



Valorisation des rejets thermiques des moteurs à combustion interne pour une production d'électricité ou de froid

Adrien Bétrancourt¹, Thierry Le Pollès¹,
Emmanuel Chabut¹, Maurice-Xavier
François^{1,2}

¹HEKYOM, ²LIMSI-CNRS

adrien.betrancourt@hekyom.com

Journée SFT/SFA

Paris, 10 décembre 2010



Plan

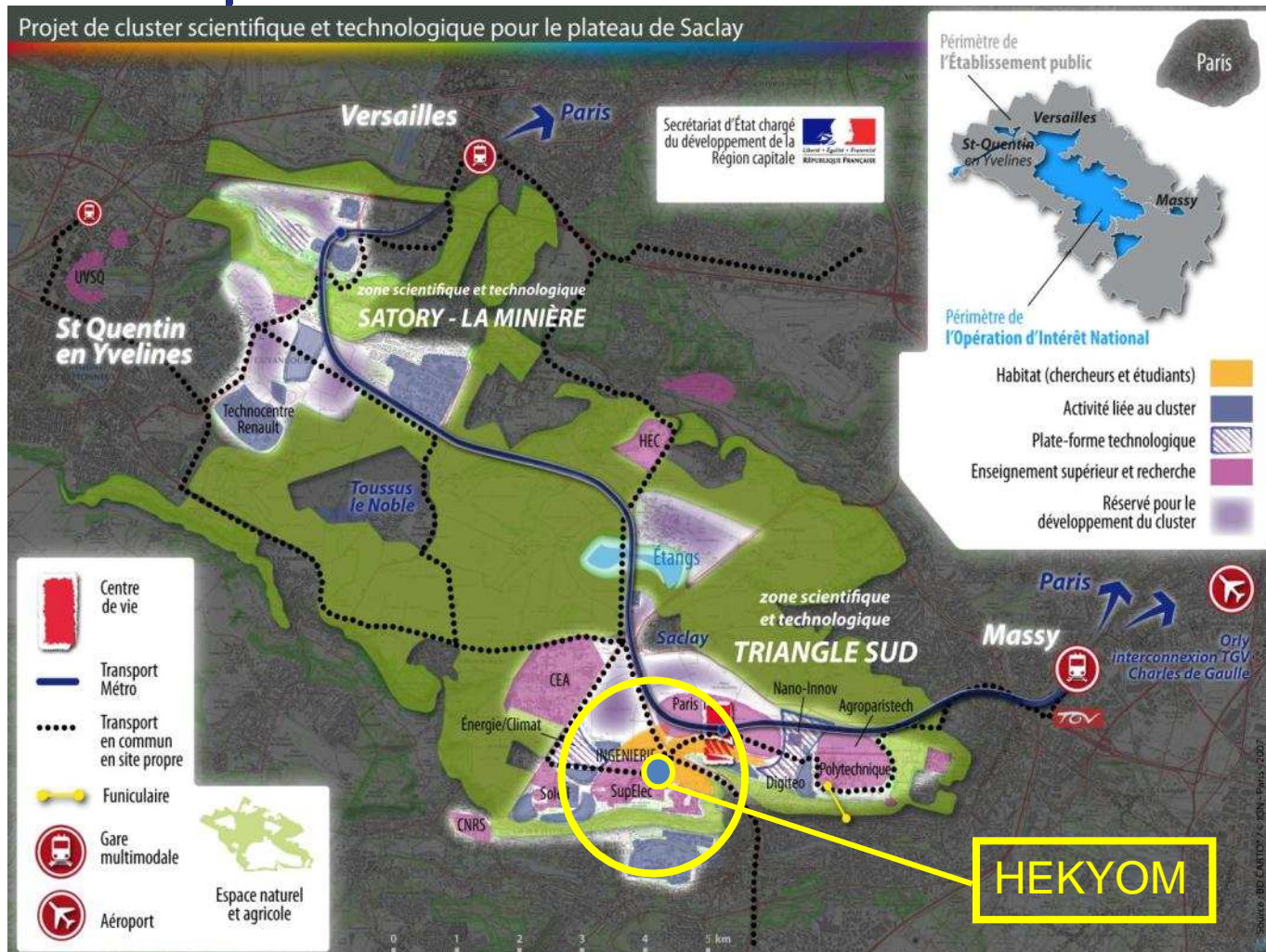
1. HEKYOM, l'énergie du son
2. Valorisation des rejets thermiques des moteurs à combustion interne : un exemple de moteur essence automobile
3. Valorisation des rejets thermiques des moteurs à combustion interne : un exemple de moteur diesel marin
4. Récupération des rejets thermiques dans les gaz d'échappement
5. Conclusion et perspectives



HEKYOM : l'énergie du son

- Fondé en 2002
- 3 ingénieurs R&D, 1 manager, 1 directeur scientifique
- Bureau d'étude expert dans le domaine de la conversion d'énergie thermoacoustique :
 - Étude de faisabilité pour des applications spécifiques en pompage de chaleur (réfrigération à la cryogénie), remontée en température, génération d'électricité...
 - Fabrication de prototypes thermoacoustiques préindustriels
- 3 brevets (2 sous licences exclusives + 1 propre)

Implantation d'HEKYOM



Partenaire 1

IPN Orsay (2003)

- Expertise scientifique et technique
- Aire expérimentale
- Bureau d'étude

Partenaire 2

LIMSI-CNRS (1994)

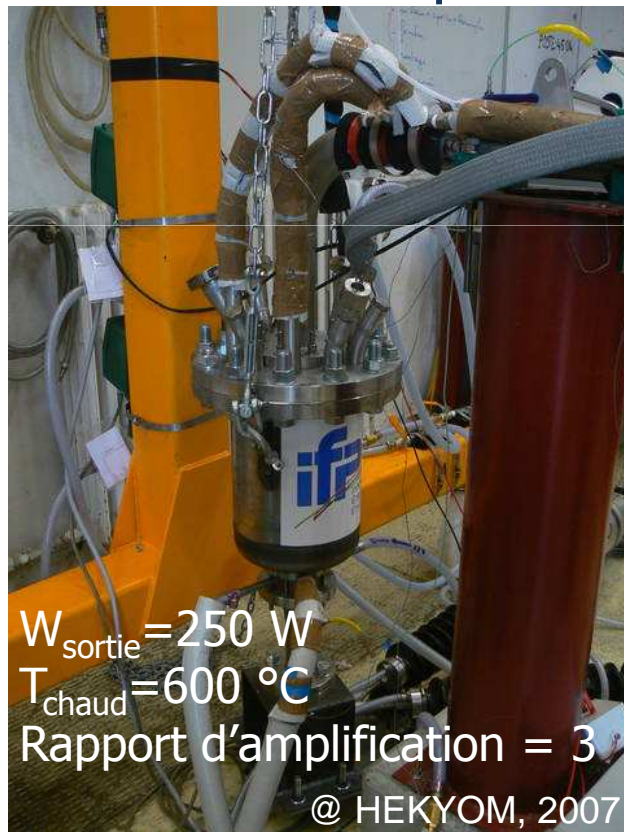
- Expertise scientifique
- Outils de simulation

HEKYOM, Adrien Bétrancourt, journée SFT/SFA
"Thermoacoustique", 10 décembre 2010



HEKYOM : les projets réalisés et en cours (1/4)

Amplificateur d'onde thermoacoustique



Réfrigération Industrielle Thermoacoustique (RITA)



en collaboration avec ADEME et
Actif Industries. Depuis 2009



HEKYOM : les projets réalisés et en cours (2/4)

Dimensionnement et construction de TPs pour la Formation Permanente d'Orsay/SFV : Tube à gaz pulsé et réfrigération thermoacoustique



@ HEKYOM, 2010

générateur d'onde stationnaire (60W)



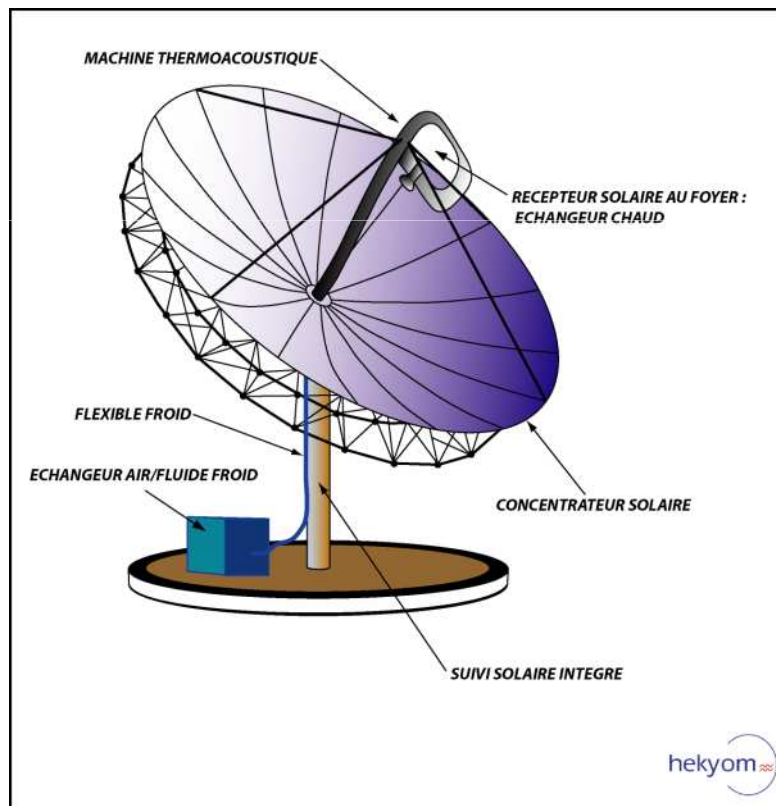
@ HEKYOM, 2010

tube à gaz pulsé
-100°C



HEKYOM : les projets réalisés et en cours (3/4)

- Réfrigération thermoacoustique solaire (TACSOL). ANR en collaboration avec IPNO, PROMES et LaTEP



→ dimensionnement du système thermoacoustique (générateur d'onde en boucle et réfrigérateur 1kW -30°C en boucle)



HEKYOM : les projets réalisés et en cours (4/4)

- Projet européen THATEA (7^{ème} PCRD) en collaboration avec IPNO (FR), ECN (NL), ASTER (NL), NRG (NL), University of Manchester (GB), Université de Messine (IT)
→ dimensionnement d'une boucle froide -40°C à haut rendement ($\sim 30\%$ de Carnot obtenu expérimentalement)
- Plusieurs études de faisabilité :
 - Procédé thermoacoustique pour une application automobile
 - ...



Plan

1. HEKYOM, l'énergie du son
2. Valorisation des rejets thermiques des moteurs à combustion interne : un exemple de moteur essence automobile
3. Valorisation des rejets thermiques des moteurs à combustion interne : un exemple de moteur essence marin
4. Récupération des rejets thermiques dans les gaz d'échappement
5. Conclusion et perspectives



Quelques chiffres de transport en France

Chaque année (avant 2009) :

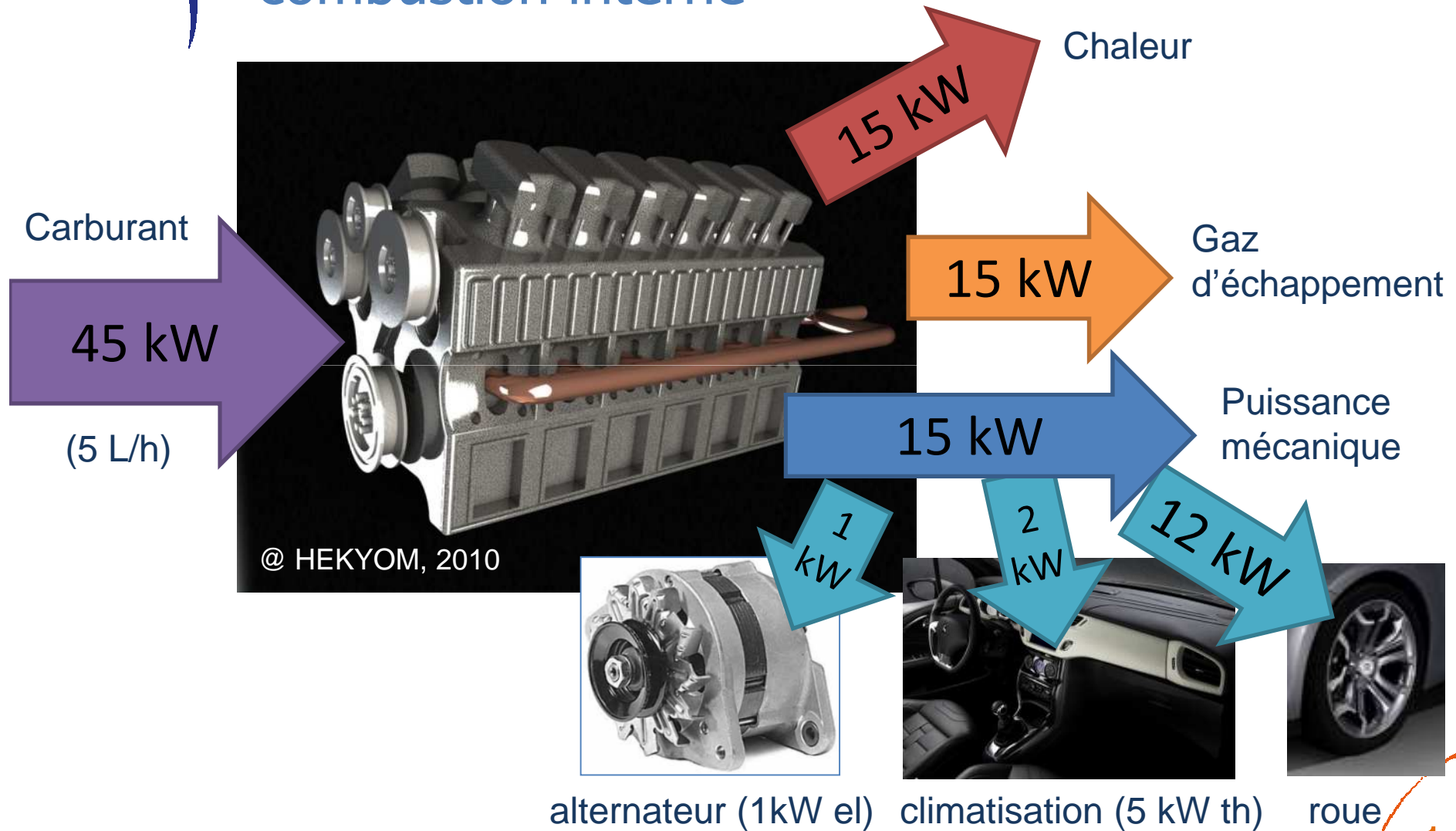
- 2 000 000 voitures neuves immatriculées
- 50 000 Poids Lourds Neufs immatriculés
- 45 000 000 tonnes carburants (essence + diesel) livrés

Source : Ministère de l'écologie, des transports et du développement durable





Exemple de bilan énergétique d'un moteur à combustion interne





Enjeux d'un système de récupération d'énergie dans les gaz d'échappement

- **But** : réduction de la consommation globale du véhicule
- **Procédé** : valorisation de l'énergie rejetée dans les gaz d'échappement par un système thermoacoustique
 - production d'électricité
 - production de froid



Caractéristiques des gaz d'échappements

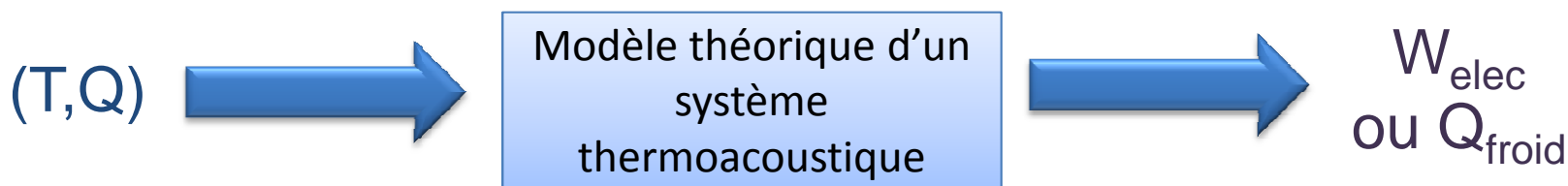
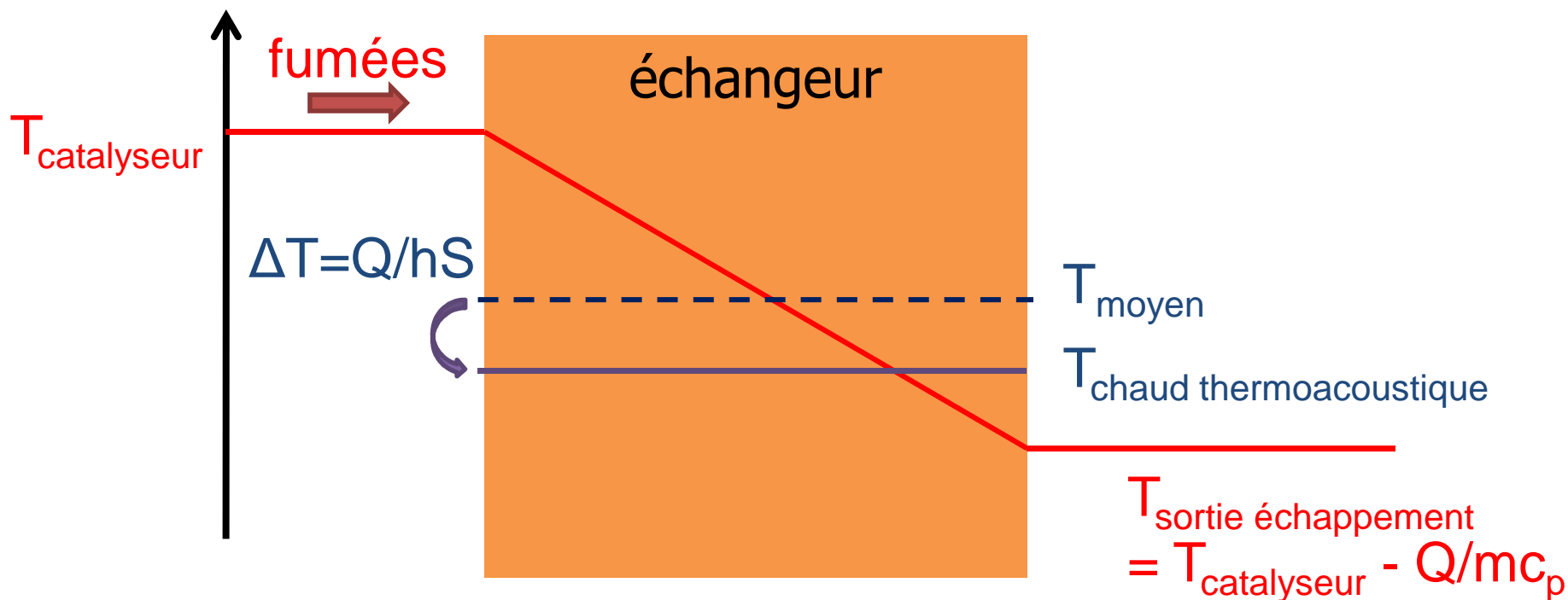
Pour un véhicule léger (moteur essence) :

- En sortie du catalyseur : température comprise entre 400 et 800 °C
- Débit massique de l'ordre de 100 kg/h
- Composition : CO₂, HC, NO_x, etc.
- Capacité calorifique moyenne : 1 150 J/kg/K

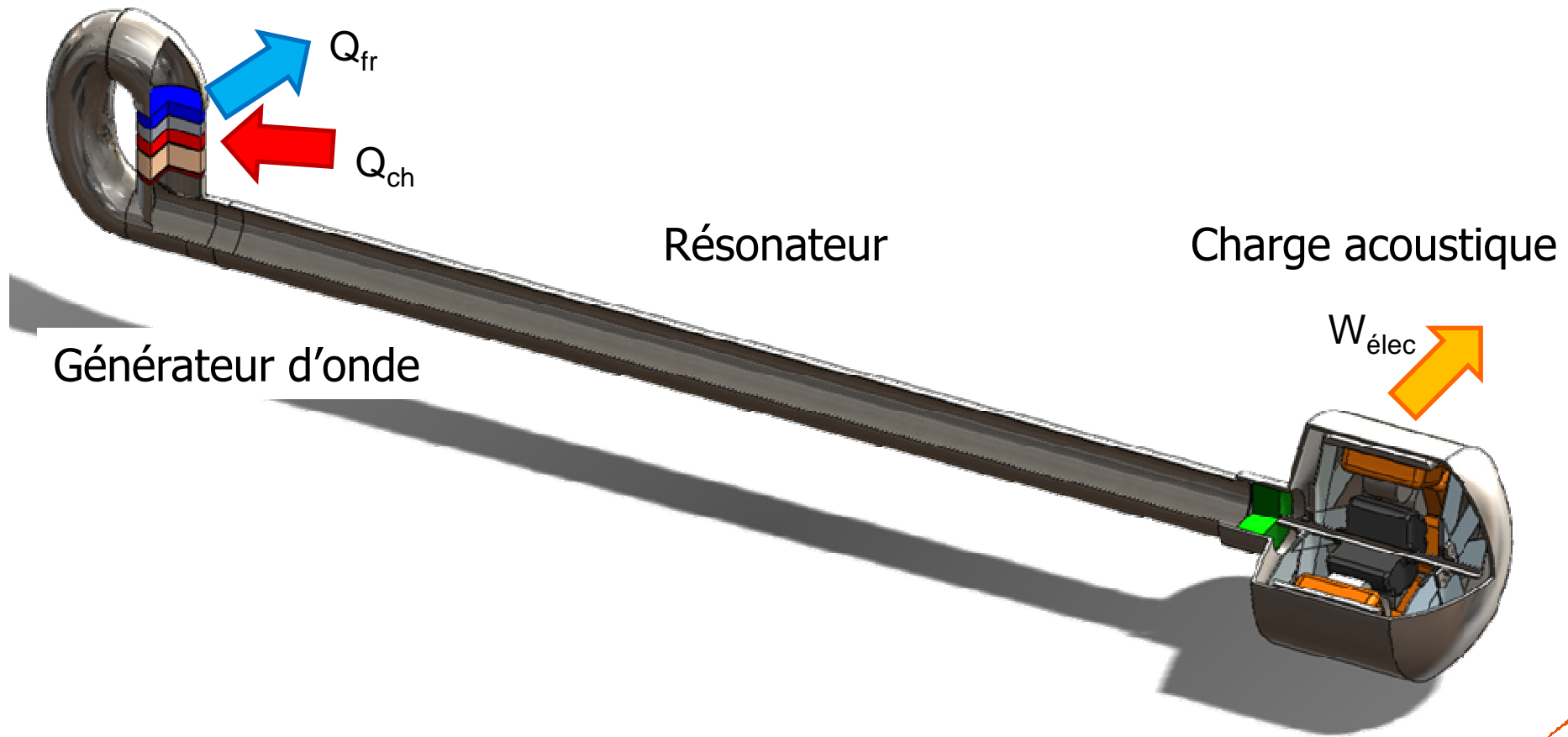
Moteur à essence plus chaud que moteur diesel mais débit plus faible



Méthode d'estimation de la performance d'un système thermoacoustique de récupération d'énergie



Système thermoacoustique





Modèle théorique d'un générateur d'onde thermoacoustique

- **Puissance acoustique délivrée** par le générateur d'onde

$$W_{\text{acous}} = \eta_{\text{thermoacoustique}} Q_{\text{chaud}}$$

- où $\eta_{\text{thermoacoustique}}$ représente **l'efficacité thermoacoustique** du système

$$\eta_{\text{thermoacoustique}} = 0.15 \eta_{\text{Carnot}} \text{ (générateur d'onde stationnaire : stack)}$$

$$\eta_{\text{thermoacoustique}} = 0.4 \eta_{\text{Carnot}} \text{ (générateur d'onde progressive : boucle)}$$



Modèle théorique de la charge acoustique

- l'efficacité de transmission du résonateur

$$\eta_{\text{résonateur}} = 0.8$$

- Réfrigérateur en boucle

$$\text{COP}_{\text{réfrigérateur}} = 0.4 \text{ COP}_{\text{Carnot}}$$

- Générateur électrique (alternateur linéaire)

$$\eta_{\text{résonateur}} = 0.85$$



Comparaison des systèmes thermoacoustiques pour un moteur essence

Systeme TA	Puissance électrique moyenne	Gain / mécanique	P.V.
Stack	400 W	5 %	> 200
Boucle	800 W	10 %	> 200
Architecture brevet	1 600 W	20 %	< 200 (limite classe I et II)



brevet déposé par HEKYOM sur une nouvelle architecture acoustique



gain électrique / mécanique de l'ordre de 20-25 %
Système très compact (PV inférieur à 200)



Plan

1. HEKYOM, l'énergie du son
2. Valorisation des rejets thermiques des moteurs à combustion interne : un exemple de moteur essence automobile
3. Valorisation des rejets thermiques des moteurs à combustion interne : un exemple de moteur diesel marin
4. Récupération des rejets thermiques dans les gaz d'échappement
5. Conclusion et perspectives



Enjeux d'un système de récupération d'énergie pour un navire

- Réduction de la consommation du navire
- Production de la climatisation pour un local réfrigéré
- Variation de charge du moteur faible
→ production constante

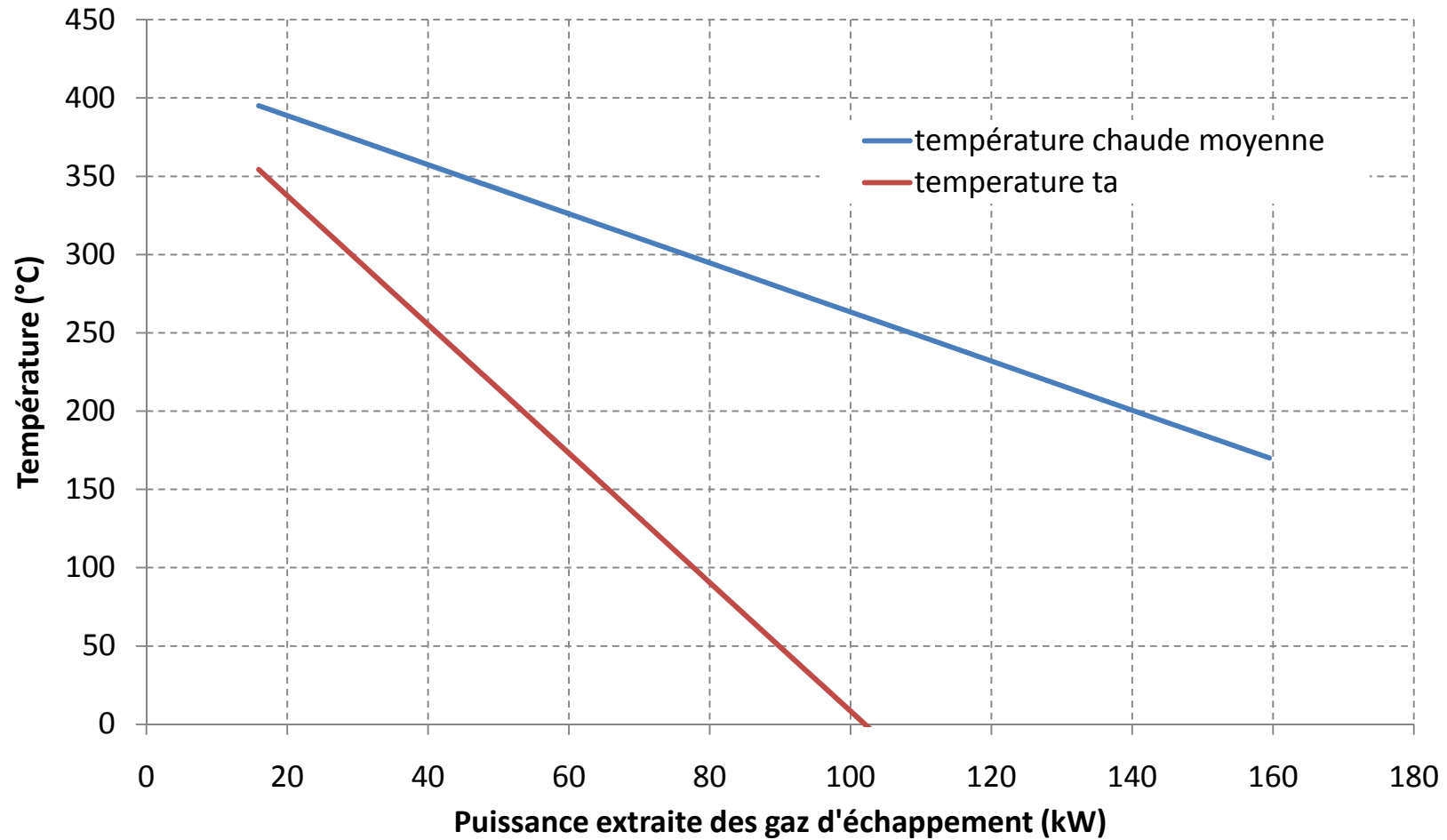


Données d'entrée pour le dimensionnement du système TA

- Puissance froide : 25,8 kW
- Température froide TA : 0°C
- Température de rejet TA : 40 °C
- Température chaude TA : déterminée en fonction de la puissance disponible

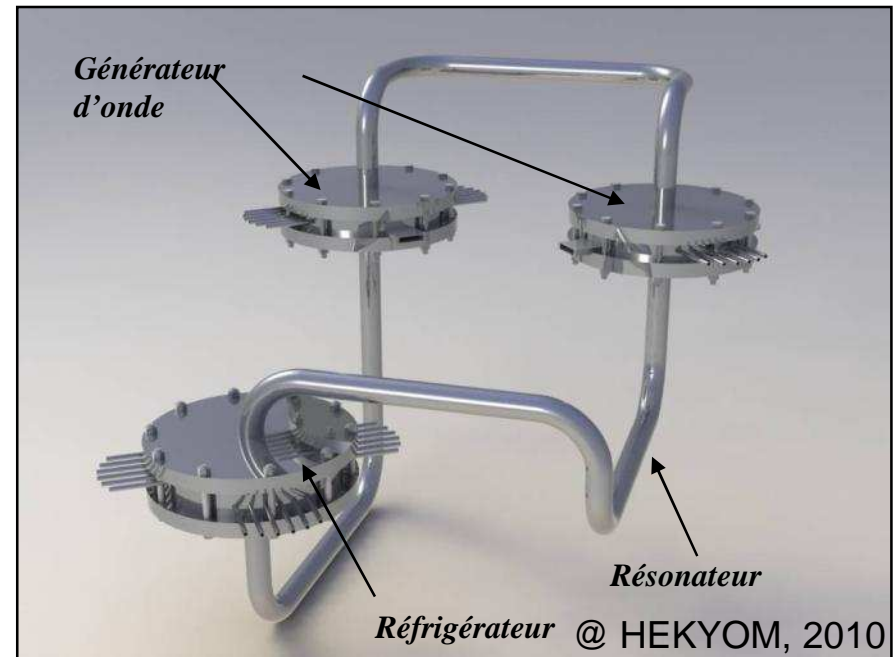
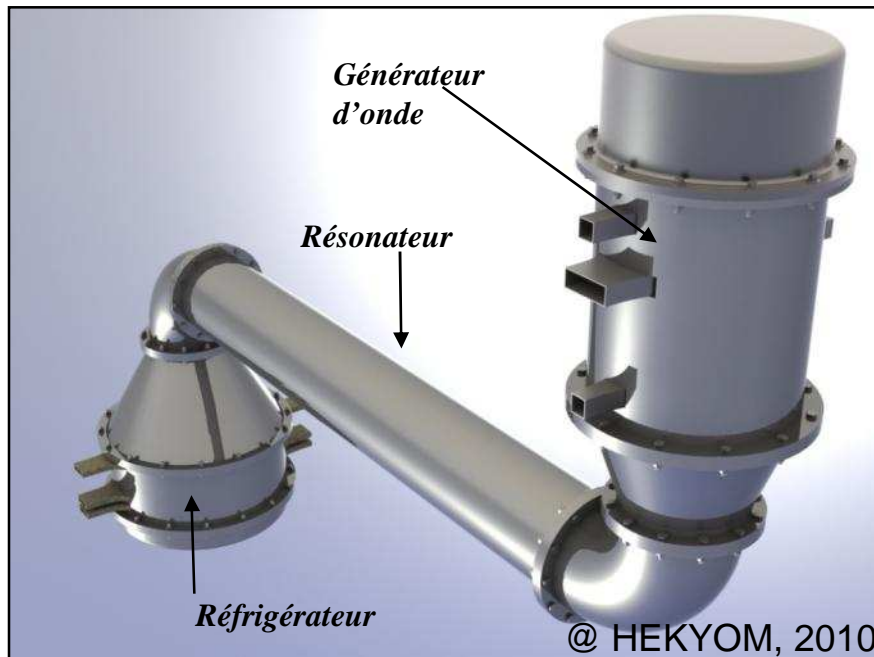


Puissance disponible dans les gaz d'échappement



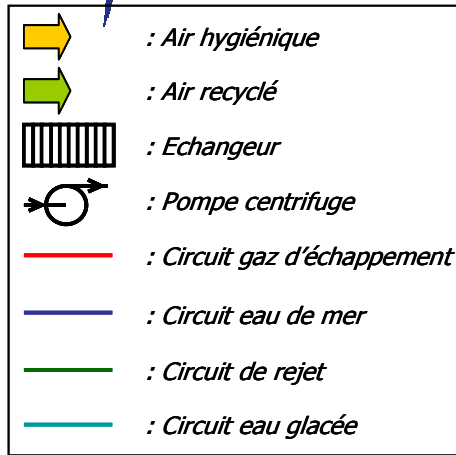


Machines thermoacoustiques : comparaison



Efficacité du même ordre
mais poids et PV plus faible pour la machine à ondes progressives

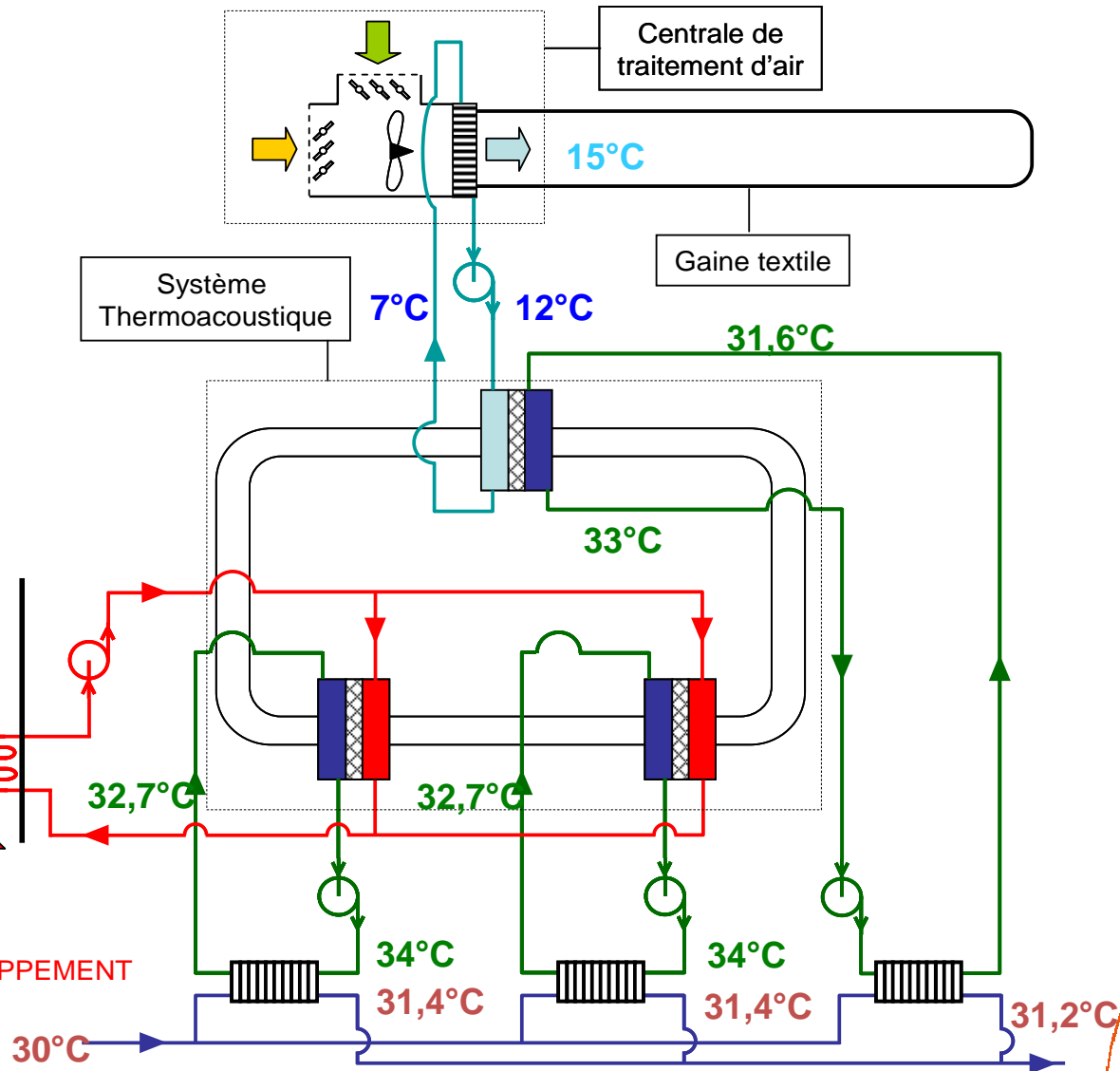
Machine thermoacoustique intégré dans le système global



$T_{\text{chaud}} TA = 240^{\circ}\text{C}$
 $T_{\text{rejet}} TA = 40^{\circ}\text{C}$
 $T_{\text{froid}} TA = 0^{\circ}\text{C}$

Echappement

GAZ D'ECHAPPEMENT





Efficacité du système intégré

- Prise en compte de la consommation des périphériques :
 - 2 x 1,1 kW pour la pompe du circuit d'eau douce de rejet de chaleur du générateur d'onde
 - 1,5 kW pour la pompe du circuit d'eau douce de rejet de chaleur du réfrigérateur
 - 1,1 kW pour la pompe du circuit de transport de frigories
 - 1,3 kW pour la batterie de ventilation



Baisse d'efficacité du système TA de 12 %



Plan

1. HEKYOM, l'énergie du son
2. Valorisation des rejets thermiques des moteurs à combustion interne : un exemple de moteur essence automobile
3. Valorisation des rejets thermiques des moteurs à combustion interne : un exemple de moteur diesel marin
4. Récupération des rejets thermiques dans les gaz d'échappement
5. Conclusion et perspectives

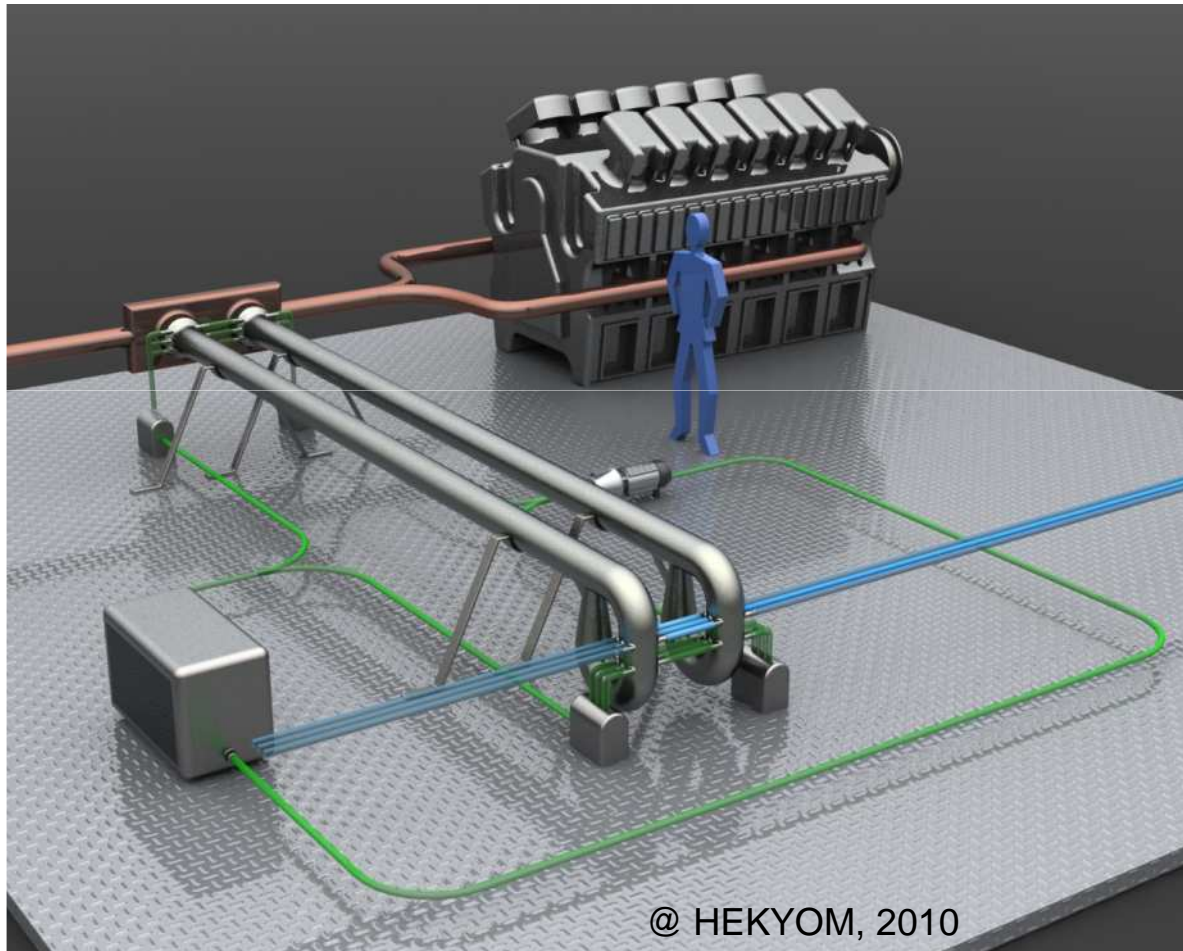


Récupération de chaleur dans les gaz d'échappements : un enjeu réaliste mais complexe ?

- Encrassement dû aux particules fines
 - taille des pores de nos échangeurs ?
 - diminution du coefficient d'échange
 - surface d'échange importante
- Faible perte de charge afin de ne pas augmenter la consommation du moteur → limitation de la surface d'échange
- Température de sortie minimale pour éviter condensation



Échangeur direct ou indirect ?



Compacité

Surface d'échange

Coefficient d'échange convectif

Perte de charge côté échappement et côté thermoacoustique



Plan

1. HEKYOM, l'énergie du son
2. Valorisation des rejets thermiques des moteurs à combustion interne : un exemple de moteur essence automobile
3. Valorisation des rejets thermiques des moteurs à combustion interne : un exemple de moteur diesel marin
4. Récupération des rejets thermiques dans les gaz d'échappement
5. Conclusion et perspectives



Conclusions et perspectives

- Un domaine prometteur pour la thermoacoustique
- Comparaison favorable avec les technologies concurrentes : Rankine, thermoélectricité, etc.
- Échangeur récupérateur d'énergie : l'un des éléments-clés du système
→ secteur ouvert à l'innovation