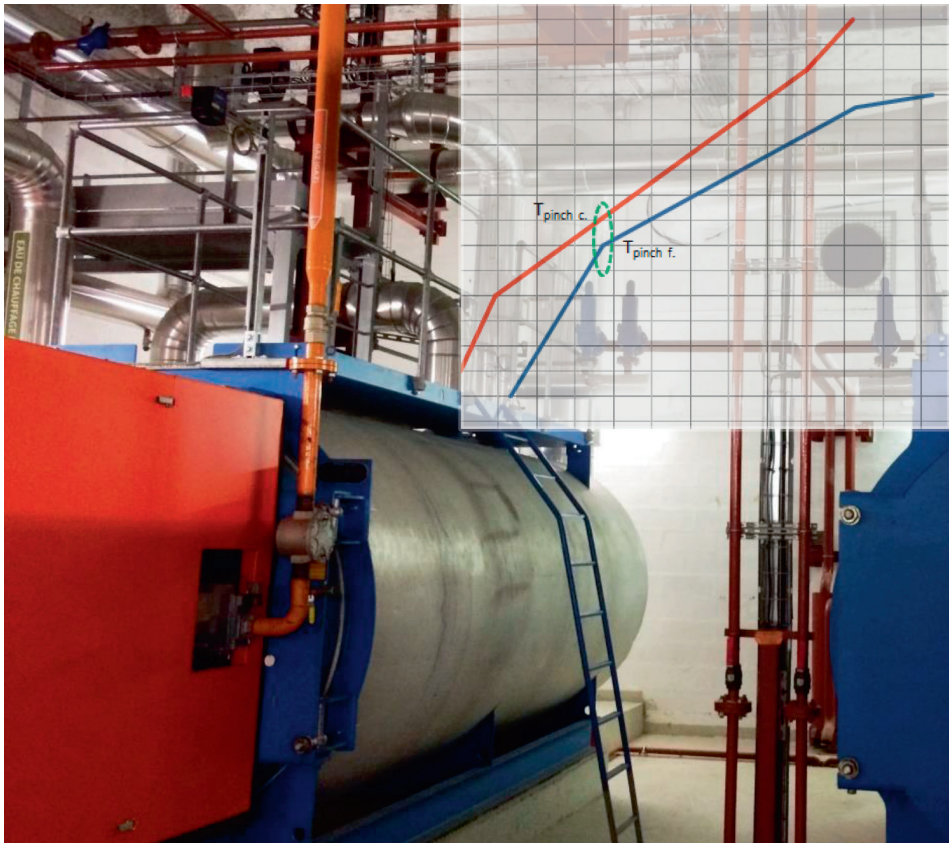


Jacques Woillez

Économiser les combustibles avec la méthode pinch

Guide pratique



Lavoisier
hermes

Jacques Woillez

**Économiser
les combustibles
avec la méthode pinch
Guide pratique**

Lavoisier
hermes

editions.lavoisier.fr

Chez le même éditeur

Conversion chaleur-énergie mécanique : principes et applications industrielles
Jacques Woillez, Lavoisier Hermes, 2018

Systemes diphasiques – Éléments fondamentaux et applications industrielles.
Lavoisier Hermes, 2014. Prix Roberval 2015.

Direction éditoriale ; Jean-Marc Bocabeille
Mise en pages : Nord Compo

Pour plus d'informations sur nos publications :



newsletters.lavoisier.fr/9782746249530

© 2023 Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7462-4953-0

Sommaire

Notations	IX
Introduction	1

Chapitre 1 Présentation de la méthode

1. Première étape : identification des flux	9
2. Deuxième étape : construction des courbes composites	11
3. Troisième étape : définition de la cible énergétique	13
4. Quatrième étape : conception du réseau de chaleur	15
5. Aspect économique	17

Chapitre 2

Échangeurs régénérateurs

1. Bases pour la définition d'un échangeur de chaleur	20
<hr/>	
2. Échangeur régénérateur sur une turbine à gaz	23
<hr/>	
2.1. Première étape : identification des flux	25
2.2. Deuxième étape : construction des courbes composites	25
2.3. Troisième étape : définition de la cible énergétique	28
2.4. Quatrième étape : conception du réseau de chaleur.....	29

Chapitre 3

Réseaux de chauffage

1. Cas d'un réseau impliquant 3 fluides	32
<hr/>	
1.1. Position du problème	32
1.2. Première étape : identification des flux	33
1.3. Deuxième étape : construction des courbes composites	34
1.4. Troisième étape : définition de la cible énergétique	36
1.5. Quatrième étape : conception du réseau de chaleur.....	36
<hr/>	
2. Cas d'un réseau impliquant 4 fluides	39
<hr/>	
2.1. Position du problème	39
2.2. Une solution intuitive	40
2.3. Solution selon la méthode pinch	41
<hr/>	
3. Apport des pompes à chaleur	48
<hr/>	

Chapitre 4

Récupération de chaleur sur les centrales thermiques

1. Fonctionnement d'une centrale thermique	51
2. Mise en œuvre de la méthode pinch	53
2.1. Première étape : identification des flux	53
2.2. Deuxième étape : construction des courbes composites	54
2.3. Troisième étape : définition de la cible énergétique	57
2.4. Quatrième étape : conception du réseau de chaleur.....	57
3. Cas avec condensation des fumées	60
3.1. Première étape : tableau des flux.....	60
3.2. Deuxième étape : établissement des courbes composites.....	61
3.3. Troisième étape : définition de la cible énergétique	64
3.4. Quatrième étape : conception du réseau de chaleur.....	64

Chapitre 5

Processus thermiques en génie chimique

1. Situation initiale	69
2. Application de la méthode pinch	70
2.1. Première étape : identification des flux	70
2.2. Deuxième étape : construction des courbes composites	71
2.3. Troisième étape : définition de la cible énergétique	74
2.4. Quatrième étape : conception du réseau de chaleur.....	74

3. Ajustement itératif d'un réseau d'échangeurs	78
3.1. Descriptif du cas.....	79
3.2. Établissement des courbes composites et de la cible énergétique.....	79
3.3. Établissement du réseau d'échangeurs.....	81

Chapitre 6

Générateurs de vapeur

1. Fonctionnement d'un générateur de vapeur	85
2. Application de la méthode pinch	87
2.1. Première étape : identification des flux.....	87
2.2. Deuxième étape : construction des courbes composites.....	88
2.3. Troisième étape : définition de la cible énergétique.....	90
2.4. Quatrième étape : conception du réseau de chaleur.....	90
3. Température des tubes des échangeurs	91

Chapitre 7

Centrale diesel-électrique à cogénération

1. Fonctionnement d'une centrale thermique	95
2. Mise en œuvre de la méthode Pinch	97
2.1. Première étape : identification des flux.....	97
2.2. Deuxième étape : construction des courbes composites.....	98
2.3. Troisième étape : définition de la cible énergétique.....	101
2.4. Quatrième étape : conception du réseau de chaleur.....	101

3. Cas avec production de vapeur	105
3.1. Première étape : tableau des flux.....	107
3.2. Deuxième étape : établissement des courbes composites.....	108
3.3. Troisième étape : définition de la cible énergétique	111
3.4. Quatrième étape : conception du réseau de chaleur.....	112
4. Optimisation paramétrique	115

Annexes

1. Grandeurs physiques	119
1.1. Eau liquide et vapeur	119
1.2. Air humide.....	121
1.3. Eau additionnée d'antigel	122
1.4. Huiles thermiques	123
1.5. Solides pulvérulents.....	123
1.6. Pouvoir calorifique des combustibles	124
2. Principaux types d'échangeurs de chaleur	125
3. Logiciels d'aide à la mise en œuvre de la méthode pinch	127
4. Recommandations pratiques pour la réalisation d'un réseau de chaleur	130
4.1. Les échangeurs de chaleurs	131
4.2. La chaudière d'appoint	131
4.3. Les pompes.....	131
4.4. La tuyauterie.....	132
4.5. Groupe de maintien en pression	132
4.6. Filtre à barreaux magnétique.....	134

Notations

- A : Surface d'échange d'un échangeur de chaleur (m^2)
C : Débitance thermique, $kW.K^{-1}$
C_p : Capacité calorifique à pression constante, $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$
H : Enthalpie, kW
h : Enthalpie spécifique, $kW.kg^{-1}$
K : Coefficient de transfert d'un échangeur de chaleur ($kW.m^{-2}.K^{-1}$)
M : Masse molaire, $kg.mol^{-1}$
P : Pression, Pa ou bar absolus
P_T : Puissance thermique, kW
q : Débit massique, $kg.s^{-1}$
R : Constante universelle des gaz parfaits ($J.kg^{-1}.mol^{-1}$)
T : Température, K ou °C
y : Humidité massique de l'air humide, kg de vapeur par kg d'air sec
- α : Humidité en volume de l'air humide, %
 ϵ : Efficacité d'un échangeur thermique, adim.
 λ : Conductibilité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
 ρ : Masse volumique, $kg.m^{-3}$
 η : Rendement énergétique (adim.)

Abréviations :

- BT : Basse température
CC : Courbe composite
ECS : Eau chaude sanitaire
HT : Haute température
PAC : Pompe à chaleur

Indices :

- a : relatif à l'air sec
c : chaud
e : entrée

f : froid

g : grand

fi : final

in : initial

p : petit

s : sortie

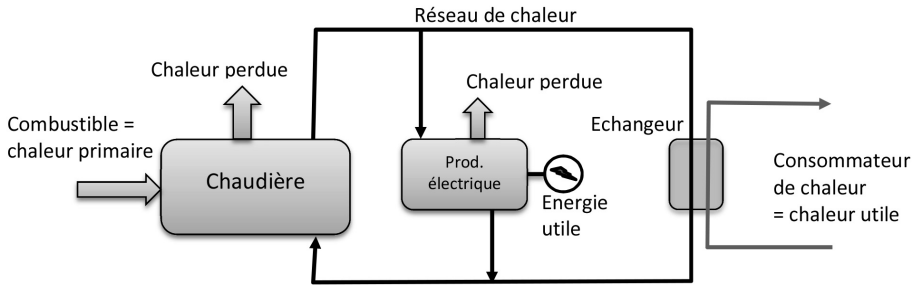
sat : relatif aux conditions de saturation

v : relatif à la vapeur

Introduction

En ces temps où la recherche des économies de combustibles devient un enjeu économique stratégique, les processus de conception des installations de production et de distribution de chaleur constituent un sujet de première importance. La méthode de calcul du pincement thermique, plus connue sous la dénomination « méthode pinch », permet justement de concevoir de manière certaine et optimale les réseaux de fluides caloporteurs qui assurent le transfert de chaleur entre plusieurs sources de chaleur distinctes et plusieurs consommateurs. Lorsqu'elle est mise en œuvre sur des installations neuves ou sur des installations existantes qui font l'objet d'un audit énergétique, elle procure des gains de consommation de combustible qui sont statistiquement de l'ordre de 10 % à 35 %, parfois d'avantage. Cette amélioration peut avoir des conséquences financières importantes pour les entreprises : facture énergétique réduite, obtention de subventions attribuées selon un critère d'efficacité énergétique, obtention d'un taux de TVA réduit pour la chaleur vendue sur les réseaux urbains, permis d'exploitation renouvelé face aux durcissements des législations environnementales, obtention des quotas CO₂, succès d'une réponse à appel d'offre sur performance énergétique, etc.

Dans tous les processus de fabrication et de production industrielle, il est fait usage de réseaux de chaleur. Ces réseaux sont constitués de conduites qui distribuent un fluide chaud (en thermodynamique, on dira à enthalpie élevée) tel que de l'eau liquide, de l'eau sous forme de vapeur, de l'air plus ou moins humide, de l'huile ou un fluide frigorigène. Cette chaleur est produite par une source de chaleur primaire, la chaudière, qui brûle un combustible solide, liquide ou gazeux. Par l'intermédiaire d'échangeurs de chaleur, ce ou ces fluides cèdent leur chaleur au processus industriel, par exemple les processus de chauffage, séchage, cuisson, stérilisation, réaction chimique, etc. et bien sûr la production d'électricité. Le fluide chaud, ce faisant, se refroidit, ou se condense s'il s'agit de vapeur, et retourne vers la source de chaleur primaire prévue à cet effet afin de se régénérer. La figure 1 ci-dessous schématise le principe de fonctionnement d'un tel réseau de chaleur.

**Figure 1**

Principe d'un réseau de chaleur, cas d'une cogénération chaleur + électricité.

Le critère de performance d'un tel réseau est le rendement énergétique E défini par :

$$E = \frac{\text{Énergie électrique produite} + \text{chaleur utile}}{\text{Chaleur primaire}}$$

La chaleur primaire est celle apportée par le combustible, il s'agit d'une énergie qu'il faut en général payer. Le terme de chaleur « utile » s'apparente en fait à la chaleur vendue, c'est-à-dire exploitée pour un besoin de production. L'énergie électrique quant à elle est évidemment une énergie utile, qui peut aussi être vendue. Ainsi le critère d'efficacité énergétique du réseau intègre-t-il à la fois l'aspect thermodynamique et l'aspect économique.

Naturellement, la conception du réseau visera à minimiser la chaleur primaire, c'est-à-dire la consommation de combustible, afin de maximiser le rendement énergétique de l'installation.

On a fait apparaître sur la Figure 1 la production de chaleur perdue, soit :

$$\text{Chaleur perdue} = \text{chaleur primaire} - \text{chaleur utile} - \text{énergie électrique}$$

Cette chaleur perdue est souvent dénommée « chaleur fatale », au sens qu'on ne sait pas quoi en faire. C'est là qu'apparaît la notion de récupération de chaleur fatale sur un système thermique. En-effet, si sur un site on dispose de deux unités impliquant des processus thermiques, il est tout à fait possible de récupérer la chaleur perdue sur un des processus pour la valoriser sur l'autre. Cette possibilité est illustrée par la Figure 2. La chaleur perdue du processus 2 sera disponible pour un processus principal (processus 1) sous la forme d'une conduite contenant le fluide de travail (fumées d'échappement, huile ou eau de refroidissement, effluent rejeté, etc.). Cette chaleur perdue, une fois récupérée par un échangeur récupérateur sur le fluide de travail du premier processus, et réintroduite dans le réseau de chaleur principal, aura pour effet, à énergie utile inchangée, de diminuer la consommation de combustible de la chaudière et donc la facture énergétique.

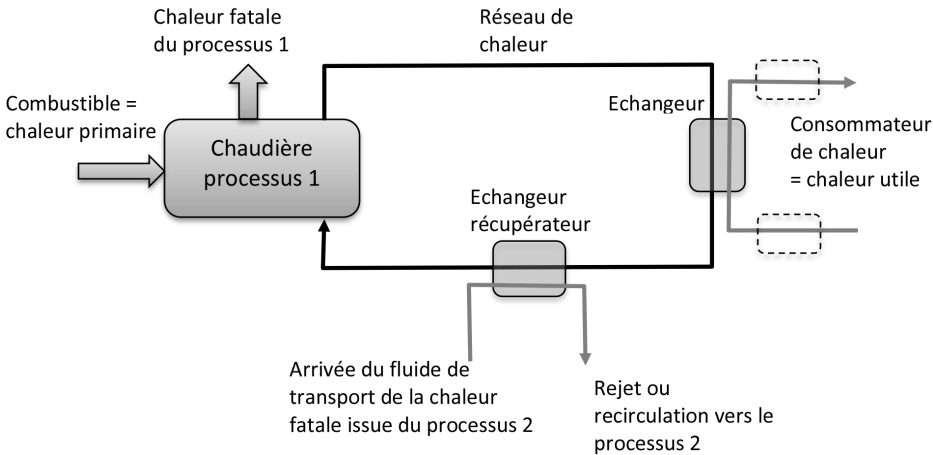
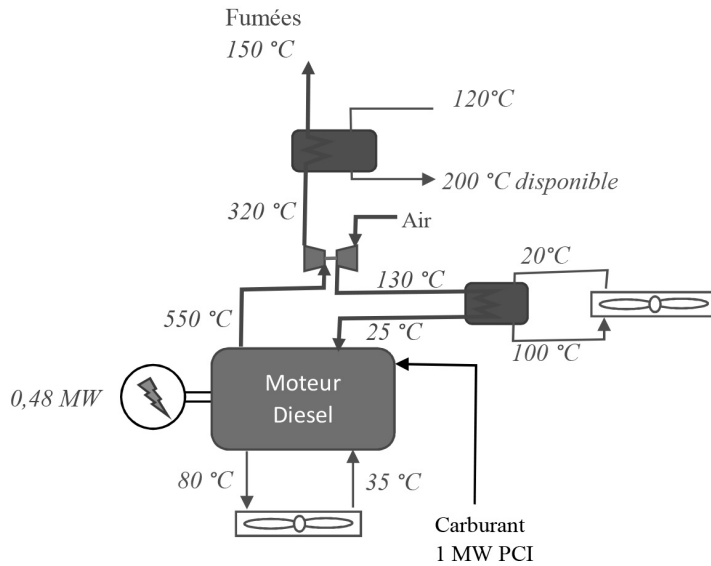


Figure 2
Principe de valorisation de la chaleur fatale et positions alternatives possibles de l'échangeur récupérateur.

La Figure 2 permet d'introduire une définition pour la suite de cet ouvrage : le fluide de transport de la chaleur fatale issue du processus 2 sera appelé « disponibilité ». En-effet, ce fluide est disponible pour alimenter en chaleur un consommateur approprié.

Sur la Figure 2, l'échangeur de valorisation de la chaleur fatale du processus secondaire a été placé arbitrairement sur le retour à la chaudière du fluide de travail du processus principal. Mais aussi bien, il aurait pu être placé à l'arrivée ou au départ du fluide de travail du circuit consommateur. En somme, dans ce schéma simple proposé, il y a 3 possibilités de transfert de chaleur, et la question se pose de savoir comment faire pour choisir la meilleure des trois. Cette question peut s'avérer assez complexe lorsque de nombreux fluides de travail, soit consommateurs, soit disponibilités, sont en jeu.

Nous allons prendre pour exemple le cas de la Figure 3 qui constitue un cas industriel courant qui présente un processus de génération de chaleur utile et fatale, que nous mettrons face à un ensemble de consommateurs de manière à illustrer la complexité des transferts de chaleur possibles et l'intérêt de la méthode pinch.

**Figure 3**

Principe de fonctionnement d'un groupe électrogène turbo utilisé en cogénération.

Il s'agit d'un groupe électrogène diesel de puissance thermique arbitraire 1 000 kW. En fonctionnement stabilisé, ce moteur rejette des fumées d'échappement à haute température, et a besoin d'eau pour assurer le refroidissement du moteur et de l'air comburant en aval du turbo-compresseur. Le bilan thermique du moteur s'établit donc selon le tableau 1. Au total, le moteur rejette en chaleur perdue 52 % de la puissance thermique injectée sous forme de carburant, soit 520 kW.

Tableau 1

Bilan thermo-mécanique du moteur diesel pris en exemple.

	kW	%
Puissance thermique du combustible	1 000	100 %
Puissance mécanique sur l'arbre	480	48 %
Pertes thermiques dans les fumées	250	25 %
Pertes thermiques dans le circuit de refroidissement	190	19 %
Pertes thermiques de l'intercooler	80	8 %

Le moteur procure donc 3 fluides de travail sous forme d'eau liquide, constituant autant de disponibilités. En-effet, chacun de ces fluides doit être refroidi avant d'être recirculé vers le moteur. Habituellement ce refroidissement est effectué par des aéro-réfrigérants ou des hydro-réfrigérants, et la chaleur perdue est finalement rejetée au milieu naturel. Ainsi :

- Les fumées d'échappement, normalement à une température de 330 °C, peuvent être refroidies jusqu'à environ 150 °C (en deçà, des problèmes de condensation corrosive se produiraient dans les conduites d'échappement) à l'aide d'un échangeur

de chaleur placé sur la cheminée. Cet échangeur fournit un flux d'eau chaude pressurisée de température 200 °C qui doit être retournée à l'échangeur à 120 °C, ce qui nécessite l'extraction d'une puissance thermique de 175 kW. Cette récupération de chaleur n'est pas nécessaire au fonctionnement du moteur, mais elle représente une disponibilité.

- Le circuit de refroidissement du moteur lui-même, qui s'effectue par un circuit d'eau qui entre à 35 °C et ressort à 80 °C, nécessitant l'extraction d'une puissance thermique de 188 kW. (Nota : on a négligé pour simplifier la présentation et les calculs ultérieurs la distinction entre circuit d'eau et circuit d'huile de lubrification)
- Le circuit de refroidissement de l'intercooler du turbocompresseur (celui-ci refroidit l'air de combustion qui a été échauffé par la compression dans le turbo), qui s'effectue par un circuit d'eau qui entre à 20 °C et ressort à 100 °C, nécessitant l'extraction d'une puissance thermique de 80 kW

Au total, ce sont 443 kW qui sont disponibles sous forme d'eau chaude à différentes températures sur trois fluides distincts.

Supposons alors que le site soit, indépendamment du moteur, consommateur de chaleur sur 3 postes représentés sur la Figure 4 :

- Un réseau de retour de condensats vers une chaudière productrice de vapeur moyenne pression. Ces retours sont habituellement à une température voisine de 90 °C et doivent être réchauffés à la température de saturation de la vapeur produite par la chaudière, soit ici 210 °C. Ce réchauffement est effectué par la chaudière productrice de la vapeur dans un échangeur dit « économiseur ». Dans l'exemple pris une puissance thermique de 502 kW est nécessaire et est fournie par le combustible de la chaudière.
- Un réseau de chauffage de bâtiment, effectué par une chaudière à eau chaude, qui relève la température de retour de l'eau de chauffage de 50 à 90 °C, pour une puissance thermique requise de 470 kW.
- Un réseau de distribution d'eau chaude sanitaire, réchauffée par une chaudière à eau chaude depuis la température d'eau de ville 10 °C jusqu'à une température de stockage de 65 °C à concurrence d'une puissance thermique requise de 92 kW.

Au total, ce sont donc 1 064 kW qui sont à fournir par les trois chaudières concernées. Sur le bilan de la Figure 4 on a fait figurer également les valeurs caractéristiques des flux thermiques à savoir :

- La capacité calorifique des fluides à pression constante (C_p) exprimées en $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Le débit massique des fluides (noté q), en kg.s^{-1}
- La débitance thermique ($C = q \times C_p$) exprimée en kW. K^{-1}

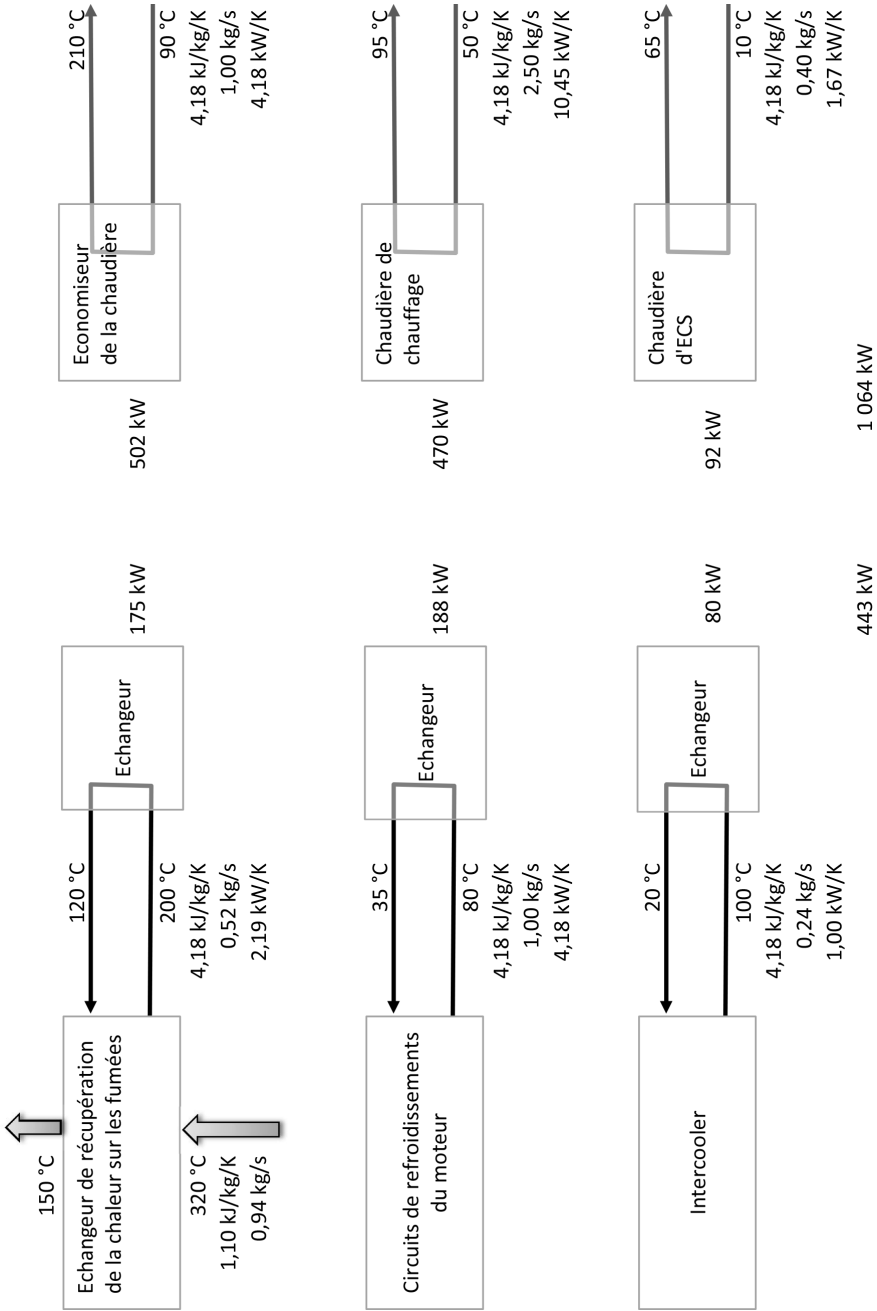


Figure 4
Disponibilités et consommateurs sur un site de production électrogène par moteur diesel.

Il apparaît alors clairement qu'il existe une opportunité d'utiliser les 443 kW de chaleur fatale disponible sur le moteur pour chauffer ou préchauffer les fluides des consommateurs. S'il était possible de transférer la totalité de la puissance thermique fatale vers les consommateurs, une économie de combustible de 443 kW serait obtenue sur les consommateurs. Mais on est en présence ici d'un réseau de chaleur qui ne comporte pas moins de 6 fluides caloporteurs qu'il faut mutualiser. Aussi une double question se pose :

- Est-il vraiment possible de transférer vers les consommateurs la totalité de la chaleur disponible, et si non, quelle puissance est-elle transférable au mieux ?
- Comment concevoir le réseau fluide de récupération et de redistribution de chaleur pour effectuer ce transfert optimal ? C'est-à-dire : à quel consommateur est-il le plus judicieux de céder la chaleur d'une disponibilité ?

Une solution pourrait consister à simuler différentes configurations d'agencement de conduites caloporteur et d'échangeurs de transfert, mais cette démarche serait longue et incertaine, c'est-à-dire qu'on ne saurait jamais si on a conçu la solution la plus performante.

C'est précisément là qu'intervient la méthode pinch.

La méthode du pincement thermique ou habituellement dénommée « méthode pinch » (en anglais *pinch* est le « pincement ») est une méthode simple et systématique qui permet :

- a) De définir à coup sûr la **cible énergétique** d'un transfert de chaleur depuis une ou plusieurs sources de chaleurs disponibles vers un ou plusieurs consommateurs requérant de la chaleur et consommant pour cela du combustible. La cible énergétique correspond à la meilleure configuration possible du réseau de chaleur réalisant le transfert (il est impossible de faire mieux).
- b) De fournir les informations nécessaires à la conception du réseau de chaleur qui permet d'atteindre cette cible énergétique.

Insistons dès à présent sur un point : la mise en œuvre de la méthode pinch conduira la plupart du temps à la conception d'un agencement non-intuitif du réseau de chaleur assurant le transfert de chaleur entre les disponibilités et les consommateurs. C'est-à-dire que la solution à laquelle on est conduit n'aurait pas été imaginable sans l'utilisation de la méthode.

Le but du présent ouvrage est de proposer une méthodologie d'application simple de la méthode pinch que tout un chacun pourra utiliser à l'aide d'un tableur. Cette méthodologie pourra s'appliquer soit à la conception initiale des réseaux de chaleur, soit à leur refonte générative d'économies d'énergie dans le cadre des audits énergétiques.

La méthode pinch a été formalisée en 1982 par Linnhoff *et al.*¹. Depuis, de nombreux ouvrages en ont développé les fondements théoriques². Nous ne reviendrons pas sur ces fondements, dont la maîtrise n'est pas vraiment nécessaire à la mise en application de la méthode.

1. B. Linnhoff and J.R Flower, A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. The Institution of Chemical Engineers, Rugby, 1982

2. Par exemple Pinch analysis and process integration, I.C.Kamp, Elsevier, 2007.

Nous développerons cette mise en application pratique en traitant d'un certain nombre de cas pratiques réels, de complexité progressive, en détaillant pas à pas pour chaque cas la mise en œuvre de la méthode. La résolution du cas d'étude de la Figure 4 constituera l'aboutissement de la démarche, étant donné que des situations industrielles ou plus de 6 fluides caloporteurs sont impliqués ne se rencontrent qu'exceptionnellement. Les cas étudiés correspondront à des situations que tout concepteur ou exploitant d'installation thermo-mécanique est susceptible de rencontrer dans sa vie professionnelle. Ainsi il y a tout lieu de penser que le lecteur pourra reproduire par lui-même assez facilement ces cas d'études qui peuvent constituer autant d'exercices d'entraînement, de sorte qu'au final il maîtrisera la méthode et sera à même de la transposer aux situations auxquelles il est confronté.

Le premier chapitre décrira les étapes fondamentales de la méthode et le deuxième chapitre l'illustrera sur un cas « trivial » pour lequel seuls deux fluides caloporteurs seront impliqués, et qui permettra de la pratiquer immédiatement. Ensuite nous aborderons des cas industriels concrets où la méthode démontre tout son intérêt, et qui comporteront jusqu'à 6 fluides caloporteurs. De plus nous aborderons deux situations particulières : le cas où l'un des fluides est soumis à un changement de phase (évaporation ou condensation) et les situations où il sera opportun d'améliorer le bilan énergétique d'un réseau à l'aide d'une pompe à chaleur. Enfin nous rassemblerons dans une annexe les grandeurs physiques nécessaires à la mise en œuvre de la méthode ainsi que quelques développements pratiques qui faciliteront son utilisation.

Sur la plupart des installations industrielles, de la chaleur doit être fournie à partir d'un combustible pour les besoins du processus d'exploitation. Une partie de cette chaleur est valorisée économiquement, pour le chauffage ou la production d'électricité par exemple, mais une autre partie, souvent non-négligeable, doit être rejetée à l'atmosphère, pour des nécessités de refroidissement notamment. La méthode de calcul du pincement thermique, plus connue sous la dénomination « méthode pinch », permet de réduire au minimum théorique possible l'appel de chaleur fournie par le combustible en recyclant la chaleur perdue, soit vers le processus en cours lui-même, soit vers un autre poste de consommation voisin. Des réseaux de chaleur assurent alors le transfert de chaleur depuis plusieurs sources de chaleur distinctes vers plusieurs consommateurs. Lorsqu'elle est mise en œuvre sur des installations neuves ou sur des installations existantes qui font l'objet d'un audit énergétique, la méthode procure par rapport à une conception intuitive des gains de consommation de combustible qui sont statistiquement de l'ordre de 10 % à 35 %, parfois davantage. Cette amélioration peut avoir des conséquences financières importantes pour les entreprises : facture énergétique réduite, obtention de subventions attribuées selon un critère d'efficacité énergétique, obtention d'un taux de TVA réduit pour la chaleur vendue sur les réseaux urbains, obtention des quotas CO₂, succès d'une réponse à appel d'offre sur performance énergétique, etc.

L'ouvrage constitue un guide pratique de mise en œuvre rapide de la méthode, qui ne nécessite qu'un simple tableur et ne recourt à aucun logiciel spécialisé dans ce domaine. Il s'adresse aux étudiants des filières énergétiques et aux concepteurs d'installations thermiques des bureaux d'études techniques, ainsi qu'aux exploitants de sites industriels désireux d'améliorer la performance énergétique de leur installation.

Après un exposé général de la méthode, le lecteur est invité à se familiariser avec elle à travers des cas-types fréquemment rencontrés sur les systèmes thermiques industriels, et qui concernent notamment les domaines de la production d'énergie électrique et de la vente de chaleur à travers des réseaux de distribution. L'auteur accompagne pas à pas cette prise en main, de sorte qu'à l'issue de ce bref parcours, le lecteur aura acquis la maîtrise pratique nécessaire à la mise en œuvre de la méthode sur ses propres problématiques énergétiques.

*Ingénieur Civil du Génie Maritime, diplômé de l'ENSTA, qualifié aux fonctions de maître de conférence, Jacques Woillez a exercé durant plus de 40 années des fonctions de chef de projet ou de chef de service en bureau d'études techniques dans les secteurs de l'énergie, de l'environnement et de la chimie. Il est actuellement consultant-formateur indépendant en ingénierie des fluides et de la thermique. Il est l'auteur de « Systèmes diphasiques, éléments fondamentaux et applications industrielles » (Lavoisier 2014, **Prix Roberval 2015**) et de « Conversion chaleur-énergie mécanique, principes et applications industrielles » (Lavoisier 2018).*



978-2-7462-4953-0