University of M'sila-----Faculty: ST------Module:Internal combustion engines -Master 2 -Energetics 2025/2026

Internal Combustion Engine (Advanced Course)

The content of the course

Chapter 01: New Techniques and Engine Efficiency Improvement
1-1 Under-sizing
1-2 Variable Valve Timing
1-3 Variable Compression Ratio
1-4 Miller-Atkinson Cycle
1-5 Stratified Charge
1-6 HCCI Concept (Homogeneous Charge Compression Ignition)
1-7 PCCI Concept (Premixed Charge Compression Ignition)

Chapter 02: Gasoline Injection Techniques
2-1 Electronic Engine Management and Diagnostics
2-2 K-Jetronic System
2-3 D-Jetronic System
2-4 L-Jetronic System

Chapter 03: Combustion Modeling in Engines
3-1 Single Zone Model
3-2 Two-Zone Model
3-3 Multi-Zone Model

Chapter 04: Formation of Pollutants
4-1 Carbon Monoxide (CO)
4-2 Unburned Hydrocarbons
4-3 Formation of Aromatics
4-4 Formation of Soot
4-5 Formation of Nitrogen Oxides (NOx)

Chapter 05: Supercharging of Internal Combustion Engines with Turbochargers
5-1 Mapping (Turbine, Compressor, Engine) and Functional Characteristics
5-2 Engine-Turbocharger Matching

محرك الاحتراق الداخلي (دوروس متقدمة)

محتوى المادة

الفصل 01: تقنيات جديدة وتحسين كفاءة المحركات

1-1 التصغير الزائد

2-1 توقيت صمام متغير

3-1 نسبة ضغط متغيرة

4-1 دورة ميلر-أتكينسون

5-1 الشحن بالطبقات

6-1 مفهوم) HCCIالاشتعال المتجانس بالضغط)

7-1 مفهوم) PCCIالاشتعال المتجانس المسبق بالضغط)

الفصل 02: تقنيات حقن البنزين

1-2 إدارة المحرك الإلكترونية والتشخيص

2-2 نظام K-Jetronic

2-3نظام D-Jetronic

2-4نظام L-Jetronic

الفصل 03: نموذج منطقة واحدة

1-3 النموذج منطقة واحدة

2-3 النموذج منطقتين

3-3 النموذج متعدد المناطق

الفصل 04: تكون الملوثات

1-4 أول أكسيد الكربون ((CO

4-2الهيدروكربونات غير المحترقة

3-4 تكون المركبات العطرية

4-4 تكون السوت

5-4 تكون أكاسيد النيتروجين ((NOx

الفصل 05: تحميل المحركات الاحتراقية الداخلية بواسطة التوربوكمبريسورات

1-5 الرسم البياني (التوربينات والكمبريسورات والمحرك) والخصائص الوظيفية

2-5 توافق المحرك مع التوربوكمبريسور

CHAPITRE 01

New techniques and improvement of engine performance

1-1 Undersizing (downsizing)

Under-sizing is a set of processes aimed at reducing the displacement of an engine without compromising its specific power, with the goal of reducing fuel consumption.

The technical solutions implemented in both gasoline and diesel engines enable the reduction of engine displacement while maintaining sufficient power for the vehicle's requirements.

To achieve this goal, several methods are employed, such as direct injection and turbocharging.

الفصل الأول

تقنيات جديدة وتحسين أداء المحركات

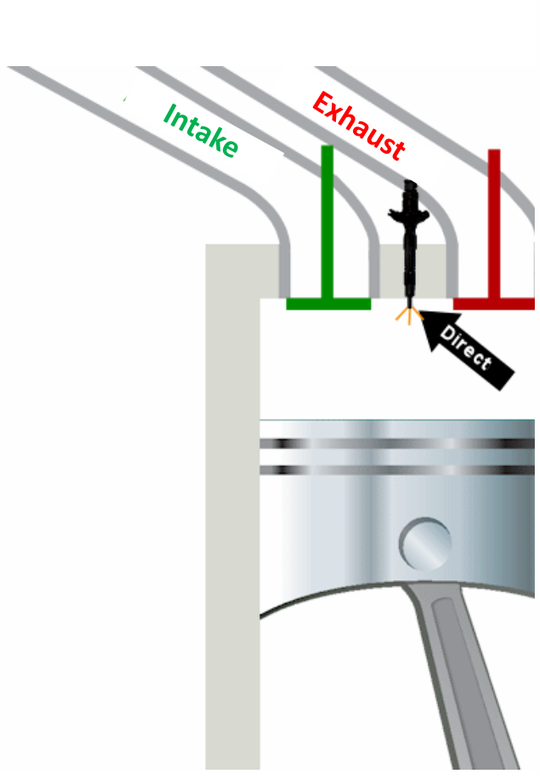
1-1 تقليص الحجم

التقليل من الحجم هو عبارة عن مجموعة من العمليات التي تهدف إلى تقليل حجم المحرك دون المساس بقوته المحددة ، بهدف تقليل استهلاك الوقود. تتيح الحلول التقنية المطبقة في كل من محركات البنزين والديزل تقليل إزاحة المحرك مع الحفاظ على طاقة كافية لمتطلبات السيارة.لتحقيق هذا الهدف ، يتم استخدام عدة طرق ، مثل الحقن المباشر والشحن التوربيني.

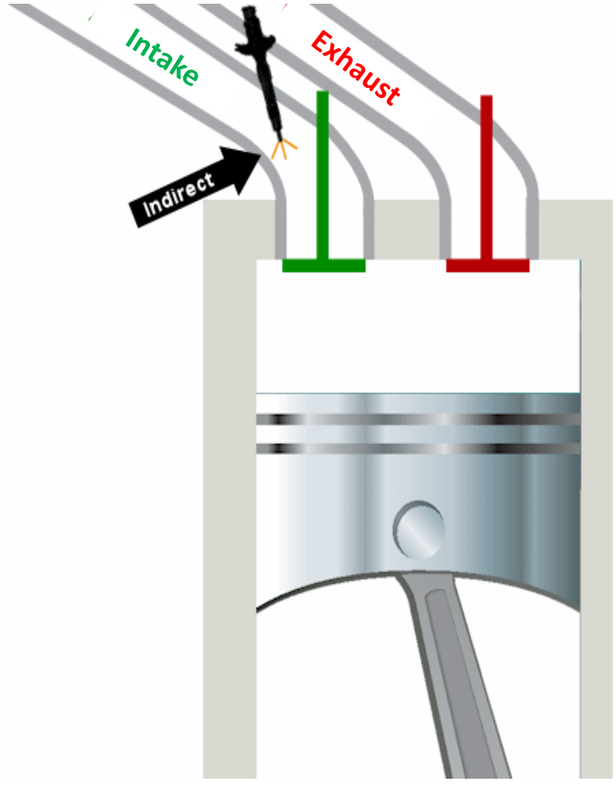
1.1.1 Direct Injection

This type of injection results in higher pressures as these engines have a higher compression ratio.

Modern gasoline engines, especially those equipped with a turbocharger, promote direct injection to reduce fuel consumption.



Direct Injection

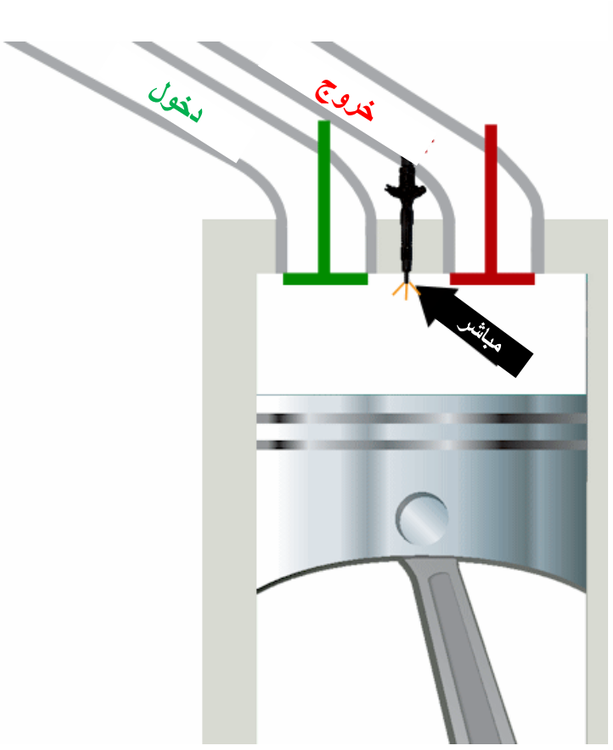


Indirect Injection

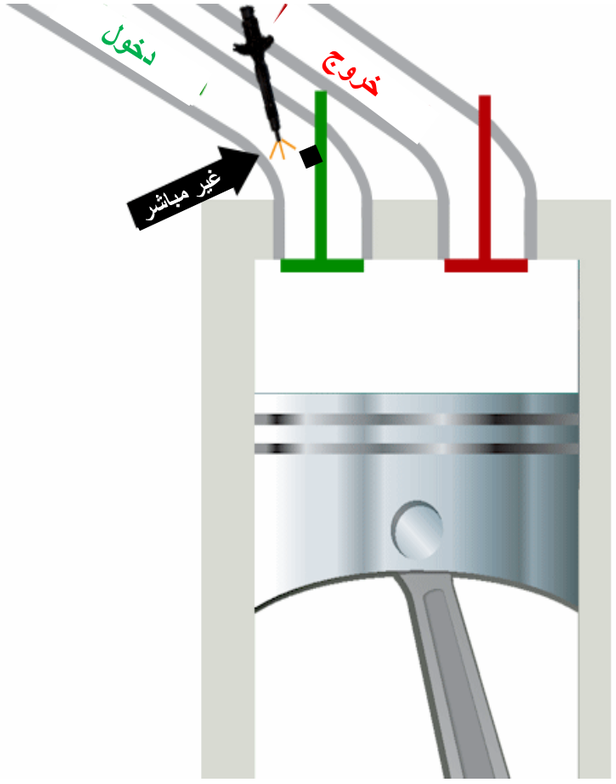
1.1.1 الحقن المباشر

هذا النوع من الحقن يؤدي إلى زيادة الضغط حيث تحتوي هذه المحركات على نسبة ضغط أعلى

المحركات الحديثة التي تعمل بالبنزين، خاصة تلك المجهزة بتوربوشاحن، تتبنى حقن المباشر للحد من استهلاك الوقود



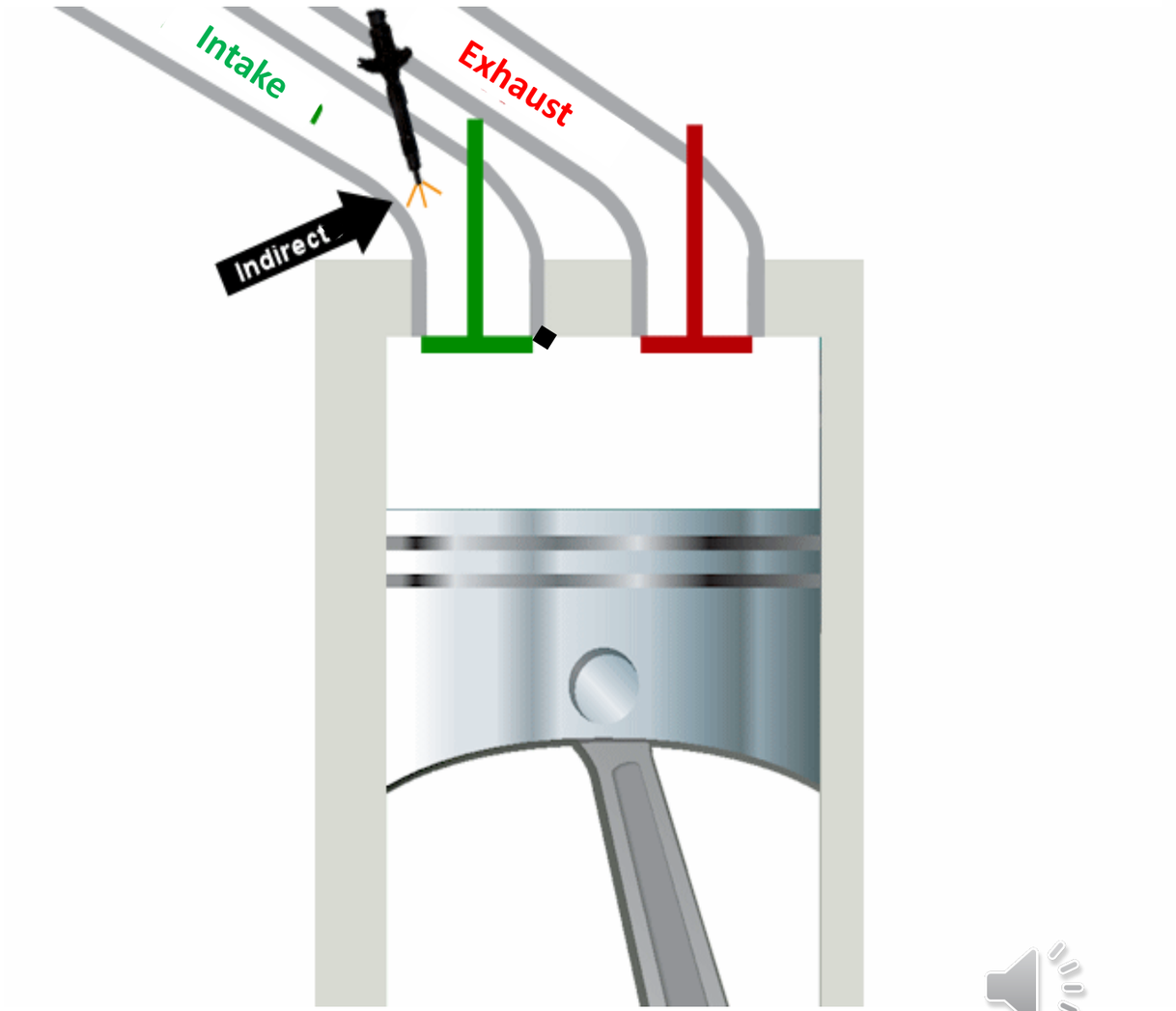
الحقن المباشر



الحقن الغيرالمباشر

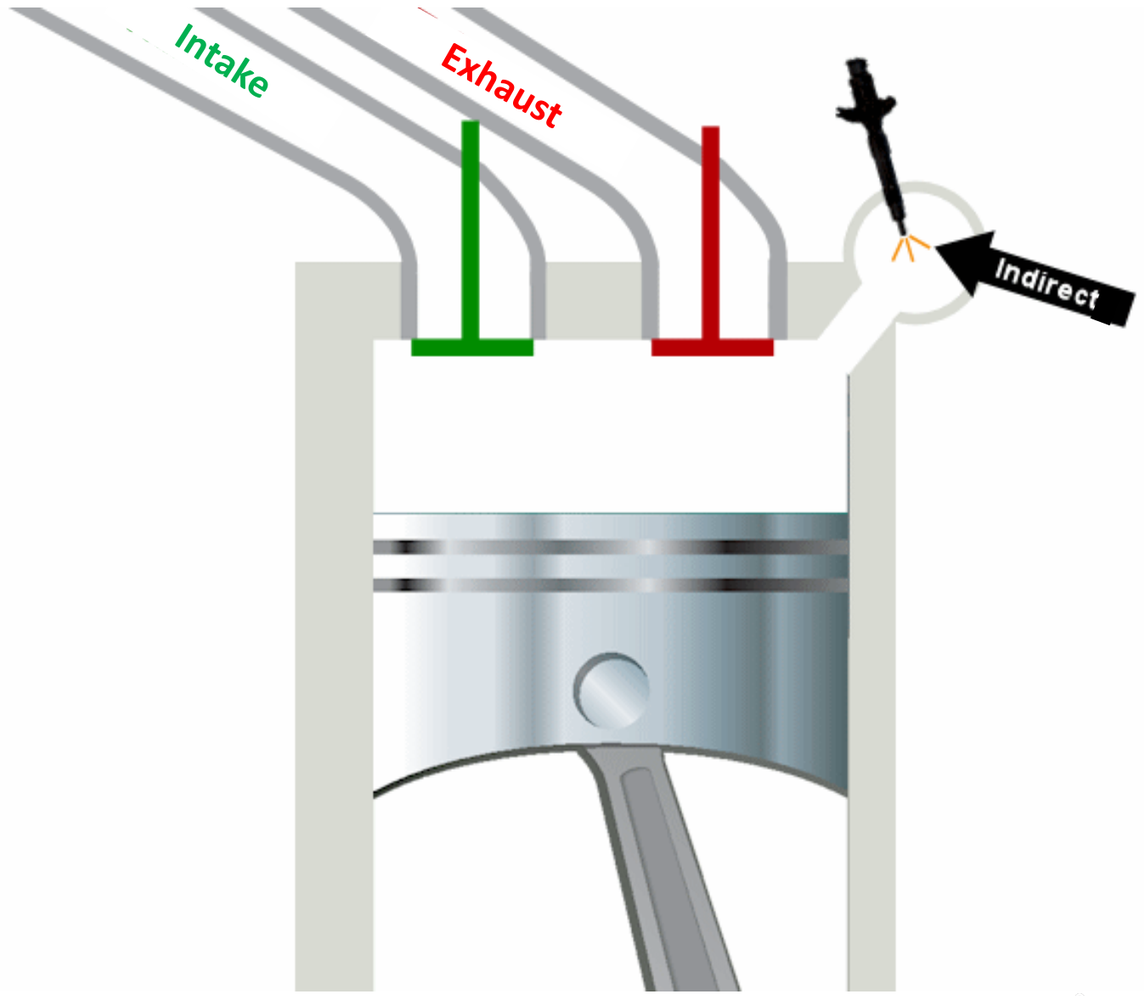
1.1.2 Indirect injection

Indirect Injection in ESSENCE Engine



On an indirect injection of a gasoline engine, the injector is placed upstream of the valve, ie in the intake manifold. The mixture is carried out by vaporization before entering the cylinder.

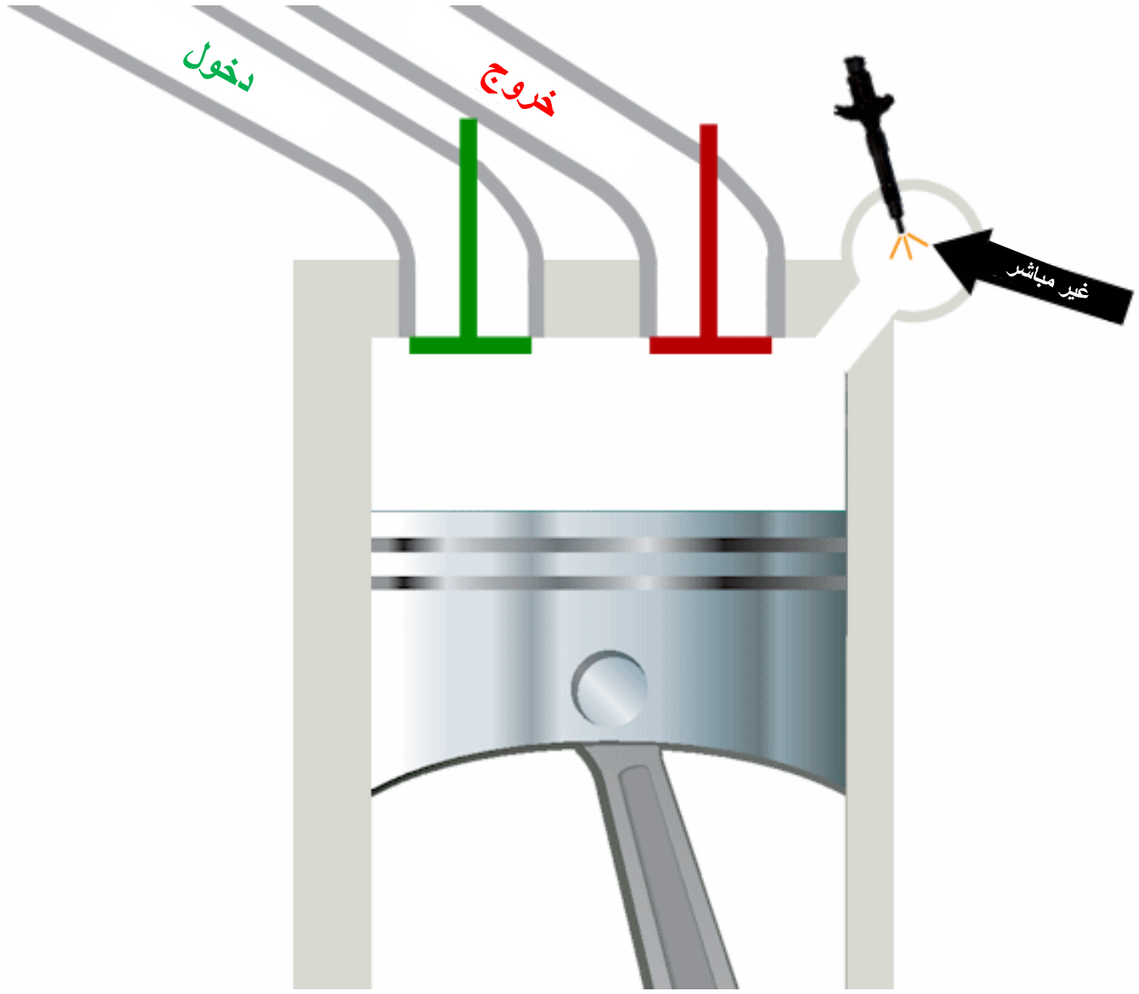
Indirect Injection in DIESEL Engine



In the case of a diesel, the injection takes place in a small separate chamber (pre-combustion chamber) which overlooks the cylinder, and not in the intake duct in the case of an indirect gasoline.

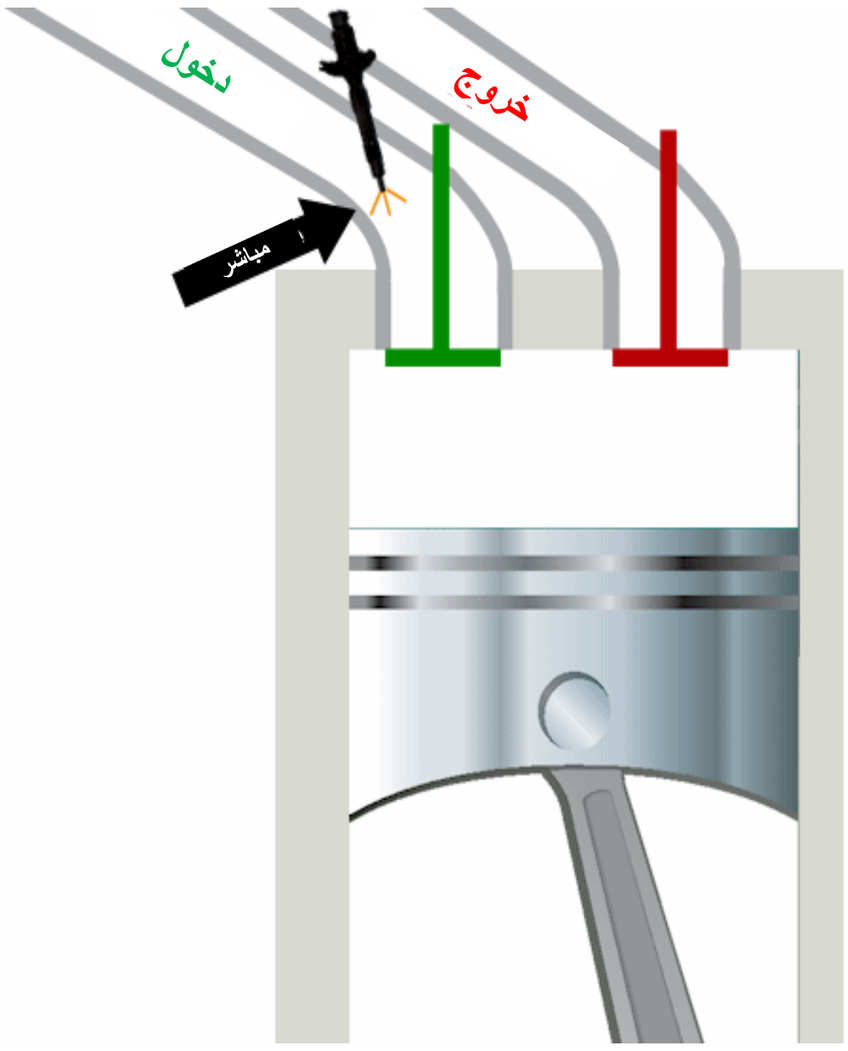
1.1.2 الحقن غير المباشر

الحقن غير المباشر في محركات الديزل



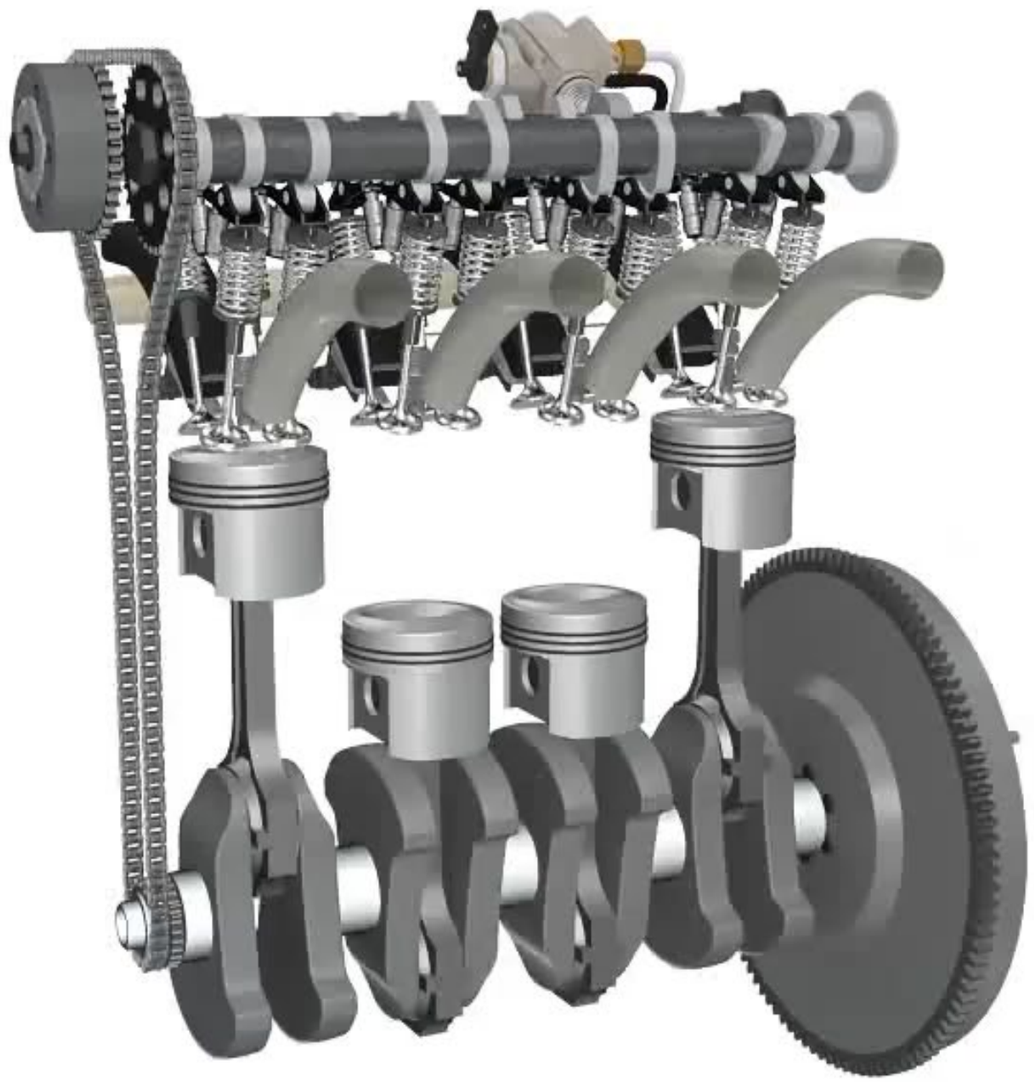
في حالة محرك الديزل، يتم الحقن في غرفة صغيرة منفصلة تسمى غرفة الاحتراق الأولي، والتي تكون متصلة بالأسطوانة. وهذا يختلف عن الحقن غير المباشر للبنزين، حيث يتم حقن الوقود في منظم السحب

الحقن غير المباشر في محركات البنزين



في أنظمة الحقن غير المباشر لمحركات البنزين، يتم وضع الحاقن في مكان يسبق صمام السحب، عادة في المنظم السحبي. يتم تجزئة الوقود وخلطه مع الهواء عن طريق التبخير قبل دخول الأسطوانة

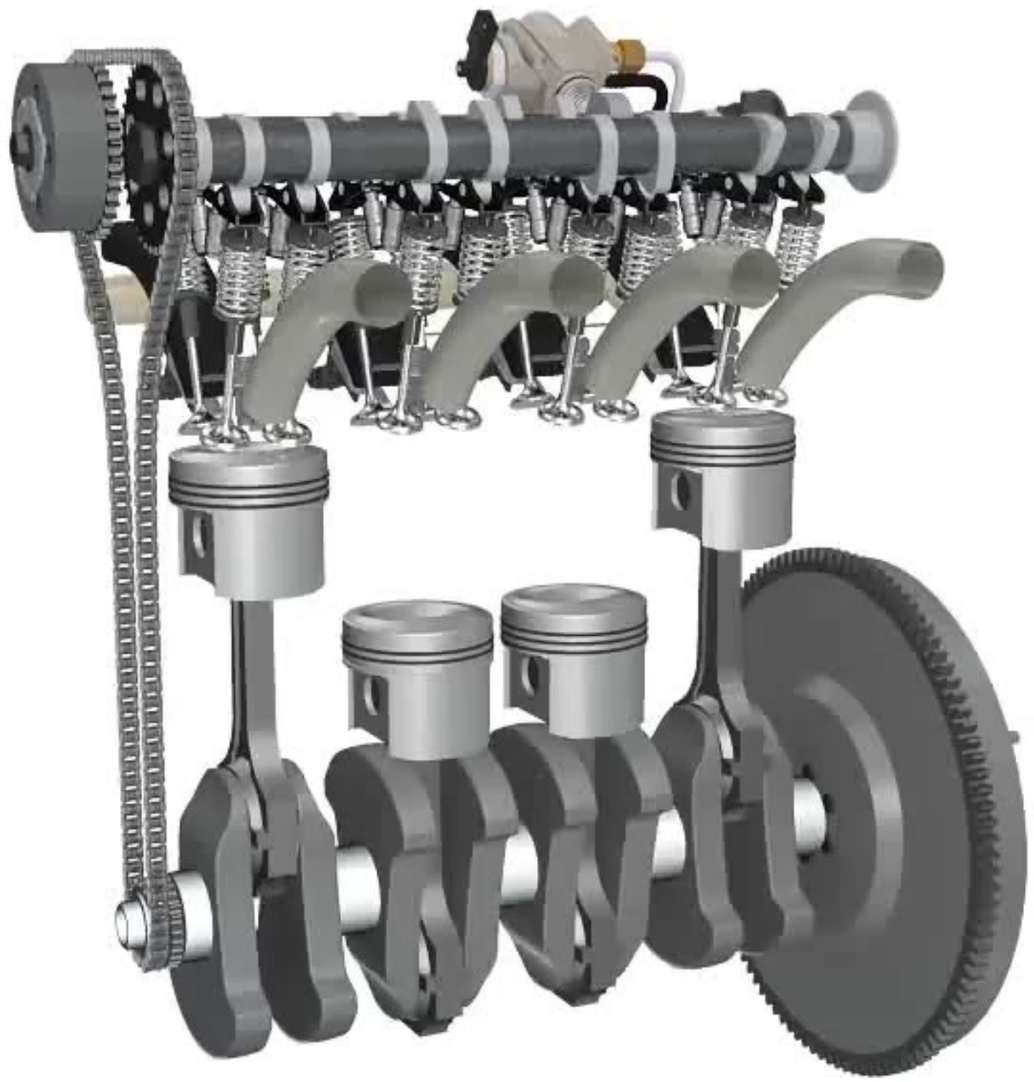




© Techauto 2013

VIDEO INJECTION DIRECTE





© Techauto 2013

VIDEO INJECTION DIRECTE

1.1.3 Turbocharging with Turbocharger

It provides a power gain or a reduction in displacement while maintaining the same power output. For example, a turbocharged 1.6-liter engine can achieve the same torque performance as a 2.5-liter engine.

THE POWER OF AN ENGINE P

P=C.ω

P is the power

C is the couple

ω is the rotational speed

$$\omega = \frac{\pi N}{30}$$

(ω in s^{-1}, N in tr/min)

To increase the power of an engine, we can increase:

1. **its rotational speed**
2. **its couple:**

3.1.1 التوربوشحن بواسطة التوربوشاحن

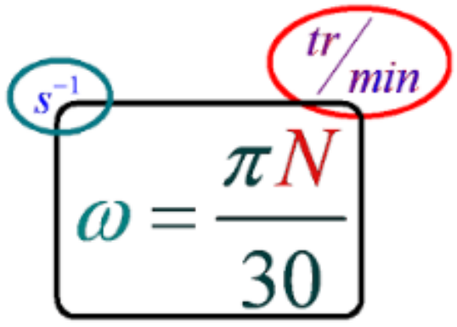
يوفر التوربوشحن زيادة في القوة أو تقليل في السعة مع الحفاظ على نفس إخراج القوة. على سبيل المثال، يمكن لمحرك سعة 1.6 لتر مع توربوشحن تحقيق نفس أداء عزم الدوران كمحرك سعة 2.5 لتر

قوة المحرك P

$$P=C.\omega$$

P هو القوة

C هو العزم



لزيادة قوة المحرك، يمكننا زيادة:

- **سرعة دورانه**
- **العزم**

حيث يُمثل الرمز ω سرعة دوران المحرك.

Increasing the rotational speed of an engine is limited by factors such as inertia and friction in the engine components. As a result, the speed cannot be increased arbitrarily.

The torque can be increased by increasing the quantity of fuel and oxidizer (air) through methods such as turbocharging or mechanical supercharging (forced induction).

The torque of the engine also depends on the mean effective pressure (or PME) This is the role of supercharging, which thus makes it possible to increase the PME and therefore the torque of the engine and therefore the power

زيادة سرعة دوران المحرك محدودة بعوامل مثل الاختام والاحتكاك في مكونات المحرك. نتيجة لذلك، لا يمكن زيادة السرعة بشكل عشوائي

يمكن زيادة العزم عن طريق زيادة كمية الوقود والمؤكسد (الهواء) باستخدام طرق مثل التوربوشحن أو التعزيز الميكانيكي (التعزيز القسري)

العزم للمحرك يعتمد أيضًا على الضغط الفعال المتوسط (PME)، وهذا هو دور التوربوشحن (Supercharging)، حيث يسمح بزيادة الضغط الفعال المتوسط وبالتالي العزم للمحرك وبالتالي القوة

1.1.4 *ISO-consumption curves*

For an internal combustion engine, the amount of fuel depends on the following factors:

Power (P):

Torque (C):.

Rotational speed (N):

The iso-consumption curves indicate the areas where the motor is economical and those which generate high consumption.

These curves allow for the comparison of different engines based on specific fuel consumption (Cse) expressed in grams per kilowatt-hour (g/kWh).

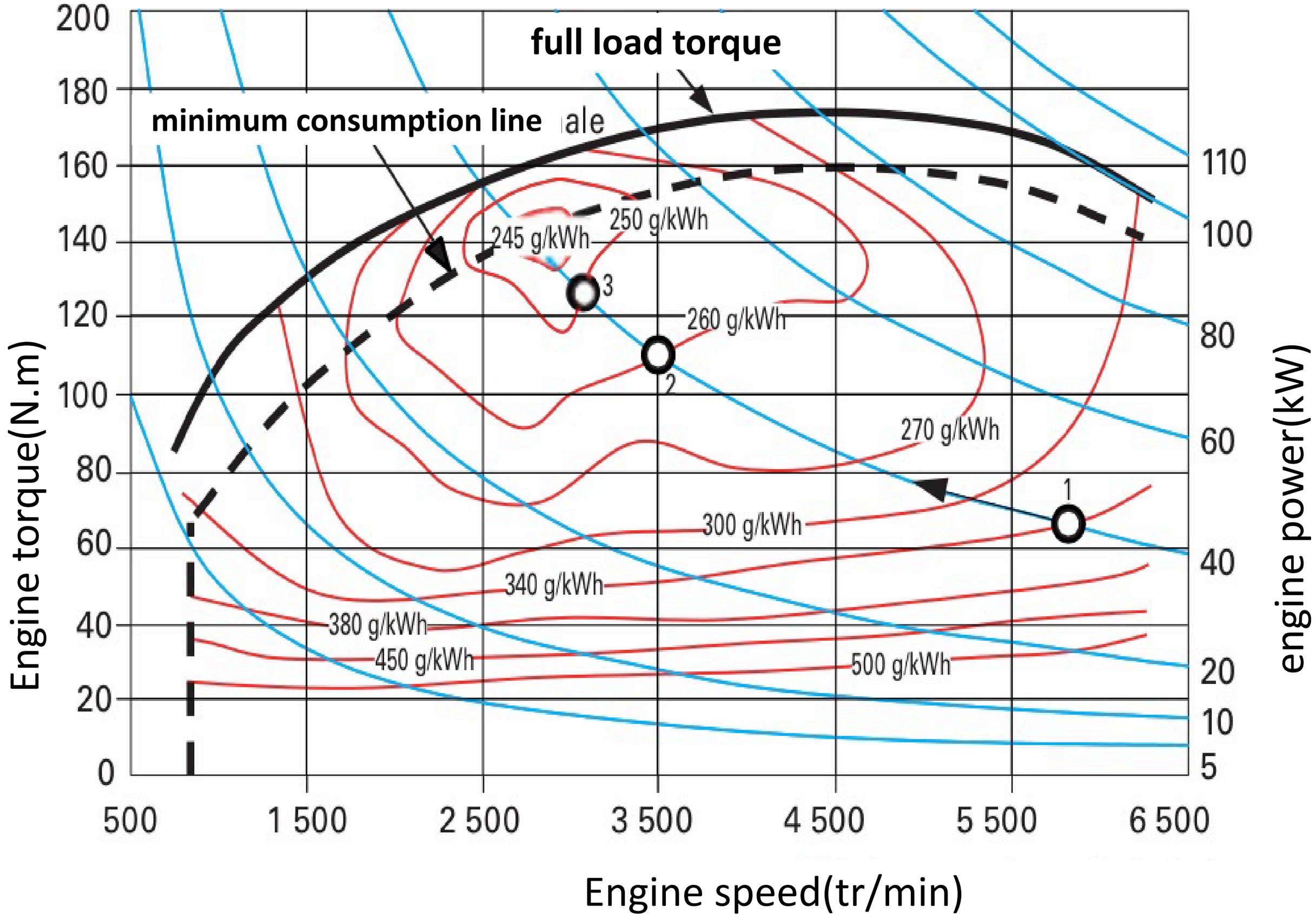
1. 1. 4 منحنيات الاستهلاك المتساوي

بالنسبة لمحرك الاحتراق الداخلي، تعتمد كمية الوقود على العوامل التالية:

1. **القوة P**
2. **العزم C**
3. **سرعة الدوران N**

تُشير المنحنيات الإيزو-استهلاك إلى المناطق التي يكون فيها المحرك اقتصاديًا وتلك التي تُولد استهلاكًا عاليًا

تتيح هذه المنحنيات مقارنة محركات مختلفة بناءً على استهلاك الوقود المحدد (Cse) المعبر عنه بالجرامات لكل كيلووات-ساعة (g/kWh)


full load torque
minimum consumption line
245 g/kWh
250 g/kWh
260 g/kWh
270 g/kWh
300 g/kWh
340 g/kWh
380 g/kWh
450 g/kWh
500 g/kWh
1
2
3
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
110
100
80
60
40
20
10
5
500
1 500
2 500
3 500
4 500
5 500
6 500
Engine torque(N.m)
engine power(kW)
Engine speed(tr/min)

1.1.5 fuel consumption

Fuel consumption depends on:

- **Vehicle mass,**
- **Geometry or shape to take into account the forces of penetration in the air,**
- **Forces due to rolling of the vehicle, etc.**
- **Power**
- **Couple**
- **Speed in revolutions per minute.**

5.1.1 استهلاك الوقود

استهلاك الوقود يعتمد على:

- **وزن المركبة،**
- **الهندسة أو الشكل لأخذ بعين الاعتبار قوى التسلل في الهواء،**
- **القوى الناتجة عن تدحرج المركبة، إلخ**
- **القوة**
- **العزم**
- **السرعة بالدورات في الدقيقة.**

انبعاث ثاني أكسيد الكربون (CO2)

سيتم أيضًا أخذ نوع الوقود المستخدم في المركبة في الاعتبار لتحديد كمية ثاني أكسيد الكربون (CO2) المنبعثة لكل كيلومتر.

مثال

قم بحساب استهلاك الوقود باللتر / 100 كم لسيارة ديزل تنبعث منها 120 غرام / CO2 كم.
البيانات المتاحة هي:

- **كتلة وقود الديزل تحتوي على 85٪ من الكربون.**
- **كثافة الديزل هي 830 كجم / متر مكعب**

44 → 12

120 → m_C

For example, the objectif of 120 g/km of CO_2 requires a fuel consumption of 4.6 liters per 100 kilometers for a diesel vehicle.

Explanation: 120 gCO_2 is equivalent to 120x12/(12+2x16) = 32.7 gC (carbon). Considering that diesel fuel contains 85% carbon by mass, the fuel consumption would be 32.7/0.85 = 38.5 g of diesel. With a density of diesel fuel at 830 kg/m3, the vehicle would need to consume approximately 4.67 liters per 100 kilometers.

85 % → 32,7 g

100 % → m carburant

830000 g → 1000 l

38,5 g → Cse l

44 ⟶ 12

120 ⟶ m_C

على سبيل المثال ، تحدد الهدف من 120 جم / كم من ثاني أكسيد الكربون استهلاكًا يبلغ 4.6 لتر / 100 كم للمركبة الديزل.

التفسير: 120 جم من ثاني أكسيد الكربون تمثل 120 × 12 / (12 + 2 × 16) = 32.7 جم من الكربون ؛ وعلمًا بأن كتلة وقود الديزل تحتوي على 85٪ من الكربون ، فسيكون الاستهلاك 32.7 / 0.85 = 38.5 جم من الديزل. بناءً على كثافة الديزل البالغة 830 كجم / متر مكعب ، يجب أن يكون استهلاك المركبة 4.67 لتر / 100 كم

85 % ⟶ 32,7 g

100 % ⟶ m carburant

830000 g ⟶ 1000 l

38,5 g ⟶ Cse l

1.1.6 Consumption reduction elements

The consumption of a vehicle depends on various parameters

1. Those inherent to the vehicle:

- **the mass, the resistance to movement (friction of the air)**

2. Those inherent in use:

- **acceleration, speed, elevation of the course...**

The mass of vehicles is a determining factor in fuel consumption, the higher it is, the more energy the vehicle will need to move.

6.1.1 عناصر تقليل الاستهلاك

استهلاك المركبة يعتمد على معاملات مختلفة.

1. **تلك المرتبطة بالمركبة ذاتها: الكتلة، مقاومة التحرك (احتكاك الهواء).**
2. **تلك المرتبطة بالاستخدام: التسارع، السرعة، ارتفاع المسار**

كتلة المركبات هي عامل حاسم في استهلاك الوقود، فكلما كانت الكتلة أعلى، ستحتاج المركبة إلى المزيد من الطاقة للتحرك

1.1.6.1 drag coefficient (Cx)

The drag coefficient (Cx) or the resistance to advancement accounts for the resistance force of a surface. It depends on the geometry of the vehicle.

1.1.6.2 drag force (Fx)

The drag force is the resisting force that a fluid exerts on an object when the fluid or the object are moving relative to each other. The drag force opposes the motion of the object and acts as a frictional force. It is deined according to the characteristics of the vehicle and its speed of movement:

$$F_x = \frac{1}{2} . \rho . S . C_x . v^2$$

ρ: Fluid density (ρ air = 1.25 kg/m3 at +10°C)

S: Frontal area of the vehicle in m2 (or reference area)

Cx: Drag coefficient

v: Relative velocity of the vehicle with respect to the fluid in m/s.

1.6.1.1 معامل السحب (Cx)

يمثل معامل السحب ((Cxأو مقاومة التقدم قوة مقاومة السطح. ذلك يعتمد على الشكل الهندسي للسيارة.

2.6.1.1 قوة السحب (Fx)

قوة السحب هي القوة المقاومة التي يمارسها السائل على جسم ما عندما يتحرك المائع أو الجسم بالنسبة لبعضهما البعض. تعارض قوة السحب حركة الجسم وتعمل كقوة احتكاك. يتم تحديدها حسب خصائص المركبة وسرعة حركتها:

$$F_x = \frac{1}{2} . \rho . S . C_x . v^2$$

ρ:كثافة السوائل (ρالهواء = 1.25 كجم / م 3 عند + 10 درجة مئوية)

S : المنطقة الأمامية للسيارة م 2 (أو منطقة مرجعية) :Cxمعامل السحب :vالسرعة النسبية للمركبة بالنسبة للسائل بوحدة .m / s

EXEMPLE

1- Calculate the force Fx required for a vehicle with a drag coefficient Cx = 0.40 and a reference area S = 2.70 m2 to travel at 100 km/h.

2- Calculate the energy consumed over 100 km.

3- Calculate the specific fuel consumption (Cse) over 100 km.

Given: Lower Calorific Value = 38.08 MJ/l

Overall efficiency from tank to wheel = 40%

مثال

1- احسب القوة Fxالمطلوبة لمركبة ذات معامل جر Cx = 0.40ومنطقة مرجعية S = 2.70 m2للتنقل بسرعة 100 كم / ساعة.

2- احسب الطاقة المستهلكة لأكثر من 100 كم

3- احسب استهلاك الوقود المحدد ((Cseلأكثر من 100 كم.المعطى: القيمة الحرارية المنخفضة = 38.08 ميجا جول / لترالكفاءة العامة من الخزان إلى العجلة = 40٪

$$F_x = \frac{1}{2}.\rho.S.C_x.v^2 = \frac{1}{2} * 1{,}25 * 2{,}70 * 0{,}4 * 27{,}8^2 = 521{,}7\,N$$

The energy W(work) of displacement = force x distance traveled

W=FxL=521.7x100000=52.17MJ.The Net Calorific Value or NCV designates the quantity of heat released during the complete combustion of a fuel, the water formed being evacuated in the form of vapor. Considering a diesel engine (Lower Calorific Value = 38.08MJ/l)

1L ⟶ 38,08 MJ.

Cse ⟶ 52,17 MJ.

Cse = 52,17/ 38,08= 1,37 litre

and if we have an overall efficiency from the tank to the wheel of 40%, then the consumption actual effective specific Cse(actual) = Cse/0.4= 3.42 liters

We therefore conclude that this vehicle will consume 3.42 liters on the 100km trip only to overcome the aerodynamic resistance to the advancement

$$F_x = \frac{1}{2}.\rho.S.C_x.v^2 = \frac{1}{2} * 1{,}25 * 2{,}70 * 0{,}4 * 27{,}8^2 = 521{,}7\,N$$

الطاقة (Wالشغل) للإزاحة = القوة × المسافة المقطوعة

W=F x L = 521,7x100000=52,17 MJ.

القيمة الحرارية الصافية أو الـ NCVتشير إلى كمية الحرارة التي تحرر خلال احتراق كامل للوقود، حيث يتم إخراج الماء المتكون على شكل بخار

بالنظر إلى محرك ديزل (القيمة الحرارية الدنيا = 38.08 ميجا جول / لتر).

1L ⟶ 38,08 MJ.

Cse ⟶ 52,17 MJ.

Cse = 52,17/ 38,08= 1,37 litre

وإذا كان لدينا كفاءة عامة من خزان الوقود إلى العجلة تبلغ 40٪، فإن استهلاك الوقود الفعلي النوعي الفعال ((Cse(real)
Cse/0.4 = 3.42 =لتر.

نستنتج بذلك أن هذه السيارة ستستهلك 3.42 لتر فقط على مسافة 100 كم للتغلب على المقاومة الهوائية للتقدم

Resistance to rule

Fuel consumption also depends on rolling resistance (Rr). Rolling resistance takes into account characteristics, their condition, pressure, and the type of road surface the vehicle is traveling on.

These characteristics and all the forces give us an expression for the vehicle Toyota PRIUS's resistance force with respect to its moving speed.

$$F\,(en\,N) = 188 + 0{,}32\,.\,v + 0{,}456\,.\,v^2$$

مقاومة السير

يعتمد استهلاك الوقود أيضًا على مقاومة الدوران (Rr) تأخذ مقاومة التدحرج في الاعتبار خصائص الإطارات وحالتها وضغطها ونوع سطح الطريق الذي تسير عليه السيارة.

هذه الخصائص وجميع القوى تعطينا تعبيرًا عن قوة مقاومة السيارة Toyota PRIUSفيما يتعلق بسرعة حركتها

$$F\,(en\,N) = 188 + 0{,}32\,.\,v + 0{,}456\,.\,v^2$$

$$F\,(en\,N)=188+0{,}32\,.\,v+0{,}456\,.\,v^{2}$$

The vehicle requires an energy of 48.175 MJ for a journey of 100 km at a speed of 90 km/h, resulting in a fuel consumption of 3.4 liters (with a Lower Calorific Value of gasoline at 35.45 MJ/l and an overall efficiency of 40%).

Speed of 90 km/h=90*1000/3600=25m/s

$F=188+0{,}32*25+0{,}456*25^{2}$ =481 N

$$F\,(en\ N) = 188 + 0{,}32\,.\,v + 0{,}456\,.\,v^2$$

تتطلب السيارة طاقة قدرها 48.175 ميجا جول لرحلة 100 كم بسرعة 90 كم / ساعة ،
مما ينتج عنه استهلاك وقود يبلغ 3.4 لتر (مع انخفاض قيمة السعرات الحرارية للبنزين
عند 35.45 ميجا جول / لتر وكفاءة إجمالية تبلغ 40٪)

Speed of 90 km/h=90*1000/3600=25m/s

$F=188+0{,}32*25+0{,}456*25^2 = 481\ N$

1-2 Variable distribution

Variable distribution allows for the modulation of certain parameters of the intake and exhaust valves (often only the intake valves), including...

- ***Variable valve timing enables the adjustment of the following parameters of the intake and exhaust valves:***
- ***Valve opening timing (more or less advanced)***
- ***Valve opening duration (more or less extended)***
- ***Valve opening degree (more or less open)***

these systems are known as VTEC in Honda engines, VANOS in BMW engines, and VVT-i in Toyota engines

2-1 التوزيع المتغير

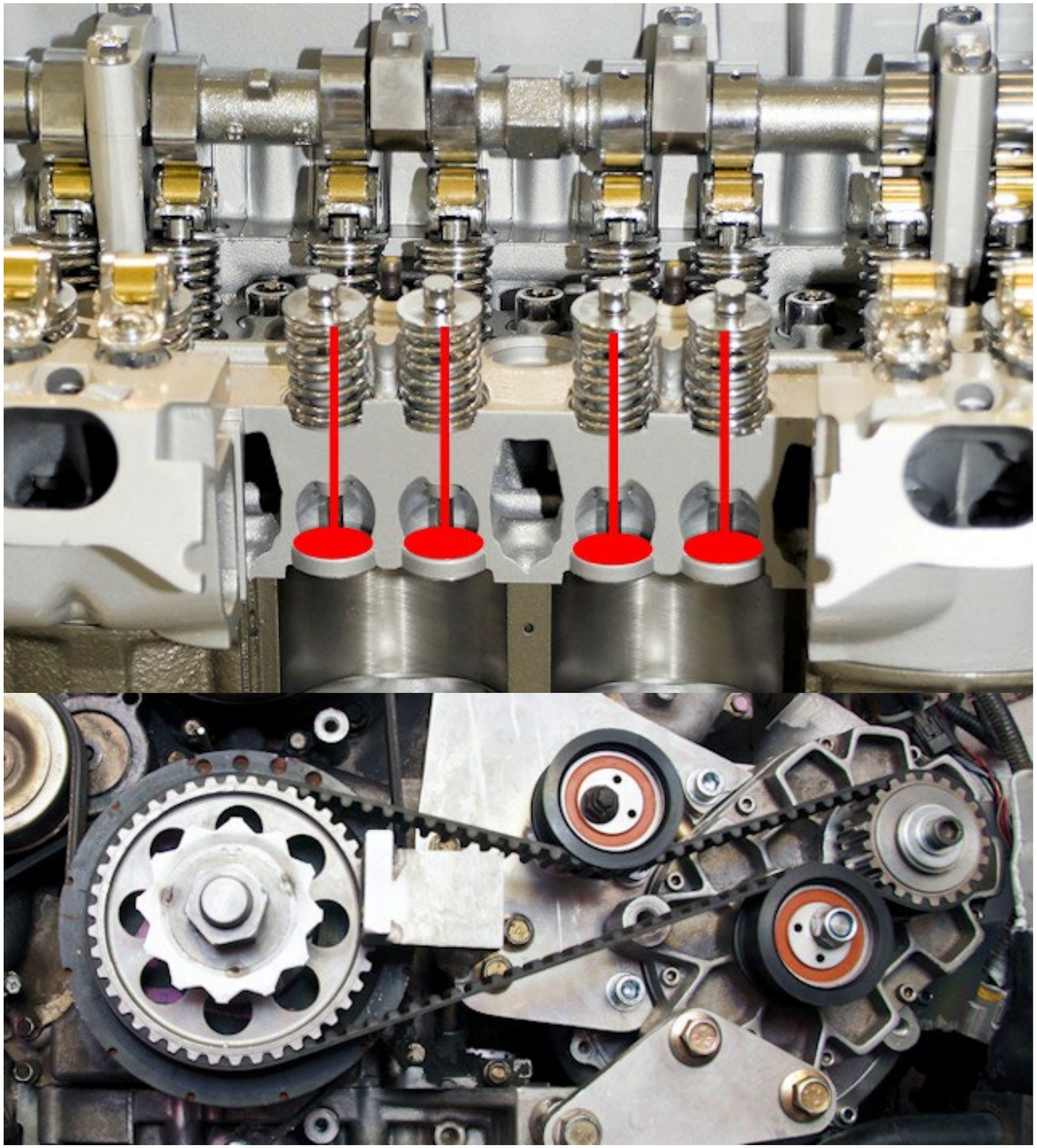
يسمح التوزيع المتغير بتعديل معلمات معينة لصمامات السحب والعادم (غالبًا ما تكون فقط صمامات السحب) ، بما في ذلك ...

تيح توقيت الصمام المتغير تعديل المعلمات التالية لصمامات السحب والعادم

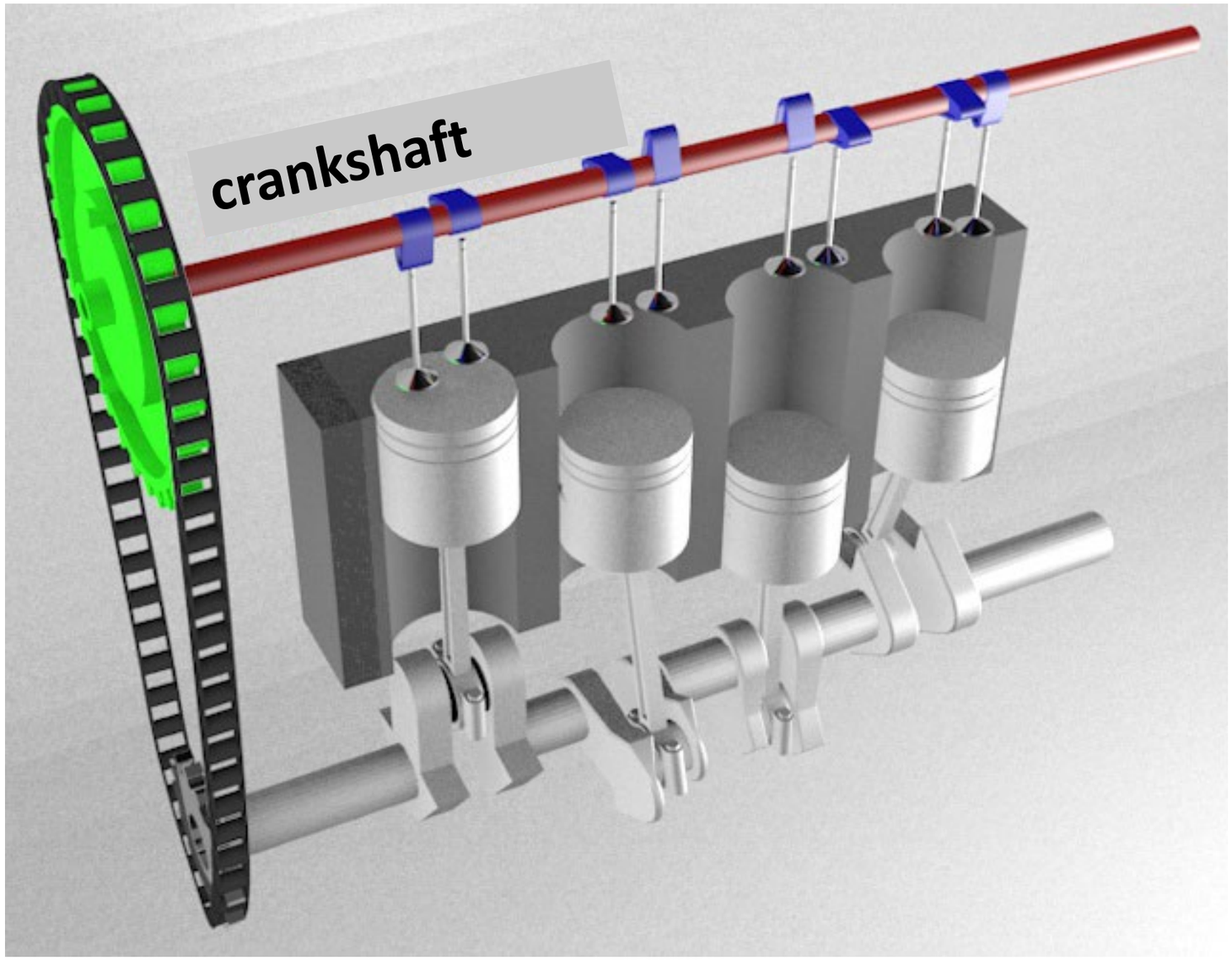
- توقيت فتح الصمام (أكثر أو أقل تقدمًا)
- مدة فتح الصمام (ممتدة أكثر أو أقل)
- درجة فتح الصمام (مفتوحة أكثر أو أقل)

هذه هي الأنظمة المعروفة باسم VTECفي محركات هوندا ، و VANOSفي محركات BMW، و VVT-iفي محركات تويوتا.

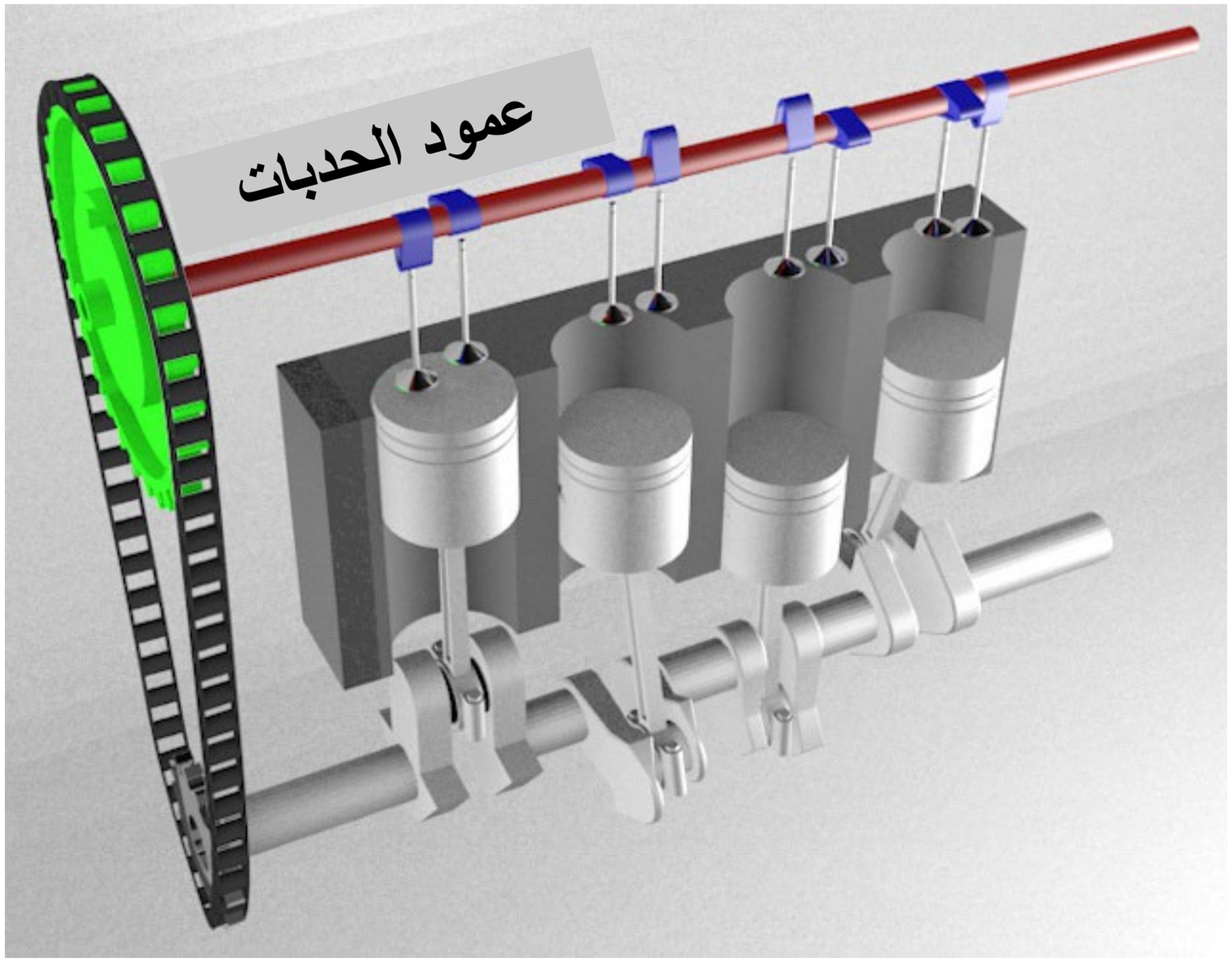
University of M'sila-----Faculty: ST------Module:Internal combustion engines -Master 2 -Energetics 2025/2026



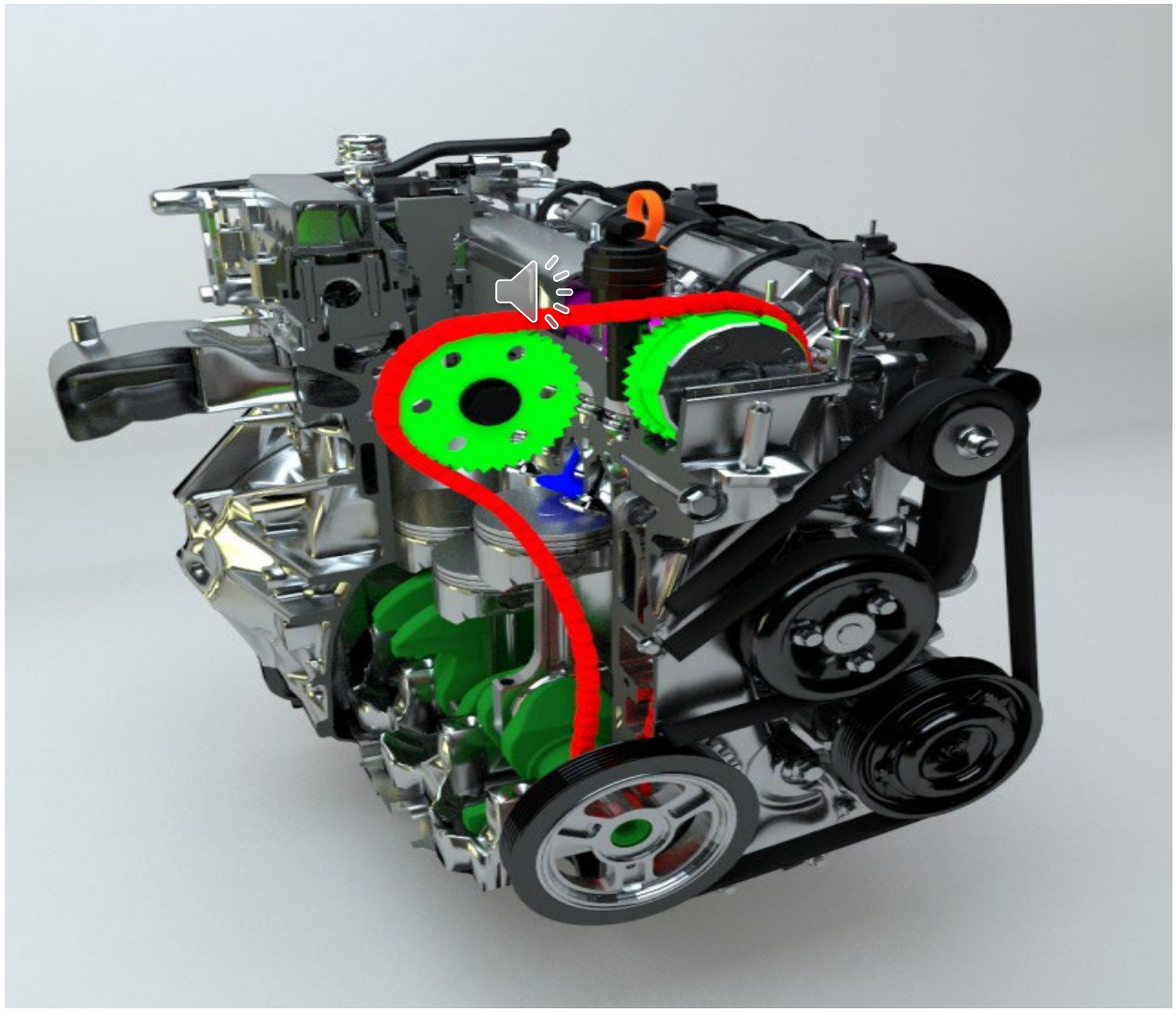
In synchronized rotation with the crankshaft (synchronized by the timing system), the camshaft's role is to move the intake valves (where air and fuel enter) and exhaust valves (where the exhaust gases exit).



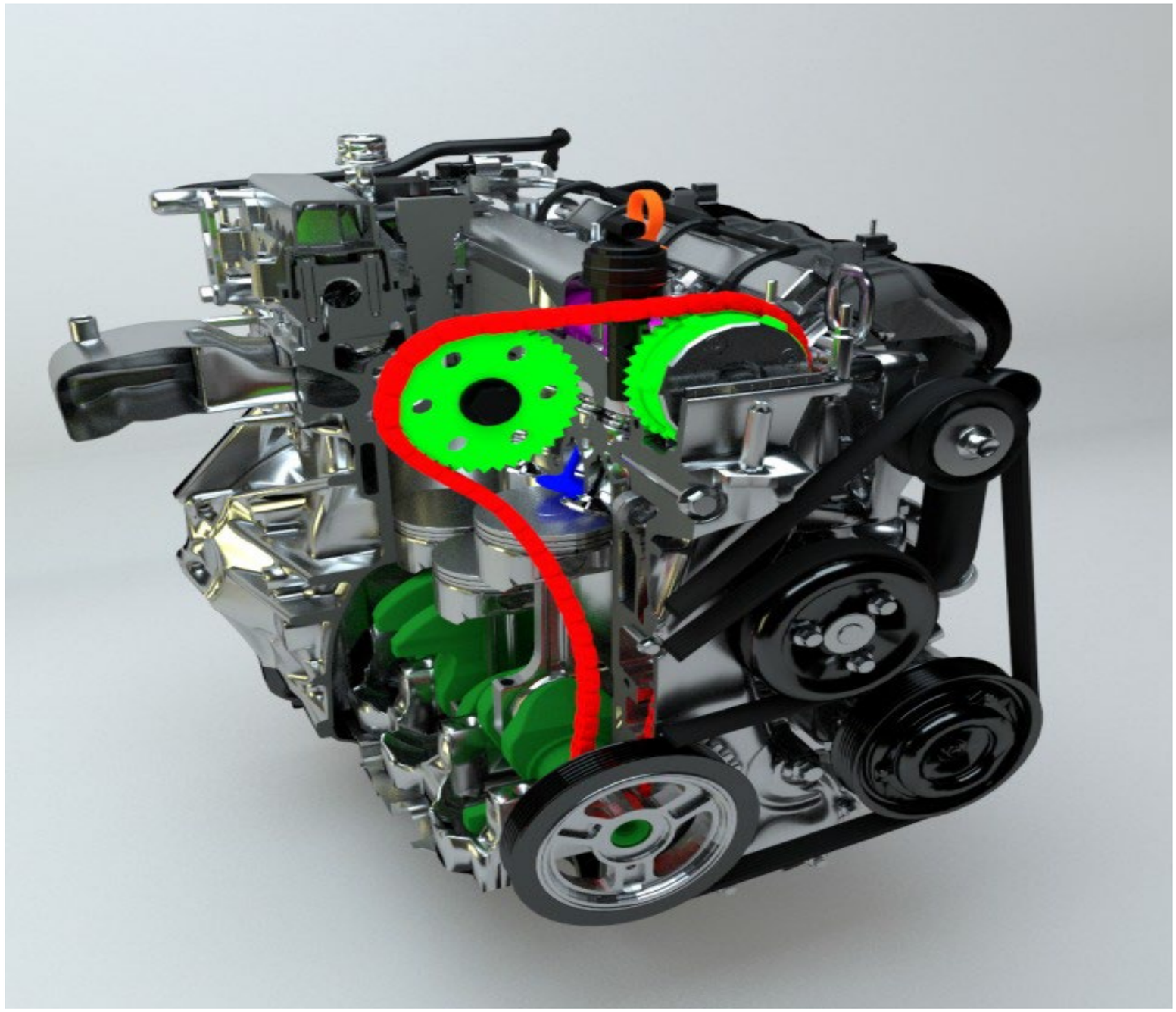
في الدوران المتزامن مع العمود المرفقي (متزامن مع نظام التوقيت) ، يتمثل دور عمود الكامات في تحريك صمامات السحب (حيث يدخل الهواء والوقود) وصمامات العادم (حيث تخرج غازات العادم).



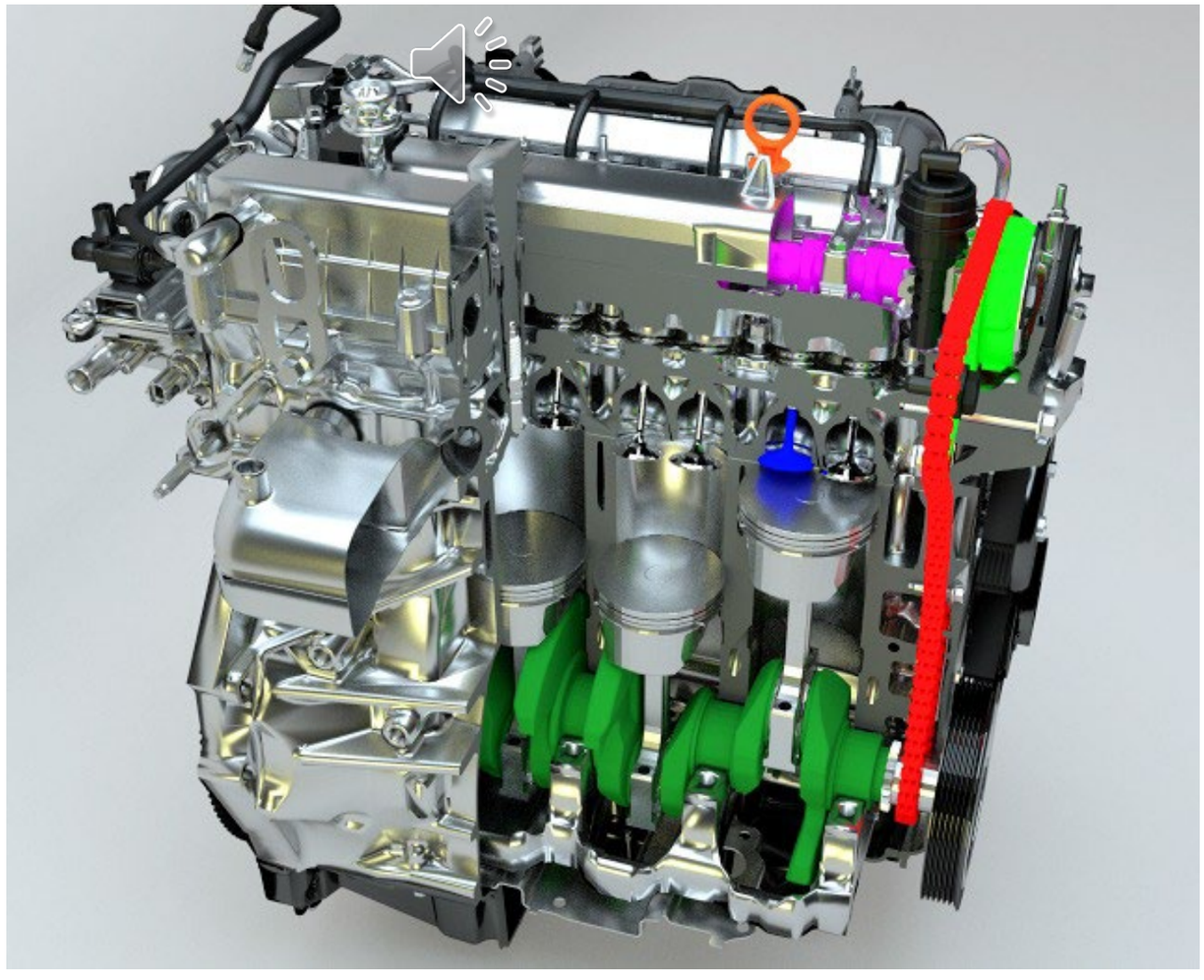
Normally, in "conventional" engines, there is only one pulley (light green) visible. However, in this Mazda engine, it is evident that there are two pulleys, indicating that two camshafts are being actuated.



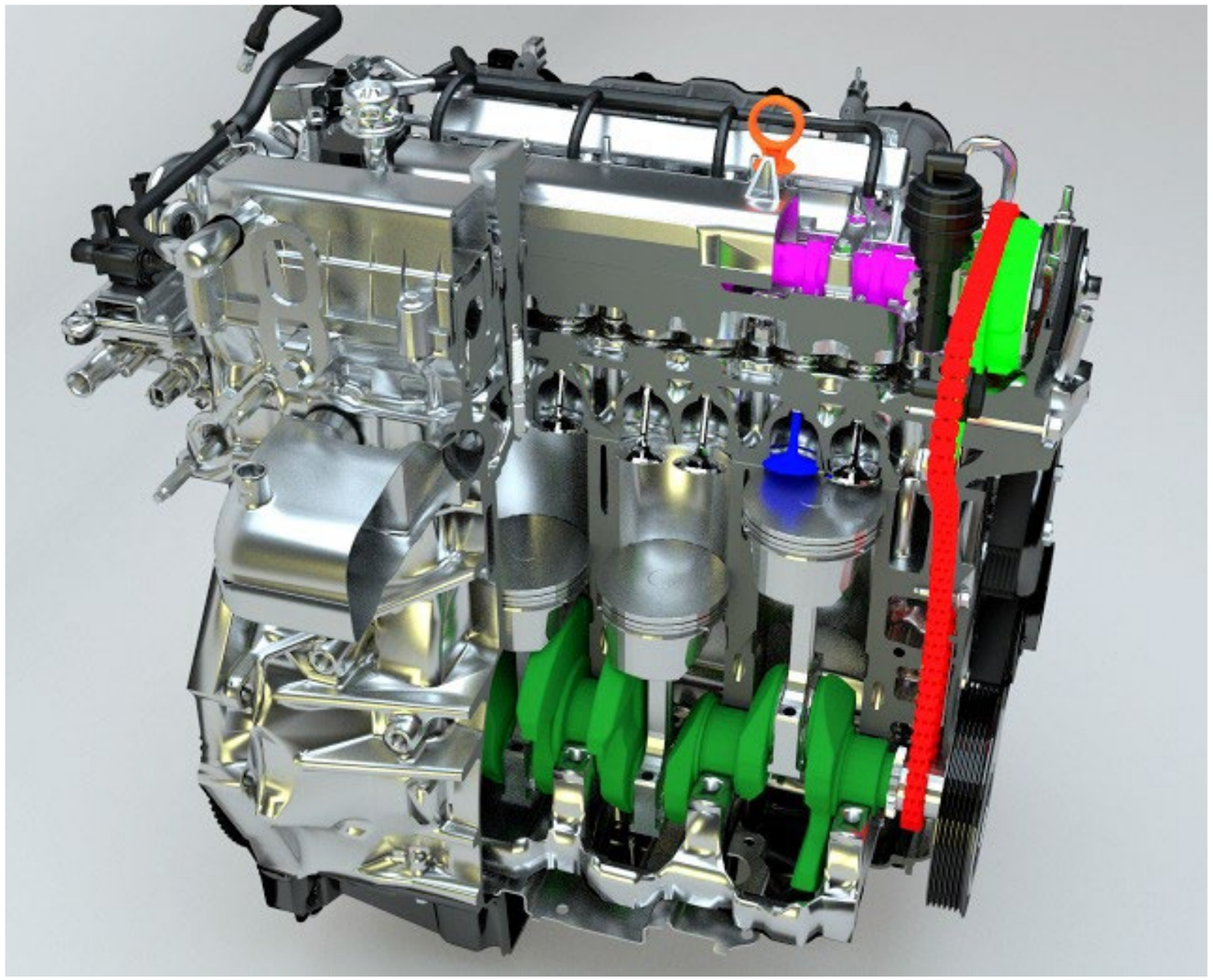
عادة ، في المحركات "التقليدية" ، هناك بكرة واحدة فقط (خضراء فاتحة) مرئية. ومع ذلك ، في محرك Mazdaهذا ، من الواضح أن هناك بكرتين ، مما يشير إلى أنه يتم تشغيل اثنين من أعمدة الكامات.



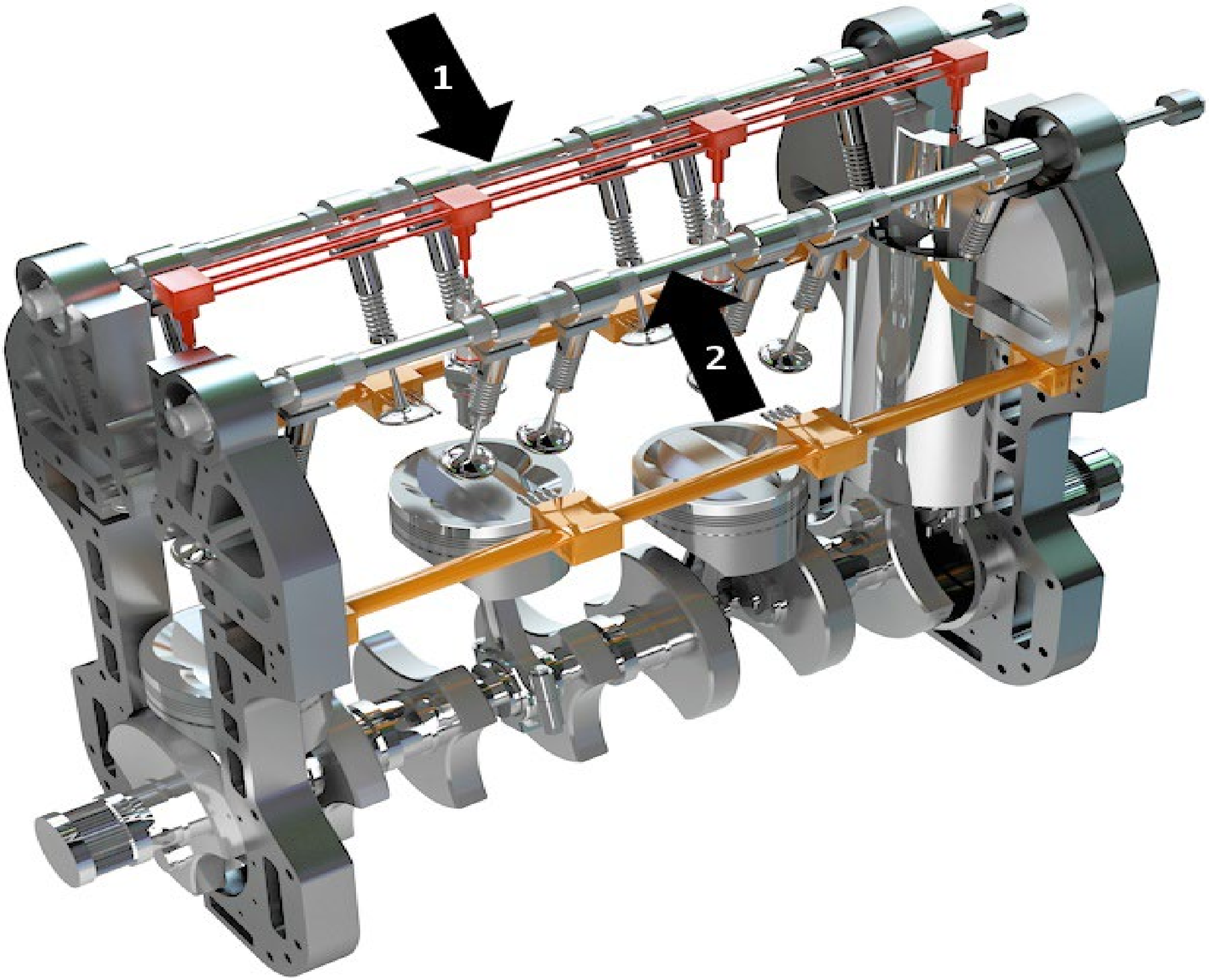
In this other view (moving to the left), we can briefly glimpse one of the two camshafts (in pink). The second one is not visible because it is "cut out" to allow a view inside the engine (you can see the hole where it inserts, take a look). In dark green is the crankshaft, in blue is one of the exhaust valves, and in red is the timing chain. Please note that only the exhaust valves are visible here because the others have been removed for the same reason as the second camshaft.



في هذا المنظر الآخر (الانتقال إلى اليسار) ، يمكننا أن نلمح بإيجاز أحد عمودي الكامات (باللون الوردي). الثانية غير مرئية لأنها "مقطوعة" للسماح برؤية داخل المحرك (يمكنك رؤية الفتحة حيث يتم إدراجها ، ألق نظرة). باللون الأخضر الداكن العمود المرفقي ، باللون الأزرق أحد صمامات العادم ، واللون الأحمر هو سلسلة التوقيت. يرجى ملاحظة أن صمامات العادم هي وحدها المرئية هنا لأنه تمت إزالة الصمامات الأخرى لنفس سبب عمود الكامات الثاني.



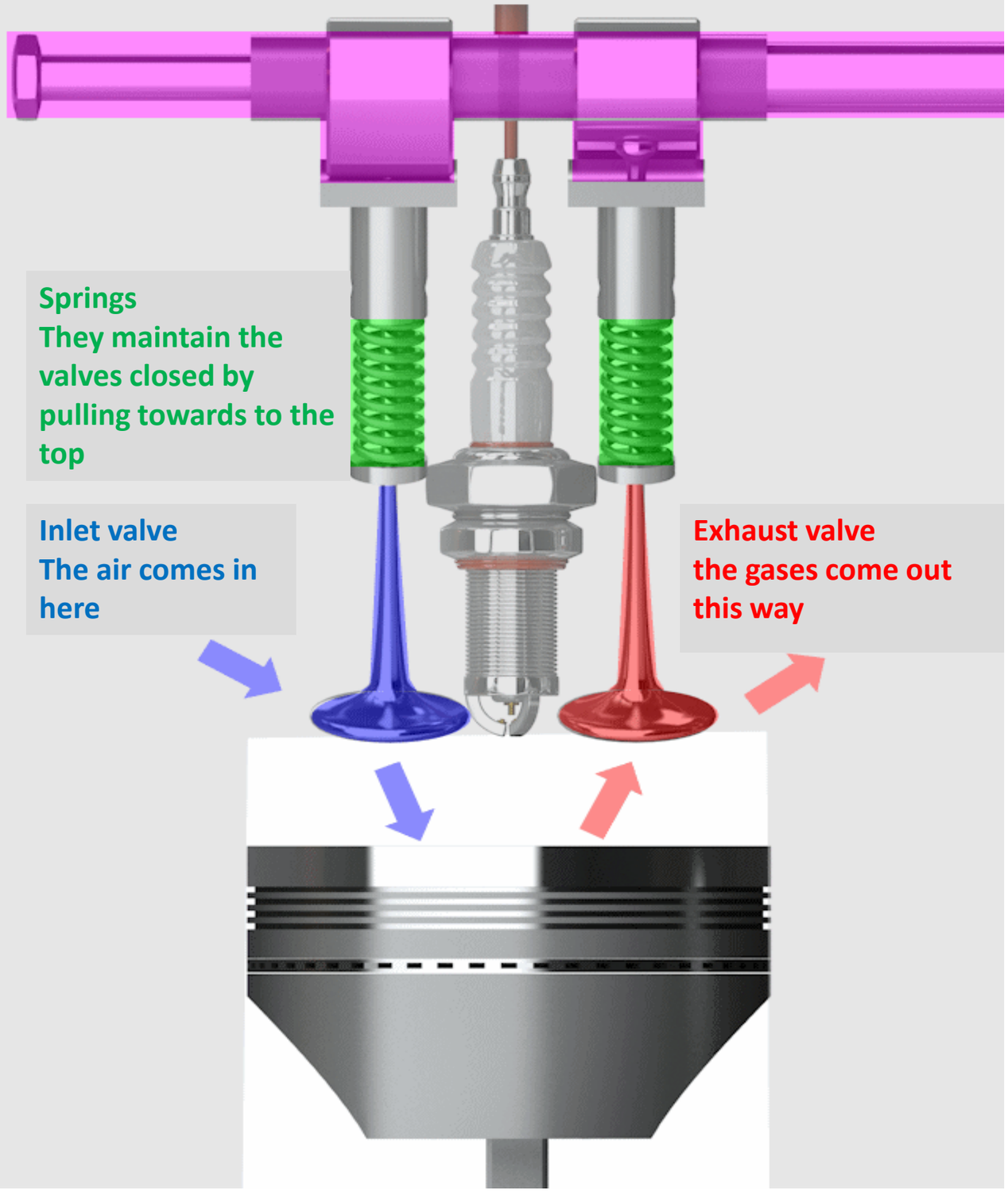
University of M'sila-----Faculty: ST------Module:Internal combustion engines -Master 2 -Energetics 2025/2026




VALVE صمام

The camshaft

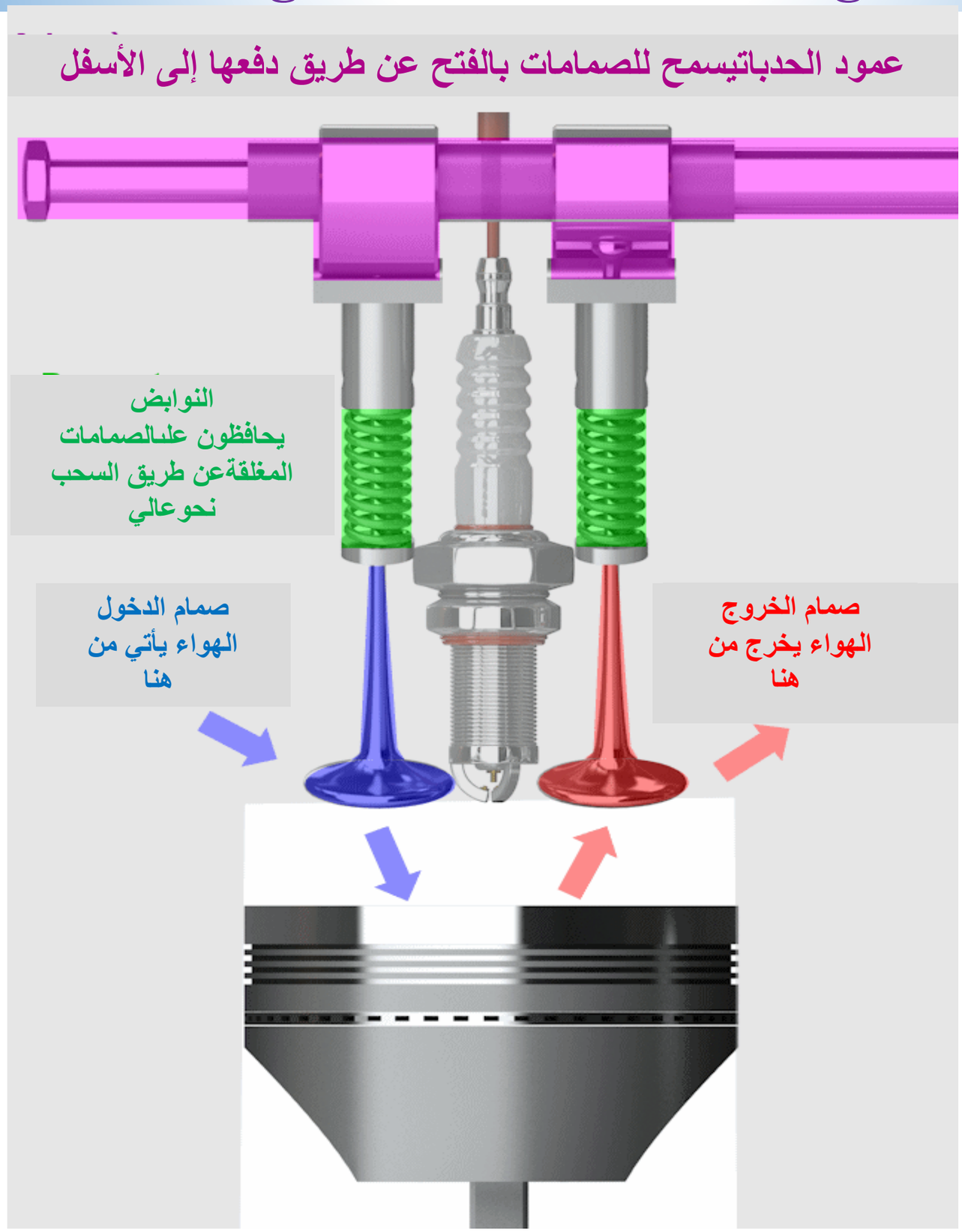
It allows the valves to open by pushing them downwards



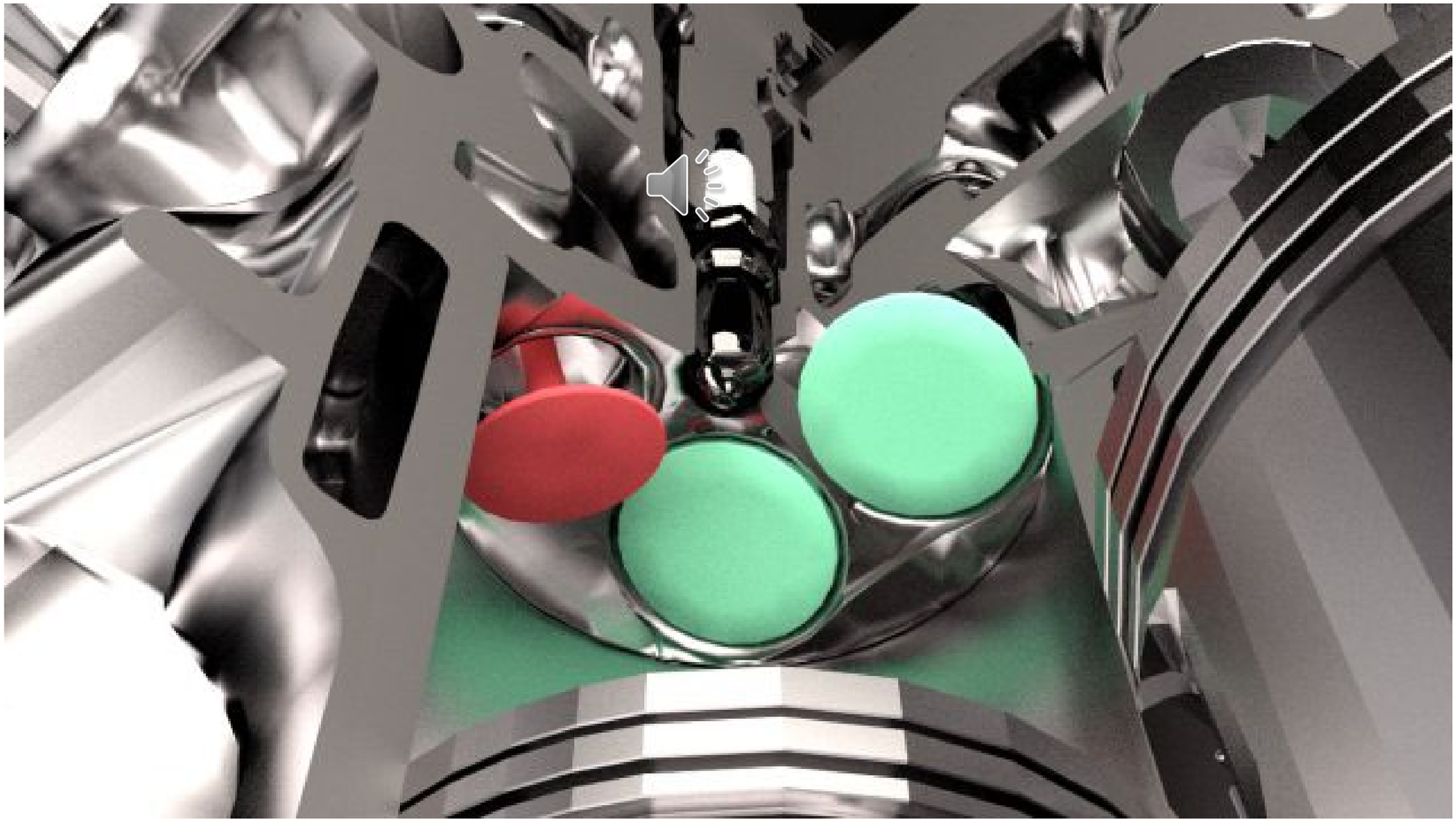
Springs
They maintain the valves closed by pulling towards to the top

Inlet valve
The air comes in here

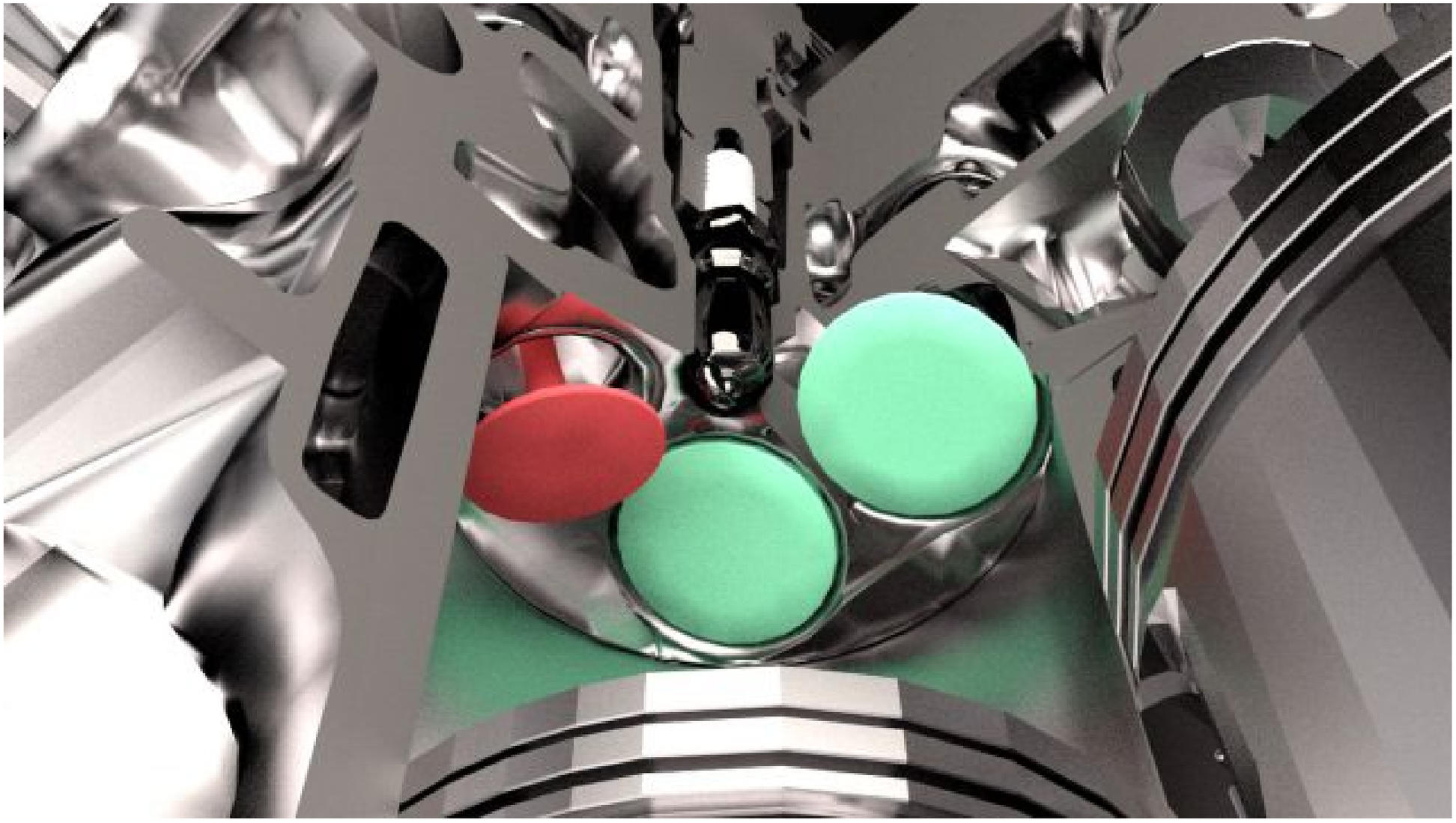
Exhaust valve
the gases come out this way

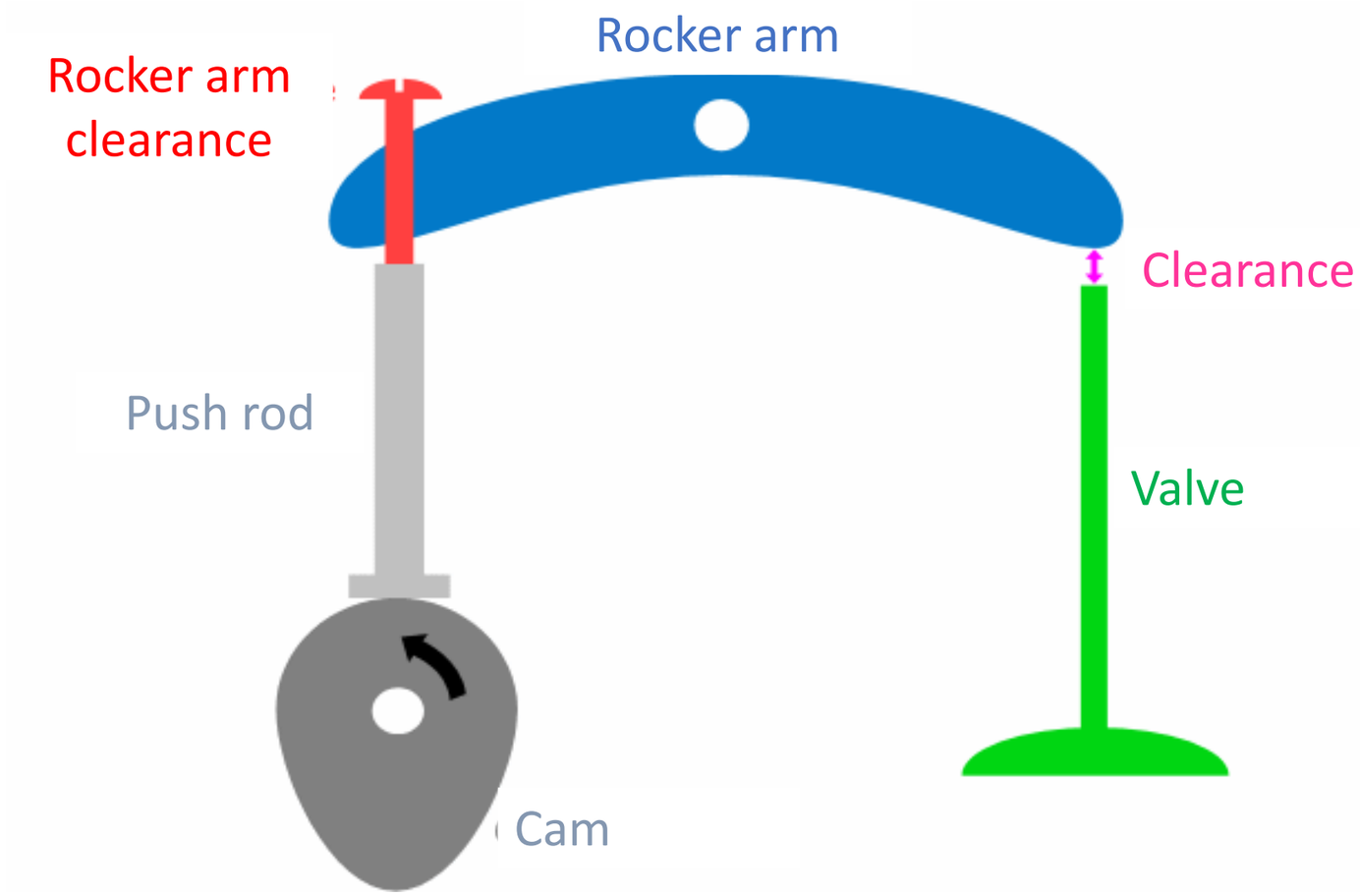

عمود الحدباتيسمح للصمامات بالفتح عن طريق دفعها إلى الأسفل
النوابض
يحافظون علىالصمامات
المغلقةعن طريق السحب
نحوعالي
صمام الدخول
الهواء يأتي من
هنا
صمام الخروج
الهواء يخرج من
هنا

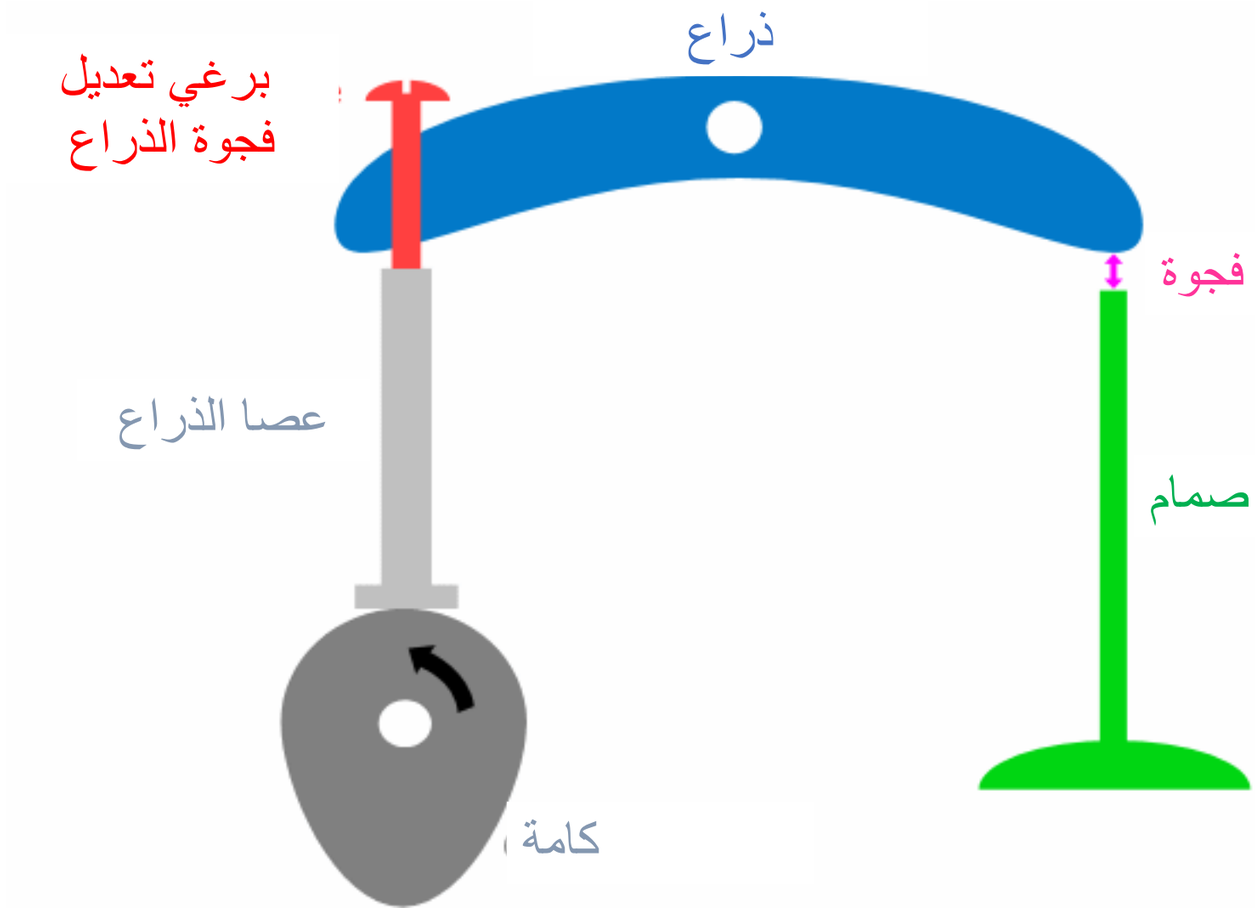
Here we are in the combustion chamber (what is right after the top image). If you only see 3 valves it is because the engine has been cut up to be able to see inside. So there is indeed another red valve that exists in reality. Regarding the colors, the green ones represent the intake valves while the red ones are exhaust valves. We see the spark plug in the middle which indicates that it is a petrol engine (2.0 Mazda).

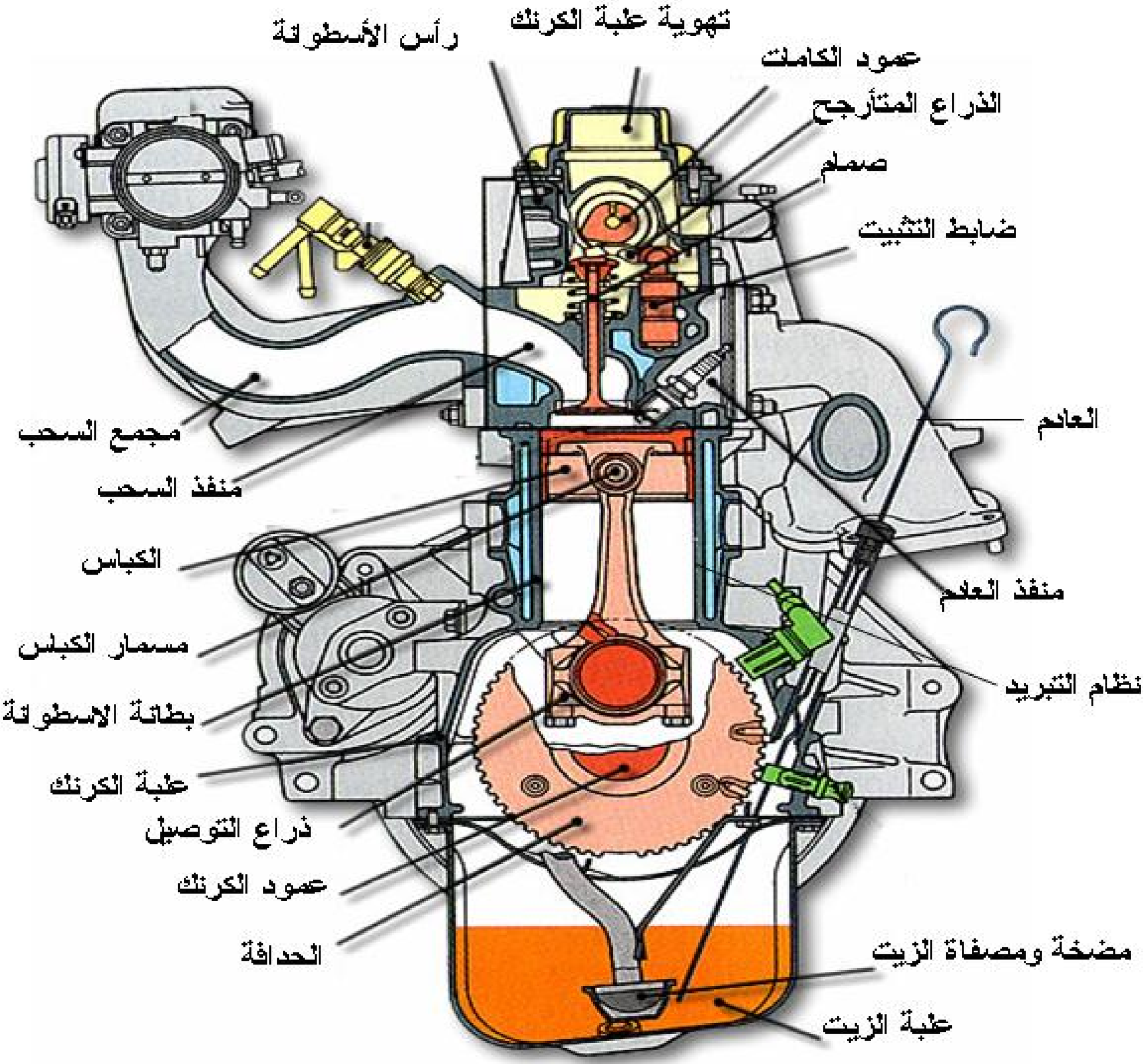


نحن هنا في غرفة الاحتراق (ما بعد الصورة العلوية مباشرة). إذا كان بإمكانك رؤية 3 صمامات فقط ، فهذا يعني أن المحرك قد تم قطعه ليتمكن من رؤية الداخل. لذلك يوجد بالفعل صمام أحمر آخر موجود في الواقع. فيما يتعلق بالألوان ، تمثل الألوان الخضراء صمامات السحب بينما تمثل الأحمر صمامات العادم. نرى شمعة الإشعال في المنتصف مما يدل على أنه محرك بنزين (2.0 Mazda).

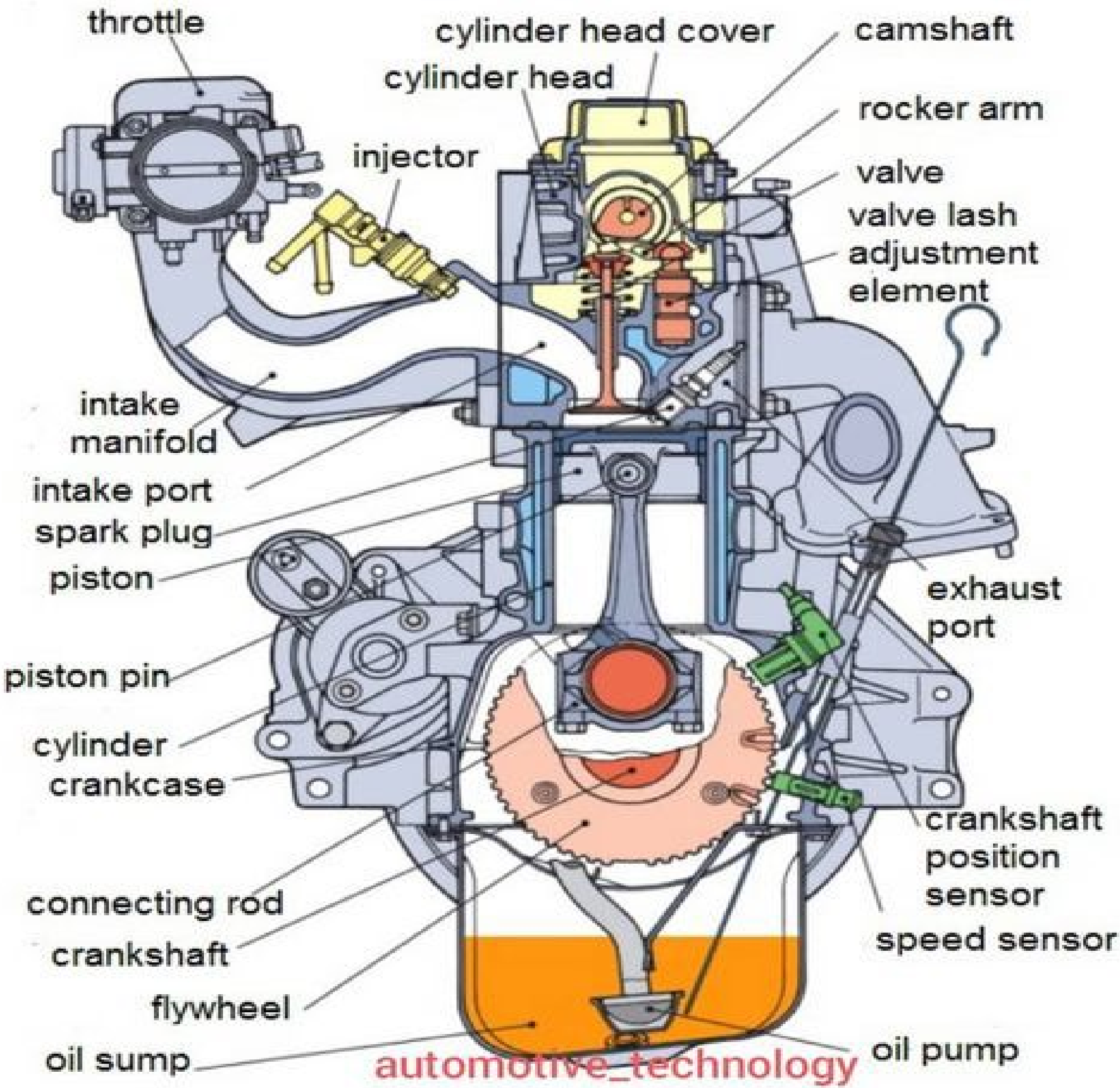



Rocker arm
Rocker arm clearance
Clearance
Push rod
Valve
Cam

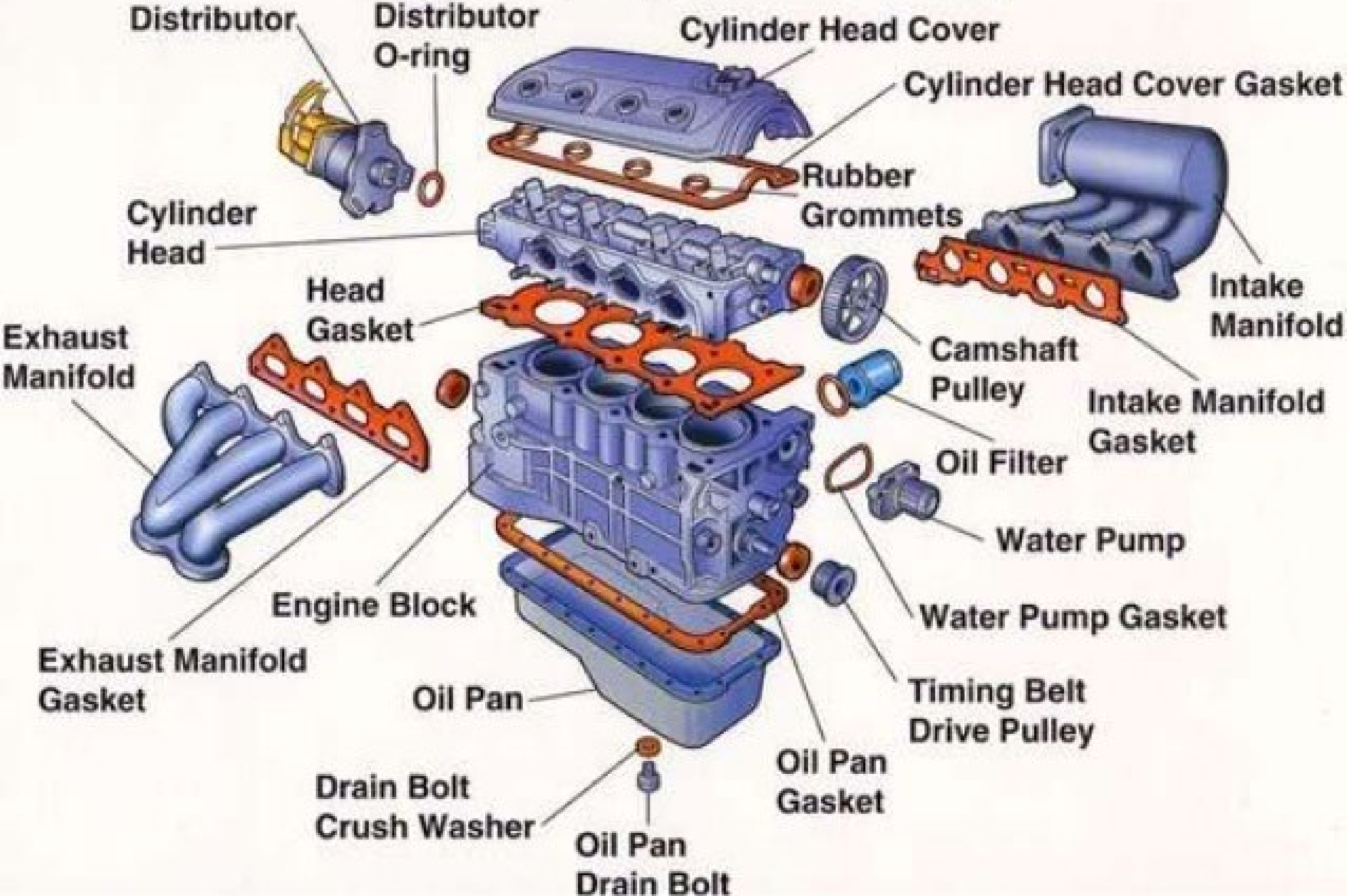

ذراع
برغي تعديل
فجوة الذراع
فجوة
عصا الذراع
صمام
كامة


تهوية علبة الكرنك
رأس الأسطوانة
عمود الكامات
الذراع المتأرجح
صمام
ضابط التثبيت
العادم
مجمع السحب
منفذ السحب
الكباس
مسمار الكباس
بطانة الاسطوانة
علبة الكرنك
ذراع التوصيل
عمود الكرنك
الحدافة
منفذ العادم
نظام التبريد
مضخة ومصفاة الزيت
علبة الزيت

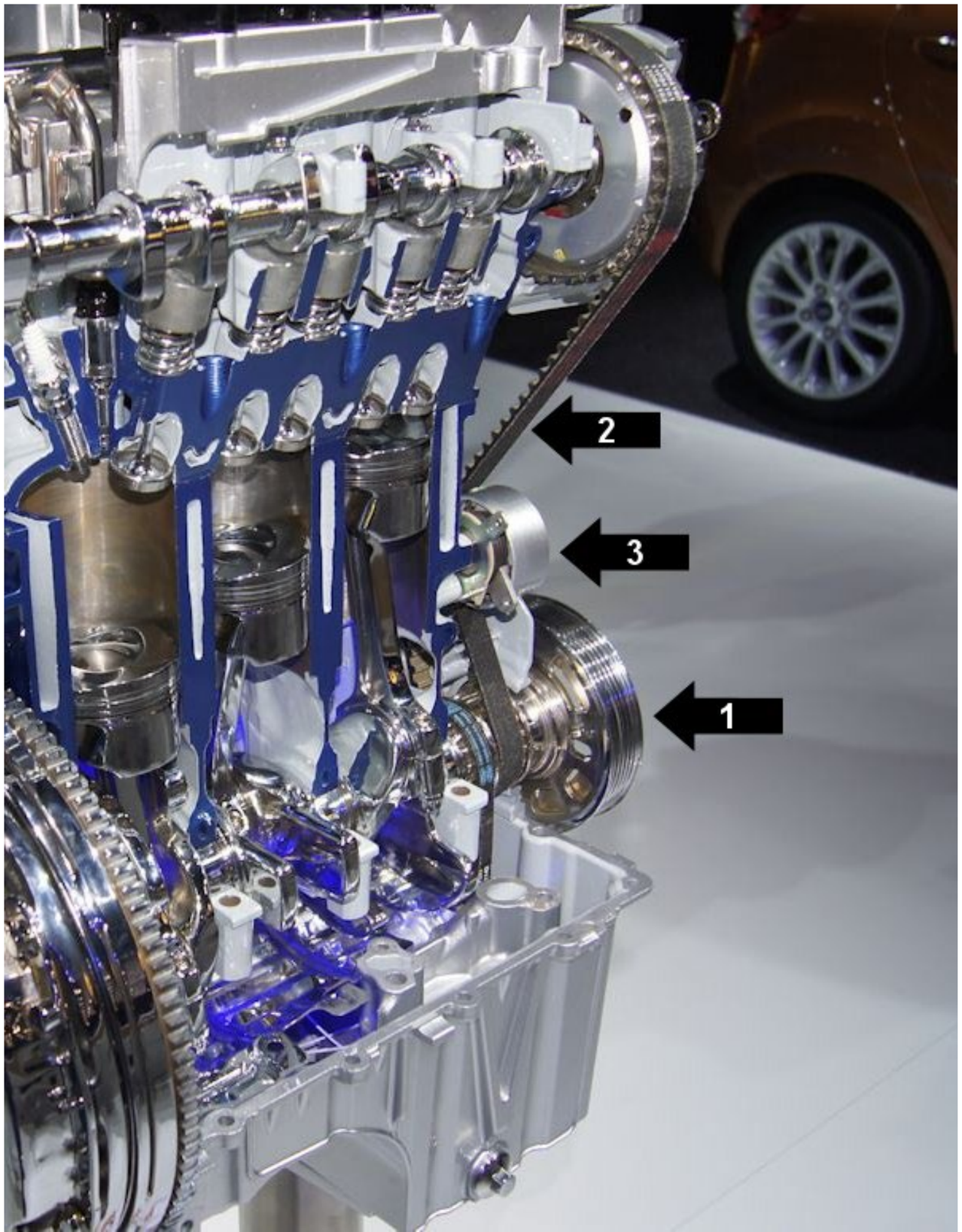
Parts of IC Engine



Engine (Exploded View)



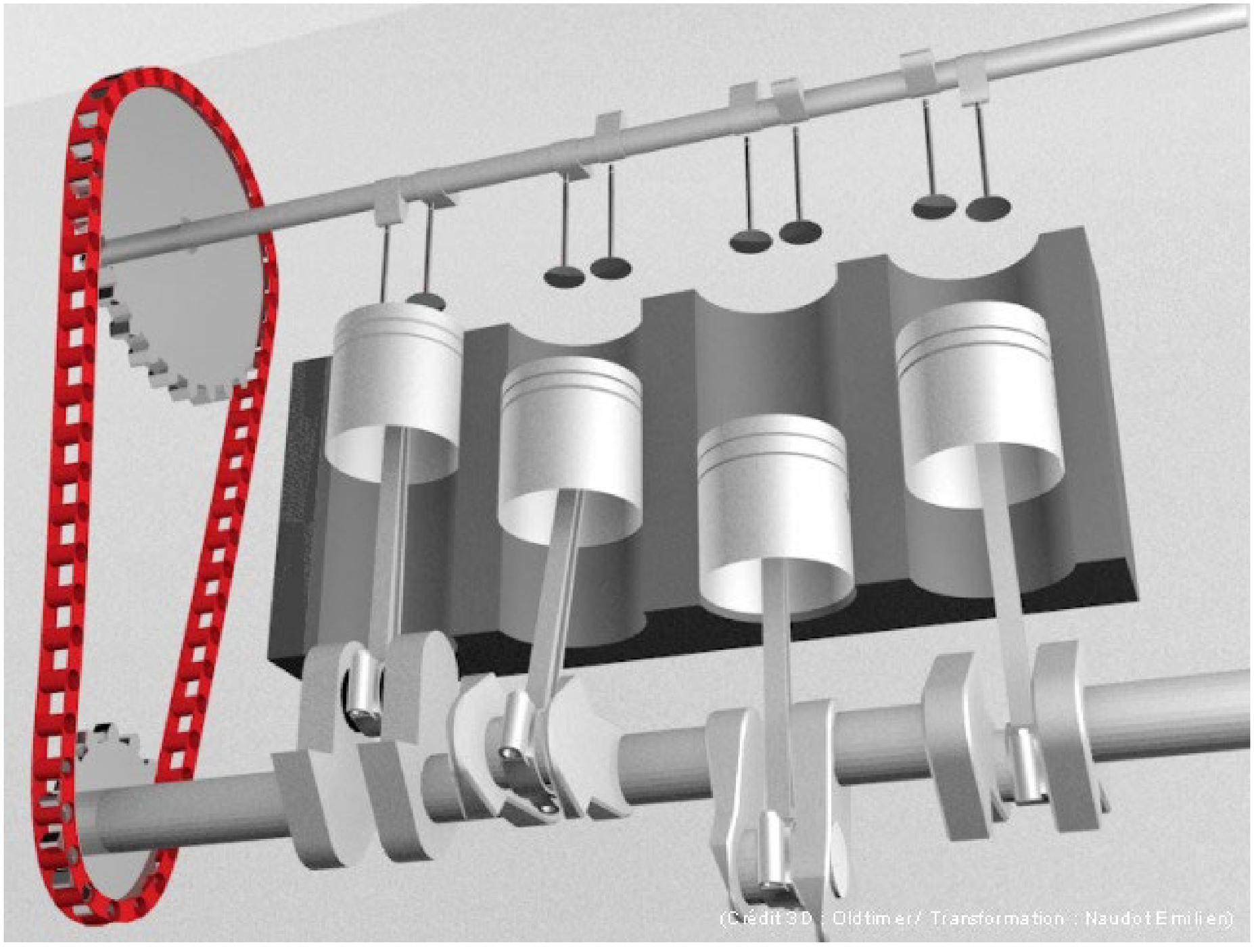
University of M'sila-----Faculty: ST------Module:Internal combustion engines -Master 2 -Energetics 2025/2026

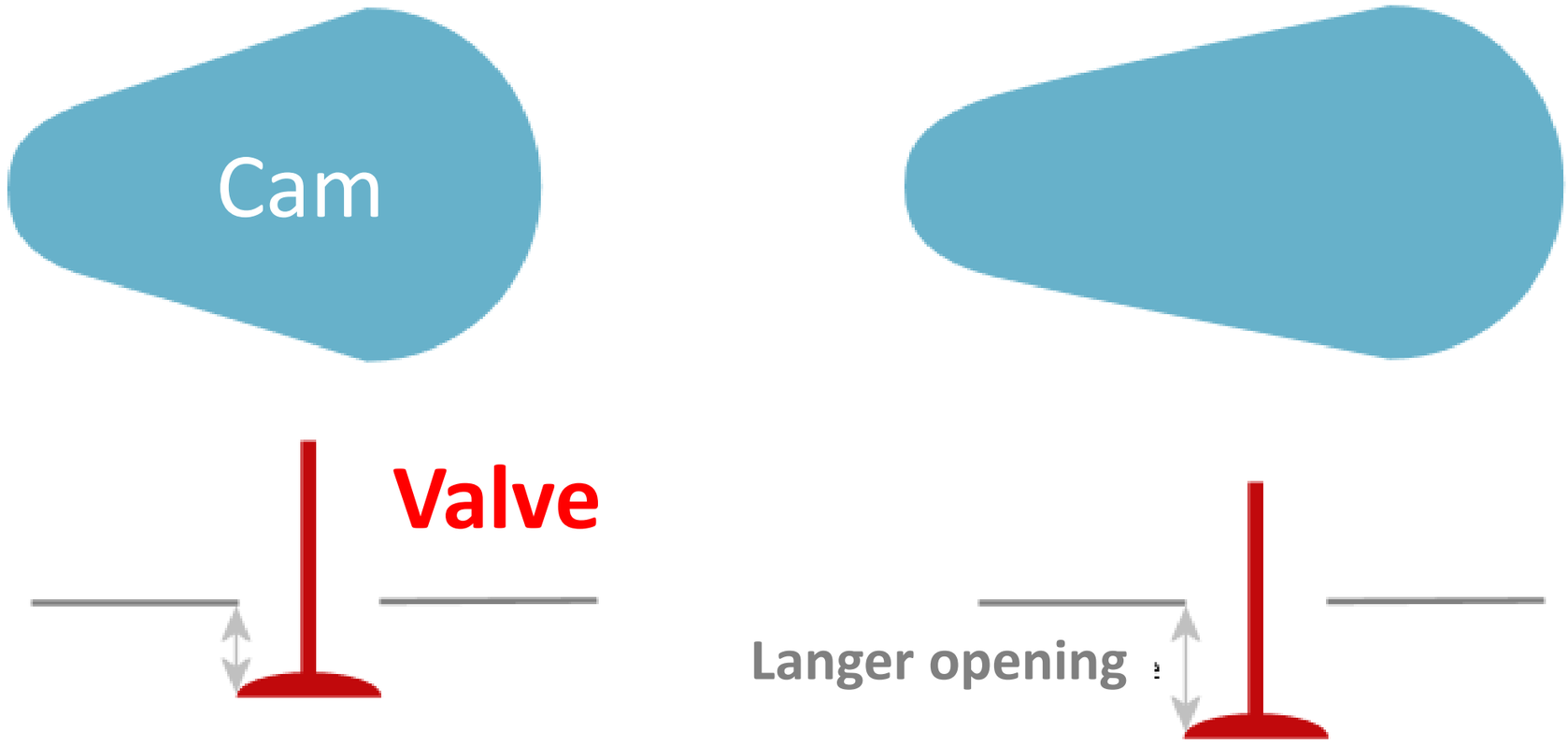


University of M'sila-----Faculty: ST------Module:Internal combustion engines -Master 2 -Energetics 2025/2026

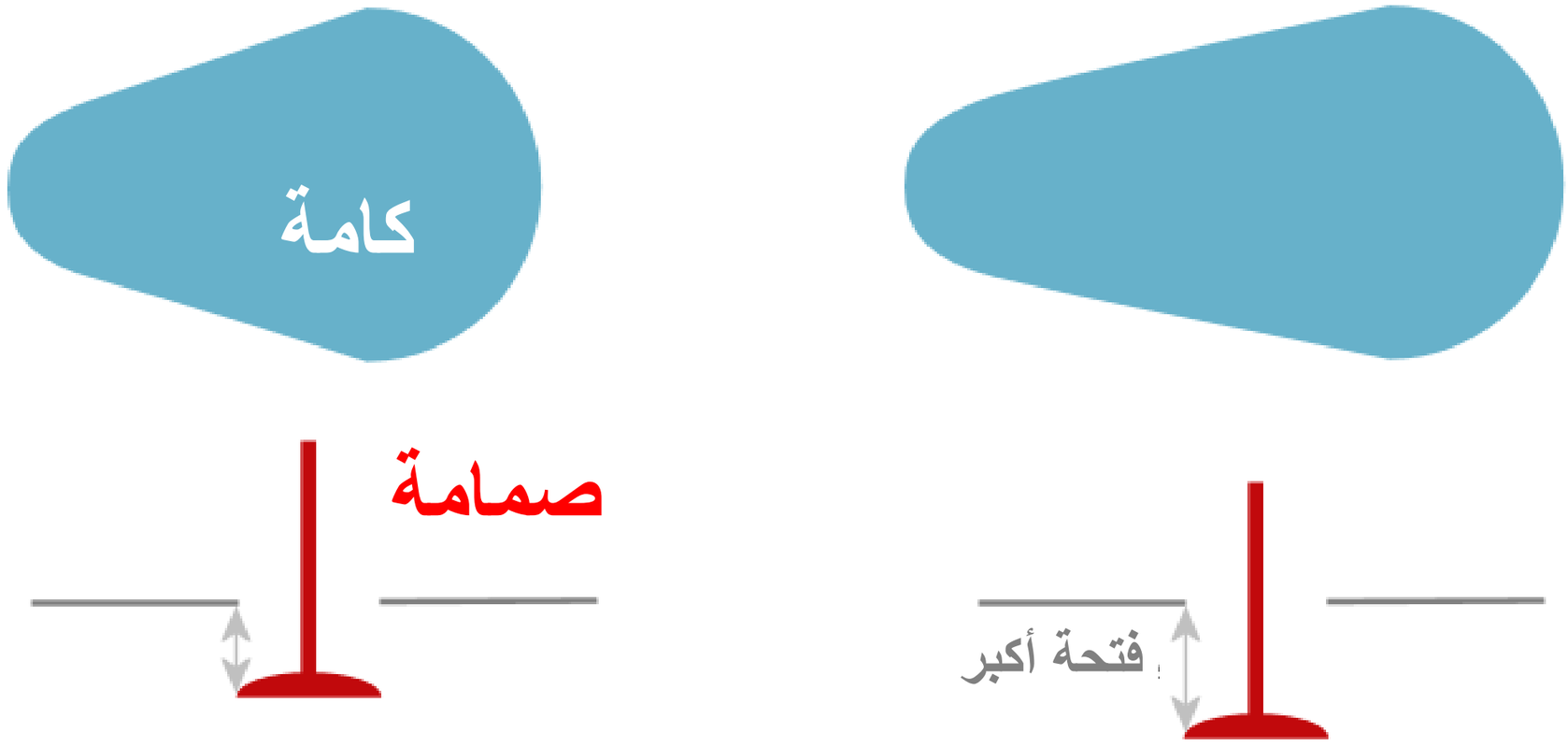


University of M'sila-----Faculty: ST------Module:Internal combustion engines -Master 2 -Energetics 2025/2026

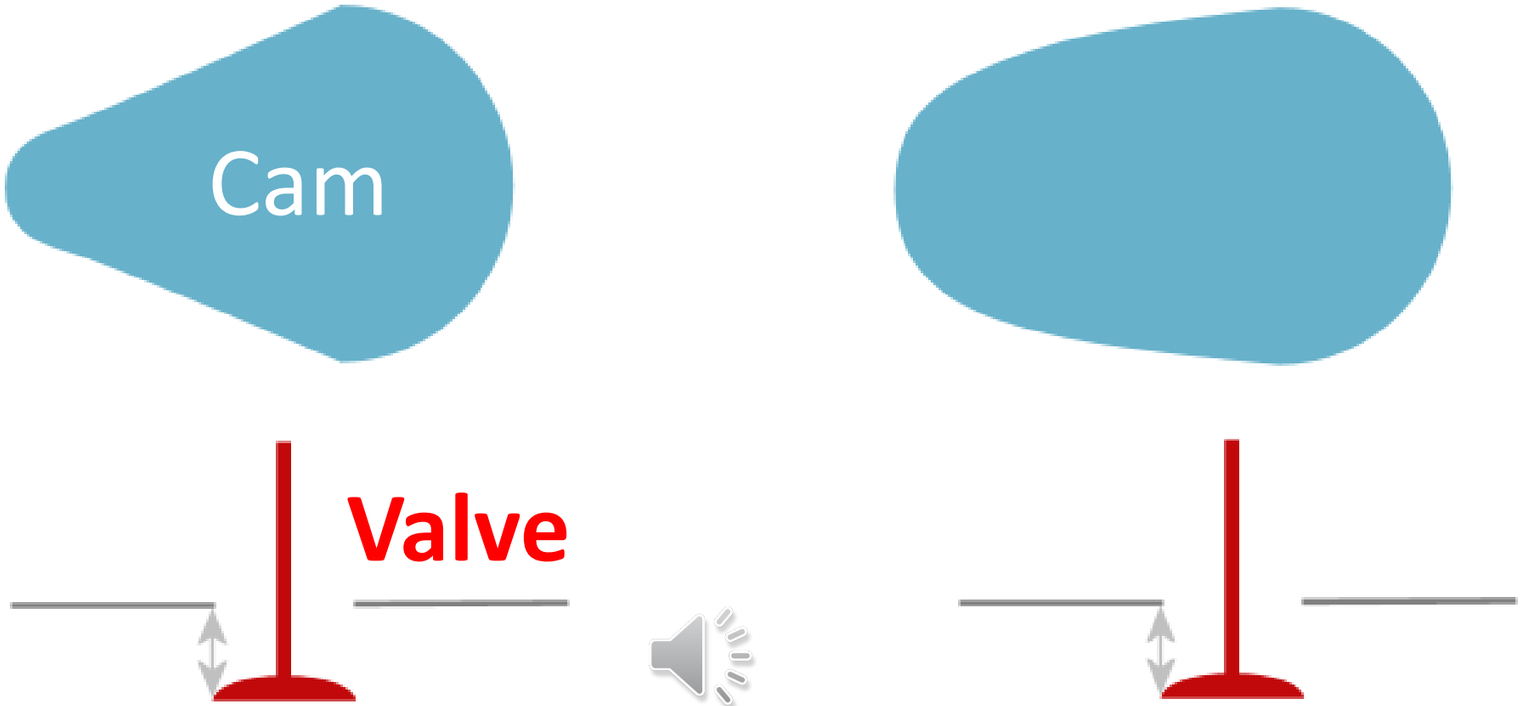




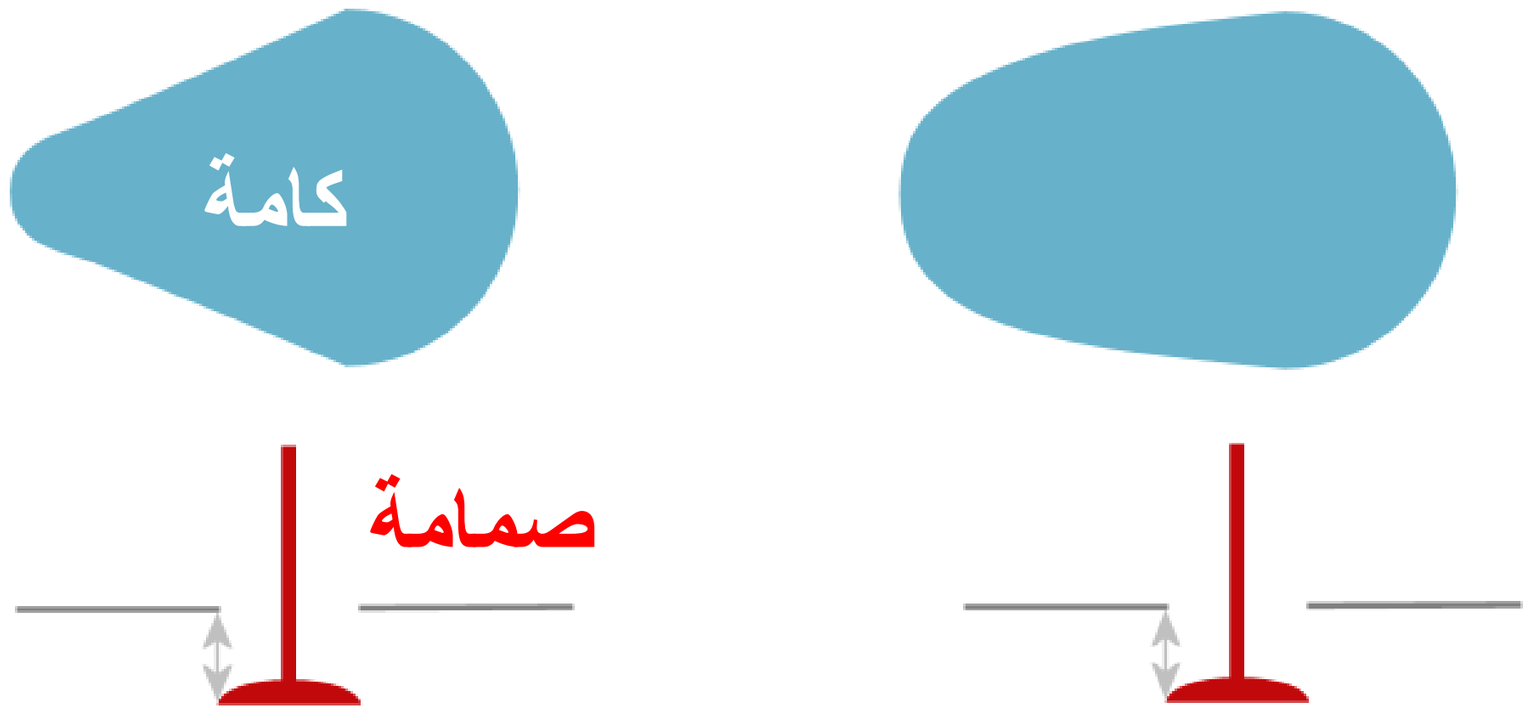
If the tip is the same size but the cam is larger, then the valve will be pushed further down (but the open time will not change).



إذا كانت نهاية الصمام نفس الحجم ولكن المنحدر (الكام) أكبر، فإن الصمام سيتم دفعه بعيدًا بشكل أكبر (لكن زمن الفتح لن يتغير).

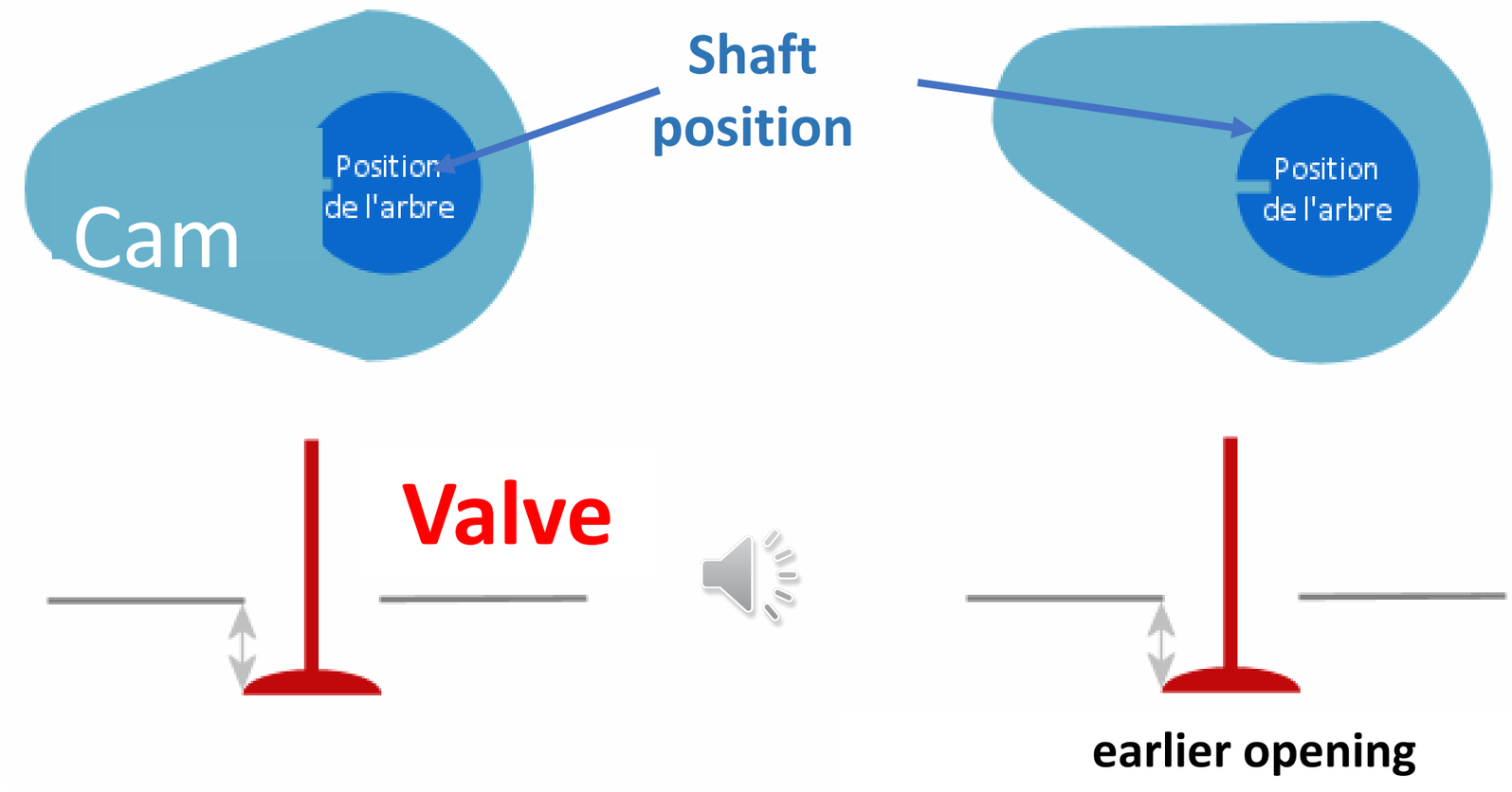


The sharper the cam, the shorter the valve opening duration. In contrast, the cam on the right will inevitably open the valve for a longer duration because its narrower end will be in contact with the valve for a longer time (pressing on the valve for a longer period), resulting in a longer valve opening time.

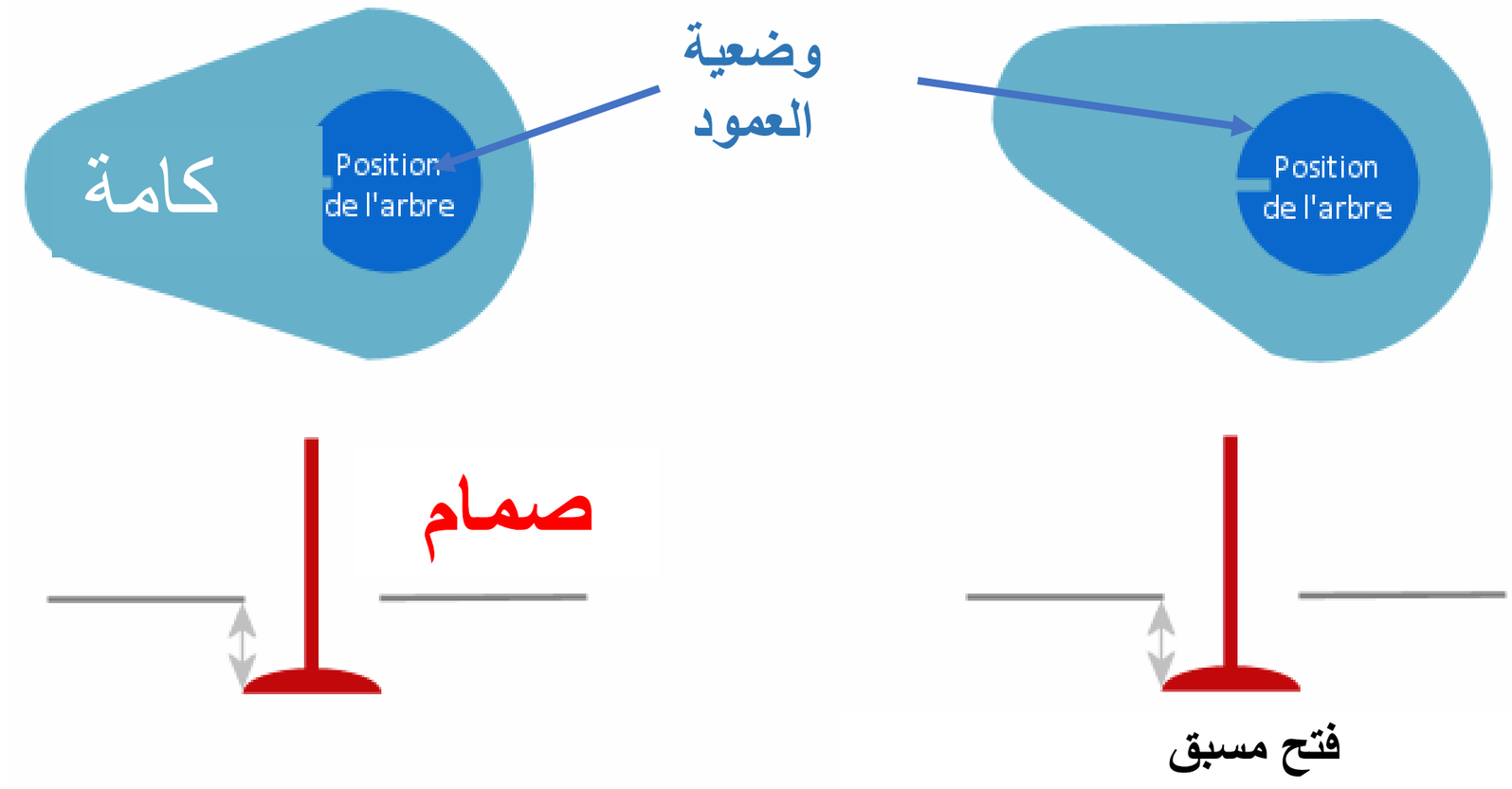


زمن الفتح أطول

كلما كان المنحدر (الكام) أكثر حدة، كلما كانت مدة فتح الصمام أقصر. بالمقابل، فإن المنحدر (الكام) على اليمين سيفتح الصمام بالضرورة لفترة أطول لأن نهاية أضيق ستكون في اتصال مع الصمام لفترة أطول (يضغط على الصمام لفترة أطول)، مما يؤدي إلى زمن فتح أطول للصمام



Here, we are simply adjusting the position of the camshaft relative to the shaft (hence the small mark placed on the axis of the shaft for you to see).



هنا ، نقوم ببساطة بضبط موضع عمود الحدبات بالنسبة للعمود (ومن هنا جاءت العلامة الصغيرة الموضوعة على محور العمود لتراها).

Variable valve timing allows for...

Variable valve timing allows for the modulation of the quantity of air/fuel mixture based on the engine's load, that is, the rotational speed!

Variable valve timing aims to open and close the valves differently depending on the engine's rotational speed. When the engine is operating at lower RPMs, some intake valves will only open partially. On the other hand, at higher RPMs, the valves will open fully to allow a greater flow of air/fuel mixture.

Furthermore, the timing of valve opening and closing is also crucial. Essentially, at lower engine speeds, to optimize certain laws of physics, the intake valves are given a slight "delay" and the exhaust valve is given a slight "advance." This timing adjustment helps improve engine efficiency and performance at different RPM ranges.

يسمح توقيت الصمام المتغير بـ ...

التوقيت المتغير للصمامات يسمح بتعديل كمية الخليط الهواء / الوقود بناءً على حمل المحرك ، أي سرعة الدوران

التوقيت المتغير للصمامات يهدف إلى فتح وإغلاق الصمامات بطريقة مختلفة اعتمادًا على سرعة دوران المحرك. عندما يعمل المحرك بسرعات دوران منخفضة، قد تفتح بعض الصمامات الشخصية جزئيًا فقط. بالمقابل، عندما تكون السرعات الدورانية عالية، ستفتح الصمامات بالكامل للسماح بتدفق أكبر للخليط الهواء / الوقود

بالإضافة إلى ذلك، فإن توقيت فتح وإغلاق الصمامات أمر بالغ الأهمية أيضًا. في الأساس، عند سرعات المحرك المنخفضة، يتم منح الصمامات الشخصية تأخير طفيف لتحسين بعض قوانين الفيزياء، بينما يتم منح الصمام العادم تقدم طفيف. يساعد هذا التعديل في تحسين كفاءة المحرك وأدائه عند مجموعات سرعات دوران مختلفة

Theoretical Exercise

Objective

To calculate and compare the **torque**, **power**, and **specific consumption** of an engine equipped with standard and variable timing at different RPMs.

تمرين نظري

هدف

لحساب ومقارنة عزم الدوران والطاقة والاستهلاك المحدد لمحرك مزود بتوزيع قياسي ومتغير عند عدد دورات مختلفة في الدقيقة.

Engine Data (4 cylinders, 2.0 L)

- **Unit displacement:** $V = \frac{2.0}{L4} = 0.5\ \mathrm{L} = 500\ \mathrm{cm}^3$.
- **Stroke:** $C = 86\ \mathrm{mm}$.
- **Bore:** $A = 86\ \mathrm{mm}$.
- **Compression ratio:** $\epsilon = 10$.
- **Thermal efficiency:**
  - Standard: $\eta_{\mathrm{std}} = 0.30$.
  - Variable: $\eta_{\mathrm{var}} = 0.35$.
- **Air density:** $\rho_{\mathrm{air}} = 1.2\ \mathrm{kg/m}^3$.
- **Calorific value of gasoline:** $PCI = 44\ \mathrm{MJ/kg}$.
- **RPMs studied:** 2,000 RPM, 4,000 RPM, 6,000 RPM.

بيانات المحرك (4 سلندر، 2.0 لتر)

إزاحة الوحدة: V = (2.0) / L4 = 0.5 L = 500 سم ^ 3.

السكتة الدماغية: C = 86ملم.

التجويف: أ = 86 ملم.

نسبة الضغط: ε = 10.

الكفاءة الحرارية:

المعيار: η_std = 0.30.

المتغير: η_var = 0.35.

كثافة الهواء: ρ_air = 1.2 ⟦ كجم / م ⟧ ^ 3.

القيمة الحرارية للبنزين: PCI = 44ميجا جول / كجم.

عدد الدورات في الدقيقة الذي تمت دراسته: 2,000 دورة في الدقيقة ، 4,000 دورة في الدقيقة ، 6,000 دورة في الدقيقة.

Volumetric Efficiency η_v

RPM	η_v (standard)	η_v (variable)
2,000	0.70	0.85
4,000	0.80	0.90
6,000	0.65	0.80

1. Calculation of Mass Air Flow ($\dot{m}_{\text{air}}$)

Questions:

1.1 Calculate the mass air flow ($\dot{m}_{\text{air}}$) for each RPM and each type of timing.

1.1 Why is the volumetric efficiency higher with variable timing at low RPM?

2. Calculation of Engine Torque (T)

BMEP according to RPM:

RPM	BMEP (standard) (bar)	BMEP (variable) (bar)
2,000	8	10
4,000	10	11
6,000	9	12

Questions:

2.1 Calculate the torque (T) for each RPM and each type of timing.

2.1 Compare the torques obtained. Why does variable timing offer higher torque at low RPM?

3. Calculation of Engine Power (P)

3.1 Calculate the power (P) for each RPM and each type of timing

3.2 At which RPM does variable timing offer the greatest power gain? Why?

4. Calculation of Specific Consumption (g_{specific})

4.1 Calculate the specific consumption for each RPM and each type of timing.

4.1 Why does variable timing reduce specific consumption?

University of M'sila-----Faculty: ST------Module:Internal combustion engines -Master 2 -Energetics 2025/2026

1-3 Variable Compression Rate

An MCE-5 engine (from the English "Multi Cycle Engine - 5 parameters") is a combustion engine, more specifically a type of variable compression engine VCR (Variable Compression Ratio)

VCR ("Variable Compression Ratio") engine whose compression ratio varies with engine speed and load by varying the volume of the combustion chamber

These engines have better thermodynamic efficiency due to increased pressure during combustion

3-1 معدل ضغط متغير

محرك) MCE-5من "محرك متعدد الدورات - 5 معلمات") هو محرك احتراق ، وبشكل أكثر تحديدًا نوع من محرك الضغط المتغير) VCRنسبة الضغط المتغيرة)

محرك ") VCRنسبة الضغط المتغيرة") الذي تختلف نسبة ضغطه باختلاف سرعة المحرك والحمل عن طريق تغيير حجم غرفة الاحتراق

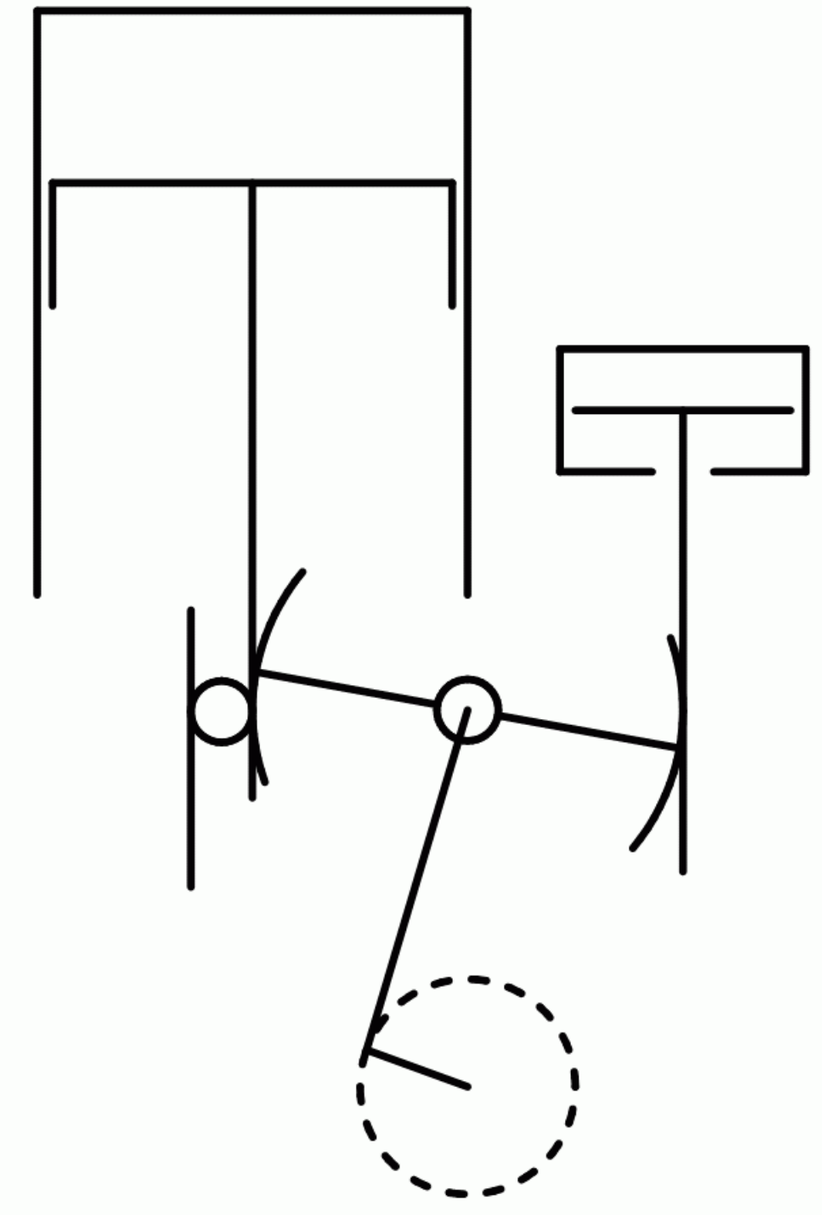
تتمتع هذه المحركات بكفاءة ديناميكية حرارية أفضل بسبب زيادة الضغط أثناء الاحتراق

Principle of the MCE-5 engine.

On the left, a conventional piston of an internal combustion engine.

On the right, the cylinder-piston assembly is a double-acting hydraulic actuator whose movement regulates the compression ratio in the left cylinder.

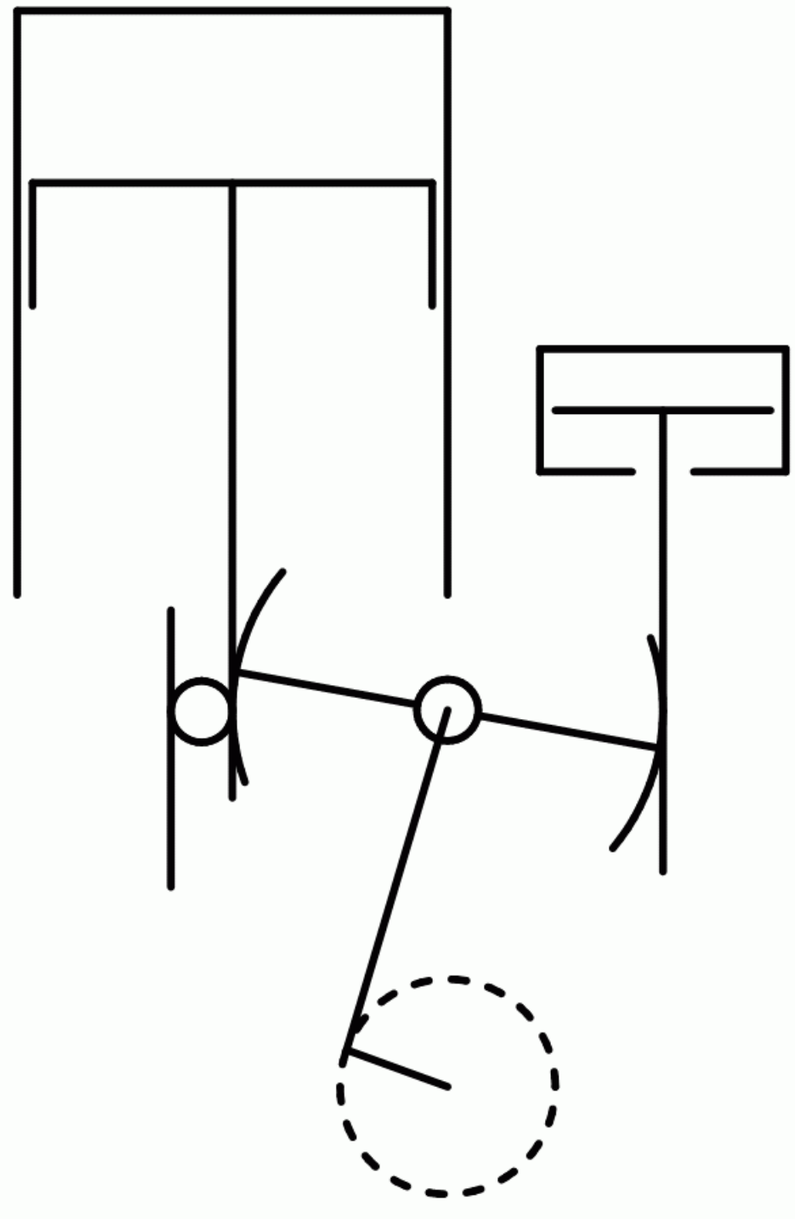
At the bottom, a connecting rod-crank system. The translational movements are converted into rotational motion, and vice versa, by racks and gears.



video

مبدأ محرك MCE-5.

على اليسار مكبس تقليدي لمحرك احتراق داخلي.
على اليمين ، مجموعة مكبس الأسطوانة عبارة عن مشغل هيدروليكي مزدوج المفعول تنظم حركته نسبة الضغط في الأسطوانة اليسرى.
في الجزء السفلي ، ربط نظام قضيب كرنك. يتم تحويل الحركات الترجمية إلى حركة دورانية ، والعكس بالعكس ، عن طريق الرفوف والتروس.



video

1-4 Miller-Atkinson Cycle

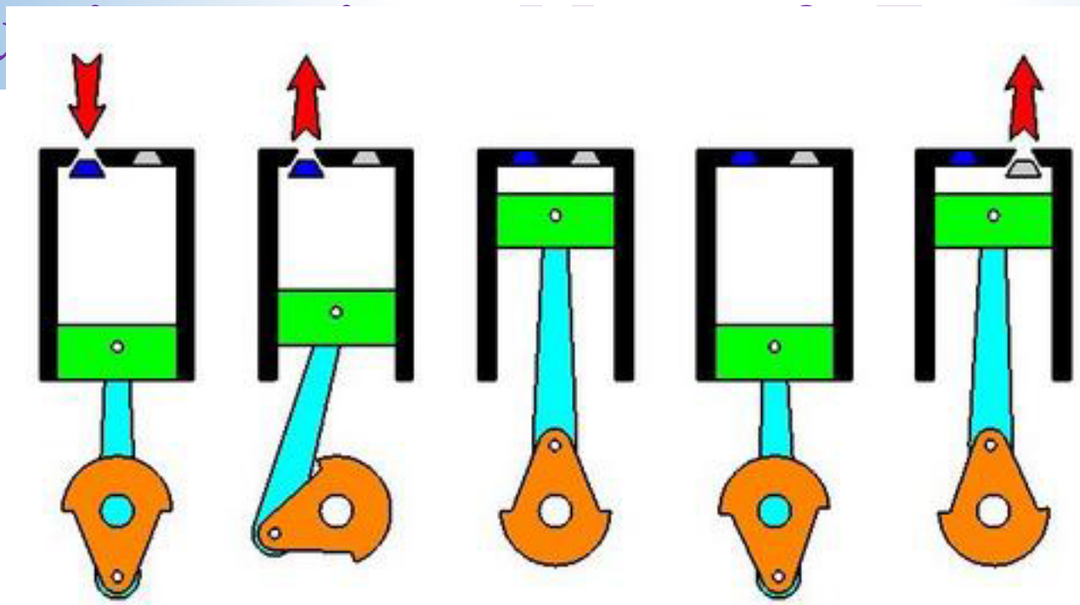
The Atkinson Cycle is a thermodynamic cycle used in an internal combustion engine. It was discovered by James Atkinson in 1882. This cycle, which employs a longer expansion stroke than compression stroke, improves efficiency at the expense of lower power output. It is commonly used in modern hybrid vehicles.

The expansion ratio is greater than the compression ratio, which improves the engine's efficiency compared to the Beau de Rochas cycle. The thermodynamic cycle with extended expansion stroke has been adopted by Toyota for its hybrids and by Mazda for its Sky-Active engines, allowing for a higher compression ratio (14:1) compared to an Otto cycle. This improvement offers better efficiency, reduced fuel consumption, and lower emissions of CO_2 and pollutants (NO_x, particles).

4-1 دورة ميلر-أتكينسون

دورة أتكينسون هي دورة ديناميكية حرارية تستخدم في محرك الاحتراق الداخلي. اكتشفه جيمس أتكينسون في عام 1882. هذه الدورة ، التي تستخدم شوط تمدد أطول من ضربة الضغط ، تعمل على تحسين الكفاءة على حساب إنتاج طاقة أقل. يستخدم بشكل شائع في المركبات الهجينة الحديثة.

نسبة التمدد أكبر من نسبة الضغط ، مما يحسن من كفاءة المحرك مقارنة بدورة Beau de Rochas.تم اعتماد الدورة الديناميكية الحرارية مع شوط التمدد الممتد من قبل تويوتا من أجل سياراتها الهجينة و Mazdaلمحركات Sky-Active، مما يسمح بنسبة ضغط أعلى (14: 1) مقارنة بدورة أوتو. يوفر هذا التحسين كفاءة أفضل ، واستهلاكًا أقل للوقود ، وانبعاثات أقل لثاني أكسيد الكربون والملوثات (أكاسيد النيتروجين ، والجسيمات).



Intake: Everything happens as in a conventional engine.

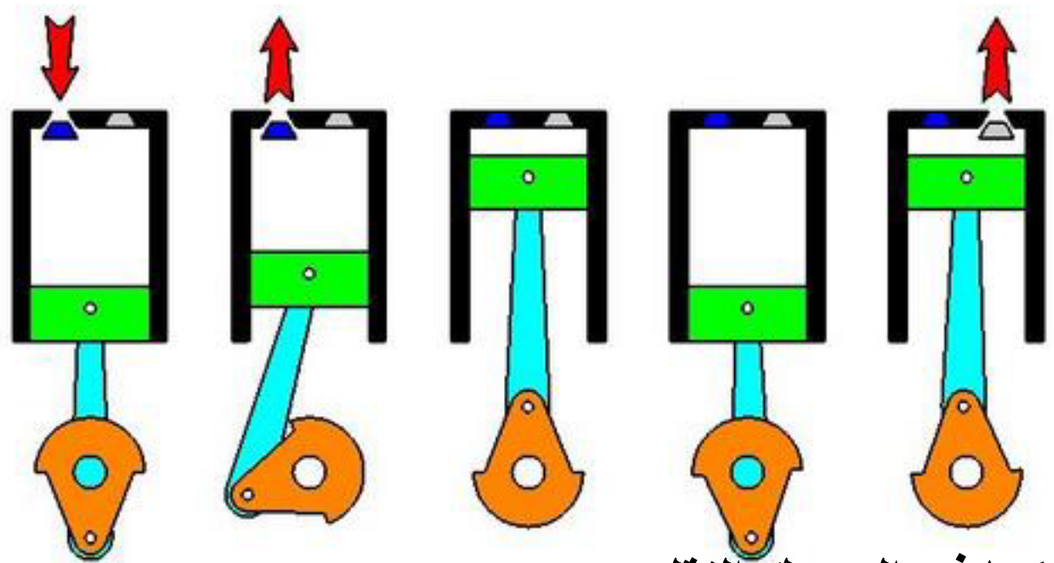
Discharge: the inlet valve closes with a significant delay: part of the mixture is therefore discharged into the pipe

Compression: As a portion of the mixture has been pushed back, only a fraction of the cylinder volume is compressed.

Expansion: The combustion gases, on the other hand, are expanded throughout the entire piston stroke.

Exhaust: Everything happens as in a conventional engine.

This type of operation, combined with the addition of a compressor at the intake, constitutes the Miller cycle.



سحب الهواء: يحدث كل شيء كما في المحرك التقليدي.

التفريغ: يُغلق صمام الدخول بتأخير كبير: وبالتالي يتم تفريغ جزء من الخليط في الأنبوب

الانضغاط: نظرًا لأن جزءًا من الخليط قد دُفِعَ إلى الوراء، يتم ضغط جزء فقط من حجم الأسطوانة.

التمدد: بالمقابل، تمدد غازات الاحتراق على طول نطاق ضربة المكبس بأكمله.

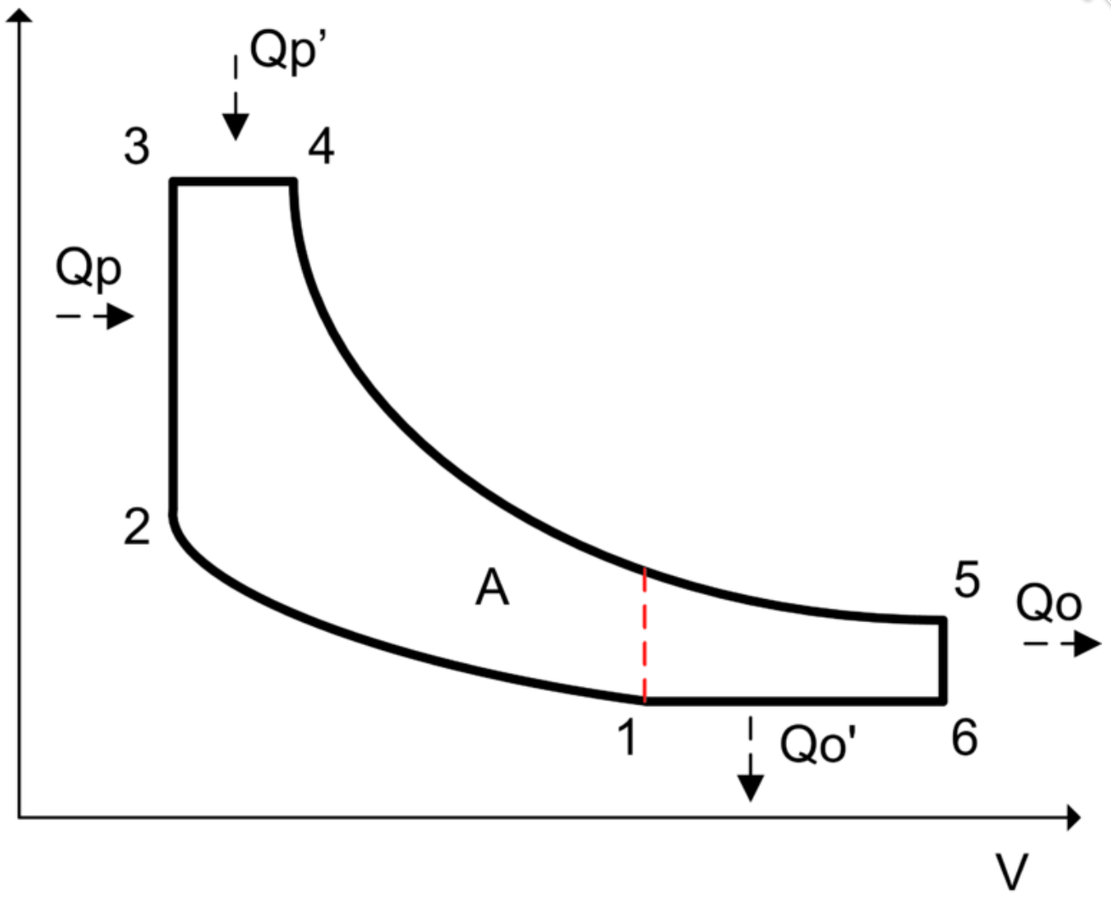
العادم: يحدث كل شيء كما في المحرك التقليدي

هذا النوع من التشغيل، بالاقتران مع إضافة ضاغط عند المدخل، يشكل دورة ميلر (Miller cycle).

The ideal Atkinson cycle.

The ideal Atkinson cycle is composed of the following processes:

1-2 Adiabatic (or isentropic) compression,
2-3 Isochoric heat absorption (pressure increases rapidly, but the piston remains stationary),
3-4 Isobaric heat absorption (combustion continues, and the piston moves),
4-5 Isentropic expansion,
5-6 Isochoric heat release,
6-1 Isobaric heat release.



الدورة الأتكنسون النموذجية.

الدورة الأتكنسون النموذجية تتألف من مراحل التالية:

2-1 الضغط المضغوط النموذجي أو الانضغاط النموذجي،

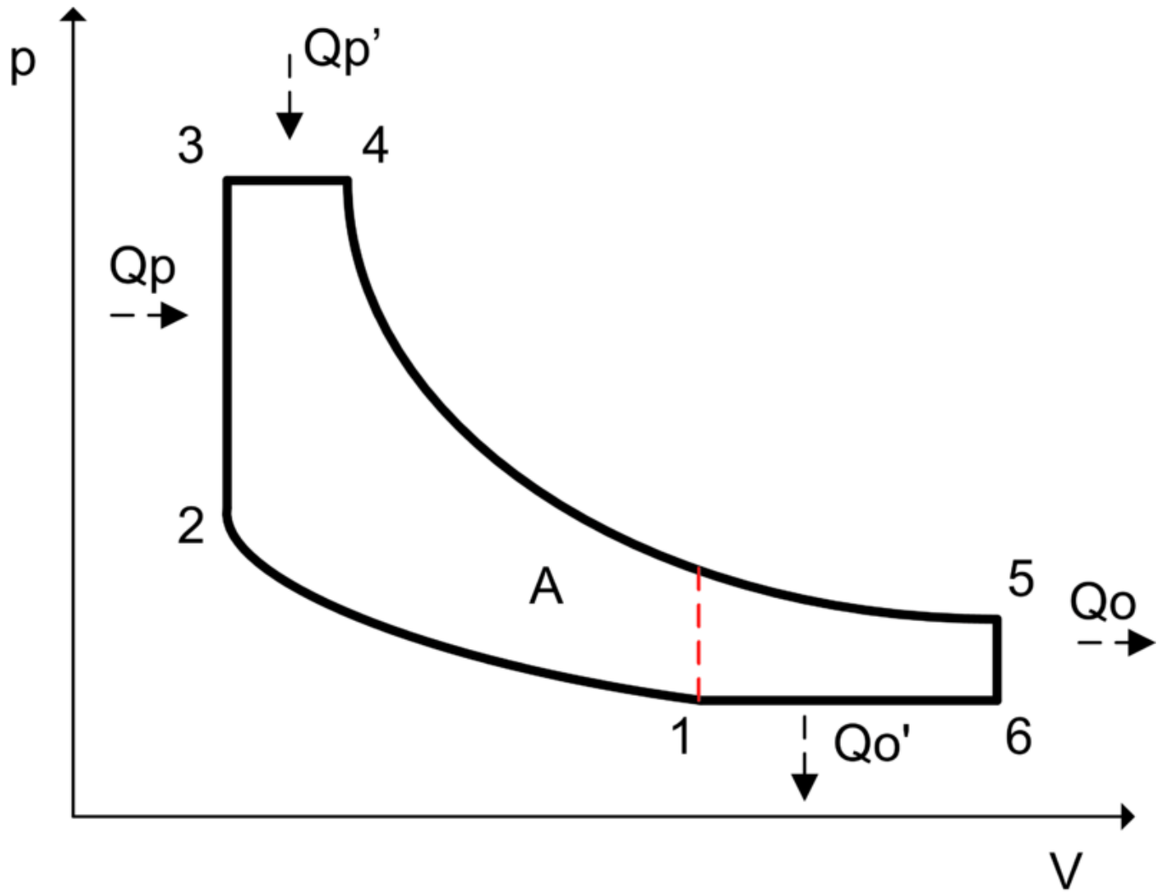
3-2 امتصاص الحرارة بحجم ثابت، حيث يزداد الضغط بسرعة لكن المكبس لم يبدأ بالحركة بعد؛

4-3 امتصاص الحرارة بضغط ثابت، حيث تستمر الاحتراق ويبدأ المكبس بالتحرك؛

5-4 التوسع النموذجي،

6-5 تحرر الحرارة بحجم ثابت،

1-6 تحرر الحرارة بضغط ثابت



Difference between the Atkinson cycle and the Otto cycle.

In the Otto cycle, the intake of the air/fuel mixture.

The intake valve opens at TDC (Top Dead Center) and closes at BDC (Bottom Dead Center).

In the Atkinson cycle, the intake valve closes after BDC, thus pushing back a portion of the mixture into the intake manifold. As a result, less mixture and less fuel are needed to complete a cycle. The compression of the engine is also lower due to the smaller volume of air being compressed.

The main drawback of a four-stroke engine with an Atkinson cycle is its reduced power output compared to a conventional Beau de Rochas cycle. This is because the Atkinson cycle admits less air and, consequently, less fuel.

الفرق بين دورة أتكنسون ودورة أوتو:

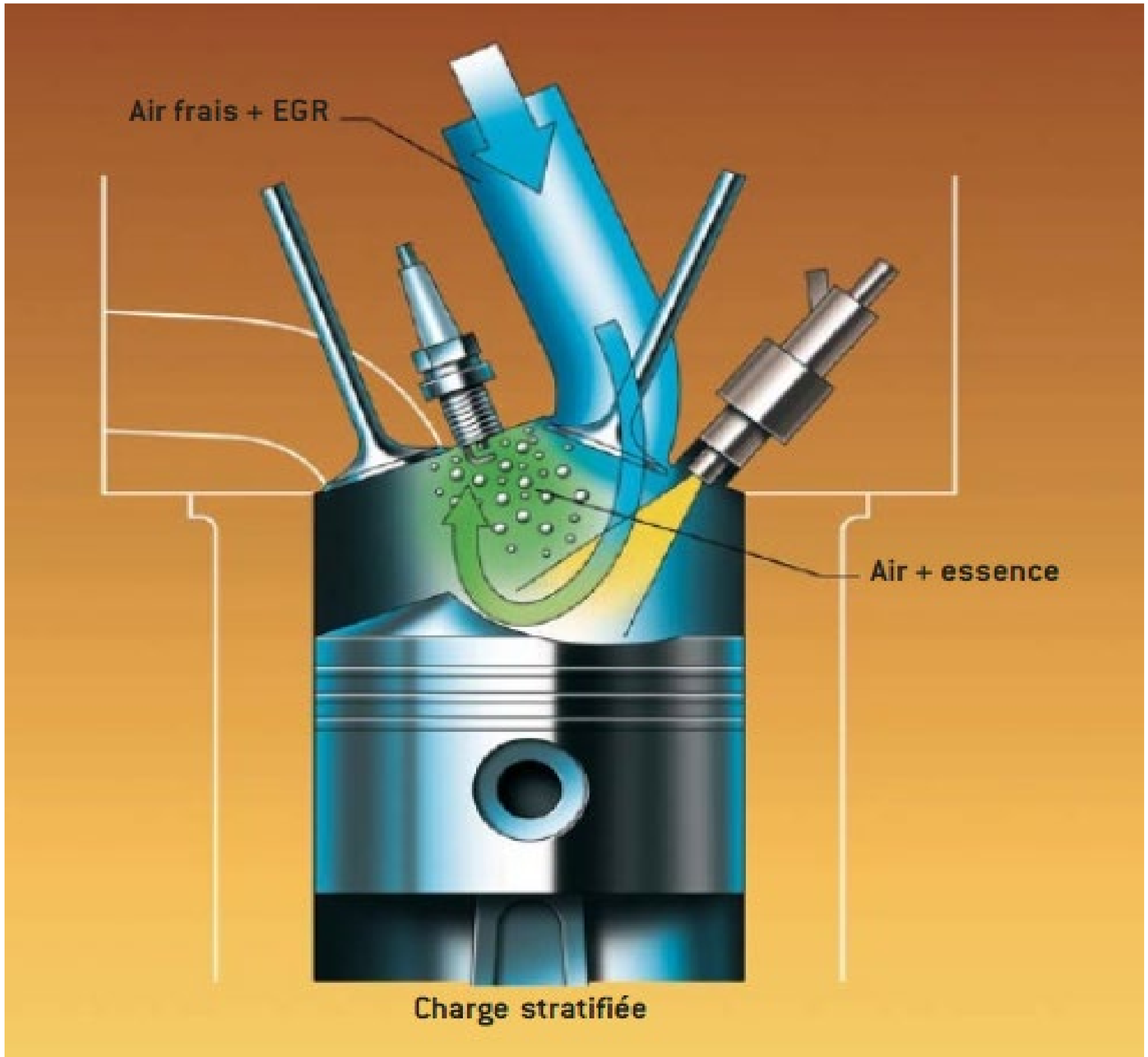
في دورة أوتو، يحدث امتصاص خليط الهواء / الوقود. تفتح صمام السحب عند TDC (أعلى نقطة للمكبس) وتغلق عند BDC (أسفل نقطة للمكبس).

في دورة أتكنسون، يتم إغلاق صمام السحب بعد BDC، مما يدفع جزءًا من الخليط إلى مجمع السحب. نتيجة لذلك، يكون هناك حاجة إلى كمية أقل من الخليط والوقود لاستكمال دورة واحدة. يكون ضغط الضاغط في المحرك أقل أيضًا بسبب حجم الهواء الأقل المضغوط.

العيب الرئيسي لمحرك ذو أربعة أشواط بدورة أتكنسون هو إنتاج قدرة أقل مقارنةً بدورة بو دو روشا التقليدية. يحدث ذلك لأن دورة أتكنسون تسمح بكمية أقل من الهواء وبالتالي أقل من الوقود

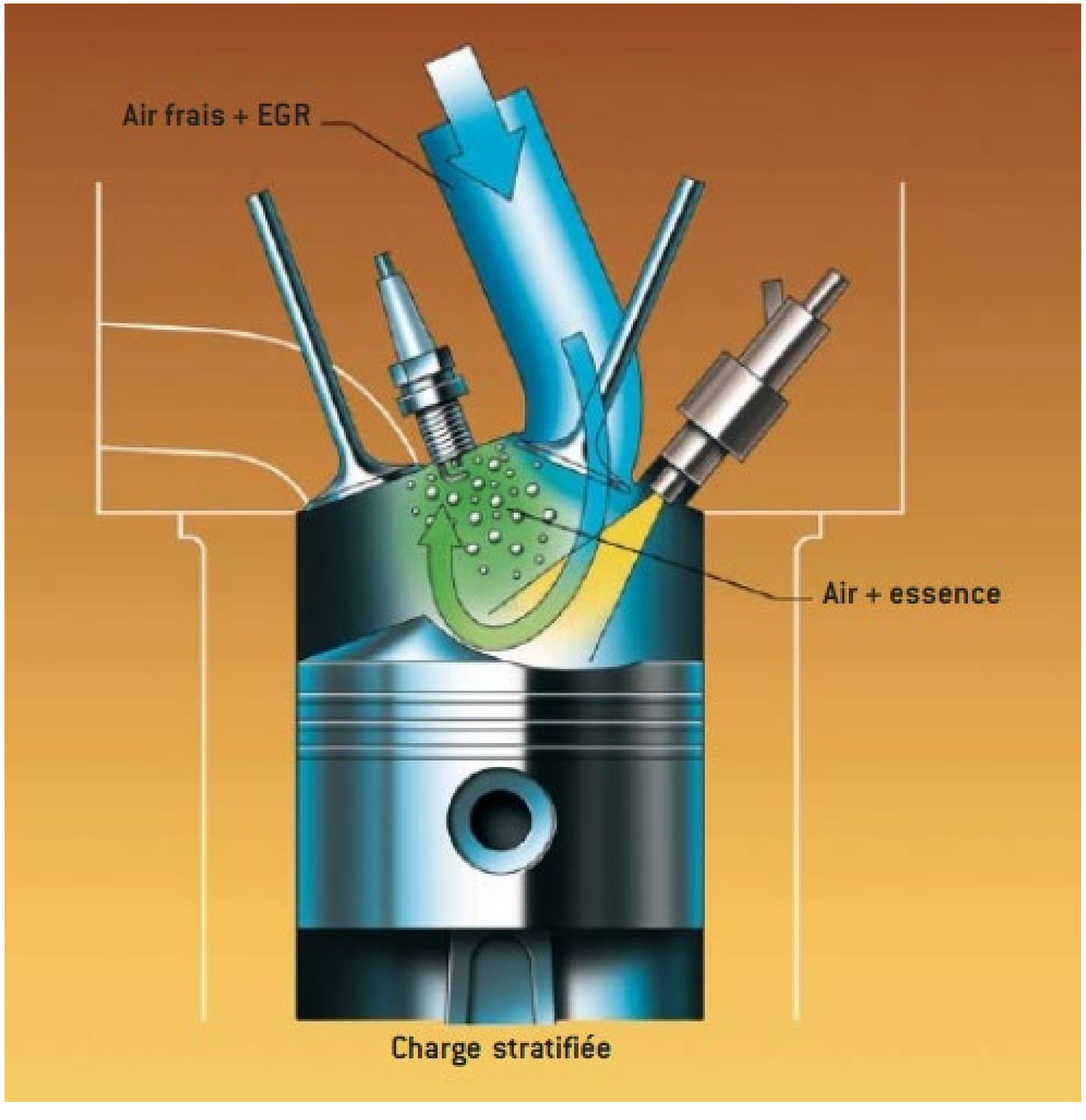
1-5 Stratified Charge

The principle of stratified charge applies to direct injection gasoline engines. It involves concentrating the fuel vaporization near the spark plug rather than throughout the entire combustion chamber. This operating mode allows for a reduction in engine fuel consumption, which can reach up to 40% when running at low loads.



University of M'sila-----Faculty: ST------Module:Internal combustion engines -Master 2 -Energetics 2025/2026

5-1 الشحن الطبقي



ينطبق مبدأ الشحن الطبقي على محركات البنزين ذات الحقن المباشر. إنه ينطوي على تركيز تبخير الوقود بالقرب من شمعة الإشعال بدلاً من تركيزه في غرفة الاحتراق بأكملها. يسمح وضع التشغيل هذا بتقليل استهلاك وقود المحرك ، والذي يمكن أن يصل إلى 40٪ عند التشغيل بأحمال منخفضة.

The principle of the stratified charge engine.

The principle of the stratified charge engine is to have a rich mixture, which is inflammable, in close proximity to the spark plug, and a leaner mixture, so low in fuel that it could not be used in a traditional engine, in the rest of the cylinder. In a stratified charge engine, the power output is no longer controlled by the quantity of air admitted but by the amount of injected gasoline, similar to a diesel engine.

مبدأ محرك الشحن الطبقي.

مبدأ محرك الشحنة الطبقية هو أن يكون لديك خليط غني ، قابل للاشتعال ، على مقربة من شمعة الإشعال ، وخليط أقل رشاقة ، منخفض الوقود لدرجة أنه لا يمكن استخدامه في المحرك التقليدي ، في بقية الأسطوانة. في محرك الشحن الطبقي ، لم يعد يتم التحكم في خرج الطاقة بكمية الهواء المسموح بها ولكن بكمية البنزين المحقون ، على غرار محرك الديزل.

Stratified charge means that the air/fuel mixture in the cylinder is distributed into several layers with different fuel concentrations.
A stratified mixture is a heterogeneous and structured (organized) mixture that is generally poor to very poor $0.1 \ll R_{globale} < 0.7$

Air coefficient and richness

For gasoline (essence), the ratio that ensures total combustion (stoichiometric ratio) is approximately 14.5, i.e. it takes approximately 14.5 kg of air to completely burn 1 kg of fuel.

Air coefficient λ is the ratio $\frac{m_{air}}{m_{essence}}$ /14,5

Wealth r =1/λ is the ratio $\frac{m_{essence}}{m_{air}}$ /0,07

at stochiometry λ = r = 1
A lean mixture (λ>1) (r<1) contains more air.
A rich mixture contains less air

تعني الشحنة الطبقية أن خليط الهواء / الوقود في الأسطوانة يتم توزيعه على عدة طبقات بتركيزات وقود مختلفة. الخليط الطبقي هو خليط غير متجانس ومنظم (منظم) يكون عمومًا خفيفًا إلى هزيل للغاية:

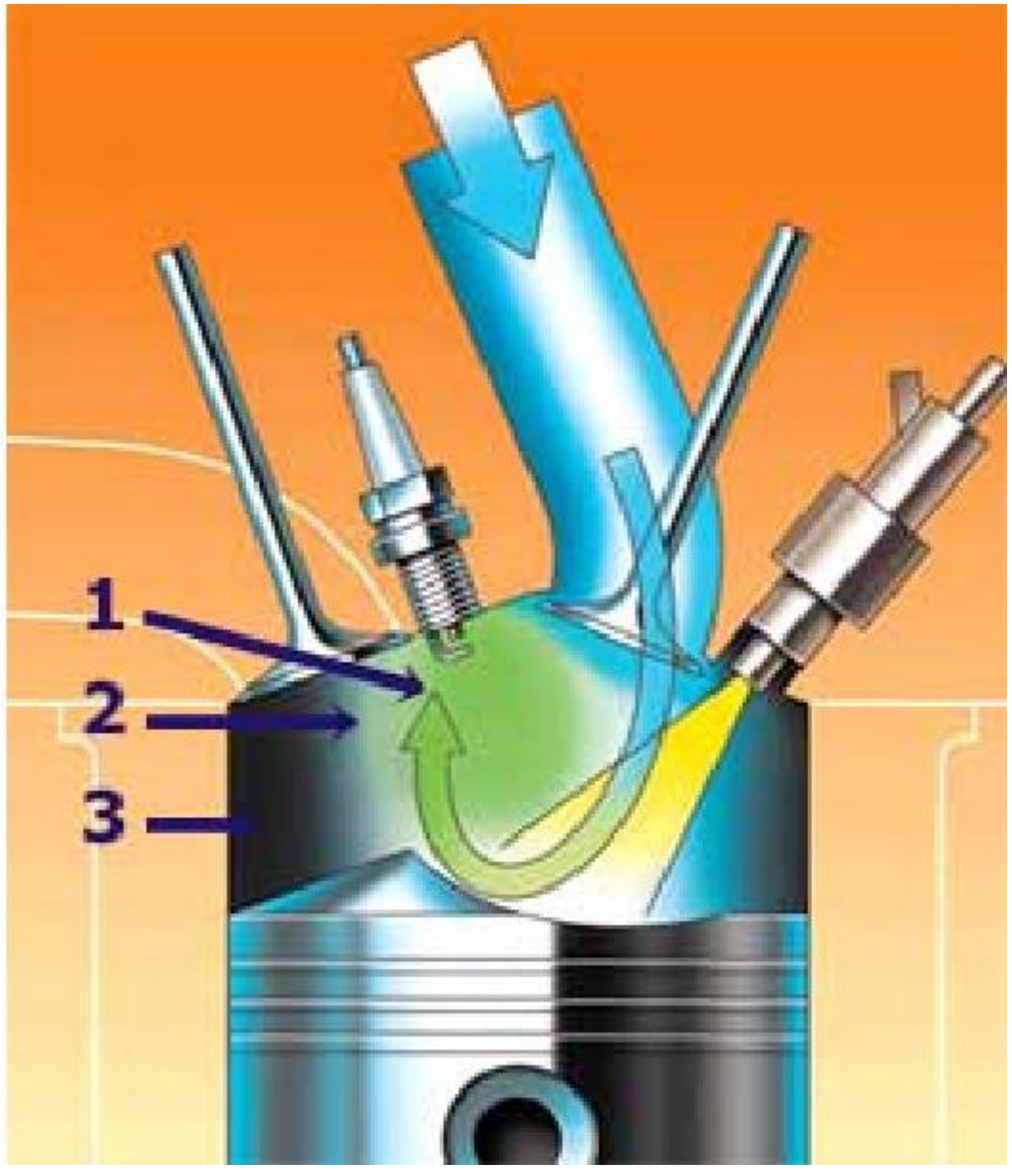
$$0.1 \ll R_{globale} < 0.7$$

معامل الهواء والغنى

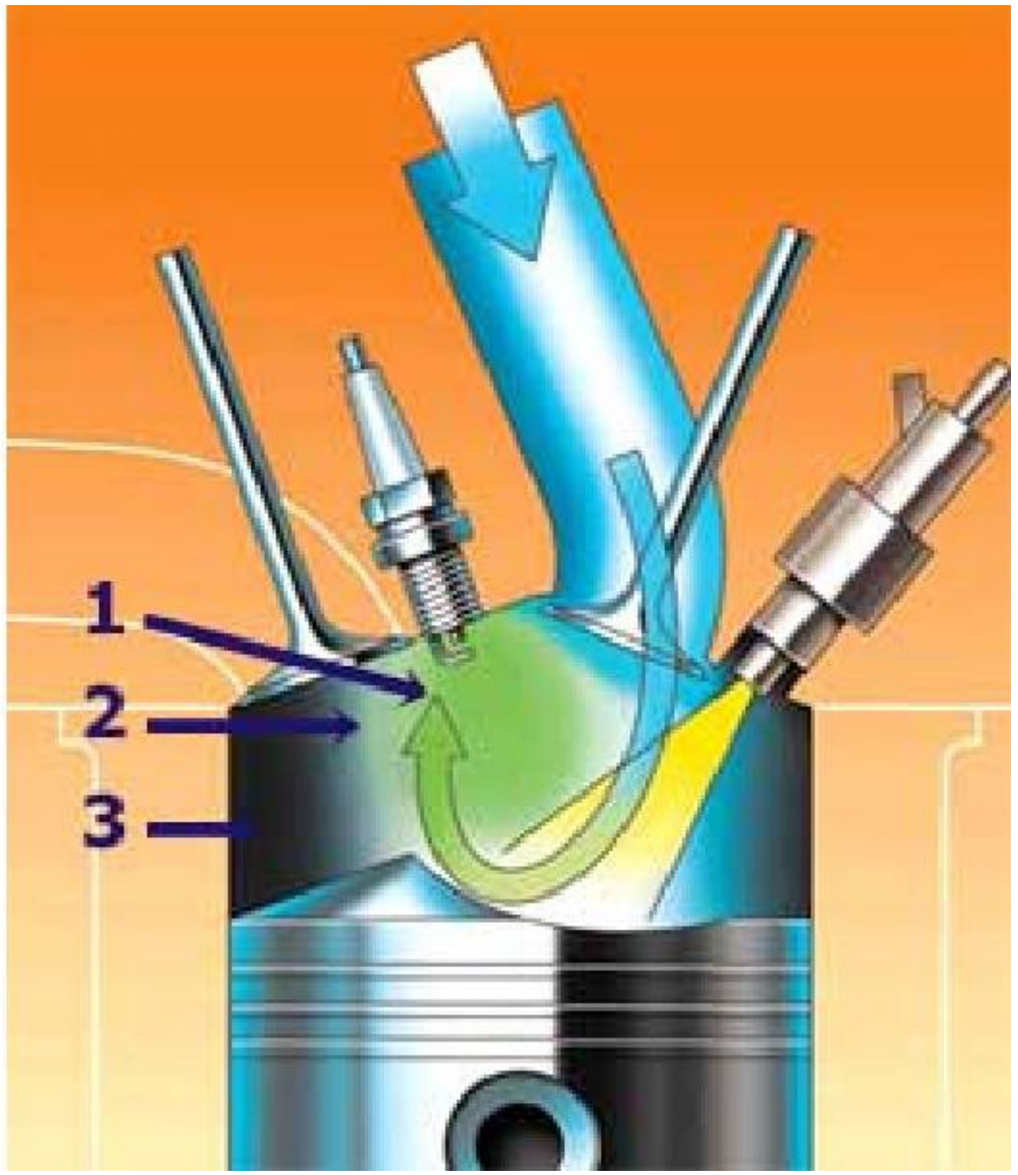
بالنسبة للبنزين، النسبة التي تضمن احتراقًا كاملاً (النسبة الكيميائية المثلى) هي تقريبًا 14.5، أي يتطلب تقريبًا 14.5 كجم من الهواء لاحتراق 1 كجم من الوقود بالكامل

$$\frac{m_{air}}{m_{essence}} /14,5$$ **معامل الهواء λ هو النسبة**

$$\frac{m_{essence}}{m_{air}} /0,07$$ **الغنا $1/\lambda$ هي النسبة**



- The air-fuel ratio is 1 (stoichiometric) around the spark plug. The spark initiates combustion (1).
- The combustion then propagates to the leaner layers and results in lower fuel consumption (2).
- The last layer can, if necessary, be exhaust gas recirculation (3).



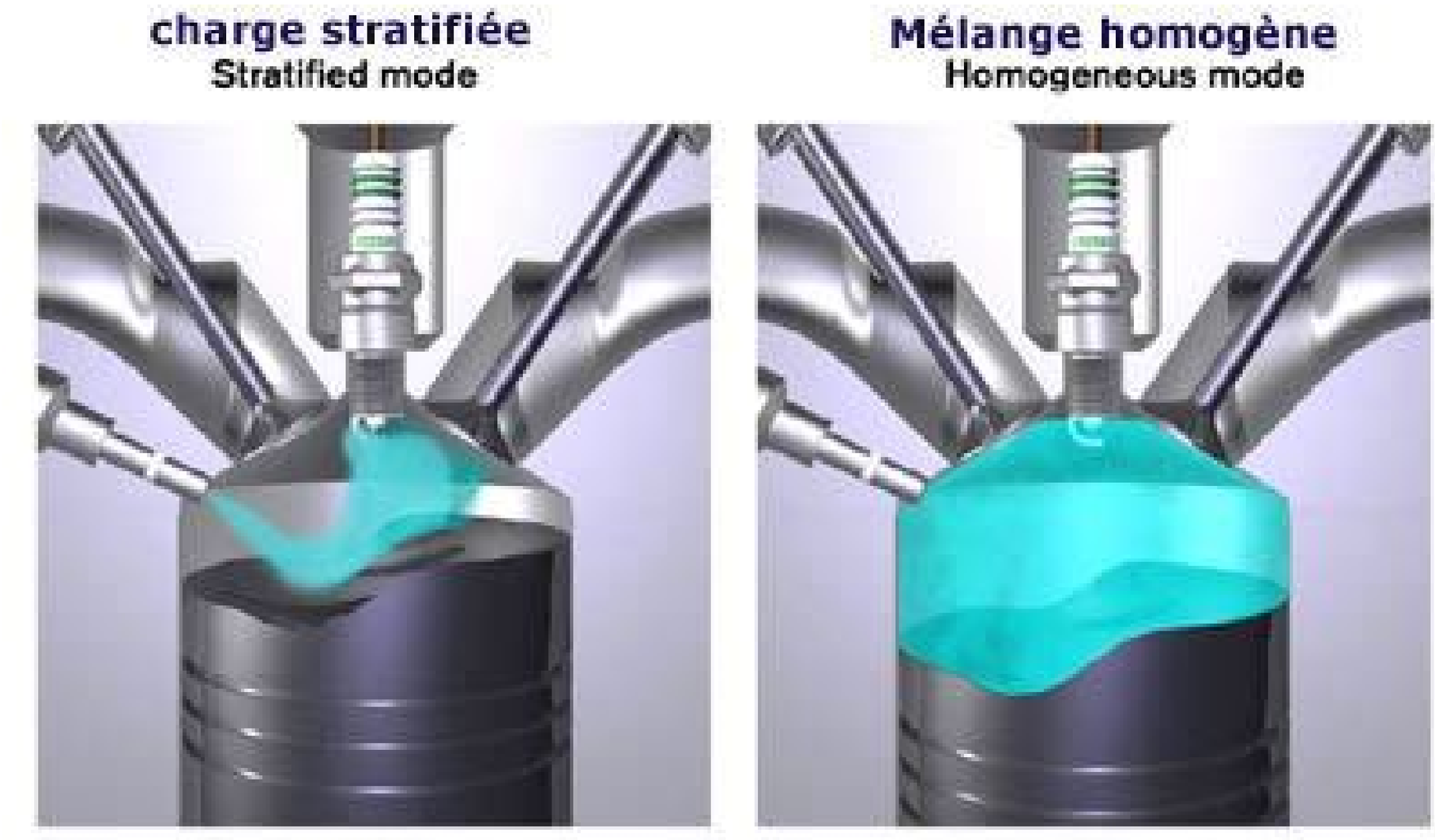
- نسبة الهواء إلى الوقود تكون متساوية (النسبة الكيميائية المثلى) حول شمعة الإشعال. تقوم الشرارة بتحفيز الاحتراق (1).

- ثم ينتقل الاحتراق إلى الطبقات الأكثر فقرًا بالوقود ويؤدي إلى استهلاك وقود أقل (2).

- يمكن أن تكون الطبقة الأخيرة، إن لزم الأمر، إعادة دورة الغازات المنبعثة (3)

**The stratified mode only operates at low engine load and low RPM.
As soon as higher power is required, the engine management switches to "homogeneous mixture" mode.**

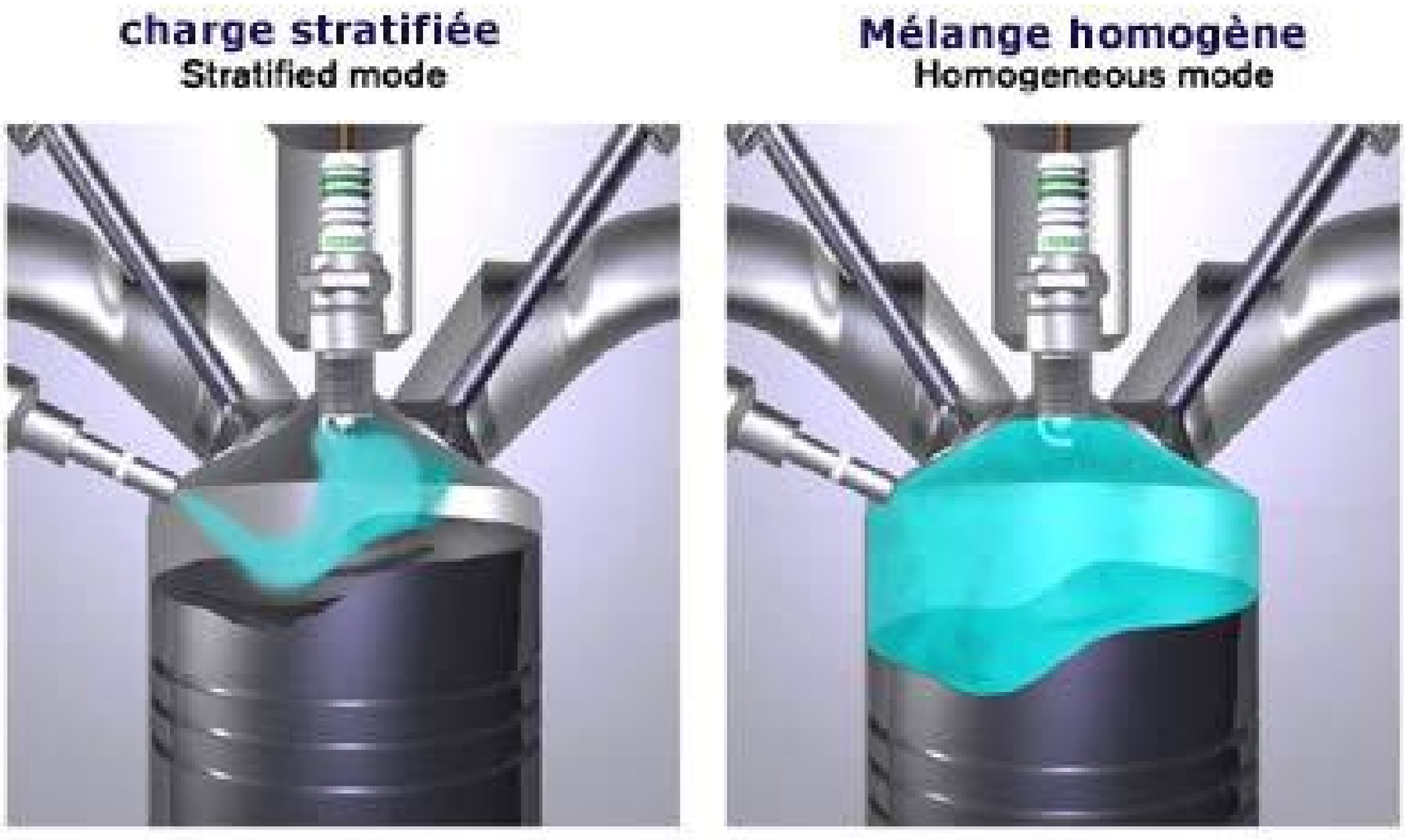
The injection is advanced and carried out during the intake of the air.



The two operating modes

الوضع الطبقي يعمل فقط عند تحميل المحرك منخفض وسرعة المحرك منخفضة. فور طلب طاقة أعلى، يقوم إدارة المحرك بالتحول إلى وضع "خليط متجانس".

تتم الحقن مبكرًا وأثناء الامتصاص للهواء



The two operating modes

The benefits of stratified combustion are:

1) To reduce fuel consumption at low load.

Homogeneous: Operating range: AFR (Air-Fuel Ratio) 0.7 to 1 (and higher).

Minimum consumption for AFR around 0.85.

Stratified: AFR → 0.3.

2) To reduce pollutant emissions.

فوائد الاحتراق الطبقي هي:

1 لتقليل استهلاك الوقود عند التحميل المنخفض.

متجانسة: نطاق التشغيل:) AFRنسبة الهواء إلى الوقود) 0.7 إلى 1 (وأعلى). الحد الأدنى لاستهلاك AFRحوالي 0.85.طبقي: .0.3 → AFR

2 للحد من الانبعاثات الملوثة.

1-6 Concept HCCI

The Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engine is a type of internal combustion engine in which the air-fuel mixture is thoroughly homogeneously mixed and is compressed intensely enough to reach the point of auto-ignition.

HCCI AND CAI MOTORS

HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) for diesel and CAI (Controlled Auto Ignition) for gasoline,These engines partially reabsorb their burnt gases, which leads to instantaneous ignition of the entire mixture contained in the combustion chamber.

6-1 مفهوم HCCI

محرك الإشعال بضغط الشحنة المتجانس (HCCIهو نوع من محركات الاحتراق الداخلي حيث يتم خلط خليط الهواء والوقود تمامًا بشكل متجانس ويتم ضغطه بشكل مكثف بدرجة كافية للوصول إلى نقطة الاشتعال الذاتي

محركات HCCIوCAI

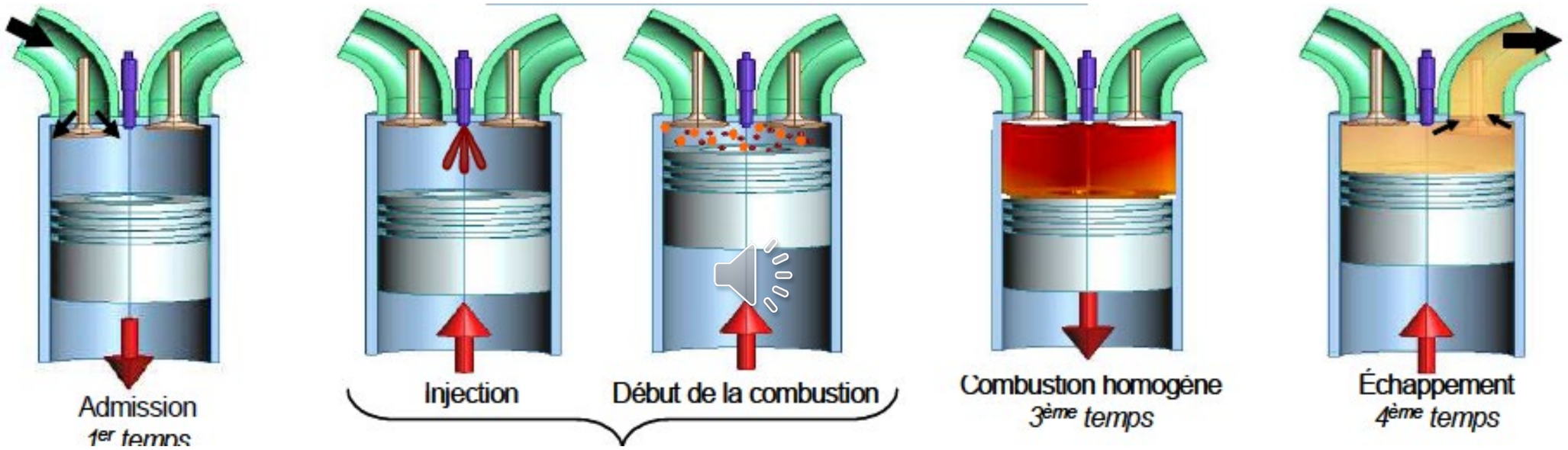
) HCCIالاشتعال بالضغط الموحد للشحنة) للديزل و) CAIالاشتعال التلقائي المضبوط) للبنزين.

هذه المحركات تعيد امتصاص جزء من الغازات المحترقة، مما يؤدي إلى اشتعال فوري للخليط بأكمله الذي يوجد في غرفة الاحتراق

University of M'sila-----Faculty: ST------Module:Internal combustion engines -Master 2 -Energetics 2025/2026

Presentation of the HCCI engine.

Four-stroke cycle for HCCI combustion.

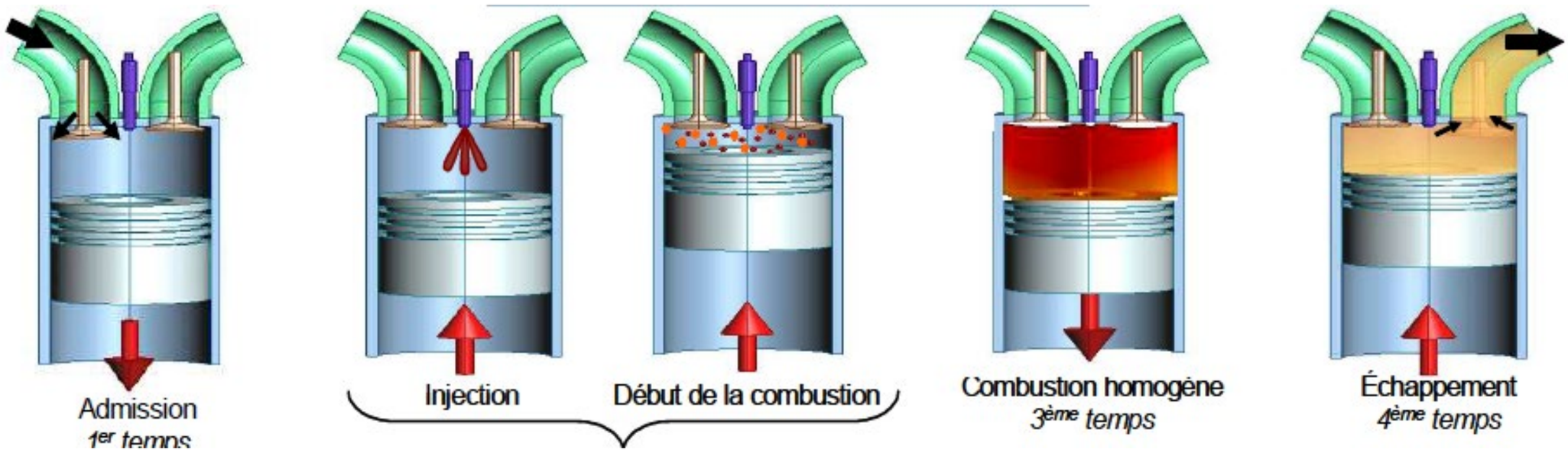


In HCCI, we have:

- **Compression ignition (auto-ignition)**
- **Direct injection and homogenization in the Diesel cycle**
- **Strong dilution and combustion control through recycled burned gases.**

عرض لمحرك) HCCIالاشتعال بالضغط الموحد للشحنة).

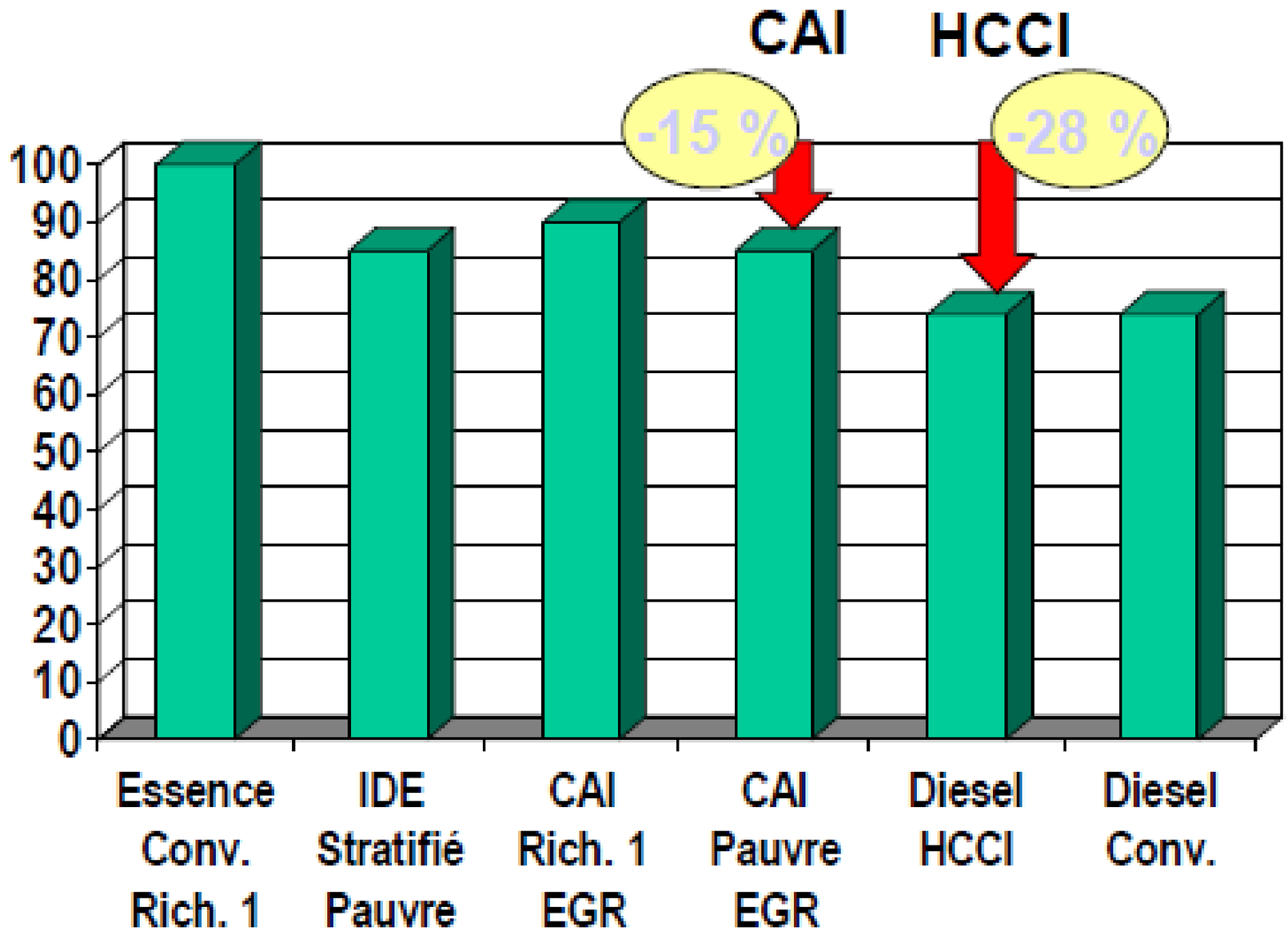
الدورة الأربعية للاحتراق HCCI



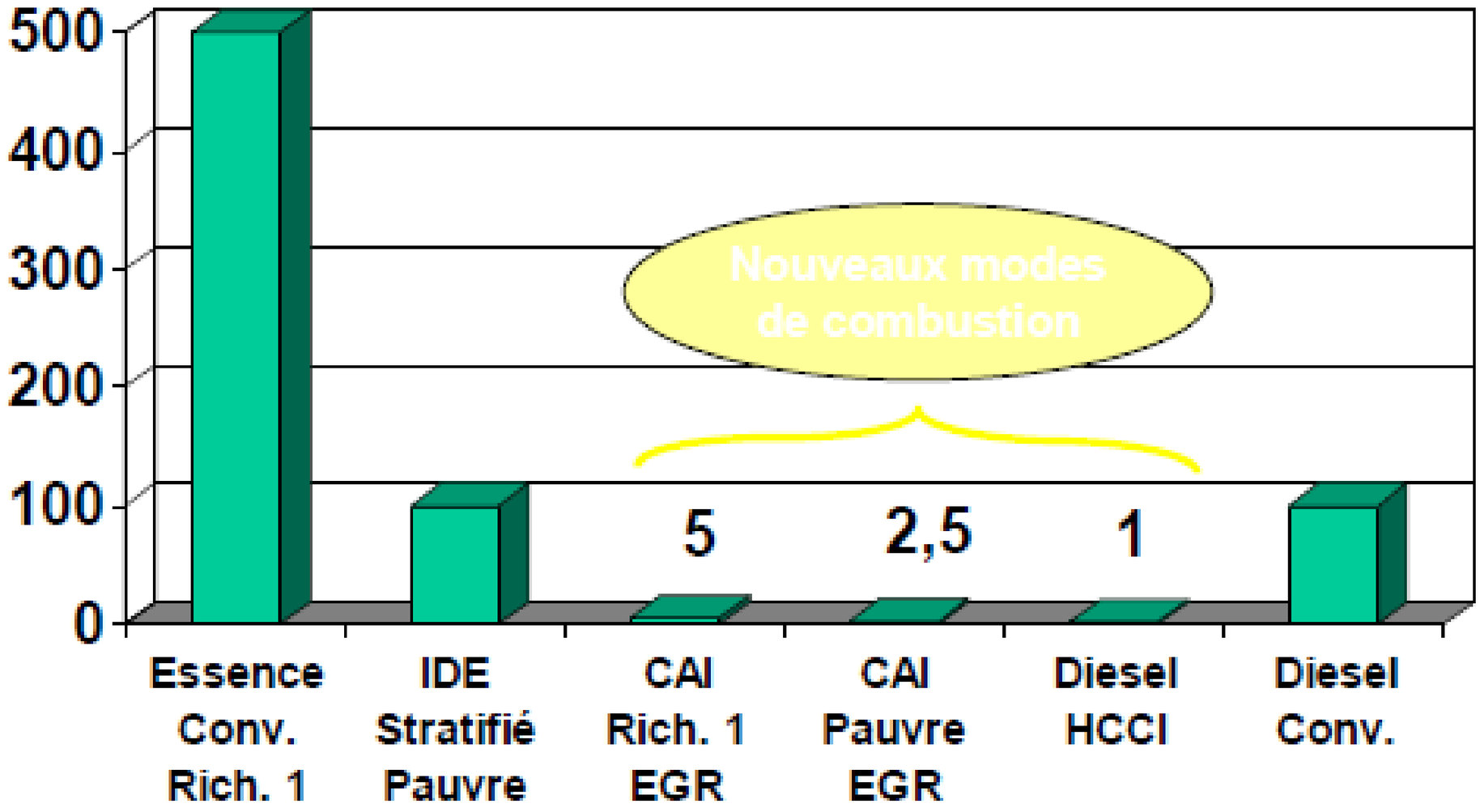
في HCCI، لدينا:

- **الإشعال بالضغط (اشتعال تلقائي)**
- **حقن مباشر وتجانس في دورة الديزل**
- **تخفيف قوي ومراقبة الاحتراق من خلال إعادة تدوير الغازات المحترقة**

Consommation de carburant



Émissions de NOx



Advantages

- low particle emission
- low NOx emission
- efficiency close to the efficiency of a conventional diesel engine

المزايا:

- **انخفاض انبعاثات الجسيمات**
- **انخفاض انبعاثات أكسيد النيتروجين ((NOx**
- **كفاءة قريبة من محرك الديزل التقليدي**

Multiple benefits of HCCI

The HCCI combustion is initiated when the mixture is heated by the recycled exhaust gases (EGR) and when the pressure becomes very high at the end of compression, with the volumetric ratio generally equivalent to that of diesel engines. The mixture ignites spontaneously rather than through a flame front starting from the spark plug. This concept currently works only under low loads, and the engine must switch to spark ignition beyond this range.

HCCI offers two advantages. The first is the ability to burn very lean fuel mixtures, avoiding the production of particles while generating significantly higher efficiency.

The second advantage is the relatively low combustion temperature, which prevents the formation of NOx despite the use of lean mixtures.

فوائد متعددة من HCCI

يبدأ احتراق HCCI عندما يتم تسخين الخليط بواسطة غازات العادم المعاد تدويرها (EGR) وعندما يصبح الضغط مرتفعًا جدًا في نهاية الضغط ، مع النسبة الحجمية بشكل عام معادلة لتلك الخاصة بمحركات الديزل. يشتعل الخليط تلقائيًا وليس من خلال واجهة لهب تبدأ من شمعة الإشعال. يعمل هذا المفهوم حاليًا فقط في ظل أحمال منخفضة ، ويجب أن يتحول المحرك إلى اشتعال الشرارة خارج هذا النطاق.

تقدم HCCI ميزتين. الأول هو القدرة على حرق مخاليط الوقود الخالية من الدهون ، وتجنب إنتاج الجزيئات مع توليد كفاءة أعلى بشكل ملحوظ.الميزة الثانية هي درجة حرارة الاحتراق المنخفضة نسبيًا ، مما يمنع تكوين أكاسيد النيتروجين على الرغم من استخدام الخلائط الخالية من الدهون

1-7 PCCI Concept

In HCCI combustion, air and fuel enter the combustion chamber and are compressed until the point of auto-ignition. On the other hand, in PCCI combustion, the fuel is injected during the compression stroke, creating a hybrid between HCCI and diesel combustion. In PCCI combustion, we can use more Exhaust Gas Recirculation (EGR) than in HCCI.

PCCI is the hybrid of HCCI and diesel combustion, providing more control over combustion/ignition and heat release rate, with lower NOx and soot emissions, as the premixed charge can be controlled differently.

7-1 مبدأ PCCI

في الاحتراق (HCCI الاشتعال بضغط الشحنة المتجانس) ، يدخل الهواء والوقود إلى غرفة الاحتراق ويتم ضغطهما حتى يحدث الاشتعال الذاتي. من ناحية أخرى ، في احتراق (PCCI اشتعال ضغط الشحنة المختلط) ، يتم حقن الوقود أثناء شوط الانضغاط ، مما ينتج عنه هجين من HCCIواحتراق الديزل. في احتراق PCCI، يمكننا استخدام إعادة تدوير غاز العادم (EGR أكثر من HCCI)

يعد (PCCIاشتعال ضغط الشحن المسبق الخلط) في الواقع مزيجًا من HCCIواحتراق الديزل ، مما يوفر مزيدًا من التحكم في الاحتراق / الإشعال ومعدل إطلاق الحرارة مع إنتاج انبعاثات أكاسيد النيتروجين والسخام. هذا ممكن لأنه يمكن التحكم في الشحنة الممزوجة مسبقًا باستخدام تقنيات مختلفة

A 4-cylinder engine, bore 86 mm and stroke 84 mm, operates at a rotation speed of 5000 rpm-1 and then delivers a torque of 154 m.N. Its volumetric ratio is 9.2 to 1. The engine runs with a richness of 1.25. The fuel used has a net calorific value of 42 $KJ.g^{-1}$. The density of the fuel is 750 kg/m^3.The valve loss coefficient is =0.8. The intake pressure is 98000 pascal and the air temperature is 20°C.The combustion efficiency is 0.9 and the mechanical efficiency is 0.85.

Calculate:

A. The effective power of the motor (in watts and hp): P_{eff}.

B. The actual mass flow of air consumed by the engine: qm_{air}

C. The mass flow of fuel injected: qm_{ess}

D. The theoretical calorific power of the injected fuel: $P_{cal\ th}$

E. The calorific power due to combustion: P_{comb}.

F. The theoretical efficiency of the cycle (Rochas beau) chosen to model the operation of this engine η_{th}.

G. The theoretical power of this engine: P_{th}.

H. The power indicated: P_i.

I. The form (or cycle) performance: η_f.

J. The effective (or total) yield using two methods: η_{eff}.

K. Specific consumption Cs.

يعمل المحرك ذو 4 أسطوانات ، قطر مكبسه 86 مم و مسافة انتقال المكبس 84 مم ، بسرعة دوران تبلغ 5000 دورة في الدقيقة يوفر عزم دوران يبلغ 154 متر نيوتن. نسبته الحجمية هي 9.2 إلى 1. يعمل المحرك بثراء 1.25. الوقود المستخدم له قيمة حرارية صافية تبلغ 42 .KJ.g-1كثافة الوقود 750 .kg/m3 معامل فقدان الصمام = 0.8. ضغط السحب هو 98000 باسكال ودرجة حرارة الهواء 20 ° C، وكفاءة الاحتراق 0.9 والكفاءة الميكانيكية 0.85.

Chapter 02: Fuel Injection Techniques

2-1 Electronic management and engine diagnostics

1967 Appearance of the first cars equipped with “JETRONIC” injection created by BOSCH. It was only later that this injection was called D-JETRONIC with the appearance of K-JETRONIC. The aim of electronic injection is to optimize the richness of the air/fuel mixture depending on the use of the engine in order to improve its efficiency and thus save fuel while having the possibility of increasing power. The principle is to get closer to ideal combustion during moderate use of the engine then to increase the richness when power is required. In addition, this technology makes it possible to cut off fuel injection during deceleration, thereby increasing fuel economy.



2: تقنيات حقن البنزين

1-2 لإدارة الإلكترونية وتشخيص للمحرك

1967 ظهور أولى السيارات المجهزة بحقن " "JETRONICمن إنتاج شركة BOSCH.في

وقت لاحق فقط تم تسمية هذا الحقن باسم D-JETRONICمع ظهور K-JETRONIC.

الهدف من الحقن الإلكتروني هو تحسين ثراء خليط الهواء / الوقود وفقًا لاستخدام المحرك من أجل تحسين كفاءته وبالتالي توفير الوقود مع إمكانية زيادة الطاقة.

المبدأ هو الاقتراب من الاحتراق المثالي أثناء الاستخدام المعتدل للمحرك ثم زيادة الثراء أثناء الطلب على الطاقة. بالإضافة إلى ذلك ، تقوم هذه التقنية بقطع حقن البنزين أثناء التباطؤ ، وبالتالي تحسين الاقتصاد في استهلاك الوقود

D-JETRONIC (1967-1976)

The letter "D" stands for "Druck" (Pressure).

Analog injection. The depression is measured by a sensor located in the intake manifold in order to calculate the fuel injection time required.

K-JETRONIC (1974-1988)

The 'K' stands for 'Kontinuierlich' (continuous).
Mechanical fuel injection. The difference is that the petrol is constantly coming out of all the injectors, with the petrol pump bringing the fuel to around 5 bar. The intake air is also measured to determine the amount of fuel to be injected.

L-JETRONIC (1974-1985)

The 'L' stands for 'Luft' (air).
Analog injection. This injection system uses a vane air flow meter. It is simpler and more reliable than the D-Jetronic, thanks to the use of specific integrated circuits. Widely used on European cars from the '80s.



‘D’. ‘Druck’ يعني ضغط

D-JETRONIC (1967-1976)

الحقن التناظري. يتم قياس النقصان في الضغط بواسطة مستشعر موجود في أنبوب السحب لحساب الوقت اللازم لحقن الوقود.

K-JETRONIC (1974-1988)

‘K’. ‘Kontinuierlich’ يعني مستمر

حقن الوقود الميكانيكي. الفرق هو أن البنزين يخرج من جميع الحاقنات طوال الوقت ، مع مضخة الوقود التي تصل الوقود إلى حوالي 5 بار. يتم قياس هواء السحب أيضًا لتحديد كمية البنزين المراد حقنه.

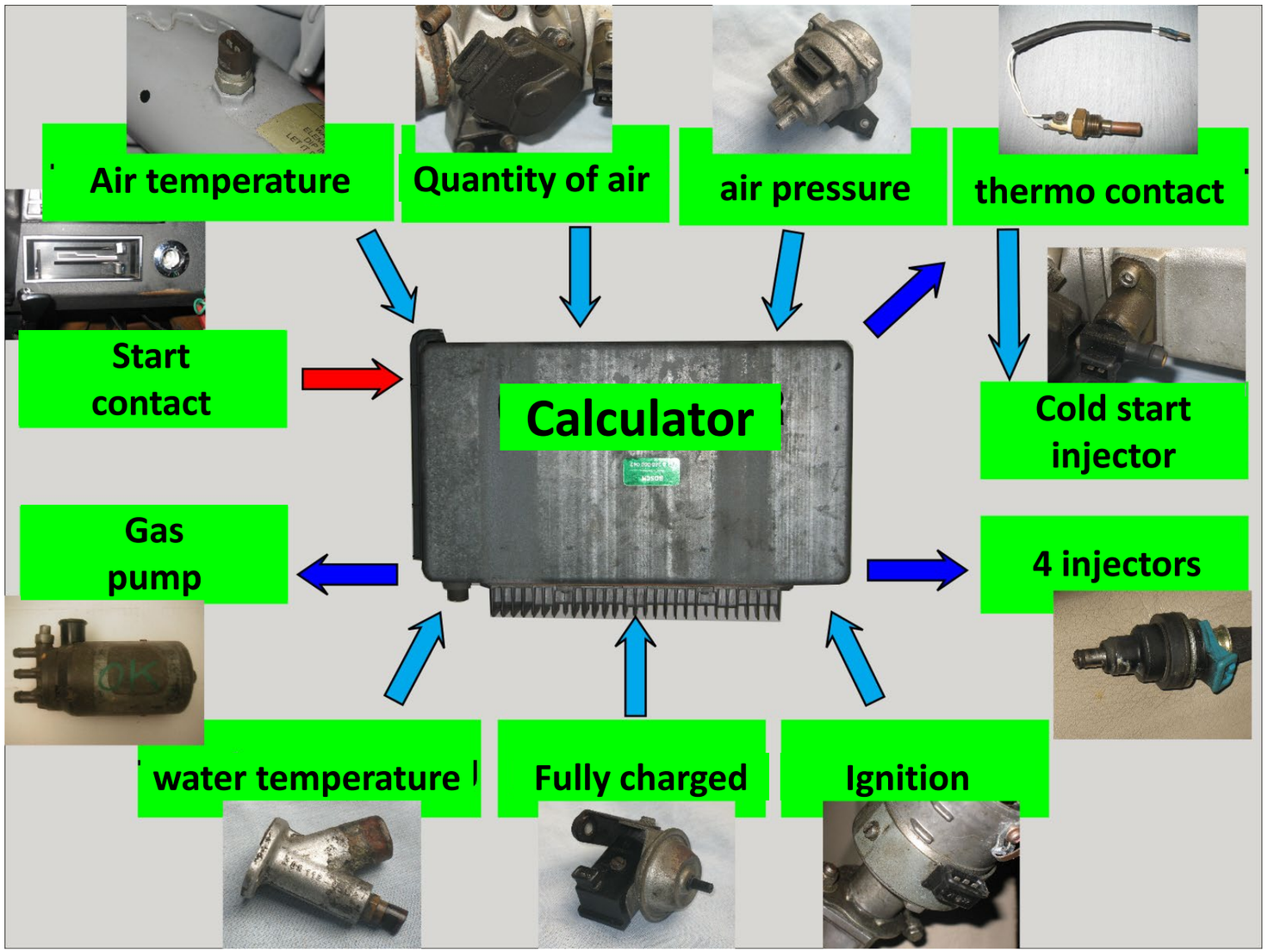
L-JETRONIC (1974-1985)

‘L’. ‘Luft’ يعني هواء

الحقن التناظري. يستخدم نظام الحقن هذا مقياس تدفق هواء. إنه أبسط وأكثر موثوقية من D-Jetronic، بفضل استخدام دوائر متكاملة محددة. تستخدم على نطاق واسع في السيارات الأوروبية في الثمانينيات

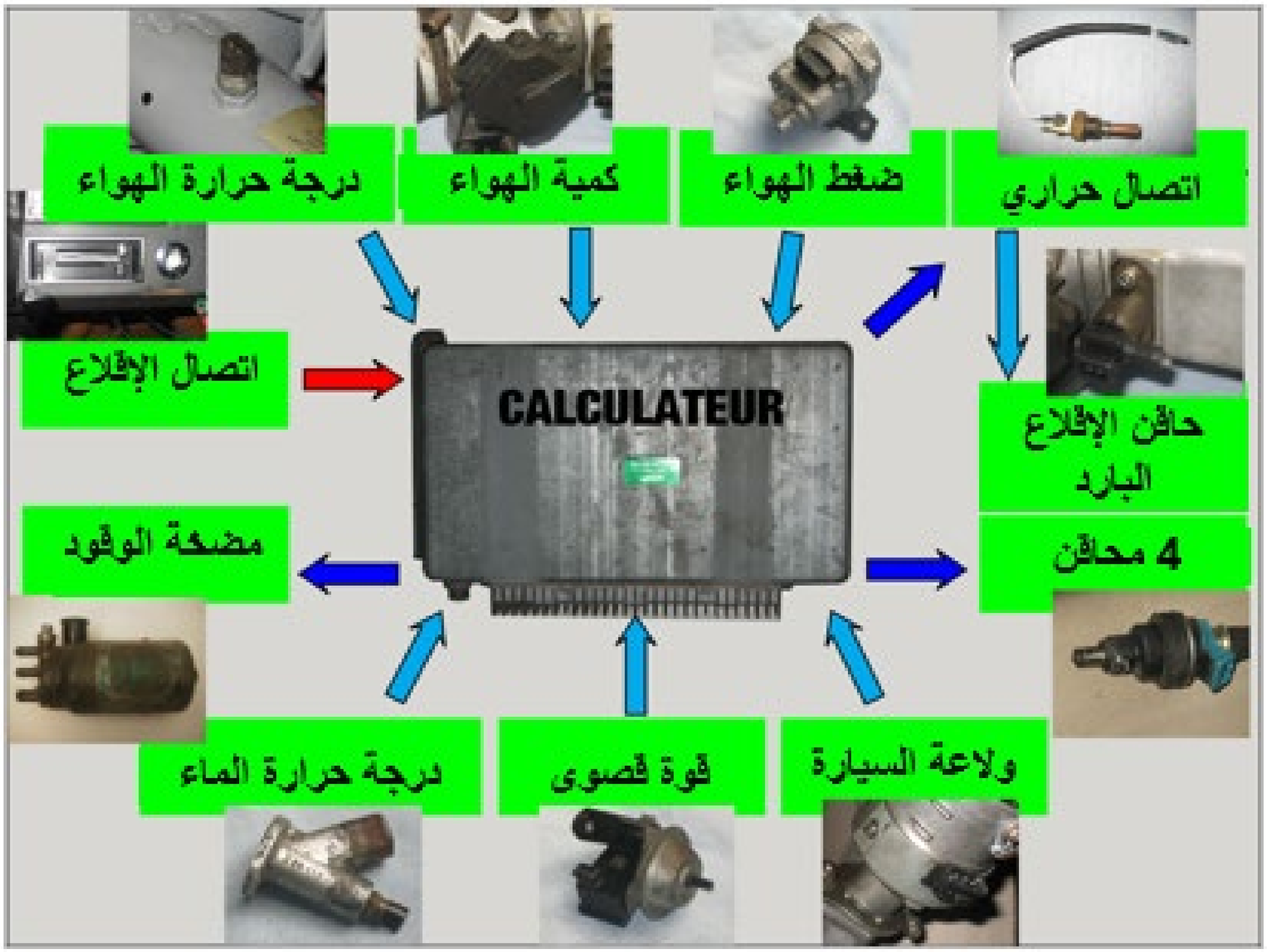
FONCTIONNEMENT

Sensors provide information to the control unit that operates them and controls the injection. Injecting gasoline into the air forms the carbureted mixture. So there are two different circuits.



كيفية التشغيل

تقرأ أجهزة الكشف المعلومات إلى الكمبيوتر الذي يستخدمها ويتحكم في الحقن. يشكل حقن البنزين في الهواء خليط الوقود. لذلك هناك دائرتان مختلفتان

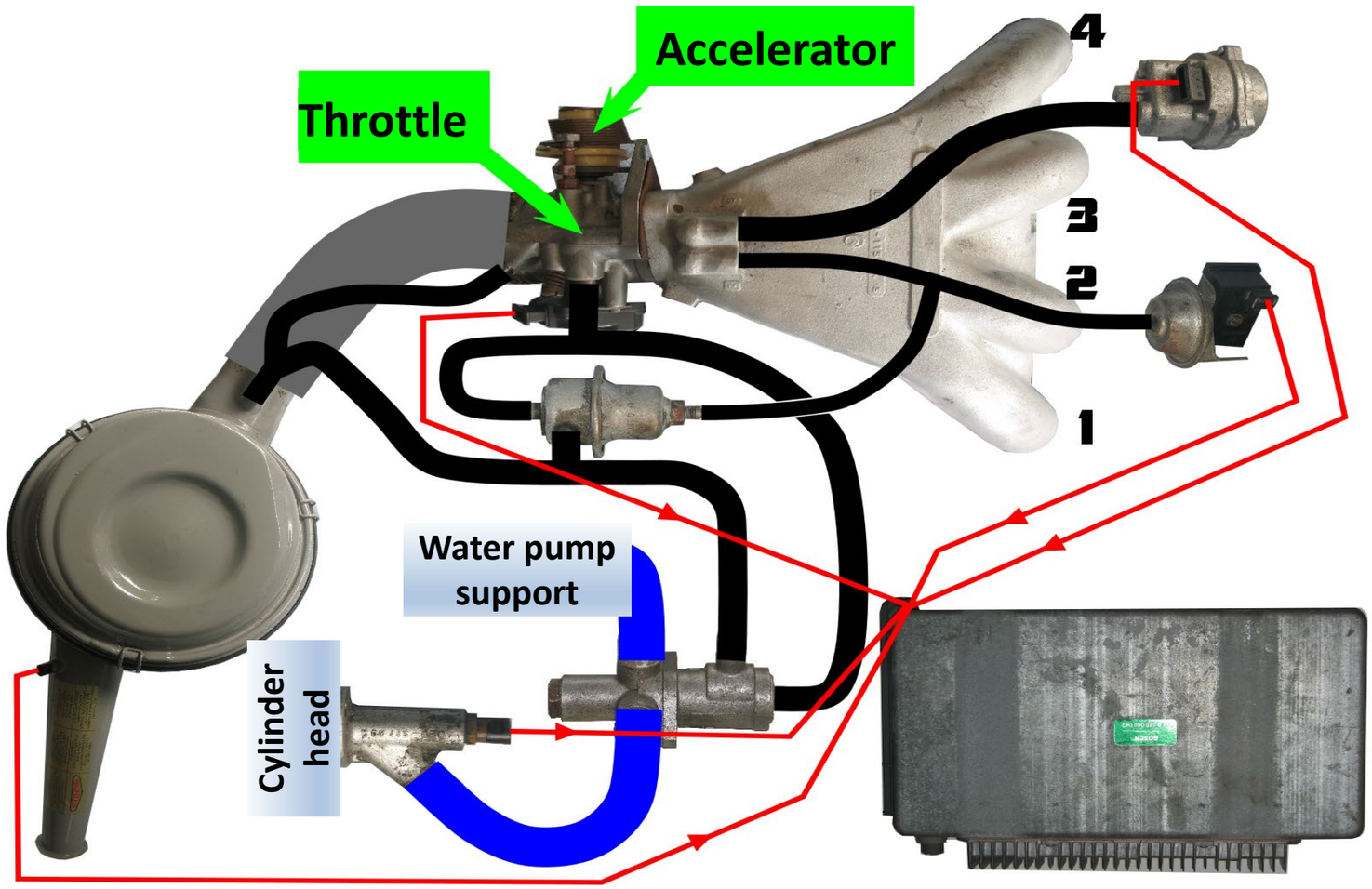


1-Air Circuit

The cylinders are fed by the pipes1, 2, 3, 4 of the inlet manifold.

- The main air inlet is controlled by the throttle opening located at the inlet of the manifold through the throttle.

- The second essential piece of information is given by the pressure probe, which transforms the absolute pressure indication in the intake manifold into an electrical signal. For a given engine speed, the manifold pressure decreases when the throttle is closed, it increases when the throttle is closed.

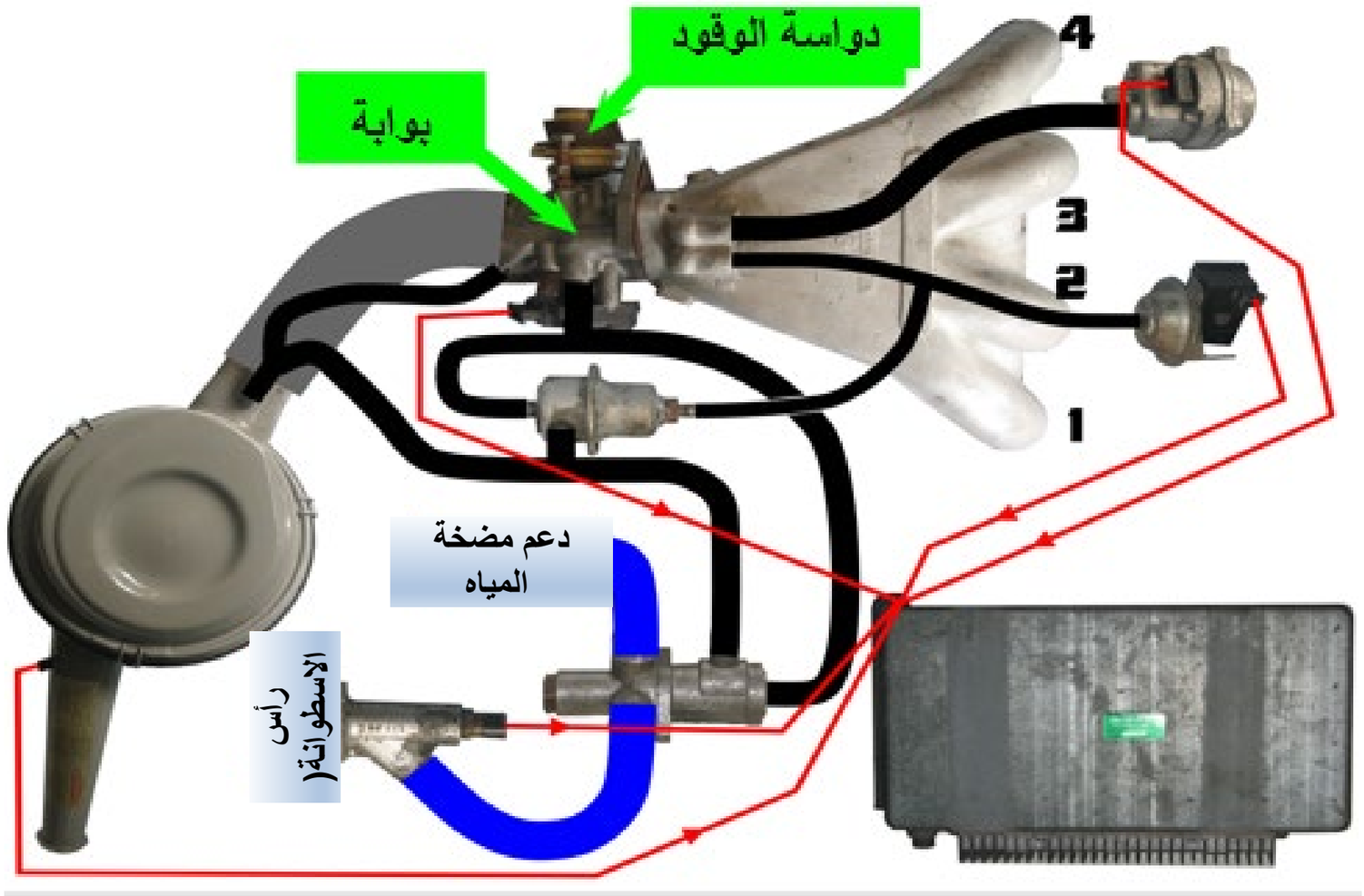


1-دائرة الهواء

تتم تغذية الأسطوانات عن طريق الأنابيب 1 2 3 4 من أنبوب السحب.

- يتم التحكم في مدخل الهواء الرئيسي عن طريق فتح صمام الموجود عند مدخل الأنبوب عبر الدواسة.

- يتم إعطاء المعلومات الأساسية الثانية بواسطة مستشعر الضغط الذي يحول مؤشر الضغط المطلق الموجود في مجمع السحب إلى إشارة كهربائية. بالنسبة لسرعة محرك معينة ، ينخفض ضغط السحب عند إغلاق الخانق ، ويزيد بخلاف ذلك

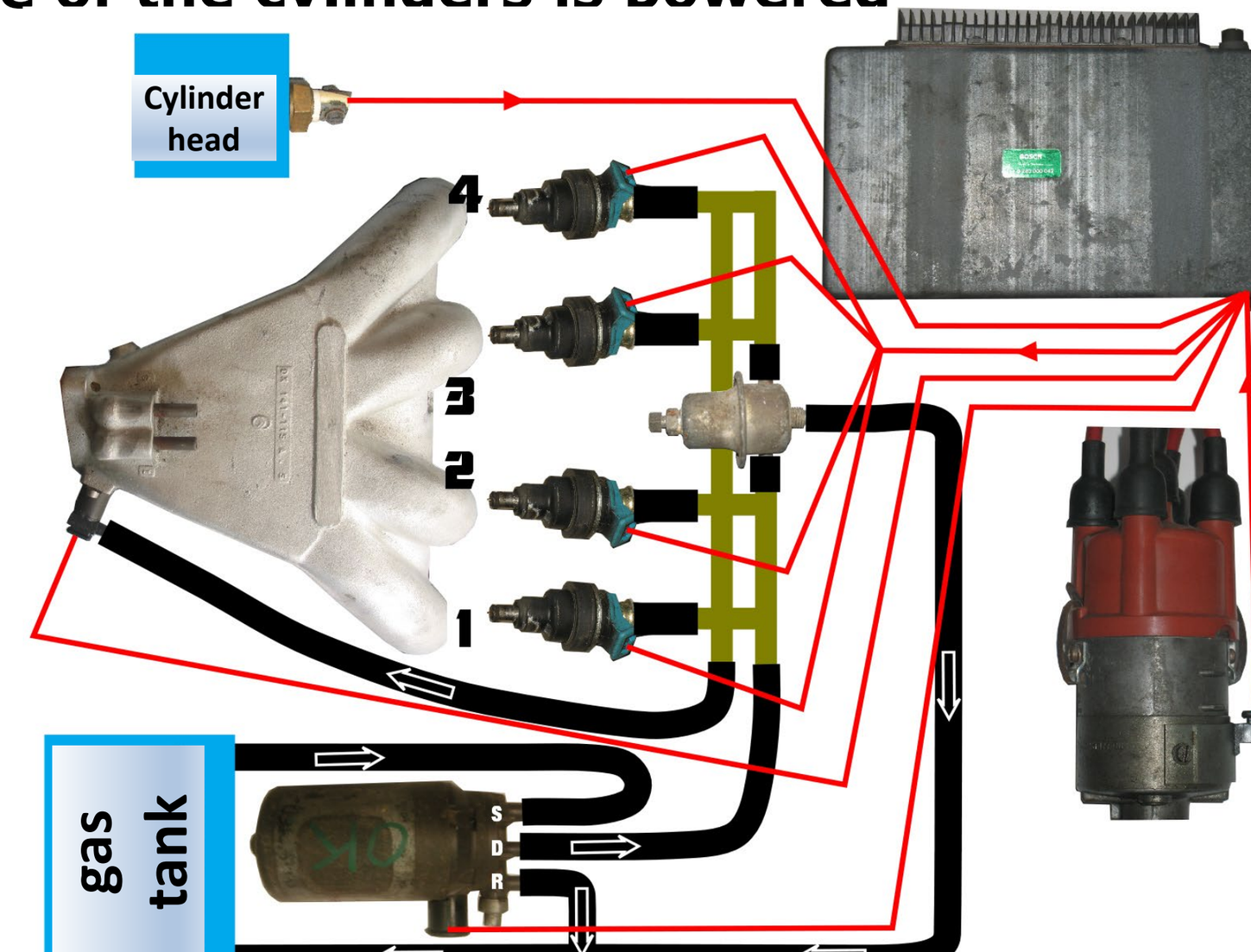


2-Fuel System

The cylinders are fed by means of 4 injectors attached to the intake pipes, which inject behind the intake valve. The injection pressure is regulated at 2 bar. When cold, a fifth injector supercharges fuel into the tubing.

The injectors are fed two by two (1/3 and 4/2). When a group of injectors receives a pulse, one of the cylinders is powered

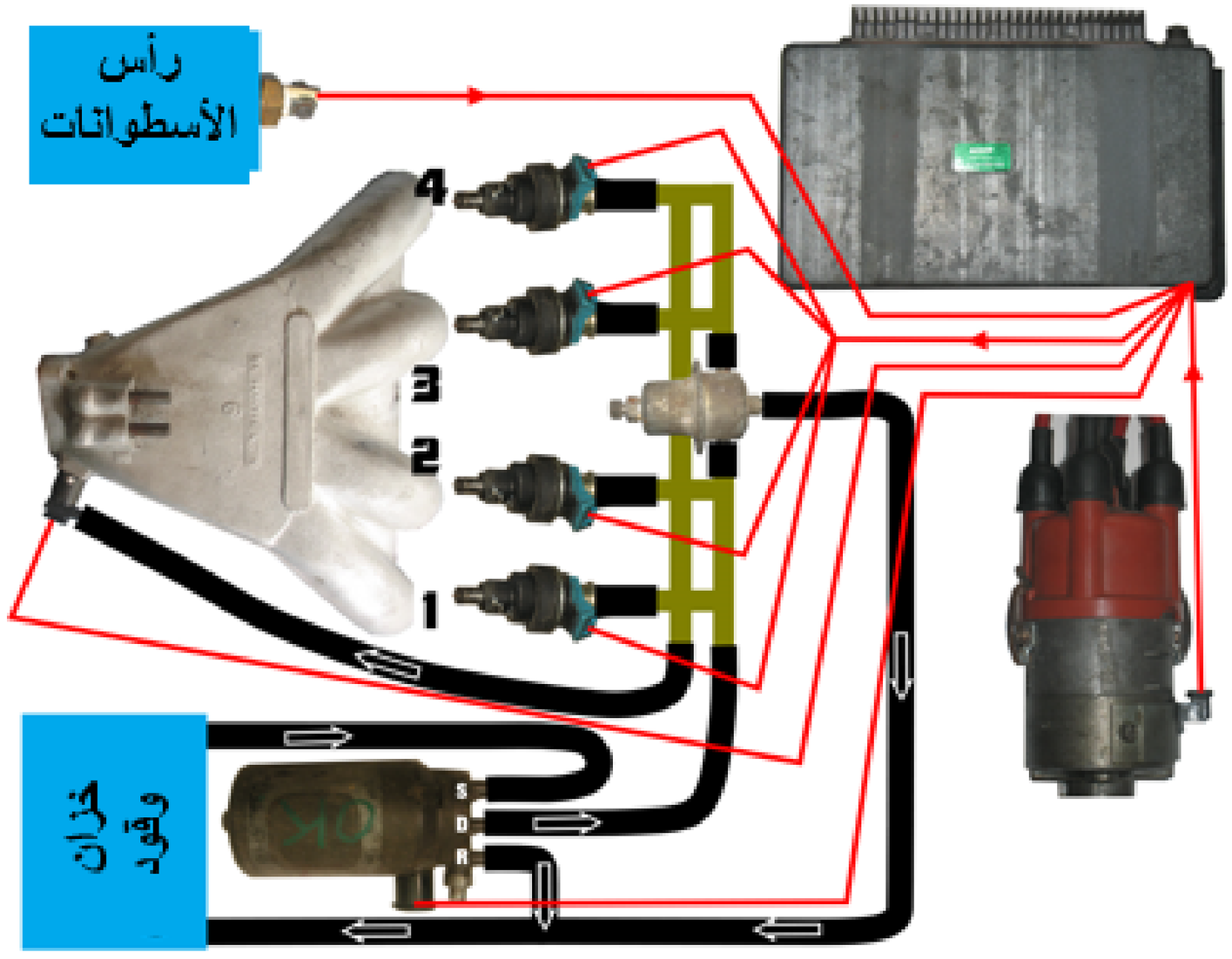
-The calculator
On the one hand, the igniter receives a current sent by two contacts, mounted in the igniter and controlled by the igniter shaft. It is therefore "informed" about the position of the moving parts and the speed of rotation of the engine, since the igniter is driven by the camshaft.



2-دائرة الوقود

تتم تغذية الاسطوانات عن طريق 4 محاقن ملحقة بأنابيب السحب والتي يتم حقنها خلف صمام السحب.
يتم تنظيم ضغط الحقن عند 2 بار. عند البرد ، يشحن حاقن خامس الوقود في المشعب.
يتم توفير الحاقنات اثنين في اثنين (1/3 و 4/2). عندما تتلقى مجموعة من المحاقنات نبضًا ، يتم تنشيط إحدى الأسطوانات

يستقبل الكمبيوتر الإلكتروني ، من ناحية ، تيارًا يتم إرساله من خلال جهتي اتصال ، مثبتتين في المشعل ويتم التحكم فيهما بواسطة عمود الأخير. لذلك "يتم إطلاعه" على موضع الأجزاء المتحركة وسرعة دوران المحرك ، حيث يتم تشغيل المشعل بواسطة عمود الكامات.



University of M'sila-----Faculty: ST------Module:Internal combustion engines -Master 2 -Energetics 2025/2026



Pilot Valve



Throttle axlis contactor



Additional Air Control



Injector



Cold Start Injector



Full-load switcher



Fuel pump



Ignition Injection



Air Tp° Probe



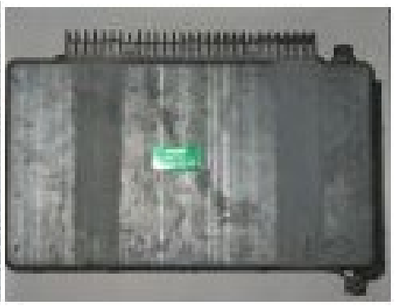
Fuel pressure regulator



Thermot contact



Water probe Tp°



Calculator

Cold engine: It needs more energy, to get it you need:

- A richer mixture, this is the role of the temperature probe placed in the water circuit which acts at all speeds when the T° is below 70°

- A greater amount of mixing is the role of the additional air control.

Engine brake: The throttle is closed, the accelerator pedal is released.

- If the engine speed is less than 1800 rpm and will increase (steep descent for example), the injector will work and will only be switched off at 1800 rpm.

University of M'sila-----Faculty: ST------Module:Internal combustion engines -Master 2 -Energetics 2025/2026



مضخة الوقود



محول كامل التحميل



حاقن البدء البارد



الحاقن



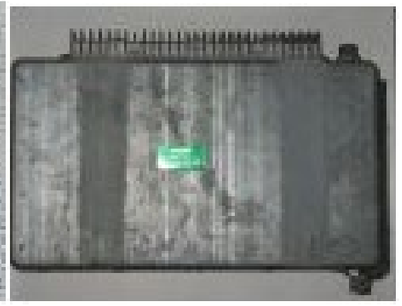
تحكم إضافي في الهواء



قواطع محور الخانق



صمام القائد



حاسوب



مسبار درجة حرارة الماء



الاتصال الحراري



منظم ضغط الوقود



مسبار درجة حرارة الهواء



حقن الاشتعال

المحرك البارد: يحتاج إلى مزيد من الطاقة ، لتحصل عليه تحتاج:

- خليط أكثر ثراءً ، هذا هو دور مسبار درجة الحرارة الموضوع في دائرة المياه والذي يعمل في جميع السرعات عندما تكون درجة الحرارة أقل من 70 درجة

- كمية أكبر من الخليط هو دور التحكم الإضافي في الهواء.

فرامل المحرك: يتم إغلاق دواسة الوقود ، ويتم تحرير دواسة الوقود.

- إذا كانت سرعة المحرك أقل من 1800 دورة في الدقيقة وستزداد (هبوط حاد على سبيل المثال) ، يعمل الحاقن وسيتم قطعه فقط عند 1800 دورة في الدقيقة

2.2 D-JETRONIC

THE MAIN ELEMENTS AND THEIR ROLES.

The calculator:

Its function is to manage all the information received from the various sensors and supply the engine with the right amount of fuel required according to the load at which it is used.

The Air Pressure Sensor:

Together with the ECU, it is the main element of the injection. Its role is to continuously measure the absolute pressure in the intake manifold, and to adjust the injection time according to this criterion. It transforms pressure variations into electrical signals sent to the control unit.



2.2 D-JETRONIC العناصر الرئيسية وأدوارها.

الحاسوب

وتتمثل مهمتها في إدارة جميع المعلومات الواردة من أجهزة الاستشعار المختلفة وتزويد المحرك بالكمية المناسبة من الوقود المطلوب وفقا للحمل الذي يتم استخدامه فيه.

مستشعر ضغط الهواء:



جنبا إلى جنب مع وحدة التحكم الإلكترونية ، هو العنصر الرئيسي للحقن. يتمثل دورها في القياس المستمر للضغط المطلق في مشعب السحب ، وضبط وقت الحقن وفقا لهذا المعيار. يحول تغيرات الضغط إلى إشارات كهربائية مرسلة إلى وحدة التحكم.

Triggering contacts

They have three functions:

– the first, to inform the ECU that the engine has been started,

– the second of the crankshaft's angular velocity (its rotation)

–the third, the successive closing and opening indicate to the ECU which pair of injectors is to be powered, (1/3 or 4/2).



The Water Temperature Sensor

It indicates the temperature of the cylinder head coolant. Based on this information, the ECU increases or decreases the opening time of the injectors (cold enrichment, hot depletion).



تشغيل جهات الاتصال



لديهم ثلاث وظائف:

- الأول ، لإبلاغ وحدة التحكم الإلكترونية بأن المحرك قد بدأ ،
- السرعة الزاوية الثانية للعمود المرفقي (دورانه)
-الثالث ، يشير الإغلاق والفتح المتتاليان إلى وحدة التحكم الإلكترونية أي زوج من الحاقنات سيتم تشغيله ، (1/3 أو 4/2).



مستشعر درجة حرارة الماء

يشير إلى درجة حرارة سائل تبريد رأس الأسطوانة.

بناء على هذه المعلومات ، تزيد وحدة التحكم الإلكترونية أو تقلل من وقت فتح الحاقنات (التخصيب البارد ، النضوب الساخن).

The main injectors:

There are 4 of them, and they are electrically controlled by the ECU according to all the information sent by the elements already mentioned. The fuel is injected upstream of the intake valves. Their fuel flow rate is a function of the injector opening



The additional air control:

It's an extra inlet of air. Its flow rate is directly related to the temperature of the engine.
It consists of two adjoining bodies: an air part and a coolant part.
An air light, which is fully open in freezing weather, gradually closes as the engine heats up and closes completely when the engine reaches its maximum temperature. The additional air supply is then cut off.



الحاقنات الرئيسية :



هناك 4 منهم ، ويتم التحكم فيها كهربائيا بواسطة وحدة التحكم الإلكترونية وفقا لجميع المعلومات المرسلة من العناصر التي سبق ذكرها. يتم حقن الوقود في المنبع من صمامات السحب.
معدل تدفق الوقود الخاص بهم هو دالة لوقت فتح الحاقن من 2.5 مللي ثانية في وضع الخمول لمدة 1.5 لتر / ساعة إلى 9.7 مللي ثانية عند التحميل الكامل و 42 لتر / ساعة.

تحكم إضافي في الهواء :



إنه مدخل إضافي للهواء. يرتبط معدل التدفق مباشرة بدرجة حرارة المحرك.
يتكون من جسمين متجاورين: جزء هواء وجزء سائل تبريد.
يتم إغلاق ضوء الهواء ، الذي يفتح بالكامل في الطقس المتجمد ، تدريجيا مع ارتفاع درجة حرارة المحرك وإغلاقه تماما عندما يصل المحرك إلى أقصى درجة حرارة له. ثم يتم قطع إمدادات الهواء الإضافية.

2-2 K-jetronic system

The K-Jetronic Injection is a mechanical injection system with continuous injection.

K = Kontinuierlich = continuous

Its organization includes 3 functions

1. **Airflow Measurement:**

   The measurement of the air quantity is controlled by a probe plate installed in the air flow meter.

2. **Fuel Supply:**

An electric fuel pump discharges fuel to the Feeder-dispenser.

The role of the meter-distributor is to distribute the fuel between The different injectors:

2-2 نظام K-jetronic

حقن K-Jetronicهو نظام حقن ميكانيكي مع حقن مستمر.

K = Kontinuierlich = مستمر

يشمل تنظيمها 3 وظائف

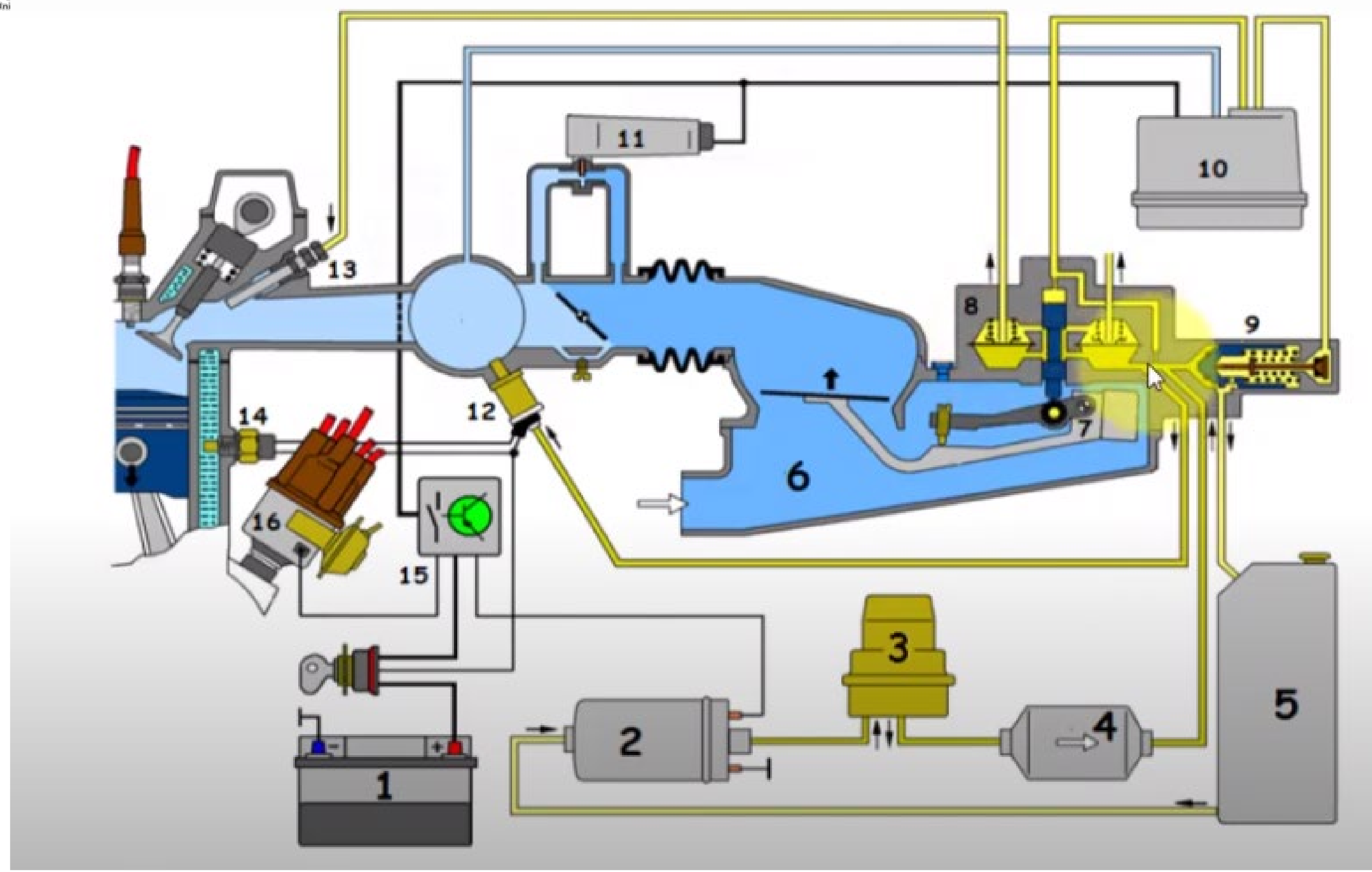
1. قياس تدفق الهواء:

يتم التحكم في قياس كمية الهواء بواسطة لوحة مسبار مثبتة في مقياس تدفق الهواء.

2. إمدادات الوقود:

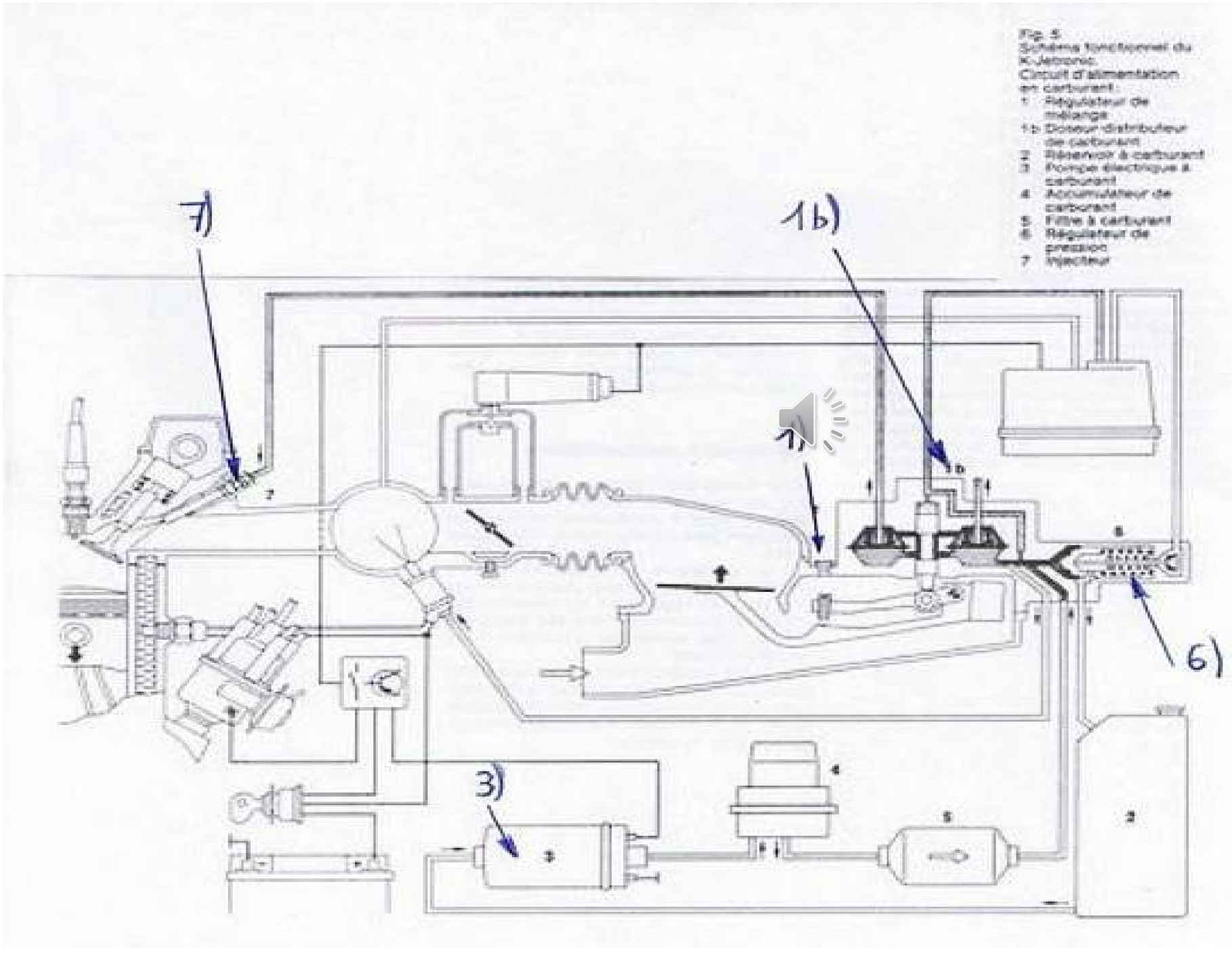
تقوم مضخة الوقود الكهربائية بتفريغ الوقود إلى موزع التغذية.

دور موزع العدادات هو توزيع الوقود بين الحاقنات المختلفة:

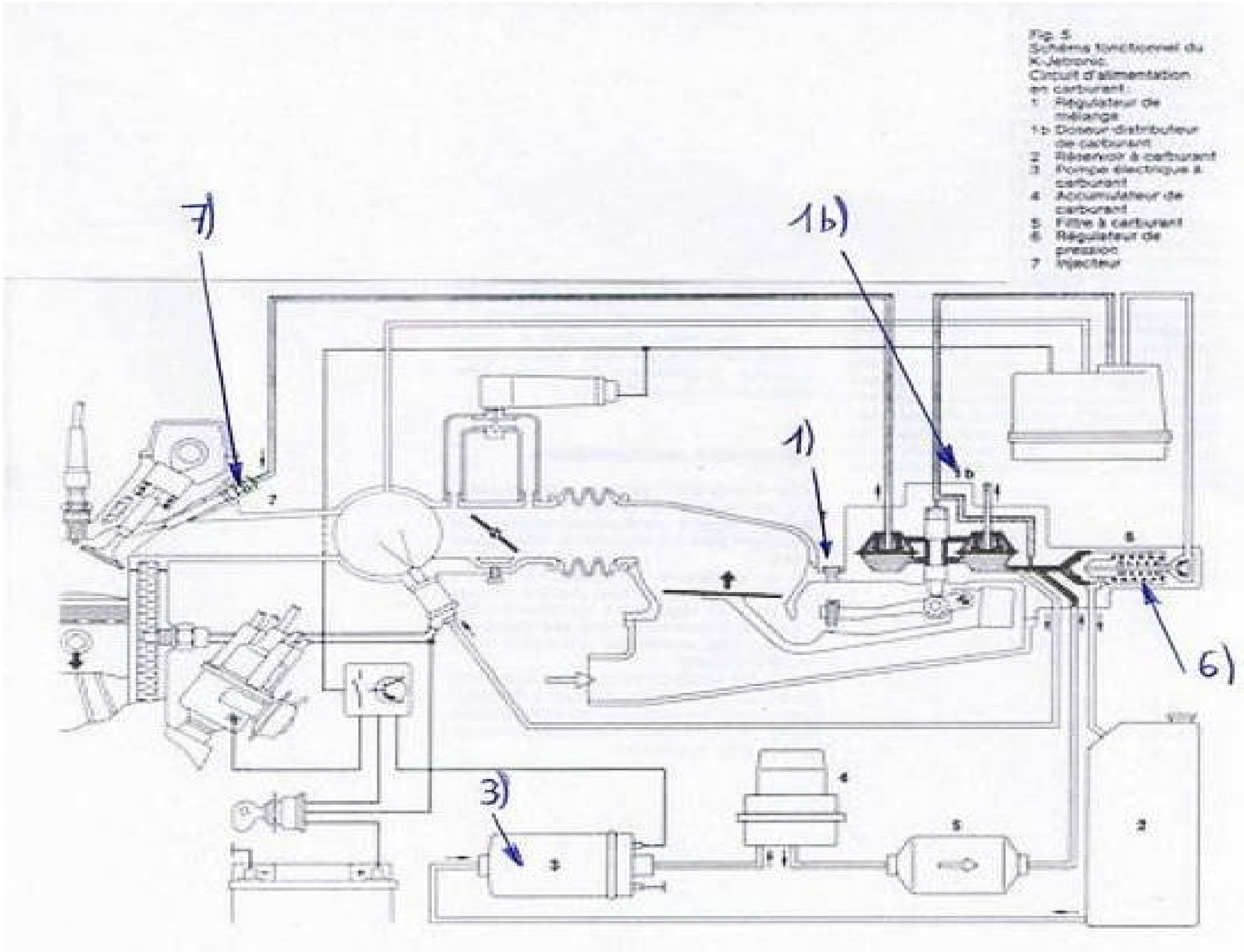

11
10
13
8
9
12
7
6
14
16
15
3
5
2
4
1

University of M'sila-----Faculty: ST------Module:Internal combustion engines -Master 2 -Energetics 2025/2026





1) CO richness adjustment screw.
2) 1b) Dispenser
3) 3) Electric fuel pump.
4) 6) Pressure regulator.
5) 7) Injector.



1) برغي تعديل ثراء ثاني أكسيد الكربون.
2) 1 ب) موزع
3) مضخة الوقود الكهربائية.
4) منظم الضغط.
5) حاقن.

Carburation:

The volume of air sucked in, depending on the position of the probe plate, is the essential element for fuel dosing. This dosage is determined by the air flow meter, which in turn controls the dispenser.
The air flow meter and the dispenser are the mixing regulator.

Operation.

The fuel pump draws the fuel into the tank and pushes it under pressure to the feeder-dispenser.

Then the fuel is sent to the injectors.

The injectors ensure continuous injection to the various intake manifolds.

The air-fuel mixture is then sucked in when the intake valves are opened.

الكربنة:

حجم الهواء الذي يتم امتصاصه ، اعتمادا على موضع لوحة المسبار ، هو العنصر الأساسي لجرعات الوقود. يتم تحديد هذه الجرعة بواسطة مقياس تدفق الهواء ، والذي بدوره يتحكم في الموزع.

مقياس تدفق الهواء والموزع هما منظم الخلط.

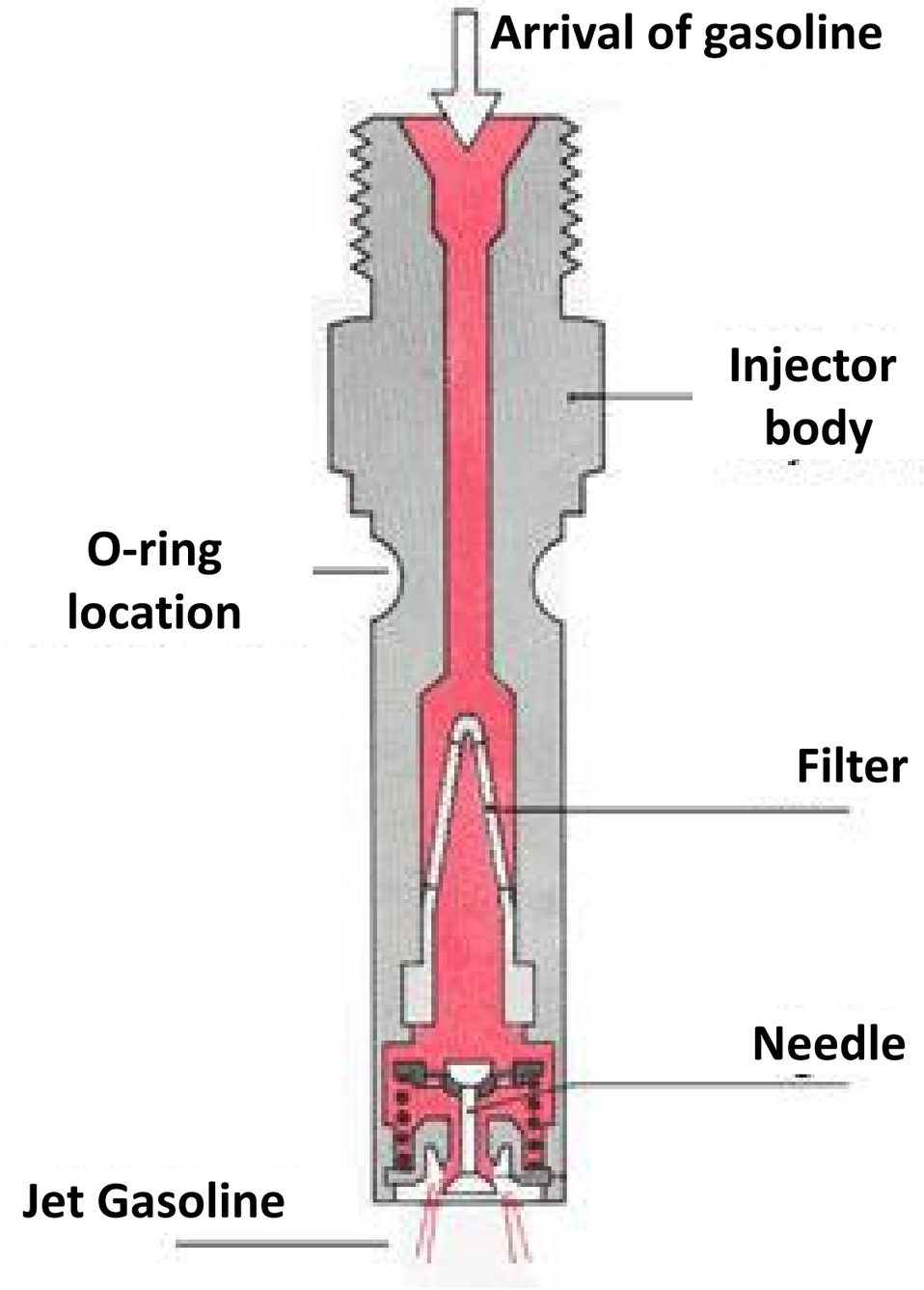
عملية.

تقوم مضخة الوقود بسحب الوقود إلى الخزان وتدفعه تحت الضغط إلى موزع التغذية.

ثم يتم إرسال الوقود إلى الحاقنات.

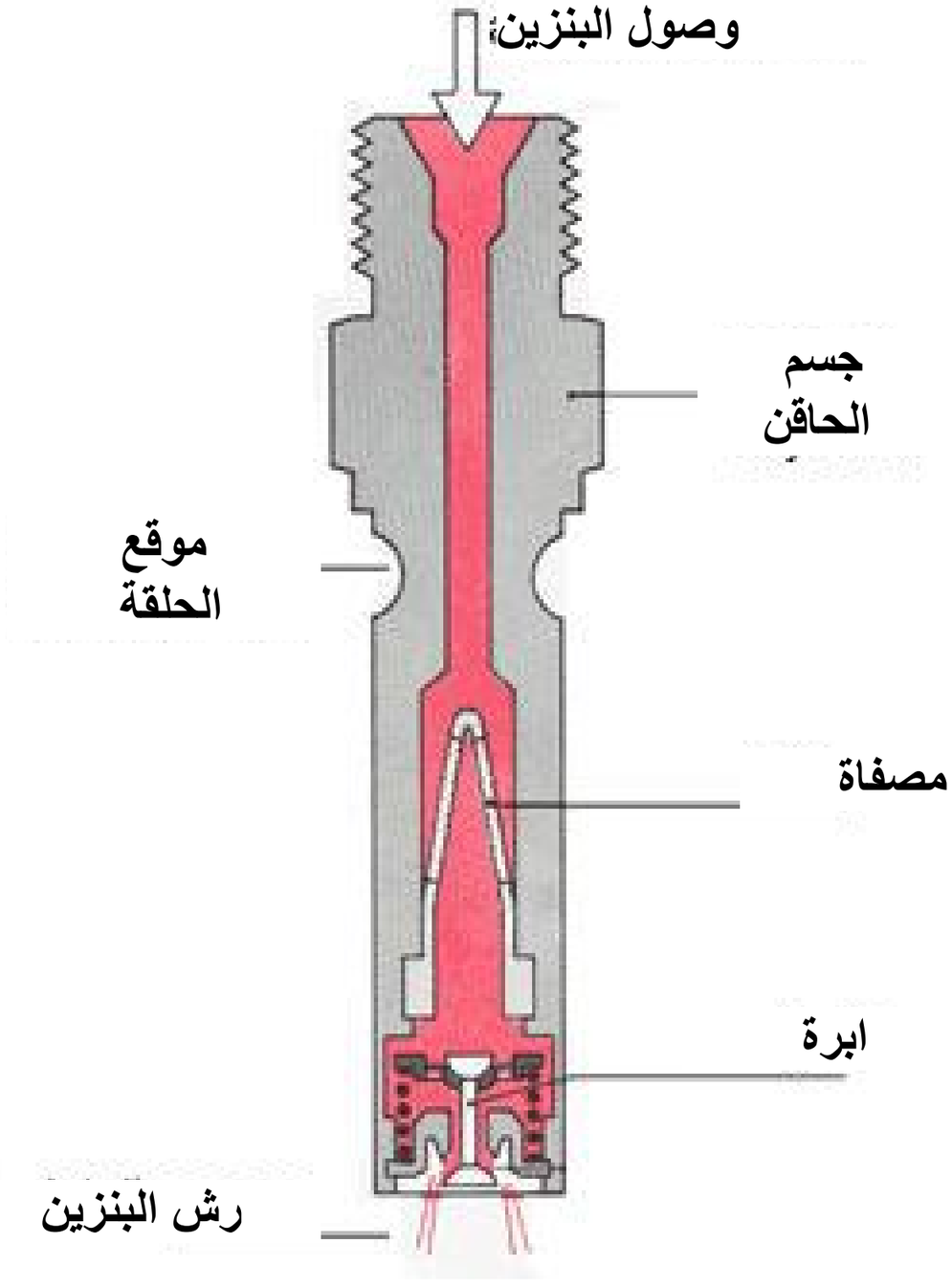
تضمن الحاقنات الحقن المستمر لمشعبات السحب المختلفة.

ثم يتم امتصاص خليط الهواء والوقود عند فتح صمامات السحب.

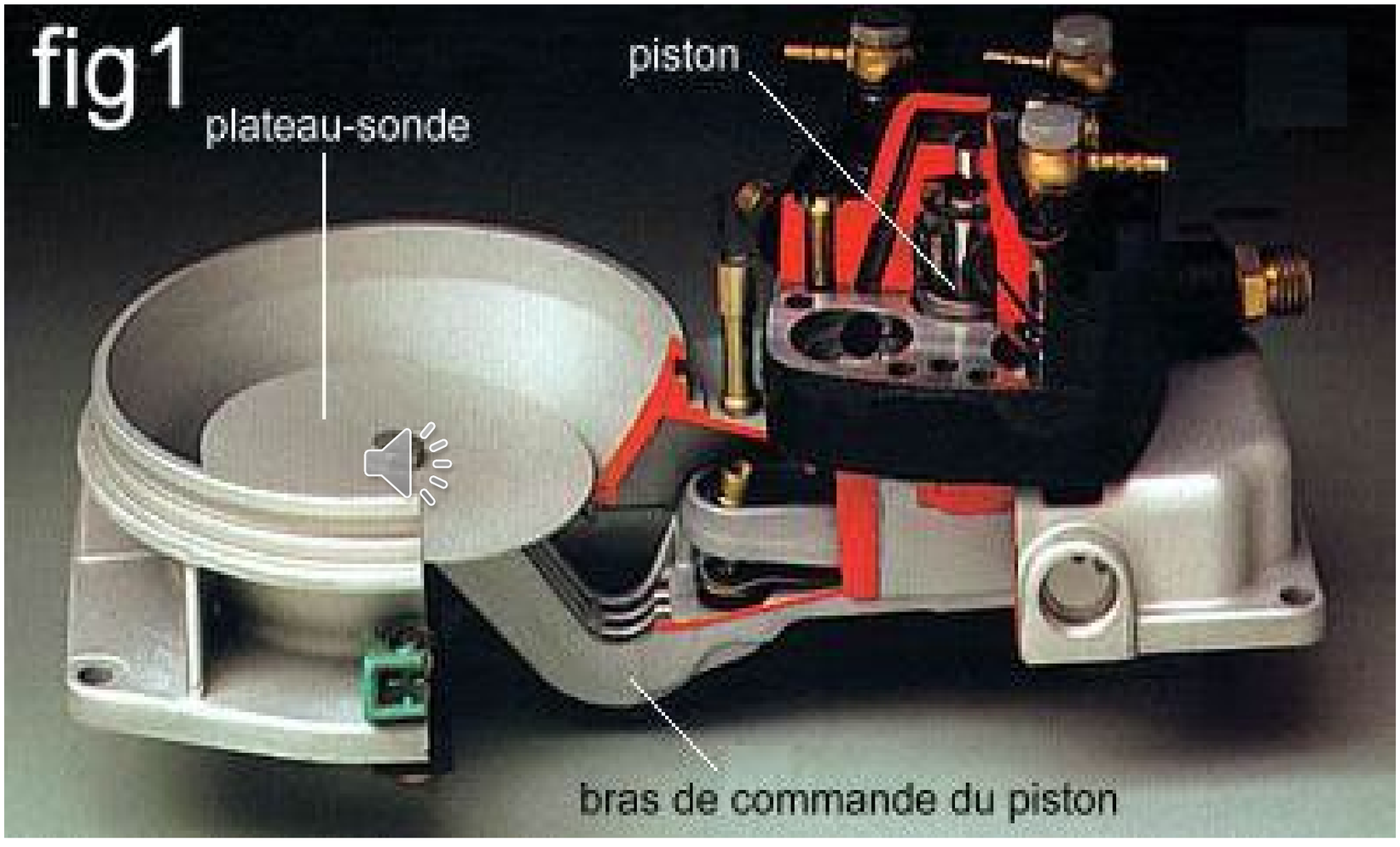


A needle is pushed by a spring, when the fuel pressure increases, the spring compresses, from a certain pressure (given by the manufacturer), the needle pushes the spring back and allows the fuel to pass through which will be sprayed in the form of a jet.

يتم دفع الإبرة بواسطة زنبرك ، عندما يزداد ضغط الوقود ، يضغط الزنبرك ، من ضغط معين (تقدمه الشركة المصنعة) ، تدفع الإبرة الزنبرك للخلف وتسمح للوقود بالمرور من خلاله سيتم رشه على شكل نفاثة.

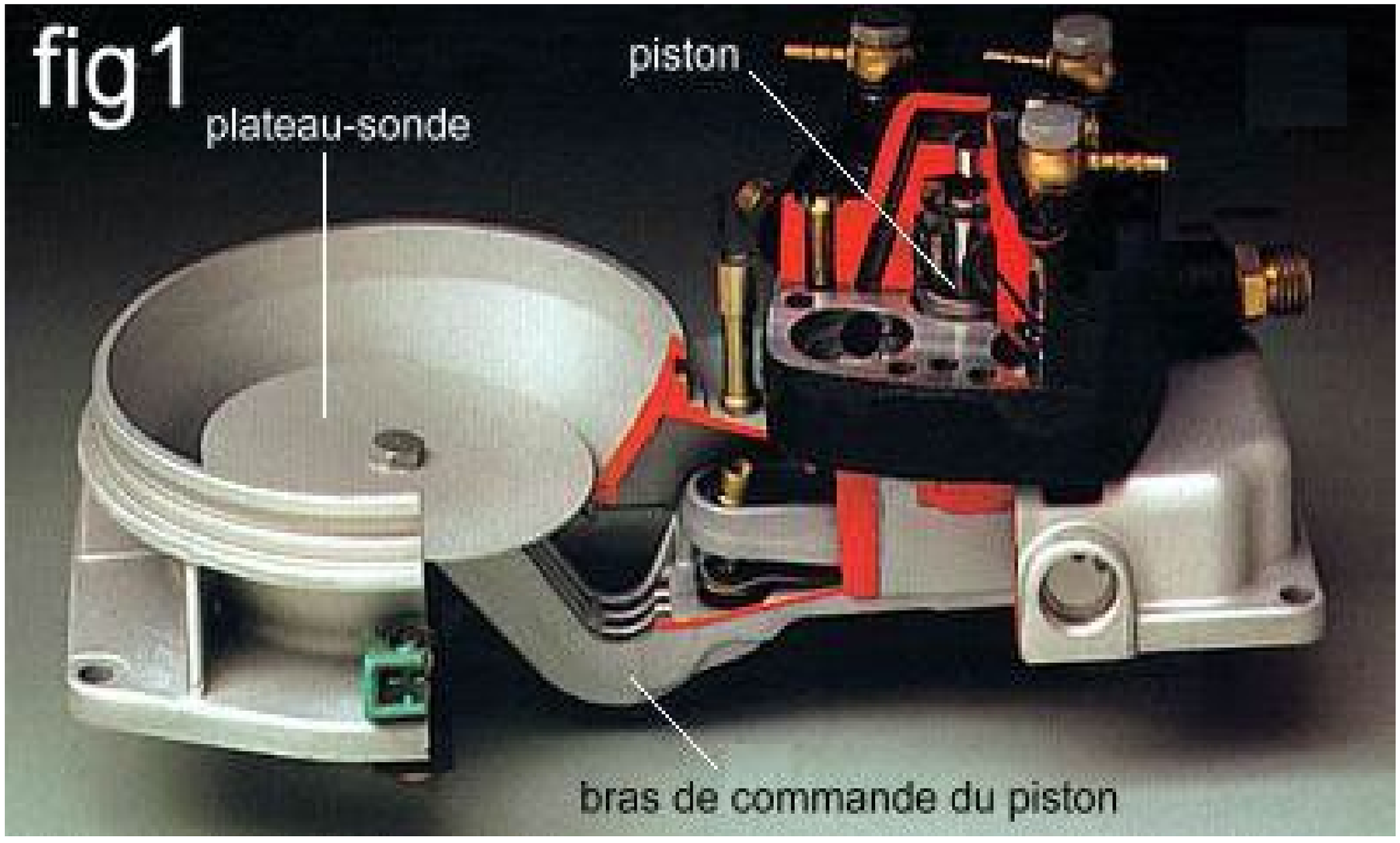


Feeder-dispenser Fig1:



The fuel is delivered to the injectors through the manifolds coming from the feeder-dispenser. This doses the fuel according to the amount of air admitted through the flow meter

موزع التغذية الشكل 1:



يتم تسليم الوقود إلى الحاقنات من خلال المشعبات القادمة من موزع التغذية. هذه جرعات الوقود وفقا لكمية الهواء التي يتم قبولها من خلال مقياس التدفق

The Flow Meter

It consists of a disc placed in the air passage, it is fixed on a movable arm and moves according to the volume of air admitted. The arm attached to it is swivelling, and acts on a drawer (piston) see fig2. This slides into a cylinder with calibrated slots (see fig3) (as many slots as there are cylinders to be fed)

fig2

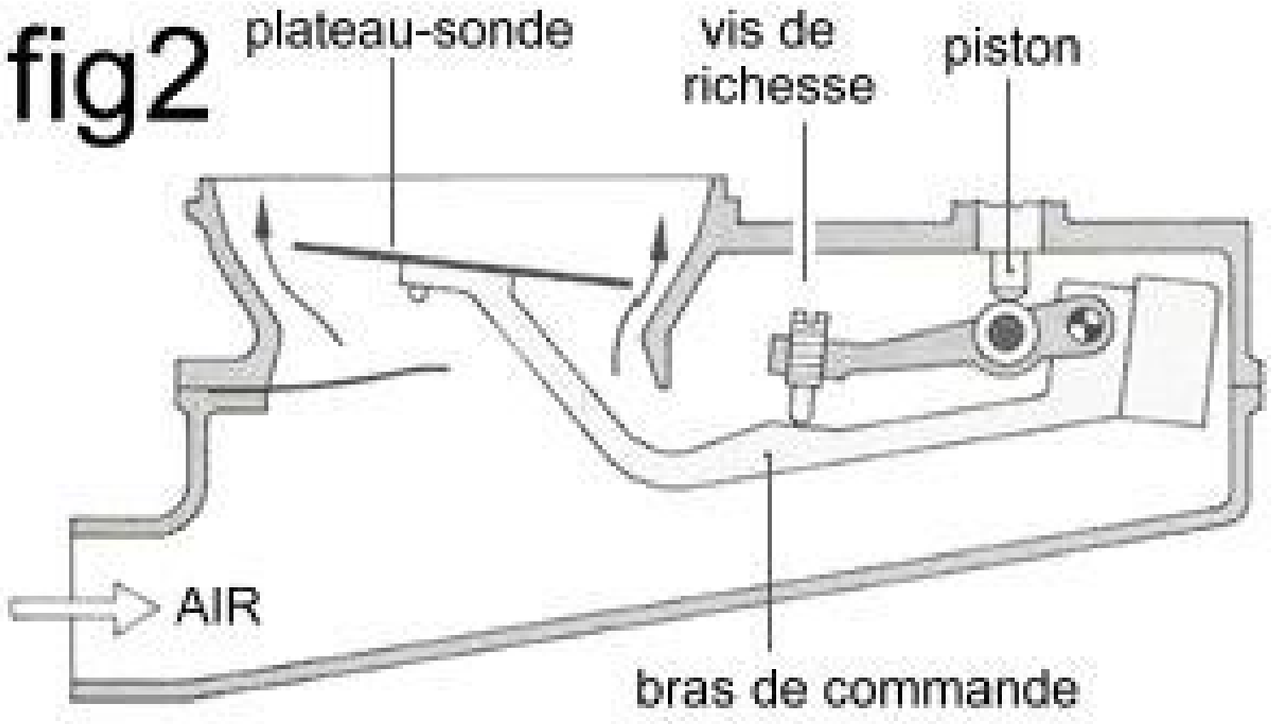




fig3

مقياس التدفق

يتكون من قرص يوضع في ممر الهواء ، ويتم تثبيته على ذراع متحرك ويتحرك وفقا لحجم الهواء المسموح به. الذراع المتصل به يدور ، ويعمل على درج (مكبس) انظر الشكل 2. ينزلق هذا إلى أسطوانة ذات فتحات معايرة (انظر الشكل 3) (العديد من الفتحات مثل الأسطوانات المراد تغذيتها)

fig2

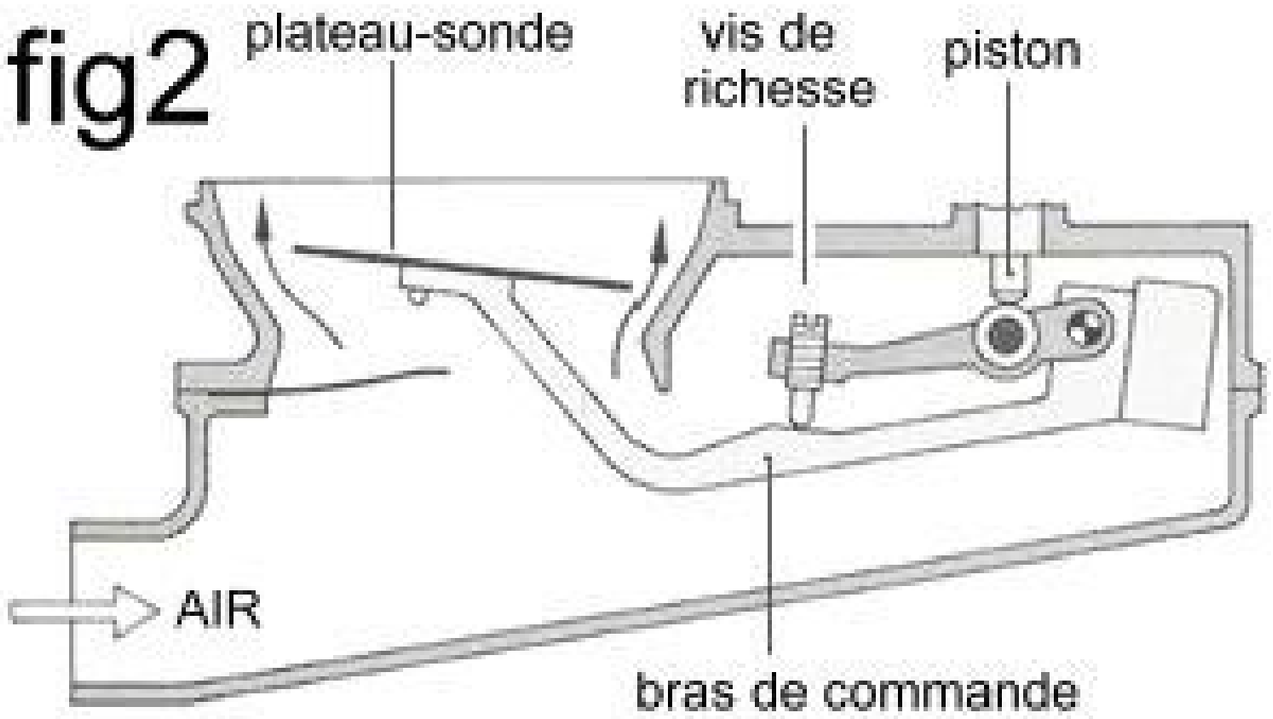


fig3



2-3 L-jetronic system

L-Jetronic injection is an electronically controlled injection system with intermittent injection

The purpose of this injection is to allocate to each injector the exact amount of fuel needed for the engine to function properly. In addition, this type of injection adapts almost instantaneously to the different conditions of the engine. (e.g. Cold engine – fully loaded – decelerating etc. Etc.).

To know the different conditions of the motor, different sensors inform the electronic box.
In turn, the electronic box sends information about the amount of fuel to be injected.

2-3نظام -Lجيترونيك

حقن L-Jetronicهو نظام حقن يتم التحكم فيه إلكترونيا مع حقن متقطع

الغرض من هذا الحقن هو تخصيص الكمية الدقيقة من الوقود اللازمة للمحرك ليعمل بشكل صحيح لكل حاقن. بالإضافة إلى ذلك ، يتكيف هذا النوع من الحقن على الفور تقريبا مع الظروف المختلفة للمحرك. (على سبيل المثال ، محرك بارد ـ محمل بالكامل ـ تباطؤ ، إلخ. الخ.).

لمعرفة الظروف المختلفة للمحرك ، تقوم أجهزة استشعار مختلفة بإبلاغ الصندوق الإلكتروني. بدوره ، يرسل الصندوق الإلكتروني معلومات حول كمية الوقود المراد حقنها.

Principle.

The fuel pump draws the fuel into the tank and pushes it under pressure back to the injection rail.

The L-Jetronic basically consists of these different elements:

1. The suction system:

It supplies the engine with the necessary amount of air. It includes the air filter, intake manifold, throttle.

2. Probes:

The probes measure the parameters of the engine. The essential parameter is the volume of air drawn in by the engine which is measured by the air flow meter.
Other sensors measure throttle position, engine temperature, air temperature, engine speed, fuel injection volume, additional air volume, additional volume at start-up, and mains voltage.

In this system it is possible to set idle and CO.

مبدأ.

تقوم مضخة الوقود بسحب الوقود إلى الخزان وتدفعه تحت الضغط مرة أخرى إلى سكة الحقن.

يتكون L-Jetronic بشكل أساسي من هذه العناصر المختلفة:

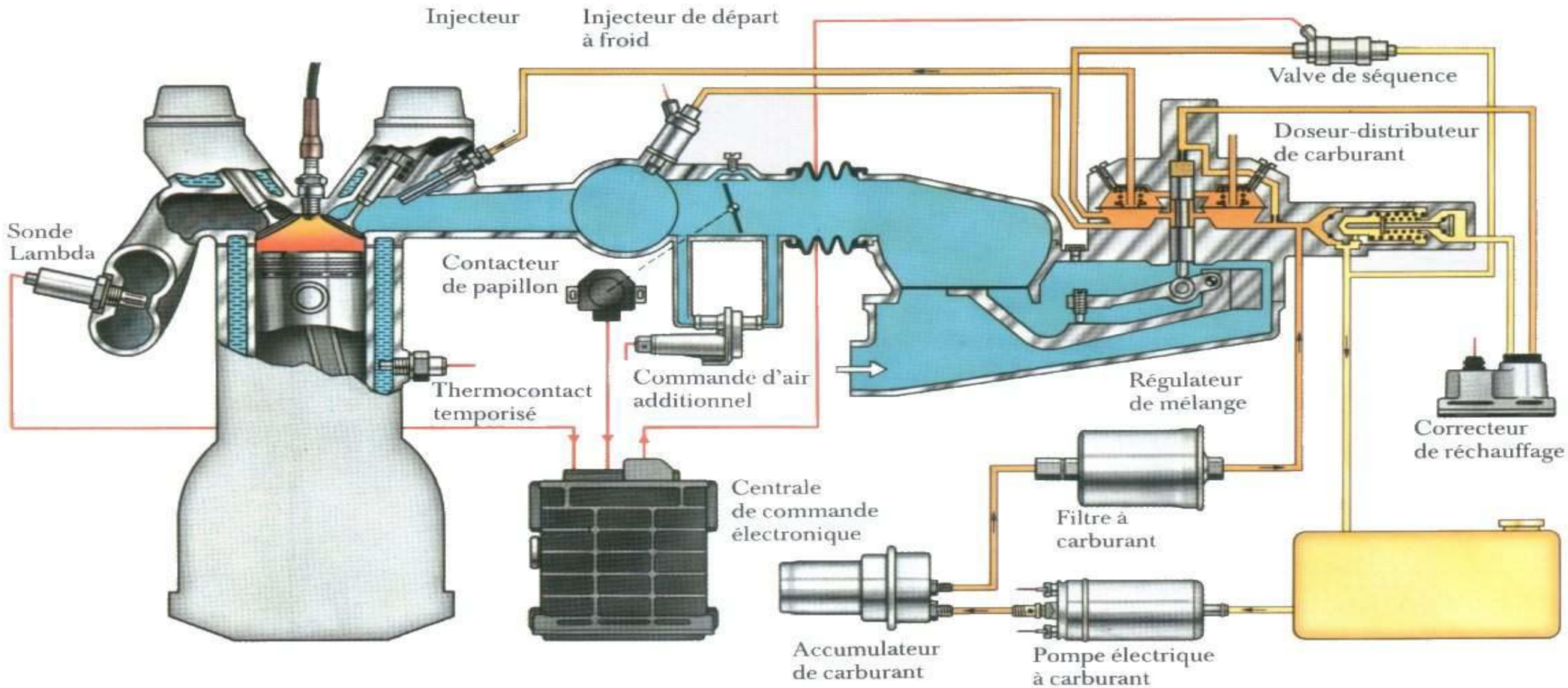
1.نظام الشفط:

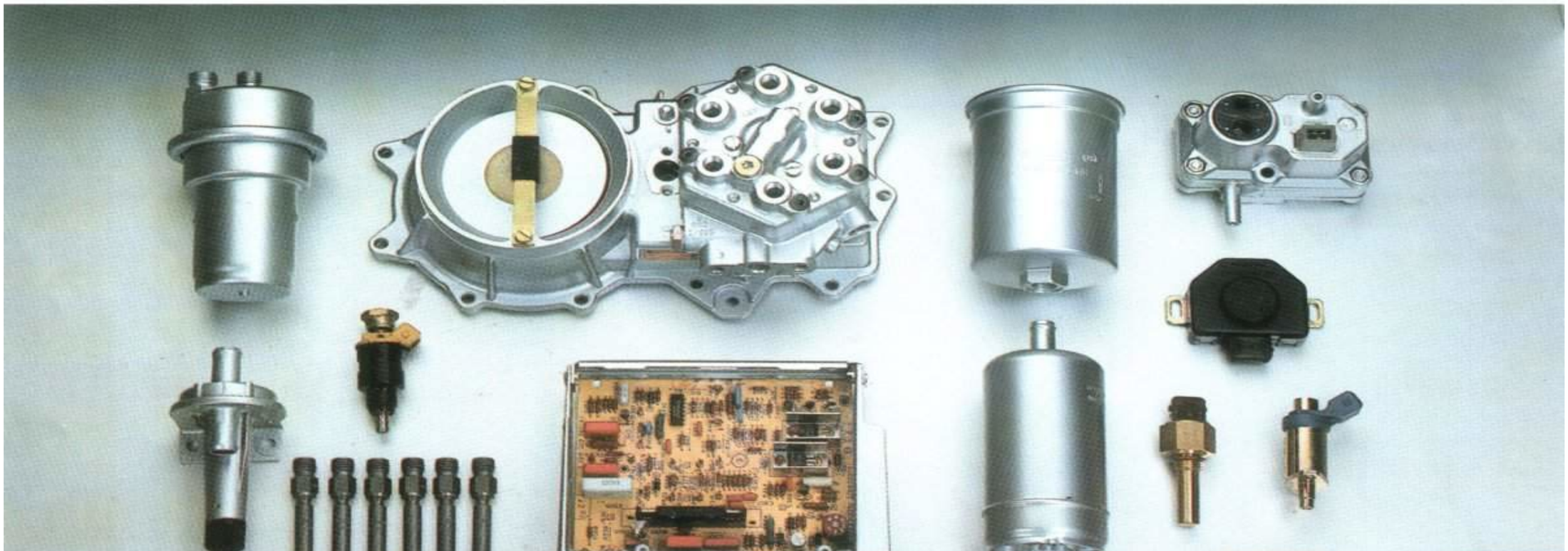
يزود المحرك بالكمية اللازمة من الهواء. ويشمل فلتر الهواء ، مشعب السحب ، دواسة الوقود.

2.المسابر:

تقيس المجسات معلمات المحرك. المعلمة الأساسية هي حجم الهواء المسحوب بواسطة المحرك والذي يتم قياسه بواسطة مقياس تدفق الهواء.
تقيس المستشعرات الأخرى موضع الخانق ودرجة حرارة المحرك ودرجة حرارة الهواء وسرعة المحرك وحجم حقن الوقود وحجم الهواء الإضافي والحجم الإضافي عند بدء التشغيل وجهد التيار الكهربائي.

في هذا النظام ، من الممكن ضبط الخمول وشركاه.


Injecteur
Injecteur de départ à froid
Valve de séquence
Doseur-distributeur de carburant
Sonde Lambda
Contacteur de papillon
Thermocontact temporisé
Commande d'air additionnel
Régulateur de mélange
Correcteur de réchauffage
Centrale de commande électronique
Filtre à carburant
Accumulateur de carburant
Pompe électrique à carburant



CHAPTER III: MODELING OF COMBUSTION IN ENGINES

3.1-INTRODUCTION

Different types of mathematical models are used to simulate the operation of internal combustion engines, whether spark-ignition or compression-ignition.

These models can be grouped into two main categories:

- Order models

- Physical models.

Physical models reproduce the phenomena that occur produced in engines from the point of view of either fluid mechanics or thermodynamics.

In this category of models, a distinction must be made between, on the one hand,

Dimensional models based on the Navier-Stokes equations and the energy conservation equation in differential form in space;

Thermodynamic models based on the first two laws of thermodynamics.

3.1-مقدمة

تستخدم أنواع مختلفة من النماذج الرياضية لمحاكاة تشغيل محركات الاحتراق الداخلي ، سواء كانت اشتعال شرارة أو اشتعال ضغط.

يمكن تجميع هذه النماذج في فئتين رئيسيتين:

نماذج الطلب

النماذج المادية. النماذج الفيزيائية تعيد إنتاج الظواهر التي تحدث يتم إنتاجها في المحركات من وجهة نظر ميكانيكا الموائع أو الديناميكا الحراريه.

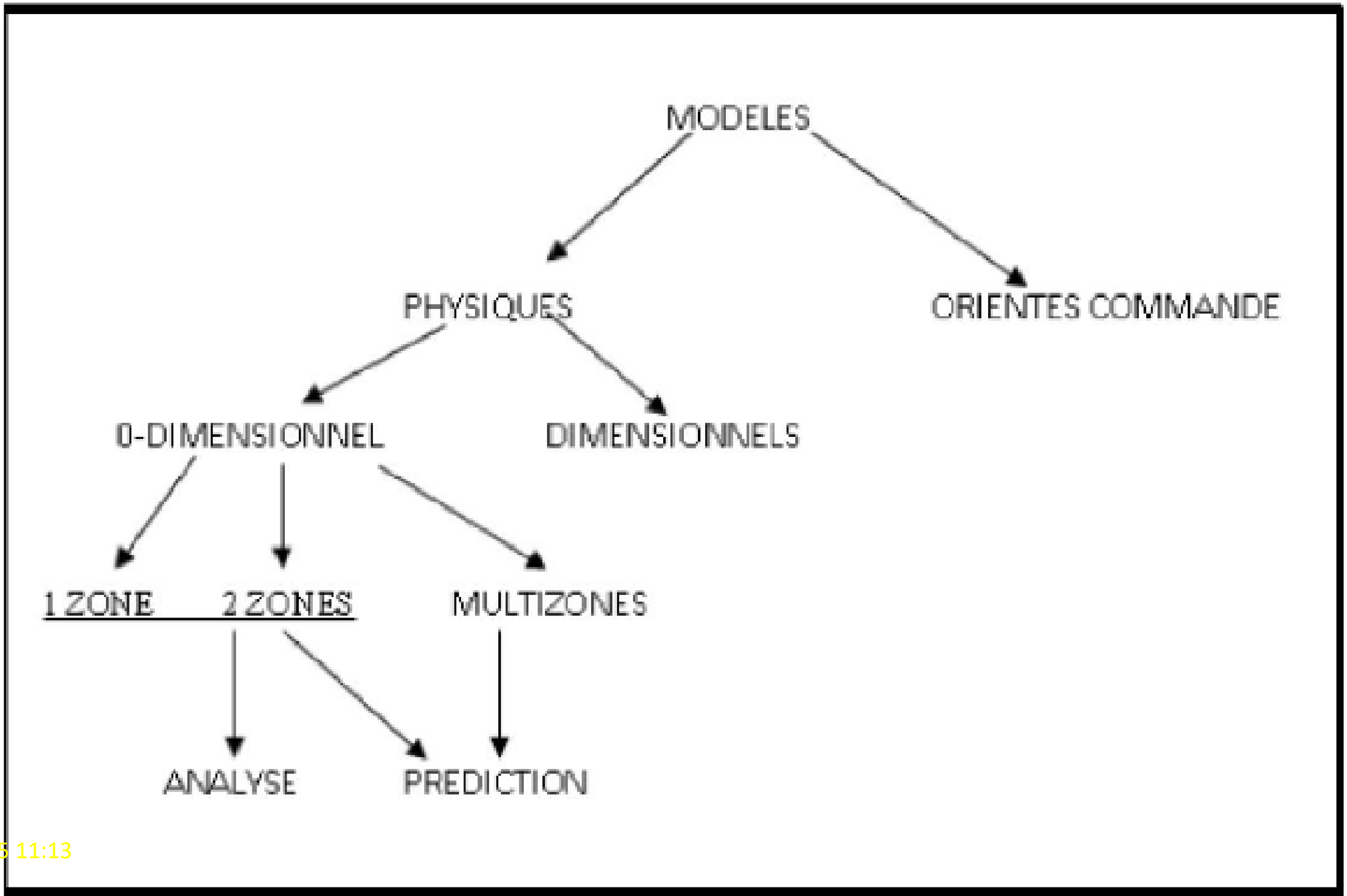
في هذه الفئة من النماذج ، يجب التمييز بين ، من ناحية ،

نماذج الأبعاد القائمة على معادلات نافييه ستوكس ومعادلة الحفاظ على الطاقة في thermodynamic

Thermodynamic models are also called zero-dimensional models because only time is considered as an independent variable. The basis of zero-dimensional modeling lies in writing mass and energy conservation equations, for which the inflow and outflow rates, thermodynamic properties, and heat transfers must be provided. The overall structure of the solution, including specific models and submodels, is illustrated in the following figure.

تُسمى النماذج الديناميكية الحرارية أيضًا بالنماذج صفرية الأبعاد، لأن الزمن وحده هو المتغير المستقل. يكمن أساس النمذجة صفرية الأبعاد في كتابة معادلات حفظ الكتلة والطاقة، والتي يجب أن تتضمن معدلات التدفق الداخل والخارج، والخصائص الديناميكية الحرارية، وانتقال الحرارة. يوضح الشكل التالي البنية العامة للحل، بما في ذلك النماذج الفرعية والنماذج المحددة.

CHAPTER III: MODELING OF COMBUSTION IN ENGINES



3-2 Modèle thermodynamique 1 zone

This approach assumes that the gas system in the combustion chamber is homogeneous, therefore the temperature and pressure of the gases are uniform.

Energy balance for the gas system:

The gas mixture in the cylinder exchanges with the external environment:

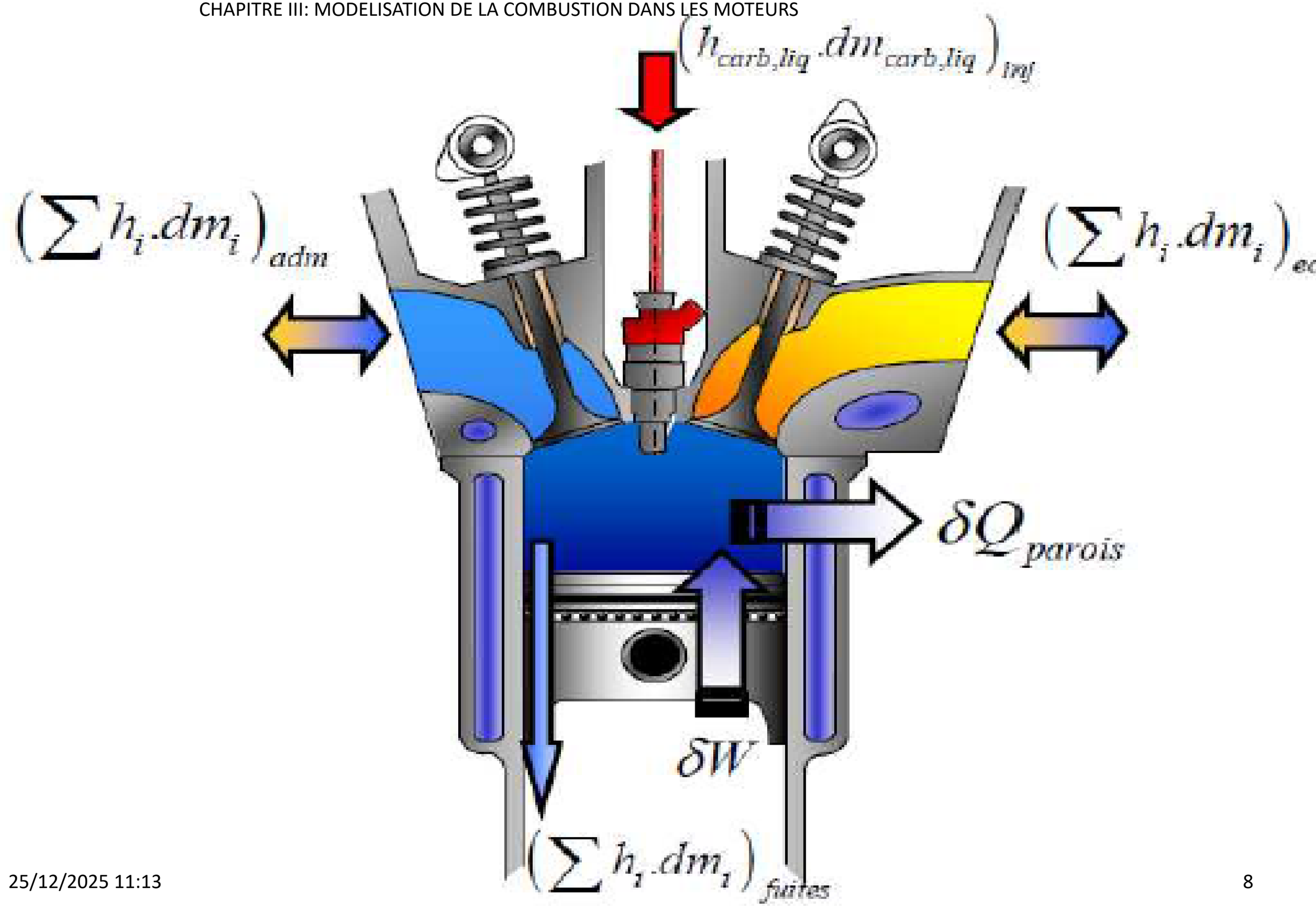
- **Heat transfers to the walls** $\mathrm{d}Q_{parois}$ **,**
- **Work performed by the piston on the system** $\mathrm{d}W$ **,**
- **The enthalpy change induced by the various mass transfer mechanisms such as liquid fuel injection.**

$$(\mathrm{h}_{carb,l};\ dm_{carb,l})_{inj}$$

3-2: 1 zone thermodynamic model

- **Segment leaks** $\left(\sum h_i.dm_i\right)_{fuites}$
- **Mass transfers to valves** $\left(\sum h_j.dm_j\right)_{adm}$ et $\left(\sum h_j.dm_j\right)_{ech}$

These latter terms will be grouped together in the term $:\left(\sum h_j.dm_j\right)$


$\left(h_{carb,liq}.dm_{carb,liq}\right)_{inj}$
$\left(\sum h_i.dm_i\right)_{adm}$
$\left(\sum h_i.dm_i\right)_{ec}$
δQ_{parois}
δW
$\left(\sum h_i.dm_i\right)_{fuites}$

Neglecting potential energy and kinetic energy, the first law of thermodynamics applied to this system allows us to write

$$dU = \delta W + \delta Q_p + \sum h_j . dm_j$$

With dU the internal energy variation

The internal energy of a gas mixture can be calculated from the internal energies of each species constituting the mixture:

$$U = \sum m_k . u_k = m \sum Y_k . u_k$$

Avec m_k , Y_k et u_k respectively the mass, the mass fraction and the internal energy per unit mass of the species k and m is the mass of the mixture

The internal energy mass and the heat capacity at constant volume can be estimated from the formulas:

$$u = \sum Y_k . u_k \quad \text{Et} \quad c_v = \sum Y_k . c_{v,k}$$

The internal energy variation can be written as

$$dU = u.dm + m\sum dY_k . u_k + m.c_v . dT$$

$$dU \equiv u.dm + m\sum dY_k.u_k + m.c_v.dT$$

$m_{cv}\,dT$, the term corresponding to the variation in energy induced by the evolution of temperature,

u.dm **, the term representing the change in energy due to the addition or removal of mass in the area,**

$m\sum dY_k.u_k$ **elated to the variation in energy induced by the evolution of the composition of the mixture.**

The work done by the piston to the gas system is expressed

$$dW = -PdV$$

With

P , the pressure in the area and therefore the cylinder pressure with the assumption of uniform pressure,

dV , the variation in volume of the area,

Heat losses at the walls are the sum of the heat losses induced by convection and radiation phenomena

$$\delta Q_p = \delta Q_{p,convectif} + \delta Q_{p,rayonnement} \equiv dQ_p$$

the temperature variation of the system over time:

$$dT = \frac{1}{m.c_v}\left(-PdV + dQ_p + \sum h_j.dm_j - u.dm - m\sum dY_k.u_k\right)$$

The mixture is an ideal gas so the equation is: P.V = m.r.T

With

m , the total mass in the area,

r , the ideal gas constant of the mixture.

CHAPTER III: MODELING OF COMBUSTION IN ENGINES

$$dU = \delta W + \delta Q_p + \sum h_j.dm_j$$

$$dU = u.dm + m\sum dY_k.u_k + m.c_v.dT$$

$$\delta Q_p = \delta Q_{p,convectif} + \delta Q_{p,rayonnement} \equiv dQ_p$$

$$\boldsymbol{dW = -PdV}$$

$$dT = \frac{1}{m.c_v}\left(-PdV + dQ_p + \sum h_j.dm_j - u.dm - m\sum dY_k.u_k\right.$$

$$\boldsymbol{P.V = m.r.T}$$

3.3: 2 zones Thermodynamic Model

The concept of a two-zone thermodynamic model is used for:

The study of the combustion of spark-ignition engines.

In this case, the gas system will be divided into two subsystems.

- fresh gases (air + steam fuel)

- Flue gases that are the result of combustion or from any recycled gases (EGR)

This approach is also used in diesel combustion mainly for access to the thermodynamic quantities of the flue gases and mainly in the case of the modeling of species such as NOx or thermal COs.

CHAPTER III: MODELING OF COMBUSTION IN ENGINES

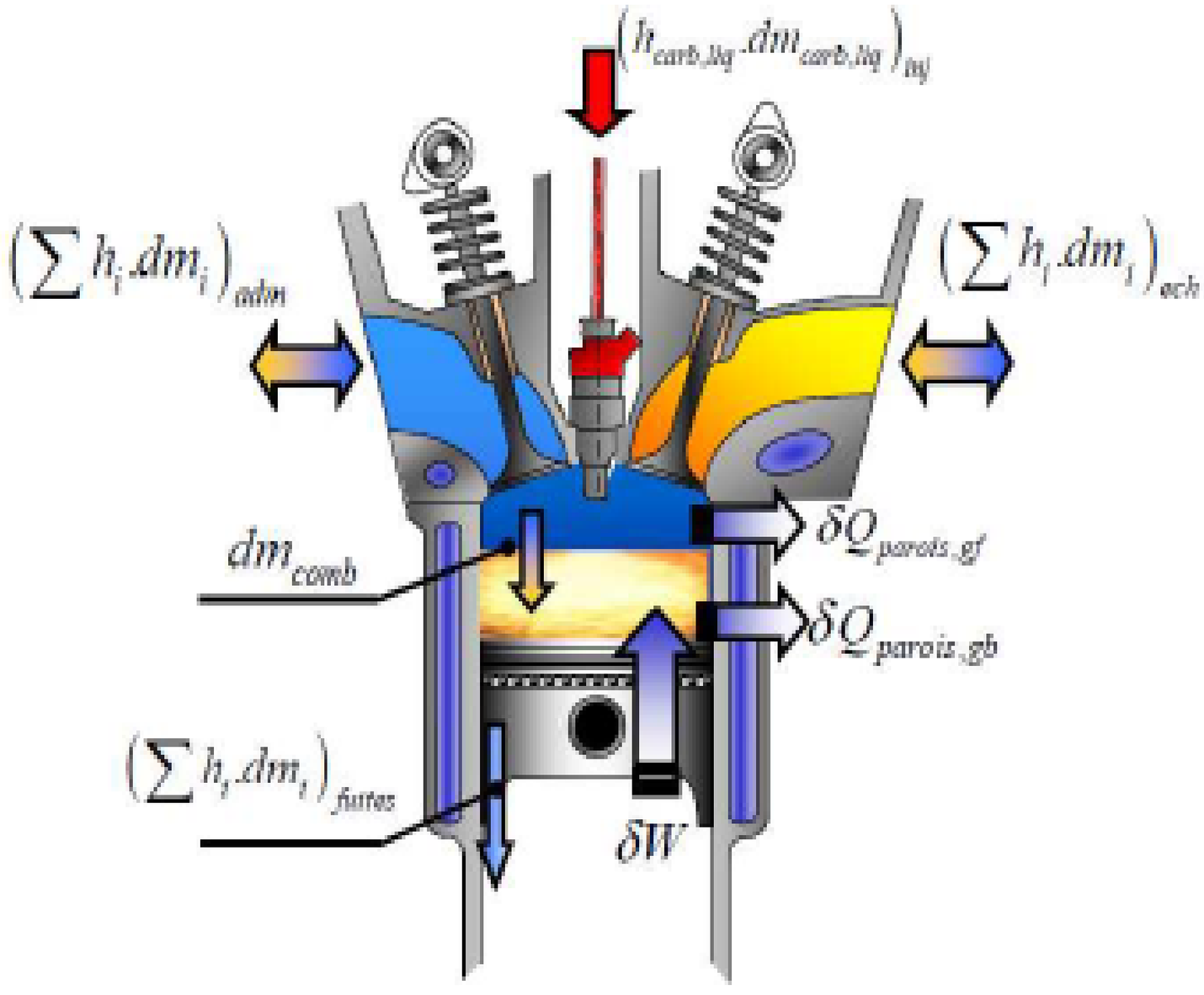
The detailed mathematical formulation of the two-zone thermodynamic model consists of a system of 7 algebraic and differential equations.

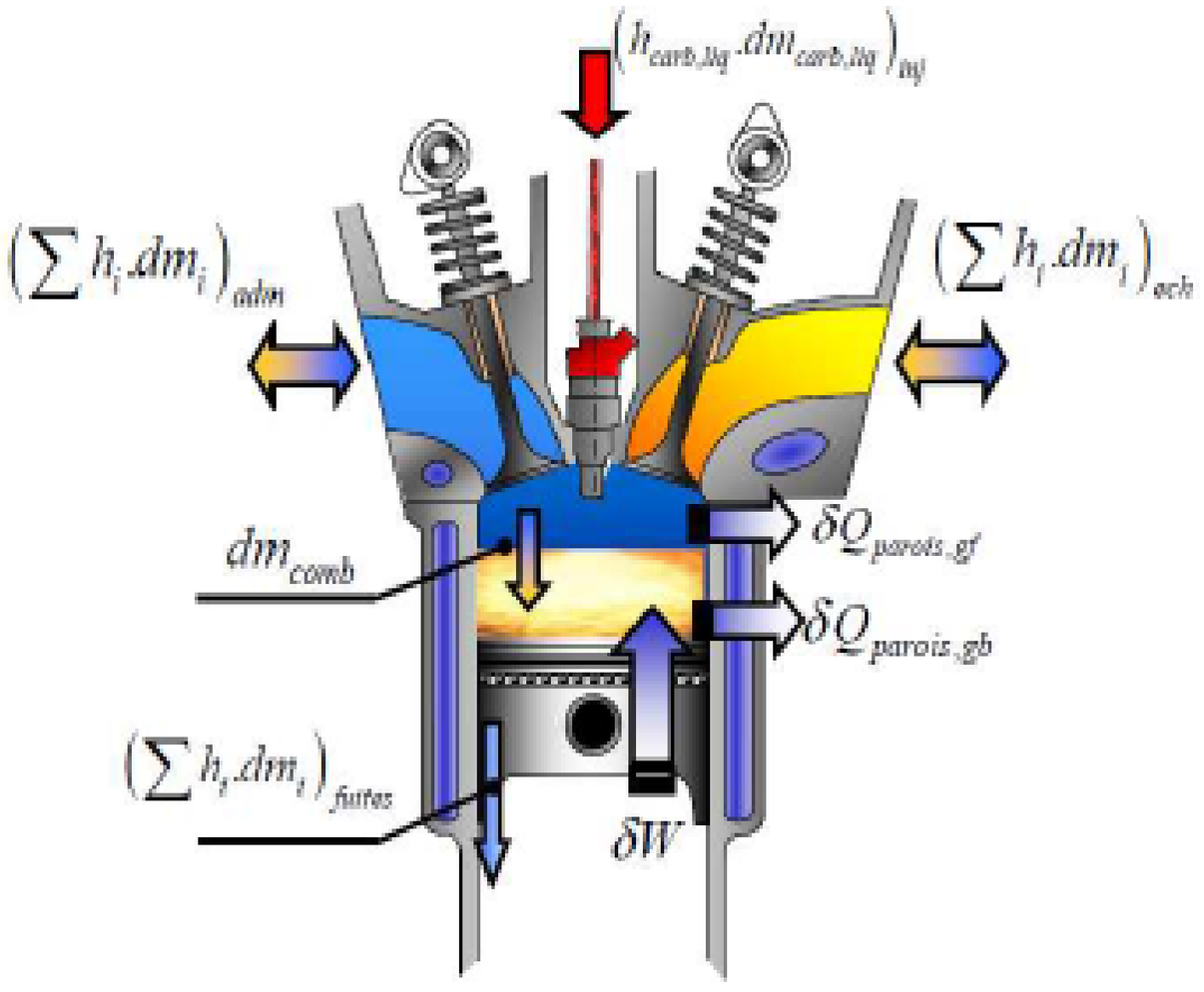
We will find for each zone;

an equation for the conservation of energy

an equation of state,

an equation for the conservation of mass and total volume.





تتكون الصياغة الرياضية التفصيلية للنموذج الديناميكي الحراري ثنائي المنطقتين من نظام مكون من 7 معادلات جبرية وتفاضلية.

سنجد لكل منطقة.

معادلة لحفظ الطاقة

معادلة الحالة ،

معادلة للحفاظ على الكتلة والحجم الكلي.

CHAPTER III: MODELING OF COMBUSTION IN ENGINES

Variation de la température d'une zone au cours du temps à l'aide du premier principe de la thermodynamique :

$$\begin{cases} dT_1 = \dfrac{1}{m.c_{v,1}}\left(-PdV_1 + dQ_{p,1} + \left(\sum h_j.dm_j\right)_1 - u_1.dm_1 - m_1\left(\sum dY_k.u_k\right)_1\right) \\ dT_2 = \dfrac{1}{m.c_{v,2}}\left(-PdV_2 + dQ_{p,2} + \left(\sum h_j.dm_j\right)_2 - u_2.dm_2 - m_2\left(\sum dY_k.u_k\right)_2\right) \end{cases}$$

Les équations d'état sur les différentes zones, sachant que la pression est uniforme dans la chambre, donnent :

$$\begin{cases} P.V_1 = m_1.r_1.T_1 \\ P.V_2 = m_2.r_2.T_2 \end{cases}$$

Avec,

m_1 et m_2 „ la masse totale dans la zone 1 et la zone 2,

r_1 et r_2 , la constante du mélange de gaz parfait présent dans la zone 1 et 2,

Variation of the temperature of a zone over time using the first law of thermodynamics:

$$\begin{cases} dT_1 = \dfrac{1}{m.c_{v,1}}\left(-PdV_1 + dQ_{p,1} + \left(\sum h_j.dm_j\right)_1 - u_1.dm_1 - m_1\left(\sum dY_k.u_k\right)_1\right) \\ dT_2 = \dfrac{1}{m.c_{v,2}}\left(-PdV_2 + dQ_{p,2} + \left(\sum h_j.dm_j\right)_2 - u_2.dm_2 - m_2\left(\sum dY_k.u_k\right)_2\right) \end{cases}$$

The equations of state on the different zones, knowing that the pressure is uniform, give:

$$\begin{cases} P.V_1 = m_1.r_1.T_1 \\ P.V_2 = m_2.r_2.T_2 \end{cases}$$

m_1 and m_2, the total mass in zone 1 and zone 2,

r_1 and r_2 , the constant of the ideal gas mixture present in zones 1 and 2,

تغير درجة حرارة المنطقة بمرور الوقت باستخدام القانون الأول للديناميكا الحرارية:

$$\begin{cases} dT_1 = \dfrac{1}{m.c_{v,1}}\left(-PdV_1 + dQ_{p,1} + \left(\sum h_j.dm_j\right)_1 - u_1.dm_1 - m_1\left(\sum dY_k.u_k\right)_1\right) \\ dT_2 = \dfrac{1}{m.c_{v,2}}\left(-PdV_2 + dQ_{p,2} + \left(\sum h_j.dm_j\right)_2 - u_2.dm_2 - m_2\left(\sum dY_k.u_k\right)_2\right) \end{cases}$$

معادلات الحالة في المناطق المختلفة ، مع العلم أن الضغط موحد

$$\begin{cases} P.V_1 = m_1.r_1.T_1 \\ P.V_2 = m_2.r_2.T_2 \end{cases}$$

m_1 وm_2، الكتلة الكلية في المنطقة 1 والمنطقة 2 ،

r_1 وr_2، ثابت خليط الغاز المثالي الموجود في المنطقتين 1 و 2 ،

En considérant la conservation du volume et de la masse on aura :

$$V = V_1 + V_2$$

$$dm_1 = dm_{adm,1} - dm_{ech,1} - dm_{fuites,1}\left(\pm dm_{comb} + dm_{carb,1}\right)_1$$

$$dm_2 = dm_{adm,2} - dm_{ech,2} - dm_{fuites,2}\left(\pm dm_{comb} + dm_{carb,1}\right)_2$$

La température moyenne se déduit donc de l'équation d'état des gaz parfait appliquée à la chambre :

$$T = \frac{P.V}{m.r}$$

La température moyenne en fonction des différentes températures dans les zones et de leurs fractions volumiques respectives,

$$T = \frac{1}{\frac{f_{V1}}{T_1} + \frac{f_{V2}}{T_2}}$$

Avec, f_{V1} et f_{V2} , la fraction volumique de la zone 1 et de la zone 2.

Considering the conservation of volume and mass, we will have:

$$V = V_1 + V_2$$

$$dm_1 = dm_{adm,1} - dm_{ech,1} - dm_{fuites,1}\left(\pm dm_{comb} + dm_{carb,l}\right)_1$$

$$dm_2 = dm_{adm,2} - dm_{ech,2} - dm_{fuites,2}\left(\pm dm_{comb} + dm_{carb,l}\right)_2$$

The average temperature is therefore deduced from the equation of state of the ideal

$$T = \frac{P.V}{m.r}$$

The average temperature as a function of the different temperatures in the zones and their respective volume fractions,

$$T = \frac{1}{\frac{f_{V1}}{T_1} + \frac{f_{V2}}{T_2}}$$

With, f_{V1} and f_{V2} , the volume fraction of zone 1 and zone 2.

بالنظر إلى الحفاظ على الحجم والكتلة ، سيكون لدينا:

$$V = V_1 + V_2$$

$$dm_1 = dm_{adm,1} - dm_{ech,1} - dm_{fuites,1}\left(\pm dm_{comb} + dm_{carb,1}\right)_1$$

$$dm_2 = dm_{adm,2} - dm_{ech,2} - dm_{fuites,2}\left(\pm dm_{comb} + dm_{carb,1}\right)_2$$

لذلك يتم استنتاج متوسط درجة الحرارة من معادلة حالة الغازات المثالية

$$T = \frac{P.V}{m.r}$$

متوسط درجة الحرارة كدالة لدرجات الحرارة المختلفة في المناطق وكسور الحجم الخاصة بها ،

$$T = \frac{1}{\frac{f_{V1}}{T_1} + \frac{f_{V2}}{T_2}}$$

مع f_{V1} وf_{V2}، الكسر الحجمي للمنطقة 1 والمنطقة 2.

3,4- Modèle Thermodynamique Multizones

L'approche multi zones est une généralisation du modèle deux zones.

Dans l'approche deux zones, gaz frais / gaz brûlés, l'hypothèse est faite que la température dans les gaz brûlés est homogène dû à un mélange parfait et instantané des produits issus de la combustion.

Afin de mieux prédire la formation des oxydes d'azote, on peut diviser la zone des gaz brûlés en deux sous zones, une zone adiabatique et une zone type « couche limite » proche parois.

$$dT_n = \frac{1}{m.c_{v,n}}\left(-PdV_n + dQ_{p,n} + \left(\sum h_j.dm_j\right)_n - u_n.dm_n - m_n\left(\sum dY_k.u_k\right)_n\right)$$

Avec, $n \in [1, N]$, l'indice relatif à la zone considérée

l'équation d'état sur chaque zone ainsi que la conservation de la masse et du volume totale donne :

$$P.V_n = m_n.r_n.T_n$$

$$V = \sum_{n=1}^{N} V_n$$

$$dm_n = dm_{adm,n} - dm_{ech,n} - dm_{fuites,n} \pm dm_{n\to n+1} \pm dm_{n-1\to n}$$

$dm_{n\to n+1}$ et $dm_{n-1\to n}$ **représentent respectivement les débits de masse entre la zone *n* et les zones voisines.**

4.3- نموذج ديناميكي حراري متعدد المناطق

النهج متعدد المناطق هو تعميم لنموذج المنطقتين.
في نهج المنطقتين ، الغازات الطازجة / الغازات المحترقة ، يتم افتراض أن درجة الحرارة في غاز المداخن متجانس بسبب الخلط المثالي والفوري للمنتجات الناتجة عن الاحتراق.
من أجل التنبؤ بشكل أفضل بتكوين أكاسيد النيتروجين ، يمكن تقسيم منطقة غاز التوهج إلى منطقتين فرعيتين ، منطقة ثابتة الحرارة ومنطقة من نوع "الطبقة الحدودية" القريبة من الجدار.

$$dT_n = \frac{1}{m.c_{v,n}}\left(-PdV_n + dQ_{p,n} + \left(\sum h_j.dm_j\right)_n - u_n.dm_n - m_n\left(\sum dY_k.u_k\right)_n\right)$$

المؤشر المتعلق بالمنطقة قيد النظر ، $n \in [1, N]$,

تعطي معادلة الحالة لكل منطقة بالإضافة إلى الحفاظ على الكتلة الكلية والحجم:

$$P.V_n = m_n.r_n.T_n$$

$$V = \sum_{n=1}^{N} V_n$$

$$dm_n = dm_{adm,n} - dm_{ech,n} - dm_{fuites,n} \pm dm_{n\to n+1} \pm dm_{n-1\to n}$$

تمثل على التوالي التدفقات الجماعية بين المنطقة N والمناطق المجاورة.

$dm_{n\to n+1}$ et $dm_{n-1\to n}$

Le système d'équation algébrique et différentielle constitué des équations précédentes permet de décrire l'état thermodynamique de chaque zones à chaque instant.

Une des voies pour déterminer la température moyenne dans la chambre est d'utiliser l'équation d'état des gaz parfait

On peut estimer la température globale :

$$T = \frac{1}{\sum_{n=1}^{N} \frac{f_{Vn}}{T_n}}$$

Avec, f_{Vn} , la fraction volumique de la zone n.

The system of algebraic and differential equations consisting of the previous equations makes it possible to describe the thermodynamic state of each zone at any given time.

One way to determine the average temperature in the chamber is to use the ideal gas equation of state

The global temperature can be estimated:

$$T = \frac{1}{\sum_{n=1}^{N} \frac{f_{Vn}}{T_n}}$$

With, f_{Vn} , the volume fraction of the zone n.

يتيح نظام المعادلات الجبرية والتفاضلية المكون من المعادلات السابقة وصف الحالة الديناميكية الحرارية لكل منطقة في أي وقت.

تتمثل إحدى طرق تحديد متوسط درجة الحرارة في الغرفة في استخدام معادلة الغاز المثالية للحالة

يمكن تقدير درجة الحرارة العالمية:

$$T = \frac{1}{\sum_{n=1}^{N} \frac{f_{Vn}}{T_n}}$$

مع ، f_{Vn}، الكسر الحجمي للمنطقة n.

Chapitre 04 :

Formation de polluants

4-1 Monoxyde de Carbone

4-2 Hydrocarbures imbrulés

4-3 Formation des aromatiques

4-4 Formation des suies

4-5 Formation des NOx

$$C_nH_m + x(O_2 + 3{,}76N_2) \Rightarrow a.CO_2 + b.H_2O + d.3{,}76N_2$$

LES POLLUANTS PRODUITS PAR LA COMBUSTION.

➢ En théorie, la combustion est complète :

$$C_nH_m + x(O_2 + 3{,}76N_2) \Rightarrow a.CO_2 + b.H_2O + d.3{,}76N_2$$

La combustion rejette du dioxyde de carbone, de l'eau et de l'azote.

Les émissions polluantes de l'automobile sont des gaz ou vapeurs relâchés dans l'atmosphère à la suite de la combustion incomplète du moteur à essence. La combustion complète du mélange air-essence ne peut être obtenue avec le carburant essence à cause des zones froides de la chambre de combustion, du changement continuel du rapport air/essence, de la température de l'air d'admission pour le mélange et celle du moteur qui ne sont pas constantes et des conditions de conduite variables :

♦ CO Monoxyde de carbone ♦ HC Hydrocarbures imbrulé
♦ N_2 Azote ♦ CO_2 Dioxyde de carbone
♦ O_2 Oxygéne ♦ H_2O Eau ♦ SO_2 Dioxyde de soufre
♦ NO_x Oxyde d'azote ♦ Particules Carbones, suies

Remarque :

-Le gazole riche en carbone, favorise la production de particules de carbone (suies)

- seule le gazole produit du dioxyde de soufre SO_2.

Certains gaz sont très toxiques. Ils sont considérés par la législation comme étant **les POLLUANTS**.

4-1 Monoxyde de carbone .CO

Gaz incolore, inodore et insipide

Le monoxyde de carbone bloque l'alimentation en oxygène du sang, au niveau pulmonaire, provoquant l'asphyxie. Ce gaz est mortel en 30 min à partir d'une concentration de 0,3%, ; il peut causer des maux de tête, vertiges ou pertes de connaissances pour des doses plus faibles.

le CO : Le monoxyde de carbone est produit par un **manque d'oxygène** (il se combine avec l'oxygène pour produire du CO_2 ($2\ CO + O_2 \Rightarrow 2\ CO_2$)

Donc il augmente avec la richesse).

Dans le cas d'un mélange riche (trop de carburant, pas assez d'air), certains atomes qui constituent la molécule d'hydrocarbure ne trouvent pas de ''partenaire oxygène'' en nombre suffisant puisque l'air manque, ils ne sont donc pas oxydés complètement et se retrouvent dans les gaz d'échappement sous forme de particules carbonées, d'hydrocarbures imbrûlés (symbole chimique HC) ou de monoxyde de carbone (symbole chimique CO),

4-2 Hydrocarbures imbrulés: HC

L'essence liquide est constituée d'un mélange d'hydrocarbures (HC) différents.

Ceux qui se retrouvent dans les gaz d'échappement sont appelés "imbrûlés": Cette combustion incomplète est typique des moteurs 2-temps dénués de système d'injection (petits scooters, tondeuses, engins de chantier, moteurs de bateau) et, dans une moindre mesure, des moteurs 4-temps.

Certains imbrûlés – tels le benzène C_6H_6 et le toluène C_7H_8 – sont très nocifs pour la santé humaine. Ils provoquent des maladies cardiovasculaires et même des crises cardiaques. Ils s'attaquent aussi au matériel génétique (ADN) contenu dans les cellules, augmentant les risques de cancer.

Les moteurs de voitures – essence ou diesel – produisent peu d'imbrûlés, grâce au pot catalytique qui en élimine plus de 90%.

Les voitures sont responsables de 58 % des émissions des hydrocarbures imbrûlés dans l'air.

4-3 Formation des aromatiques

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) Sont dangereux pour la santé car cancérogènes, ils sont des hydrocarbures aromatiques constitués de plusieurs cycles benzéniques

" Les HAP sont la plupart du temps dans les gaz d'échappement des moteurs à essence ; il s'agit dans ce cas des HAP de masse moléculaire la plus faible qu'on appelle HAP légers.

" Parmi les HAP, le benzo(a)pyrène $C_{20}H_{12}$(BaP) est le plus dangereux pour la santé, il est émis pratiquement au même taux par un véhicule essence ou Diesel

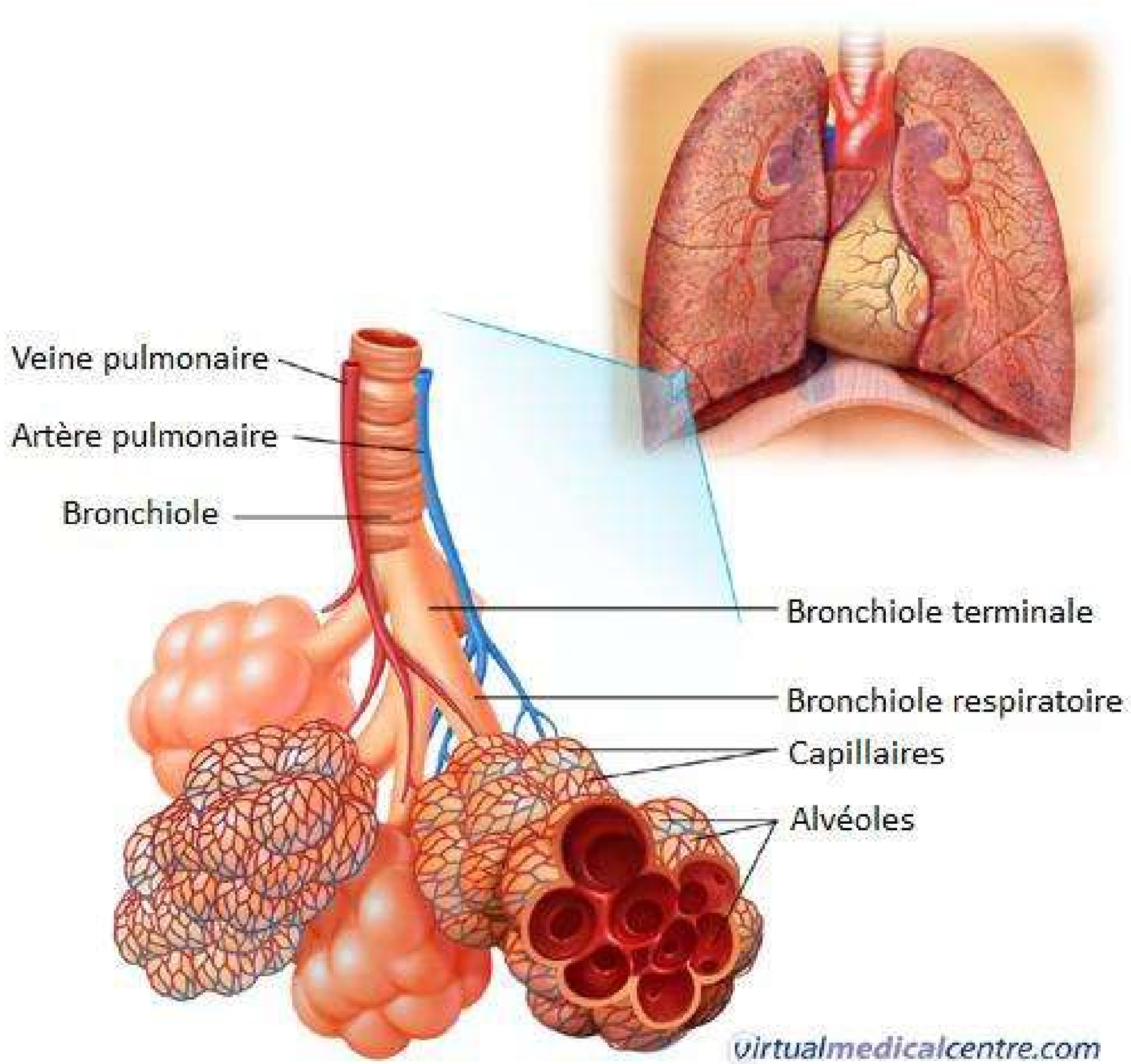
4-4 Formation des suies

Il s'agit de particules de suie microscopiques, produites en grandes quantités par les moteurs diesel, les feux de cheminée, la fumée de cigarette, la friture, etc. Elles sont généralement abrégées PM10, ce qui signifie "particule de matière (particulate matter, en anglais) de moins de 10 microns de diamètre". Il existe des particules encore plus fines: des PM2.5, des PM1 ou même des PM0.1

Plus une particule est fine, plus elle a la capacité d'être aspirée jusqu'au fond des poumons, où elle restera collée contre la paroi de l'alvéole. Avec pour conséquences une réduction de la capacité respiratoire, et un risque accru de cancer du poumon.. Dans le milieu humide de l'alvéole pulmonaire, elles vont se dissoudre et passer dans le sang. C'est pourquoi les poussières fines sont impliquées non seulement dans le cancer du poumon mais aussi dans les crises cardiaques.

Depuis quelques années, l'apparition du filtre à particules permet de réduire le nombre de PM10 rejetées par les moteurs diesel.

CHAPITRE 4 FORMATION DE POLLUANTS



4-5 Formation des NOx

Il s'agit de deux gaz – NO et NO_2 – qui sont souvent réunis sous l'appellation NOx (le "NOx", lui, n'existe pas).

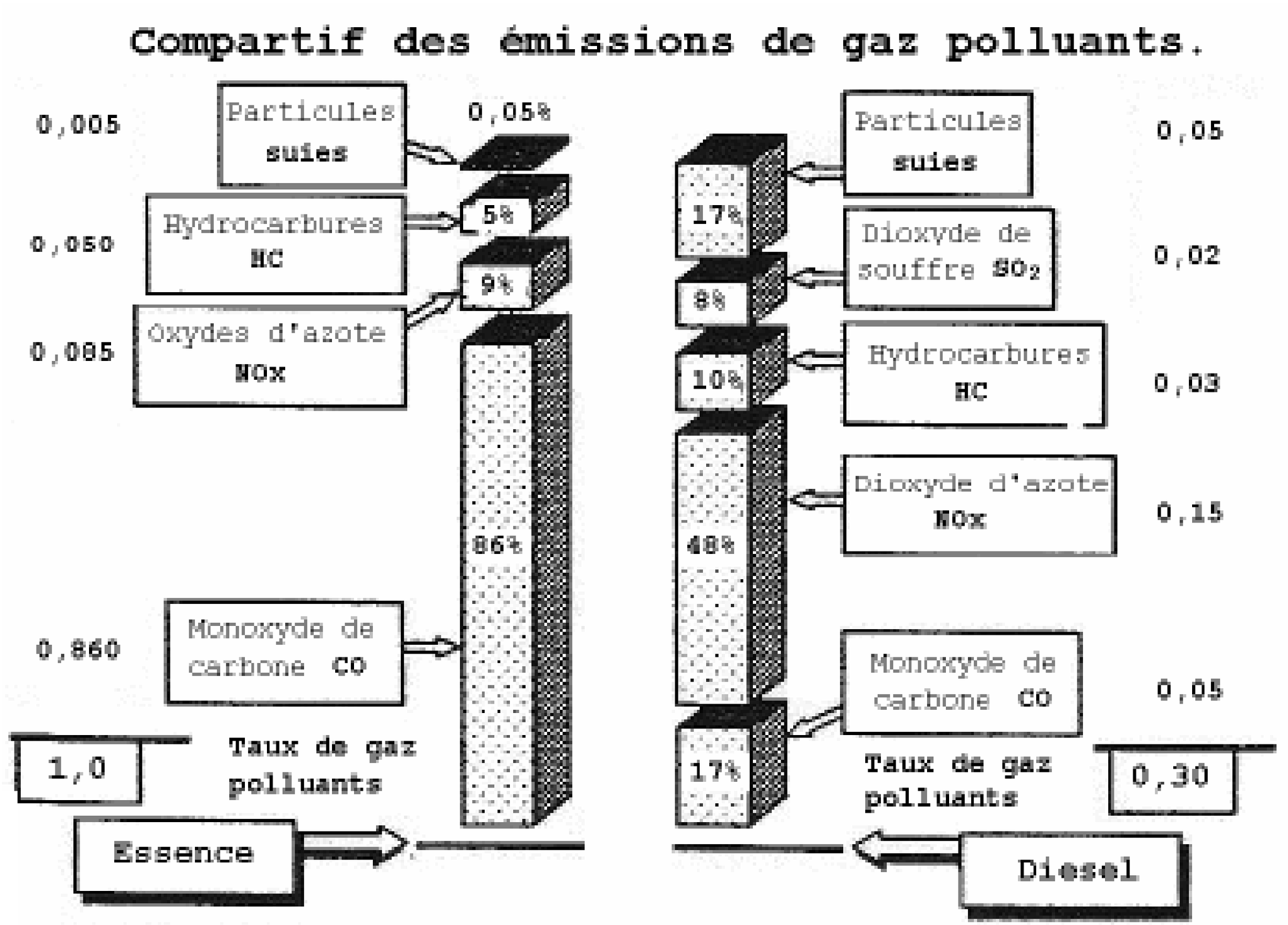
Ils sont produits principalement par les moteurs fonctionnant à l'essence et – surtout – au diesel. Ils ont grosso modo les mêmes propriétés (d'autant plus que le NO se transforme spontanément en NO_2): ils créent un acide dès qu'ils entrent en contact avec de l'eau.

Voilà pourquoi la pollution automobile agresse les voies respiratoires des humains et des animaux, ainsi que les plantes.

L'introduction du catalyseur a permis de réduire les émissions de

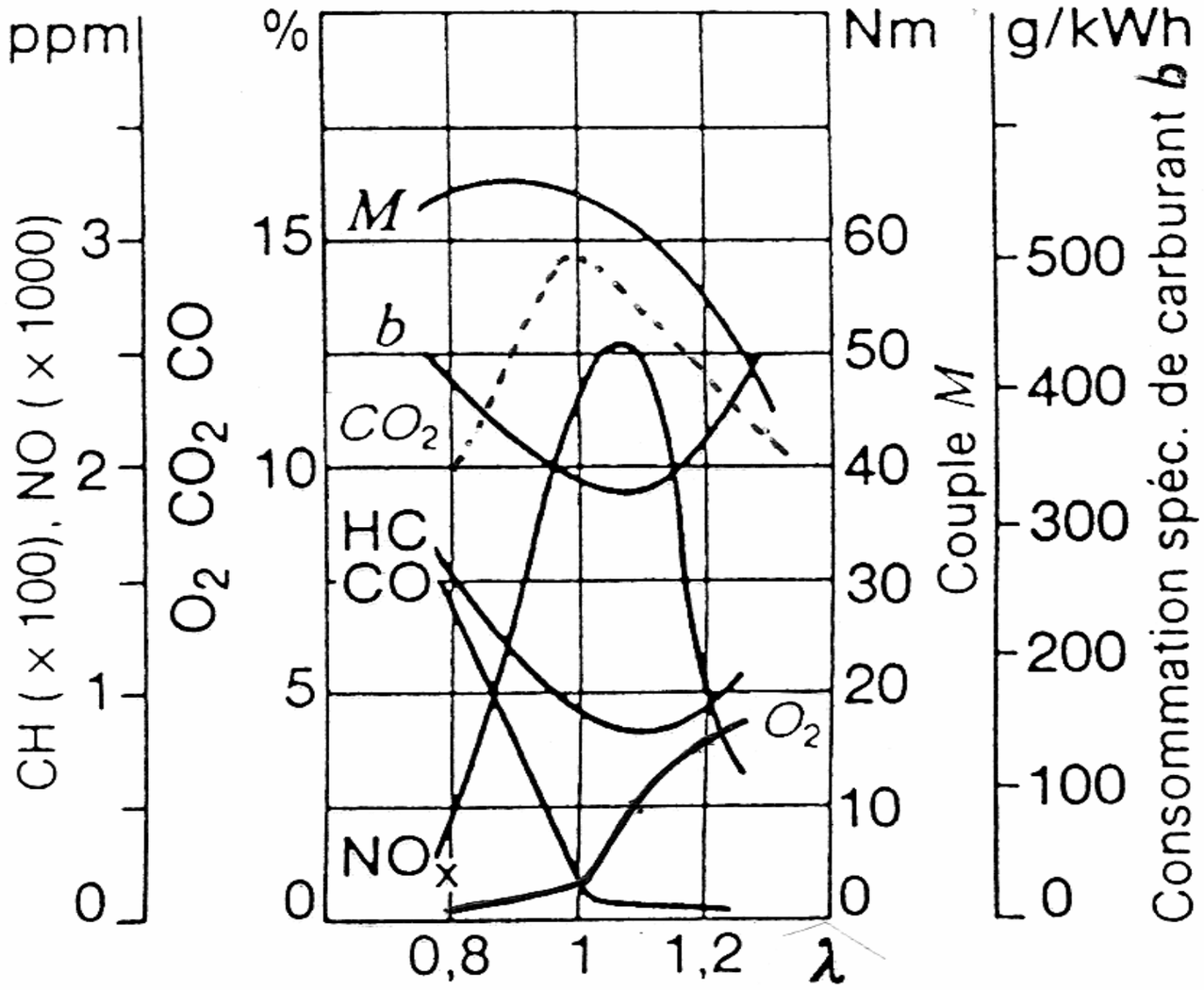
- **Normes européennes à l'émission pour homologation des véhicules neufs (Mesures sur bancs et cycles d'essai normalisés)**

Type de véhicule		Rejets de NO_x	Rejets de HC	Rejets de CO	Rejets de particules
Véhicules particuliers masse < 2,5 t moins de 7 places (depuis le 01/01/1997)	Essence*	0,6 g/km		2,2 g/km	Pas de normes
	Diesel**	0,8 g/km		1 g/km	1 g/km
Véhicules utilitaires légers masse < 3,5 t ou nombre de places (depuis le 01/10/1994)	< 1,25 t	0,97 g/km		2,72 g/km	0,14 g/km
	< 1,7 t	1,4 g/km		5,17 g/km	0,19 g/km
	> 1,7 t	1,7 g/km		6,9 g/km	0,25 g/km
Poids lourds (depuis le 01/01/1997)		7 g/kWh	1,1 g/kWh	4 g/kWh	0,15 g/kWh
2 roues (depuis le 01/01/1996)		3 g/km		6 g/km	Pas de normes
3 roues (depuis le 01/01/1996)		1,2 g/km		Pas de normes	


Compartif des émissions de gaz polluants.
0,005
Particules suies
0,05%
0,050
Hydrocarbures HC
5%
9%
0,085
Oxydes d'azote NOx
86%
0,860
Monoxyde de carbone CO
1,0
Taux de gaz polluants
Essence
Particules suies
0,05
17%
Dioxyde de souffre SO2
0,02
8%
Hydrocarbures HC
0,03
10%
Dioxyde d'azote NOx
0,15
40%
Monoxyde de carbone CO
0,05
17%
Taux de gaz polluants
0,30
Diesel

PRINCIPALES EVOLUTIONS DES POLLUANTS A L 'ECHAPPEMENT.

La composition du mélange exerce une influence prépondérante sur la composition des gaz d'échappement.



Rq : **Le CO et les HC évoluent de façon inverse / aux NOx.**

Lambda \ Polluant		HC (ppm)	CO (%)	NOx (ppm)	O_2 (%)	CO_2 (%)
0,9	Riche	125	3,9	1270	0,52	12,5
1,1	Pauvre	85	0,3	2500	2,6	13

FONCTIONNEMENT DU CATALYSEUR



Les gaz d'échappement traversent les minuscules pores du nid d'abeille qui ressemble fortement à un filtre (le but est qu'un maximum de surface "traitante" soit en contact avec les gaz). Les molécules toxiques sont mises en contact (dans les pores) avec des métaux rares par exemple le platine.

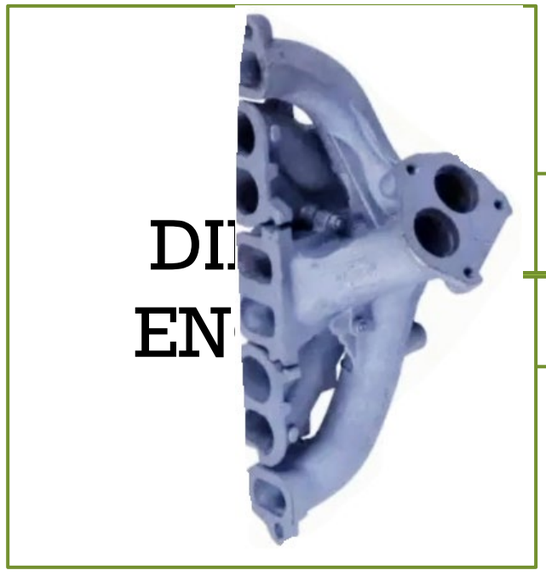
En contact avec ces éléments, la réaction chimique fait que les molécules toxiques des gaz sont transformés en d'autres éléments beaucoup moins dangereux.

Monoxyde de carbone est transformé en **dioxyde de carbone**

Oxydes d'azote transformés en **dioxyde de carbone** et **diazote**

Hydrocarbures transformés en **eau** et **dioxyde de carbone**

CHAPITRE 4 FORMATION DE POLLUANTS



DI
EN

CO
HC
NO_X
Partic







CO
HC
NO_X
Particules







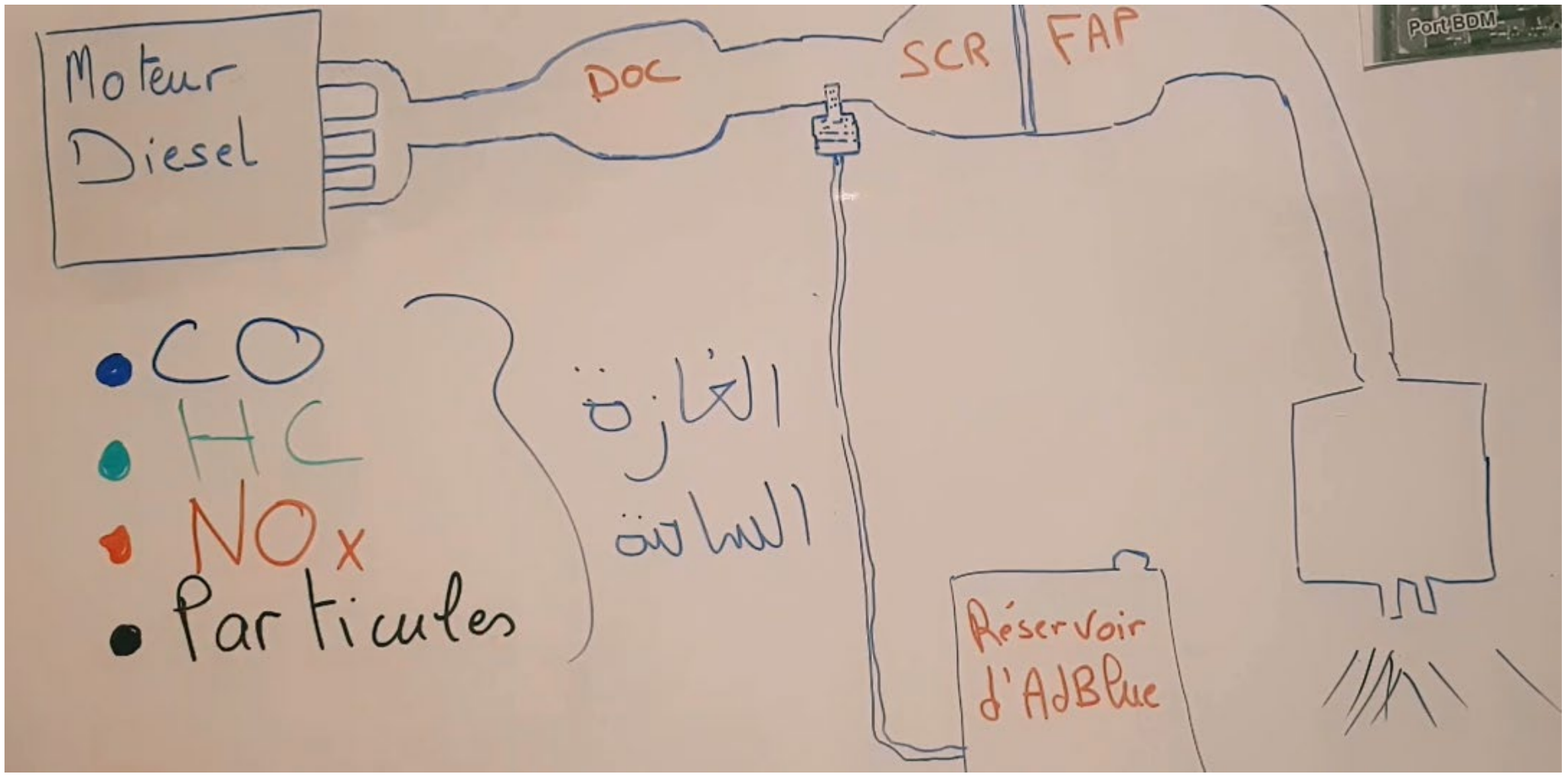
DOC : Diesel Oxydation Catalyst

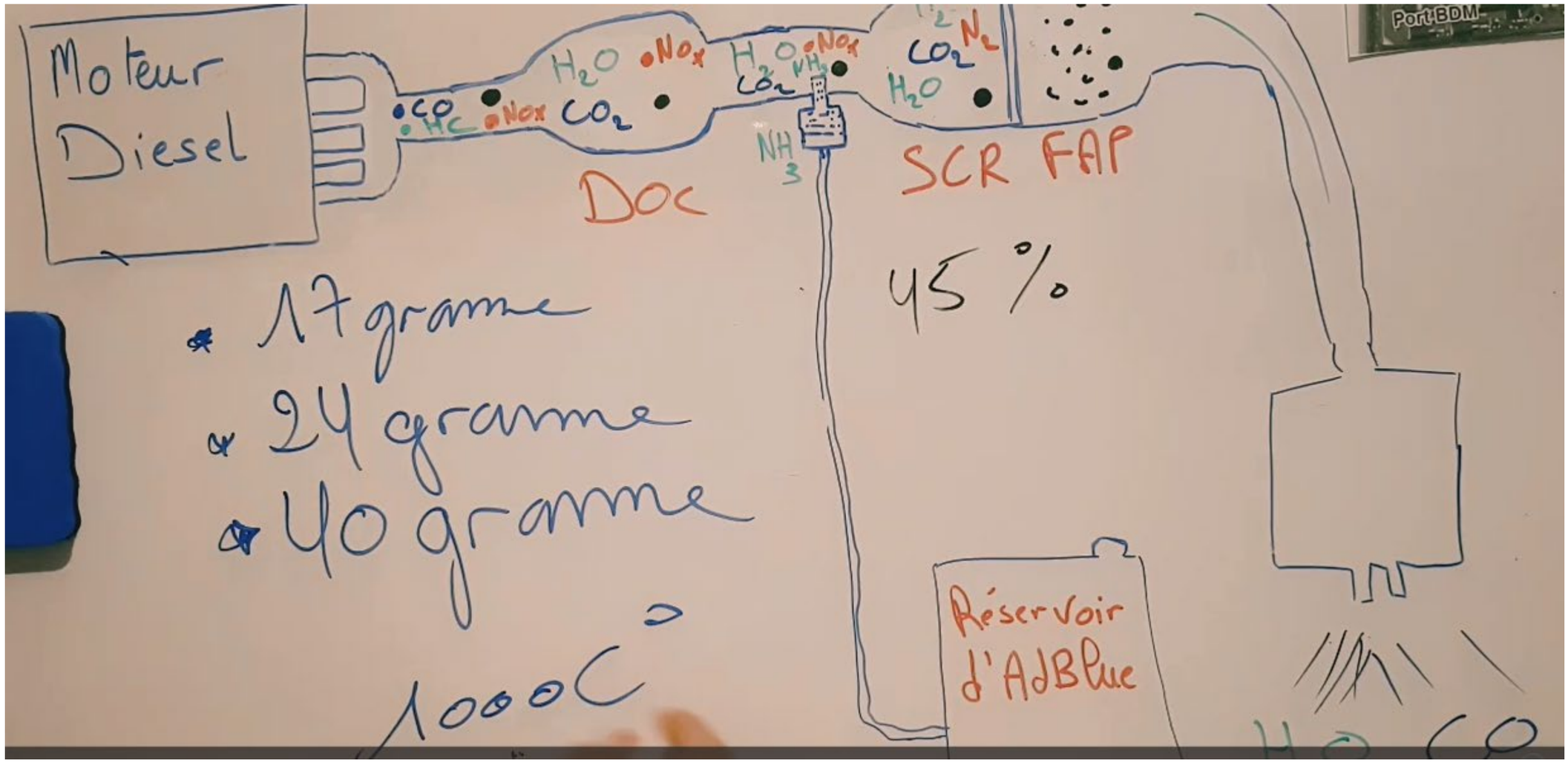
SCR : Selective Catalytic reduction

FAP : Filtre à Particules

$_2$
O

CHAPITRE 4 FORMATION DE POLLUANTS



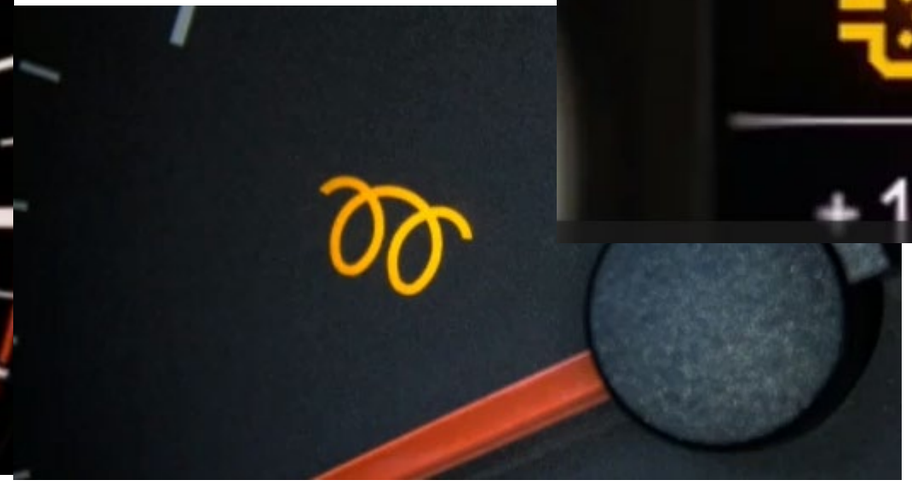

Moteur Diesel
CO
HC
NOx
H_2O
CO_2
DOC
NH_3
SCR FAP
N_2
45 %
17 gramme
24 gramme
40 gramme
1000C°
Réservoir d'AdBlue
Port BDM

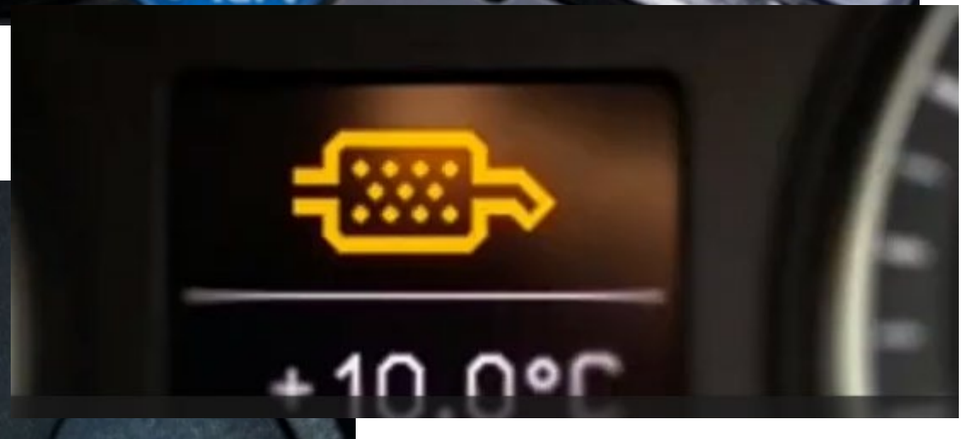
CHAPITRE 4 FORMATION DE POLLUANTS











CHAPITRE 4 FORMATION DE POLLUANTS





V-1. Principe.

Le rendement d'un moteur dépend directement de sa capacité de remplissage des cylindres et de la puissance de l'explosion dans chaque cylindre. Ainsi, on peut se poser la question : comment faire pour augmenter la puissance d'un moteur sans pour autant détériorer sa fiabilité ?
Il existe deux moyens :

✓ Augmenter la cylindrée par un réalésage, mais cela a un inconvénient majeur car cela entraîne un gain de poids considérable et une consommation supérieure donc la puissance gagnée a peu d'intérêt puisqu'on gagne en poids et en encombrement.

✓ Implanter un turbo : sans toucher à la cylindrée on envoie dans le moteur de l'air compressé afin d'améliorer le remplissage, car plus on fait pénétrer de mélange gazeux dans le cylindre, plus la quantité d'énergie libérée est importante donc plus on gagne en puissance et en couple.

Puisque l'air est compressible, on comprime l'air admis dans le moteur afin que sa puissance du augmente.

V-2. Suralimentation par turbocompresseur

Un turbocompresseur comporte trois principaux composants : un compresseur, une turbine reliée au compresseur par un arbre et un ensemble de paliers pour supporter l'arbre.

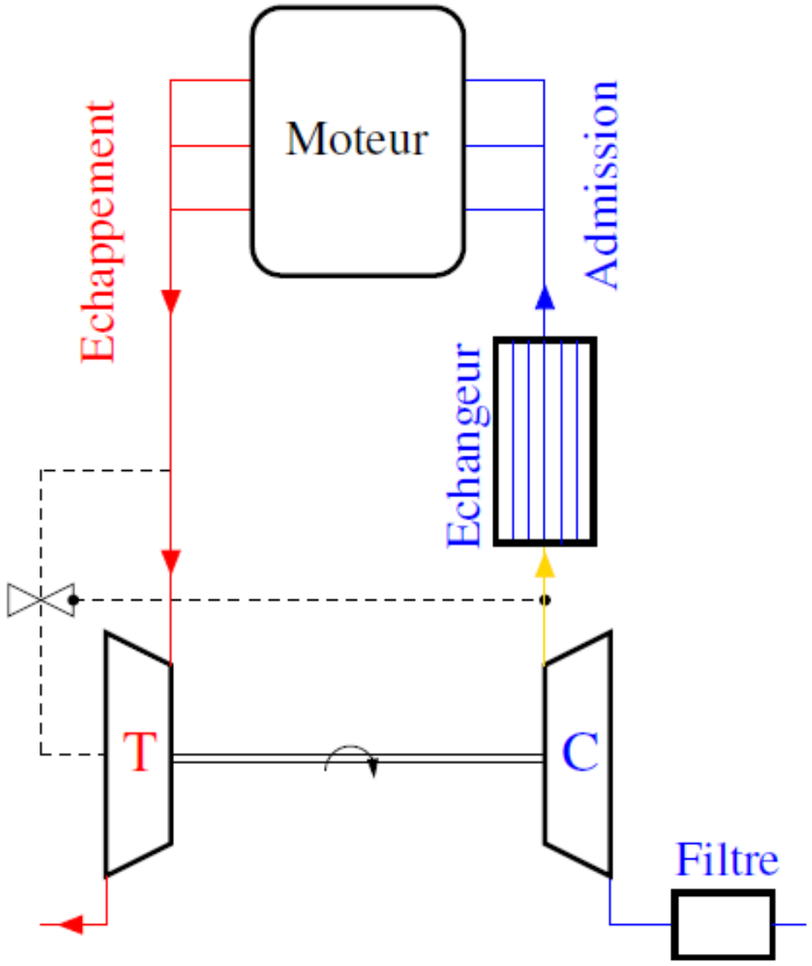
À ce jour la suralimentation est largement utilisée dans les moteurs à combustion interne. La grande majorité des moteurs Diesel fabriqués aujourd'hui sont équipés d'un turbocompresseur, tandis que les moteurs atmosphériques sont de moins en moins fréquents. Le mot turbocompresseur ou "turbo charger" en anglais, est l'abréviation de "turbo super charger". Le super charger est un compresseur entraîné par le vilebrequin du moteur.

Le turbocompresseur permet d'éviter de prendre de l'énergie au moteur, en étant relié à une turbine alimentée par les gaz d'échappement.

La turbine et le compresseur sont montés sur un arbre en commun. L'énergie cinétique des gaz d'échappement assure la rotation d'une turbine centripète qui entraîne mécaniquement la rotation du compresseur. Dans le cas d'un fonctionnement stable l'énergie fournie par la turbine est égale à l'énergie absorbée par le compresseur.

Dans un moteur suralimenté par un turbocompresseur, la masse volumique de l'air à l'admission est augmentée grâce à la compression et au refroidissement de l'air à travers un échangeur de chaleur placé entre le compresseur et l'admission du moteur. La quantité de l'air à l'admission est réglée par une soupape de décharge (Wastegate).

En l'absence de soupape, la pression d'admission générée par le turbocompresseur varie avec la pression des gaz d'échappement du moteur. La soupape dérive une partie des gaz d'échappement hors de la turbine, pour contrôler la vitesse de rotation de la turbine, qui à son tour contrôle la vitesse de rotation du compresseur. La fonction principale de la soupape de décharge est de régler une pression de suralimentation maximale pour protéger le moteur et le turbocompresseur.



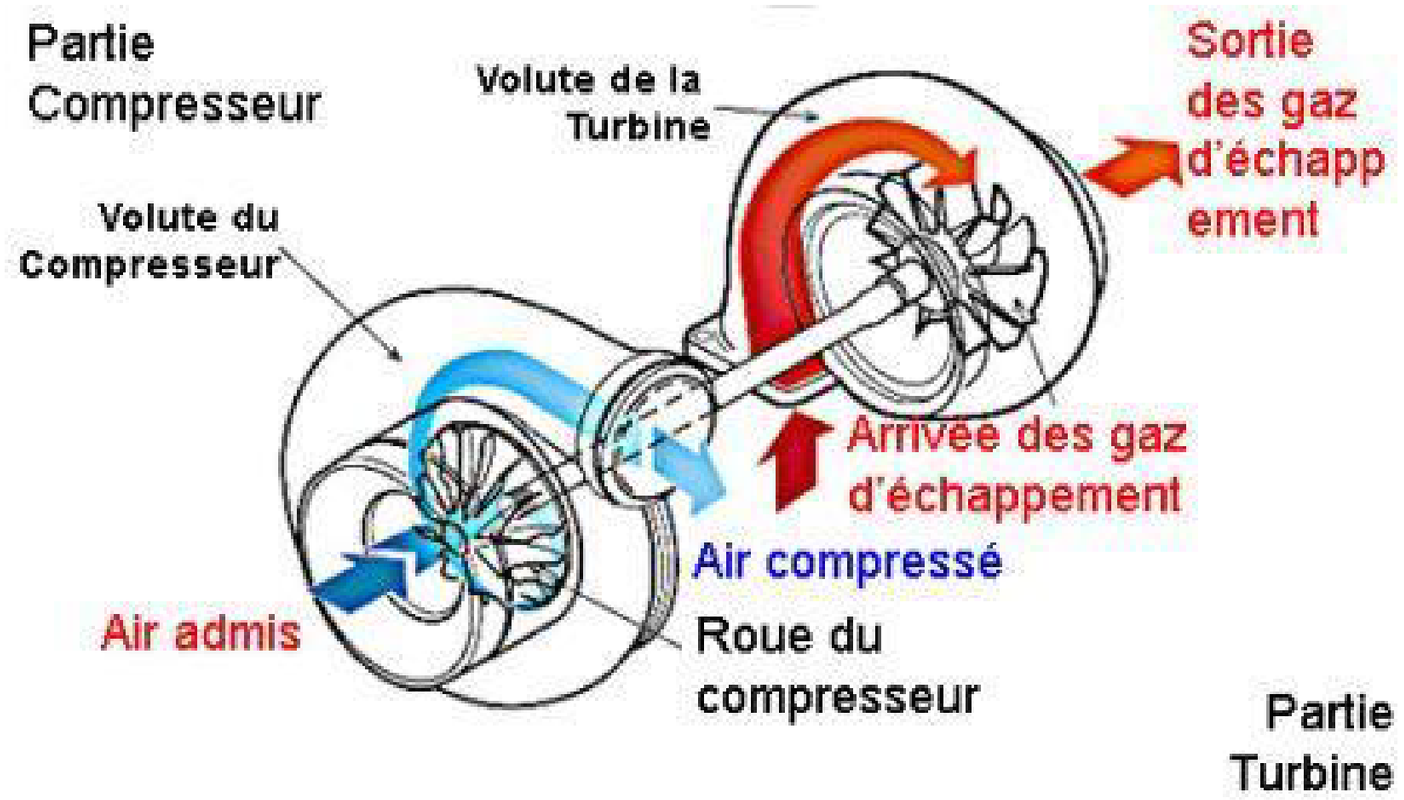


Schéma d'installation d'un moteur alimenté par un turbocompresseur

Sur les moteurs nouvelle génération, cette régulation est entièrement gérée par l'électronique de la voiture et est auto-adaptable aux besoins instantanés du conducteur.

La figure suivante représente un schéma de fonctionnement complet du turbo qui inclue "l'intercooler" c'est à dire l'élément qui permet de refroidir les gaz (réchauffés à cause de la vitesse de rotation et de la compression) qui entrent dans la chambre de combustion afin que la fiabilité et la longévité du moteur soient augmentés. Un problème dû à la forte compression des gaz frais est le cliquetis. Désormais ce problème est résolu grâce à la gestion électronique qui surveille en permanence le moteur et détecte le phénomène pour le contrecarrer.

Mais sur les premiers modèles turbocompressés, on assistait dans la chambre de combustion à un pré-allumage spontané précédant l'étincelle de la bougie (le cliquetis).

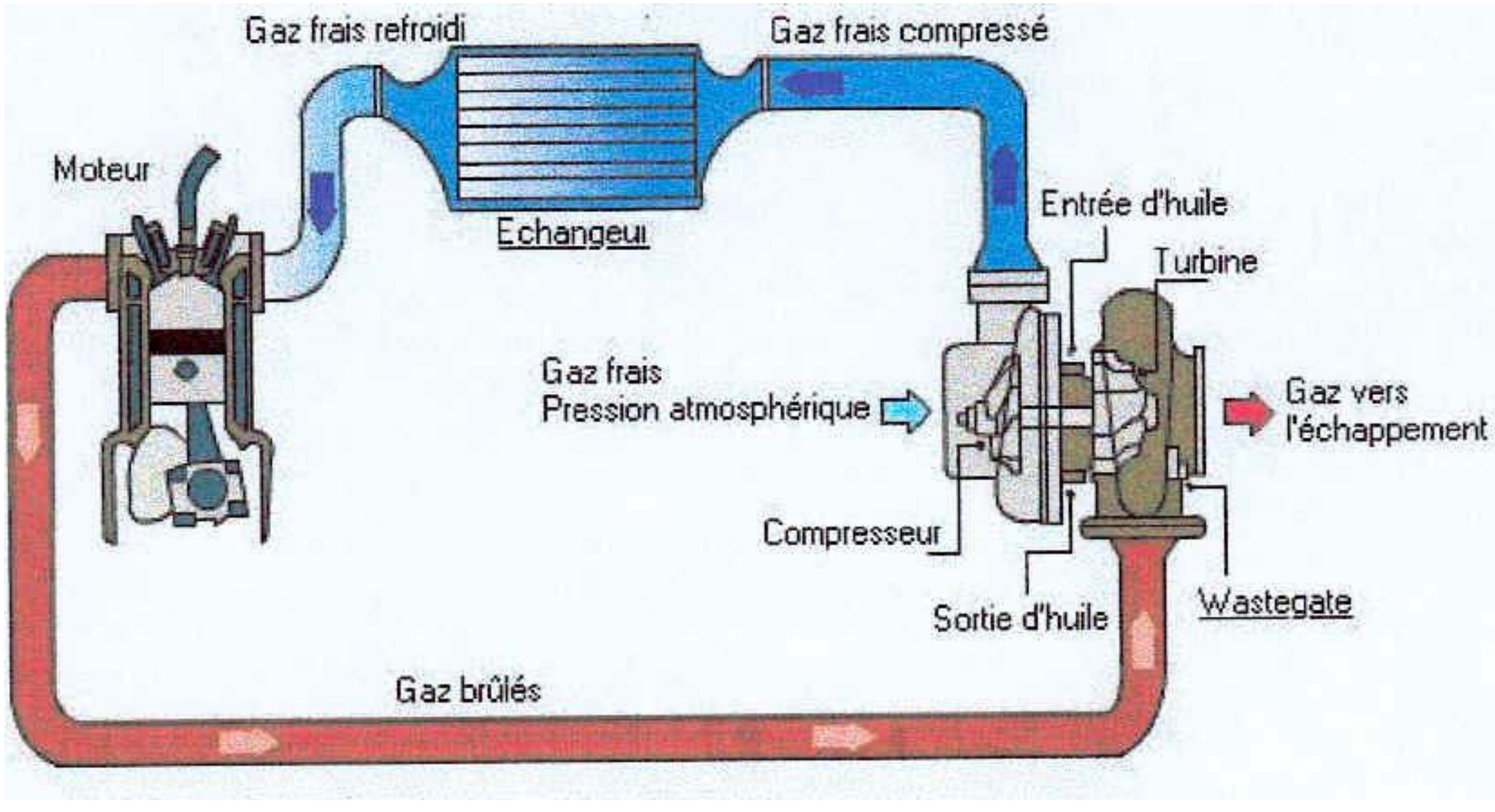


Schéma de fonctionnement complet du turbo avec intercooler

En l'absence de tout système de dépollution le moteur diesel est moins polluant que le moteur essence

V-3. Suralimentation par compresseur

La fonction assurée est strictement la même que celle du turbo. Par contre les moyens diffèrent. Contrairement au turbo qui est entraîné par les gaz d'échappement le compresseur est entraîné mécaniquement par le moteur.
Le compresseur volumétrique utilise la variation du volume d'air pour faire varier la pression de l'air. L'air est emprisonné entre deux roues en spirale. Il est obligé de sortir. La pression fournie dépend donc de l'effort rencontré à la sortie et le débit correspond au régime de rotation. Le temps de réponse, caractéristique principale du turbo est donc nul sur un compresseur.
Voici une vue en coupe du compresseur :

Voici une vue en coupe du compresseur :

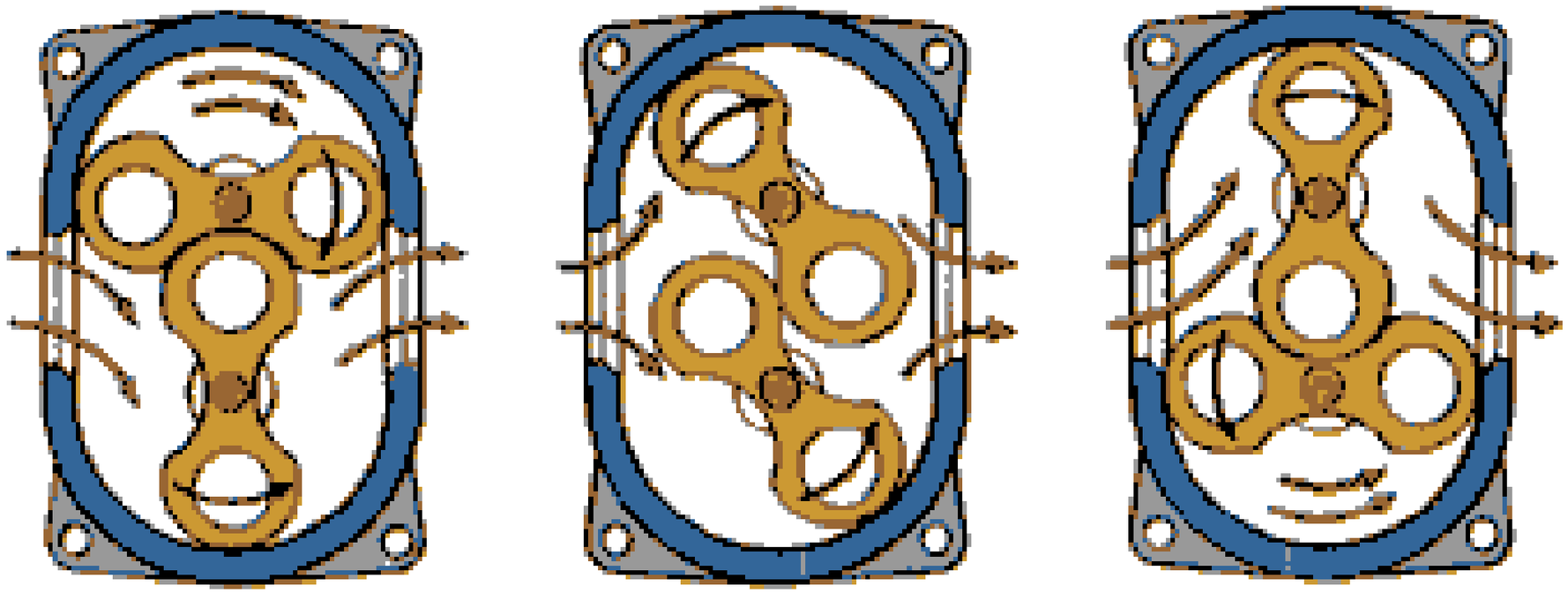


schéma de compresseur volumétrique

Le principal inconvénient de ce système de suralimentation est qu'il absorbe environ une dizaine de chevaux est qu'il fait considérablement monter la consommation. Ce qui explique pourquoi ce système ne peut pas être monté sur des petits moteurs. Jaguar est un grand utilisateur de cette technologie car il dispose de gros moteurs ne craignant pas une surconsommation. Jaguar arrive, grâce à cette technologie, à faire passer la puissance d'un V8 4.0 de 294 à 375 ch.

V-4. Cartographies de turbocompresseurs

V-4-1. Performances d'un turbocompresseur.

Dans les conditions les plus courantes, 7 variables physiques indépendantes sont susceptibles d'affecter les performances d'une turbomachine : une dimension caractéristique (par exemple le diamètre de la roue D), la vitesse de rotation N, le débit massique de fluide $\dot{m}$, les états thermodynamiques à l'aspiration et au refoulement (pressions d'arrêt Pa et Pr, et enthalpies totales ha et hr).

Parmi ces 7 variables, interviennent 3 unités fondamentales (Masse, Longueur, Temps).

L'application du théorème de Vaschy-Buckingham (*Ce théorème établit que si une équation physique met en jeu n variables physiques, celles-ci dépendant de k unités fondamentales, alors il existe une équation équivalente mettant en jeu n-k variables sans dimension construites à partir des variables originelles*) permet de réduire à 7 - 3 = 4 le nombre de variables adimensionnelles caractéristiques du fonctionnement de la machine.

Les variables les plus couramment choisies sont :

1) un nombre de Mach relatif à la vitesse débitante Cf :

$$(M_a)_c = \frac{C_f}{C_s}$$

Avec $$C_f = \frac{\dot{m} V_a}{A} = \frac{4\dot{m} V_a}{\pi D^2} = \frac{4\dot{m} r T_a}{\pi D^2 P_a}$$

et Cs est la vitesse du son dans le fluide $C_s = \sqrt{\gamma r T_a}$ en assimilant le fluide à un gaz parfait

$$(M_a)_c = \frac{4\dot{m}\sqrt{r T_a}}{\pi D^2 P_a \sqrt{\gamma}}$$

2) un nombre de Mach relatif à la roue

$$(M_a)_u = \frac{U}{C_s}$$

Avec

$$U = \frac{\pi DN}{60}$$

$$(M_a)_u = \frac{\pi DN}{60\sqrt{\gamma r T_a}}$$

3) Le rapport des pressions d'arrêt d'entrée et de sortie $\frac{P_r}{P_a}$

4) L'efficacité isentropique de l'étage $\eta_s = \frac{(h_r)_s - h_a}{h_r - h_a}$ pour un compresseur

ou $\eta_s = \frac{h_r - h_a}{(h_r)_s - h_a}$ pour une turbine

$$\text{ou } \eta_s = \frac{h_r - h_a}{(h_r)_s - h_a} \quad \text{pour une turbine}$$

Lorsqu'on fixe le choix d'une machine et d'un fluide particulier, les nombres adimensionnels (Ma)c et (Ma)u deviennent proportionnels à des variables réduites d'expressions plus simples :

$(M_a)_c$ sera proportionnel à $\frac{\dot{m}\sqrt{T_a}}{P_a}$ qu'on appelle débit massique corrigé, et

$(M_a)_u$ sera proportionnel à $\frac{N}{\sqrt{T_a}}$ qu'on appelle vitesse de rotation corrigée

D'autres grandeurs adimensionnelles sont aussi couramment employées par les constructeurs : le facteur de débit φ et le facteur d'enthalpie ψ, ou encore les deux coefficients de Rateau μ et δ.

V-4-1-1. Le facteur de débit □

Il est naturel de s'intéresser aux deux nombres de Mach représentatifs des écoulements dans les machines, (Ma)c et (Ma)u. Le rapport de ces deux grandeurs, indépendant des propriétés du fluide, conditionne la forme du triangle des vitesses, et correspond à une première grandeur adimensionnelle : le facteur de débit □ qui permet d'assurer la similitude cinématique sur la totalité des limites des écoulements

$$\varphi = \frac{(M_a)_c}{(M_a)_u} = \frac{4\dot{m}\sqrt{rT_a}}{\pi D^2 P_a \sqrt{\gamma}} \times \frac{60\sqrt{\gamma r T_a}}{\pi D N}$$

$$\varphi = \frac{(M_a)_c}{(M_a)_u} = \frac{C_f}{U} = \frac{240\dot{V}_a}{\pi^2 N D^3} = \frac{240}{\pi}\delta$$

Ce facteur □ est proportionnel à une autre grandeur adimensionnelle très utilisée : le deuxième coefficient de Rateau

$$\delta = \frac{\dot{V}_a}{\pi N D^3}$$

IV-4-1-2. Le facteur d'enthalpie Ψ

Les turbomachines ont pour fonction, soit de détendre un fluide pour produire de l'énergie, soit de fournir de l'énergie à un fluide. Les écoulements étant proches de l'adiabatique, du fait des faibles surfaces d'échange et des vitesses importantes, il est logique de prendre comme énergie de référence le travail de détente ou de compression isentropique |Δhs|.

$$|\Delta h_s| = mC_p(T_r - T_a)$$

Avec $C_p - C_v = mR;\ \frac{C_p}{C_v} = \gamma;\ PV = nRT$ et $T_r P_r^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_a a^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$

On aura $$|\Delta h_s| = \frac{1}{\gamma-1} P_a V_a \left| \left(\left(\frac{P_r}{P_a}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right|$$

Le rapport de cette énergie de référence à une énergie cinétique bien choisie constitue une grandeur adimensionnelle intéressante. Une première idée consiste à mettre en évidence dans cette formule la vitesse du son Cs. On obtient :

$$\frac{|\Delta h_s|}{1/2 C_s^2} = \frac{2}{\gamma - 1}\left|\left(\left(\frac{P_r}{P_s}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right)\right| = \Omega$$

Mais on prend en général cette énergie cinétique égale à 1/2 U2, correspondant à l'énergie cinétique maximale dans le rotor. On définit ainsi le facteur d'enthalpie ψ, égal au double du premier coefficient de Rateau μ.

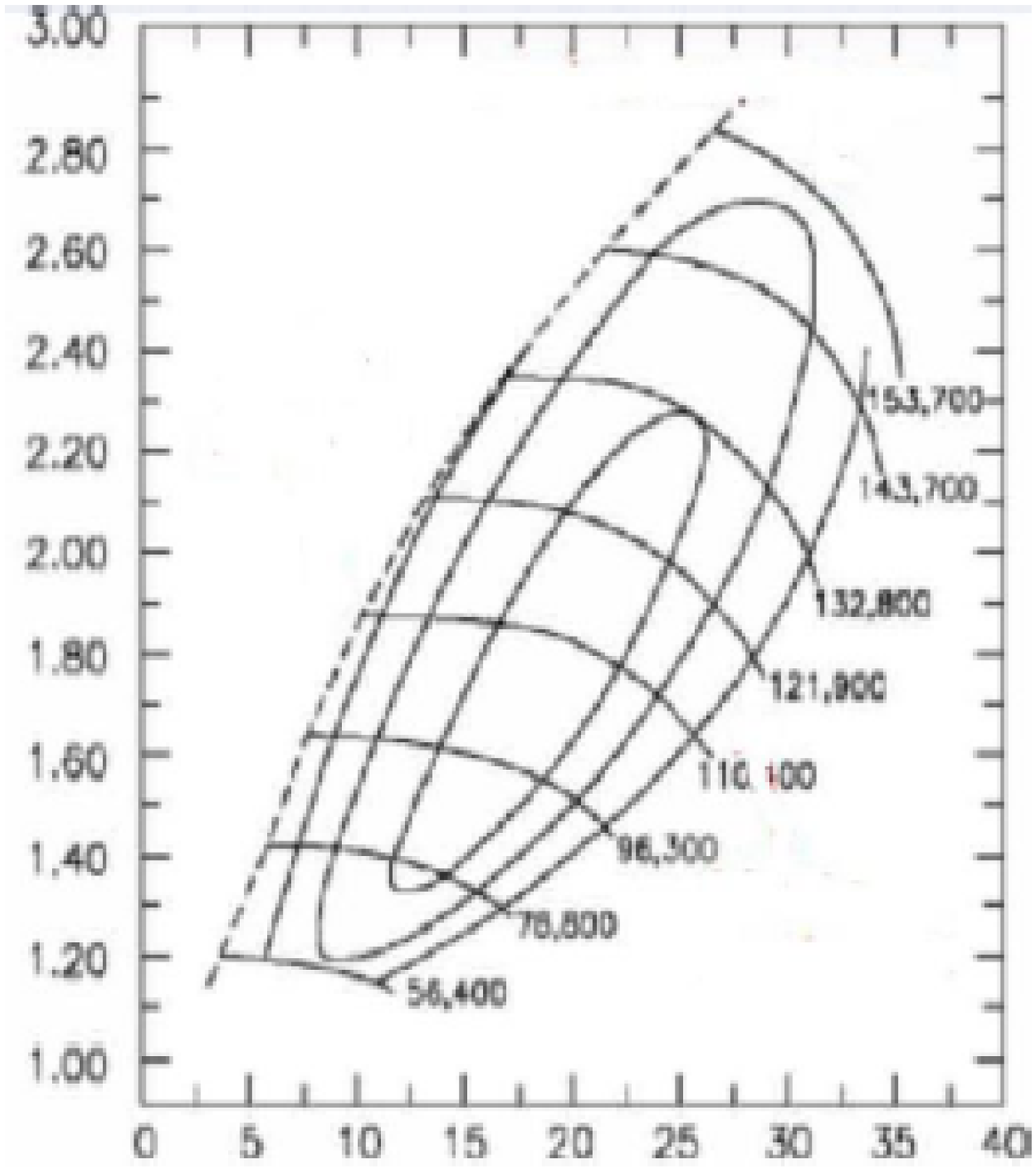
$$\Psi = \frac{|\Delta h_s|}{1/2 C_s^2} = 2\mu = \frac{\Omega}{(M_a)_u^2}$$

V-4-2. Présentation générale des performances d'une machine

Dans la pratique, on présente le plus souvent les performances d'une machine sous la forme de courbes caractéristiques (ou cartographies) $\frac{p_r}{p_a} = f(\dot{m}_c)$ pour des valeurs constantes de la vitesse de rotation corrigée Nc :

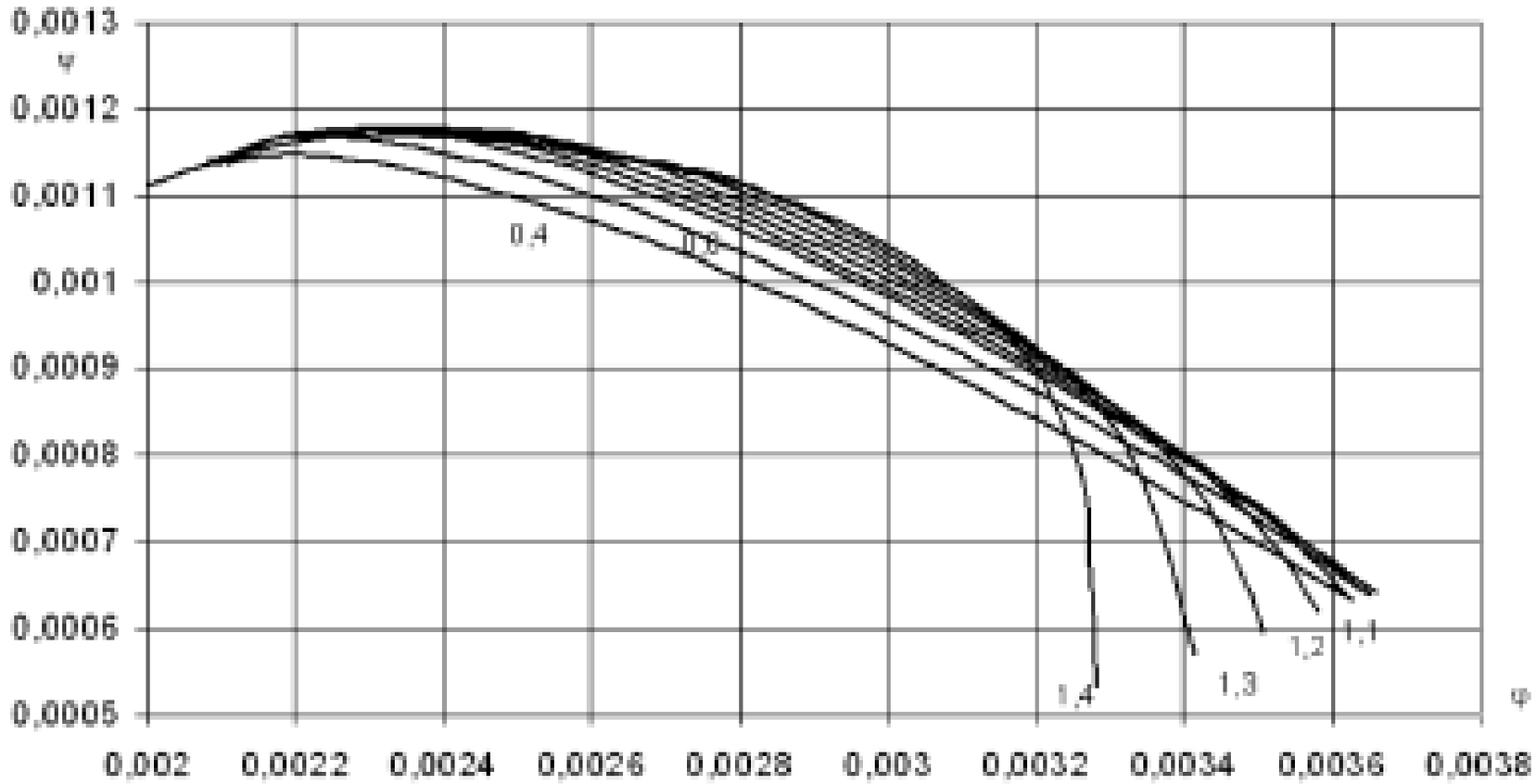
$\frac{P_r}{P_a}$ est le rapport des pressions d'arrêt d'entrée et de sortie

Pour les turbocompresseurs, c'est le débit massique corrigé $\dot{m}_c$ ou le facteur de débit φ qui est utilisé en abscisse. En ordonnée, on reporte d'une part le rapport de pression Pr/Pa ou le facteur d'enthalpie ψ ou Ω, et d'autre part le rendement isentropique. La vitesse de rotation corrigée est encore reprise en paramètre. La figure IV.5. nous montre une cartographie de compresseur du turbo T3 trim 60 de Garrett. En abscisse, on trouve le débit traversant le turbo en livre/minute, et en ordonné se trouve le rapport entre la pression sortie compresseur et l'entrée.



Cartographie de compresseur du turbo T3 trim 60

Les représentations de la cartographie d'un tel turbocompresseur dans les autres repères s'obtiennent par simple changement de variable en utilisant les formules précédentes. La représentation dans un repère (ψ,φ) de ces caractéristiques conduirait à la figure suivante



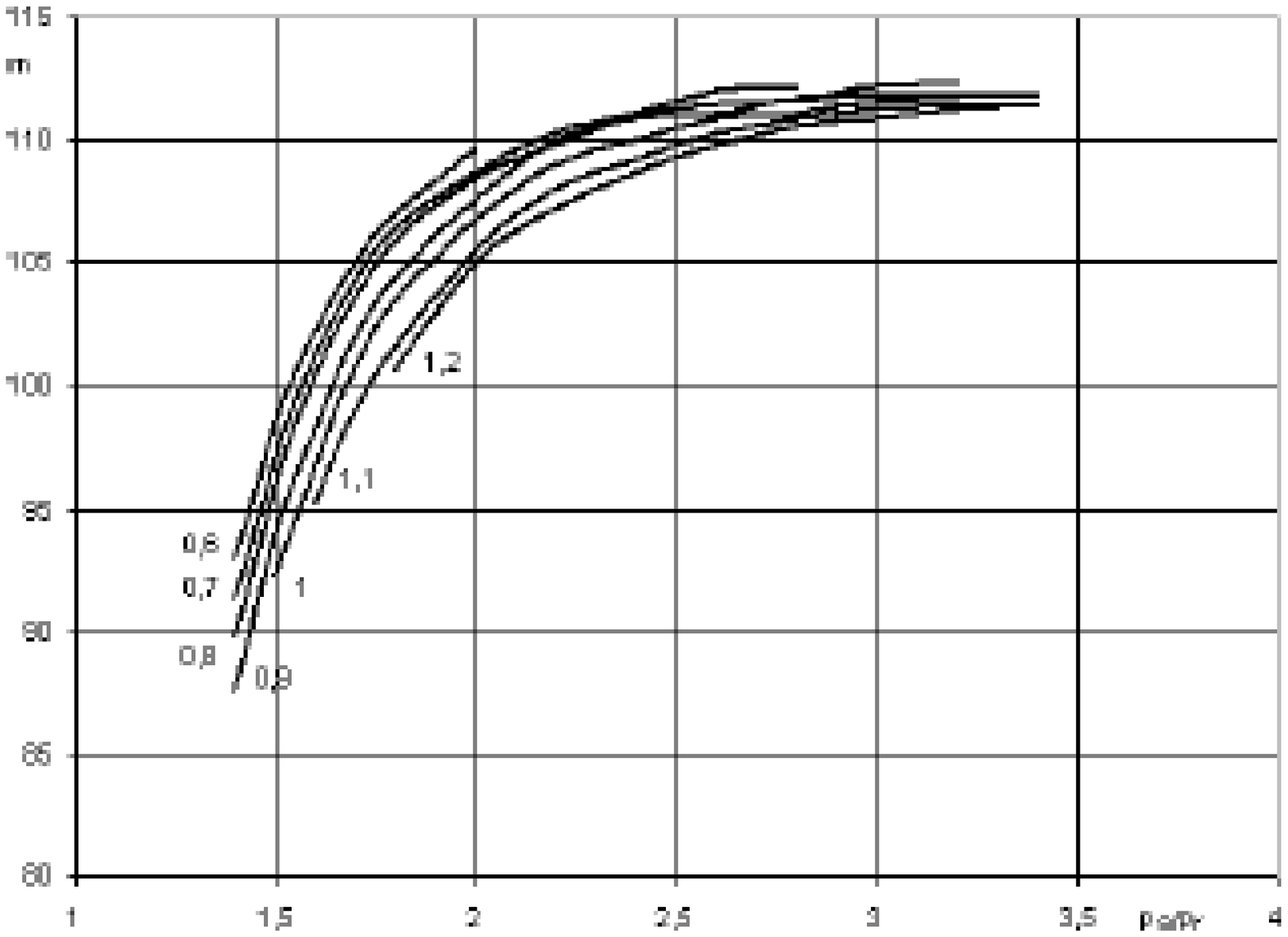
Caractéristiques dans le repère (ψ,φ)

V-5. Cartographies de turbines

Dans le cas d'une turbine, bien qu'il soit aussi possible de retenir le même repère que pour les turbocompresseurs, c'est généralement le rapport de pression qui est utilisé en abscisse. En ordonnée, on trouve le débit massique corrigé ou l'efficacité isentropique de la machine.

Le paramètre des courbes est encore la vitesse de rotation corrigée, mais elle ne joue ici qu'un rôle secondaire : ce n'est que lorsqu'on veut très fortement réduire le rapport de pression ou la vitesse de rotation que les performances tendent à se dégrader. Cette souplesse tient à la stabilité d'écoulement dans les aubages liés au gradient de pression qui y règne.

La figure suivante donne l'allure des caractéristiques d'une turbine aéronautique bi-étagée, pour différentes vitesses de rotation.


115
m
110
105
100
95
90
85
80
1
1,5
2
2,5
3
3,5
4
p suPr
1,2
1,1
1
0,9
0,8
0,7
0,6

V-6 Adaptation moteur – turbo

Le moteur suralimenté par turbocompresseur est vulnérable à basse vitesse de rotation en pleine charge car le faible débit de gaz dans la turbine se traduit par un manque d'énergie et donc une pression d'air trop faible par rapport aux besoins du moteur. Dans tous les cas de suralimentation d'un moteur de traction routière, on favorisera l'adaptation du turbocompresseur au régime de couple maximal, éventuellement à une vitesse inférieure et à plein couple.