

Chemins énergétiques pour la récupération d'énergies (CERES)

Assaad Zoughaib¹, Michel Feidt², Sandrine Pelloux-Prayer^{3*}, Fabien Thibault^{1,3}, Van Long Le²

¹Centre d'efficacité Energétique des Systèmes, Mines Paristech,
5 rue Léon Blum, 91120 Palaiseau

²Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, Université de Lorraine,
2 avenue de la Forêt de Haye, 54518 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

³EDF R&D, Avenue des Renardières – Ecuelles. 77818 MORET-SUR-LOING Cedex

* (auteur correspondant : sandrine.pelloux-prayer@edf.fr)

Résumé - Le projet ANR CERES-2 a donné naissance à une plateforme logicielle (appelée Plateforme CERES) permettant d'optimiser la récupération de chaleur dans les procédés industriels continus. Une méthodologie multiéchelle et multicritère d'optimisation est intégrée dans la plateforme. Elle est présentée dans cette communication à travers un exemple de procédé industriel dans lequel un cycle organique de Rankine est intégré et optimisé.

Nomenclature

\dot{W}	Puissance, kW	Ex	Exergétique
\dot{Q}	Flux de chaleur, kW	I	au sens du premier principe de la thermodynamique
\dot{E}_x	Flux d'exergie	ref	frigorigène
\dot{m}	Débit massique, kg.s ⁻¹	t	turbine
<i>Symboles grecs</i>		p	pompe
η	Rendement	1-4	points de fonctionnement du cycle CRO
<i>Indices et exposants</i>		is	isentropique
h/c	côté chaud/froid	0	de référence
esc/ssc	entrée/sortie de la source chaude		
esf/ssf	entrée/sortie de la source froide		

1. Introduction

En France, la consommation annuelle d'énergie dans l'industrie est d'environ 456 TWh, dont 70 % sont consacrés aux besoins de chaleur. Bien que l'efficacité énergétique de l'industrie française soit l'une des plus élevées au monde, il y subsiste des gisements d'économie très significatifs [1], notamment par la récupération de chaleur [2]. Plusieurs études [3] montrent qu'il est en théorie possible de récupérer 10 à 25 % de l'énergie des fumées de chaudières, fours et sécheurs, ce qui représente entre 35 et 85 TWh/an pour la France [4]. Les difficultés rencontrées par les industriels pour optimiser leur consommation énergétique peuvent être regroupées dans 3 catégories :

- la diversité des sources de chaleur fatale (nature, température...);
- la diversité des technologies de production et de récupération disponibles ;
- les différents critères à prendre en compte pour l'optimisation : économiques, énergétiques, et environnementaux.

L'objectif du projet CERES-2 est de développer une plateforme permettant d'appuyer les industriels dans leurs choix d'investissements en identifiant les solutions optimales de valorisation de chaleur fatale. Ce projet, soutenu par l'ANR (ANR-EESI-2010), rassemble 11 partenaires du monde académique et industriel.

La plateforme CERES, développée sous licence open source, comporte 3 éléments :

- Une liaison avec une bibliothèque de procédés et de technologies de valorisation de chaleur en langage Modelica. Des connexions sont réalisables vers d'autres simulateurs afin d'importer des modèles développés sous d'autres environnements ;
- Une liaison vers des algorithmes d'optimisation et des solveurs mathématiques ;
- Une méthodologie de résolution.

La méthode de résolution développée couple des solveurs mathématiques, des algorithmes d'optimisation et la méthode du pincement. Celle-ci, élaborée par Linnhoff [5], permet l'étude énergétique et économique de l'ensemble d'un procédé par la description et l'analyse des flux de chaleur. Des travaux complémentaires ont permis d'établir les règles générales de sélection des utilités adéquates pour un procédé [6]. La méthode du pincement présente cependant quelques limitations. D'un point de vue théorique, elle ne permet pas de prendre en compte les contraintes industrielles, comme l'éloignement géographique, qui vont empêcher l'échange de chaleur entre deux flux ; les résultats obtenus ne sont alors pas pertinents. D'un point de vue pratique, elle s'avère parfois trop complexe à exploiter dans la mesure où l'analyse des courbes par un non-expert est difficile et où les temps de calcul deviennent longs dès que le nombre de flux étudiés est conséquent.

Dans le cadre du projet CERES-2, cette méthode a donc été complétée de manière à pallier ces limites. Aujourd'hui, chaque problème d'optimisation (énergétique, exergetique et/ou économique) peut être résolu simplement via un algorithme spécifique, faisant appel à des solveurs ou à des algorithmes d'optimisation mono ou multiobjectif.

Cette communication présente les développements méthodologiques réalisés pour la résolution d'un problème d'intégration énergétique : la sélection et le pré-dimensionnement des technologies de récupération de chaleur et leur optimisation. Un cas d'application industriel (raffinerie de pétrole), issu de la littérature, illustre par la suite ces développements, avec comme exemple l'intégration de cycles organiques de Rankine.

2. Méthodologie CERES

La méthodologie développée dans le cadre du projet CERES permet d'identifier, hiérarchiser et séquencer les étapes de construction d'un processus d'optimisation global. Les principales étapes sont:

- L'identification et la quantification des potentiels de récupération de chaleur au sein d'un procédé industriel. La méthode du pincement développée par Linnhoff est exploitée dès cette étape ;
- L'identification et le pré-dimensionnement d'utilités et de systèmes thermodynamiques de valorisation de la chaleur pertinents par rapport au procédé étudié (pompes à chaleur, cycles organiques de Rankine, unité de cogénération..) ;
- La construction et l'optimisation du réseau d'échangeurs de chaleur (HEN). La construction du HEN peut s'écrire comme un problème combinatoire linéaire ;
- La conception optimale des équipements spécifiés.

La méthodologie doit répondre à une problématique complexe : résoudre un problème possédant de nombreux paramètres et variables de conception (discrètes et/ou continues) aboutissant à des solutions technologiquement viables, en un temps compatible avec des exigences industrielles. L'utilisation découplée de critères énergétique, exergetique, économique et technologique est donc envisagée. Si l'identification du potentiel de récupération et la construction du réseau d'échangeurs sont issues de l'état de l'art, la spécification et la conception optimale des utilités sont originales puisqu'elles associent

l'analyse exergetique à l'analyse énergétique de la méthode du pincement. Ce sont ces deux étapes qui sont développées ci-après.

2.1. Présélection des utilités thermodynamiques

L'objectif de ce module est de proposer des utilités thermodynamiques performantes en se basant sur le profil des besoins de puissance en fonction de la température (appelé Grande Courbe Composite par Linnhoff [5]) et en utilisant un critère qui minimise la destruction d'exergie. Le nombre d'utilités est alors limité, tout en se prémunissant de l'oubli de solutions pertinentes. Les systèmes proposés par ce module sont :

- des pompes à chaleur qui échangent avec une ambiance (l'atmosphère, le sous sol ou de l'eau), que l'on considérera comme une source froide ou chaude infinie ;
- des thermofrigopompes, thermodynamiquement identiques aux PAC, mais qui associent un besoin de refroidissement et un besoin de chauffage directement entre les flux du procédé ;
- l'installation de Cycles de Rankine Organiques, ou plus généralement de cycles moteurs, est possible ;
- l'installation d'utilités chaudes de type cogénération et d'utilités froides de type production d'eau glacée est proposée.

Chacune des utilités mentionnées ci-dessus échange à des niveaux de température constants et est modélisée de la même façon qu'une pompe à chaleur : une puissance calorifique et frigorifique, un rendement exergetique ou une efficacité dépendant de ces températures et deux variables, l'une continue et l'autre binaire, respectivement pour le dimensionnement de la puissance installée et l'utilisation ou non de l'utilité. Toutefois, leur placement dépend de la température de pincement (T_p), de la température ambiante (T_0) et de leur position respective.

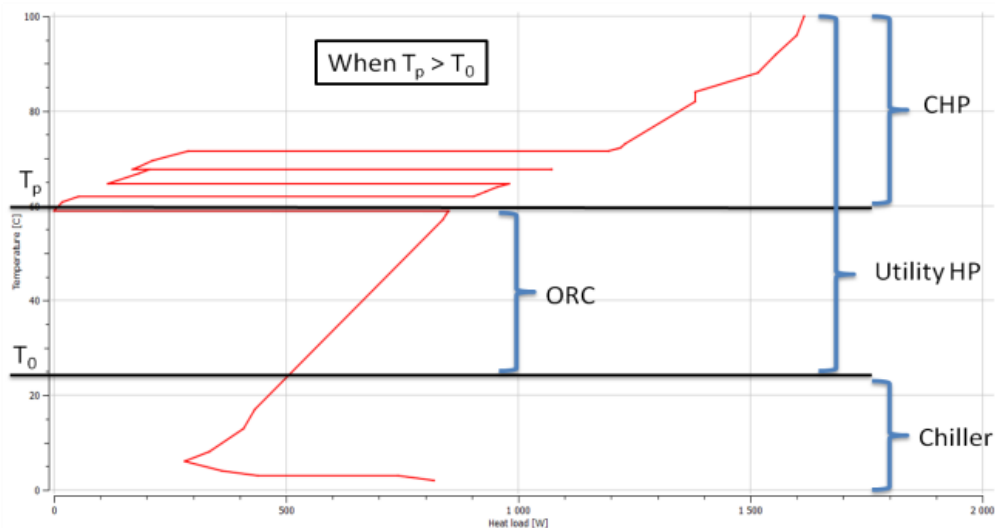


Figure 1. Positionnement des utilités supplémentaires en fonction des températures

Les évaporateurs des groupes froids se positionnent à des températures inférieures à la fois à la température ambiante et à la température du pincement, tandis que les unités de cogénération ne sont efficaces qu'au dessus du maximum de ces deux températures.

En ce qui concerne les pompes à chaleur (utilitaires et thermofrigopompes), pour le placement d'un seul équipement, il est impératif qu'elle traverse la température de pincement. Cela n'est pas nécessairement le cas si elle est combinée avec une autre pompe à chaleur, comme on a pu le démontrer dans [7]. Dans le cas particulier des PAC utilitaires, les

évaporateurs doivent être placés au dessus de la température ambiante, qui correspond à la température de leur source de chaleur.

En revanche, les cycles de Rankine organiques doivent être placés sous le pincement, mais au dessus de la température ambiante.

L'algorithme développé minimise la consommation/destruction d'exergie du système en sélectionnant et dimensionnant les utilités adaptées. Il quantifie ainsi le flux exergétique disponible (refroidissement au dessus de la température ambiante) et/ou les besoins d'exergie (chauffage au dessus de la température du pincement et refroidissement en dessous de la température ambiante). Un rendement exergétique considéré a priori permet d'approcher les performances des systèmes réels de conversion (moteurs ou récepteurs).

2.2. Optimisation à l'échelle des équipements

Le module de préselection spécifie ainsi des équipements de valorisation ou de récupération de chaleur. Cette spécification se traduit par les niveaux de température des sources chaudes et froides et la puissance de l'équipement. Pour confirmer l'intérêt de cette solution, l'équipement doit être conçu et optimisé pour atteindre au moins le rendement exergétique supposé a priori et physiquement acceptable. Cette démarche en deux temps est présentée pour les cycles organiques de Rankine : modélisation du fonctionnement thermodynamique de l'équipement (§2.2) et optimisation de ses caractéristiques sur un cas précis à partir des optimiseurs disponibles dans la plateforme CERES (§3).

Selon Thieriot et al. [8], les algorithmes d'optimisation peuvent être divisés en deux familles : les algorithmes du Gradient et les algorithmes Métaheuristiques. La plateforme CERES utilise les algorithmes Métaheuristiques présentant les caractéristiques suivantes : les règles et les aléas sont combinés pour mimer les phénomènes naturels, les calculs dérivés ne sont pas nécessaires et les méthodes les plus développées sont les algorithmes évolutionnaires et génétiques. Plusieurs algorithmes sont inclus dans la plateforme CERES pour l'optimisation : algorithmes génétiques (Non Sorting Genetic Algorithm et Strength Pareto Evolutionary Algorithm), essaim de particules et recuit simulé.

Dans ce travail, l'optimisation multicritère réalisée pour le cycle CRO¹ simple (voir Figure 2) est une maximisation du rendement au sens du premier principe η_t , du rendement exergétique η_{Ex} et de la puissance \dot{W}_{ORC} , avec comme variable de conception la pression réduite p_r (i.e. le ratio de la pression d'évaporation à la pression critique du fluide cyclé), qui peut varier de 0,4 à 0,7 [9]. Les équations du CRO sont décrites comme suit :

La pompe

$$\eta_{is,p} = \frac{h_{2,is} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{ref}(h_2 - h_1) \quad (2)$$

L'évaporateur

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_{ref}(h_3 - h_2) \quad (3)$$

$$\dot{E}x_h = \dot{m}_h [h_{hsi} - h_{hso} - T_0(s_{hsi} - s_{hso})] \quad (4)$$

La turbine

$$\eta_{is,t} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,is}} \quad (5)$$

¹ Cycle de Rankine Organique

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{ref}(h_3 - h_4) \quad (6)$$

Le condenseur

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{ref}(h_4 - h_1) \quad (7)$$

Les fonctions objectifs :

La puissance du CRO

$$\dot{W}_{ORC} = \dot{W}_t - \dot{W}_p \quad (8)$$

Le rendement au sens du premier principe du CRO

$$\eta_I = \frac{W_{ORC}}{Q_h} \quad (9)$$

Le rendement exergetique du CRO

$$\eta_{Ex} = \frac{Ex_{utile}}{Ex_{dépensée}} = \frac{W_{ORC}}{Ex_h} \quad (10)$$

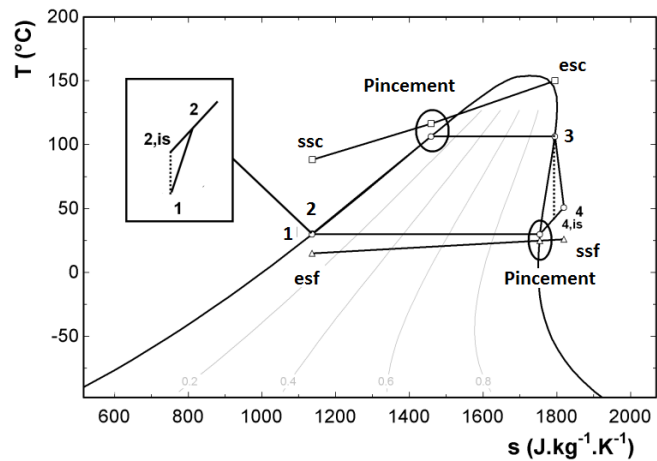
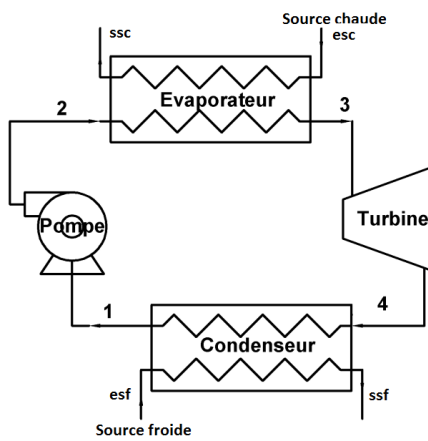


Figure 2. Cycle CRO simple avec quatre composants principaux : pompe, évaporateur, turbine et condenseur

3. Cas d'application : étude du fractionnement du pétrole

Le procédé de préchauffe de pétrole brut pour le procédé de fractionnement en composés principaux tels que naphta, essences, kérosène, et mazout [2] [10] est dans ce travail pris comme cas d'étude pour l'intégration du CRO.

Les données des flux de chaleur avec les températures entrantes, sortantes et les charges thermiques extraites à partir du schéma de l'entrepreneur sont introduites dans la plateforme CERES. Pour le ciblage énergétique et économique, un ΔT_{min} global de 20 °C est pris. La grande courbe composite (GCC) tracée à partir de ces flux est présentée en rouge dans la Figure 3.

La lecture de cette GCC montre qu'en dessous de la température de pincement du procédé (situé à 160 °C), de l'ordre de 40 MW de besoin de refroidissement est disponible entre 150 °C et 100 °C. Une poche auto suffisante de l'ordre de 10 MW se situe ensuite entre 100 °C et la température ambiante (température d'entrée du pétrole brut).

L'utilisation du module de présélection (en supposant a priori un rendement exergetique pour les CRO de 50 %) suggère l'utilisation de cycles organiques de Rankine (limité dans les

simulations à 1 puis 2 équipements en cascade) pour valoriser l'exergie contenue dans les fluides à refroidir. Les résultats sont présentés sur la figure 3.

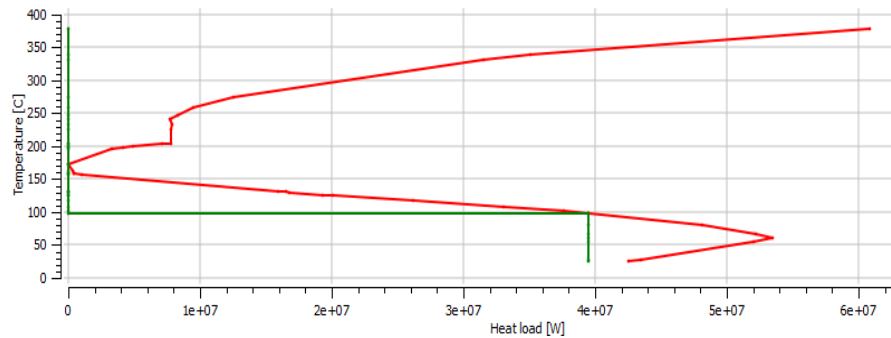


Figure 3b. Intégration d'un CRO

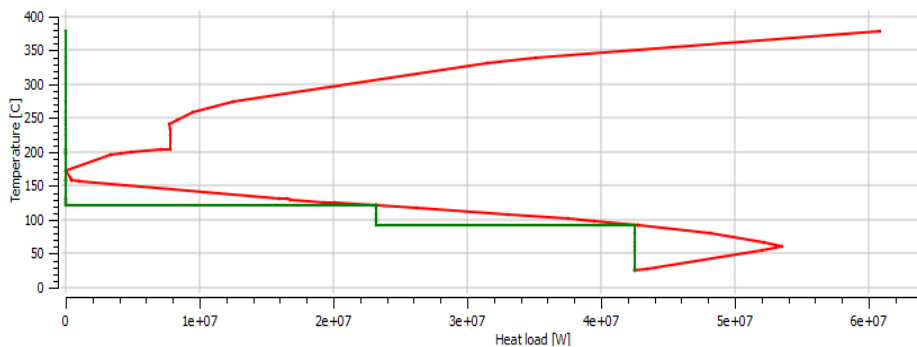


Figure 3a. Intégration de deux CRO en cascade

Quand le nombre de CRO est limité à 1, le module de présélection propose un CRO prélevant 39 MW de chaleur et ayant une température de source à 100 °C (Figure 3b). Ce CRO a un potentiel de production de 3,7 MW d'électricité. L'intégration de 2 CRO en cascade (Figure 3a) permet de prélever tout le besoin de refroidissement (42 MW). Ce prélèvement se fait à deux températures de source de (120 °C et 90 °C). Ils ont un potentiel de production cumulé de 4,3 MW d'électricité.

Le faible écart d'exergie valorisée entre les deux cas (1 et 2 CRO), suggère a priori une difficulté à justifier économiquement l'investissement dans deux équipements. Ainsi, la conception détaillée est réalisée pour un CRO.

Les paramètres pour la modélisation du module CRO sont listés dans le Tableau 1.

Paramètres	Valeurs	Descriptions
Source chaude	Eau chaude	Eau pressurisée à 10 bars
Source froide	Eau froide	Pression supposée à 2 bars > pression atmosphérique
T_0 (°C)	25	Température ambiante de référence
T_{cond} (°C)	30	Température de condensation
$Pinch_{Eva}$ (°C)	10	Pincement de l'évaporateur
$Pinch_{Cond}$ (°C)	3	Pincement du condenseur
T_{esc} (°C)	150	Température entrante de la source chaude
T_{esf} (°C)	20	Température entrante de la source froide
η_{is}	0,8	Rendement isentropique de la pompe et de la turbine

Tableau 1. Paramètres pour la modélisation du CRO

Pour l'optimisation multicritère par CERES, l'algorithme « SPEA2Adapt », un algorithme auto-adaptatif issu des algorithmes génétiques, est recommandé.

Les résultats de l'optimisation multicritère par CERES sont présentés sous la forme de courbes de Pareto de deux fonctions objectives (Figure 4) : η_I (rendement au sens du premier principe) en fonction de η_{Ex} (rendement exergetique). En effet, chaque point sur la courbe de Pareto est un optimum potentiel. Donc la sélection du point de travail dépend de l'expérience de l'opérateur ou de l'ordre de priorité des objectifs. Dans cette étude, un point idéal est un point hypothétique pour lequel deux fonctions objectives trouvent leurs valeurs maximales (Figure 4). Ce-point là ne se trouve pas sur la courbe de Pareto. Le point optimal sur la courbe de Pareto est déterminé comme le point le plus proche de ce point idéal.

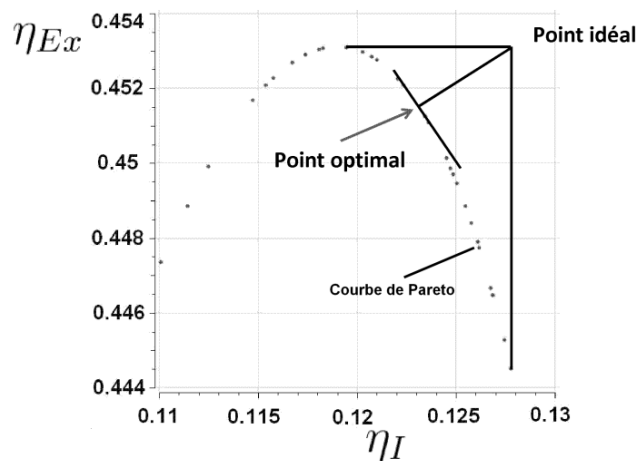


Figure 4. Courbe de Pareto entre η_{Ex} et η_I

Les résultats de l'optimisation représentés à la Figure 4 montrent que le CRO conçu a un rendement exergetique supérieur à 45 %, ce qui correspond à l'hypothèse d'un rendement exergetique de 50 % supposé dans le module de présélection. La puissance électrique calculée est cependant supérieure de 20 % par rapport à la puissance estimée par le module de présélection. Cet écart est lié à l'évolution du fluide organique dans le bouilleur (préchauffe et évaporation) qui permet de fonctionner à une température entropique moyenne (température équivalente de source) supérieure à celle de la sortie de la source chaude.

La conception et l'optimisation du modèle CRO permet de valider la pertinence énergétique et technologique d'une solution optimisée d'un CRO dans ce procédé de préchauffe de pétrole brut. L'étape ultérieure de conception du réseau d'échangeurs de chaleur et de sélection des utilités sur des critères économiques permettra d'évaluer la rentabilité d'une telle solution.

4. Conclusion

En conclusion, cette communication a montré les développements méthodologiques réalisés sur la sélection, le dimensionnement et l'optimisation des utilités via un cas industriel. Ils permettent via l'analyse énergétique et exergetique des flux de procédés industriels de proposer les meilleurs chemins de récupération de l'énergie. Ces développements, intégrés à une méthodologie plus large permettant de sélectionner les utilités et créer le réseau d'échangeurs de chaleur sur des critères économiques, permettent aussi une analyse complète d'un problème d'intégration énergétique. La méthode propose une approche multiéchelle : allant d'une analyse rapide du potentiel et d'une spécification de conditions opératoires d'équipement à la conception optimale détaillée des technologies proposées.

La progressivité de la méthodologie permet d'approfondir l'analyse en fonction du potentiel d'efficacité énergétique atteignable et de la précision des données d'entrée.

Références

- [1] Terrien, P. 2008. ECLEER and Energy Efficiency in Industry, Electricité de France Workshop Printemps de la Recherche. Les Renardières : s.n., 2008.
- [2] Center for Process Integration. 2006. *UK Government Energy Demonstration Projects*. Manchester : s.n., 2006.
- [3] US Department of Energy, Process Heating. 2000. *A Special Supplement to Energy Matters*. 2000.
- [4] M. Dupont, E. Sapora. 2009. The heat recovery potential in French industry : Which opportunities for heat pumps systems? ECEEE : s.n., 2009.
- [5] B. Linnhoff, E. Hindmarch. 1983. *The pinch design method for heat exchanger networks*. s.l. : Chemical Engineering Science, 1983.
- [6] M. Bagajewicz, A. Barbaro. 2003. *On the use of heat pumps in total site heat integration*. s.l. : Computers & Chemical Engineering, 2003.
- [7] F. Thibault, A. Zoughaib, S. Jumel, *An Exergy-based LP algorithm for Heat Pump Integration in industrial processes*, in proceedings of ECOS 2013
- [8] Thieriot, H., et al., *Towards Design Optimization with OpenModelica Emphasizing Parameter Optimization with genetic algorithms*, in *8th Modelica Conference 2011*: Dresden, Germany.
- [9] VL Le., M. Feidt, A. Kheiri, S. Jumel *Working fluid selection and performance comparison of subcritical and supercritical ORC for low-temperature waste heat recovery*, ECEEE 2012.
- [10] Kemp, I.C., *Pinch Analysis and Process Integration: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. 2007: Butterworth-Heinemann. 416.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'ANR.