

SFT 30 mars 2006

# MODELISATION SYSTEME APPLIQUEE A L'OPTIMISATION ENERGETIQUE DES MOTEURS THERMIQUES

Laboratoire d'Etudes Thermiques UMR CNRS 6608

Equipe Analyse Système et Optimisation

ENSMA Futuroscope

A.Alexandre, Y. Bertin, P. Lagonotte, [jean-marie.petit@ensma.fr](mailto:jean-marie.petit@ensma.fr),  
[djamel.karmed@lcd.ensma.fr](mailto:djamel.karmed@lcd.ensma.fr)

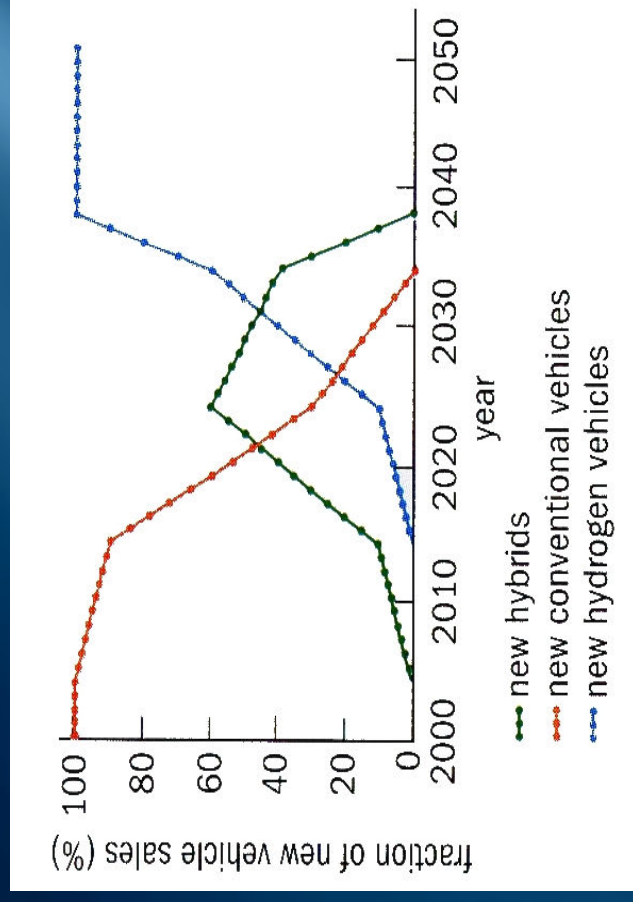
PSA : Ludovic Tomaselli, Nawal Jaïjal

TSR Poitiers (Thermic Simulation Recherche)

## Plan de l'exposé

- Contexte d'optimisation
- Travaux du laboratoire
- Architecture de l'outil numérique et couplage des modèles
- Modélisation thermique nodale du système et optimisation énergétique du moteur
- Modélisation thermodynamique de la combustion et exemples de résultats
- Conclusion

# Contexte d'optimisation

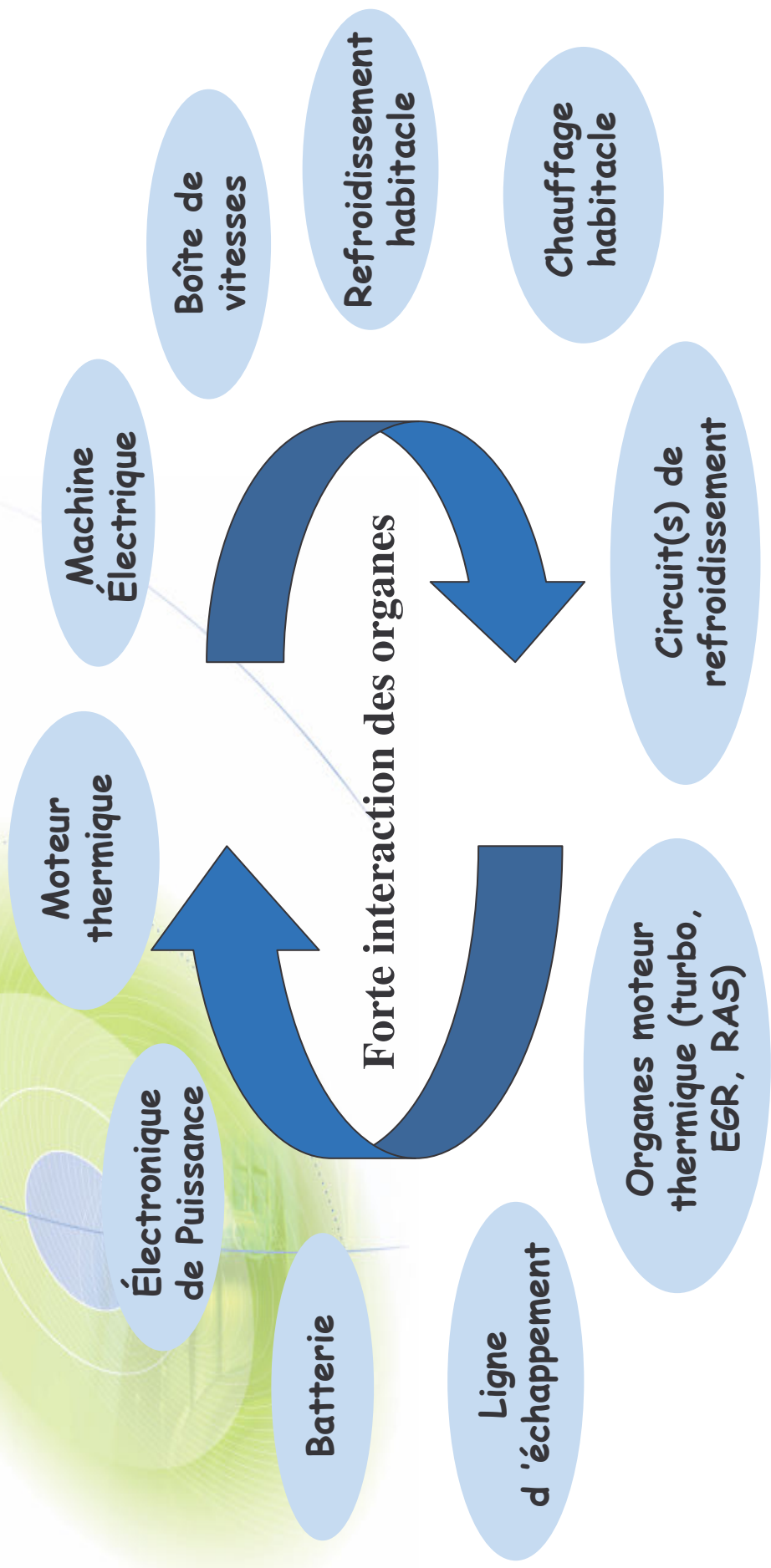


Réf : Fuel cell review  
06/2004

**Mots clés :**

**consommation – émissions**

# Contexte d'optimisation



GMP hybride

## Travaux du LET ENSMA

Thèses :

1997 : S. Ravary (modèle F8Q Renault)

2000 : L. Tomaselli (modèle DW10ATED PSA)

2004 : C. Rouaud (CIFRE Renault)\*

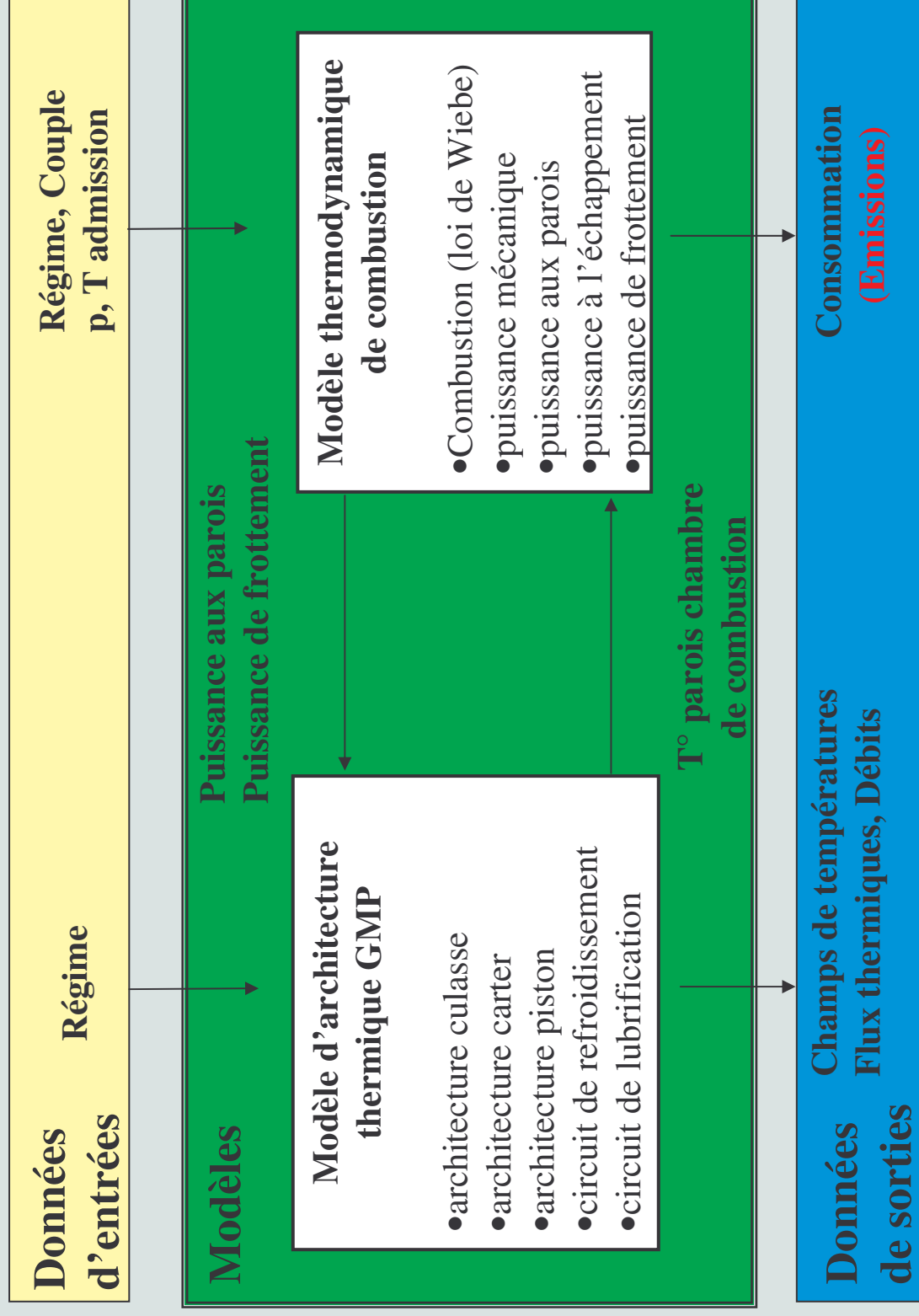
2005 : N. Dollinger (CIFRE PSA)\*

200x : N. Jaljal (CIFRE PSA)\*

.../...

\* Confidentialité des travaux

# Architecture de l'outil numérique pour le moteur thermique



# Couplage des modèles

Problème : Constantes de temps entre les phénomènes

Thermique → Seconde

Combustion → °Vilebrequin

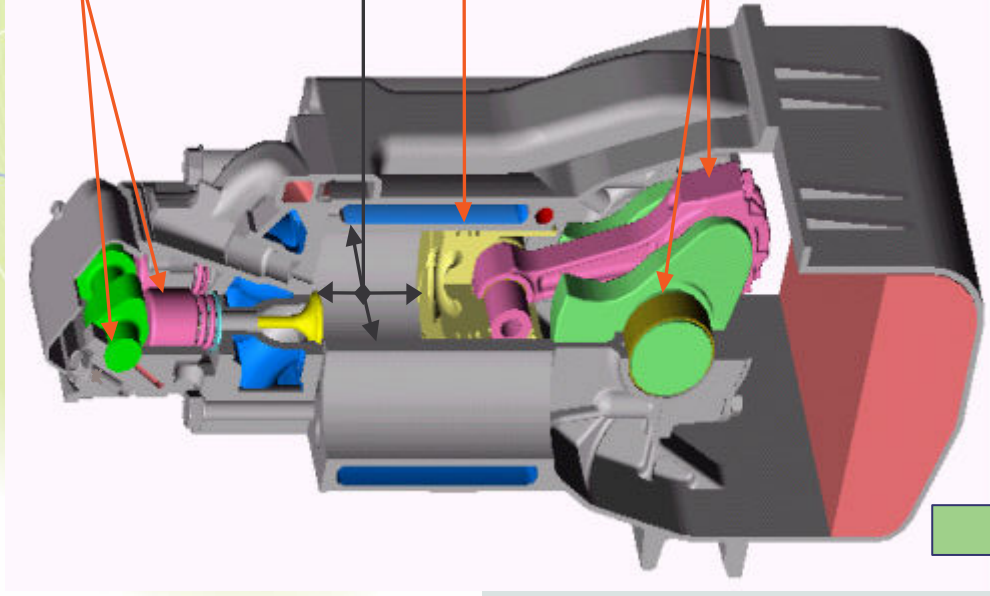
Hypothèse Invariance de la température de paroi durant le cycle

$$\frac{\partial T_p}{\partial \theta} = 0$$

Schéma logiciel



# Description du moteur thermique



Frottements distribution

Flux aux parois  
(Combustion, Woschni)  
Frottements

Piston/Segment/Chemise

Frottements vilebrequin

1) Décomposition nodale  
masses métalliques  
eau  
huile  
gaz  
air sous capot

+

2) Sources de chaleur

+

3) Conductances entre les nœuds  
Convection  
Conduction  
Rayonnement  
Transport (fluide)

Températures et flux : eau, huile, ...

Modèle exploité pour l'étude de la montée en température du moteur sur véhicule



# Méthode nodale

|                 |                     |                      |
|-----------------|---------------------|----------------------|
| <b>Analogie</b> | <b>Électrique</b> → | <b>Thermique</b>     |
|                 | Potentiel →         | Température          |
|                 | Intensité →         | Flux thermique       |
|                 | Capacité →          | Capacité calorifique |

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum G_{ij} (T_j - T_i) + \Phi_i$$

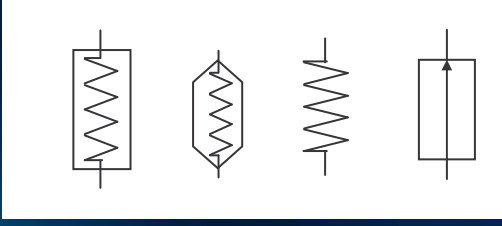
Nature de l'échange      Expression du flux      Expression de la conductance

**Conduction**       $\phi_{ij}^{cd} = \frac{\lambda S_{ij}}{L_{ij}} (T_i - T_j)$        $G_{ij}^{cd} = \frac{\lambda S_{ij}}{L_{ij}}$

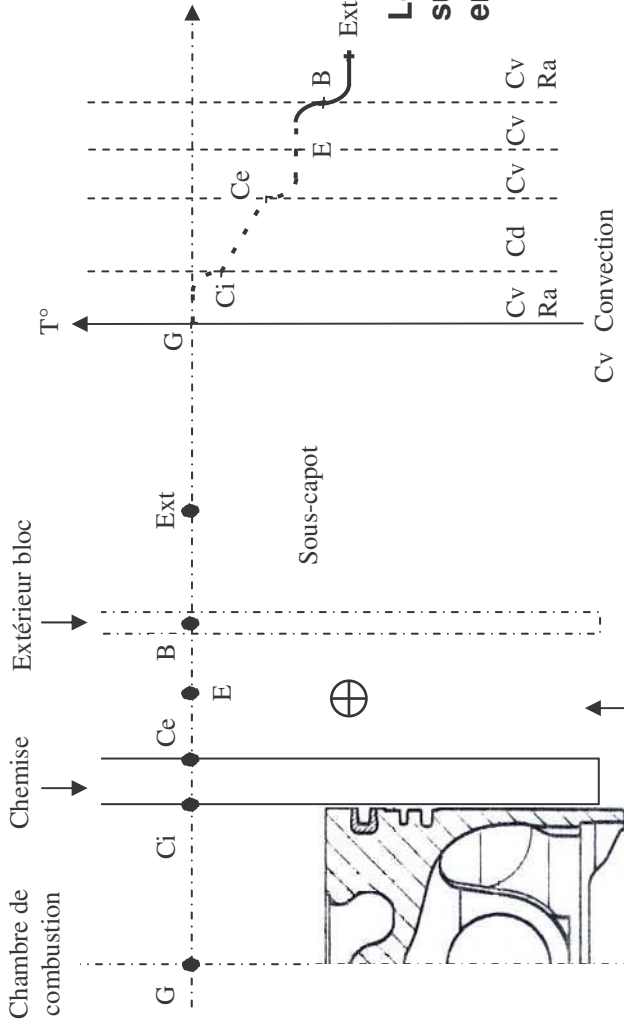
**Rayonnement (direct entre corps gris)**       $\phi_{ij}^r = \epsilon_i \epsilon_j \sigma S_i F_{ij} (T_i^4 - T_j^4)$        $G_{ij}^r = \epsilon_i \epsilon_j \sigma S_i F_{ij} (T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j)$

**Convection**       $\phi_{ij}^{cv} = h S_{ij} (T_i - T_j)$        $G_{ij}^{cv} = h S_{ij}$

**Écoulement de fluide**       $\phi_{ij}^f = \dot{m} c (T_i - T_j)$        $G_{ij}^f = \dot{m} c$



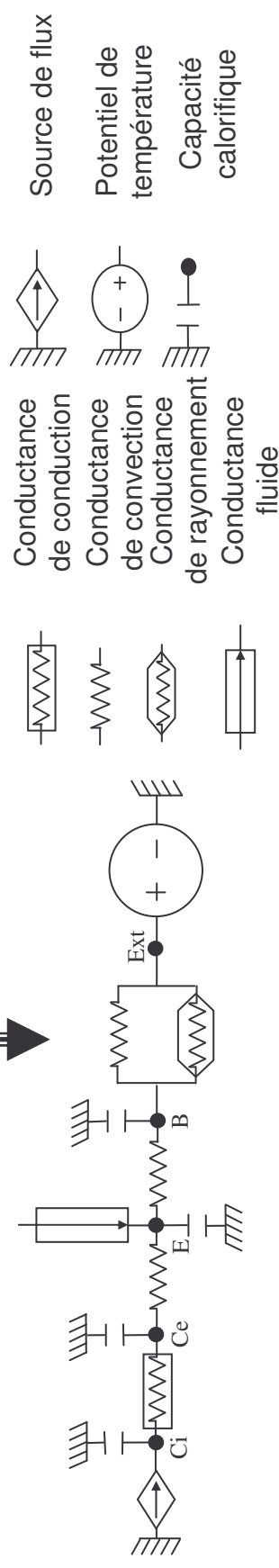
# Modèle d'architecture : Principe



Les différentes conductances sont calculées sur la base de corrélations semi-empiriques, empiriques ou analytiques

Cv Convection  
Cd Conduction  
Ra Rayonnement

Noyau d'eau

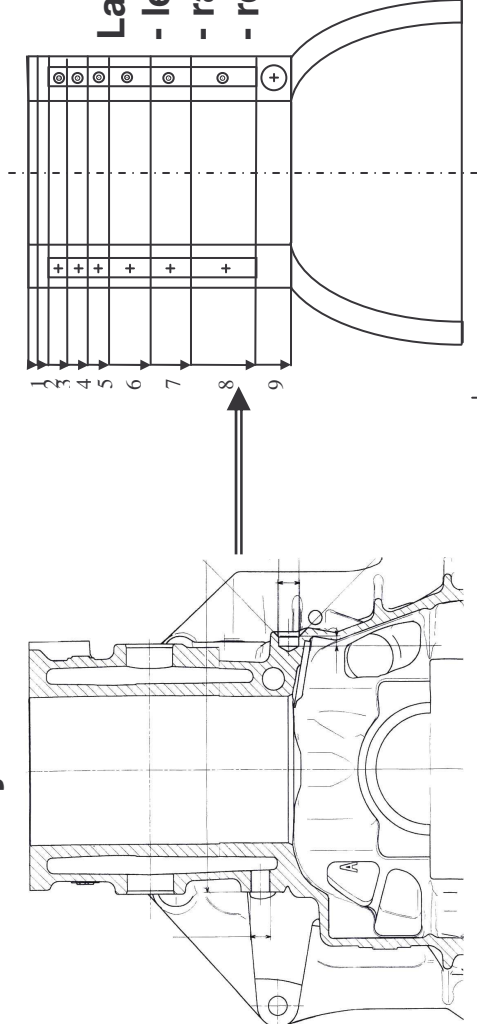


Conductance de conduction  
Conductance de convection  
Conductance de rayonnement  
Conductance fluide

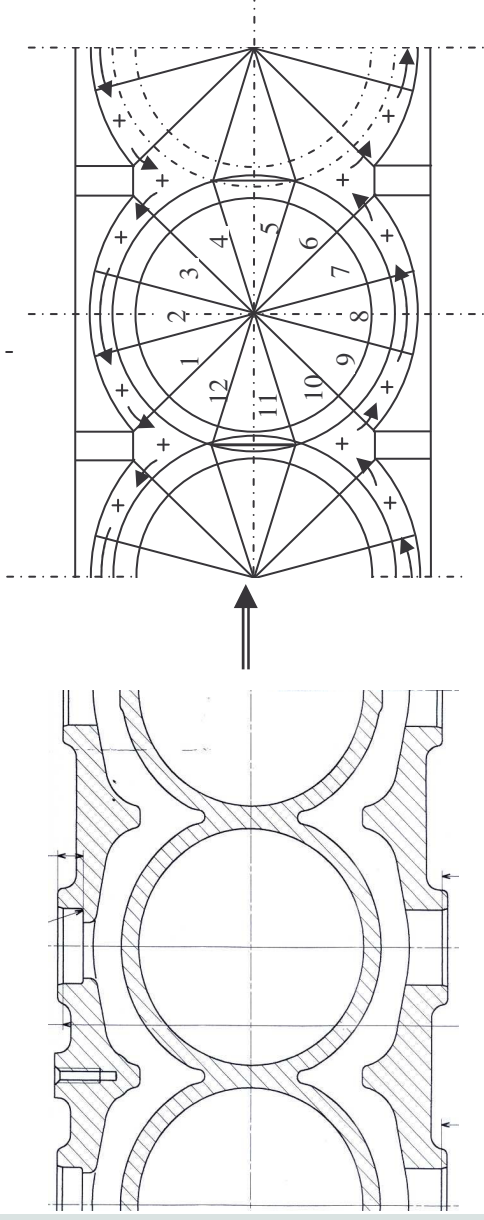
Source de flux  
Potentiel de température  
Capacité calorifique

# Modèle d'architecture : Discretisation

## Carter- cylindre

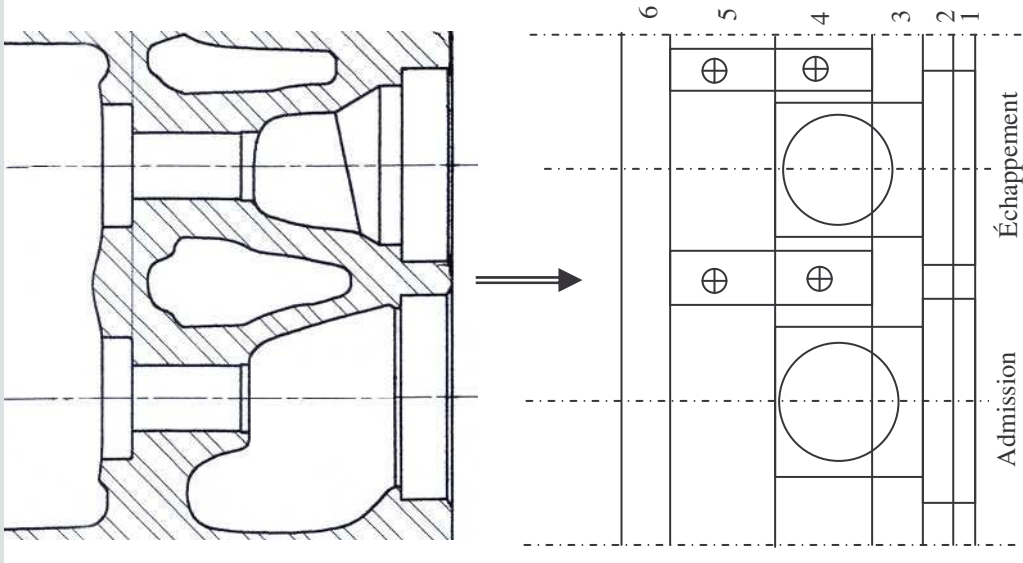
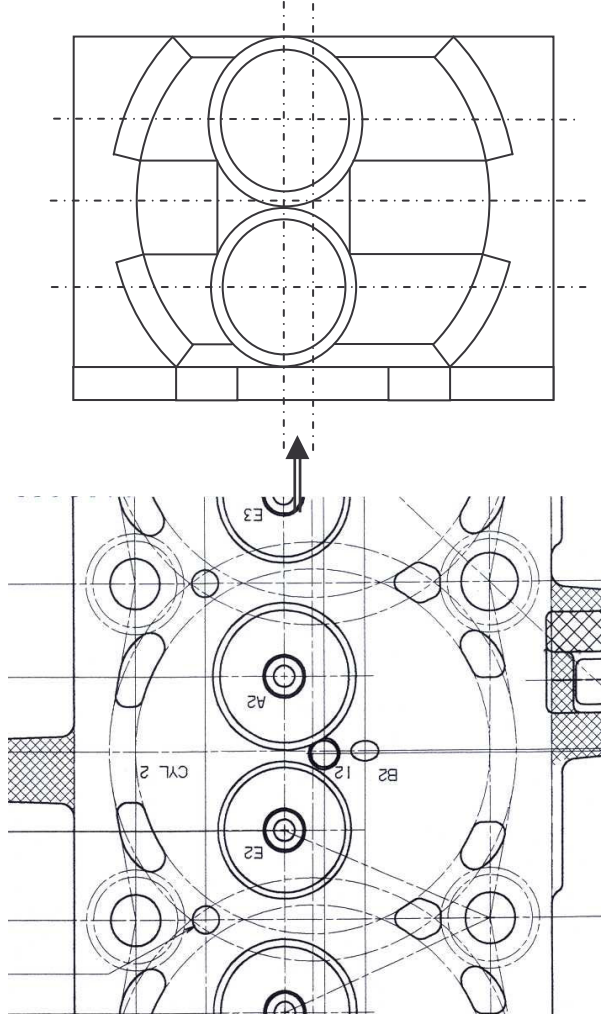


- La discrétisation géométrique prend en compte:
- les cotes géométriques principales
  - raffinement dans les zones de fort gradient
  - respect des surfaces d'échanges et des masses



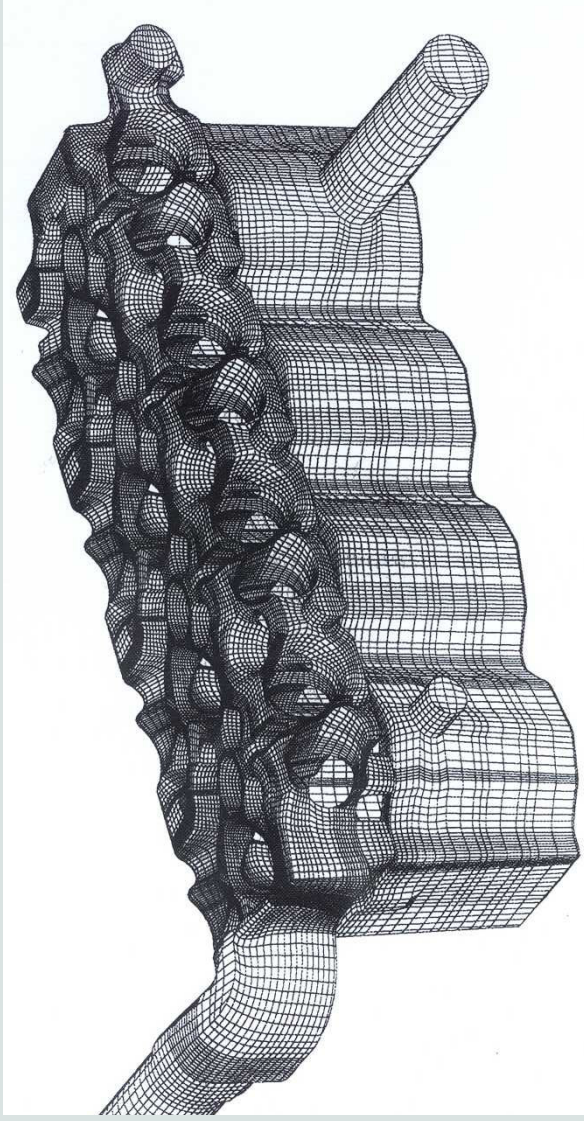
# Modèle d'architecture : Discretisation

Culasse



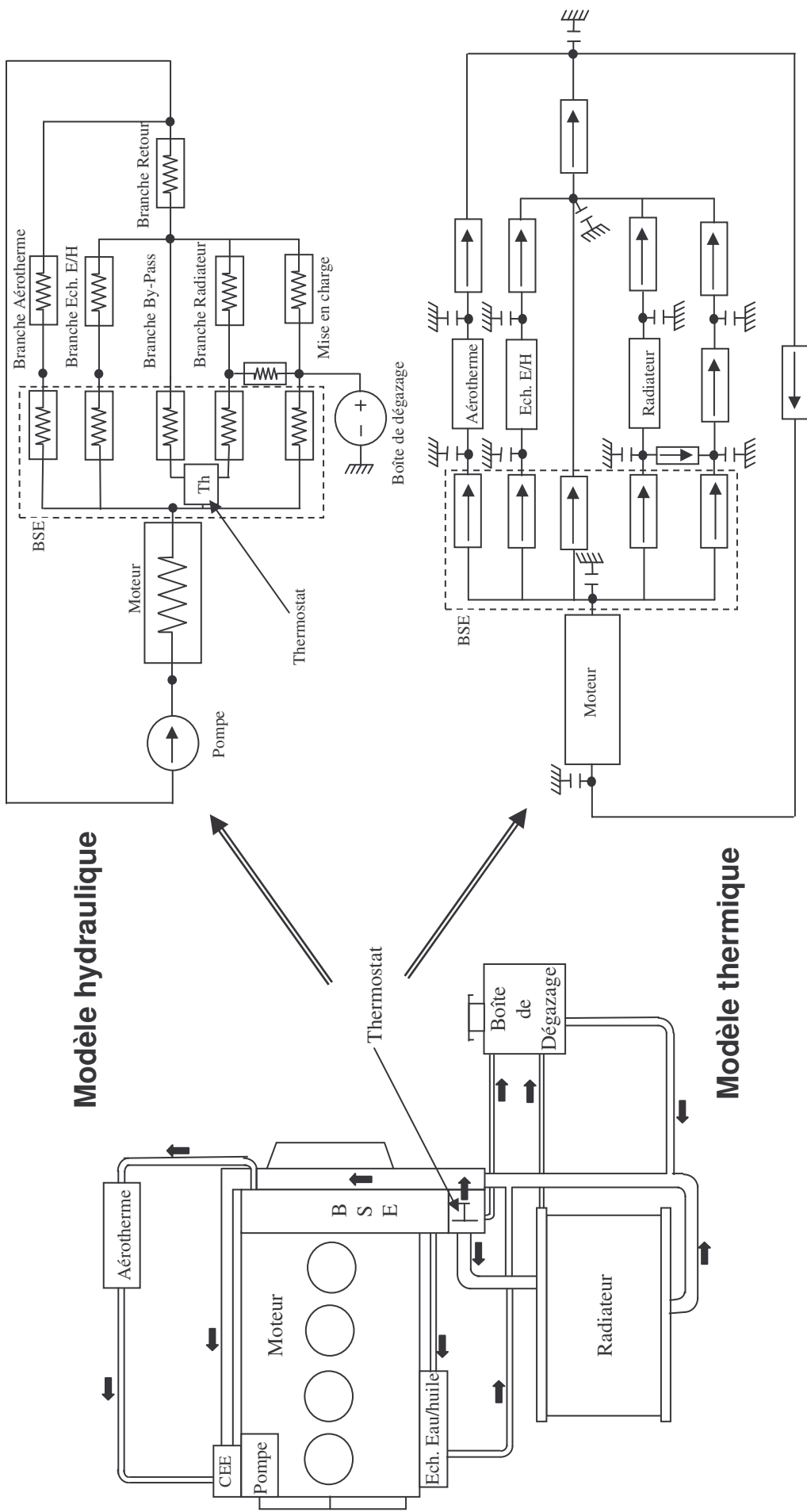
Complexité géométrique du noyau d'eau

## Modèle d'architecture : Traitement de l'hydraulique interne

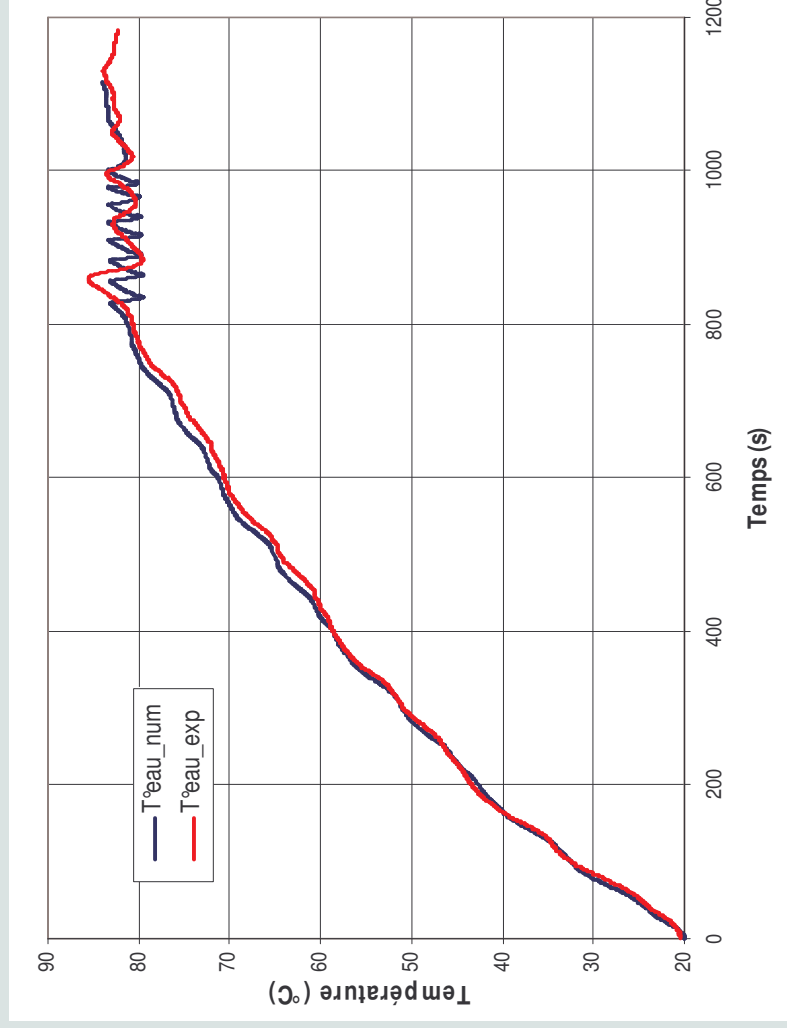


Maillage 3D du noyau d'eau  
sous FIRE® 400.000 mailles

# Modèle d'architecture : Circuit de refroidissement

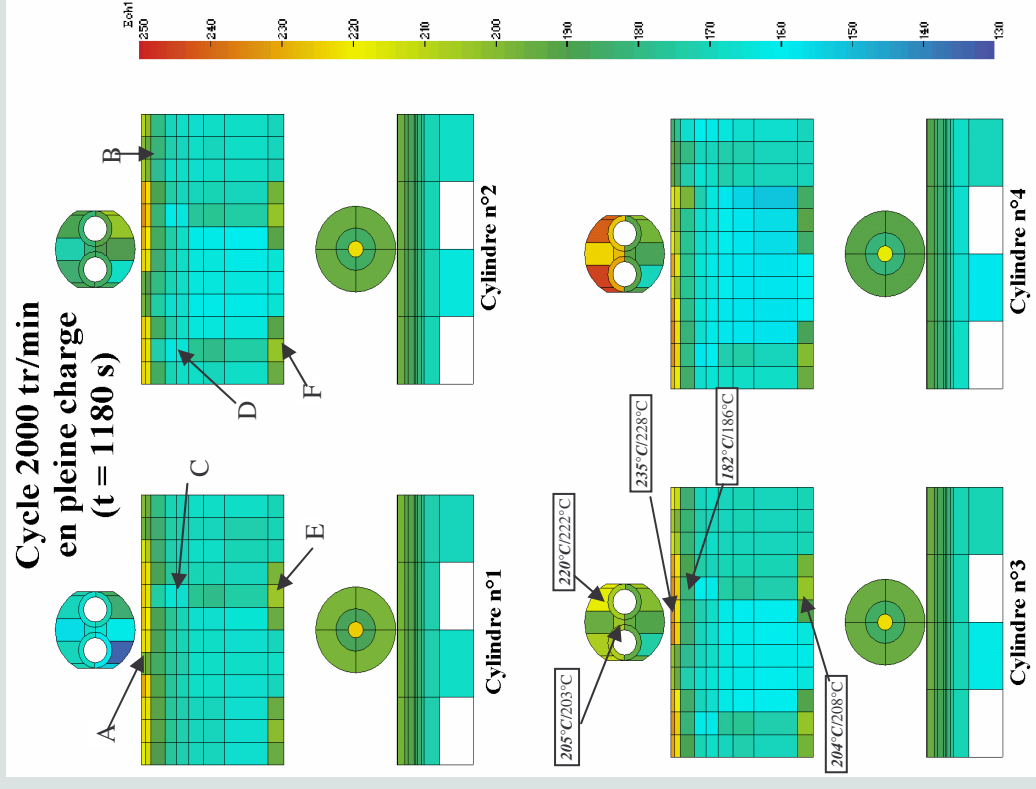


# Exemple de validation des résultats



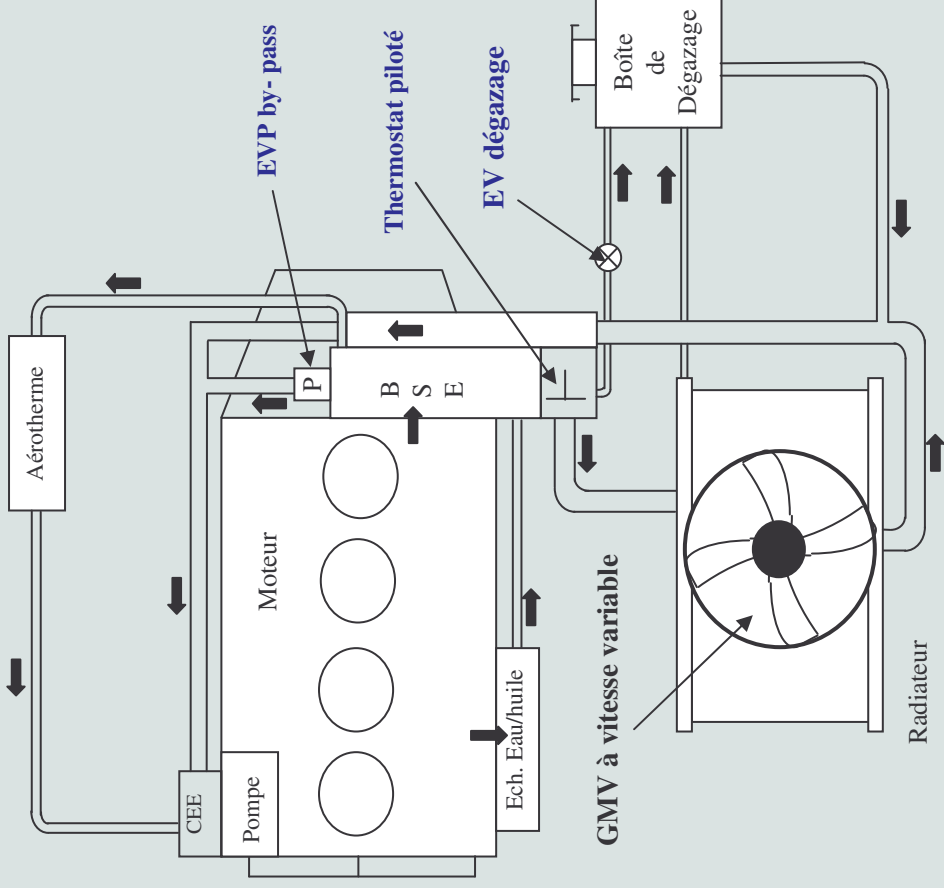
Aspect transitoire

(démarrage à froid : montée en température du moteur)



thermométrie numérique  
(température parois chambre)

# Optimisation du système



## Actions envisagées :

**Contrôle du débit d'eau**

**Contrôle du volume d'eau**

**Contrôle de la température d'eau**

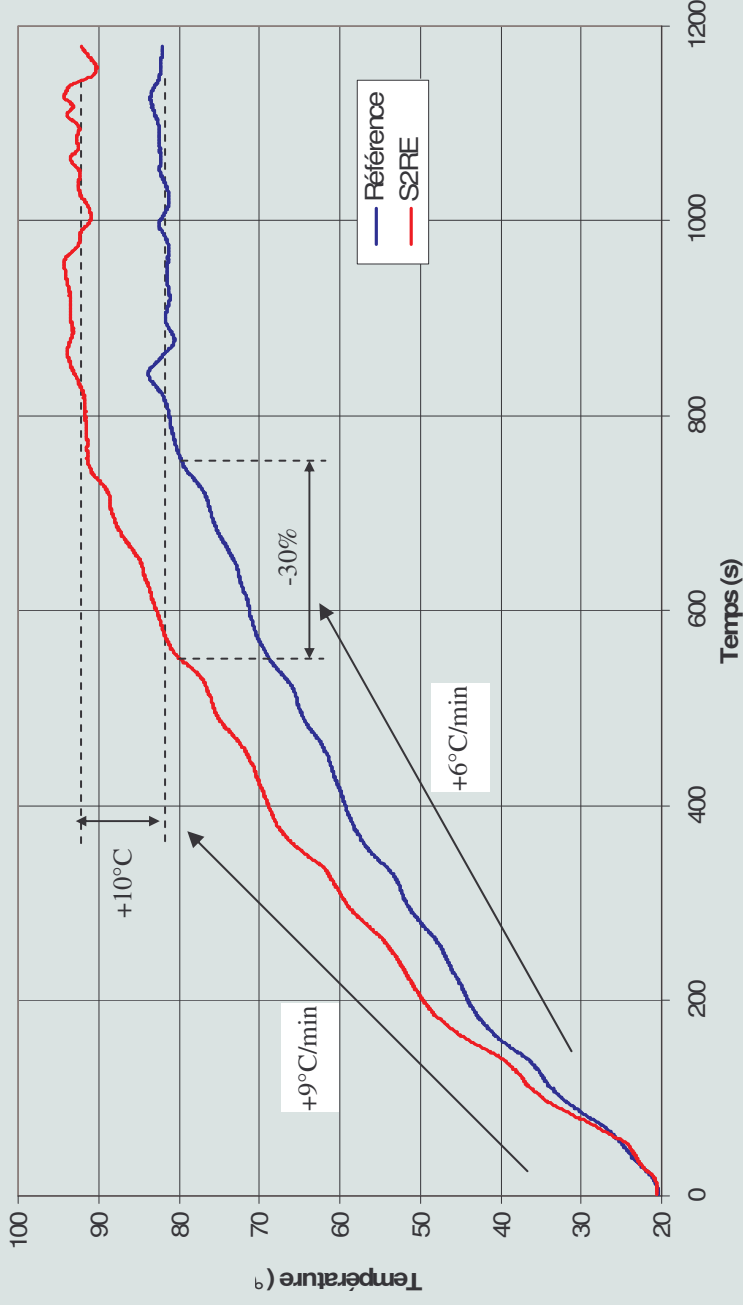
## Evolution technologique du circuit :

- 1 Électrovanne proportionnelle by-pass pour le contrôle du débit interne moteur
- 1 Électrovanne on/off de dégazage pour le contrôle du volume d'eau en transitoire
- 1 thermostat piloté et 1 GMV à vitesse variable pour le contrôle de la température d'eau



# Mesure des performances et homologation

## Évolutions des paramètres thermiques (sortie moteur)



Cycle normalisé ECE&EUDC

## Réduction de 30% de la phase de montée en température du moteur

## Mesure des performances et homologation

### Consommation

Sur cycle ECE&EUDC

|                      | Consommation (l/100km) |         |              |
|----------------------|------------------------|---------|--------------|
|                      | 1 ECE                  | 234 ECE | EUDC         |
| Référence            | 9,63                   | 7,90    | 4,83         |
| Evolution            | 9,13                   | 7,56    | 4,67         |
| Ecart /Référence (%) | -5,19                  | -4,30   | -3,31        |
|                      |                        |         | Mixte        |
|                      |                        |         | 6,13         |
|                      |                        |         | 5,89         |
|                      |                        |         | <b>-3,92</b> |

# Mesure des performances et homologation

## Émissions polluantes

| CO                   | (en g/km) |         |            |
|----------------------|-----------|---------|------------|
|                      | 1 ECE     | 234 ECE | EUDC Mixte |
| Référence            | 2,243     | 1,072   | 0,030      |
| Evolution            | 1,930     | 0,767   | 0,025      |
| Ecart /Référence (%) | -14,0     | -28,4   | -19,3      |
| <b>-22,4</b>         |           |         |            |

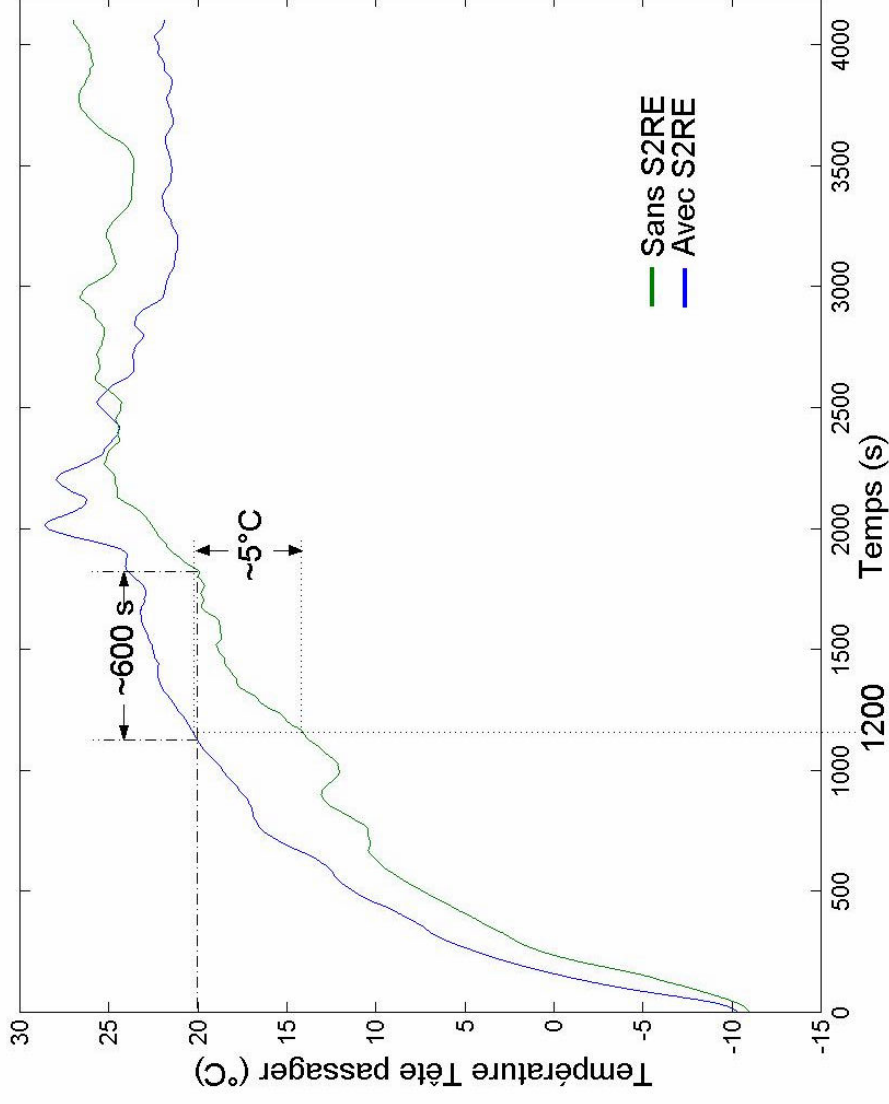
| HC                   | (en g/km) |         |            |
|----------------------|-----------|---------|------------|
|                      | 1 ECE     | 234 ECE | EUDC Mixte |
| Référence            | 0,169     | 0,113   | 0,014      |
| Evolution            | 0,134     | 0,076   | 0,009      |
| Ecart /Référence (%) | -20,5     | -32,5   | -34,0      |
| <b>-29,1</b>         |           |         |            |

| NOx                  | (en g/km) |         |            |
|----------------------|-----------|---------|------------|
|                      | 1 ECE     | 234 ECE | EUDC Mixte |
| Référence            | 0,992     | 0,703   | 0,578      |
| Evolution            | 1,080     | 0,742   | 0,628      |
| Ecart /Référence (%) | +8,9      | +5,5    | +8,6       |
| <b>+7,9</b>          |           |         |            |

# Mesure des performances et homologation

## Impact sur l'habitacle



Montée en température habitacle plus rapide (gain de plusieurs minutes pour atteindre 20°C)

# Modélisation thermodynamique de la combustion

- **Modèle à 1 zone :**
  - loi de Wiebe
  - prédictif
- **Modèle multizones :**
  - combustion par « tranches »
  - optimisation des paramètres moteur (Richesse, AA, ...)
  - prédiction des émissions

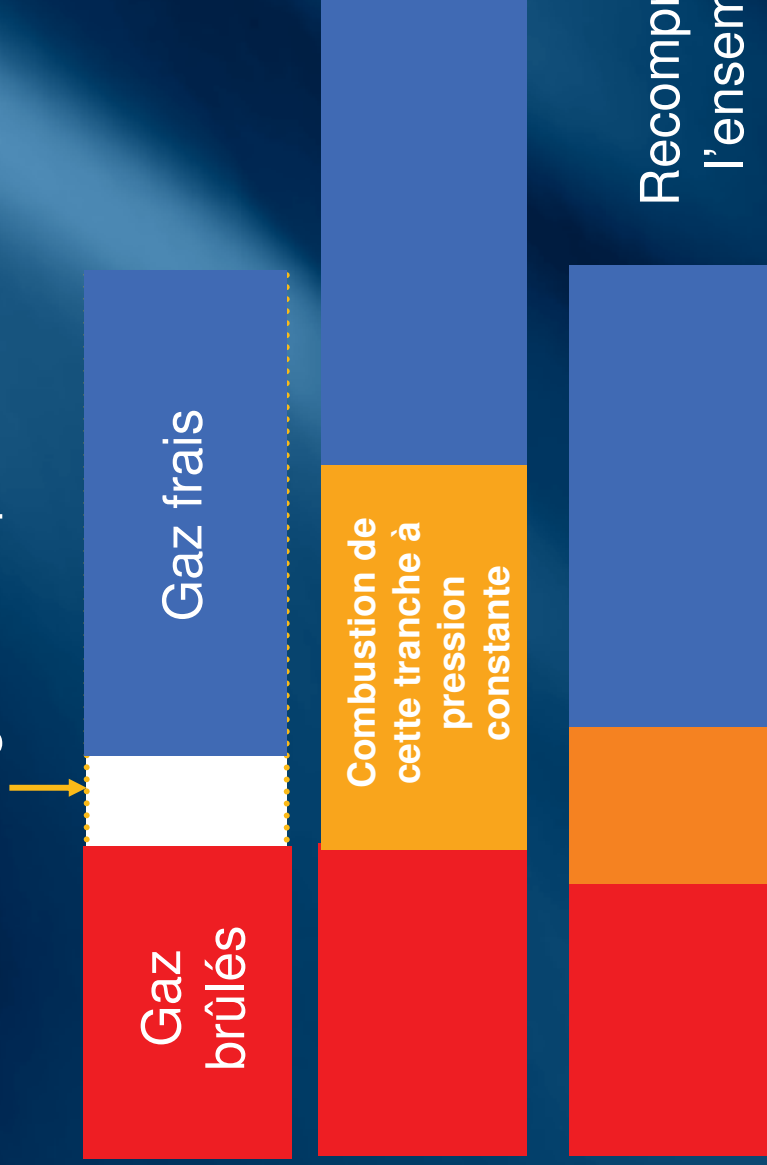
$$\phi_{comb} = \eta_{comb} m_{carb} PCI \frac{dx_b}{dt}$$

## Modèle de combustion par tranches : hypothèses

- Le volume de la chambre de combustion est divisé en tranches
- Il n'y a aucun transfert de masse ou de chaleur entre les différentes tranches.
- A chaque instant, la pression est uniforme dans la chambre.
- Les gaz sont supposés parfaits.
- Corrélation de Woschni pour les transferts aux parois.
- Les tranches brûlent successivement à pression constante.
- l'ensemble des gaz est comprimé isentropiquement jusqu'au nouveau volume.

# Principe du modèle

Tranche de gaz frais qui va brûler



Recompression (ou détente) de l'ensemble jusqu'au nouveau volume

# Formulation

|   |   |   |
|---|---|---|
| 1                                       | i-1   | i                                       |
| $X_{i-1,1}$<br>$T_{i-1,1}$<br>$P_{i-1}$ | $X_{i-1,i-1}$<br>$T_{i-1,i-1}$<br>$P_{i-1}$ | $X_{i-1,i}$<br>$T_{i-1,i}$<br>$P_{i-1}$ |

Après la combustion de la tranche i-1

|   |   |   |
|---|---|---|
| 1                                       | i-1   | i   |
| $X_{i-1,1}$<br>$T_{i-1,1}$<br>$P_{i-1}$ | $X_{i-1,i-1}$<br>$T_{i-1,i-1}$<br>$P_{i-1}$ | $X_{ad\ i-1,i}$<br>$T_{ad\ i-1,i}$<br>$P_{i-1}$ |

Combustion de la tranche i à pression constante  $P_{i-1}$

|                                 |                                     |                                 |
|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1                               | i-1                                 | i                               |
| $X_{i,1}$<br>$T_{i,1}$<br>$P_i$ | $X_{i,i-1}$<br>$T_{i,i-1}$<br>$P_i$ | $X_{i,i}$<br>$T_{i,i}$<br>$P_i$ |

Equilibre des pressions dans les gaz frais et les gaz brûlés



## Calcul de la pression

Après recompression (ou détente) des gaz jusqu'au nouveau volume de la chambre, la pression est calculée à l'aide de l'équation :

$$AY^{\frac{1}{\gamma}} + BY^{\frac{1}{\gamma}} - 1 = 0$$

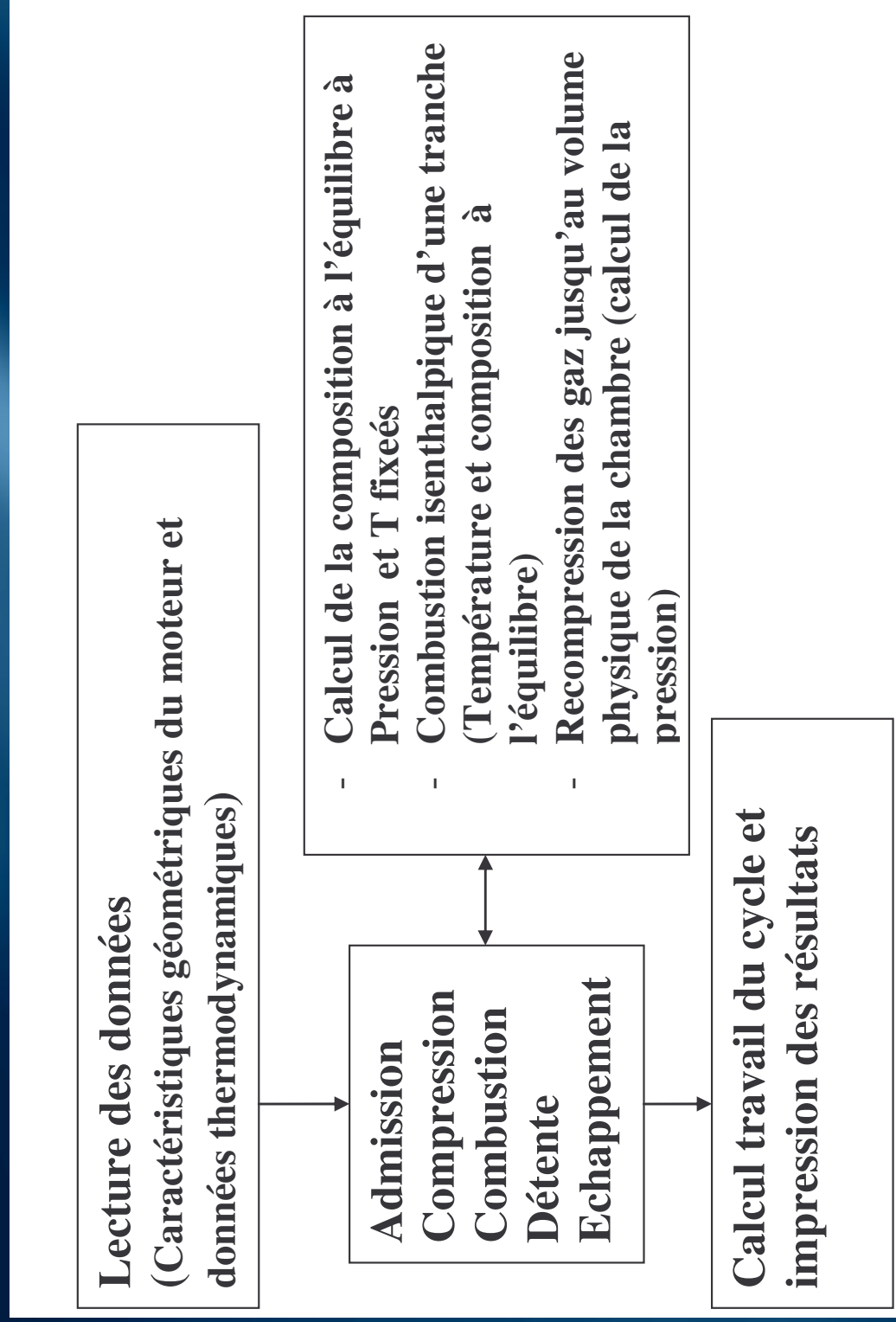
Où

$$Y = \frac{P_{i-1}}{P_i}$$

$$A = \frac{V_{ch,i-1}}{V_{ch,i}} \left( X_{ad,i} + \sum_{j=1}^{i-1} X_{i-1,j} \right)$$

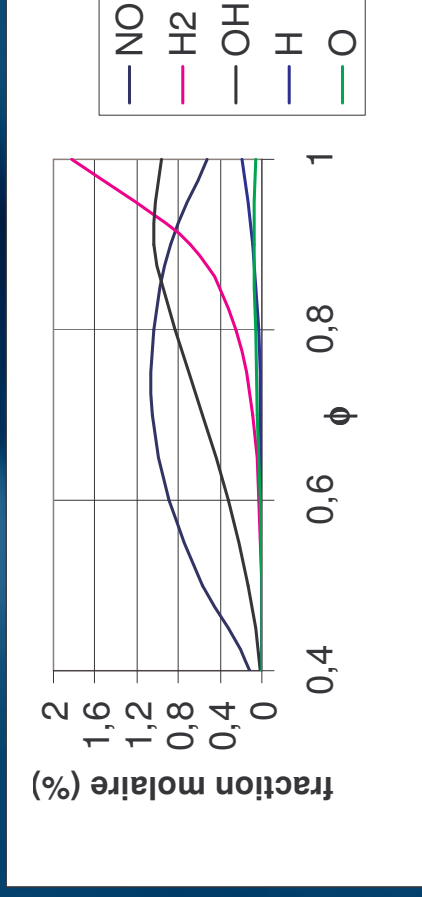
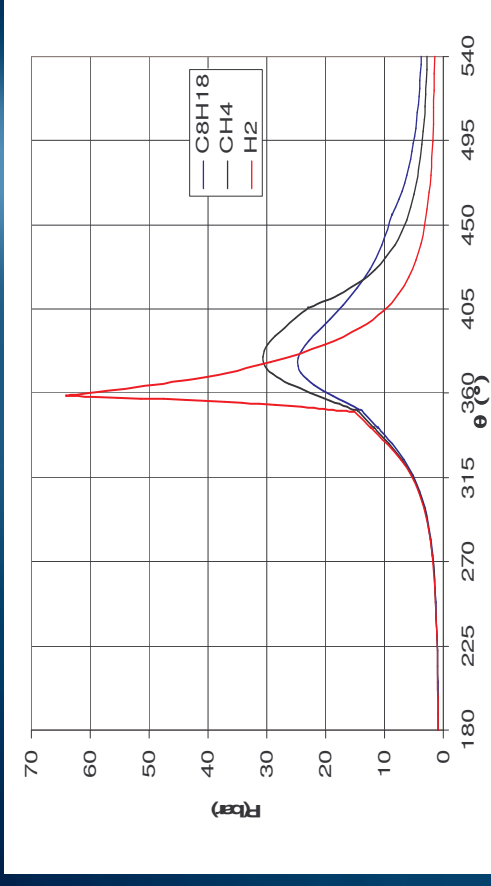
$$B = \frac{V_{ch,i-1}}{V_{ch,i}} \sum_{j=i+1}^N X_{i-1,j}$$

# Organigramme du programme



# Exemple d'application à l'hydrogène

Influence du carburant ( $C_8H_{18}$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ )  $P_{ad}=0.9\text{bar}$ ,  $AA=10^\circ$ ,  $\phi=1$



$P_{ad} = 0.9\text{bar}$ ,  $AA=30^\circ$   
 $RPM=3000$

Hydrogène : composition des gaz brûlés

## Conclusion

- Présentation générale d'une approche de modélisation système (couplage thermique et combustion) appliquée à l'optimisation énergétique des moteurs thermiques.
- Validation du module thermodynamique de combustion « multizones » en cours.
- Orientation des études :
  - GMP hybride
  - alternatives énergétiques (H<sub>2</sub>)