

# Projets de Récupération de chaleur fatale suivis par l'ULg

Waste Heat to Energy, le point sur une filière à haut potentiel  
*Université de Liège, le 14 mars 2017*

**Vincent LEMORT**, Van Long LE, Samuel GENDEBIEN, Ludovic  
GUILLAUME, et al.

*Laboratoire de Thermodynamique, Université de Liège*

# Contenu de la présentation

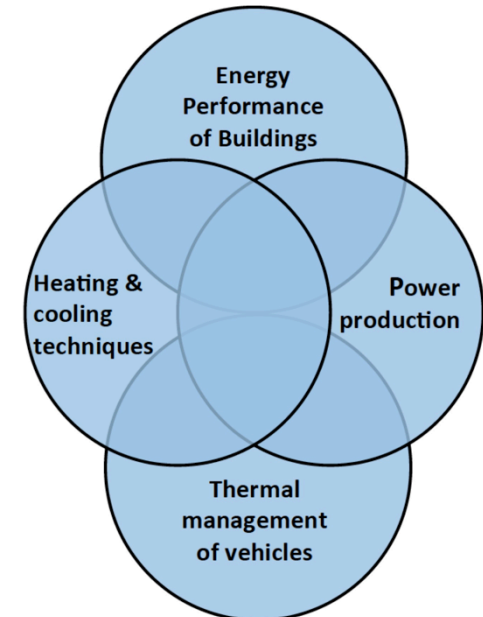
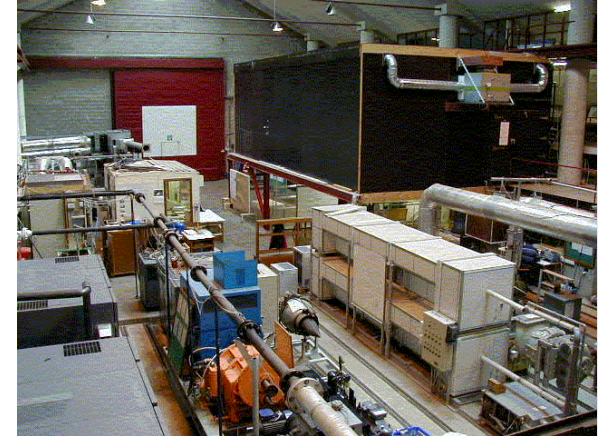
---

- 1. Laboratoire de thermodynamique**
2. Bancs d'essais moteurs aéronautiques
3. Fours de réchauffage de brames
4. Moteurs à combustion interne
5. Conclusions

# Laboratoire de Thermodynamique

## *Présentation générale*

- Département d'Aérospatiale et Mécanique
- Equipe d'approx. **30 personnes**: 4 professeurs (1 Emérite), 3 postdoc, 12 doctorants, 4 techniciens, 1 secrétaire, 5 chercheurs invités, 2 collaborateurs scientifiques
- Activités de recherche contribue à développer des **systèmes thermiques** innovants et performants
- Bon équilibre entre recherche **expérimentale** et **numérique**
- Grande proximité avec le monde **industriel**



# Laboratoire de Thermodynamique

## *Activités sur la récupération de chaleur*

- Bâtiments

- ✓ Ventilation (Green+, SmartPac, Silenthalpic)
- ✓ Machines frigorifiques (IEA Annex 48)

« **Heat to heat** »: avec ou sans pompes à chaleur

- Transports

- ✓ Moteurs de voitures (thèses CIFRE)
- ✓ **Moteurs de poids lourds (FP7 Nowaste)**
- ✓ Moteurs de navires (FP7 Joule)
- ✓ **Moteurs d'avions (Green)**

« **Heat to power** »: ORC

(« Heat to cool »: cycles trithermes)

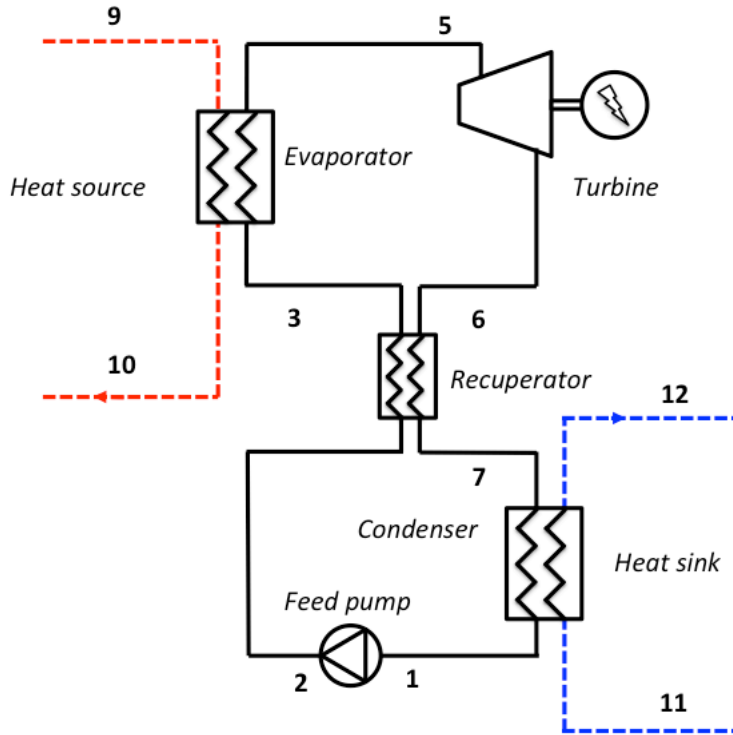
- Industrie

- ✓ **Fours à brames (ORCAL)**
- ✓ Cubilots de fonderies

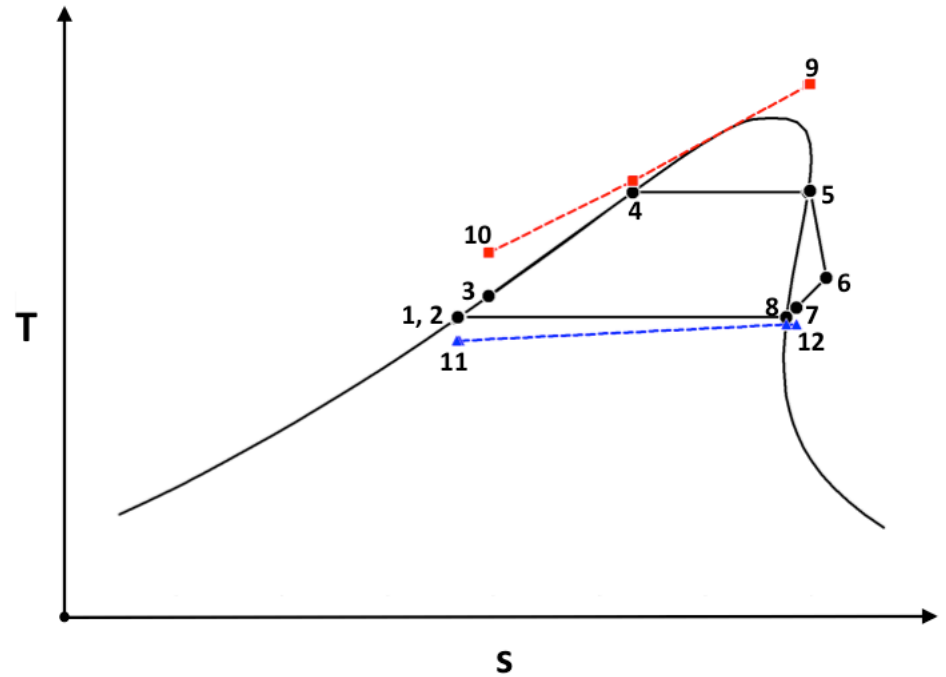
# Laboratoire de Thermodynamique

## Activités sur la récupération de chaleur

### Organic Rankine cycle (ORC)



*La machine*

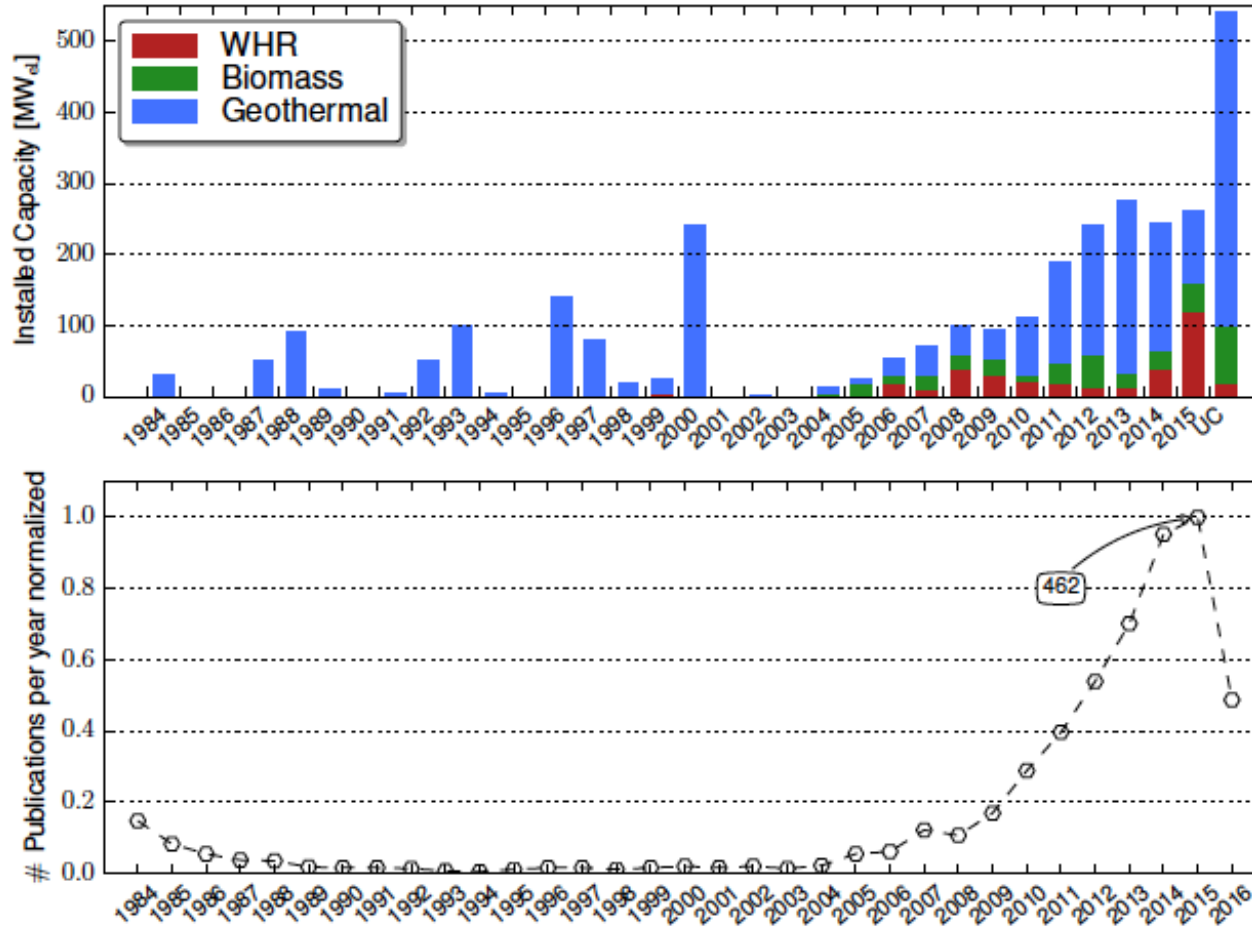


*Le cycle*

# Laboratoire de Thermodynamique

## *Activités sur la récupération de chaleur*

*Marché des ORCs est en plein développement...*



Source: Desideri, 2016

# Contenu de la présentation

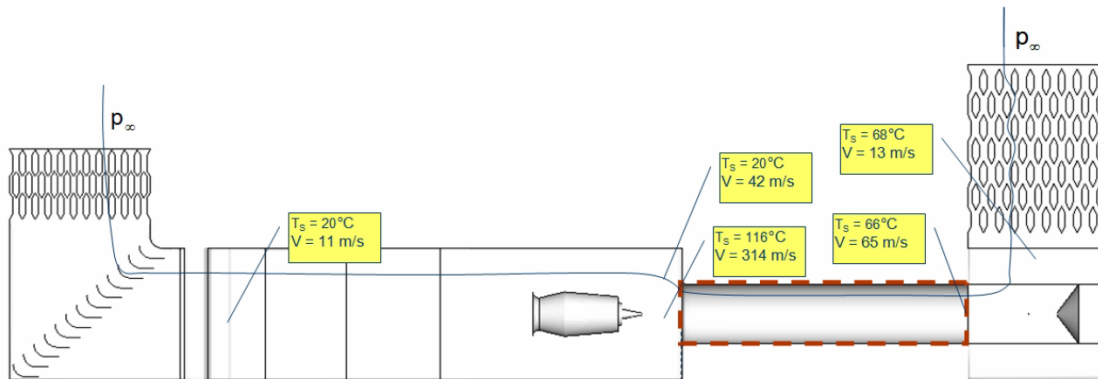
---

1. Laboratoire de thermodynamique
- 2. Bancs d'essais moteurs aéronautiques**
3. Fours de réchauffage de brames
4. Moteurs à combustion interne
5. Conclusions

# Bancs d'essais moteurs aéronautiques

## Contexte

- Marché des bancs moteurs: OEM, fabricants de moteurs, sociétés de maintenance, compagnies aériennes, armées.
- Bancs d'essais à proximités de consommateurs énergétiques (chaleur/froid/électricité)
- Récupération de chaleur sur bancs d'essais de moteurs
  - Turbofan: gaz d'échappement (1240-1450 kg/s et 55-70°C: 47 MW)
  - Turbojet: gaz d'échappement (550 kg/s et approx. 300°C: 161 MW)
  - Turboprop: eau refroidissement du frein (30-70°C) et gaz (35-60 kg/s et approx. 300°C: 17 MW)
  - Turboshift: eau refroidissement du frein (30-70°C) et gaz (35-60 kg/s et approx. 317°C: 11 MW)

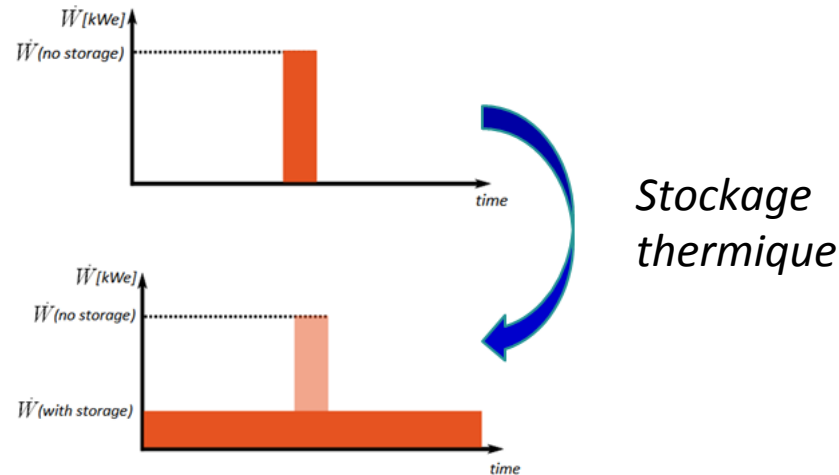




# Bancs d'essais moteurs aéronautiques

## *Verrous technologiques*

- Température des gaz en sortie de réacteur peut-être très basse: 55°C
- Rentabilité économique de la solution de récupération de chaleur dépend de la fréquence d'utilisation du banc (et de la simultanéité avec la consommation énergétique du site).

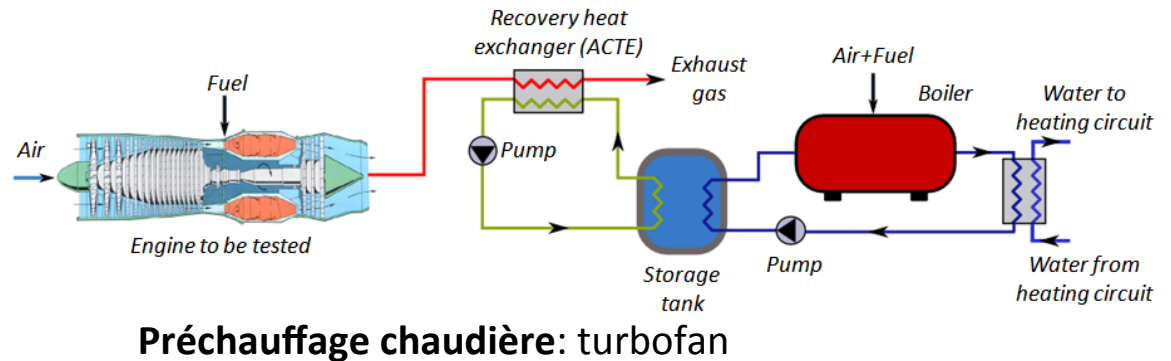
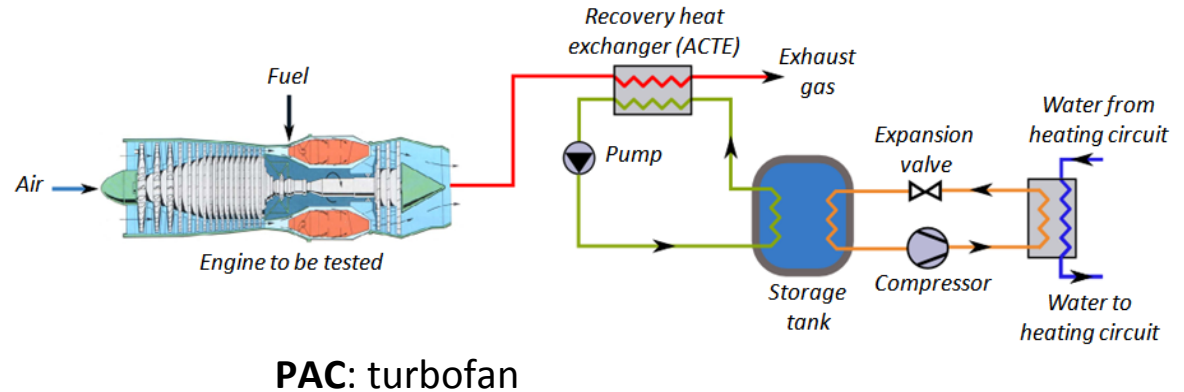
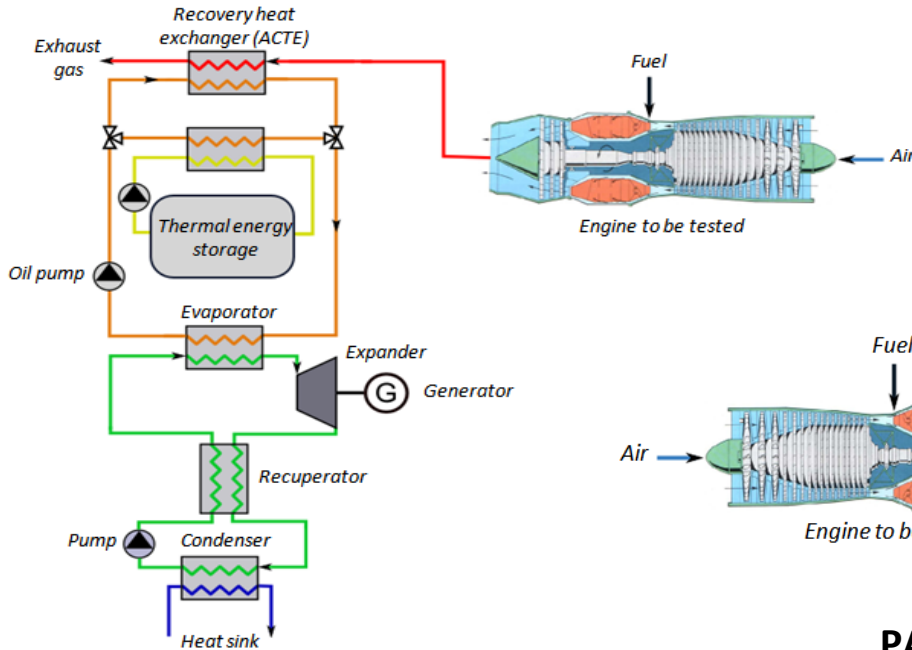


- Echangeur de récupération de chaleur ne doit pas perturber les performances du moteur (limitation de la contre-pression).

# Bancs d'essais moteurs aéronautiques

## Contributions

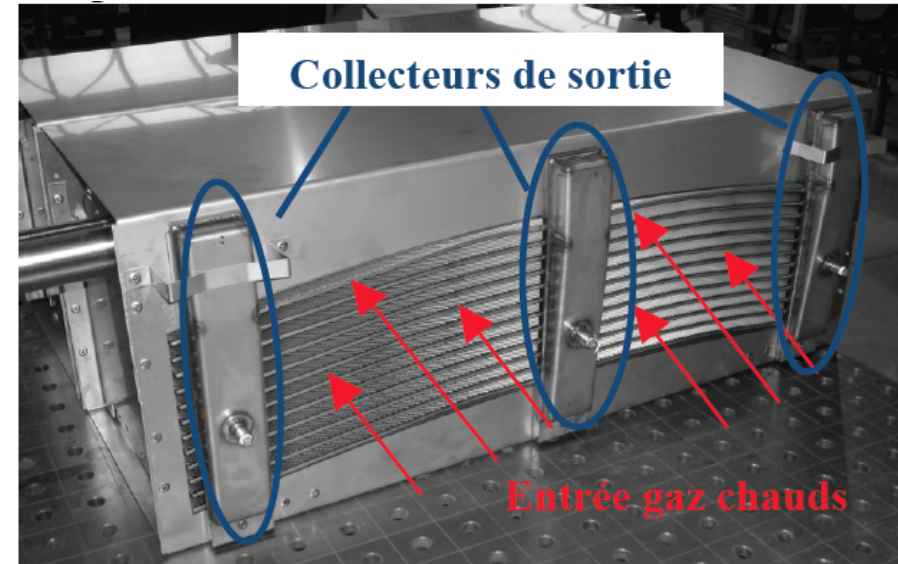
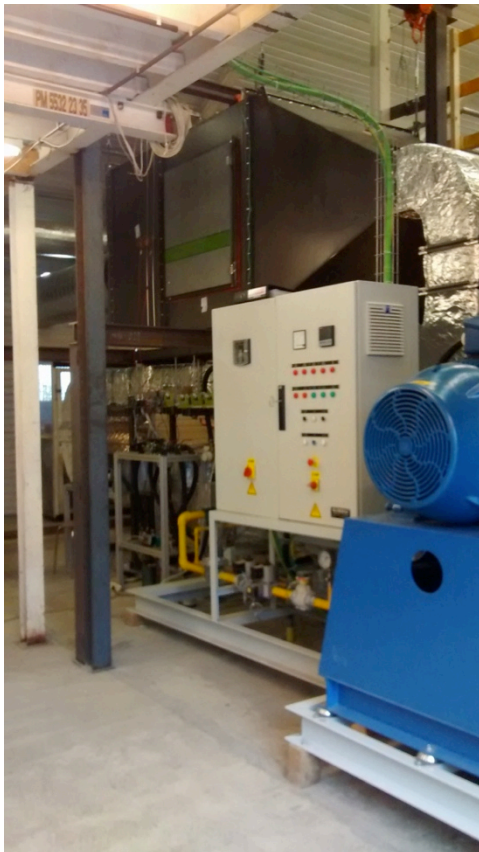
- Comparaison par la simulation de différentes techniques de récupération.



# Bancs d'essais moteurs aéronautiques

## Contributions

- Mise à l'essais et modélisation d'un prototype d'échangeur de chaleur mis à l'échelle (similitude de Reynolds).

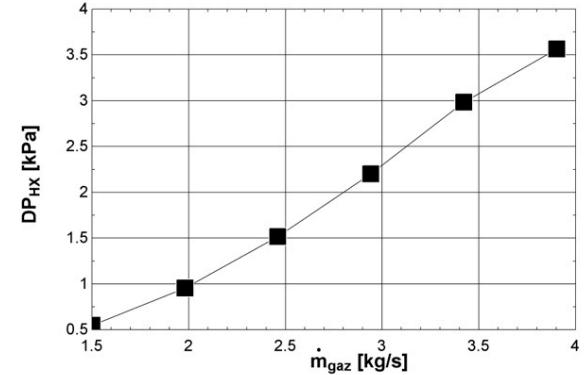
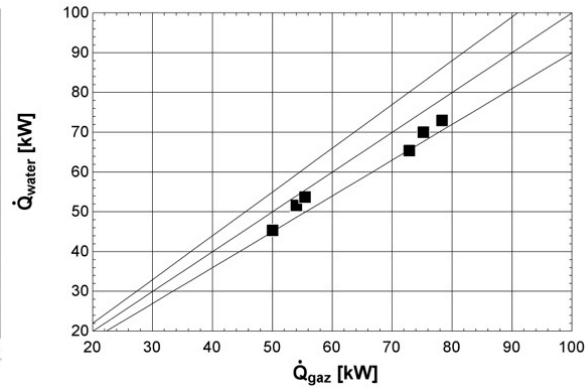
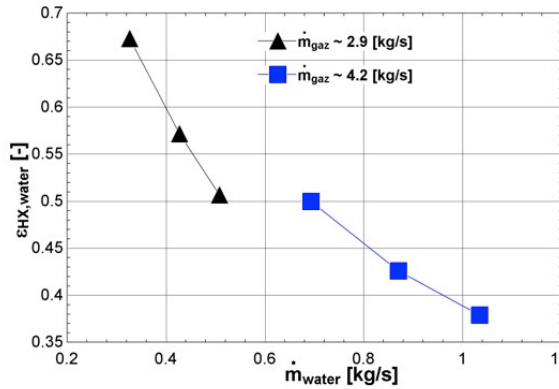


- Echangeur: plaques tubulaires, 14 m<sup>2</sup>
- Banc d'essais: Brûleur gaz de 465kW (vs 46 MW), débit d'air: 0-4.2 kg/s et température: 20-450°C

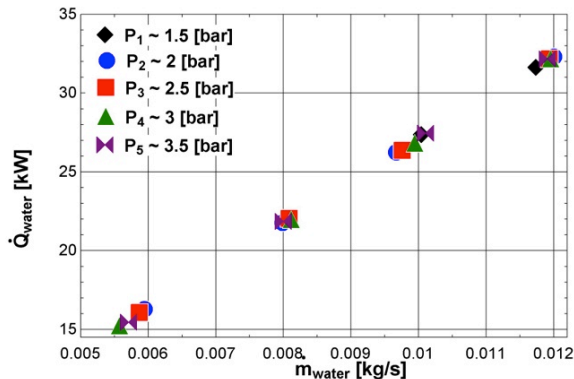
# Bancs d'essais moteurs aéronautiques

## Contributions

- Performances en « heat to heat » (génération d'eau chaude):



- Performances en « heat to power » (génération de vapeur):



# Bancs d'essais moteurs aéronautiques

## *Perspectives*

---

- Etudier en détails plusieurs sites équipés de bancs d'essais.
- Réaliser des essais avec des fluides organiques (ORC).
- Etudier la dynamique de l'échangeur.

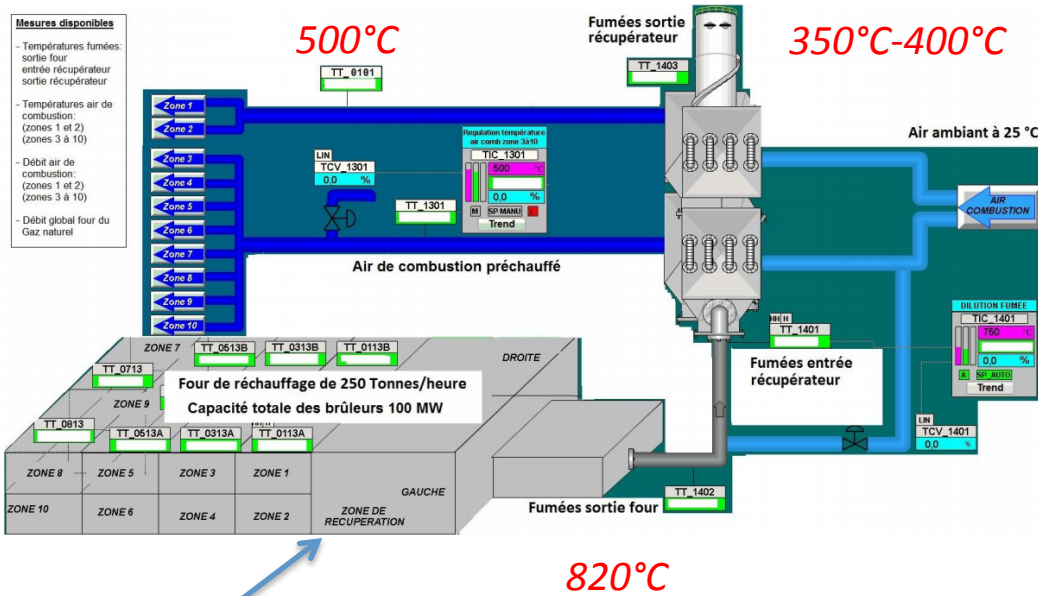
# Contenu de la présentation

---

1. Laboratoire de thermodynamique
2. Bancs d'essais aéronautiques
- 3. Fours de réchauffage de brames**
4. Moteurs à combustion interne
5. Conclusions

# Fours de réchauffage de brames

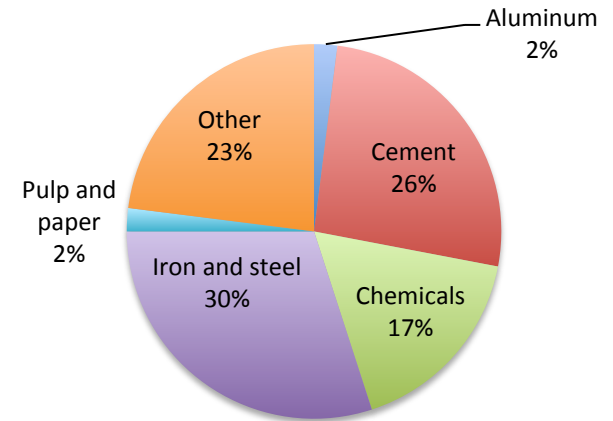
## Contexte



- Consommation en gaz: 350 kWh par tonne d'acier produite.
- Fours déjà équipés d'un échangeurs de récupération
- 25-35% perdus dans les fumées.
- Potentiel additionnel de récupération via un ORC.



Source: Comeca



Emissions directes de CO2 dans l'industrie, par secteur en 2006 (IEA, 2009)

# Fours de réchauffage de brames

## *Verrous technologiques et scientifiques*

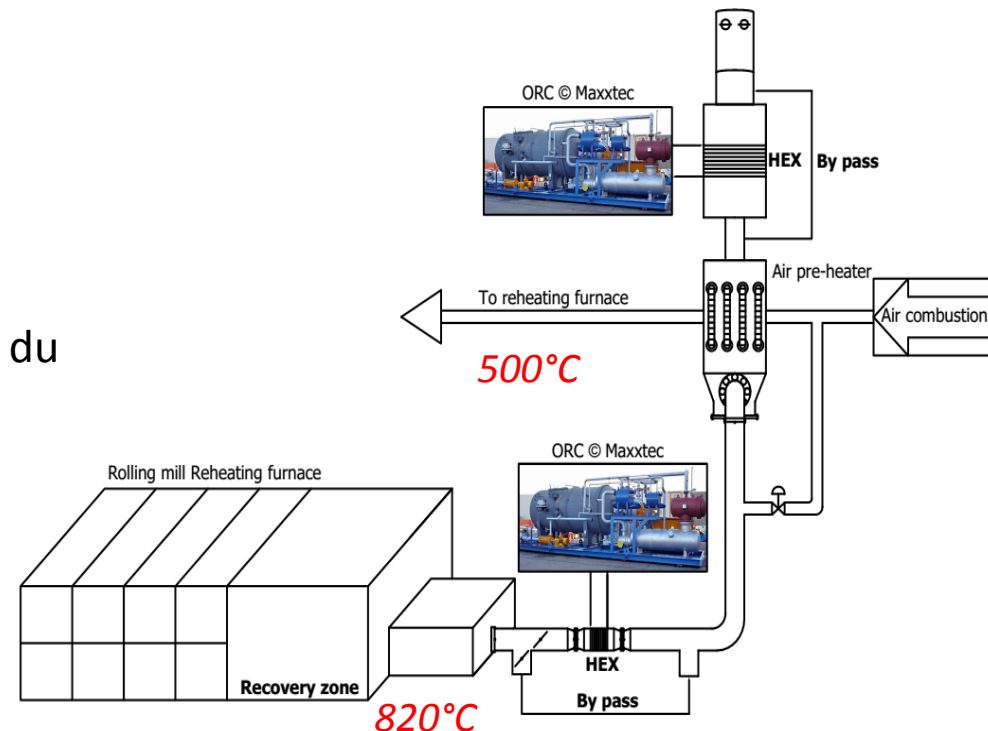
○ Position de l'échangeur de récupération additionnel

➤ Aval du récupérateur:

- ✓ Evaporation directe est possible (pas de fluide intermédiaire)
- ✗ Transfert de chaleur sous un faible  $\Delta T$ : importantes surface d'échange et pertes de charge.

➤ Amont du récupérateur:

- ✓ Important  $\Delta T$ : limitation pertes de charge.
- ✗ Chute de  $t^\circ$  → redimensionnement du récupérateur
- ✗ Haute température → évaporation indirecte impossible/choix fluide caloporteur limité

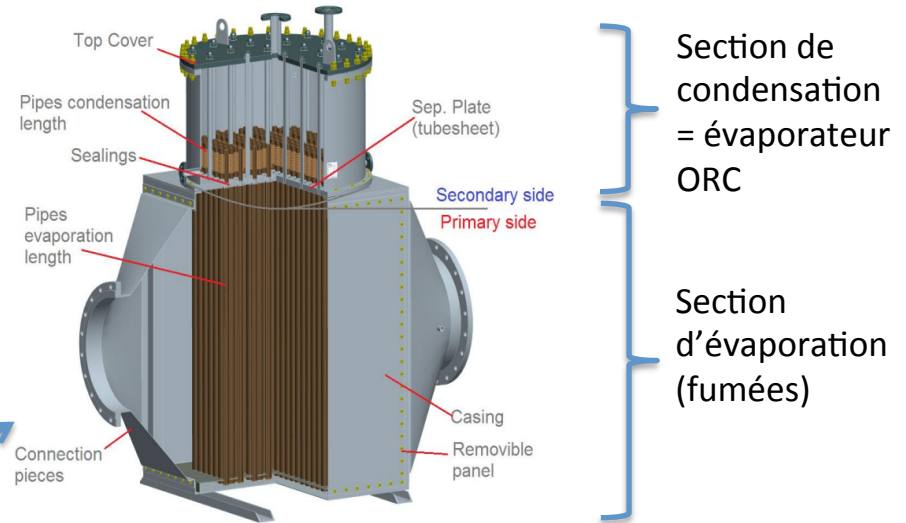




# Fours de réchauffage de brames

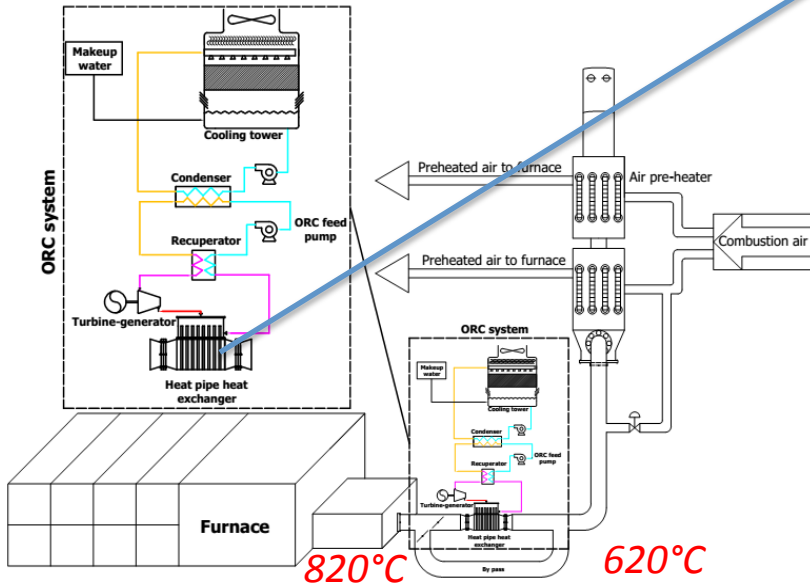
## Verrous technologiques

- Utilisation de caloducs à gravité (« thermosiphons »)
  - ✓ Fluide caloporteur naturel
  - ✓ Faible gradient de température
  - ✓ Faible coût, peu de maintenance, compact, fiable
  - ✓ Pas de pompes circulation



Source: Amini A., 2013

- Utilisation d'un ORC vs cycle à vapeur d'eau: thermodynamiquement et économiquement plus intéressant

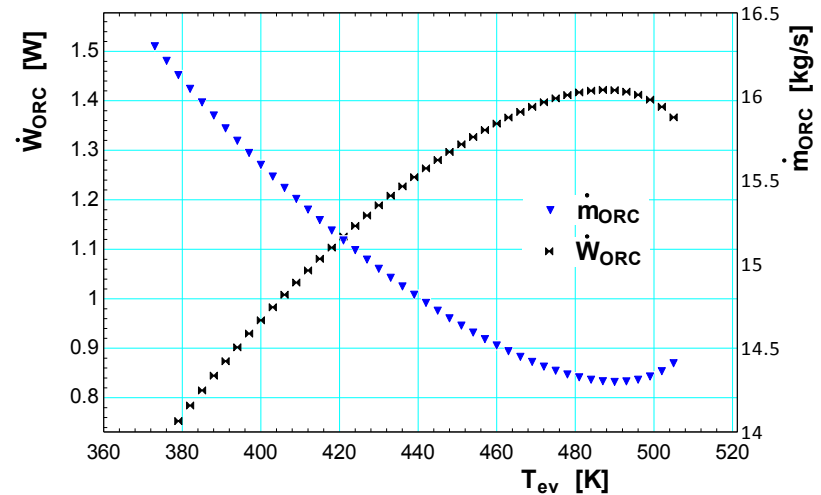
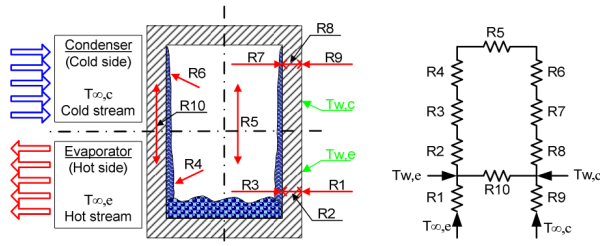


# Fours de réchauffage de brames

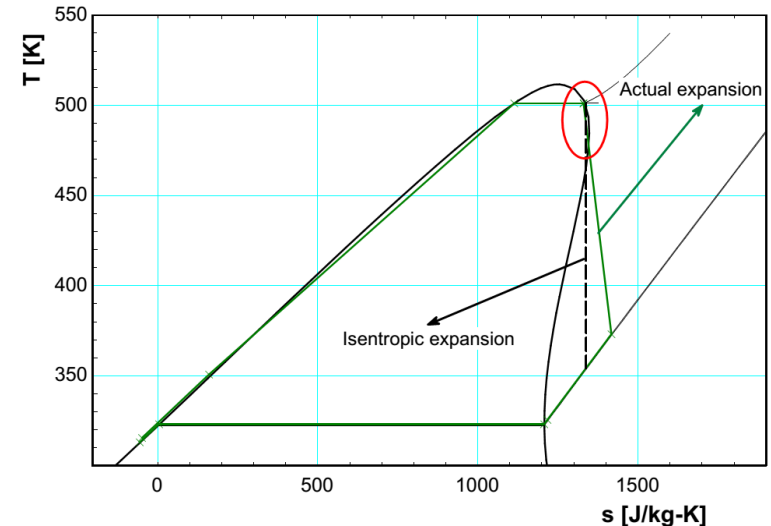
## Contributions

$\times 10^6$

- Dimensionnement des caloducs (prises en compte limites sur les transferts de chaleur), choix du fluide (eau)/matériau (acier)



- Pre-dimensionnement ORC: utilisation du cyclopentane, turbine, échangeur récupérateur
- Performances évaluées:
  - ✓ 7,435 MWth récupérés
  - ✓ 1.42 MWe produits
  - ✓ Rendement ORC: 19.1%
  - ✓ Payback > 4 ans



# Contenu de la présentation

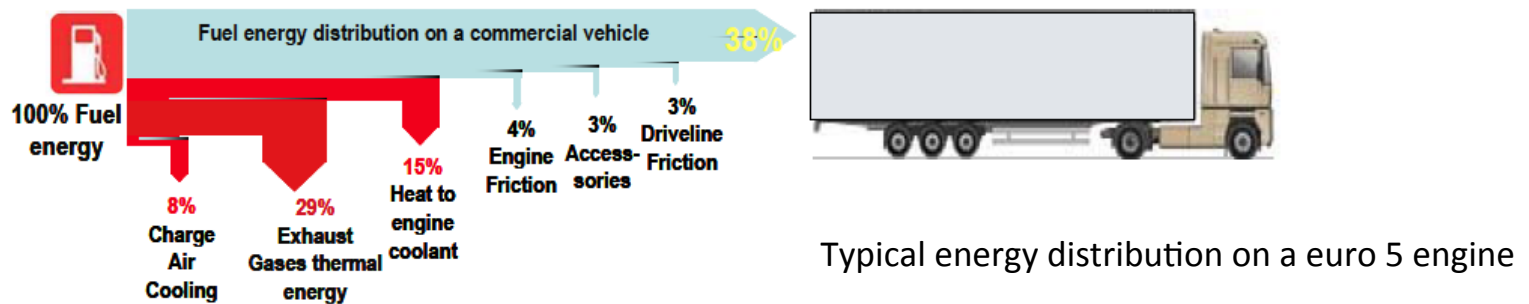
---

1. Laboratoire de thermodynamique
2. Bancs d'essais de moteurs aéronautiques
3. Fours de réchauffage de brames
- 4. Moteurs à combustion interne**
5. Conclusions

# Moteurs à combustion interne

## Contexte

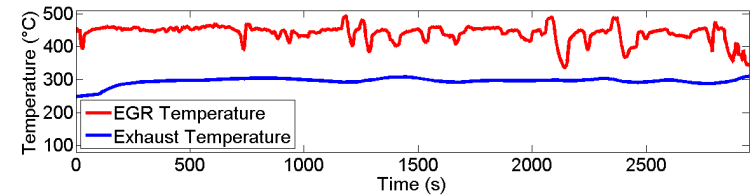
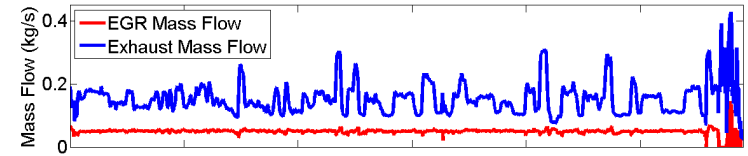
- Réduire la consommation de carburant des poids lourds est nécessaire:
  - Pour réduire les émissions de CO2.
  - Augmenter la compétitivité du transport par camion (le carburant représente 28% du coût opératoire d'un camion).
- Une des pistes: valorisation chaleur rejetée à l'ambiance (près de 60% de l'énergie du carburant) via ORC.



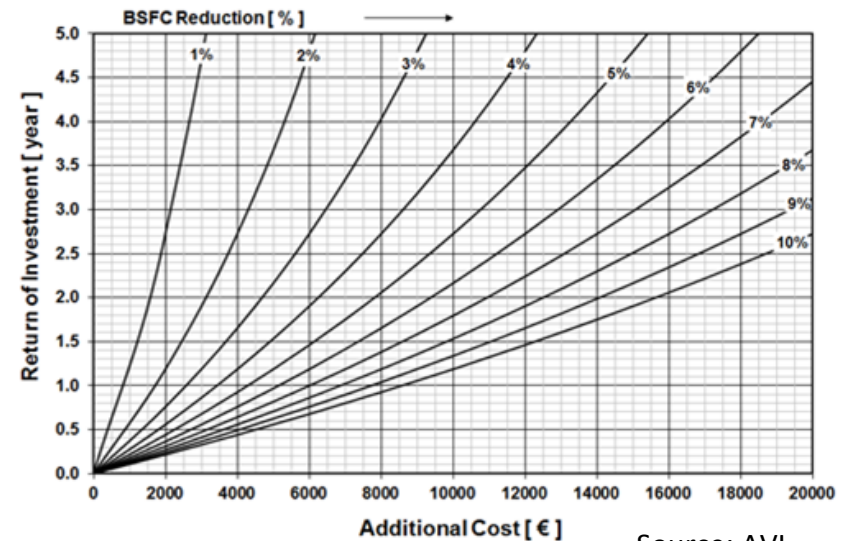
# Moteurs à combustion interne

## Verrous technologiques

- Choix du fluide + machine expansion
- Limitation sur le poids/contre-pression moteur
- Sources de chaleur fortement dynamiques: contrôle adapté
- Augmentation de la charge de refroidissement du camion
- Atteindre un ROI < 2 ans



### RETURN OF INVEST (ROI) VIEW

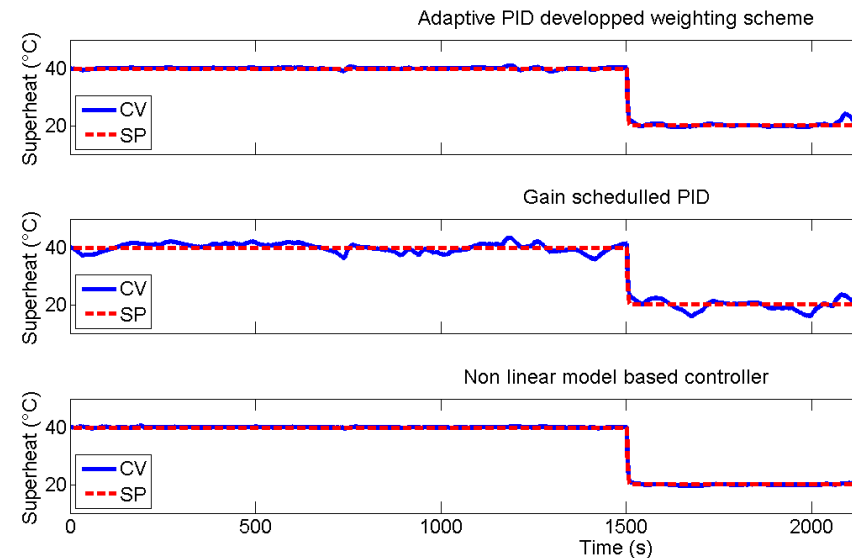
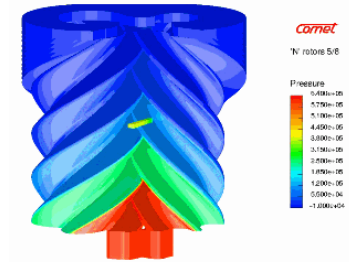
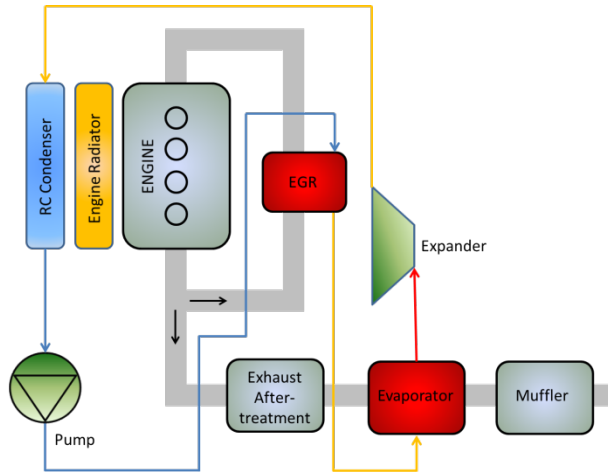


Source: AVL

# Moteurs à combustion interne

## Contributions

- Développement, modélisation et caractérisation expérimentale de nombreuses turbines (volumétriques, axiales, radiales)
- Développement outils simulation régime établi/dynamique
- Etude architecture ORC
- Etude du contrôle des ORC



Source: V. Grelet et al.. Model based control for waste heat recovery heat exchangers Rankine cycle system in heating duty trucks. 3rd International Seminar on ORC Power Systems, Brussels, 2015.

# Conclusions et perspectives

---

- Les solutions techniques présentées (en particulier, les ORC) sont globalement techniquement matures, mais le **potentiel d'innovation** reste très large.
  - Développement de composants: échangeurs, turbines, stockages, etc.
  - Stratégies de contrôle avancées.
- La **rentabilité économique** (ROI) est parfois encore difficilement atteignable.
- La solution de récupération de chaleur a un **impact sur le procédé**: une approche globale est nécessaire.

---

Merci pour votre attention!

Nous remercions également la Région wallonne et la Commission européenne pour le financement des projets présentés.

[Vincent.lemort@ulg.ac.be](mailto:Vincent.lemort@ulg.ac.be)

