



MODELISATION D'UN ECHANGEUR A THERMOSIPHONS POUR LA RECUPERATION DE CHALEUR

**Van Long Lê¹, Xavier Dumas², Ludovic Ferrand², Vincent
Lemort¹**

¹Laboratoire de Thermodynamique, Université de Liège

²CMI Industry, groupe CMI



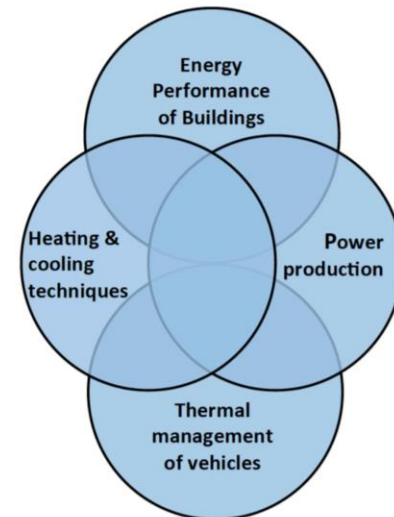
Plan

- Introduction
 - Laboratoire de Thermodynamique
 - Projet ORCAL
 - Système ORC
 - Échangeur à thermosiphons
- Modélisation
 - Résistance thermique totale de thermosiphon
 - Limite de fonctionnement de thermosiphon
 - Procédure pour le calcul de la performance de thermosiphon
- Résultats
- Conclusions et remarques
- Références

Laboratoire de Thermodynamique

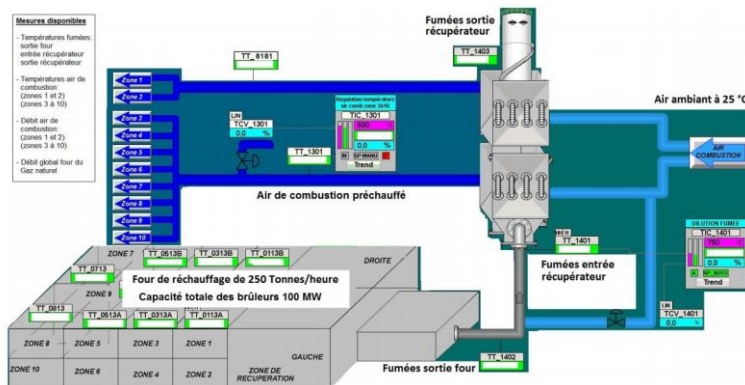


- Département d'Aérospatiale et Mécanique
- Equipe d'approx. **30 personnes**: 4 professeurs (1 Emérite), 3 postdoc, 12 doctorants, 4 techniciens, 1 secrétaire, 5 chercheurs invités, 2 collaborateurs scientifiques
- Activités de recherche contribue à développer des **systèmes thermiques** innovants et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

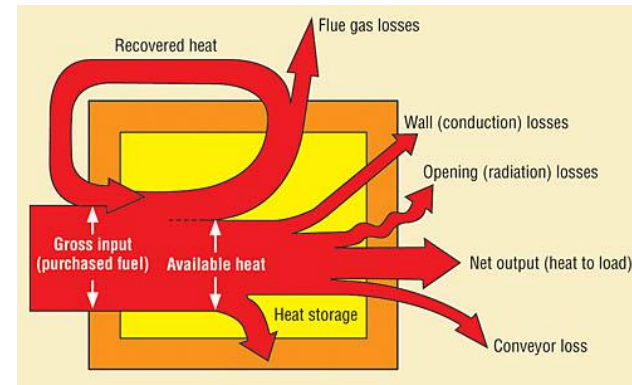


Projet ORCAL

- Conception de système ORC couplé à des thermosiphons pour la récupération de chaleur hors des effluents gazeux de four de réchauffage pour laminoirs
- Parain industriel: le groupe CMI
- Financement: cofinancé par le programme Marie Curie de la Commission européenne et la région Wallonne (SWP – DOG6)



Four de réchauffage (source: CMI)



Pertes thermiques

Système ORC (Organic Rankine Cycle)

ORC = Cycle de Rankine + Fluide de travail organique

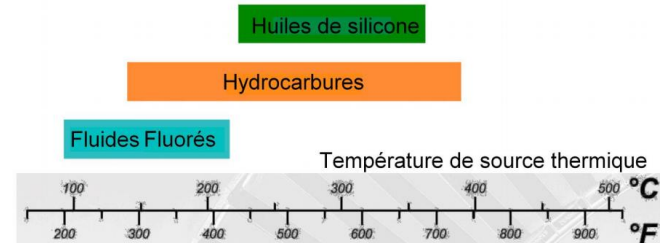
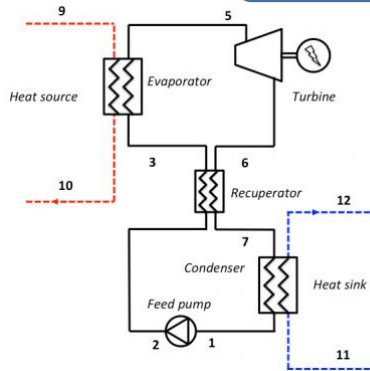
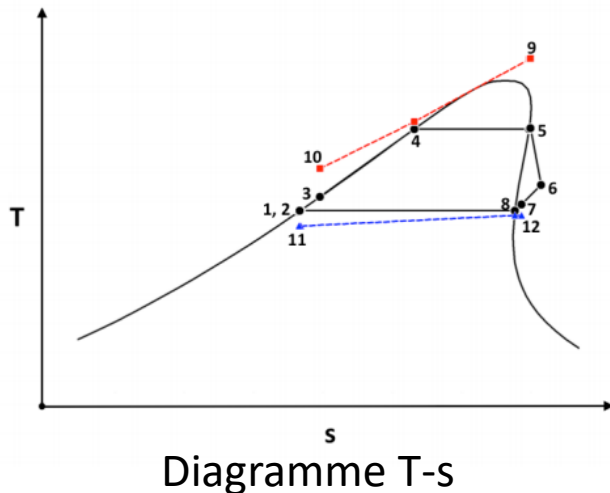


Schéma de procédé



Avantages

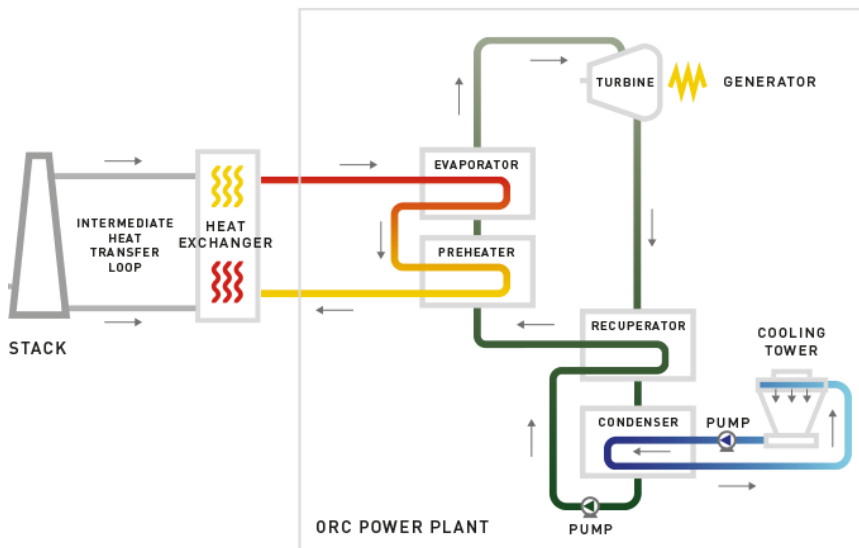
- Rendement élevé (~ 85 %) de la turbine.
- Faible contrainte mécanique de la turbine.
- Faible vitesse de rotation de la turbine permettant l'entraînement direct de la génératrice (sans utilisation d'une boîte à vitesse).
- Sans érosion de l'aubage de la turbine.
- Sans oxydation du fluide de travail.
- Solution complètement automatique, ne pas demander les opérateurs licenciés / hautement qualifiés.
- Aucun traitement de l'eau nécessaire.
- Grande flexibilité et bonne performance à charge partielle.

Inconvénients

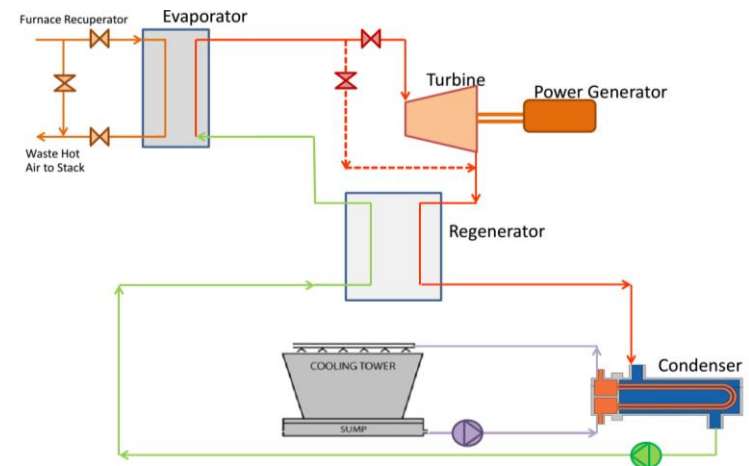
- Impact environnemental, inflammabilité.
- Coût de fluide de travail élevé.
- Stabilité thermique et chimique de fluide organique .
- Limite de température.

Transfert de chaleur de fumées au fluide organique

Source: <http://exergy-orc.com>



Source: Cheng, 2014



Boucle de transfert thermique intermédiaire

- **Coût d'investissement élevé**
- **Haute complexité**

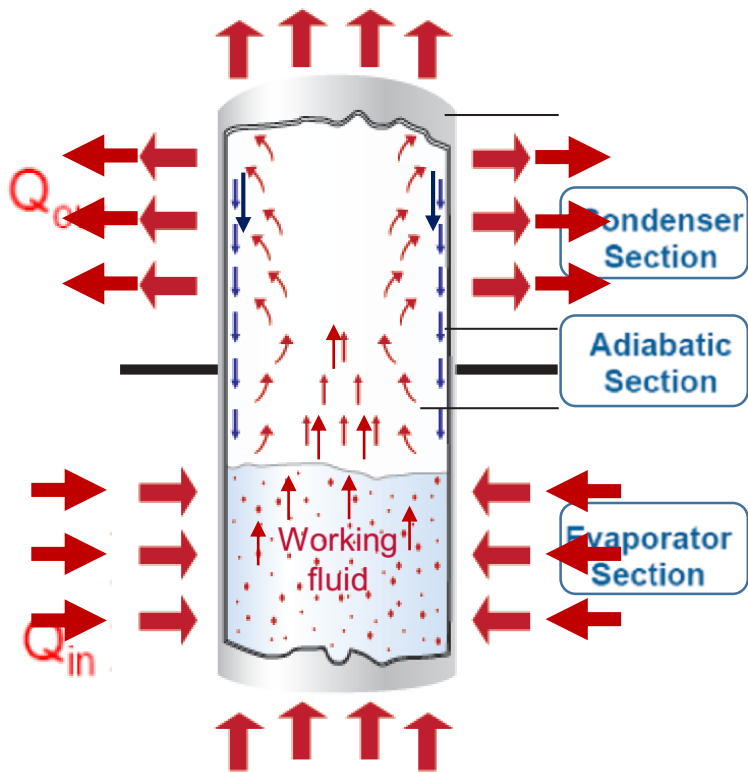
Evaporateur direct

- **Moins sécurisé**
- **Basse température**

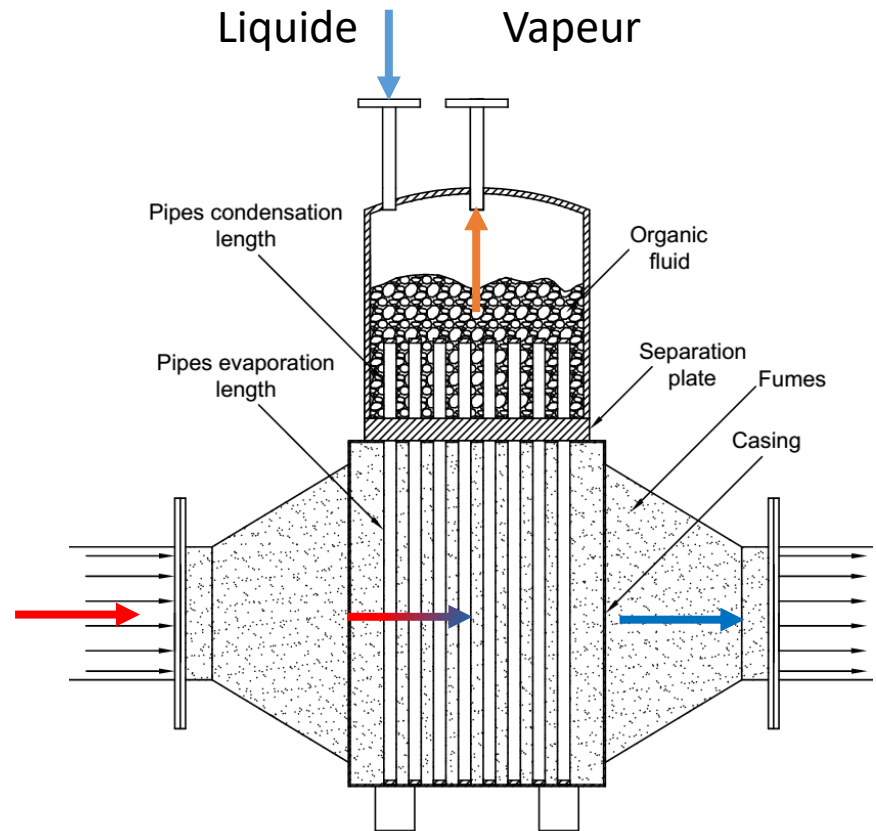
Technologie de thermosiphon diphasique

- **Moins chère**
- **Fluide organique en dehors de trajectoire de gaz chaud**

Échangeur à thermosiphons

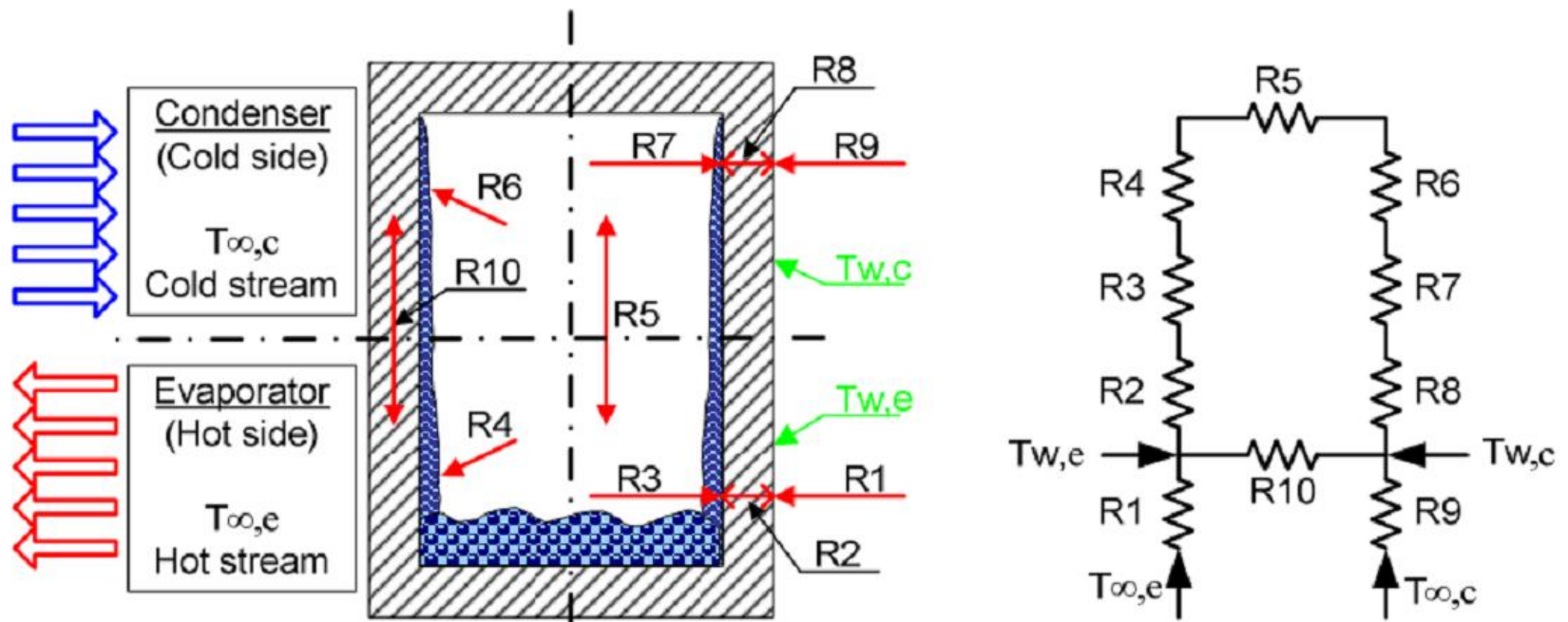


Thermosiphon
Source: Jouhara, 2016



Échangeur à thermosiphon

Résistance thermique totale

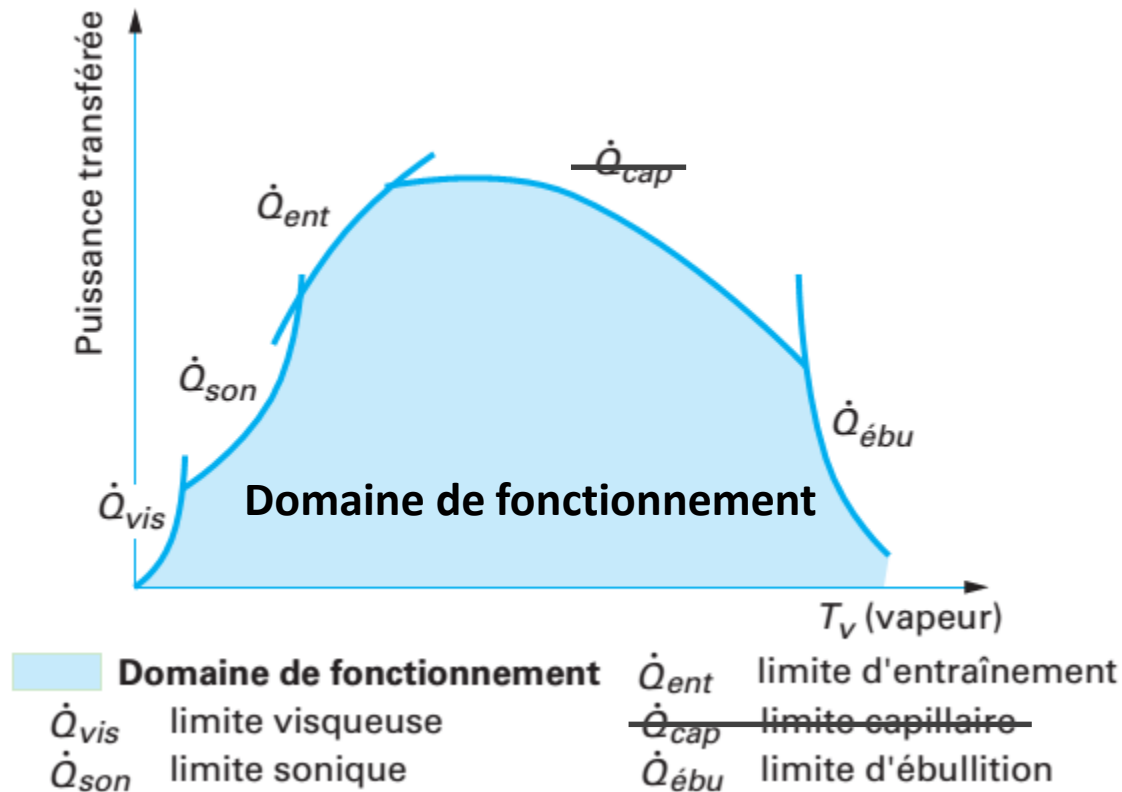


Source: Marcia, 2013

$$R_{tot} = R_1 + \left[\left(\sum_2^8 R_i \right)^{-1} + R_{10}^{-1} \right]^{-1} + R_9$$

$$\dot{Q} = \Delta T / R_{tot}; \quad \Delta T \approx T_{\infty,e} - T_{\infty,c}$$

Limite de fonctionnement

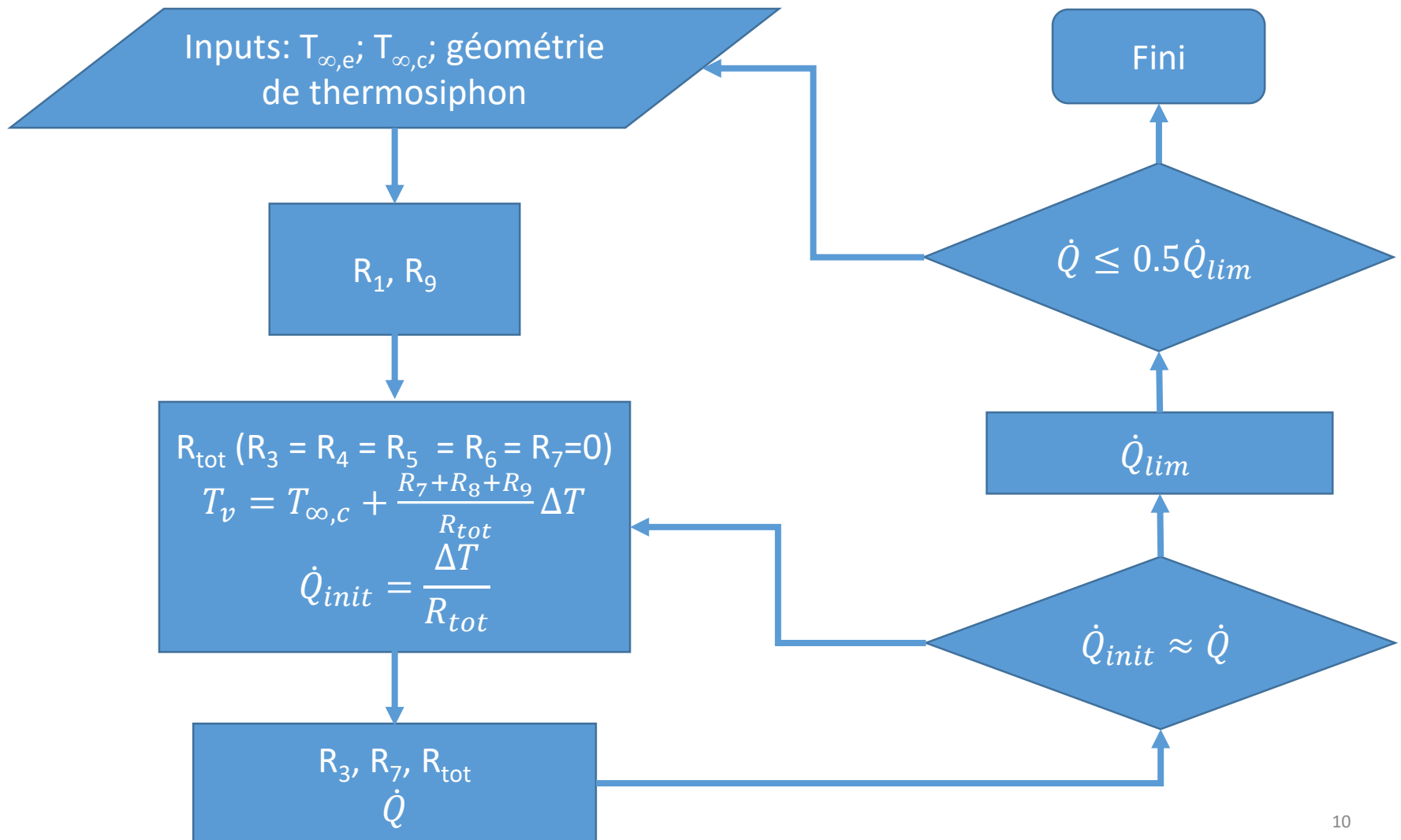


source: Bonjour et al, 2010

$$\dot{Q}_{lim} = \text{MIN}(\dot{Q}_i)$$

$$\dot{Q} \leq \dot{Q}_{lim} \quad (\text{Bon design : } \dot{Q} \leq 0.5 \times \dot{Q}_{lim})$$

Procédure pour le calcul de la performance

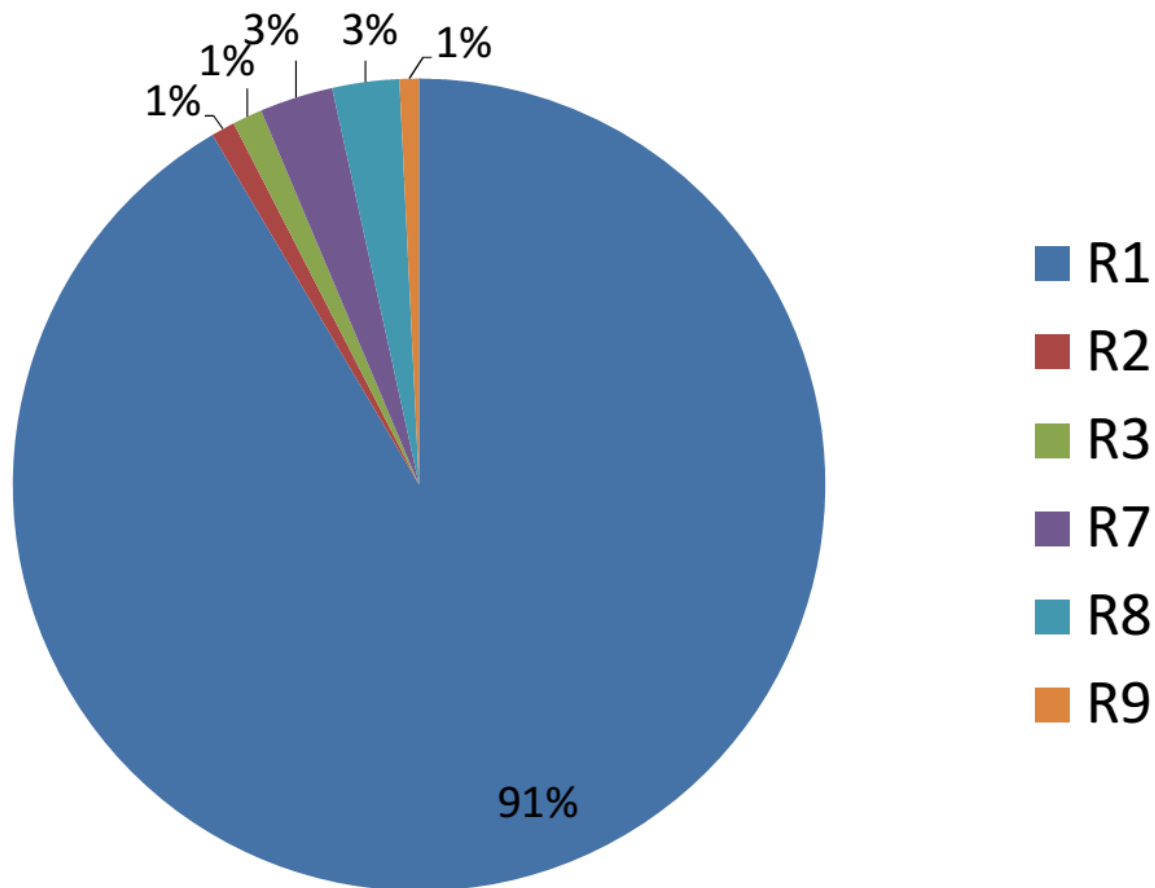


Données pour la simulation

Paramètre	Valeur	Unité
d_o/d_i	48/41	mm
$L_e/L_a/L_c$	3.4/0.3/1.2	m
Fluide thermosiphon	Eau	-
Taux du remplissage	0.6	-
Fluide chaud/froid	Fumées/Cyclopentane	-
Vitesse de fumées à l'entrée	7	m/s
Température de fumées à l'entrée	720	°C
Débit massique de fumées	21	kg/s
Flux thermique de l'échangeur	4.022	MW
Température d'évaporation	200	°C
Tube	Lisse	-

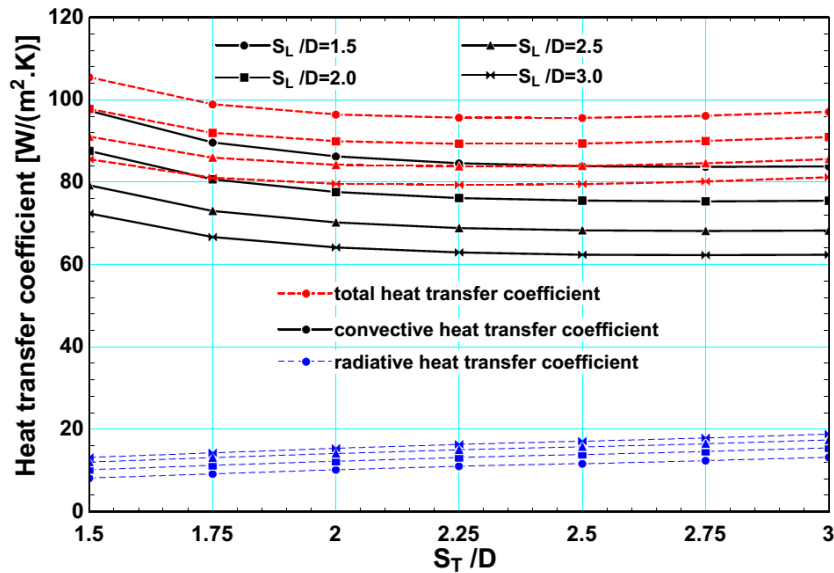
Résultats (1)

La résistance thermique côté fumées est dominante et représente de 91% de la résistance totale.

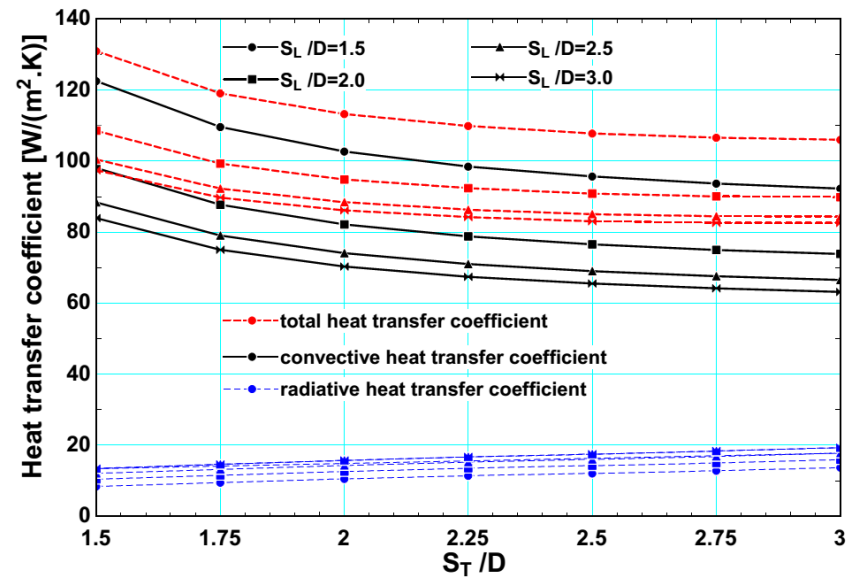


Répartition des résistances thermiques

Résultats (2)



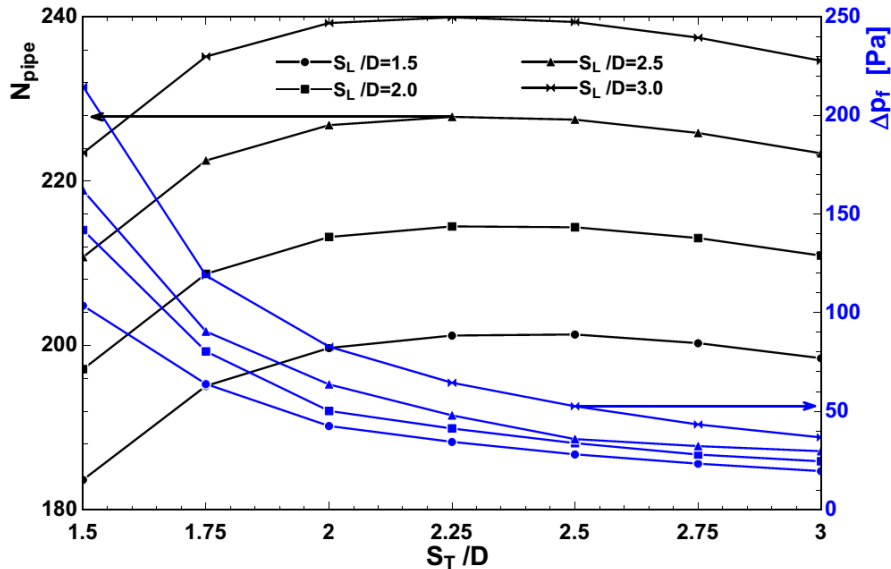
Disposition alignée



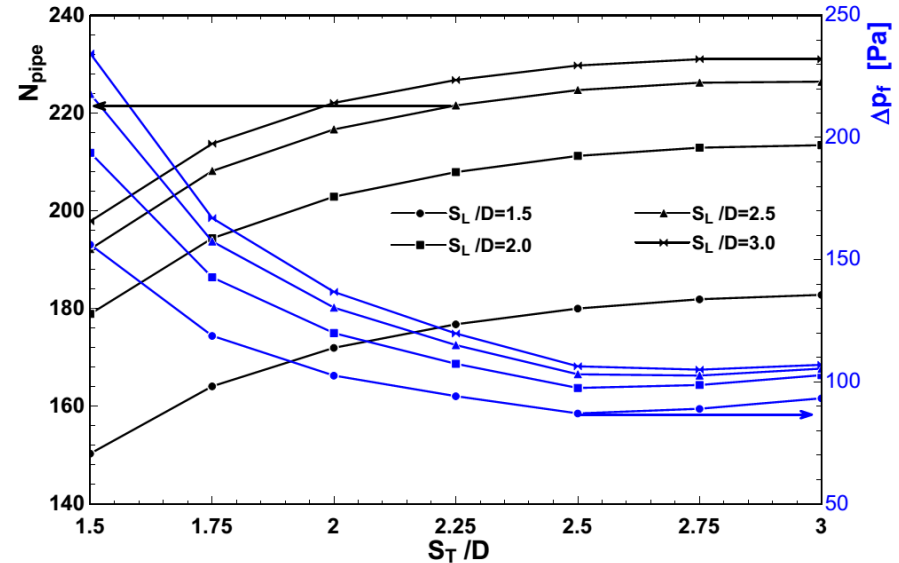
Disposition quinconce

- Le transfert de chaleur en convection est dominant côté fumées.
- Le coefficient convectif est inversement proportionnel aux pas transversaux et longitudinaux.
- Le coefficient radiatif est proportionnel à l'espace entre les tubes (thermosiphons).

Résultats (3)



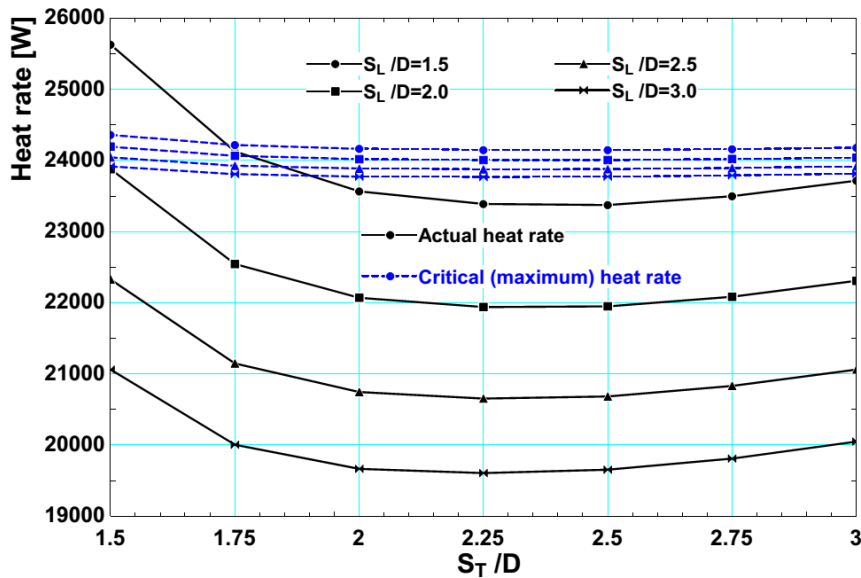
Disposition alignée



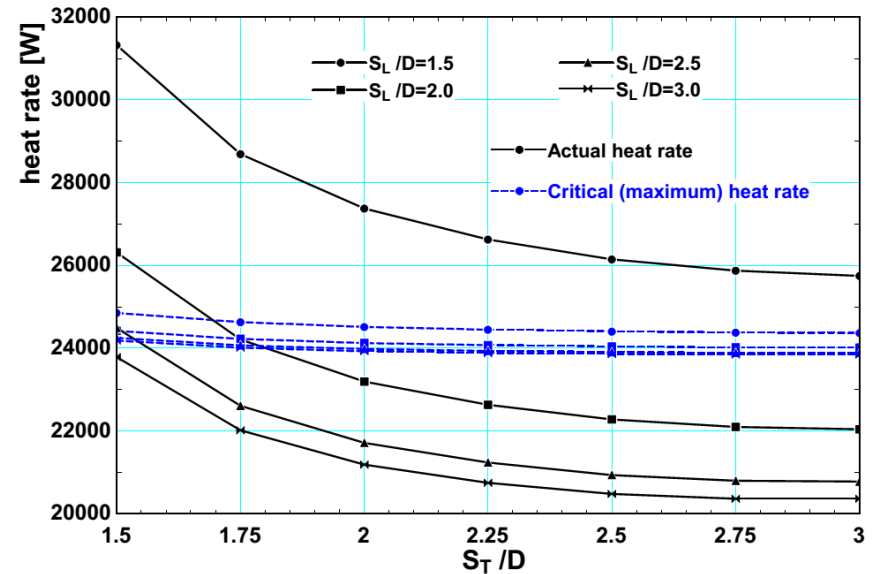
Disposition quinconce

- La perte de charge de fumées est inversement proportionnelle et proportionnelle au pas transversal et longitudinal, respectivement.
- La disposition quinconce représente un gain du coefficient de transfert de chaleur mais des pertes de charge de fumées plus élevées.

Résultats (4)



Disposition alignée



Disposition quinconce

- Certaines dispositions des tubes sont éliminées à cause du dépassement du flux critique.

Conclusions et remarques

- La modélisation d'un évaporateur à thermosiphons diphasique pour transférer la chaleur d'un effluent gazeux au fluide de travail du système ORC.
- La surface de transfert de chaleur et la perte de charge de fumées sont évaluées en fonction de dispositions des tubes (thermosiphons).
- La résistance thermique côté fumées représente la valeur la plus importante et de 91% de la résistance thermique totale de thermosiphon.
- Le couplage ORC- thermosiphons présente un vrai potentiel pour améliorer la rentabilité économique de la technologie ORC pour la récupération de chaleur fatale.

Références

- Lemort, V., Le, V. L., Gendebien, S., & Guillaume, L. (2017). Projets de Récupération de chaleur fatale suivis par l'ULg. Paper presented at Waste Heat to Energy, le point sur une filière à haut potentiel, Liège, Belgique.
- <http://exergy-orc.com/applications/heat-recovery-from-industrial-process>
- Cheng, C. H. (2014). Organic Rankine Cycle Waste Heat Recovery System for Steel Rolling Mill Reheating Furnace, EENP AWARDS, Singapore.
- Jouhara, H. (2016). Heat pipe based steam generators, 33rd HEXAG Meeting, Newcastle, UK.
- Marcia, B. H. M. (2013). Thermosyphon Technology for Industrial Applications *Heat Pipes and Solid Sorption Transformations* (pp. 411-464): CRC Press.
- Bonjour, J., Lefèvre, F., Sartre, V., Bertin, Y., Romestant, C., Ayel, V., & Platel, V. (2010). Systèmes diphasiques de contrôle thermique - Thermosiphons et caloducs. *Techniques de l'ingénieur*.



Merci pour votre attention!

Questions?

Van Long LÊ

Laboratoire de Thermodynamique

Université de Liège

E-Mail: vanlong.le@ulg.ac.be

Tél.: +32 4 366 4816

