

Etude de l'extension de la méthode d'intégration énergétique de l'échelle locale à l'échelle territoriale.

Alaa FARHAT^{1,2*}, Assaad ZOUGHAIB¹, Khalil EL KHOURY²

¹Centre Efficacité énergétique des Systèmes, Mines-PARISTECH
5, Rue Léon Blum, Palaiseau 91120, France

²Université Libanaise, Faculté de Génie 2
Roumieh, Liban

* (auteur correspondant : alaa.farhat@mines-paristech.fr)

Résumé - Ce travail explore l'application de l'intégration énergétique au-delà des limites d'un seul site industriel, en étudiant l'intégration énergétique de plusieurs sites industriels entre eux. Les caractéristiques énergétiques des sites sont exploitées afin de déterminer les échanges de chaleur entre sites aboutissant à une performance énergétique améliorée. Les échanges ne sont pas limités à la zone créée par les profils des besoins/excès des sites, ce qui permet d'explorer plusieurs possibilités spécialement avec l'intégration de systèmes thermodynamiques de conversion.

Nomenclature

Indices:

i , intervalle de température

s , site industriel

res , réseau d'échange

Symboles:

T , température K

Q , contenu énergétique d'un site s à un intervalle, W

R , reste énergétique d'un intervalle, W

C , utilité chaude d'un site, W

F_s , utilité froide d'un site, W

S , la chaleur transférée d'un réseau vers un site, W

P , la chaleur transférée d'un site vers un réseau, W

$Cpac$, la chaleur fournie par le condenseur d'une PAC dans un site, W

$Epac$, la chaleur extraite par les évaporateurs, d'une PAC dans un site, W

N , nombre total des intervalles de températures

ns , nombre des sites

RES , nombre des réseaux

Sigles:

GCC, grande courbe composée

PAC, pompe à chaleur

COP, coefficient de performance

1. Introduction

La méthode du pincement a été introduite par Linhoff [1] cette méthode vise à minimiser la consommation énergétique d'un procédé au sein d'un site industriel.

Par la suite, une extension de cette méthode est proposée par Dhole et Linhoff en 1993 [2] en introduisant la méthode du Total Site Analysis (TSA). La TSA est appliquée sur plusieurs sites ayant subi l'intégration énergétique cette méthode aide à déterminer les échanges possibles entre ces sites à partir des excès chaleur restants et les besoins non satisfaits. Dans le cas où un site a des excès à des températures favorables, ces excès peuvent remplacer partiellement ou totalement les utilités externes d'un site voisin, ayant des besoins de chauffage à des températures inférieures.

Les régions d'échange entre deux sites en utilisant la méthode de TSA se situent entre le niveau de température des excès d'un site et le niveau de température des besoins de l'autre. [3]. Pour plusieurs sites, la construction des profils des excès/besoins est proposée [3] [4], ce qui permet d'identifier les régions d'échange. Alternativement, Maréchal et Kalitvenzeff [5], Rodera et Bagajewisc [6], utilisent les méthodes mathématiques pour déterminer les opportunités d'intégration de plusieurs sites. Pour Rodera et Bagajewisc, l'intégration entre plusieurs sites s'étend au-delà des zones d'excès et de besoins en chaleur pour couvrir les

poches autosuffisantes en chaleur. Bandhopadyay et Al. proposent une modification à la TSA pour tenir compte de ces poches [7].

L'échange entre des sites qui se trouvent à proximité nécessite un moyen d'échange indirect; ceci ne pouvant être les flux des procédés provenant de sites différents, puisque les inconvénients de telles méthodes sont nombreux. Tout d'abord les flux provenant de plusieurs sites doivent être compatibles, la maîtrise du procédé devient difficile et finalement des pertes économiques peuvent intervenir en cas de fuite puisque ces flux peuvent être des produits. Pour ces raisons la plupart des travaux adopte les réseaux d'échange tertiaire, malgré la pénalité énergétique qui s'impose [8]. Le choix du fluide d'échange pour la TSA et les méthodes affiliées c'est l'eau en état diphasique (vapeur) ceci est dû à la capacité calorifique importante des fluides en état diphasique et le fait que les utilités à vapeurs sont largement présentes dans l'industrie. Roderer et Bagajewisc proposent d'utiliser des fluides monophasiques puisque le potentiel de récupération est plus important en suivant l'évolution de température des flux [6].

Dans certains cas une grande différence de niveau de température entre les excès de chaleur d'un site et les besoins de l'autre favorise une détente à l'aide de turbines à vapeur avant un échange [3]. De tels systèmes de conversion permettent de valoriser les propriétés exergétique de ces excès. Pour les excès à basse température, des pompes à chaleur pourront élever leur niveau de température afin de les rendre utilisables.

L'utilisation des systèmes de conversion peut engendrer des possibilités d'échange hors des zones ainsi décrites, puisqu'elles modifient la distribution des zones de besoins ou excès d'une installation. Ceci nécessite l'anticipation des zones d'échange tout au long de l'échelle de température afin de pouvoir exploiter plus de possibilités.

Ce travail adopte une approche multi-échelle, la première échelle étant l'échelle locale ou une intégration au niveau d'un seul site. La deuxième échelle nommée territoriale représente l'intégration de sites individuels entre eux dans une même région ou territoire. L'approche est simultanée, donc l'interaction entre sites peut affecter le fonctionnement interne d'un site, et l'installation de systèmes thermodynamiques peut affecter l'existence ou les caractéristiques des réseaux. Ainsi, dans cette approche les régions d'échanges peuvent exister partout et sont indépendantes du positionnement des excès et des besoins des différents sites ce qui aide à explorer mieux les caractéristiques des sites simultanément.

Dans le but d'évaluer les avantages de l'extension de la méthode d'intégration énergétique à l'échelle du territoire, un algorithme de spécification est proposé. L'algorithme permet de déterminer les réseaux et les PAC les plus intéressants sur le plan énergétique et exergétique ainsi que leurs nombres. La méthode de programmation linéaire et combinatoire (MILP) est utilisée pour écrire l'algorithme qui vise à atteindre la solution optimale d'une fonction objectif, qui est la somme des consommations exergétiques. La formulation du problème définit des relations qui représentent les équilibres énergétiques, exergétiques et les différents systèmes.

2. Description du problème et sa formulation mathématique

2.1. Description

Le but est d'avoir une modélisation multi-échelle qui permet d'évaluer tous les types d'échanges possibles entre les sites et de pouvoir spécifier les températures de ces zones d'échanges et les systèmes de conversion nécessaires.

Pour utiliser la programmation linéaire et combinatoire, on introduit des intervalles de températures, dans lesquels les échanges d'un site avec un réseau ou un système de conversion auront lieu. À ce stade on considère que les flux qui se trouvent au sein d'un même site sont supposés avoir déjà échangé entre eux en appliquant la méthode du pincement,

ce qui détermine la nature de l'intervalle: excédentaire ou déficitaire. Généralement, dans chaque site les flux définiront les intervalles de températures en suivant la méthode de Papoulias et Grossman [9], mais chaque intervalle peut être divisé en plusieurs sous-intervalles. Ces divisions permettent d'explorer plusieurs options concernant l'intégration des pompes à chaleur (PAC). Dans certains cas les intervalles initiaux sont suffisamment petits et leurs valeurs sont conservées. Toute quantité de chaleur résiduelle dans un intervalle peut être fournie à un intervalle inférieur. Pour un intervalle (i) la borne supérieure est représentée par T_i , tandis que la borne inférieure est représentée par T_{i+1}

2.2. Principe de fonctionnement à l'échelle locale

A l'échelle locale les systèmes thermodynamiques de conversion, comme les pompes à chaleur, sont modélisés afin de trouver leur placement optimal. Parallèlement, les zones excédentaires en chaleur dans une installation pourront se connecter à un réseau qui à son tour peut fournir cette chaleur à une zone en besoin de chaleur dans une autre installation.

De ce qui précède les types de flux et utilités à l'échelle locale sont décrits dans les paragraphes suivants et représentés dans la Figure 1.

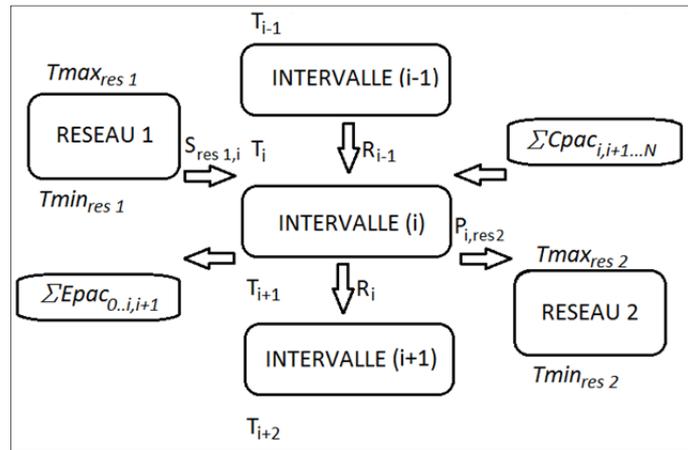


Figure 1: Echanges au niveau d'un intervalle i dans un site donné

2.2.1. Utilités chaudes et froides

Normalement pour chaque site il existe à minima une utilité chaude (C_s) et une utilité froide (F_s) qui sont nécessaires pour satisfaire les besoins post-intégration. L'utilité chaude agit à l'intervalle ayant les températures plus élevées ($i=0$), et l'utilité froide agit à l'intervalle ayant les températures les plus basses ($i=N$).

2.2.2. Pompes à chaleur (PAC)

Les PAC sont exclusives au site, pour un intervalle (i) elles ont leur condenseur ($Cpac_{s,i,j}$) qui opère à la borne de température supérieure T_i , tandis que leur évaporateur ($Epac_{s,i,j}$) opèrent sur les bornes inférieures de tous les intervalles au-dessous de l'intervalle i , T_{i+1} à T_N . Le nombre des PAC qui pourront fournir de la chaleur (par leur condenseur) à un intervalle est dépendant de sa position sur l'échelle de température. Ceci est inversement applicable aux PAC qui pourront extraire de la chaleur (par leur évaporateur) de cet intervalle à la borne de température inférieure T_{i+1} , tandis que leur condenseur opère sur les bornes supérieures de tous les intervalles au-dessus de l'intervalle i , T_0 à T_i .

2.2.3. Cycles de vapeurs et organiques de Rankine

Exclusifs au site, ces machines opèrent d'une façon inverse aux PAC donc le même principe d'intégration s'applique sauf que les condenseurs sont remplacés par des évaporateurs et vice versa.

2.2.4. Echangeurs avec les réseaux

Les échangeurs relient les sites aux réseaux, ces échangeurs peuvent être des sources ou des puits de chaleur selon le type du flux. Les réseaux peuvent exister partout sur l'échelle de température. Pour garantir un échange réalisable dans le cas où le réseau est une source ($S_{res,i,s}$) les conditions suivantes sont nécessaires :

$$Tmax_{res} \geq T_i + \Delta T_{res,i} \quad (1)$$

$$Tmin_{res} \geq T_{i+1} + \Delta T_{res,i} \quad (2)$$

Où res représente le réseau, i l'intervalle, $\Delta T_{res,i}$ le pincement à l'échangeur, tandis que pour les réseaux $Tmax$ et $Tmin$ représentent les températures opératoires, leur différence présente le glissement.

Dans le cas où le réseau est un puit ($P_{i,res,s}$) on a les relations suivantes :

$$T_i \geq Tmax_{res} + \Delta T_{res,i} \quad (3)$$

$$T_{i+1} \geq Tmin_{res} + \Delta T_{res,i} \quad (4)$$

Pour les réseaux à fluides monophasiques: ($Tmax=Tmin$), la pénalité énergétique est évaluée par Kemp [8] en tenant compte des types d'échanges et des températures opératoires des réseaux

2.2.5. Formulation mathématique des échanges

En général l'équation qui gouverne les échanges dans un intervalle i pour un site s avec des réseaux est la suivante:

$$Q_{s,i} = \sum_{res=0}^{RES} S_{res,i,s} - \sum_{res=0}^{RES} P_{i,res,s} + R_{s,i-1} - R_{s,i} + \sum_{j=i+1}^{N+1} Cpac_{s,i,j} - \sum_{j=0}^i Epac_{s,j,i} + C_s(si \ i = 0) - F_s(si \ i = N) \quad (5)$$

2.3. Principe de fonctionnement à l'échelle territoriale

Les réseaux intermédiaires ainsi présentés formeront les liens entre les différents sites, on étend donc le modèle pour couvrir plusieurs sites tout en les connectant par les réseaux. Les transferts de chaleur à travers les réseaux subiront une pénalité énergétique car un échangeur additionnel est nécessaire. La figure 2 illustre deux sites connectés via un réseau.

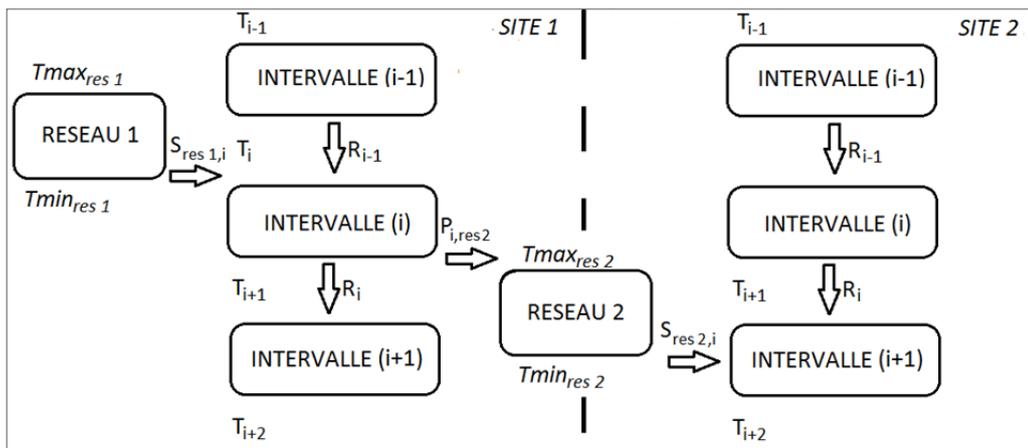


Figure 2: Echanges entre deux sites différents

2.3.1. Caractéristiques des réseaux

Chaque réseau peut se présenter comme un flux chaud pour une zone déficitaire dans un certain site et comme un flux froid pour une zone excédentaire dans un autre site. Pour pouvoir couvrir toute les zones de températures de tous les sites, les températures opératoires

des réseaux seront situées entre la plus grande température d'entrée des flux chauds et la température d'entrée des flux froids. La création de l'échelle de températures peut suivre la méthodologie décrite précédemment, mais on peut avoir les bornes des températures opératoires des réseaux décalées par rapport à celles des sites. Ceci fournit une plage d'échange qui est plus grande.

2.3.2. Interaction au niveau-des réseaux

Les réseaux ne stockent pas de la chaleur, ce qui nécessite que toute chaleur qui est récupérée par le réseau d'un site doit être fournie à un autre, ce qui emmène à la relation suivante :

$$\sum_{s=1}^{ns} S_{res,i,s} = \sum_{s=1}^{ns} P_{i,s,res} \quad (6)$$

Dans le cas où des utilités territoriales sont envisagées sur les réseaux, l'équation ci-dessus peut être modifiée, en ajoutant le terme qui représente l'utilité au côté convenable de l'équation, par exemple si on ajoute une utilité chaude Q_c au réseau res l'équation devient :

$$Q_{c,res} + \sum_{s=1}^{ns} S_{res,i,s} = \sum_{s=1}^{ns} P_{i,s,res} \quad (7)$$

2.4. Relations propres aux systèmes thermodynamiques de conversion

La relation thermodynamique entre le condenseur d'une PAC et son évaporateur doit être respectée, ceci s'applique aux autres systèmes de conversion.

$$Cpac_{s,i,j} = Epac_{s,i,j} * \frac{COP_{s,i,j}}{COP_{s,i,j-1}} \text{ tel que } i \in [0, N] \text{ et } j \in [i + 1, N + 1] \quad (8)$$

3. Algorithme de spécification

L'algorithme a pour but de trouver la configuration pour laquelle la consommation d'exergie, ou indirectement une destruction d'exergie minimale puisqu'il permet de rapprocher les besoins exergetiques de l'exergie mise en jeu via les utilités. Ce critère permet de comparer deux types d'énergie différents, calorifique et électrique, et tenir compte du niveau de température auquel est fournie la chaleur.

3.1. Fonction Objectif

La somme des consommations d'exergie des systèmes est présentée dans l'équation suivante:

$$Exergie = \sum_{s=1}^{ns} (1 - \frac{T_a}{T_{Cs}}) * C_s + \sum_{s=1}^{ns} \sum_{i=0}^N \sum_{j=i+1}^{N+1} \frac{Cpac_{s,i,j}}{COP_{s,i,j}} + \sum_{s=1}^{ns} (\frac{T_a}{T_{Fs}} - 1) F_s \quad (9)$$

Dans le premier terme, $(1 - T_a/T_{Cs})$ représente le facteur de Carnot de l'utilité chaude C_s et, T_{Cs} représente la température de la source et T_a la température ambiante du site. Le second terme est la somme des consommations électriques des PAC installées sur le site. Dans le troisième terme, $(1 - T_{Fs}/T_a)$ représente le facteur de Carnot de l'utilité froide, T_{Fs} représente la température du puits, les termes de cette somme existent si et seulement si $T_{Fs} < T_a$.

Les équations (5) à (8) forment la base pour la conception d'un algorithme de spécification. En effet, ces équations représentent les contraintes qui assurent la représentation correcte des systèmes utilisés tels, les PAC, ou systèmes générateurs, et que les échanges se déroulent dans le bon sens.

3.2. Spécification des différents systèmes

Le fait d'attribuer des températures opératoires à chaque réseau possible ou aux systèmes de conversions, permet de spécifier les caractéristiques des systèmes nécessaires pour

atteindre une utilisation optimale des ressources énergétiques. L'obtention de ces caractéristiques est indispensable pour une évaluation technique des systèmes en cas d'étude d'implémentation physique, par exemple les températures des condenseurs des PAC peuvent être limitées à 150 °C. De même, des réseaux à fluides monophasiques, comme l'eau, qui opèrent à des températures supérieures à 100 °C engendrent l'utilisation des systèmes de pressurisation ou même la substitution du fluide d'échange par certains types d'huiles.

4. Cas d'étude

Dans un premier temps, l'algorithme a été testé pour plusieurs cas de la littérature et les résultats sont en accord. Dans ce papier, un cas d'étude est choisi et présenté afin de tester les capacités de l'algorithme et les apports de l'approche multi-échelles ainsi décrite.

4.1. Description

Dans ce cas, deux sites ayant leurs points de pincement à la même température, sont étudiés. Un échange entre les deux sites est impossible, puisque les zones de déficit telles que les zones d'excès des deux sites sont aux mêmes températures. Pour réduire les consommations énergétiques des deux sites, des PAC peuvent être installées ce qui présentera la première partie de l'étude de ce cas. Puis la possibilité d'avoir des réseaux et des PAC est étudiée dans la deuxième partie. Les caractéristiques des sites sont représentées dans le tableau 1.

	<i>Utilité chaude</i>	<i>Utilité froide</i>	<i>Point de pincement</i>
	kW	kW	°C
Site 1	40	240	80
Site 2	320	30	80

Tableau 1 : Propriétés des installations

Le tableau 1 et les grandes courbes composées des deux sites (Figures 3 et 4), qui représentent la synthèse des caractéristiques des flux des deux sites, montrent que le besoin en chaleur au-dessus du pincement du site 1 est plus grand que son besoin en refroidissement. L'inverse est vrai pour le site 2.

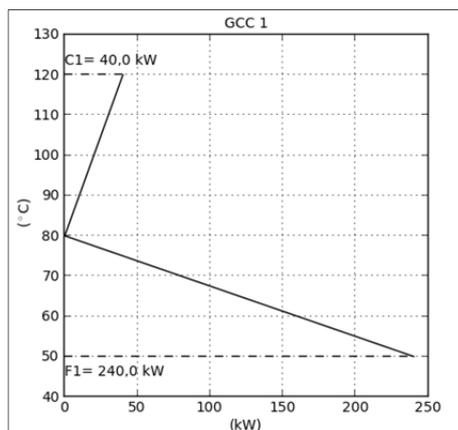


Figure 3: GCC du site 1

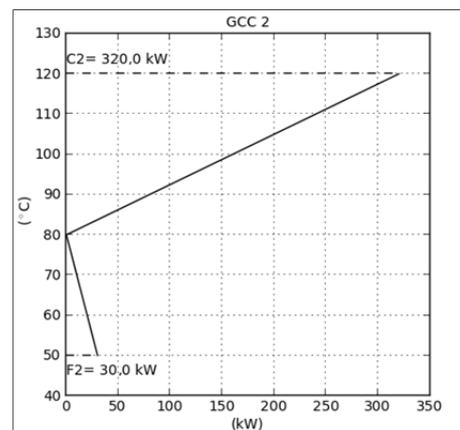


Figure 4: GCC du site 2

4.1.1. Introduction des pompes à chaleur

La capacité maximale des PAC est limitée par l'excès de chaleur en dessous du pincement ou des besoins au-dessus du pincement selon le site. En essayant d'utiliser le plus grand nombre de PAC possible mais sans ouvrir la possibilité d'échange entre sites, la

consommation d'exergie est réduite de 180 kW à 152,56 kW. L'algorithme trouve au total 13 PAC, 8 sont attribuées au site 1 tandis que 5 sont attribuées au site 2. Dans les figures 5 et 6 les traits horizontaux (flux diphasiques), au-dessus du pincement représentent les capacités des condenseurs des PAC tandis que ceux qui sont en dessous représentent les évaporateurs. La capacité totale des condenseurs des PAC du site 1 est limitée par les besoins de chaleur au-dessus du pincement qui sont de 40 kW. Pour le site 2, la capacité totale des évaporateurs des PAC est limitée par les excès de chaleur au-dessous du pincement qui sont de 30 kW. Les utilités chaudes et froides satisfont les besoins et les excès subsistants.

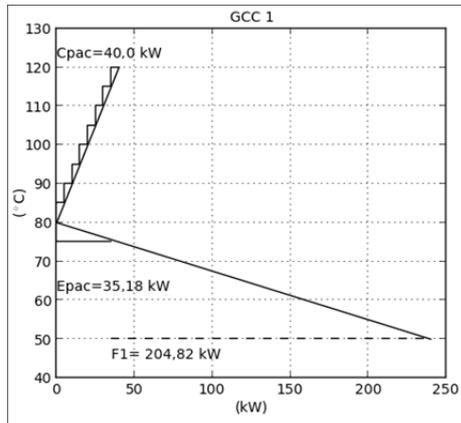


Figure 5: Localisation des PAC, site 1

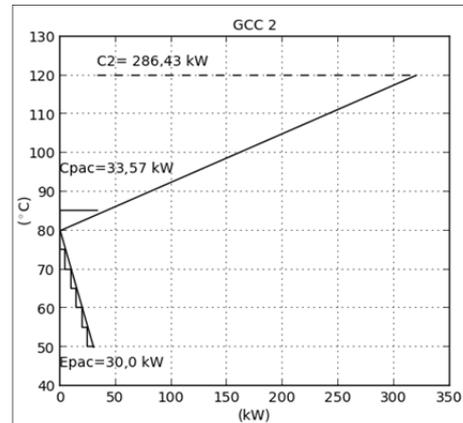


Figure 6: Localisation des PAC, site 2

4.1.2. Introduction d'un réseau avec une PAC pompe à chaleur

En ouvrant la possibilité d'échange entre les deux sites, et en limitant le nombre maximal des réseaux et des PAC à 1. L'algorithme propose un réseau qui transfère la chaleur de la zone à fort excès de chaleur à basse température du site 1 vers le site 2, et d'installer une PAC dans le site 2 pour relever le niveau de température de cette chaleur. La consommation d'exergie est réduite à 122,96 kW. La zone d'échange est en dessous des pincements des deux sites, ce qui ne peut pas être obtenu par la méthode de la TSA.

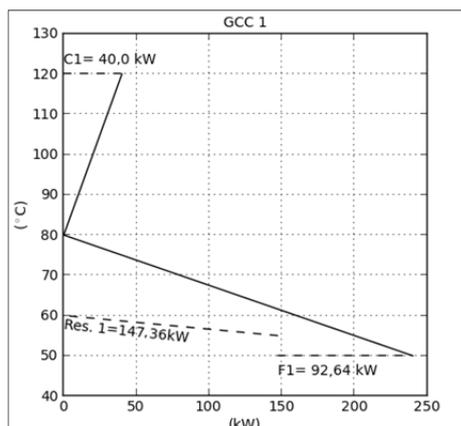


Figure 7: Installation d'une PAC avec un réseau, site 1

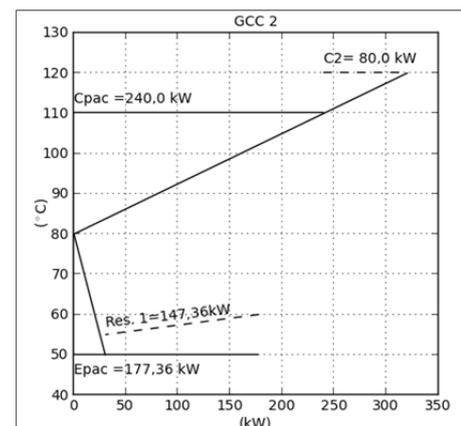


Figure 8: Installation d'une PAC avec un réseau, site 2

Dans ce cas l'existence du réseau dépend de la possibilité d'installer une PAC, et en revanche le réseau permet d'augmenter la contribution de la PAC dans la fourniture des besoins énergétiques des sites (240 kW fournis et 177,36 kW extraits). La représentation de la PAC et du réseau (supposé fonctionner avec un fluide monophasique) est effectuée sur les figures 7 et 8.

5. Conclusion

L'étude de l'état de l'art de l'intégration énergétique à l'échelle du territoire, montre que la plupart des études mettent en relief les aspects techniques et logistiques d'une telle intégration entre plusieurs sites industriels, en favorisant l'intégration à travers des réseaux d'échange tertiaires. Cependant, la conception des réseaux d'échanges est dépendante des zones inter-pincements ou de la localisation d'une poche autosuffisante d'un site au-dessus du pincement d'un autre. En revanche, l'algorithme développé dans cette étude vise à explorer les possibilités d'échange au-delà des limites actuelles et l'étude de cas qui est présentée dans cet article montre que des échanges peuvent exister hors des régions définies auparavant et que l'utilisation des PAC avec les réseaux permet de mieux exploiter les excès énergétiques des sites et surtout ceux qui sont à un niveau de température relativement bas .

Références

- [1] B. Linhoff et E. Hindmarsh, The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks, *Chemical Engineering Science*, Vol.38, Pergamon Press Ltd, (1982).
- [2] V. Dhole et B. Linhoff, Total Sites Targets for Fuel, Co-Generation, Emission, and Cooling, *Computer and Chemical Engineering*, (1993).
- [3] J. Klemes et Al., *Targeting And Design Methodology For Reduction Of Fuel, Power And Co, On Total Sites*, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, Pergamon Press Ltd, (1997).
- [4] P.Y. Liew et Al, Technique for Total Site Sensitivity Analysis, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 40, Elsevier, (2012).
- [5] F. Maréchal et B. Kalitventzeff, Energy Integration of Industrial Sites: tools, methodology and application, *Computer and Chemical Engineering*, Vol. 18, Pergamon Press Ltd, 1998.
- [6] H. Rodera, et M. Bagajewisc, Targeting Procedures for Energy Savings by Heat Integration Across many Plants. *AIChE Journal*, Vol. 45, (1999).
- [7] S. Bandyopadhyay, J. Varghese et V. Bansal, Targeting for cogeneration potential through total site integration. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, Elsevier, (2012).
- [8] I. Kemp, Pinch Analysis and Process Integration, A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. Oxford : Butterworth-Heinemann, (2007).
- [9] S. Papoulias et I. Grossman, A Structural Optimisation Approach in Process Synthesis-II, *Computer and Chemical Engineering*, Vol. 7, Pergamon Press Ltd. (1983).