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.

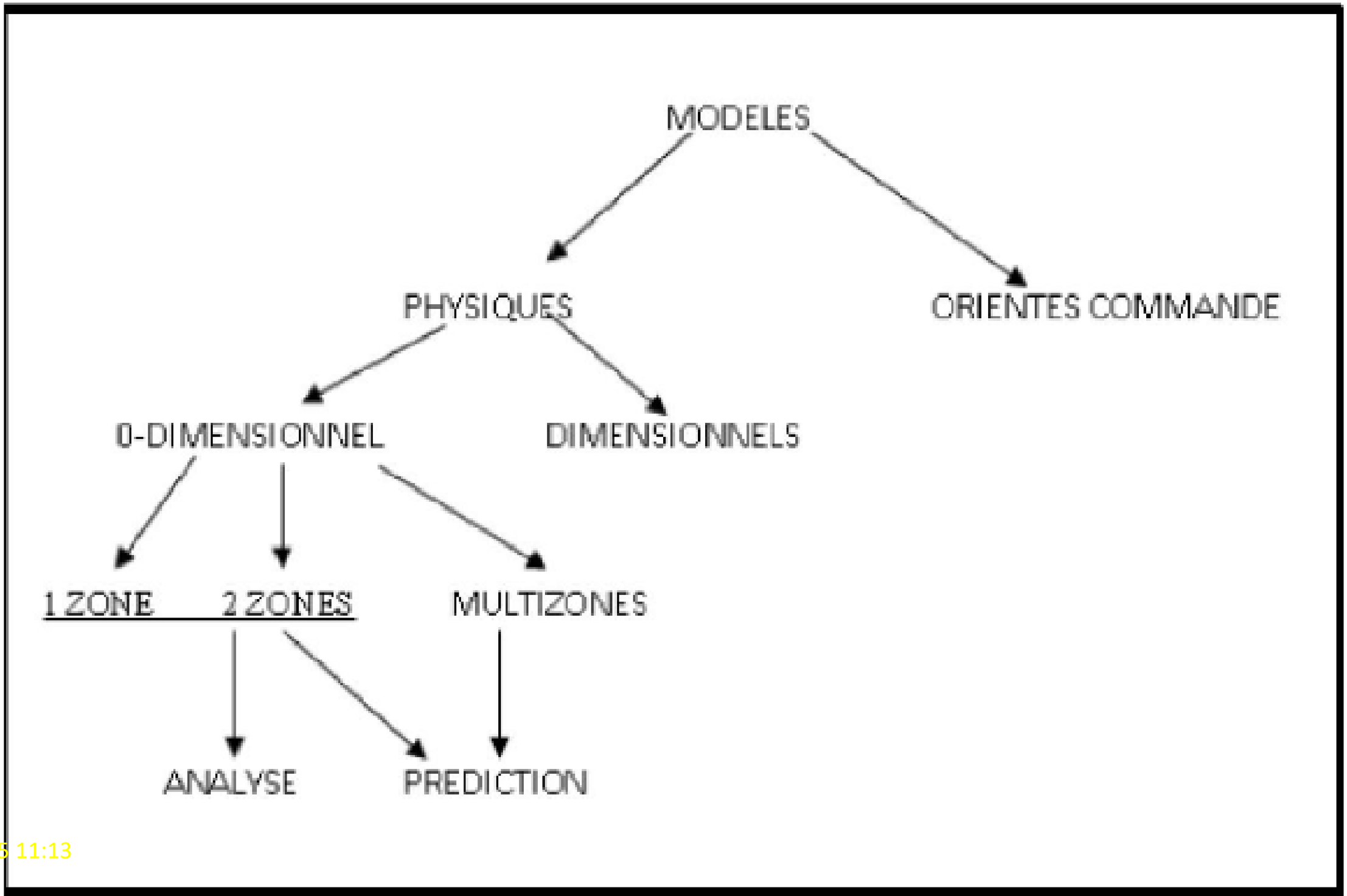
في هذه الفئة من النماذج ، يجب التمييز بين ، من ناحية ،

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:

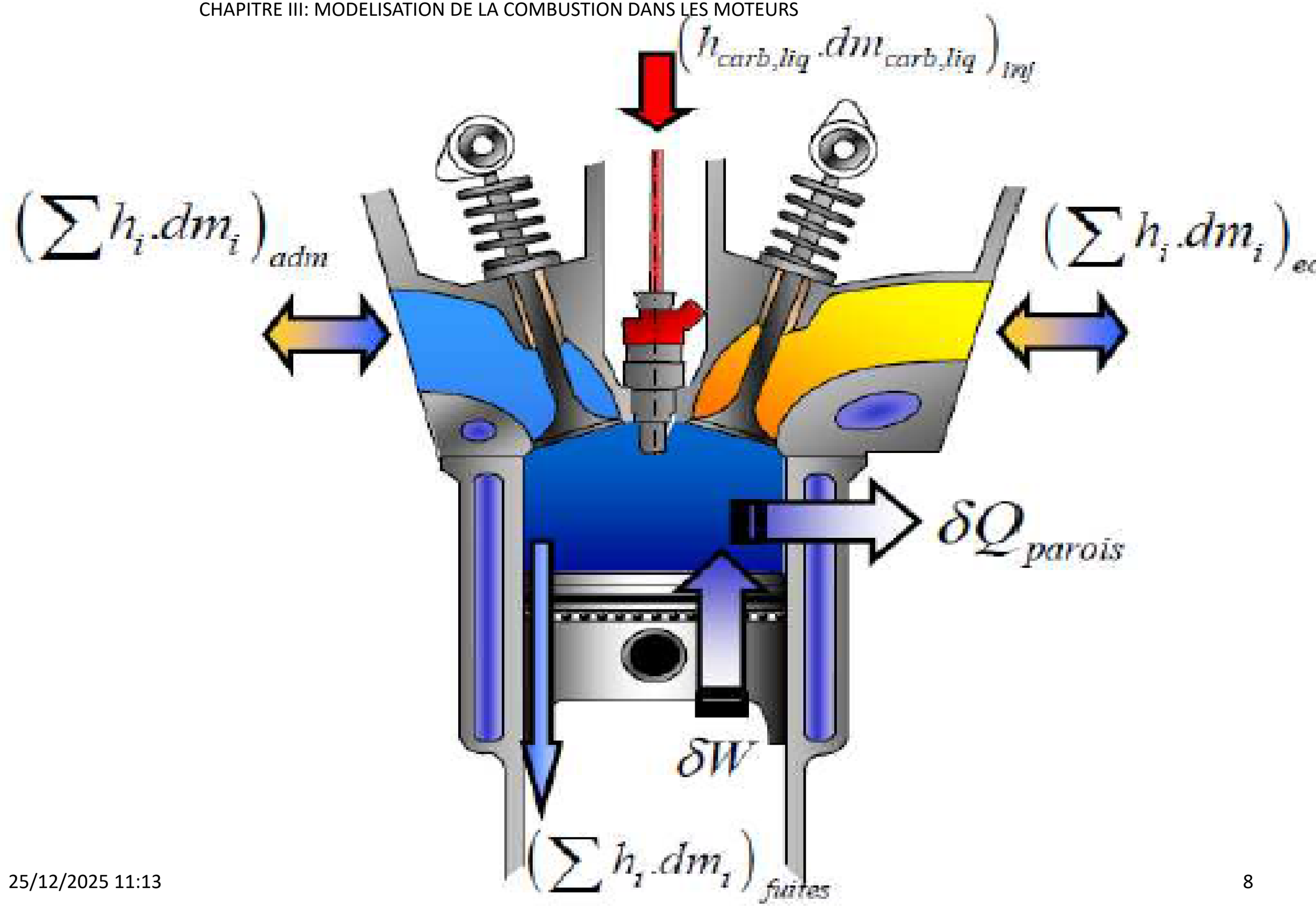
- **Heat transfers to the walls** $\mathrm{d}Q_{parois}$ **,**
- **Work performed by the piston on the system** $\mathrm{d}W$ **,**
- **The enthalpy change induced by the various mass transfer mechanisms such as liquid fuel injection.**

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

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.

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

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

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

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

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

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

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

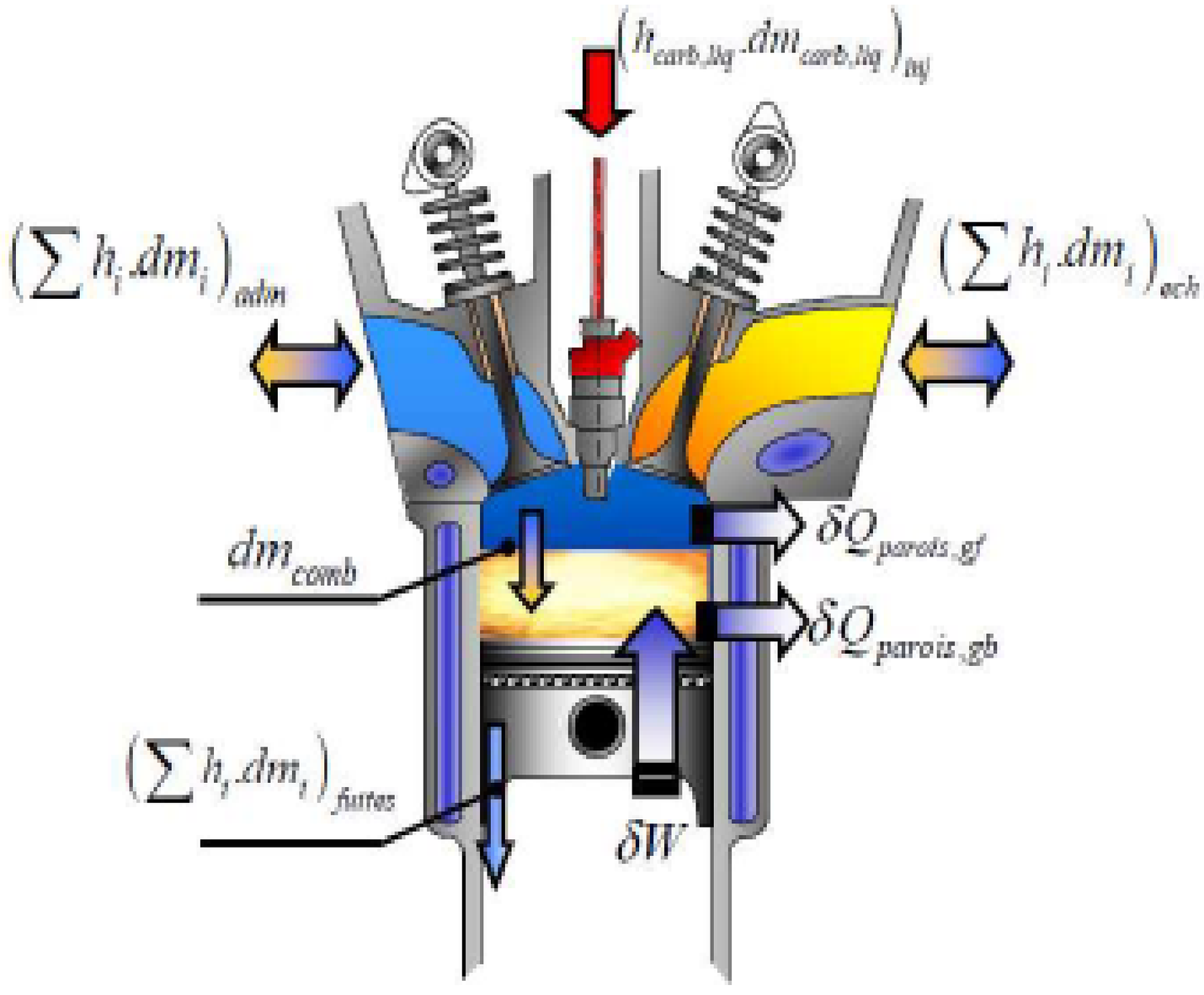
The detailed mathematical formulation of the two-zone thermodynamic model consists of a system of 7 algebraic and differential equations.

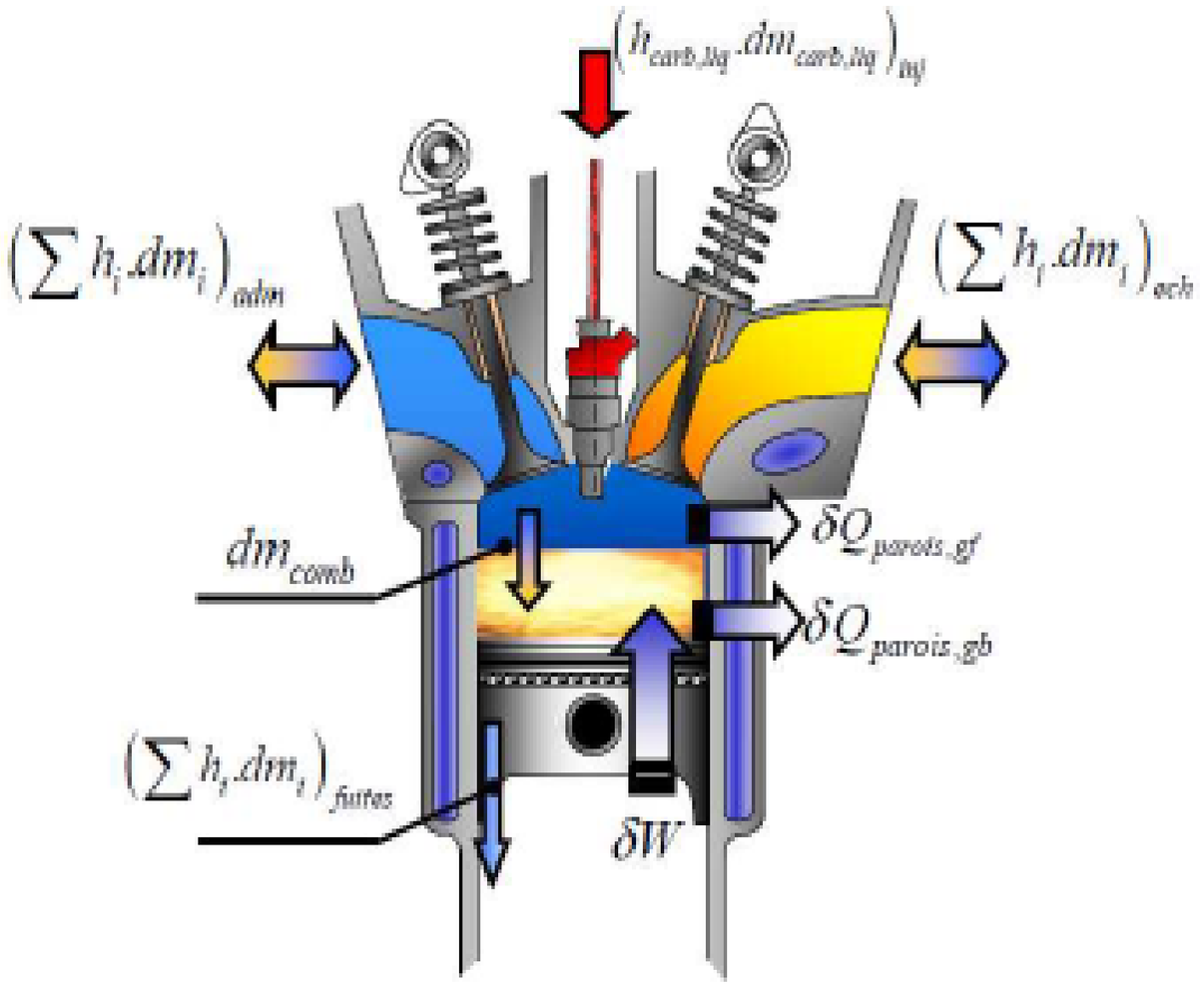
We will find for each zone;

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.