

# CYCLE ORGANIQUE SOUS- ET SUPERCRITIQUE DE RANKINE POUR LA VALORISATION DES REJETS THERMIQUES INDUSTRIELS

**Van Long Le<sup>a</sup>, Michel Feidt<sup>a</sup>, Abdelhamid Kheiri<sup>a</sup>, Stéphanie Jumel<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée – LEMTA

<sup>b</sup> EDF – R&D



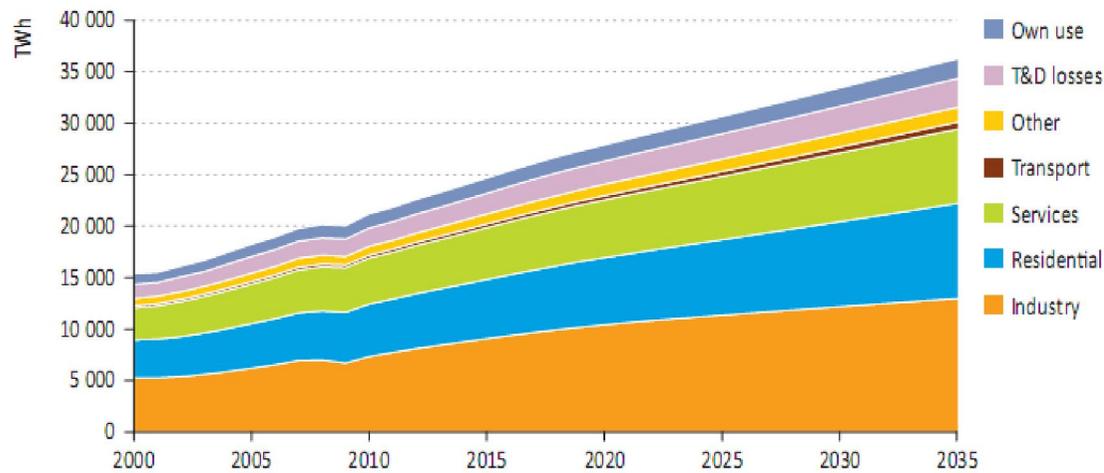
LMCS 2012

# Plan

- Introduction
- ORC sous- et supercritique
- Equations
- Cas d'étude
- Conclusions - Perspectives

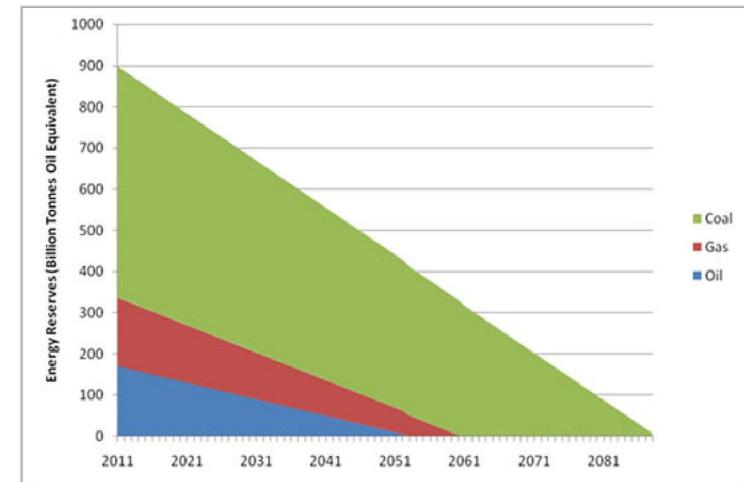
- **Introduction**
- ORC sous- et supercritique
- Equations
- Cas d'étude
- Conclusions - Perspectives

# Contexte énergétique



La demande d'électricité mondiale par secteur

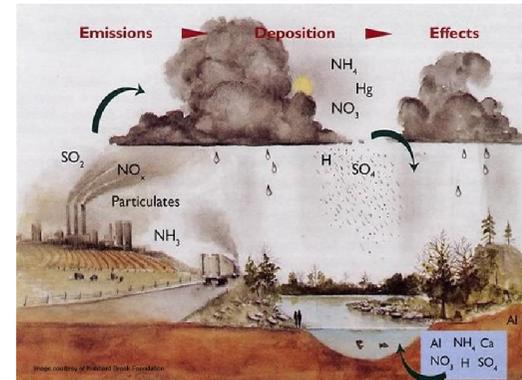
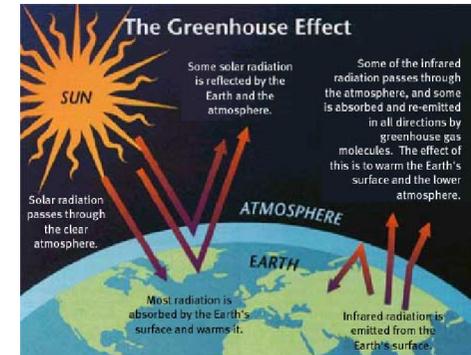
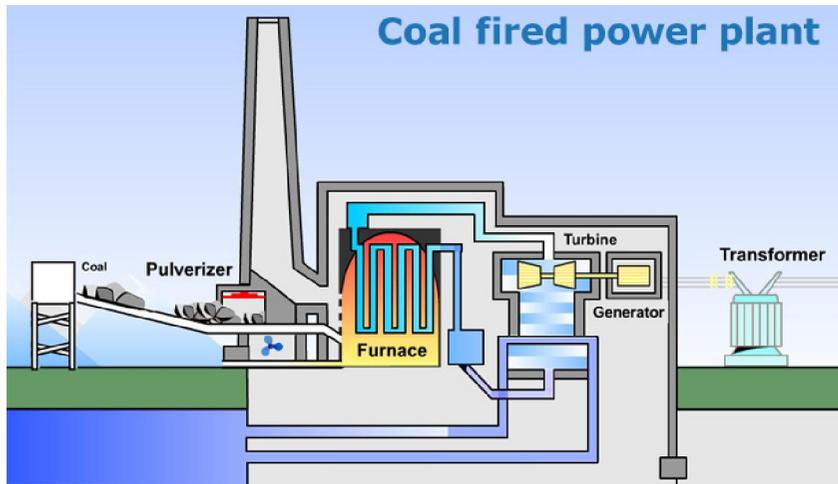
Source: *World Energy Outlook 2011*



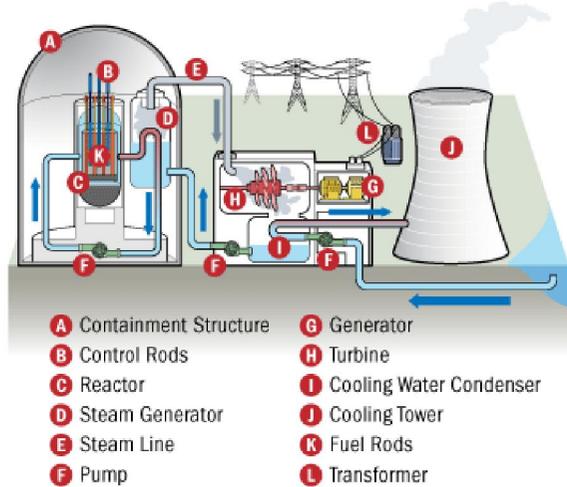
Epuisement de ressource fossile

Source: <http://www.ecotricity.co.uk/our-green-energy/energy-independence/the-end-of-fossil-fuels>

# Problèmes environnementaux



Inside a Nuclear Power Plant ©2011 HowStuffWorks



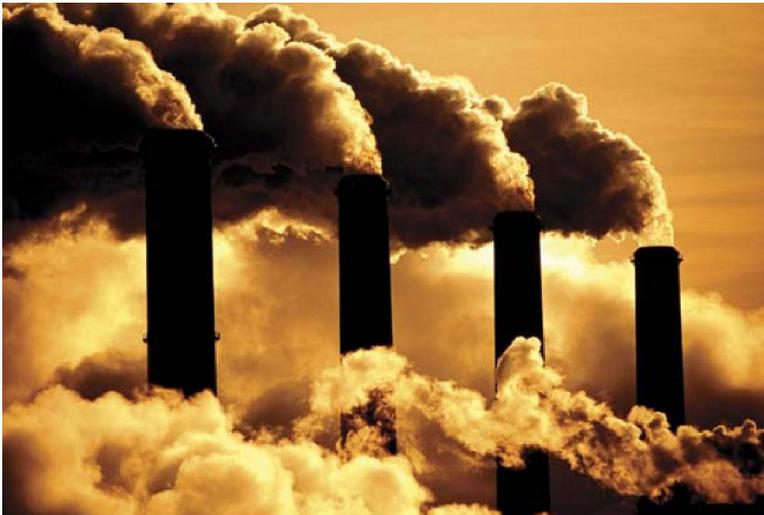
Tchernobyl



Fukushima

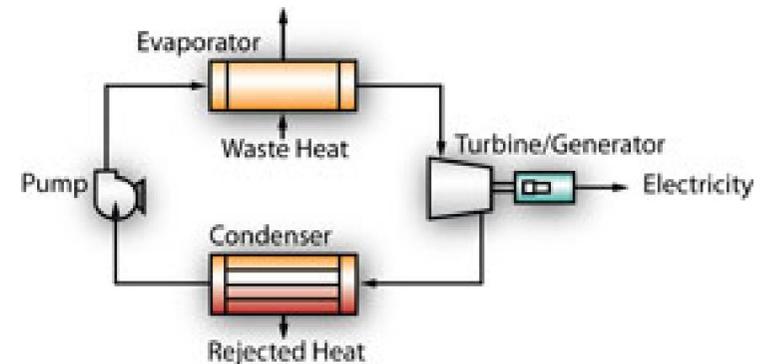
# Valorisation des rejets thermiques

## Chaleur fatales



- Gaz d'échappement, surface chaude, produit chaud
- Energie perdue (20 – 50 %)

## Valorisation



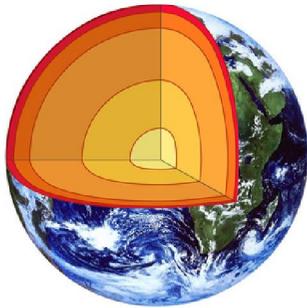
- Amélioration de l'efficacité énergétique
- Satisfaction de la demande d'électricité
- Diminution de la pollution thermique

# Solution ORC

Source de chaleur à basse température



Energie solaire

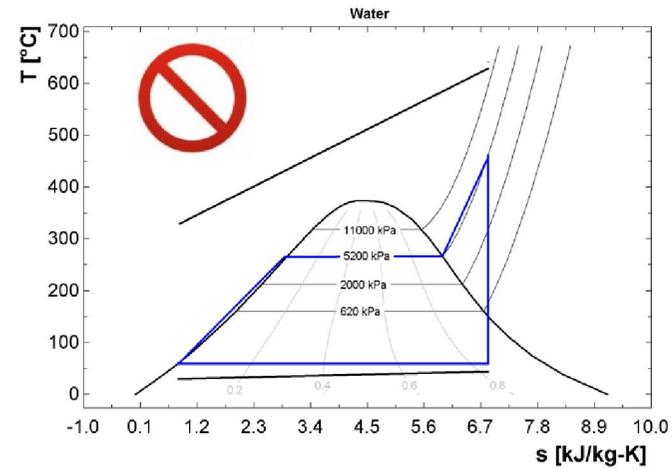


Géothermie

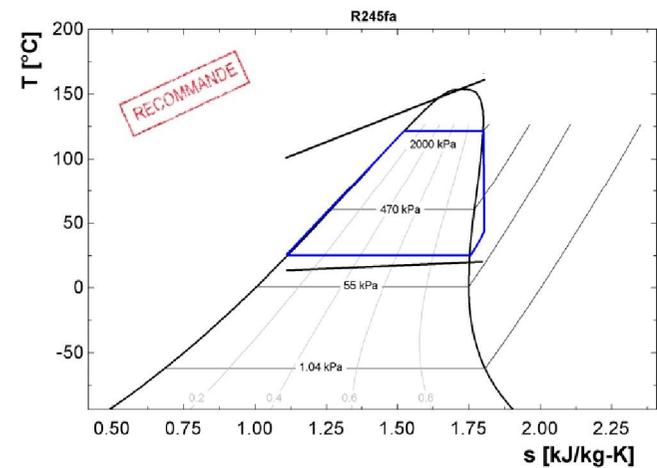


Rejets thermiques

Cycle classique

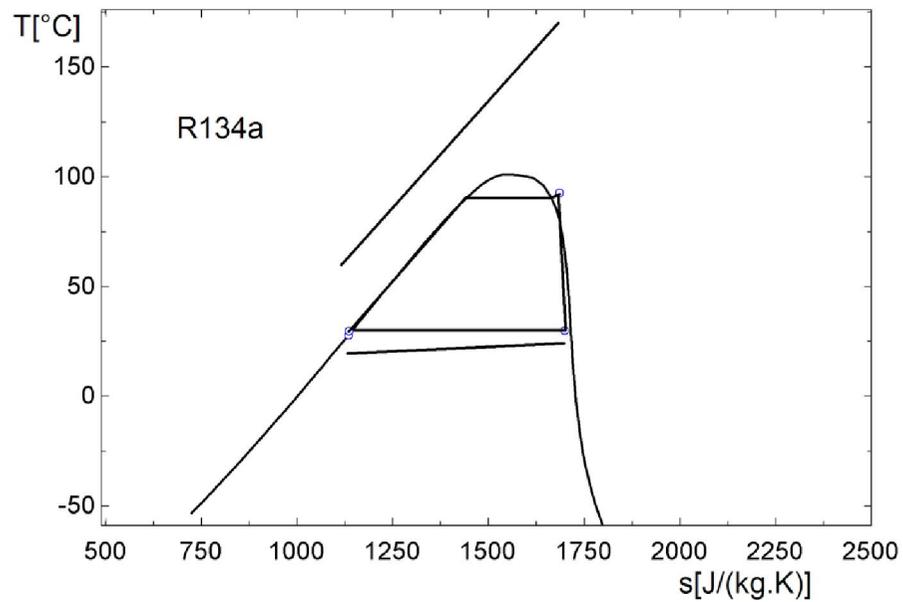


Cycle ORC

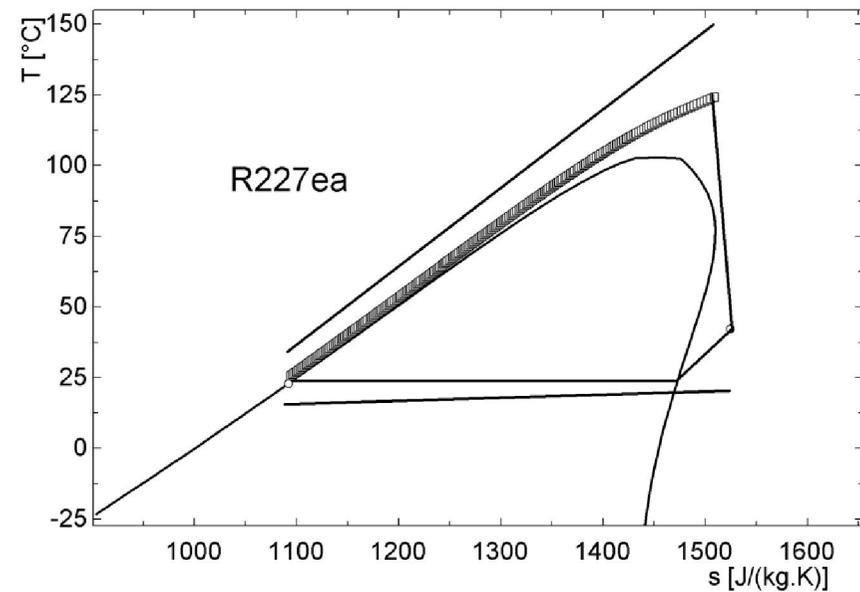


- Introduction
- **ORC sous- et supercritique**
- Equations
- Cas d'étude
- Conclusions - Perspectives

# ORC sous- et supercritique



ORC souscritique



ORC supercritique

# Fluides organiques

**Corps pure (R245fa) ou mélange  
(R410A: 50%R32/50%R125)**

**Fluide mouillant:**

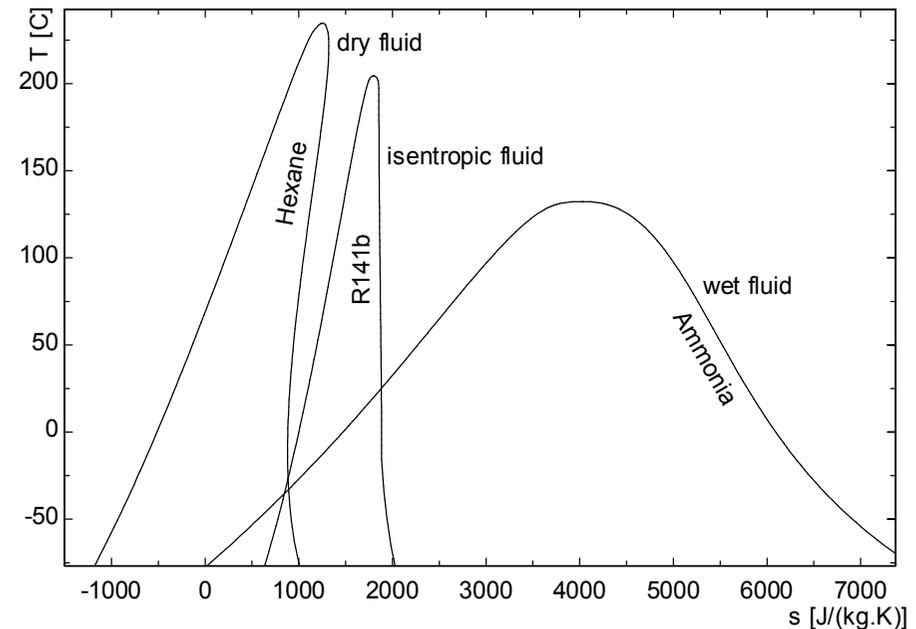
$$dT/ds < 0$$

**Fluide isentropique:**

Courbe de saturation de vapeur vertical

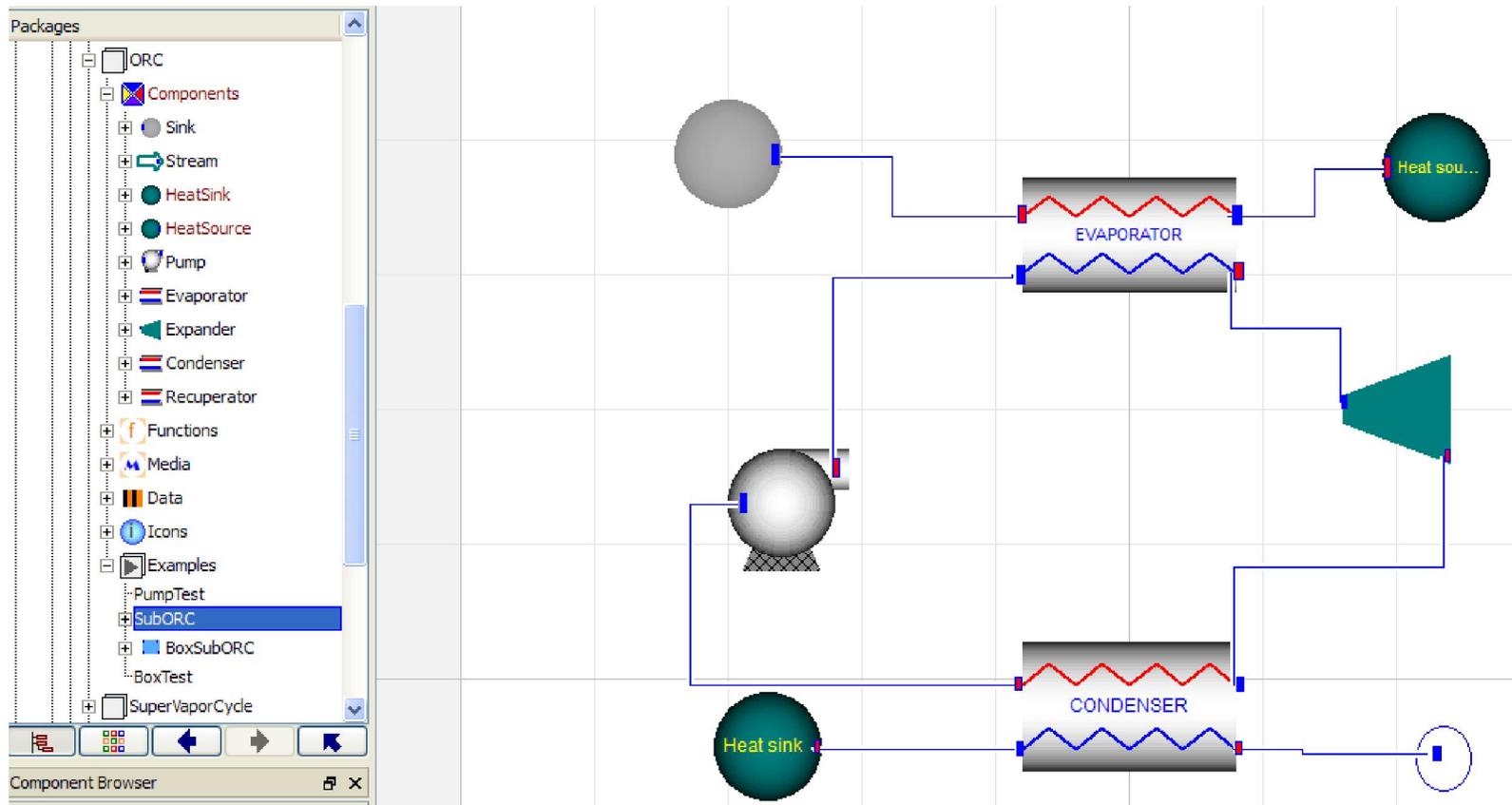
**Fluide séchant:**

$$dT/ds > 0$$



Trois types du fluide de travail du cycle ORC

# Composants du cycle



- Introduction
- ORC sous- et supercritique
- **Equations**
- Cas d'étude
- Conclusions - Perspectives

# Equations – Bilan énergétique

## Pompe

$$\dot{W}_P = \dot{m}(h_{P,out} - h_{P,in})/\eta_{P,m}$$

$$\eta_{P,is} = \frac{\dot{W}_{P,is}}{\dot{W}_P} = \frac{(h_{P,out,is} - h_{P,in})}{(h_{P,out} - h_{P,in})}$$

## Evaporateur

$$\dot{Q}_h = \dot{m}(h_{Evap,wf,out} - h_{Evap,wf,in})$$

## Détendeur

$$\dot{W}_{Exp} = \dot{m}(h_{Exp,in} - h_{Exp,out})$$

$$\eta_{Exp,is} = \frac{\dot{W}_{Exp}}{\dot{W}_{Exp,is}} = \frac{(h_{Exp,in} - h_{Exp,out})}{(h_{Exp,in} - h_{Exp,out,is})}$$

## Condenseur

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_{Cond,wf,in} - h_{Cond,wf,out})$$

## Puissance nette

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{Exp} - \dot{W}_P$$

## Rendement thermique

$$\eta_{th} = \dot{W}_{net} / \dot{Q}_h$$

# Equations – Analyse exergetique

## Pompe

$$\dot{I}_P = T_0 \dot{m} (s_{P,out} - s_{P,in})$$

## Evaporateur

$$\dot{E}x_{Evap} = \dot{m}_h [(h_{Evap,ex,in} - h_{Evap,ex,out}) - T_0 (s_{Evap,ex,out} - s_{Evap,ex,in})]$$

$$\dot{I}_{Evap} = T_0 [\dot{m} (s_{Evap,wf,out} - s_{Evap,wf,in}) + \dot{m}_h (s_{Evap,ex,out} - s_{Evap,ex,in})]$$

## Détendeur

$$\dot{I}_{Exp} = T_0 \dot{m} (s_{Exp,out} - s_{Exp,in})$$

## Condenseur

$$\dot{I}_{Cond} = T_0 [\dot{m} (s_{Cond,wf,out} - s_{Cond,wf,in}) + \dot{m}_c (s_{Cond,ex,out} - s_{Cond,ex,in})]$$

## Rendement exergetique

$$\eta_{Ex} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}x_{Evap}}$$

## Exergie détruite

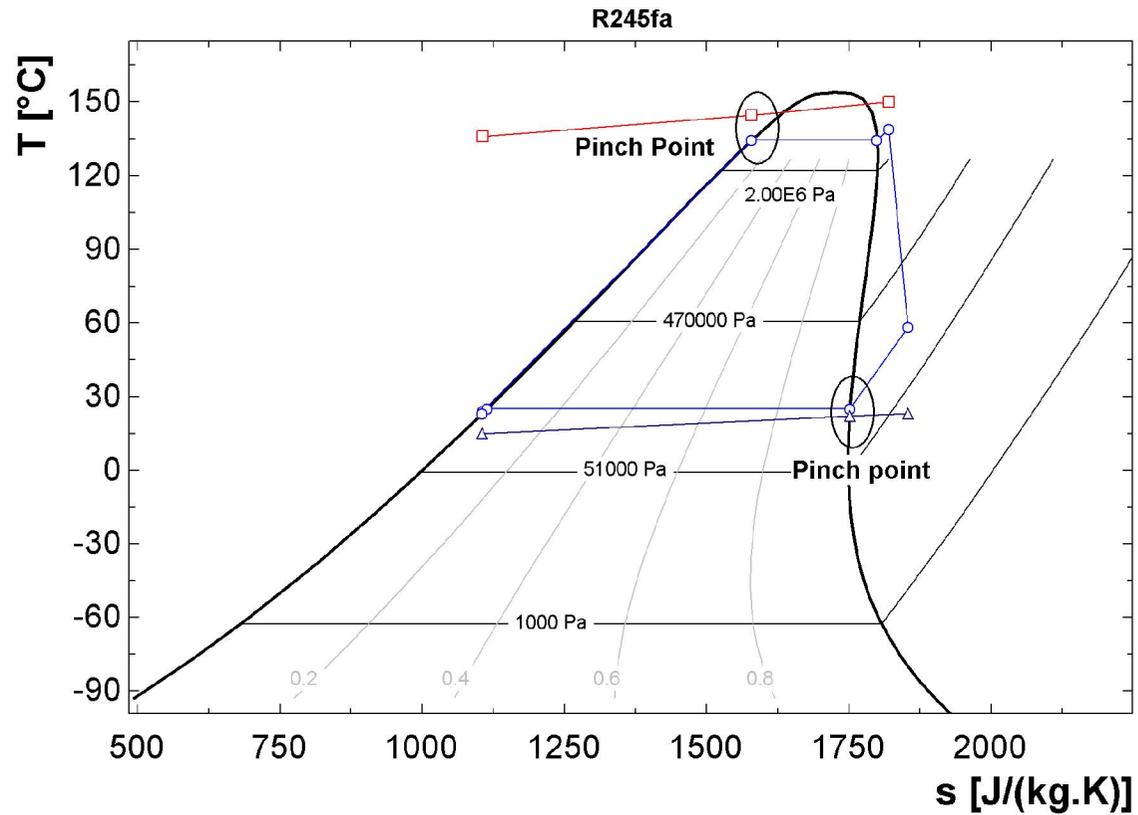
$$\dot{I}_{tot} = \dot{I}_P + \dot{I}_{Evap} + \dot{I}_{Exp} + \dot{I}_{Cond}$$

- Introduction
- ORC sous- et supercritique
- Equations
- **Cas d'étude**
- Conclusions - Perspectives

# Cas d'étude

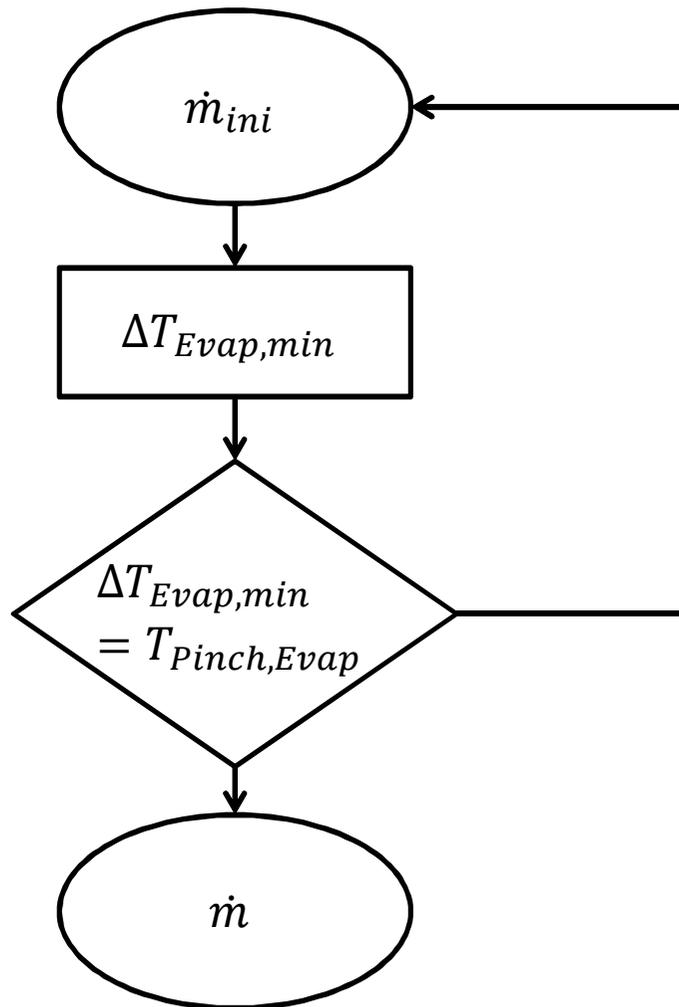
Entrées	Sorties	
source de chaleur: l'air ( $T_{hsi} = 150^{\circ}\text{C}$ , $\dot{m}_h = 0.1 \text{ kg/s}$ ) Puits froid: l'eau ( $T_{csi} = 15^{\circ}\text{C}$ ) $p_r = 0.8$ (souscritique)/1.5 (supercritique) $T_{Exp,in} = 139^{\circ}\text{C}$ $T_{cond} = 25^{\circ}\text{C}$ $\eta_{P,is} = \eta_{Exp,is} = 0.8$ $\eta_{P,m} = \eta_{Exp,m} = 0.9$ $T_{pinch,Evap} = 10^{\circ}\text{C}$ $T_{pinch,Cond} = 3^{\circ}\text{C}$	Souscritique	Supercritique
	R245fa $\dot{W}_{net} = 193.8 \text{ W}$ $\dot{I}_{tot} = 204.5 \text{ W}$ $\eta_l = 13.56 \%$ $\eta_{Ex} = 44.11 \%$ $\dot{m} = 0.0054 \text{ kg/s}$ $\dot{m}_c = 0.0355 \text{ kg/s}$ $T_{evap} = 134.6^{\circ}\text{C}$ $T_{hso} = 136^{\circ}\text{C}$ $T_{cso} = 23.15^{\circ}\text{C}$	R134a $886.2 \text{ W}$ $814.8 \text{ W}$ $11.39 \%$ $45.76\%$ $0.0347 \text{ kg/s}$ $0.2139 \text{ kg/s}$ - $73.46^{\circ}\text{C}$ $22.54^{\circ}\text{C}$

# ORC souscritique – R245fa

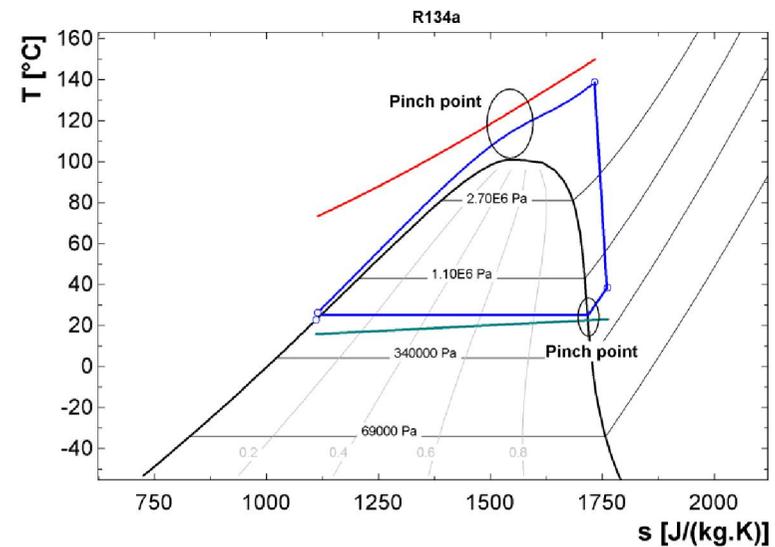


# ORC supercritique – R134a

Débit du fluide de travail

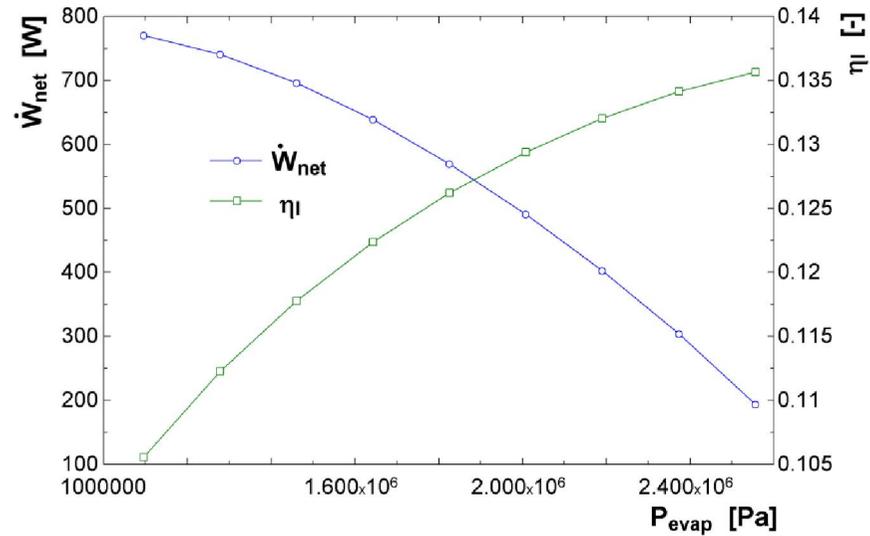


Location de pincement

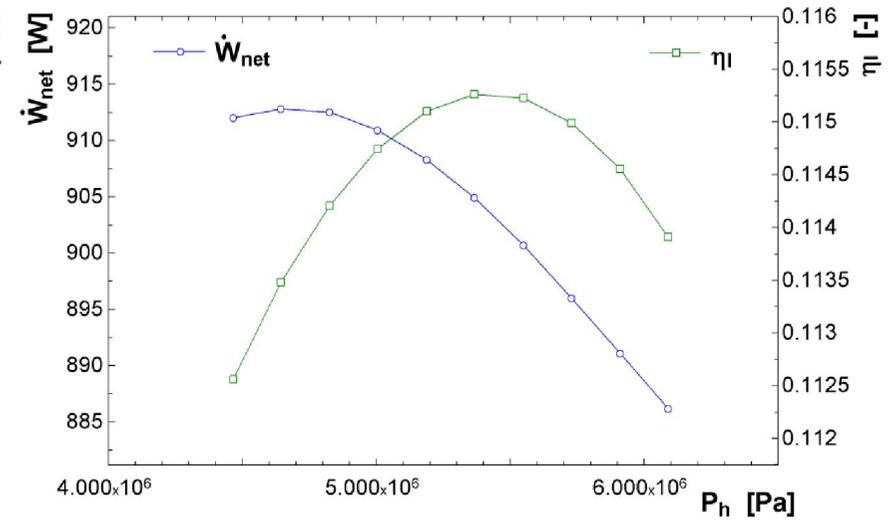


# Performance du cycle

ORC souscritique – R245fa

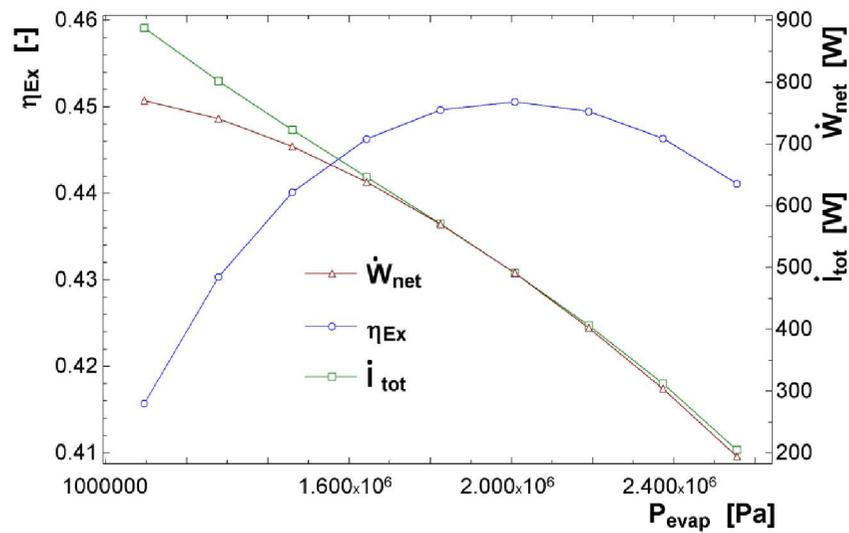


ORC supercritique – R134a

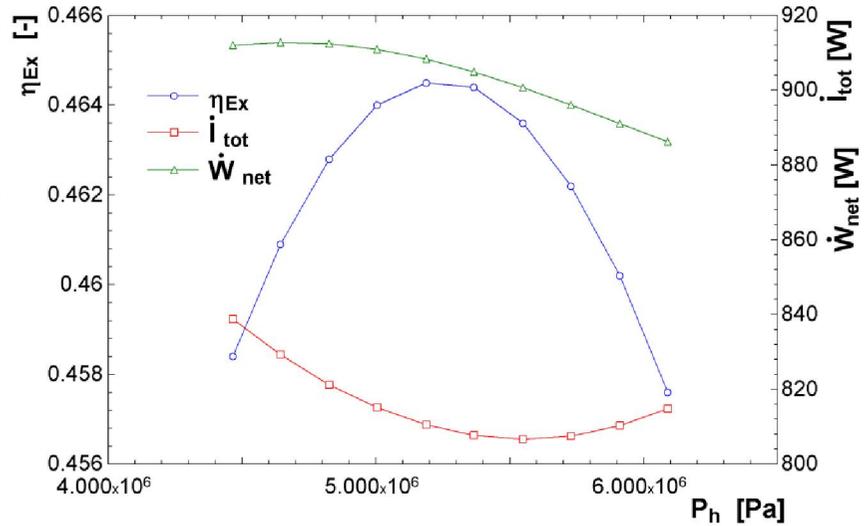


# Analyse exergétique

ORC souscritique – R245fa



ORC supercritique – R134a



- Introduction
- ORC sous- et supercritique
- Equations
- Cas d'étude
- **Conclusions - Perspectives**

# Conclusions - Perspectives

- ORC est une modification du cycle classique de Rankine
- ORC est recommandé pour la production d'électricité à partir des sources de chaleur à basse température
- ORC est adapté pour les petites et les micros centrales
- Les fluides séchant et isentropique sont recommandés pour les cycles ORC

A photograph of a green plant with large, heart-shaped leaves growing out of a clear glass lightbulb. The lightbulb is mounted on a square, textured cork base. The entire setup is centered on a plain white background.

**Merci de votre attention!**