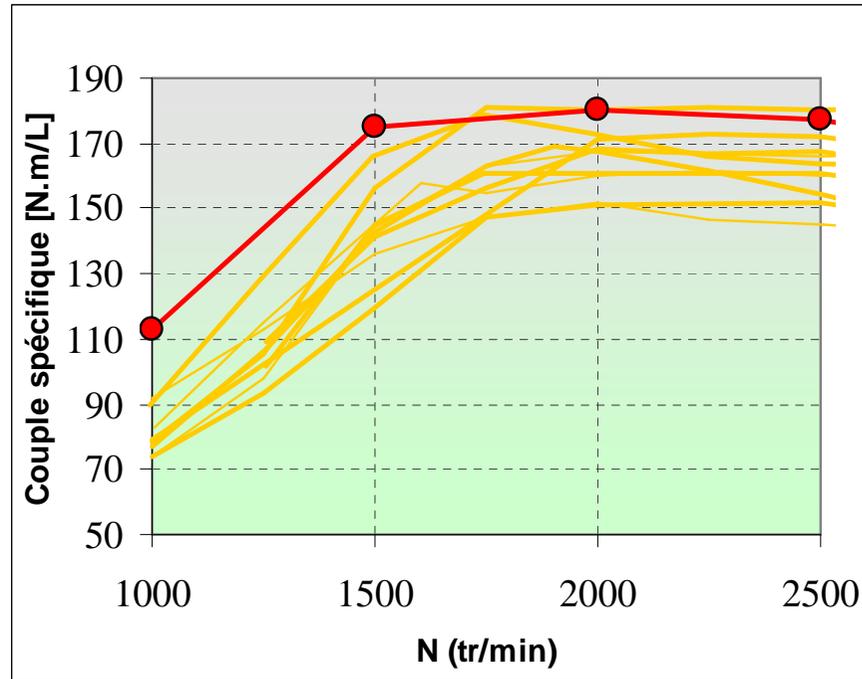
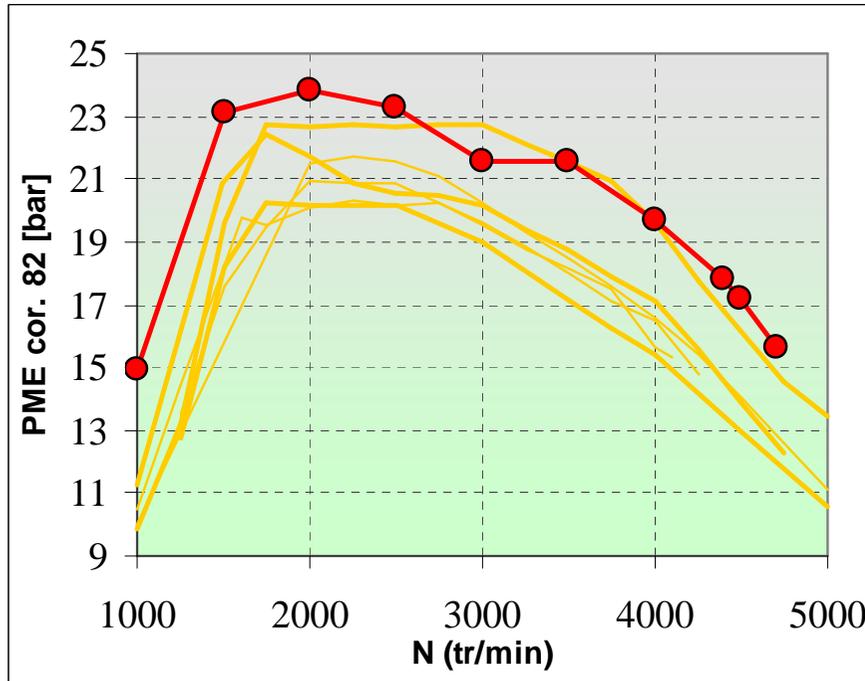
- 140 kW => 73.3 kW/L
- 400 N.m => 209 N.m/L

- **Volvo D5 (2,4L) sortie 2009 : séquentielle série**

- 150 kW => 62,5kW/L
- 420 N.m => 175 N.m/L



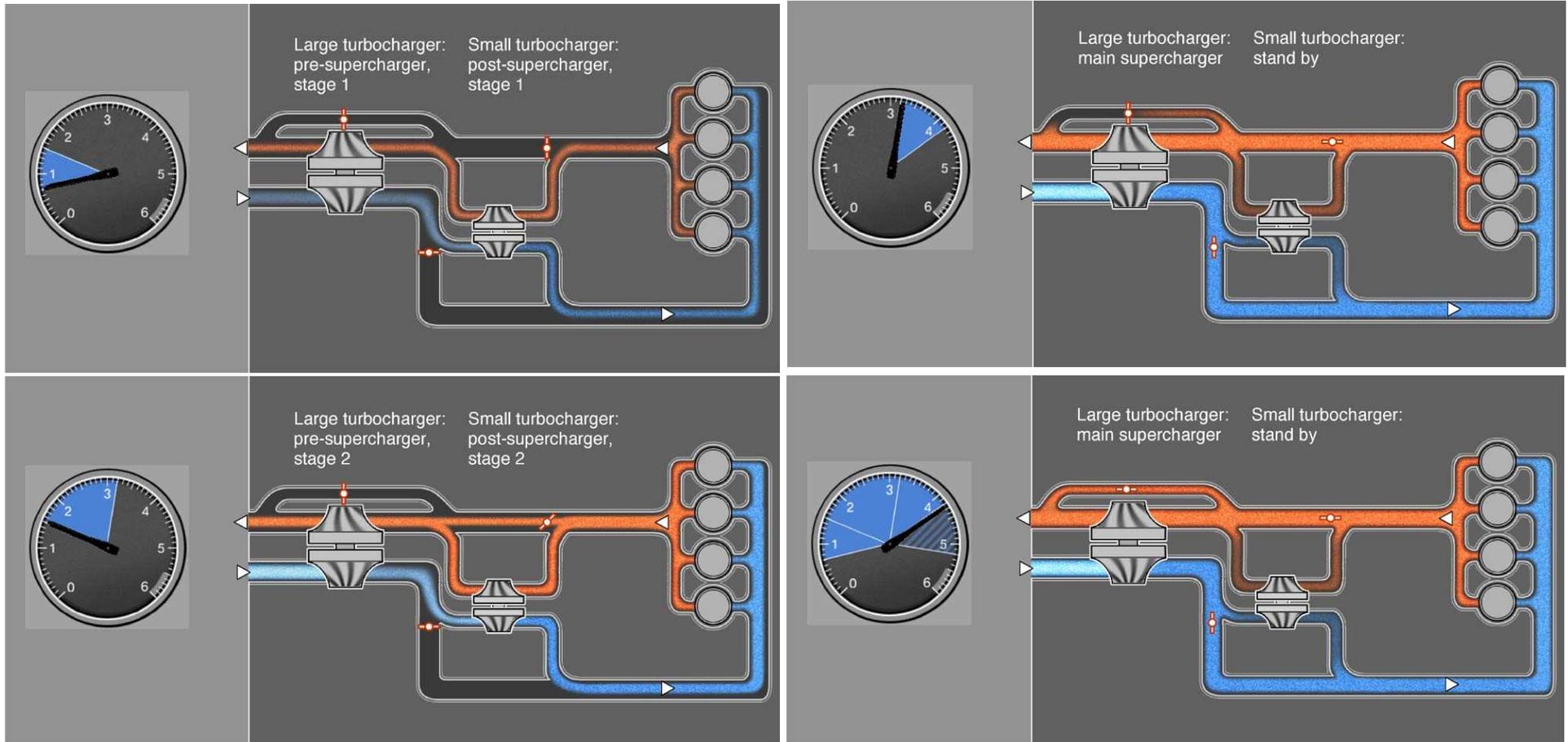
Positionnement du BMW 535d 3l par rapport aux moteurs mono sural



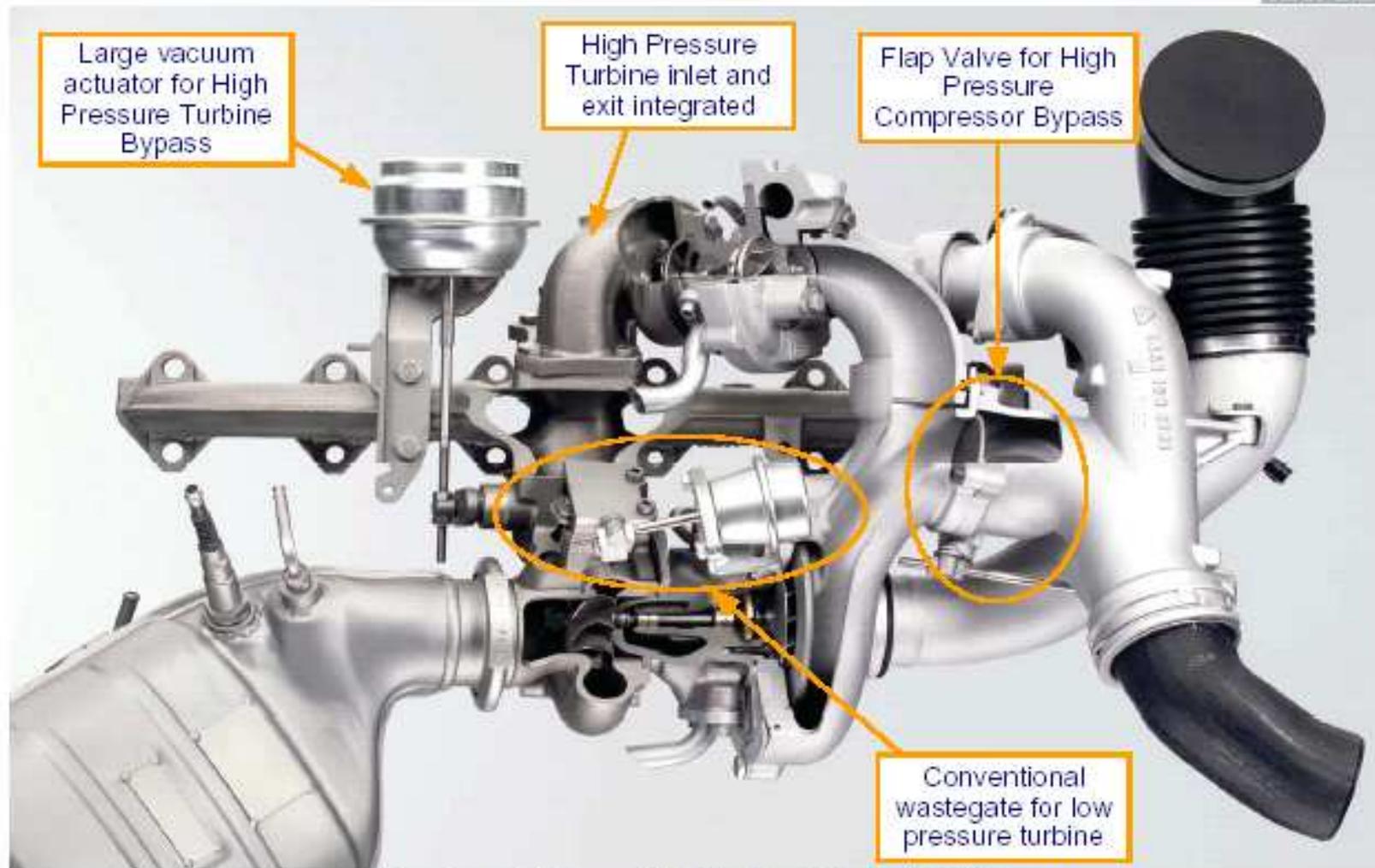
Un intérêt indéniable à bas régime

Impact positif sur les transitoires

L'architecture séquentielle série



L'architecture échappement BMW 535d



Picture Source: BMW Geneva Motor Show Press Pack, March 2004, 43pp

Fiat 1.9 jtd twin stage



Conclusion

Conclusion

- **Le turbo est au cœur des enjeux de l'automobile**
 - Moins synonyme de Puissance
 - CO2 => Downsizing
 - Dépollution
 - Fiabilité : Forte densité d'énergie, lubrification, refroidissement
- **Multiplication des fournisseurs turbo**
 - BWTS, HTT, IHI, MHI
 - mais aussi Bosch-Mahle / Continental / stratégie de *make chez Toyota*
- **Avoir un turbo sur un moteur ne fait pas tout le bonheur...**
 - Adapter le turbo au CdC du moteur
 - Adapter le moteur au fonctionnement avec turbo
 - Perte de charge,
 - Contrôle du turbo, détarrage en altitude
 - Brio à bas régime
- **Double suralimentation incontournable pour les moteurs fortement downsizés**
 - Double turbo sur les très petites cylindrées : taille des TC!
 - Compresseur + turbo (VW TSI)

MERCI DE VOTRE ATTENTION

QUESTIONS / REPOSES