

---

# CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DU MODULE ORC D'UNE MICRO-CENTRALE SOLAIRE

JOURNÉE MICRO/MINI COGÉNÉRATION

Paris, le 3 février 2016

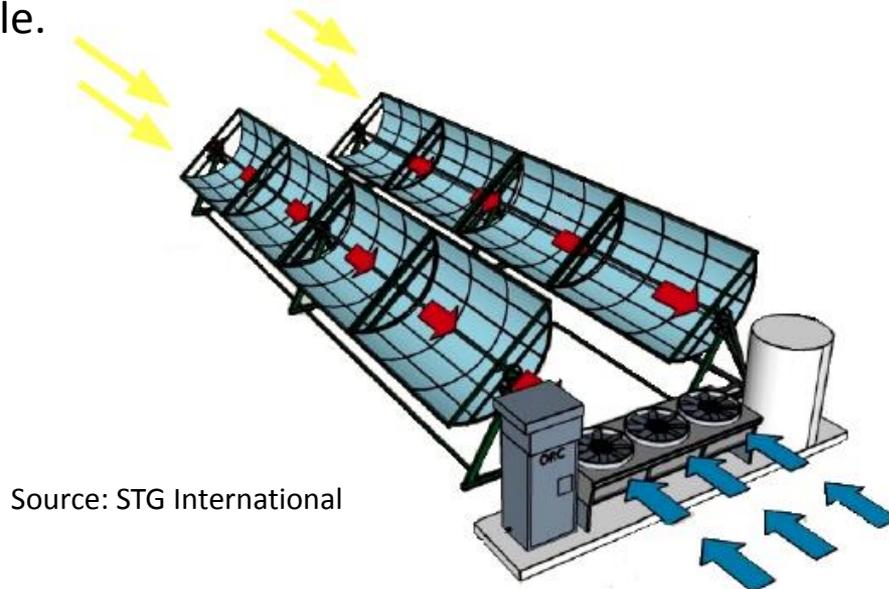
*Vincent Lemort, Olivier Dumont et Rémi Dickes*

Laboratoire de Thermodynamique, Université de Liège



# Contexte

- 2010: La Laboratoire de Thermodynamique a lancé le projet **Sun2Power**
- Projet pédagogique: “pour les étudiants et par les étudiants”.
- Objectifs:
  - ✧ Concevoir, construire et tester une micro-centrale solaire associant un champs de collecteurs **cylindro-paraboliques** et un module **ORC** (3 kWe)
  - ✧ Disposer d’une mise à l’échelle d’une centrale de plus grosse puissance pour l’étude du contrôle.



# Contenu de la présentation

---

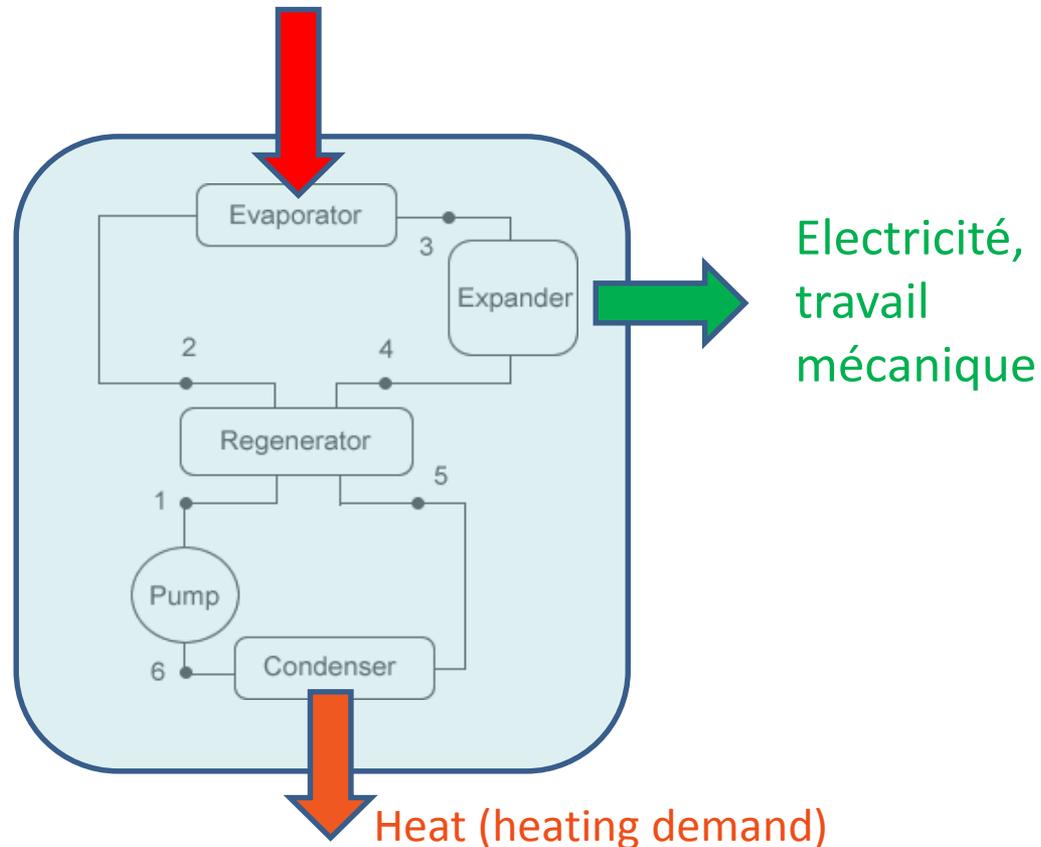
1. Contexte
2. **Technologie de l'ORC**
3. Dimensionnement de la micro-centrale solaire
4. Résultats expérimentaux sur le module ORC
5. Conclusions & perspectives

# Technologie de l'ORC (Organic Rankine Cycle)

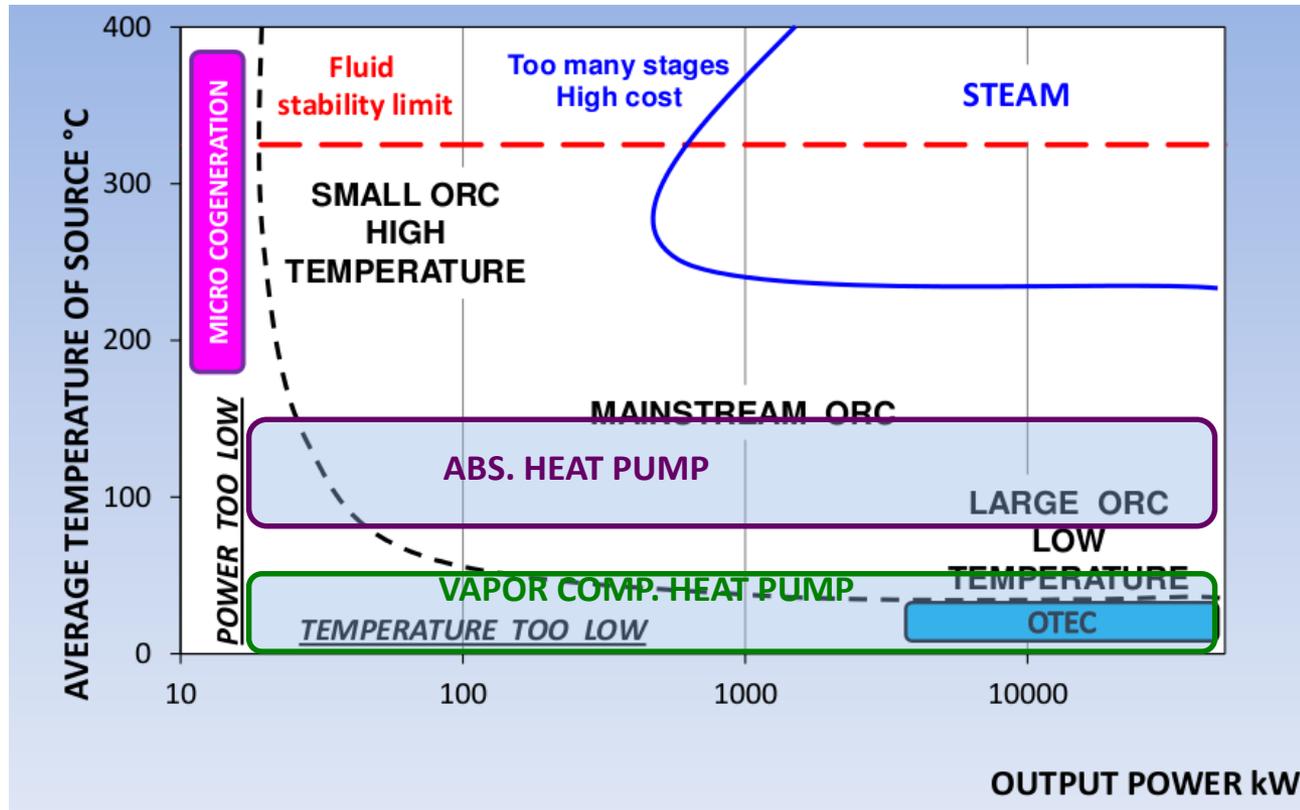
Chaleur fatale ou sources d'énergie renouvelables:  
solaire, biomasse, géothermie

Similaire aux cycles de Rankine conventionnel ,  
mais...

... fluide organique (vs  
eau)  
=> Valorisation de  
sources de chaleur à  
plus basse température



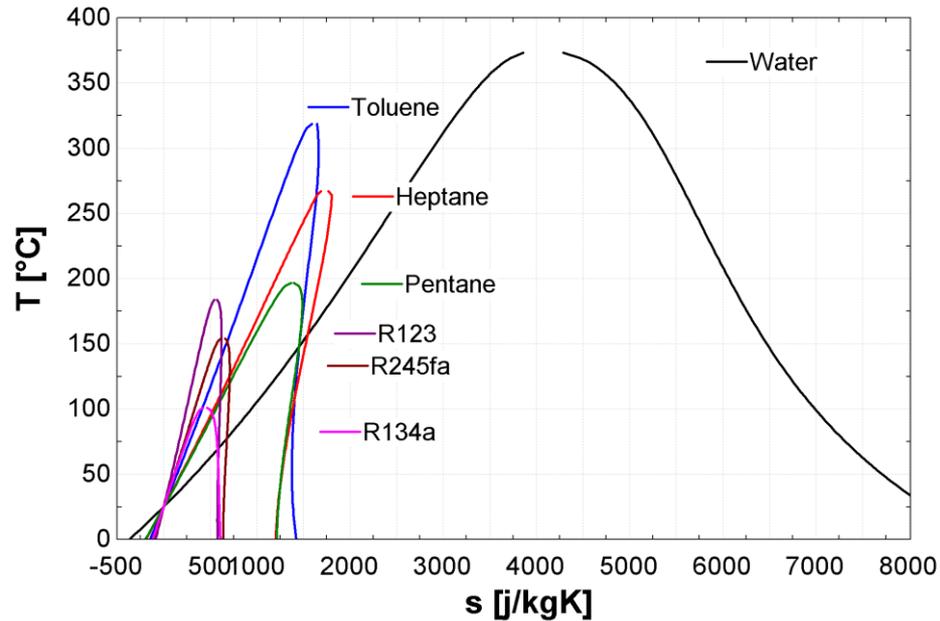
# Technologie de l'ORC (Organic Rankine Cycle)



Source: adapted from Gaia, 2011

# Dimensionnement de la micro-centrale

## *Choix du fluide de travail*

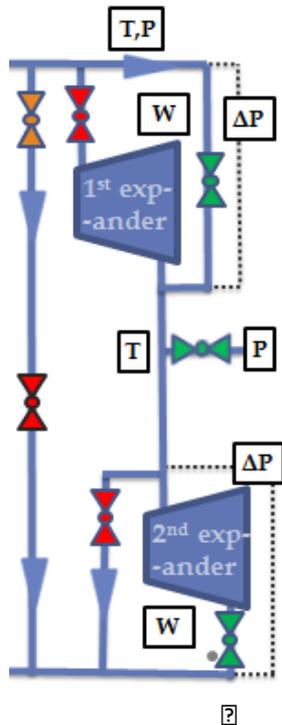


- ✓ **Performances énergétiques >>**
- ✓ Pente positive de la courbe de saturation
- ✓ Vapeur dense (taille expanseur!)
- ✓ Pression condenseur >1 bar
- ✓ Faible rapport de volume sur l'expanseur
- ✓ Faible débit massique
- ✓ Pression évaporation < 30 bar
- ✓ Faible backwork ratio
- ✓ Grande disponibilité et bas prix
- ✓ Faible impact environnemental et niveau de sécurité acceptable

# Dimensionnement de la micro-centrale

## 2 expandeurs vs 1 expandeur

$$\eta_{cycle} = \frac{(\dot{W}_{exp} - \dot{W}_{pump} - \dot{W}_{fan})|_{elec.}}{\dot{Q}_{ev}}$$



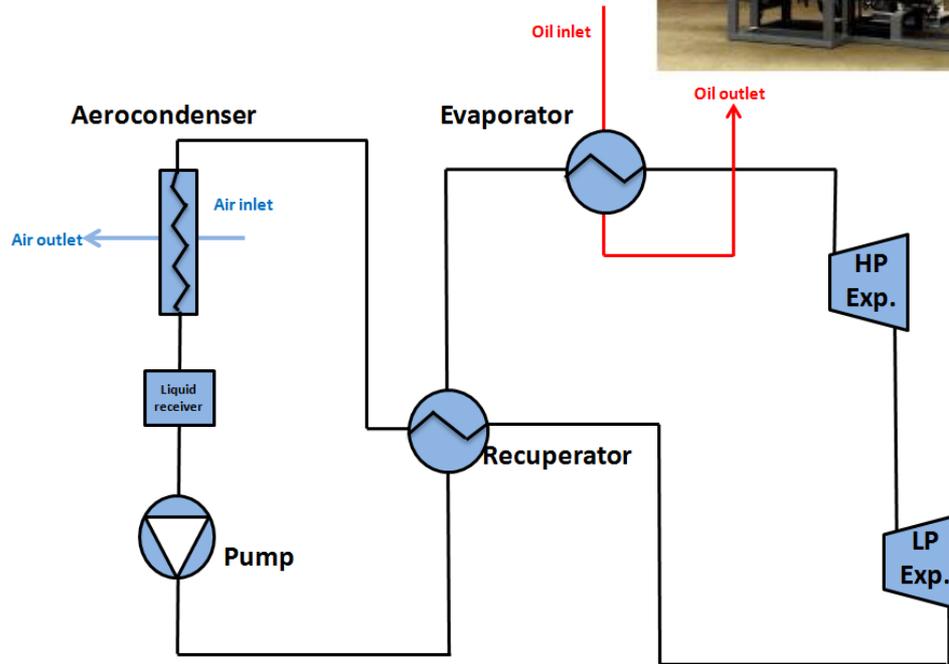
	R245fa		SES36	
	1 exp	2 exp	1 exp	2 exp
HP expander swept volume [cm <sup>3</sup> ]	39.92	11.42	64.27	22.77
LP expander swept volume [cm <sup>3</sup> ]		48.04		84.42
HP expander isentropic efficiency	0.59	0.69	0.521	0.699
LP expander isentropic efficiency		0.69		0.66
Pump consumption [kW]	0.2	0.29	0.166	0.185
Net Power [kW]	2.8	2.71	2.83	2.81
Boiler thermal power [kW]	34	23.8	32.1	21.3
Regenerator thermal power [kW]	4.69	3.3	9.5	7.6
Condenser thermal power [kW]	30.8	20.5	28.8	17.8
Mass flow rate [kg/s]	0.159	0.105	0.203	0.129
<b>Cycle thermal efficiency</b>	<b>8.2</b>	<b>11.36</b>	<b>8.83</b>	<b>13.21</b>
Evaporating temperature [°C]	105.1	140	114.5	140
Evaporating pressure [bar]	14.2	28.1	8.7	14.6
Condensing temperature [°C]	35	35	35	35
Condensing pressure [bar]	2.1	2.1	0.99	0.99

- ✓ Température maximale de 140°C
- ✓ Pression intermédiaire adaptée pour maximiser les performances
- Augmentation rendement de 38% pour le R245fa et de 50% pour SES36 .
- Coût additionnel, mais réduction de la taille du champs solaire.
- Taille expandeurs est un critère.

# Dimensionnement de la micro-centrale

## Conditions nominales

- ORC avec récupérateur
- Fluide de travail: HFC-245fa
- Composants issus de l'industrie HVAC/automobile



### ORC nominal operating conditions

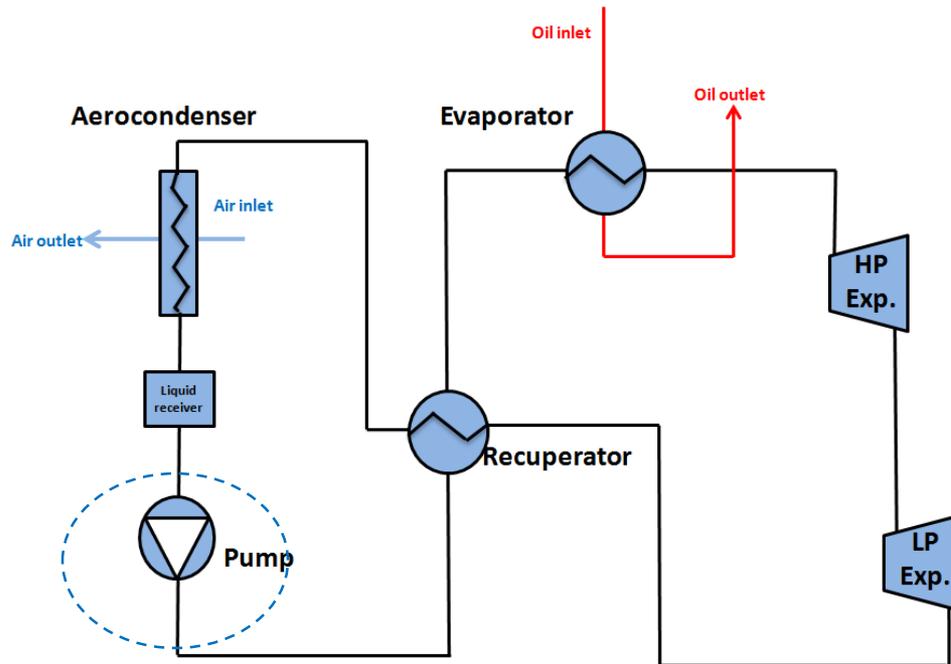
$T_{ev}$	140	°C
$P_{ev}$	28	bar
$T_{cd}$	35	°C
$P_{cd}$	2.1	bar
$Q_{ev}$	24	kW
$Q_{cd}$	20.5	kW
$Q_{rec}$	3.5	kW
$W_{pp}$	0.3	kW
$W_{net}$	2.8	kW
$\eta_{ORC}$	10.5	%

\* Georges et al. , Design of a small-scale ORC engine used in a solar power plant, 2013

# Dimensionnement de la micro-centrale

## *Pompe*

- ORC avec récupérateur
- Fluide de travail: HFC-245fa
- Composants issus de l'industrie HVAC



### Pompes

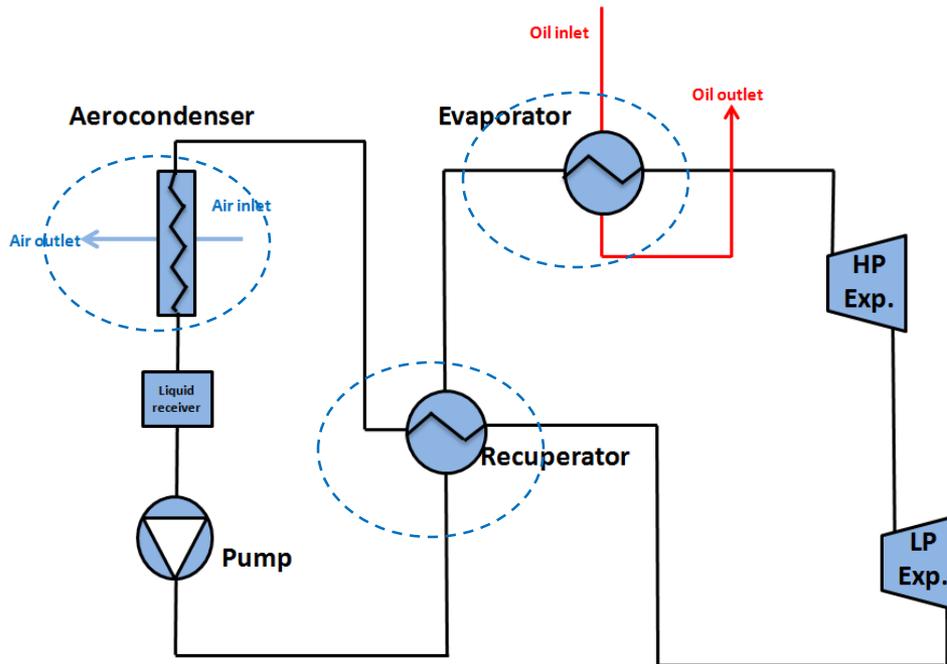
- Deux pompes testées
  - Engrenages (Viking SG-80550-M0V)
  - Diaphragme (Hydra-cell G13)
- $N_{pp}$  régulée par un variateur de fréquence



# Dimensionnement de la micro-centrale

## *Echangeurs de chaleur*

- ORC avec récupérateur
- Fluide de travail: HFC-245fa
- Composants issus de l'industrie HVAC



### Echangeurs

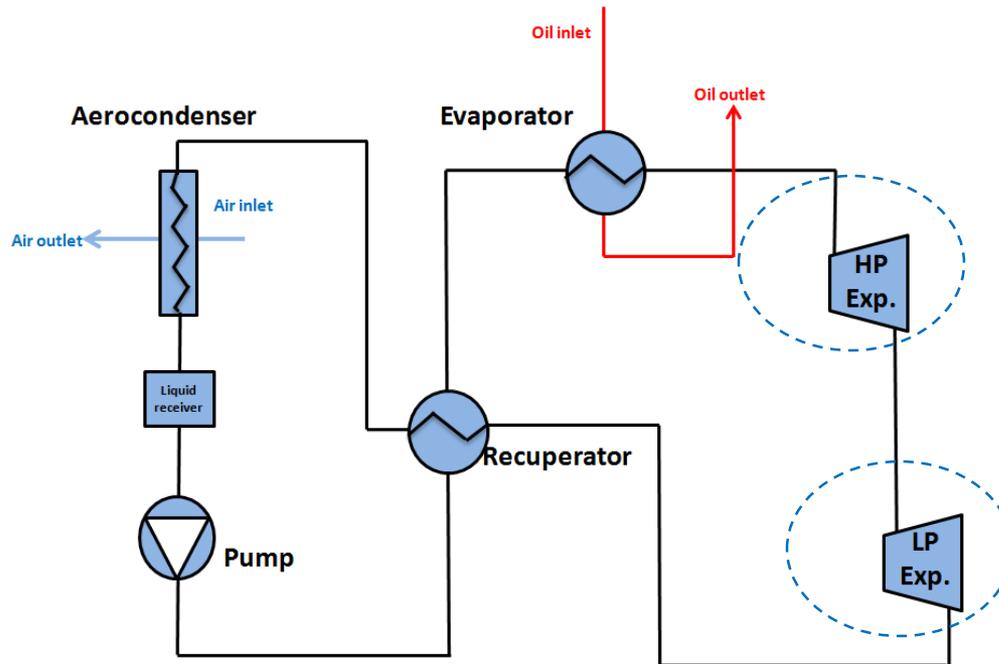
- Plaques
  - Récupérateur (Alfa Laval CB30-40H-F)
  - Evaporateur (Alfa Laval CB76-100E)
- Tubes et ailettes
  - Condenseur (Alfa Laval Solar Junior 121)



# Dimensionnement de la micro-centrale

## Expandeurs

- ORC avec récupérateur
- Fluide de travail: HFC-245fa
- Composants issus de l'industrie HVAC



### Expandeurs

- Deux expandeurs de type scroll
  - Expandeur HP (Copeland ZR34K3E-ZD)
  - Expandeur LP (Copeland ZR144KCE-TFD)
- Directement connectés au réseau électrique



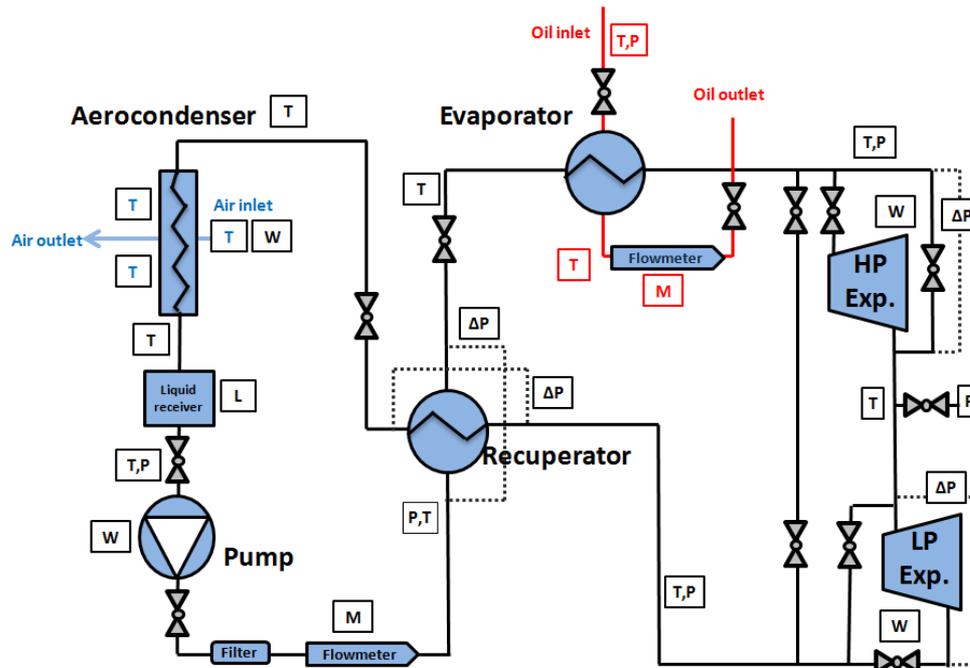
# Dimensionnement de la micro-centrale

## *Systeme d'acquisition*

- ORC avec récupérateur
- Fluide de travail: HFC-245fa
- Composants issus de l'industrie HVAC

### Systemes d'acquisition des mesures

- Pressions absolues, relatives et différentielles
- Thermocouples de type T.
- Débitmètre Coriolis et 4 wattmètres
- Acquisition et contrôle avec LabView



T = Temperature | P = Pressure | ΔP = Pressure difference | W = Electric power | M = Mass flow | L = Liquid level

# Premiers résultats expérimentaux

• 110 points en régime stabilisé

• 4 variables de contrôle:

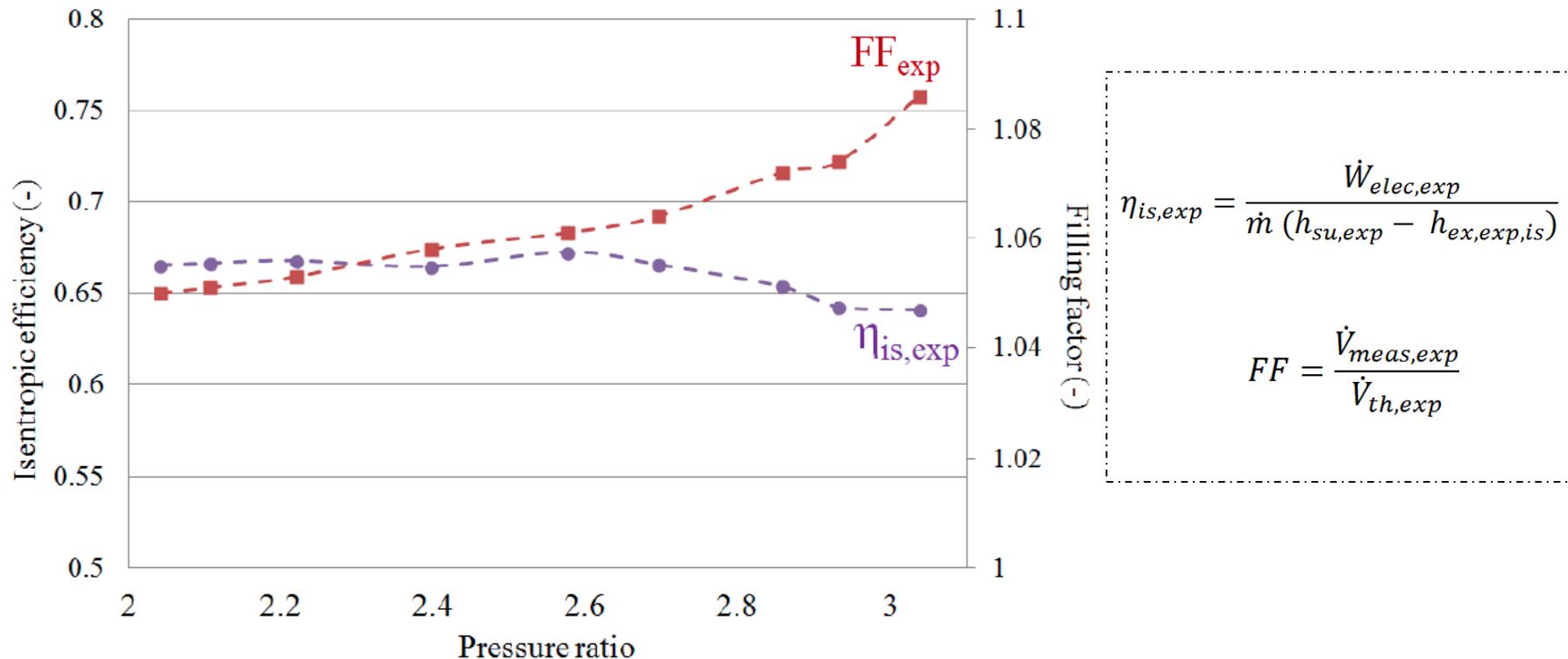
- Débit d'huile chaude;
- Température d'huile chaude;
- Vitesse de la pompe;
- Vitesse du ventilateur du condenseur;

• Configuration avec un seul expandeur

	Min	Max	
$P_{ev}$	14.5	22.6	bar
$P_{cd}$	2.1	7.9	bar
$T_{ev,ex}$	111	135	°C
$T_{cd,ex}$	25.8	61.8	°C
$m_{R245fa}$	76.2	149	g/s
$Q_{ev,th}$	14.6	29.5	kW
$Q_{cd,th}$	14.6	29.5	kW
$W_{exp}$	0.57	1.78	kW
$W_{pp}$	0.28	0.7	kW
$W_{cd}$	0.05	0.3	kW

# Premiers résultats expérimentaux

## Performances de l'expandeur

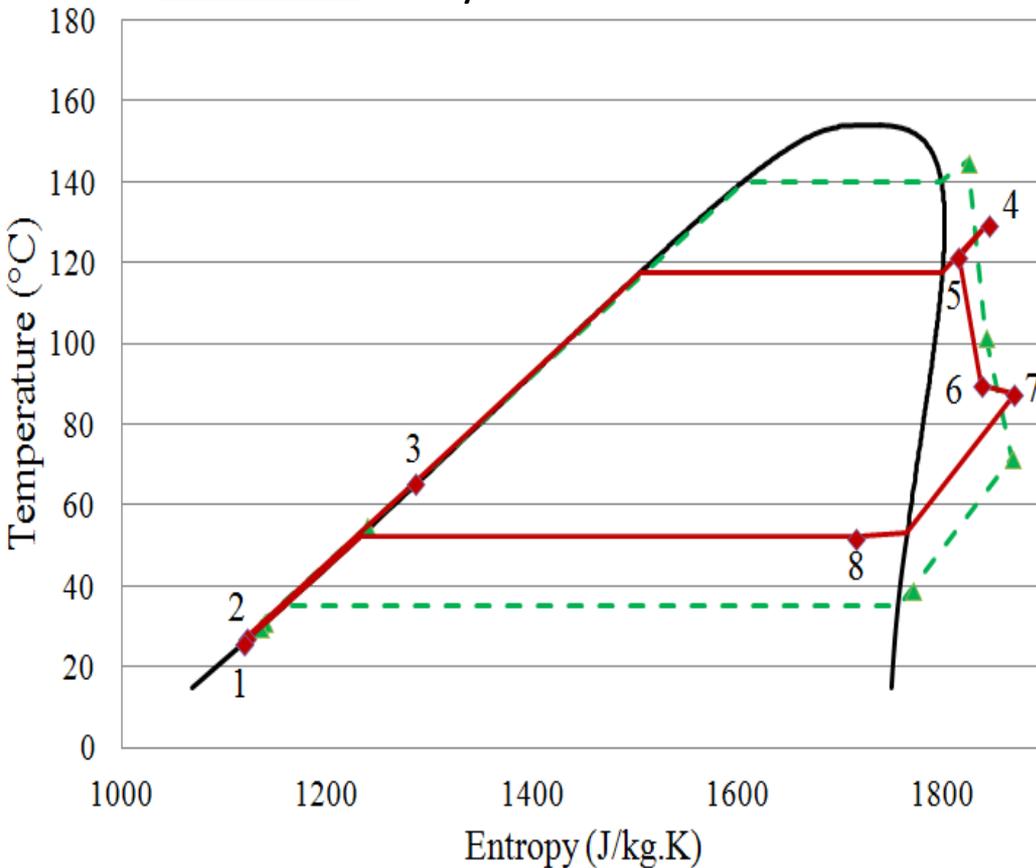


Conditions opératoires: débit de 110 g/s et pression d'évaporation de 18.6 bars

# Premiers résultats expérimentaux

## *Performance globale*

--- : Cycle théorique  
 — : Cycle mesuré



Best cycle performance		
Highest expander isentropic efficiency	68	%
Lowest expander filling factor	105	%
Highest cycle efficiency	4.5	%
Highest expander power generation	1780	W
Highest ORC net power generation	915	W

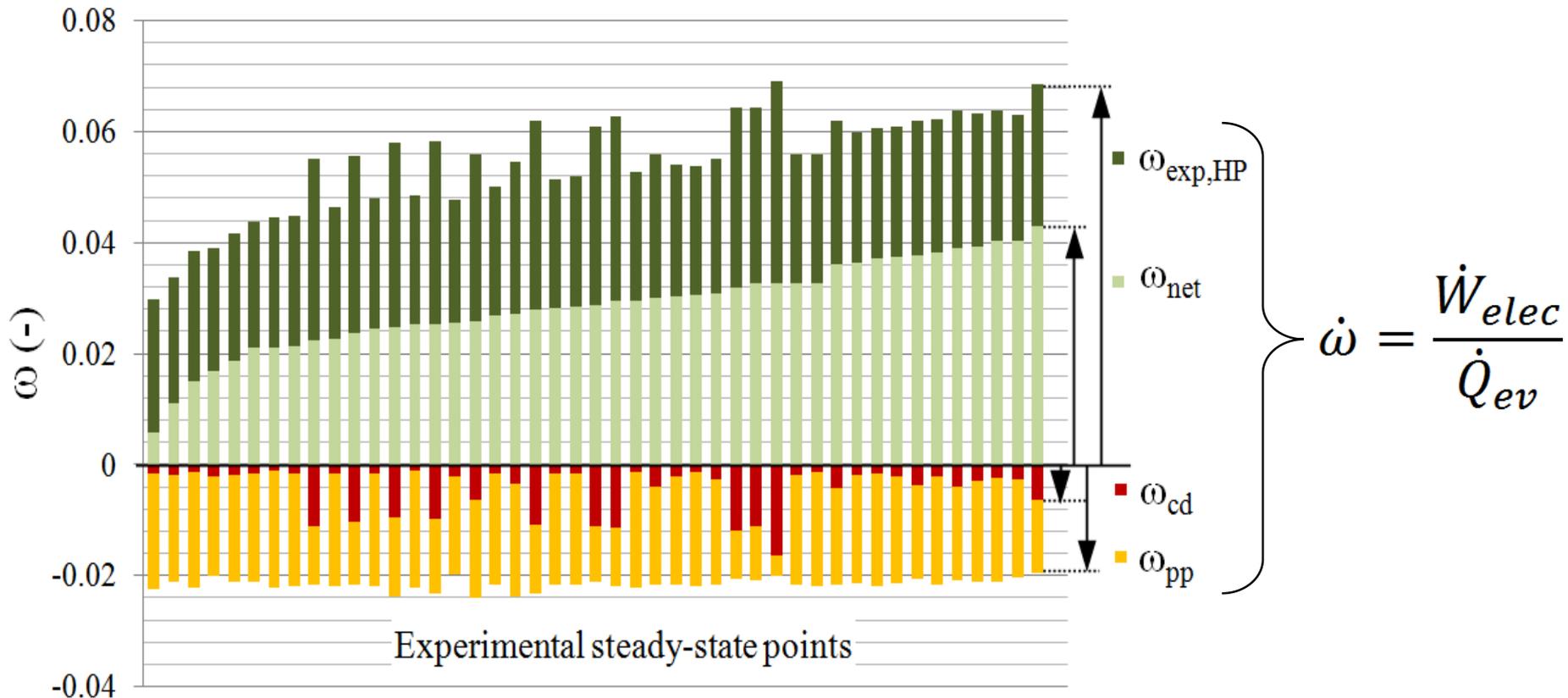
- Configuration à un seul expenseur
- $\Delta P$  excessif dans la ligne LP  $\rightarrow P_{cd} \gg$
- Expenseur surdimensionné  $\rightarrow P_{ev} \ll$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_{v, \text{expected}} > \Gamma_{v, \text{actual}} \\ V_{\text{swept, expected}} < V_{\text{swept, actual}} \\ P_{ev, \text{expected}} > P_{ev, \text{actual}} \end{array} \right.$$

# Premiers résultats expérimentaux

## *Performance globale*

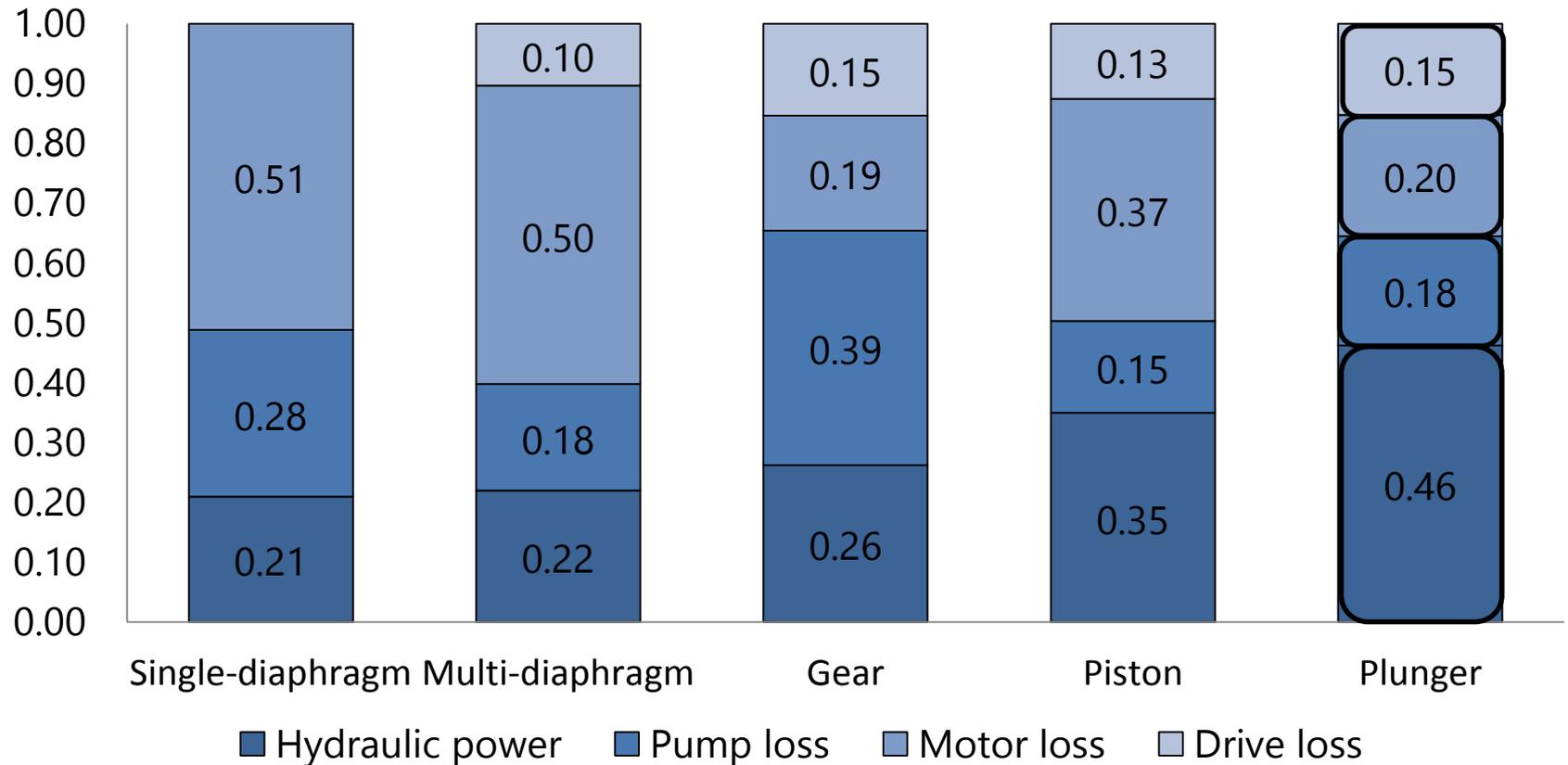
### *Puissances électriques normalisées*



Les auxiliaires pénalisent la performance. Il existe une vitesse de rotation ventilateurs optimale.

# Premiers résultats expérimentaux

## *Performance de la pompe*

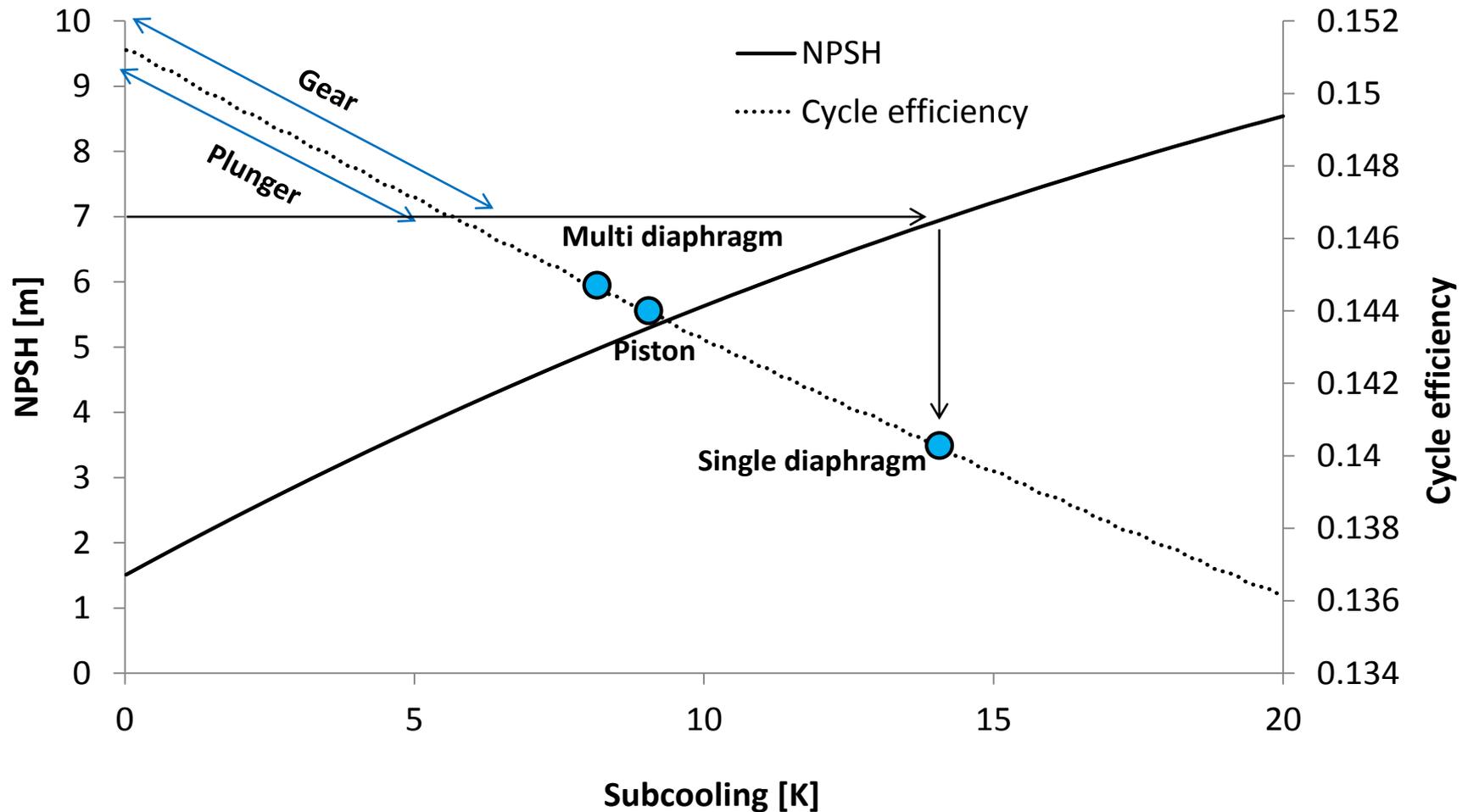


Les pertes dans le moteur et dans le variateur de fréquence représentent entre 34% et 60% de la consommation électrique. Les pertes dans le corps de pompe ne représentent que de 15% à 39%.

Source: S. Declaye. 2015. Improving the Performance of  $\mu$ -ORC Systems, PhD Thesis ULg

# Premiers résultats expérimentaux

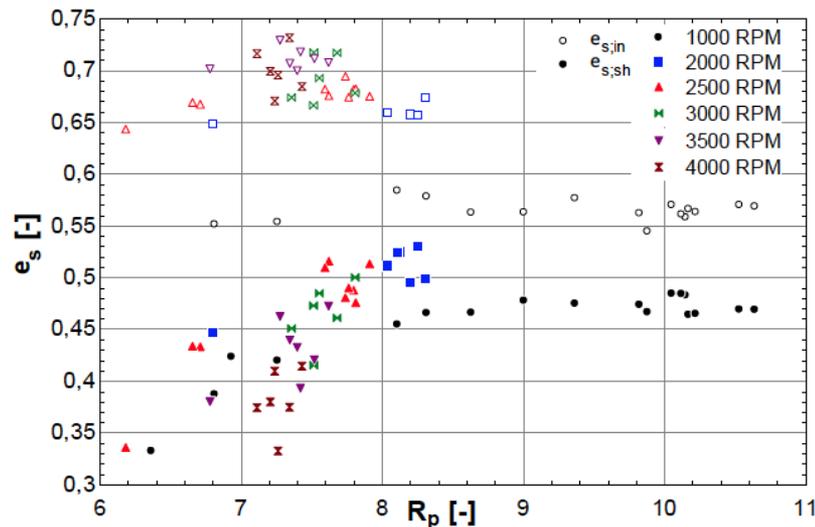
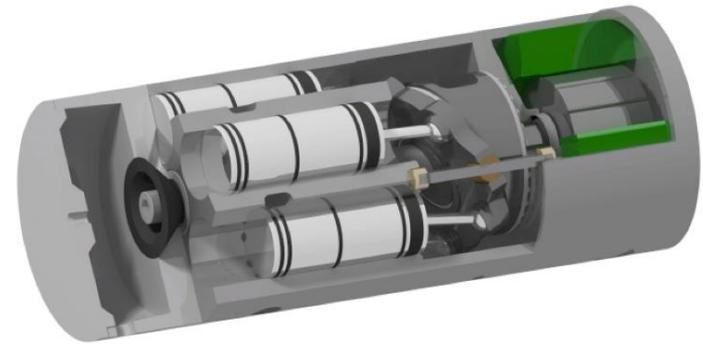
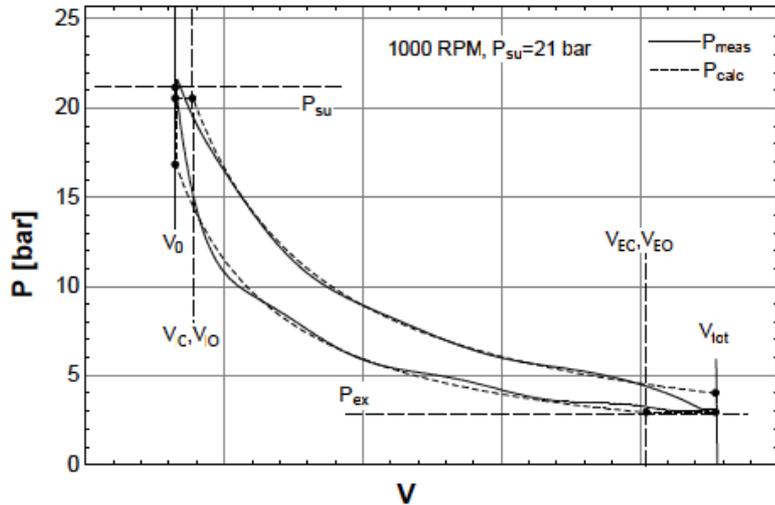
## *Performance de la pompe*



Source: S. Declaye. 2015. Improving the Performance of  $\mu$ -ORC Systems, PhD Thesis ULg

# Premiers résultats expérimentaux

## Expandeur à pistons



$$\epsilon_{s,ind} = \frac{\dot{W}_{ind}}{\dot{M}(h_{su} - h_{ex,s})}$$

Définition basée sur la puissance indiquée

$$\epsilon_{s,shaft} = \frac{\dot{W}_{shaft}}{\dot{M}(h_{su} - h_{ex,s})}$$

Définition basée sur la puissance mécanique

Source: Oudkerk et al. 2015

# Conclusions et perspectives

- Le module ORC d'une micro-centrale solaire a été caractérisé expérimentalement.
  - ✧ 4.5% de rendement/915 W
  - ✧ Améliorations possibles: réduction des pertes de charges dans les tuyauteries, utilisation de 2 expanseurs en série, pompes plus performantes
- Plusieurs autres expanseurs ont été testés: scroll, vis, pistons
- Perspectives: autres fluides, couplage du module ORC au champs de collecteurs solaires (été 2016)



---

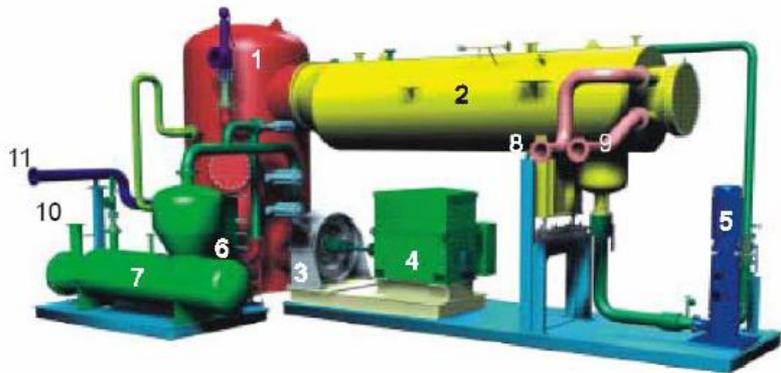
*Merci pour votre attention!*  
*Questions?*

vincent.lemort@ulg.ac.be  
<http://www.sun2power.eu>

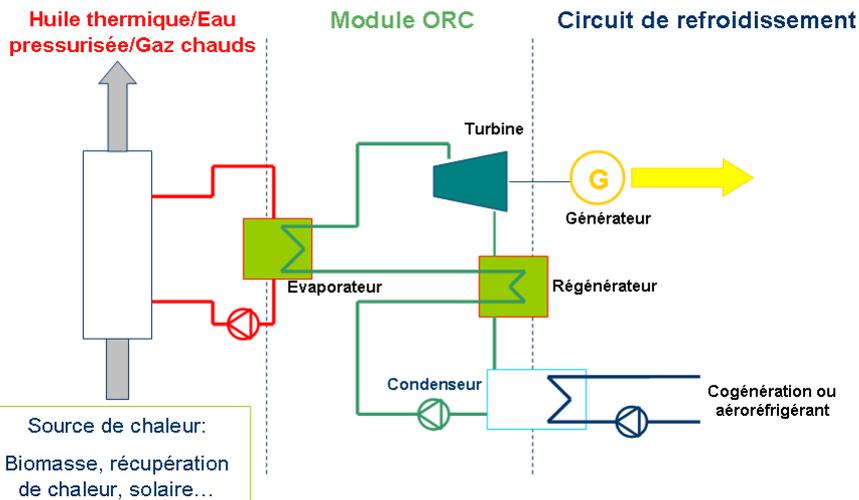
Remerciements à nos sponsors:



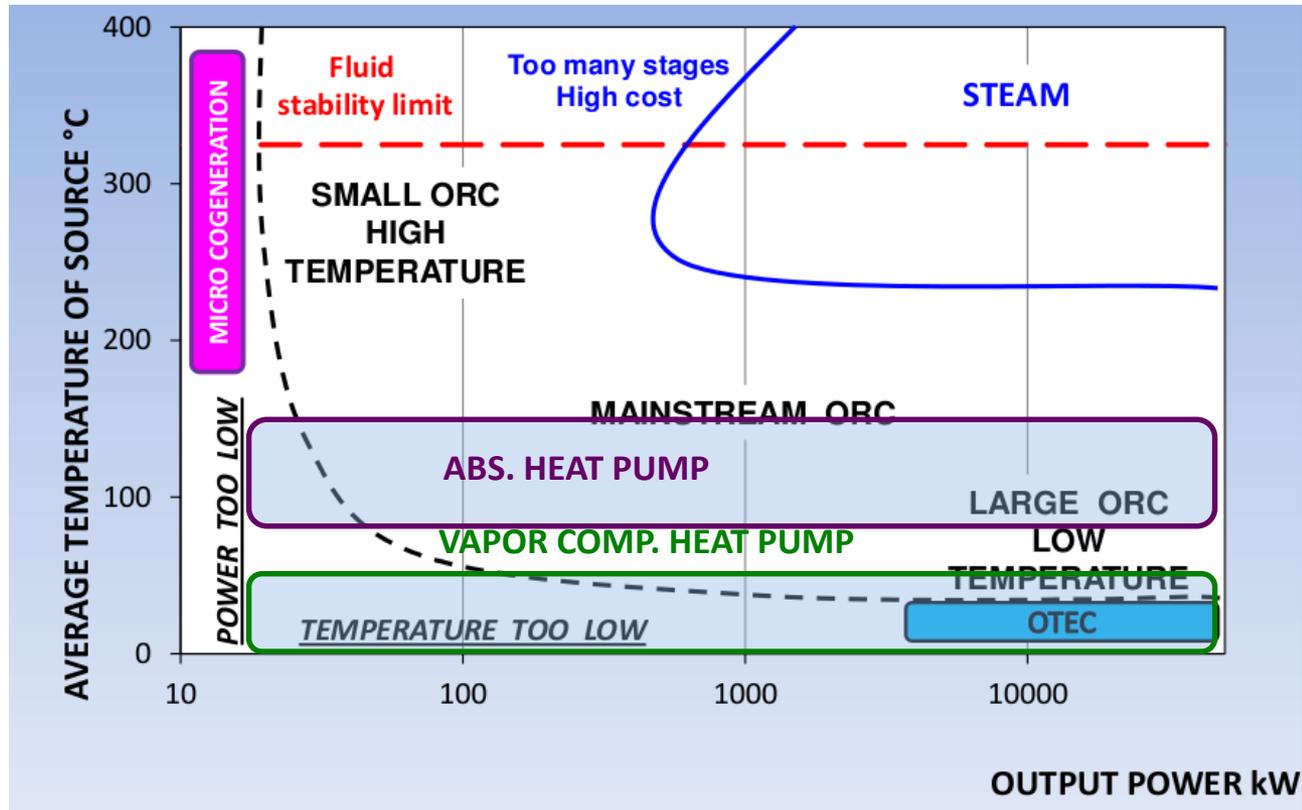
**Honeywell**



1 Regenerator	5 Circulation pump	9 Hot water outlet
2 Condenser	6 Pre-heater	10 Thermal oil inlet
3 Turbine	7 Evaporator	11 Thermal oil outlet
4 Electric generator	8 Hot water inlet	



- ✓ En récupération/cogen, systèmes ORC : économiquement plus rentable que les cycles à vapeur pour des puissances **inférieures à 3-5MWe** (système optimisé/construit en usine, pas d'unité de traitement d'eau, pas de problème de contrôle surchauffe, pression plus faibles )
- ✓ T° source de chaleur entre **100°C et 450°C**
- ✓ **Facile à installer** (en un module pré-assemblé), compact et fiable
- ✓ Chaudière moins complexe et moins chère, car
  - Chauffe une huile thermique à basse pression jusque 350°C
  - Cycle à vapeur: haute pression (60-70 bar) et nécessité de surchauffer (450°C)
- ✓ **Fluide** de travail à **basse pression**(<20 bar)
- ✓ Système autonome
- ✓ Pression au condenseur supérieure à la pression ambiante (**pas d'infiltration**)
- ✓ Fluides secs => pas de risque d'endommagement de la turbine



Source: adapted from Gaia, 2011

