

Conservatoire national des arts et métiers

www.cnam.fr/turbomachines-moteurs

- *Laboratoire du génie des procédés pour l'énergie, l'environnement et la santé (LGP2ES) du CNAM, équipe de recherche EA21, plateforme énergie et environnement*

- *École doctorale ED390 Génie des procédés et haute technologie de l'université Paris 6*

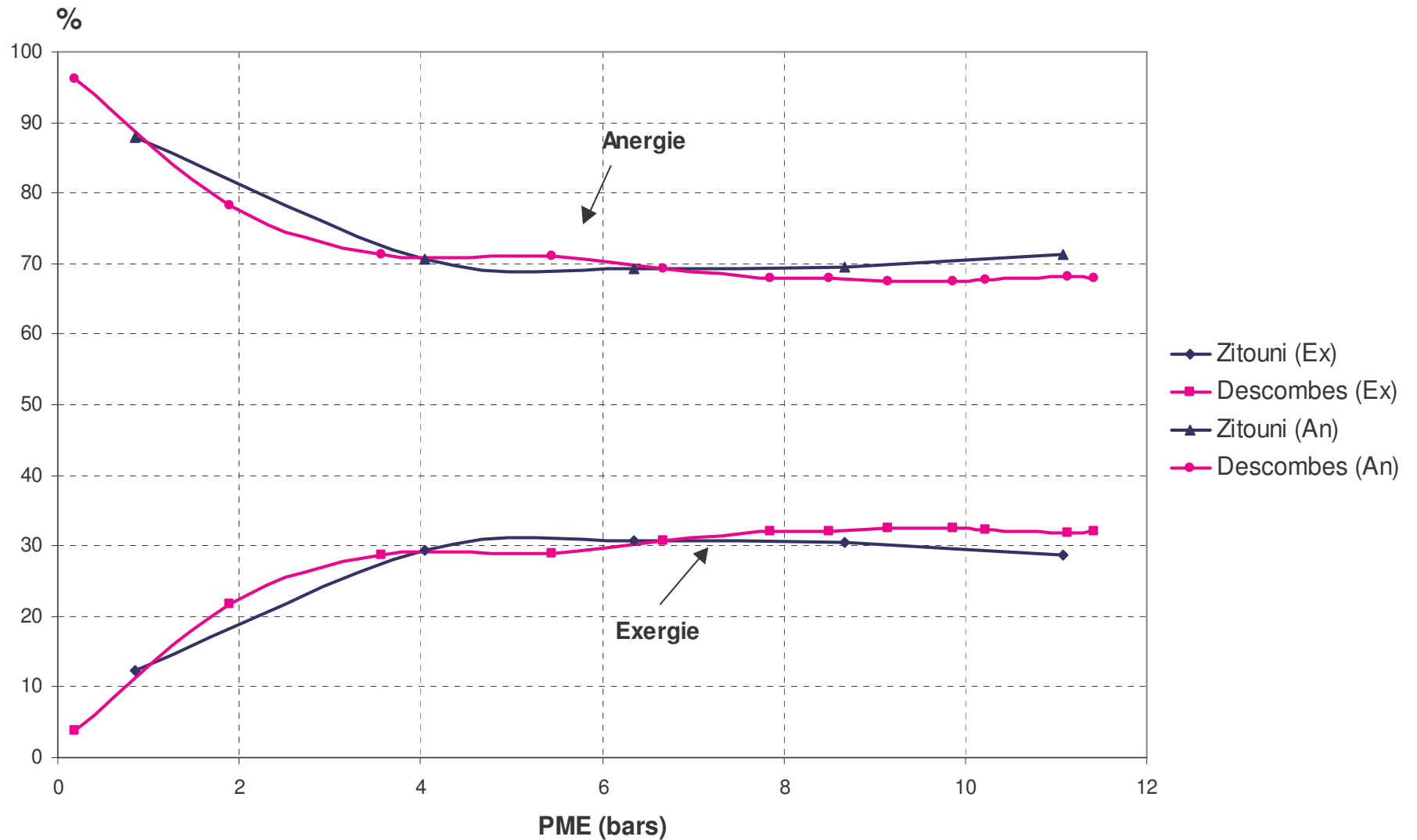
Composante turbomachines et moteurs

- **MEUNIER Francis**, professeur titulaire de la chaire de froid et climatisation
 - **DESCOMBES Georges**, professeur des universités
 - **PERILHON Christelle**, maître de conférences
 - **PODEVIN Pierre**, ingénieur de recherche
 - **TOUSSAINT Michel**, ingénieur de recherche
 - **MAUNAND Jacques**, professeur associé
 - **CLENCI Adrian**, maître de conférences à l'université de PITESTI (ROUMANIE) et chercheur au CNAM
-
- **BOUDFAR Mohamed**, doctorant 2006-2008
 - **DIANGO Alphonse**, doctorant 2007-2009
 - **ALKADEE Dareen**, doctorante 2007-2009
 - **YOBOUE Konan**, doctorant 2008-2010
 - **DELIGANT Michaël**, doctorant 2008-2010

Recherche technologique conduite au laboratoire

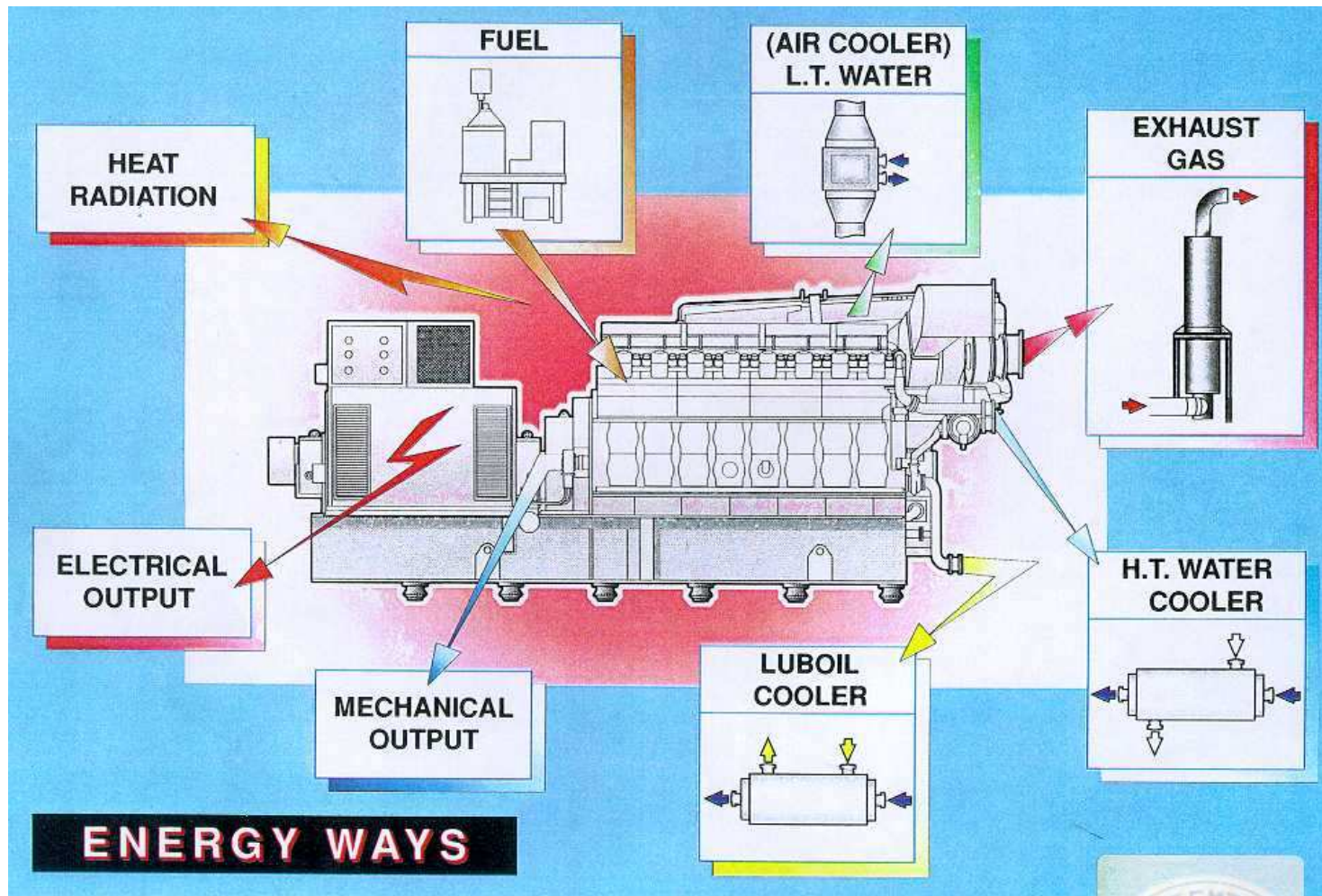
*Couplage des transferts cycliques
de quantité de mouvement et
d'énergie dans un moteur à
cylindrée réduite et haute
suralimentation.*

Conversion d'énergie en régime de fonctionnement stabilisé



Analyse 1^{er} principe

En (chimique) = Ex (mécanique) + An (thermique)



Analyse 2^{ème} principe et cogénération

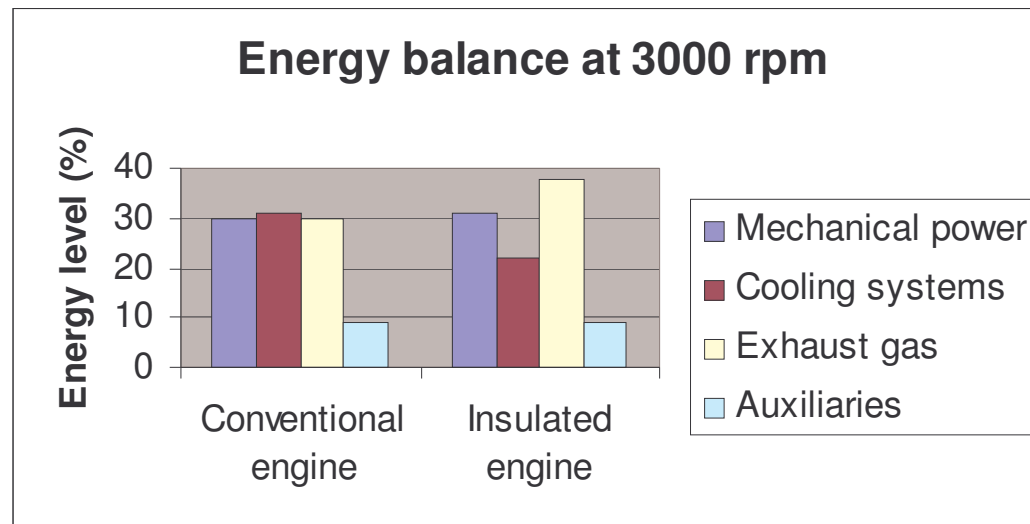
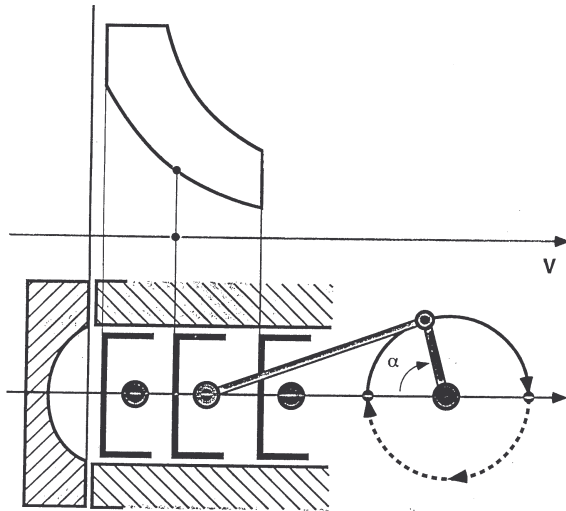
$$\eta_{\text{thermique}} = \eta_{\text{Carnot}} \cdot \eta_{\text{exergétique}}$$

$$\eta_{th} = -\frac{w}{q} = \left[1 - \frac{T_0}{T} \right] \cdot \left[1 - \frac{T_0 \Delta_i S}{q \left[1 - \frac{T_0}{T} \right]} \right]$$

Concept d'isolation thermique (insulated engines)

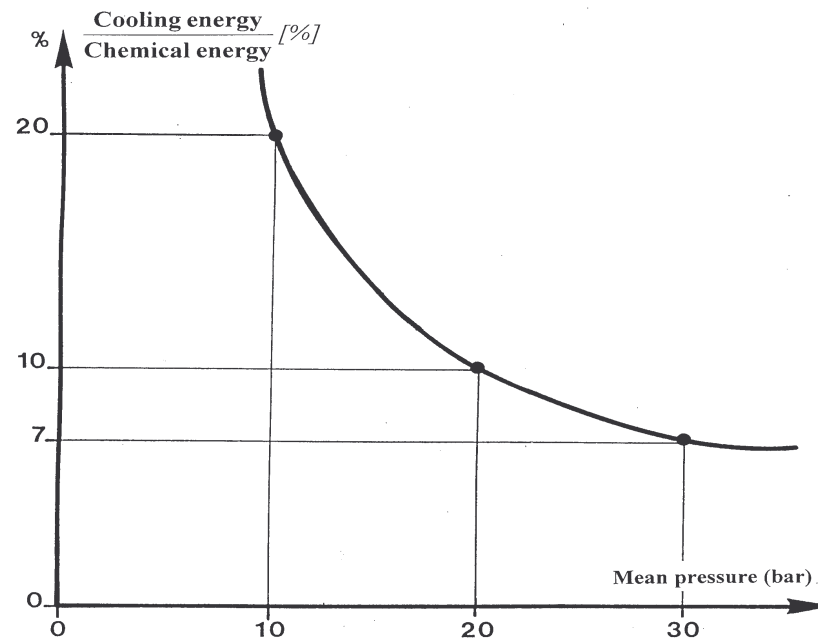
- Concept d'adiabatisation des moteurs dans un objectif de rendement thermique (1980).
- Le 1^{er} principe en système fermé ne rend pas compte de la situation dans ce contexte de couplage périodique des modes de transferts de masse et d'énergie.

$$[E_x + A_n]_{FA}^{OE} = U_{OE} - U_{FA}$$



Couplage des transferts

- Adiabatisation naturelle des moteurs turbo-suralimentés (*Magnet-Descombes 1998*) et concept de similitude aérothermique des moteurs « down-sizing ».

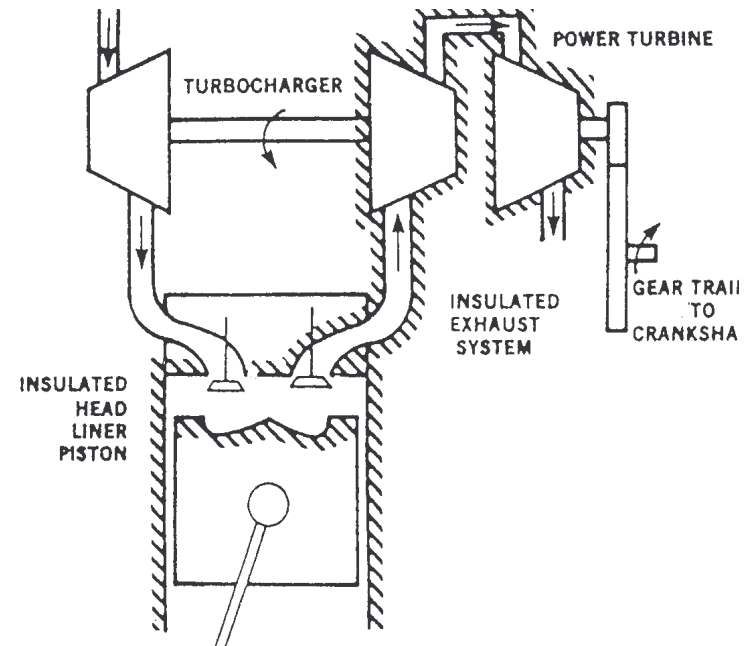


Couplage des transferts

- Concept d'isolation thermique dans un objectif généralisé de poly-génération (2000).

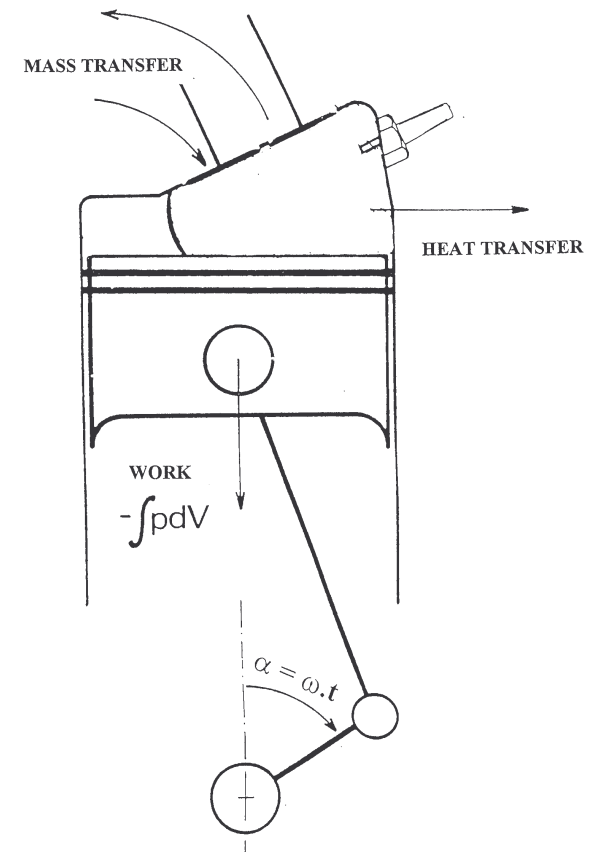
Diffusivité et porosité des céramiques.

Stabilité du zircone ZrO_2 additivé.



Mécanisme local de conversion d'énergie

- Production combinée d'exergie et d'anergie.
- Enceinte confinée.
- Alternance périodique d'apports et de retraits.
- Charges partielles et régimes transitoires.



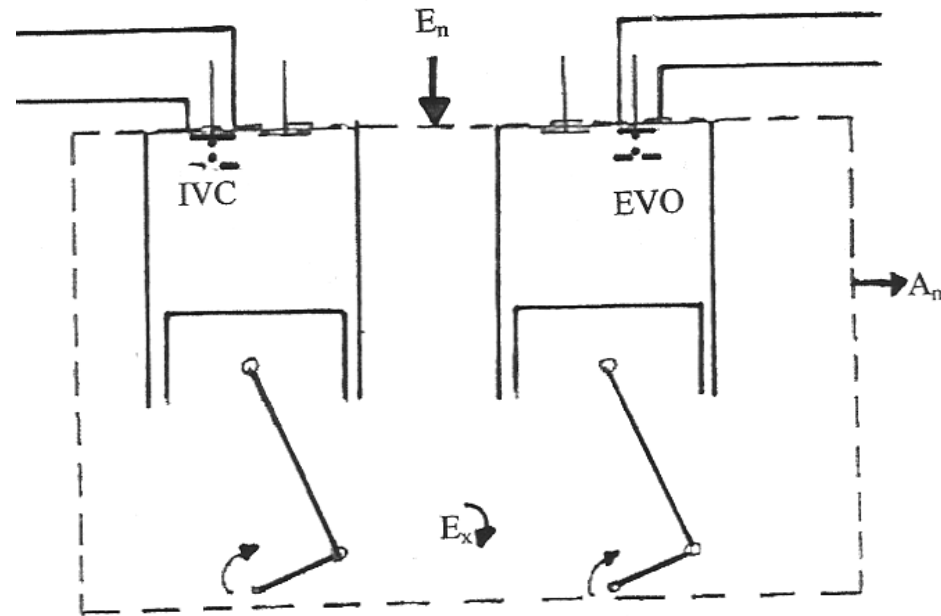
Interaction des modes de transport

- **Oscillation mécanique forcée.**
- **Thermodynamique en temps fini et milieu confiné.**
- **Effet aéroacoustique des conduits et structures tourbillonnaires dans le capsulisme.**
- **Thermique en proche paroi.**

Point de vue local

Phases ouvertes du cycle

- Couplage aéro-acoustique par effet Kadenacy



Point de vue local Phases fermées du cycle

- **Couplage mécanique, thermodynamique et thermique en proche paroi.**

$$\frac{d^2x}{dt^2} = R\omega^2 \left[\cos\alpha + \frac{\cos 2\alpha}{k} \right]$$

$$\int_1^2 \frac{dP}{P} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \int_1^2 \frac{dT}{T} - \int_1^2 \frac{dS}{r}$$

$$T(x,t) = T + \Delta T(x=0) \exp \left[-\sqrt{\frac{\pi}{a\Omega}} x \right] \cdot \sin \left[\frac{2\pi}{\Omega} \left(t - \frac{x}{\sqrt{\frac{4a\pi}{\Omega}}} \right) \right]$$

Point de vue local

Phases fermées du cycle

- Résultat d'un simple calcul analytique.
- Compétition entre la vitesse thermodynamique de détente motrice et la signature de l'onde thermique conductive (*Descombes 2003*).

N (rpm)	ω (rd.s-1)	Période Ω (s)	Vitesse de propagation w de l'onde thermique (m/s)	Longueur résiduelle $l_{0.01}$ de l'onde thermique (m)
1000	104.7	0.06	0.054	.00238
2000	209.4	0.03	0.076	.00168
3000	314.2	0.02	0.094	.00137
4000	418.9	0.015	0.108	.00119
5000	523.6	0.012	0.120	.00106

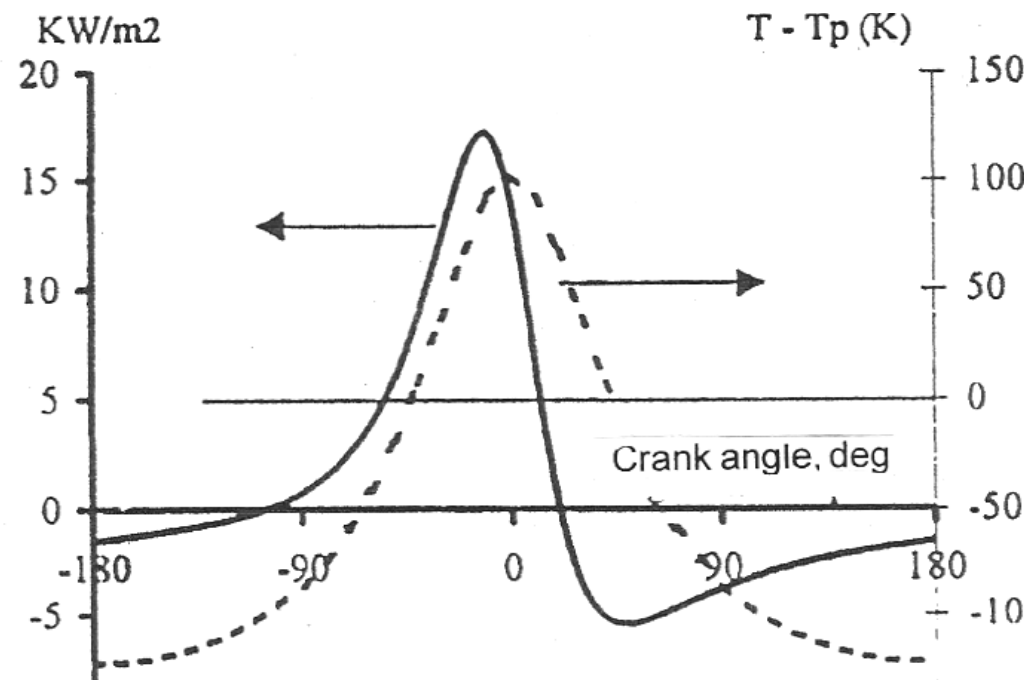
Point de vue local

Phases fermées du cycle

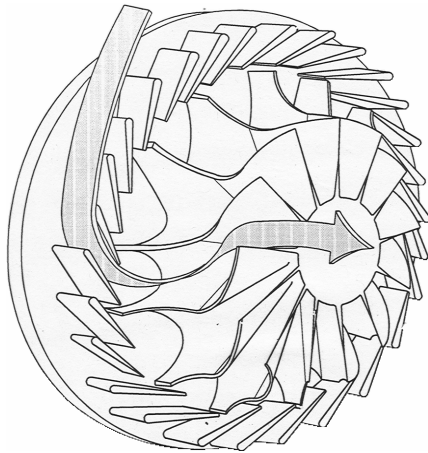
- Le temps caractéristique des transferts conductifs au sein des parois est d'un ordre de grandeur supérieur à celui du cycle au-delà d'un régime minimal de rotation.
- La vitesse thermodynamique de détente motrice est alors très supérieure à la vitesse de signature thermique conductive.
- Amortissement de la perturbation thermique dont le déphasage augmente avec la fréquence.
- Stockage d'énergie pelliculaire sur la peau des parois.

Point de vue local Phases fermées du cycle

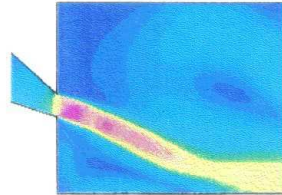
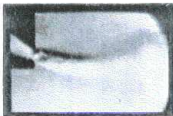
- Le refroidissement simultané des gaz en cours de détente motrice et le déphasage entraînent un changement de signe du flux pariétal.



Point de vue local Phase ouverte du cycle



- Déstockage de masse et d'énergie lors de la bouffée supersonique d'échappement en amont de la turbine de suralimentation.



*Strioscopic and iso-Mach modelling
of jet exiting channel*

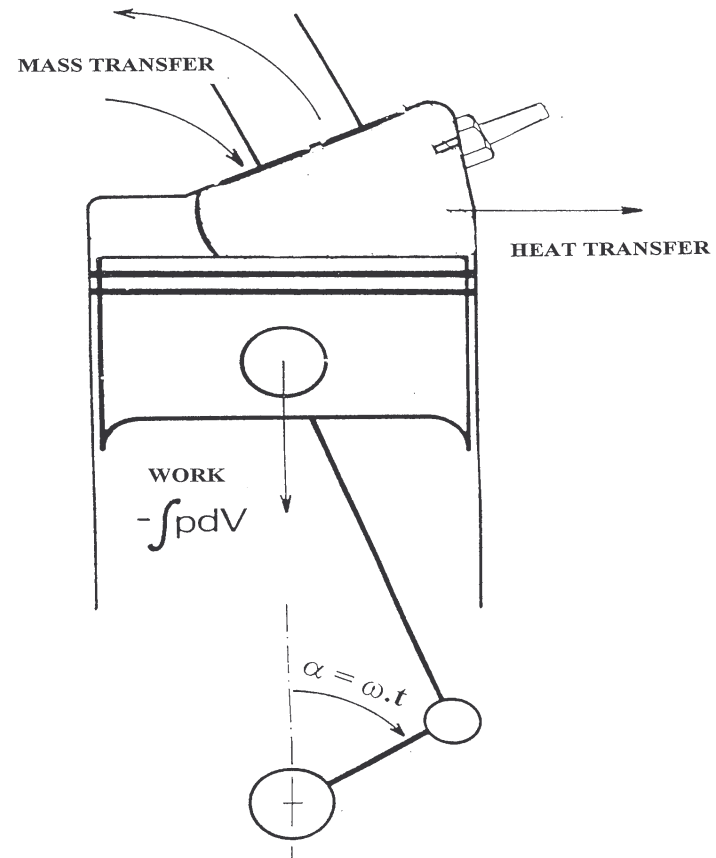
***Nappe supersonique
à l'échappement du
distributeur à calage
variable d'une turbine
(Descombes 2003)***

Couplage des transferts de masse et d'énergie

- Les effets d'alternance rapide d'apport et de reprise de chaleur sont amortis au-dessous d'un régime minimal de rotation dans les charges partielles.
- Il est par ailleurs faux de prétendre que les pertes aux parois sont sans influence sur le rendement du moteur.
- Lorsque la combustion est prolongée pendant la détente motrice, la perte aux parois devient prépondérante et les gaz d'échappement sont aussi plus chauds (*bilan d'entropie*).

Point de vue local Phases fermées du cycle

- Comportement capacitif de la couche limite aérothermique instationnaire.
- Stockage et déstockage d'énergie pelliculaire.
- Compétition des modes de transferts.



Calcul thermique multiD des coefficients d'échange

Point de vue local en phases fermées du cycle

- Inaptitude d'une corrélation basée sur la notion de coefficient d'échange à prédire le comportement instationnaire des transferts cycliques. « Recalage » systématique des résultats modélisés par les corrélations établies en régime permanent. Pas de prédictivité.
- La sous couche limite visqueuse identifie la pellicule en contact avec la paroi dans laquelle les fluctuations turbulentes sont amorties, la condition d'adhérence est assurée par la viscosité.
- La sous couche limite turbulente identifie la région adjacente dans laquelle les effets de turbulence sont prépondérants.
- Ces 2 zones sont encadrées par des valeurs arbitraires autour d'une zone tampon validée a posteriori en imposant une loi d'évolution dans la couche limite turbulente.

Charges thermiques

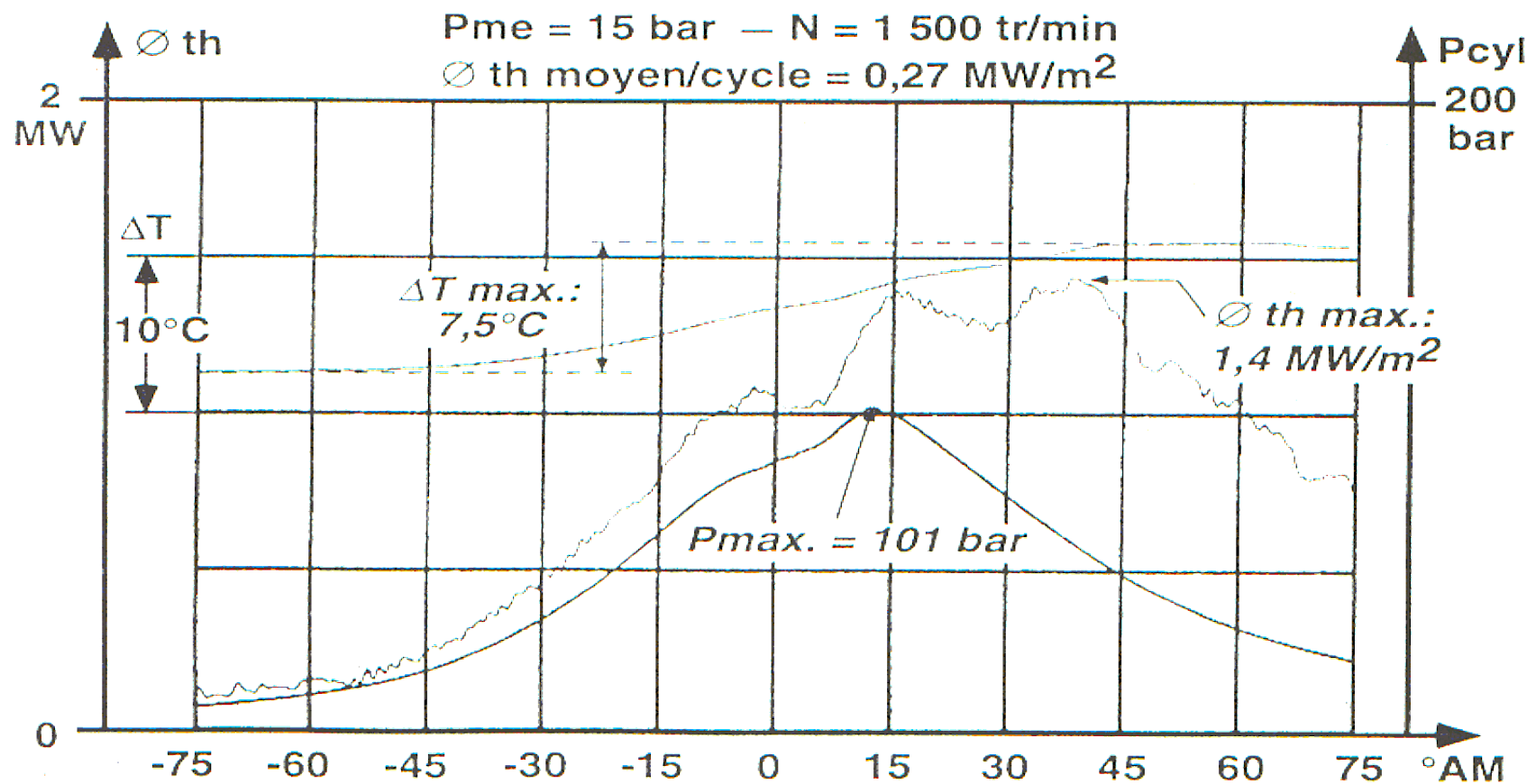
- Les charges mécaniques ont occupé les esprits pendant des décennies devant les charges thermiques.
- Les flux thermiques globaux sont représentatifs des sollicitations thermiques moyennes.

$$\frac{q}{A_p} = k \cdot PME \cdot \bar{V}_p \cdot C_s$$

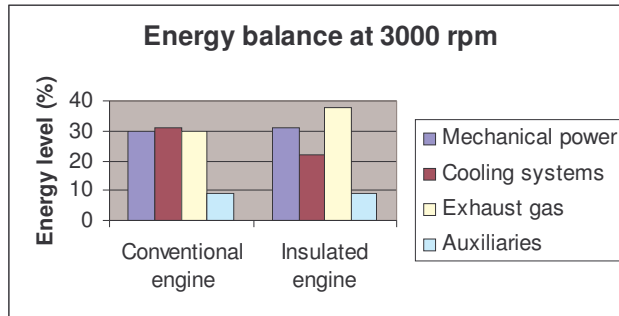
Charges thermiques

- L'acuité des problèmes posés par les gradients marqués de température et de flux au cours du cycle imposent désormais de prendre en compte les transferts thermiques rapides dans les moteurs de nouvelle génération.

Cycle avec combustion (Magnet-Descombes 2000)



Résultat



- Étude non triviale.
- Décortiquer les phénomènes pour investiguer des voies d'analyse situées en amont.
- La somme des quantités de chaleur transférées dans les circuits de refroidissement et d'échappement d'un moteur demeure au voisinage d'une constante **au-delà d'une fréquence minimale de l'oscillation forcée.**
- Charges thermiques cycliques et combustion détonante dans les diesels en charge partielle.

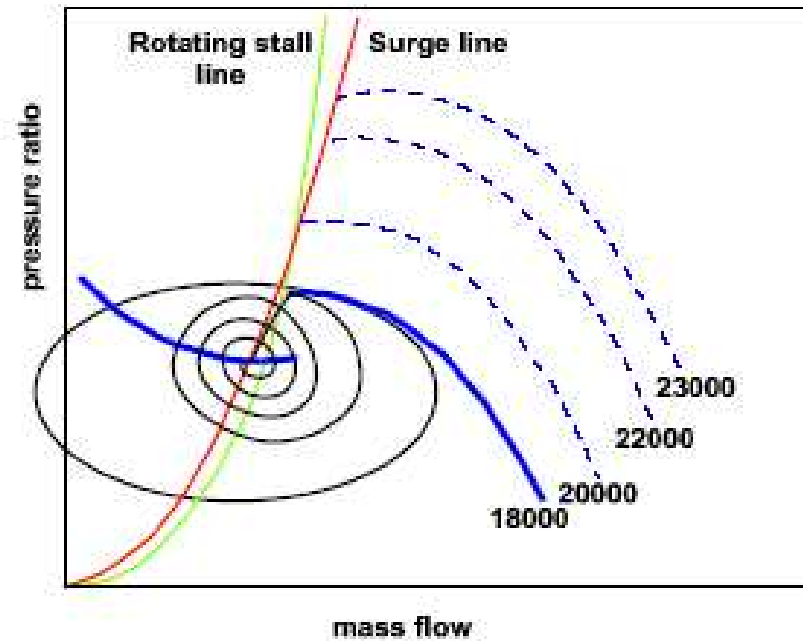
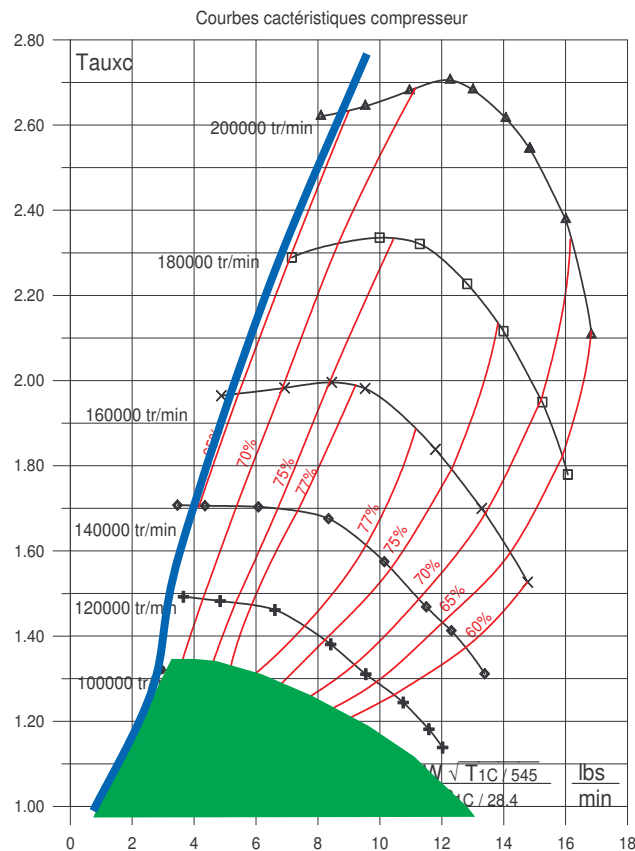
Recherche en cours

- Analyse locale des transferts de quantité de mouvement et d'énergie.
- Impact des harmoniques aéro-thermiques sur le comportement de la couche limite capacitive
- Acuité de la **similitude** aéro-convective dans les moteurs de cylindrée réduite.

Recherche en cours

- Conditions limites d'un calcul en temps court, vitesse non infinie de la perturbation thermique (schéma de calcul de Tzou).
- Conditions limites d'un calcul multiD hors équilibre.
- Caractérisation du turbocompresseur aux bas régimes de rotation.
- Concept d'éponge thermique des volutes d'un turbocompresseur dans son environnement moteur.

Interaction fluide structure (pompage) du compresseur et basses puissances



Contact

- www.cnam.fr/turbomachines-moteurs
- chaire.turbomachines-moteurs@cnam.fr