



MOTEURS THERMIQUES – partie 1b/3

Du cycle idéal à quelques cycles réels

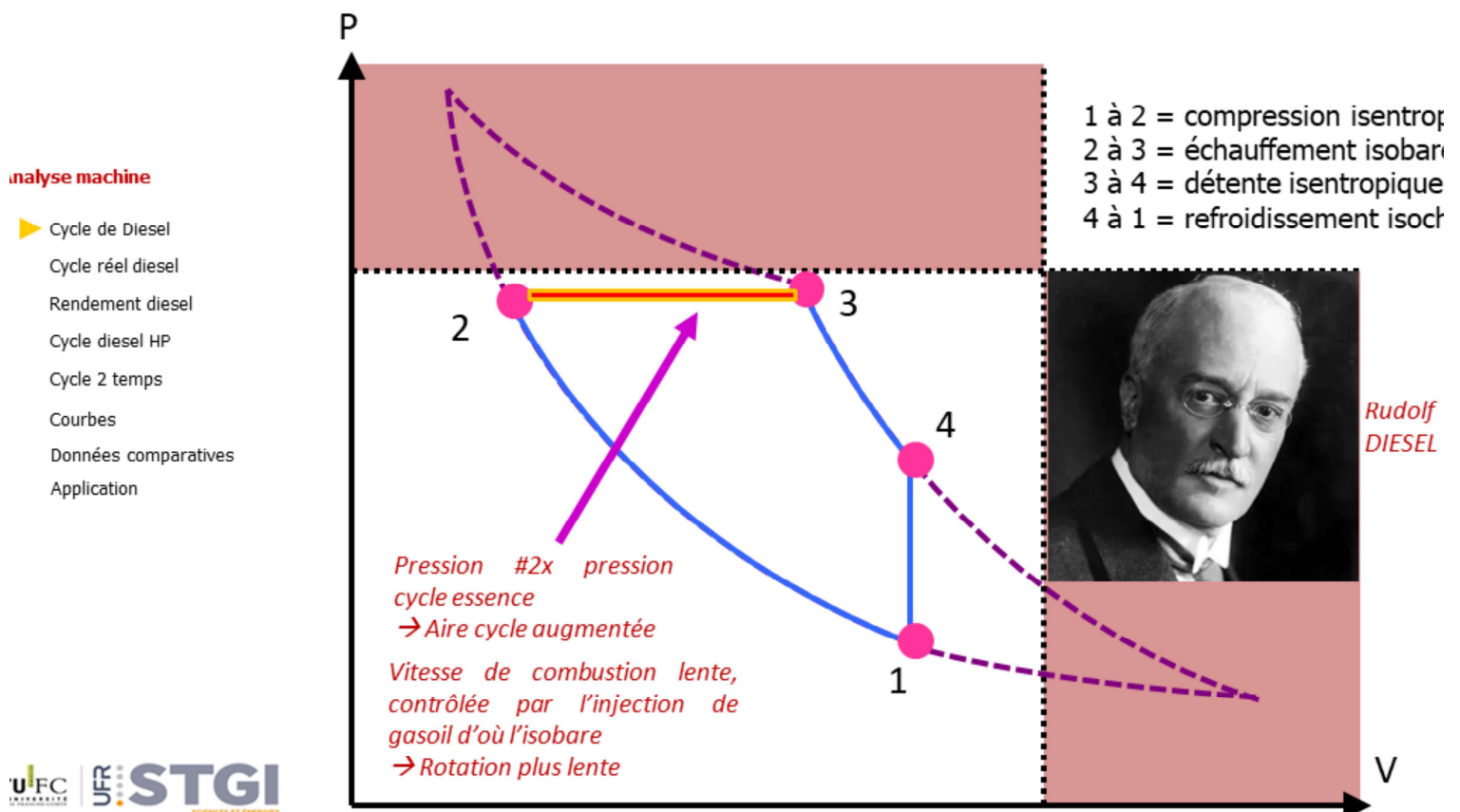


Le moteur thermique est une machine génératrice d'énergie mécanique à partir de la chaleur.

Il en existe de nombreux types technologiquement différents, moteur fusée, turbine, moteur Diesel, moteur Stirling...

On s'intéresse ici aux moteurs à arbres tournants et pistons alternatifs tels que ceux encore utilisés dans l'industrie automobile.

Une deuxième solution : le cycle de Diesel



Le cycle de Carnot, inutilisable dans les moteurs à combustion, est modifié en supprimant les deux transformations isothermes.

Face au cycle BEAU DE ROCHAS, une seconde solution est proposée par Rudolph DIESEL au début des années 1900 pour **utiliser de l'huile végétale en guise de carburant**.

Pour sa première démonstration devant un large public, lors de l'exposition universelle de Paris (1900), ce moteur consomma de l'huile d'arachide. Mais le gazole produit lors de la distillation du pétrole était alors, faute d'emploi, considéré comme un déchet. Il coûtait par conséquent peu donc supplanta vite les huiles végétales.

Dans ce cycle la compression 1-2 ne s'effectue que sur de l'air avec un **taux de compression plus élevé** (25 contre 10 en essence). La température T_2 est alors plus grande et afin d'éviter une auto-inflammation du mélange on réalise une compression séparée du carburant. Lors de l'injection il y a inflammation immédiate, donc ce système ne comporte pas de bougies d'allumage.

Le temps d'injection est réglé de façon à ce que la transformation 2-3 soit

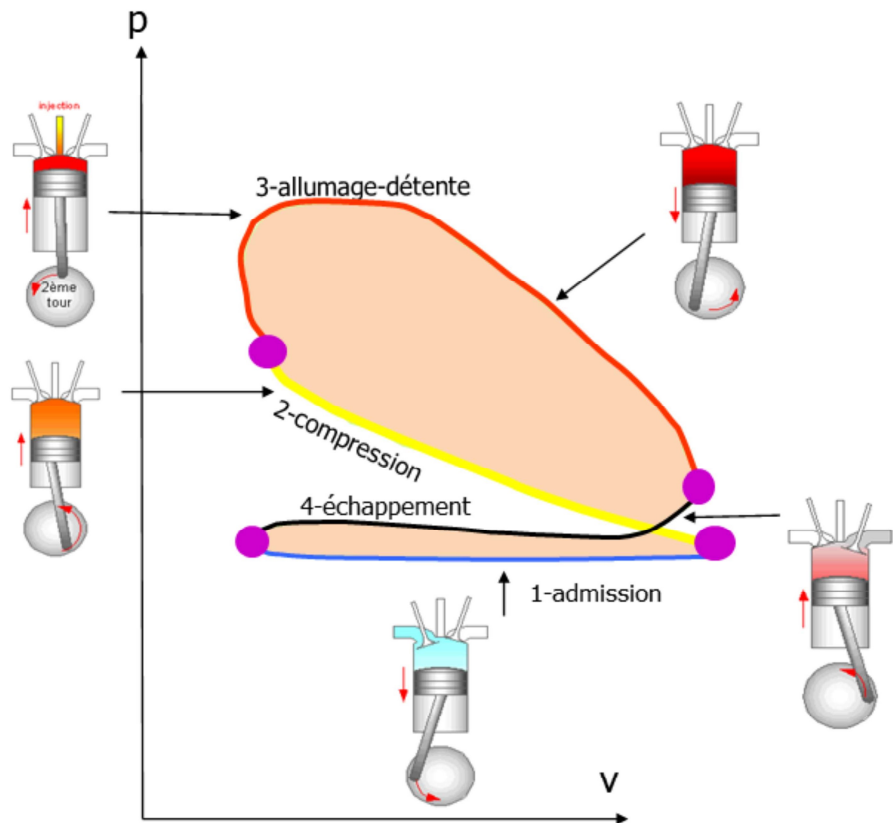
isobare...ceci n'est pas sans conséquence sur la limitation en régime des moteurs diesels qui tournent moins vite que « les essences ».

Pour faciliter le départ à froid en élevant la température des parois de la chambre de combustion et de l'air admis, les moteurs diesel sont équipés de systèmes de préchauffage (appelés **bougies**) ou de réchauffage d'air.

Cycle de Diesel réel

analyse machine

- Cycle de Diesel
- ▶ Cycle réel diesel
- Rendement diesel
- Cycle diesel HP
- Cycle 2 temps
- Courbes
- Données comparatives
- Application



On retrouve globalement les mêmes dégradations que celles observées pour le cycle à essence.

Rendement du moteur diesel 4 temps

analyse machine

- Cycle de Diesel
- Cycle réel diesel
- ▶ Rendement diesel
- Cycle diesel HP
- Cycle 2 temps
- Courbes
- Données comparatives
- Application

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{\alpha^{(\gamma-1)}} \cdot \frac{\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\gamma} - 1}{\frac{\alpha}{\beta} - 1}$$

Rendement thermique théorique

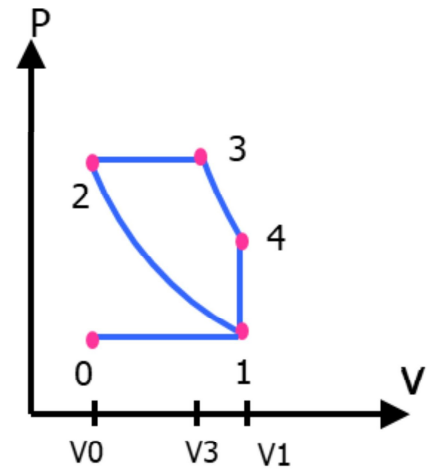
$\eta_{réel\ diesel} \# 42\%$
 $\eta_{réel\ essence} \# 36\%$

avec α le taux de compression

$$\alpha = \frac{Cylindrée + V_{chambre}}{V_{chambre}} = \frac{V_1}{V_0}$$

et β le taux de détente

$$\beta = \frac{V_1}{V_3}$$



On a toujours $\eta_{th}(\text{diesel}) > \eta_{th}(\text{essence})$ notamment grâce au taux de compression beaucoup plus élevé.

Les moteurs diesel ne possèdent plus de détonation car il ne s'agit pas d'un gaz explosif que l'on comprime, mais uniquement de l'air. On peut donc encore augmenter α .

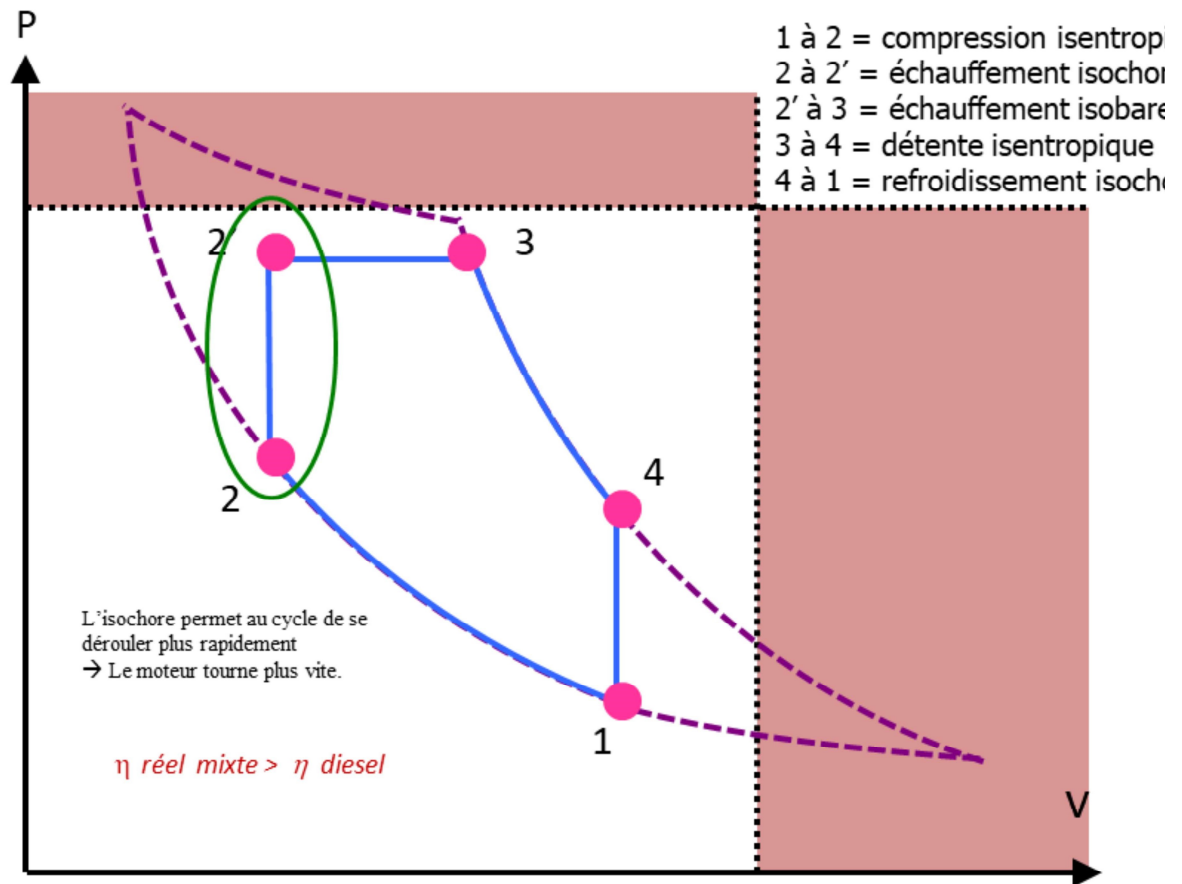
Ce qui limite α dans ce cas est la pression du gaz qui crée des contraintes mécaniques.

⇒ Valeurs numériques : voir tableau des données sur les rendements.

Une amélioration : le cycle diesel mixte

analyse machine

- Cycle de Diesel
- Cycle réel diesel
- Rendement diesel
- ▶ Cycle diesel HP
- Cycle 2 temps
- Courbes
- Données comparatives
- Application



Aujourd'hui (depuis la fin des années 90 en fait) on diminue les temps d'injection grâce à des pompes haute pression très performantes (>2000 bars contre 200-300 bars sinon !!!) autorisant aussi une pulvérisation plus fine et une meilleure combustion.

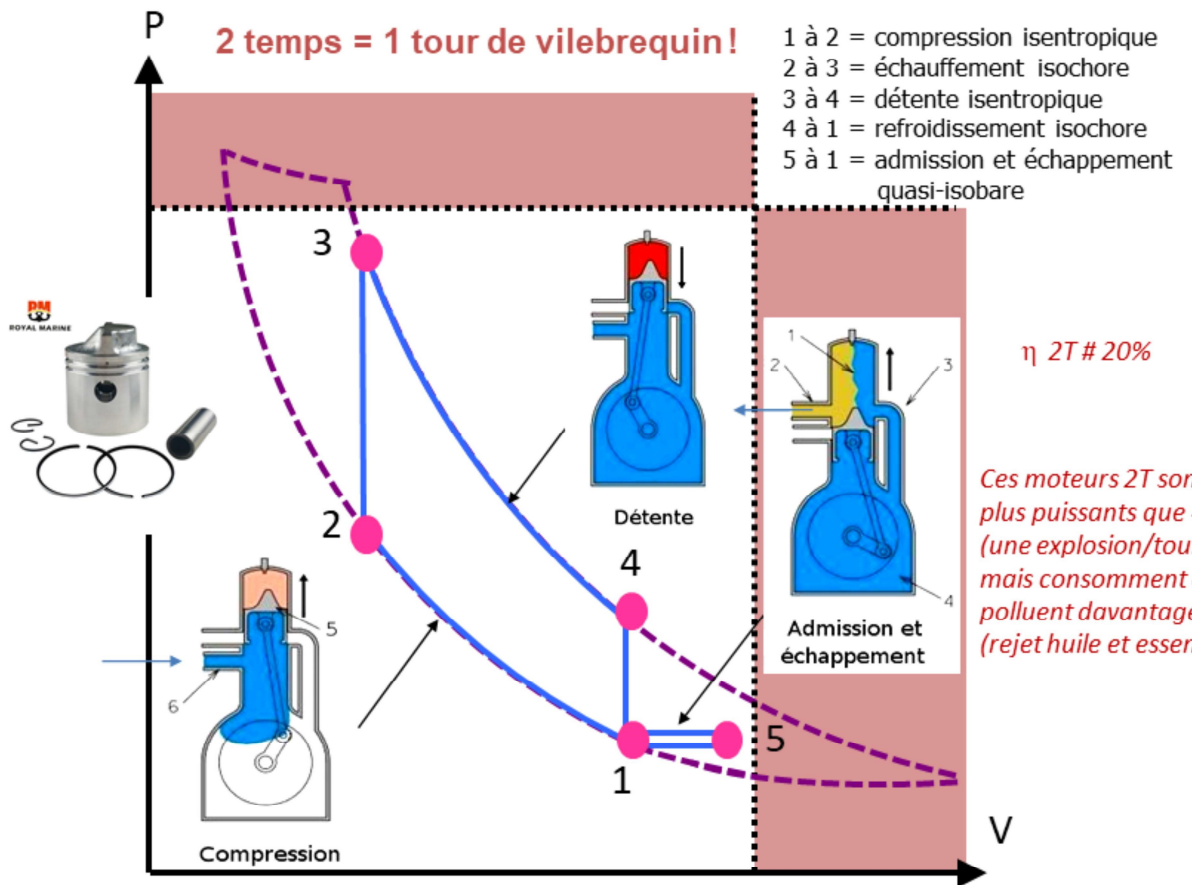
Ce cycle comporte une combustion partiellement à P cste et à V cste.

⇒ **Un moteur de type « HDI ou JTD » tourne donc plus vite qu'un diesel classique.**

Autre solution : moteur à 2 temps

analyse machine

- Cycle de Diesel
- Cycle réel diesel
- Rendement diesel
- Cycle diesel HP
- Cycle 2 temps
- Courbes
- Données comparatives
- Application



Le cycle à deux temps d'un moteur à combustion interne diffère du cycle de Beau de Rochas en ayant seulement deux mouvements linéaires du piston au lieu de quatre, bien qu'effectuant les même quatre opérations.

Il y a un cycle moteur par tour au lieu d'un tous les deux tours pour le moteur à quatre temps.

Dans un premier temps le piston (5) est au point mort haut. La bougie crée l'explosion et le piston descend en comprimant en même temps le mélange présent dans le carter, sous le piston. C'est la partie moteur du cycle, le reste du parcours sera dû à l'inertie créée par cette détente. Cette étape est la détente. Lors de cette descente du piston, l'entrée (6) du mélange dans le carter se ferme.

Arrivé à proximité point mort bas le piston débouche les lumières d'échappement (2) et d'arrivée de mélange dans le cylindre (3) : le mélange en pénétrant dans le cylindre chasse les gaz de l'explosion (zone 1 sur l'image). Il s'agit de l'étape d'admission - échappement.

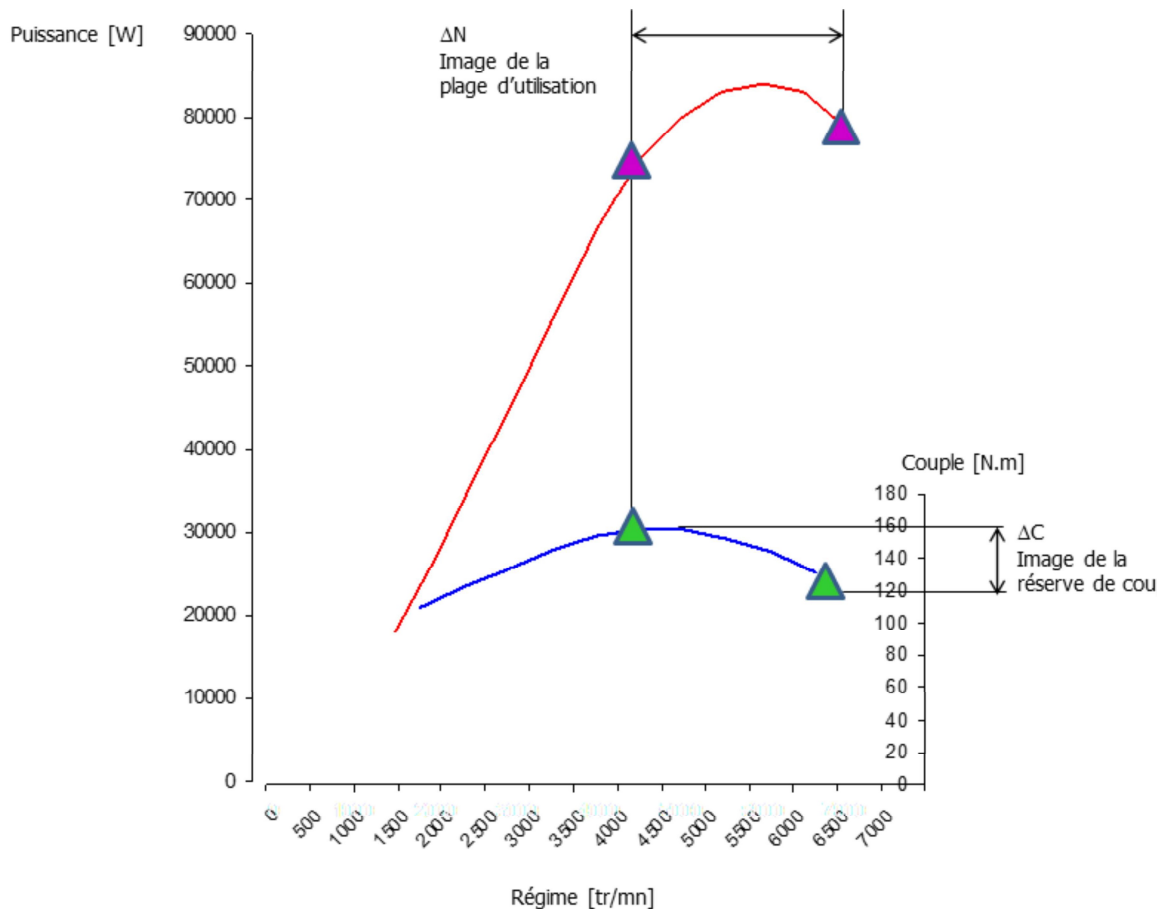
En remontant le piston comprime le mélange dans le cylindre. Au passage, il rebouche l'échappement (2) et l'entrée de mélange dans le cylindre (3), tout en créant une dépression dans le carter (4) qui va permettre l'arrivée du mélange air-essence par la soupape d'arrivée (6) dont l'entrée a été libérée par la position du piston proche du point mort haut. Cette étape est celle de compression.

Une fois arrivé à nouveau au point mort haut, le cycle peut recommencer à partir du premier point.

Courbes caractéristiques des moteurs

analyse machine

- Cycle de Diesel
- Cycle réel diesel
- Rendement diesel
- Cycle diesel HP
- Cycle 2 temps
- ▶ Courbes
- Données comparatives
- Application



Les caractéristiques principales d'un moteur sont réunies dans **les courbes de puissance et de couple**.

Il existe une relation étroite entre puissance et couple : $P = C \cdot \omega$

On peut donc construire une courbe à partir de l'autre.

En effet : $P_1 = C_1 \cdot \omega_1$ et $P_2 = C_2 \cdot \omega_2$

Ainsi $P_2/P_1 = C_2/C_1 \dots$

Le couple développé par un moteur est mesuré au banc d'essai sous pleine charge (accélérateur à fond) et différents régimes.

En reliant les points de mesure, on obtient sa courbe de couple.

La courbe de puissance peut ensuite être tracée.

- Plage d'utilisation = $N_{\max}/N(\text{de } C_{\max}) [\%] = 1 + \Delta N/N(C_{\max})$
- Réserve de couple = $C_{\max}/C(\text{de } N_{\max}) [\%] = 1 + \Delta C/C(\max)$ (si le rapport \nearrow alors souplesse \nearrow)

Attention, on observe donc que si on agit sur la courbe de puissance (vitesse maxi) il y a des répercussions sur la courbe de couple (accélération maxi).

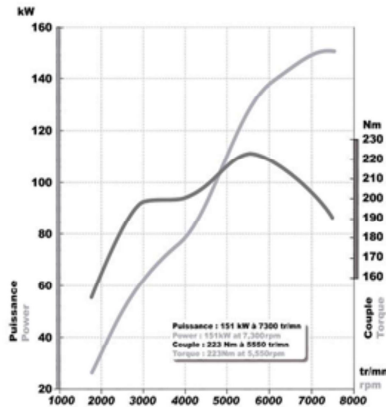
⇒ **Le rôle des rapports de la transmission (BDV) est de corriger ces influences pour que le moteur soit toujours utilisable.**

Courbes caractéristiques : quelques exemples



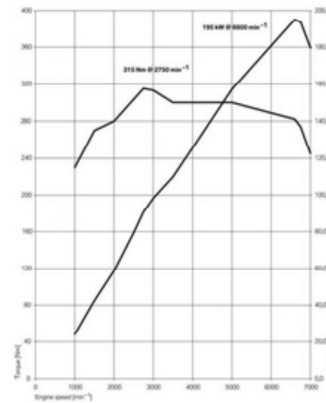
analyse machine

- Cycle de Diesel
- Cycle réel diesel
- Rendement diesel
- Cycle diesel HP
- Cycle 2 temps
- ▶ Courbes
- Données comparatives
- Application



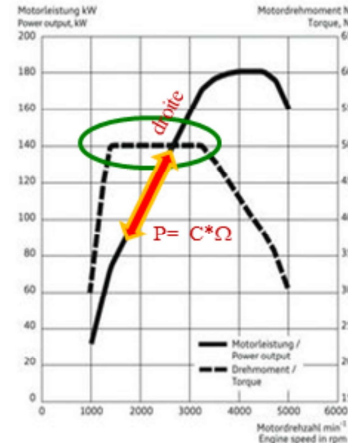
RENAULT CLIO CUP

Un moteur assez pointu, au couple maxi haut perché bien que disponible à 90% dès 3000 tr/mn, utilisable au quotidien même si adapté à la conduite très sportive.



BMW 130i

Moteur souple, coupleux sur une large plage, puissant et doté d'un régime maxi raisonnable (7000 tr/mn) qui doit permettre une utilisation à la fois civile et sportive.



AUDI 3,0 V6 TDI

Un moteur au couple maximum constant sur une large plage.

Les conditions de mesure des données peuvent varier.

La puissance nette mesurée au vilebrequin selon les normes établies par divers organismes (UE, ECE, ISO, SAE, JIS ou DIN) est celle du moteur entièrement équipé, tel que monté dans le véhicule. Ces normes sont aujourd'hui quasiment identiques.

Les normes SAE (brut) antérieures à 1972 donnaient les performances du moteur nu, sans accessoires et elles indiquaient des données de 15 à 20% plus favorables que les normes "nettes" actuelles.

Des facteurs de correction sont employés pour refléter des conditions standard de pression atmosphérique et de température ambiante (99 kPa et 25°C), annulant ainsi l'influence des conditions au moment des mesures.

Néanmoins, les courbes de couple et puissance restent approximatives car deux exemplaires en principe identiques du même moteur ne fourniront pas exactement les mêmes performances dans les mêmes conditions. Les constructeurs indiquent généralement une fourchette de tolérance de + ou - 3%...

Comparaison diesel - essence

analyse machine

Cycle de Diesel

Cycle réel diesel

Rendement diesel

Cycle diesel HP

Cycle 2 temps

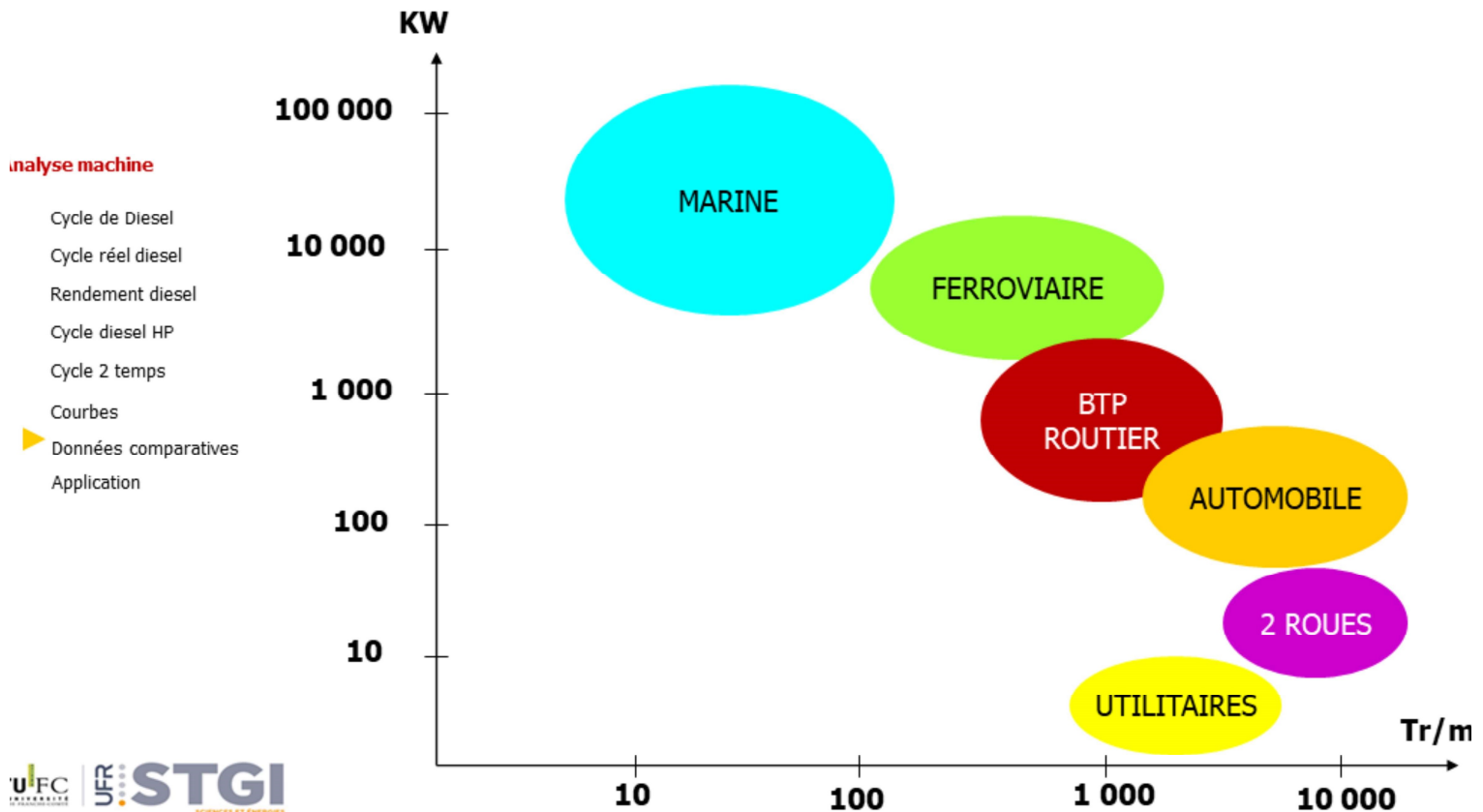
Courbes

► Données comparatives

Application

Temps du cycle	Fonctions assurées dans le moteur DIESEL type	Fonctions assurées dans le moteur à ESSENCE type
1. Admission	Aspiration d'air	Aspiration d'un mélange air-essence préparé et dosé
2. Compression	Très forte compression 20 à 30 bars de l'air d'où échauffement à 600°C environ. Rapport volumétrique de 16/1 à 24/1	Compression du mélange 8 à 12 bars d'où échauffement à 300°C environ. Rapport volumétrique 5/1 à 11/1
En fin de course de compression	Injection sous forte pression (100 à 300 bars) du combustible qui s'enflamme spontanément au contact de l'air surchauffé	Allumage du mélange par étincelle électrique à la bougie
3. Combustion ou explosion	Combustion et détente	
4. Echappement	Evacuation des gaz brûlés	

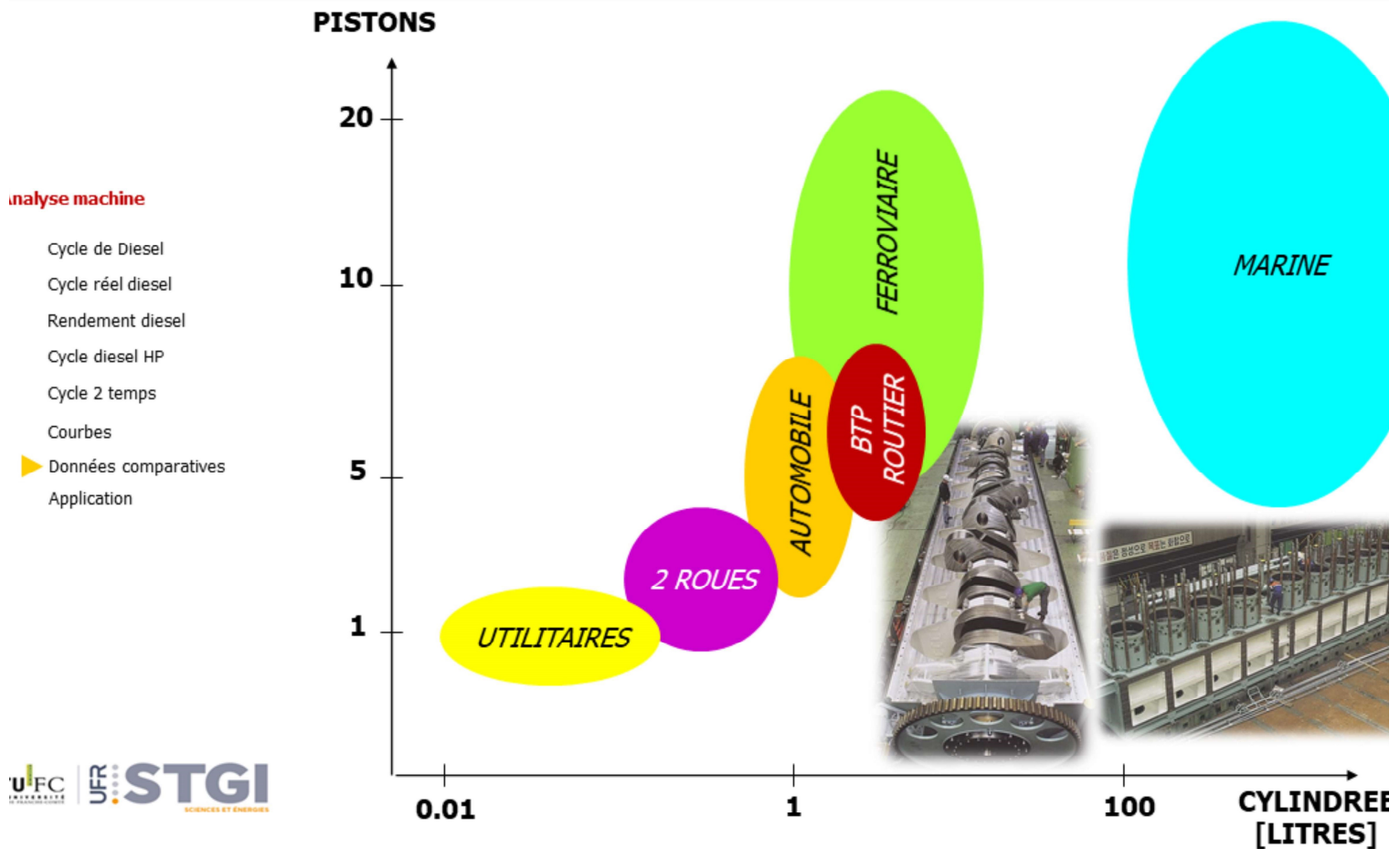
Ordres de grandeur sur les puissances



Il faut noter qu'un moteur à fortes dimensions tourne lentement, à l'inverse un moteur qui tourne très vite sera de faibles dimensions.

Ce constat est généralisable à tous les systèmes mécaniques.

Ordres de grandeur sur les géométries



L'échelle en abscisse est logarithmique.

Les caractéristiques des moteurs de bateaux, avec plusieurs m3 de cylindrée, sont absolument impressionnantes...

Exemple : pour un porte conteneur, caractéristiques du moteur thermique ...

- 108 000 CV
- 26m de long,
- 10m de large,
- 13m de haut,
- 2300 tonnes (le vilebrequin à lui seul fait 300 tonnes)
- 12 000 litres de fuel lourd/heure à 25 nœuds, la moitié à vitesse économique (14 nœuds).

Gourmand ? Et bien non, pas tant, avec une consommation spécifique de 111gr/cv et par heure, ce sont les diesels les plus économiques. Ce sont des moteurs à rampes communes (comme nos voitures désormais) mais 2 temps.

Quelques données...

analyse machine

Cycle de Diesel

Cycle réel diesel

Rendement diesel

Cycle diesel HP

Cycle 2 temps

Courbes

► Données comparatives

Application



Familles principales des moteurs à pistons										
Famille	Particularités	Type	Cycle	Alésage * Course [mm]	Cylindrée unitaire [L]	Nb de cylindres	Vitesse rotation maxi [tr/mn]	Vitesse piston maxi [m/s]	Pression moyenne effective [bar]	Puissance [kW]
Moteurs lents	Propulsion marine directe	DID	2 temps suralimenté	350*1000 900*3000	100 à 1800	4 à 12	60 à 200	8	13 à 17	4 à 2000
Moteurs semi-rapides	Propulsion marine via réducteur	DID G DF	4 temps suralimenté	400*500 570*650	60 à 190	5 à 18	320 à 500	10	20 à 23	2 à 1000
Moteurs rapides	Propulsion marine ou ferroviaire	DID	4 temps suralimenté	180*200 300*300	5 à 20	4 à 20	1000 à 1500	11	15 à 23	10 à 1000
	Poids lourds Engins de chantier			100*110 140*160	0.9 à 2.5	6 à 8	1500 à 3000	12	9 à 15	5 à 1000
Automobile		DID DII	4 temps (suralimenté)	80*80 90*90	0.4 à 0.6	4 à 6	4000 à 4500	13	8 à 12	60 à 1000
		AC		70*70 90*90	0.25 à 0.6	3 à 12	5500 à 8000	18	10 à 15	10 à 1000
Hors-bord		AC	2 temps	80*80	0.4	1 à 8	5000	14	6	10 à 1000
2 roues		AC	2 temps	40*40 90*90	0.05 à 0.6	1 à 3	8000	10 à 18	7	10 à 1000
			4 temps	55*55	0.125 à 0.3	1 à 4	10000	18	10 à 12	10 à 1000
Moteurs utilitaires	Tronçonneuses, tondeuses, groupes électrogènes...	AC (DID)	2 ou 4 temps	40*40 75*75	0.05 à 0.3	1	3000 à 4000	5 à 10	4 à 8	2 à 1000

DID= diesel à injection directe
DII = diesel à injection indirecte

G = moteur à gaz
DF = dual-fuel (diesel + gaz)

AC = allumage commandé
() = éventuellement

Une vidéo

analyse machine

Cycle de Diesel

Cycle réel diesel

Rendement diesel

Cycle diesel HP

Cycle 2 temps

Courbes

Données comparatives

▶ Application

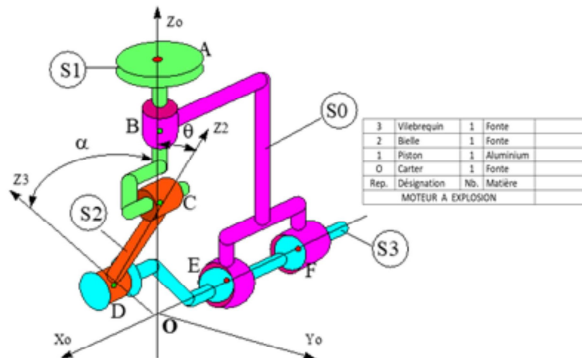
<https://www.dailymotion.com/video/xvppc>

Application 2

analyse machine

- Cycle de Diesel
- Cycle réel diesel
- Rendement diesel
- Cycle diesel HP
- Cycle 2 temps
- Courbes
- Données comparatives
- Application

Le mécanisme représenté sur le dessin suivant est celui utilisé dans un moteur à explosion.



C'est un classique système bielle-manivelle qui transforme la translation alternée du piston en rotation continue du vilebrequin..

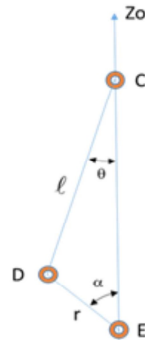
La pression P sur la tête du piston au moment de l'explosion des gaz atteint 7 Mpa.

Le diamètre du piston vaut $D = 80$ mm, sa masse est $m = 0,4$ kg.

L'excentricité du vilebrequin est $r = 50$ mm et la longueur de la bielle est $\ell = 150$ mm, on pourra considérer $r/\ell \ll 1$.

Le vilebrequin tourne à 6000 tr/mn.

On appelle α l'angle de rotation du vilebrequin par rapport à l'axe vertical et β l'angle de rotation de la bielle par rapport à ce même axe.



Travail demandé :

- 1 Calculer l'expression de $z = f(\alpha)$ en [m].
- 2 En déduire l'expression de la vitesse du piston $V = g(\alpha)$ en [m/s].
- 3 Faire de même avec l'accélération du piston, $A = h(\alpha)$ en [m/s²].
- 4 Calculer l'effort d'inertie maximum sur le piston et comparer son ordre de grandeur avec l'effort issu de la pression des gaz au moment de l'explosion. Conclure.

Application 2

analyse machine

- Cycle de Diesel
- Cycle réel diesel
- Rendement diesel
- Cycle diesel HP
- Cycle 2 temps
- Courbes
- Données comparatives
- ▶ Application



4 place Tarradin - BP 71427
25211 Montbéliard Cedex

Tél. : +33 (0)3 81 99 46 62
Fax : +33 (0)3 81 99 46 61
ufr-stgi@univ-fcomte.fr

<http://stgi.univ-fcomte.fr>