

# L'analyse Pinch : pour une utilisation efficace

DE L'ÉNERGIE, DE L'EAU ET DE L'HYDROGÈNE



Resources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

Canada



# L'analyse Pinch : pour une utilisation efficace

---

DE L'ÉNERGIE, DE L'EAU ET DE L'HYDROGÈNE

ISBN : 0-662-89794-3  
N° catalogue : M39-96/2003F

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2003

This guide is also available in English under the title:  
***Pinch Analysis: for the Efficient Use of Energy, Water and Hydrogen***

Une version électronique de ce guide est disponible à l'adresse suivante :  
<http://canmetenergie.rncan.gc.ca>

Cette publication, diffusée à des fins didactiques, ne reflète pas nécessairement le point de vue du gouvernement du Canada. De plus, pour ce qui est de son contenu, le gouvernement du Canada, ses ministres, ses fonctionnaires et ses employés ou agents n'offrent aucune garantie et n'assument aucune responsabilité.

## Table des matières

<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
1.1 Objectif de ce guide. ....	5
1.2 Qu'est-ce que l'intégration des procédés (IP)? .....	5
1.3 L'analyse Pinch : la technique d'IP la plus utilisée .....	7
<b>2 Une approche structurée pour la gestion des utilités</b> .....	<b>11</b>
2.1 Les bénéfices d'une démarche structurée. ....	11
2.2 Une approche combinant l'analyse et la conception de procédé .....	13
Phase d'analyse .....	13
Phase de conception. ....	17
2.3 Une approche qui permet de répondre à l'ensemble des enjeux .....	18
<b>3 Les principes fondamentaux de l'analyse Pinch</b> .....	<b>21</b>
3.1 Les principes de l'analyse Pinch .....	21
3.2 L'analyse Pinch appliquée à l'énergie .....	23
Construction des courbes composites .....	24
Détermination des besoins minimums d'énergie .....	27
Choix de $\Delta T_{min}$ . ....	29
Extraction des données nécessaires à l'analyse .....	31
Calcul des cibles de consommation minimales d'énergie lorsque plusieurs utilités sont disponibles : la courbe " grand composite " .....	35
Cogénération. ....	37
Pompes à chaleur .....	41
Modifications possibles au procédé : règles générales .....	42
Modifications possibles au procédé : " plus and minus principe " .....	43
La procédure de conception du système de récupération d'énergie. ....	44
Flexibilité dans la procédure de conception .....	45
Analyse globale d'un site industriel .....	47
3.3 Analyse Pinch appliquée aux réseaux d'eau .....	55
Les similarités avec l'analyse Pinch appliquée à l'énergie .....	56
Analyse lorsqu'il y a plusieurs contaminants dans l'eau .....	58
Analyse de sensibilité .....	59
Types de réutilisation d'eau possibles. ....	60
Déroulement d'une analyse Pinch pour réduire la consommation d'eau .....	62
3.4 Analyse Pinch pour réduire la consommation d'hydrogène .....	65
Les similarités avec les analyses Pinch appliquées à l'eau et à l'énergie .....	66
Analyse de sensibilité .....	68
Déroulement typique d'une analyse Pinch appliquée à l'hydrogène .....	69
<b>5 RÉFÉRENCES</b> .....	<b>71</b>

## Table des figures

2.1	Enjeux typiques d'un site industriel . . . . .	11
2.2	Bénéfices résultant d'une analyse Pinch dans le cadre d'une stratégie de réduction des coûts liés aux utilités. . . . .	13
2.3	Démarche structurée utilisant l'analyse Pinch . . . . .	14
2.4	Exemple de stratégie d'investissements . . . . .	19
3.1	Illustration de l'utilisation d'une ressource . . . . .	21
3.2	Réduction de l'utilisation d'une ressource . . . . .	22
3.3	Les courbes composites . . . . .	25
3.4	Construction des courbes composites . . . . .	27
3.5	Utilisation des courbes composites pour déterminer les cibles de consommation minimale d'énergie . . . . .	28
3.6	Conséquences d'un transfert d'énergie à travers du point de pincement . . . . .	29
3.7	Effet d'une augmentation de $\Delta T_{min}$ . . . . .	30
3.8	Compromis entre la consommation d'énergie et les Investissements . . . . .	30
3.9	Construction de la courbe "grand composite" . . . . .	36
3.10	Courbe "grand composite" illustrant les besoins minimums provenant de chacune des utilités . . . . .	36
3.11	Intégration d'une machine thermique de part et d'autre du point de pincement . . . . .	38
3.12	Rejets thermiques d'une turbine à gaz, abaissés jusqu'au point de condensation acide . . . . .	39
3.13	Récupération d'énergie limitée par la forme de la courbe « Grand Composite » . . . . .	39
3.14	Intégration d'un récupérateur de chaleur – générateur de vapeur . . . . .	40
3.15	Intégration d'une pompe à chaleur de part et d'autre du point de pincement du procédé . . . . .	42
3.16	Intégration indirecte, par l'intermédiaire des utilités, de plusieurs procédés différents d'un même site . . . . .	47
3.17	Construction des profils des demandes et des puits de chaleur pour un site complet . . . . .	50
3.18	Profils des demandes et des sources de chaleur d'un site industriel . . . . .	51
3.19	Approche utilisée pour l'analyse globale d'un site industriel . . . . .	52
3.20	Exemple de modèle simplifié des utilités d'une raffinerie de pétrole . . . . .	54
3.21	Courbes composites illustrant l'ensemble des sources et demandes d'eau d'un procédé industriel. . . . .	57
3.22	Mélange de courants sources pour réduire la consommation d'eau propre et la production d'effluents . . . . .	58
3.23	Exemple d'analyse de sensibilité . . . . .	59
3.24	Réutilisation d'eau en acceptant une augmentation de concentration à l'entrée de certains procédés . . . . .	60
3.25	Traitement partiel et réutilisation d'eau . . . . .	61
3.26	Traitement distribué des effluents . . . . .	62
3.27	Exemple d'une stratégie d'investissements pour réduire les coûts d'un nouveau système de traitement des eaux usées. . . . .	64
3.28	Outils d'analyse Pinch pour réduire la production d'hydrogène pur . . . . .	67
3.29	Analyse de sensibilité sur plusieurs unités d'une raffinerie . . . . .	69

## Table des tableaux

1	Exemple des données nécessaires à la construction des courbes composites . . . . .	26
---	--	----

# 1 INTRODUCTION

## 1.1 Objectif de ce guide

L'intégration des procédés (IP) est une approche efficace permettant à l'industrie d'améliorer sa rentabilité en réduisant ses consommations d'énergie, d'eau et de matières premières en plus de réduire ses émissions de gaz à effet de serre (GES) et la quantité d'effluents qu'elle rejette. Parmi les méthodes d'IP, l'analyse Pinch est certainement la plus employée. Cela est dû à la simplicité des concepts sur lesquels elle repose mais surtout aux résultats spectaculaires obtenus dans de nombreux projets à travers le monde.

L'objectif de ce guide est de familiariser les ingénieurs avec les techniques de base de l'analyse Pinch. Dans le chapitre 2, on aborde de façon générale comment les méthodes systématiques employées dans une analyse Pinch peuvent être utilisées dans la conception et l'optimisation de l'ensemble d'un procédé industriel. Le chapitre 3 présente les principes de base de l'analyse Pinch ainsi que les différents outils mis à la disposition du praticien. On y expose plus précisément les méthodes qui permettent une utilisation plus rationnelle de l'énergie, de l'eau et de l'hydrogène.

Le lecteur qui souhaiterait en apprendre davantage sur l'analyse Pinch ou sur d'autres méthodes d'intégration des procédés est invité à consulter la liste des références à la fin de ce guide.

## 1.2 Qu'est-ce que l'intégration des procédés (IP) ?

Le terme "intégration des procédés" peut prendre plusieurs sens différents selon à qui l'on s'adresse. Il peut être appliqué à un simple échangeur de chaleur qui récupère de l'énergie d'un courant de matière dans un procédé, à la récupération de chaleur d'une turbine à gaz, à l'optimisation des séquences d'utilisation d'un réacteur, à l'intégration de certaines unités de production d'une raffinerie de pétrole ou encore à l'ensemble d'un site industriel complexe.

Dans le contexte de ce guide, le terme intégration des procédés (IP) fait référence à l'analyse et à l'optimisation de procédés industriels complexes et d'envergure. L'IP peut donc être définie comme :

*« L'ensemble des améliorations apportées à un procédé, à ses opérations unitaires et à leurs interactions, pour qu'il utilise le plus efficacement possible l'énergie, l'eau et les matières premières ».*

L'intégration des procédés est une approche puissante qui, combinée à d'autres techniques comme la simulation de procédé, permet aux ingénieurs d'analyser de manière systématique l'ensemble d'un procédé et les interactions entre les différentes parties qu'il comprend.

Les techniques d'intégration des procédés s'appliquent aux problématiques industrielles suivantes :

- Économies d'énergie et réduction des émissions de GES ;
- Désengorgement de certains points critiques d'un procédé ;
- Optimisation des procédés discontinus ;
- Optimisation de la consommation d'hydrogène ;
- Amélioration de la conception et de l'utilisation des réacteurs ;
- Réduction de la consommation d'eau et de la production d'effluents ;
- Optimisation des séquences de séparation ;
- Réduction de la production de déchets ;
- Optimisation des utilités<sup>1</sup>;
- Réduction des coûts d'investissement.

---

1. Pour les besoins du présent guide, le terme utilités fait référence à l'ensemble des fluides utilisés principalement à des fins de chauffage (vapeur, eau ou huile chaude, etc.) ou de refroidissement (eau de refroidissement, glycol, réfrigérant, etc.).



En général, l'IP est une approche plus performante que les méthodes conventionnelles d'analyse surtout dans le cas de sites industriels complexes et de grande envergure. En effet, plus un procédé devient complexe, plus il est difficile d'identifier les meilleures possibilités d'amélioration, à moins d'utiliser une approche systématique comme le propose l'IP.

### 1.3 L'analyse Pinch : la technique d'IP la plus utilisée

L'une des techniques les plus pratiques à avoir vu le jour dans le domaine de l'IP au cours des vingt-cinq dernières années est l'analyse Pinch. Cette approche peut être utilisée pour optimiser l'utilisation de l'énergie, de l'eau ou de l'hydrogène dans de nombreux procédés et est désormais une méthode reconnue et éprouvée dans chacun des secteurs industriels suivants :

- Chimie ;
- Pétrochimie ;
- Raffinage de pétrole ;
- Pâtes et papiers ;
- Agroalimentaire ;
- Sidérurgie.

Au fil des ans, l'analyse Pinch a beaucoup évolué et s'est perfectionnée. À titre d'exemple, elle offre maintenant plusieurs outils pour analyser les courants d'énergie dans un procédé, et identifier les manières les plus économiques de récupérer un maximum de chaleur et de réduire l'utilisation des utilités, principalement la vapeur et l'eau de refroidissement. L'approche peut être utilisée pour identifier des projets d'économies d'énergie aussi bien au sein d'un procédé que dans les systèmes de production et de distribution des utilités.

Le meilleur moment pour utiliser l'analyse Pinch est lorsqu'on prévoit d'importants investissements pour modifier un procédé et avant que la conception du procédé ne soit définitivement arrêtée. Lorsque l'on conçoit une nouvelle usine, comme il est possible d'éliminer certaines contraintes en modifiant le procédé et/ou la configuration de l'usine, on peut non seulement obtenir une efficacité maximale, mais aussi réduire en même temps les investissements nécessaires.

Dans le cas de modifications à un procédé existant, il est généralement nécessaire d'investir du capital pour accroître l'efficacité du procédé. Dans ce cas, l'analyse Pinch aura comme objectif d'optimiser le rendement financier de ces investissements. Les techniques d'analyse Pinch permettent d'analyser plusieurs projets simultanément pour tenir compte des effets croisés entre les projets et s'assurer de leur compatibilité. Enfin, la stratégie d'investissement pour les projets qui ont été identifiés permettra de s'assurer que le développement à long terme du site se fait de manière cohérente.

La principale caractéristique de l'analyse Pinch est de permettre de déterminer, pour un procédé ou une usine donné, quelle est la consommation minimale en énergie, en eau et en hydrogène nécessaire à son fonctionnement. Il est donc possible d'évaluer le potentiel maximum d'amélioration et ceci, avant même de se lancer dans des travaux de conception détaillée. L'approche peut être appliquée de manière systématique au niveau de chacun des procédés de l'usine ou de manière globale pour l'ensemble du site.

Comme il y a un grand nombre de données à prendre en compte au cours d'une analyse Pinch, des logiciels spécialisés qui accélèrent le traitement et l'analyse des données sont généralement utilisés. Plusieurs logiciels offrent également des outils pour concevoir ou modifier rapidement les réseaux d'échangeurs de chaleur.

Parallèlement à l'analyse Pinch, un modèle représentant les systèmes de production et de distribution des utilités de l'usine est généralement construit. Grâce à ce modèle, les économies identifiées au sein des différents procédés peuvent être transposées en véritables économies sur les différentes sources d'énergie primaire achetée de l'extérieur.

Au cours des 20 dernières années, l'analyse Pinch a été utilisée avec succès dans plusieurs centaines d'études visant à réduire la consommation d'énergie à l'échelle d'un procédé individuel ou de l'ensemble d'un site industriel. Plus récemment, l'approche a conduit à des résultats tout aussi spectaculaires pour optimiser la consommation d'eau ou d'hydrogène. Les économies typiques identifiées dans le cadre d'une analyse Pinch dans des secteurs industriels tels que le raffinage de pétrole, la chimie, la sidérurgie, les pâtes et papiers, la pétrochimie et l'agroalimentaire sont les suivantes :

- Consommation d'énergie : réduction de 10 à 35 %<sup>2</sup>
- Consommation d'eau : réduction de 25 à 40 %
- Consommation d'hydrogène : réduction jusqu'à 20 %<sup>3</sup>

---

2. Économies d'énergie exprimées en pourcentage de la quantité totale d'énergie consommée (sauf dans le cas des pâtes et papier où elles sont exprimées en pourcentage de la quantité totale de vapeur produite).

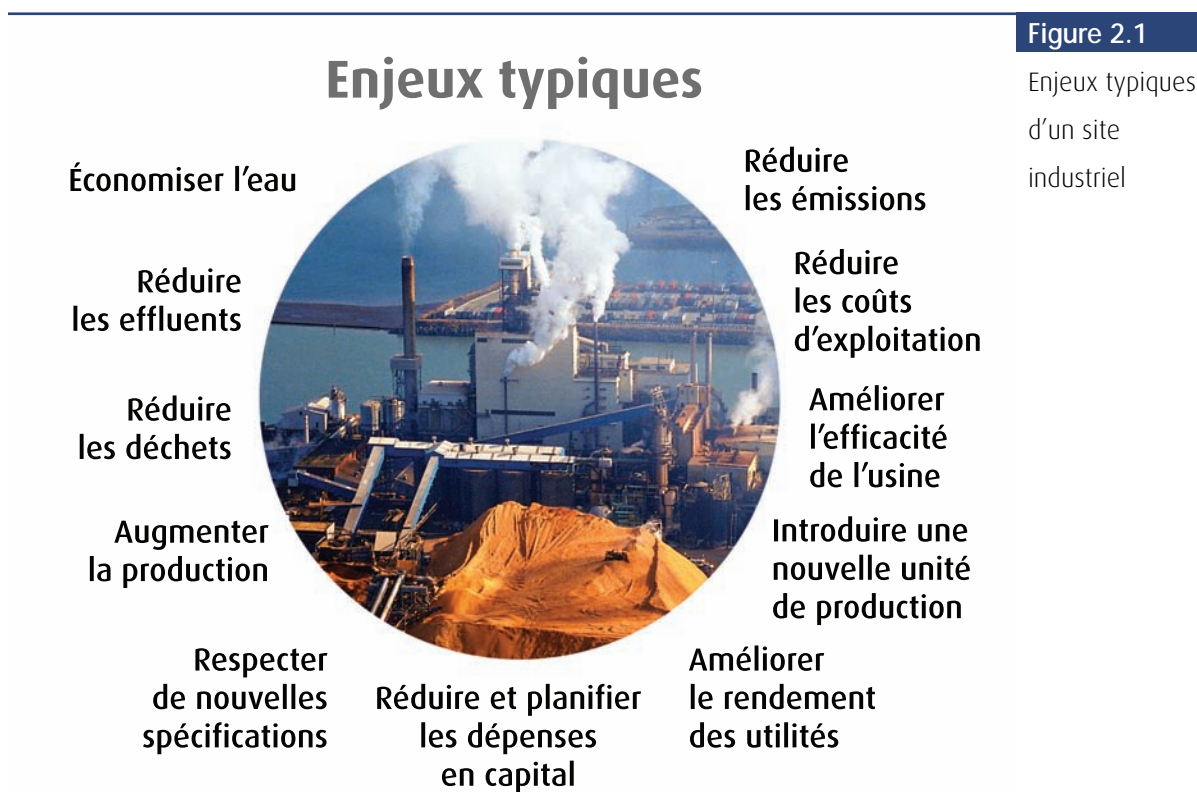
3. Industrie du raffinage de pétrole uniquement.



# 2 UNE APPROCHE STRUCTURÉE POUR LA GESTION DES UTILITÉS

## 2.1 Les bénéfices d'une démarche structurée

Les responsables d'un site de production doivent régulièrement faire face à une panoplie d'enjeux, que ce soit pour respecter de nouvelles normes environnementales, augmenter l'efficacité des procédés ou accroître la cadence de production de l'usine (figure 2.1). Chaque fois qu'un tel événement survient, le personnel de l'entreprise est sollicité pour concevoir des solutions et des investissements sont requis pour les implanter.



Les défis à relever sont donc importants : d'une part, il y a certains objectifs à atteindre, imposés par la réglementation ou les décisions de la direction de l'entreprise, et d'autre part, il faut réduire autant que possible les investissements tout en s'assurant d'obtenir la meilleure solution possible avec un excellent rendement financier.

On peut souvent identifier des mesures d'efficacité énergétique répondant aux besoins immédiats de l'usine tout en réduisant les coûts d'exploitation sans utiliser de méthode systématique. Mais il est difficile de savoir si la solution adoptée est bien la meilleure dans un contexte donné. Par exemple :

- Plusieurs projets concurrents peuvent répondre de manière satisfaisante à un problème immédiat, mais certains d'entre eux généreront plus d'économies, d'autres demanderont moins d'investissements. Il est important de s'assurer que toutes ces options ont bien été prises en compte et évaluées de façon rigoureuse.
- Il est aussi possible que la solution retenue soit un obstacle à la réalisation d'améliorations ultérieures car elles seraient difficiles à justifier au plan technique ou financier. Il faut donc développer des projets qui soient compatibles les uns avec les autres et qui puissent être combinés pour atteindre l'ensemble des objectifs présents et futurs.

En adoptant une approche systématique, on ne se contente pas d'identifier une série de projets, mais on regarde aussi comment leur combinaison permet d'atteindre les objectifs à long terme. Une telle approche peut aussi réduire :

- les coûts d'exploitation ;
- les investissements, en même temps que l'on facilite leur planification ;
- la durée et l'ampleur des travaux d'ingénierie requis.

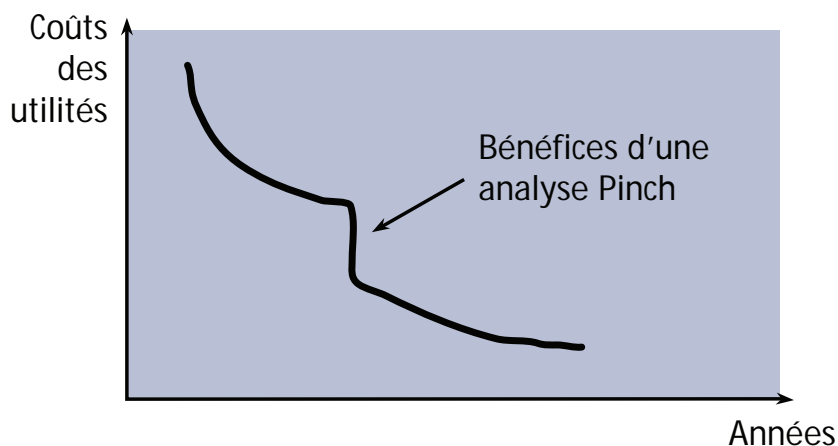
La principale caractéristique de l'analyse Pinch est de permettre de déterminer quelle est la consommation minimale en énergie, en eau et/ou en hydrogène nécessaire au fonctionnement d'un procédé donné et qui peut être atteinte en pratique. À partir d'un bilan de masse et d'énergie représentatif des conditions d'exploitation du procédé, on construit un modèle représentant ses principaux courants d'énergie et/ou de matière et permettant de :

- Définir les cibles de consommation minimale et le potentiel maximal d'économies :

*La différence entre la consommation minimale et la situation actuelle détermine le potentiel maximal d'économies théoriquement réalisables*

- Identifier les causes des inefficacités dans le procédé et les projets d'amélioration qui seraient réalisables en pratique ;
- Déterminer les zones qui présentent le plus grand potentiel d'amélioration et vers lesquelles il est préférable d'orienter les efforts.

En établissant ces cibles de consommation minimale, l'analyse Pinch permet d'avoir une vision globale du procédé afin que les projets identifiés soient compatibles entre eux. C'est justement grâce à cette vision globale de l'ensemble du site que l'on peut souvent identifier de nouvelles et importantes possibilités d'amélioration, là où on ne s'y attendait pas (*figure 2.2*).



**Figure 2.2**

Bénéfices résultant d'une analyse Pinch dans le cadre d'une stratégie de réduction des coûts liés aux utilités.

## 2.2 Une approche combinant l'analyse et la conception de procédé

Les problèmes complexes liés à la gestion optimale de l'énergie, de l'eau et de l'hydrogène sont généralement divisés en une phase d'analyse et une phase de conception. Dans cette section, les fondements théoriques et les principes de base de l'analyse Pinch ne seront pas présentés en détails. Seules les différentes phases qui la constituent seront présentées. La méthode, quant à elle, est présentée plus largement au chapitre 3.

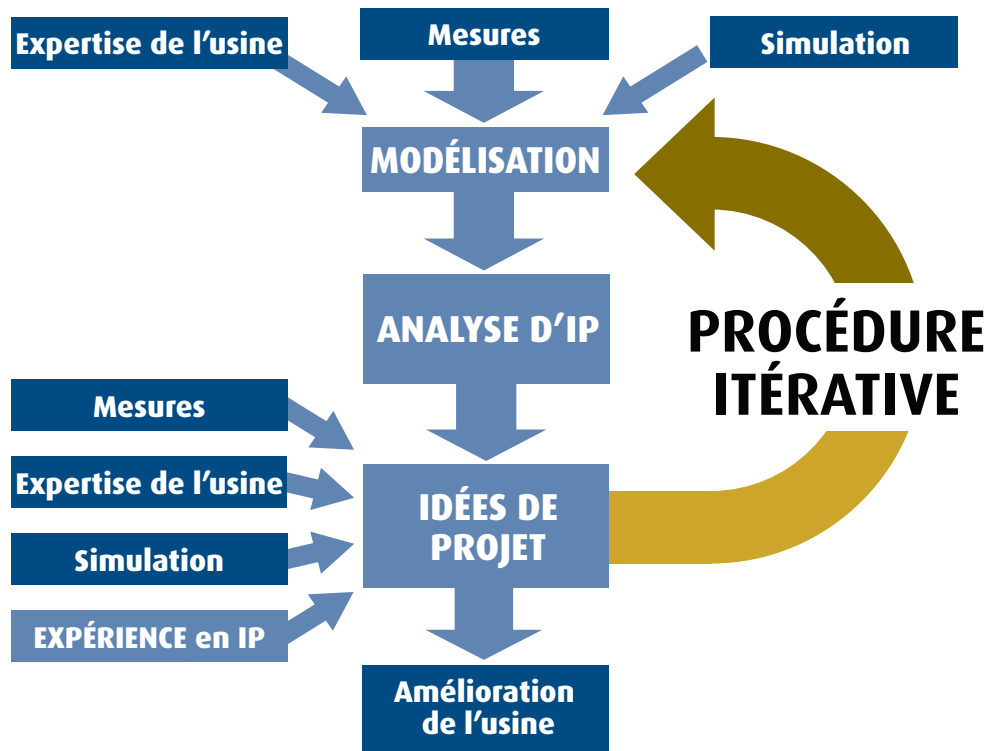
### Phase d'analyse

La *figure 2.3* illustre les différentes étapes d'une analyse Pinch typique. Les zones bleu pâle (en clair) représentent les activités directement liées à une analyse Pinch et les zones bleu foncé (en sombre) celles qui nécessitent un apport important du personnel de l'usine.

Dans n'importe quelle analyse, la première tâche consiste à recueillir les données nécessaires et à les valider. Ces données proviennent généralement de mesures directes des paramètres d'exploitation, de simulations ou de données de conception.

Figure 2.3

Démarche structurée utilisant l'analyse Pinch



Ces trois types de données peuvent en effet être utilisées pour mener une analyse Pinch. En effet :

- Les mesures directes sur le procédé permettent de définir les conditions actuelles d'exploitation. On peut donc considérer qu'il s'agit des données les plus intéressantes pour rechercher des voies d'amélioration à venir. Cependant, ces mesures peuvent parfois être incomplètes et même incohérentes les unes par rapport aux autres.
- Les résultats de simulation comprennent également les données mesurées, tel que présenté au point précédent, mais permettent en plus d'obtenir des bilans cohérents de masse et d'énergie, ce qui fait d'eux la meilleure source de données pour une analyse Pinch. Cependant, les simulations peuvent demander beaucoup d'efforts. Selon la complexité du procédé, le degré de précision demandé et les ressources financières et humaines disponibles, le spécialiste en analyse Pinch devra décider avec les responsables de l'usine si une simulation est nécessaire. De plus, il est important de décider à quels endroits les efforts seront concentrés et avec quel niveau de détails. Les efforts pourront alors se concentrer là où ils sont vraiment nécessaires. Il ne faut pas oublier qu'une simulation peut être utilisée non seulement pour fournir les données indispensables à l'analyse Pinch, mais



aussi pour évaluer rigoureusement les impacts des projets qui seront proposés à la suite de l'analyse Pinch. La simulation permet enfin de prédire les impacts de futures augmentations de la capacité de production ou ajouts d'unités de production.

- Les données de conception peuvent être utilisées lorsque les mesures directes sur le procédé ne peuvent être réalisées. Ce type de données a besoin d'être validé attentivement car l'usine peut ne plus fonctionner selon les paramètres établis lors de la conception. Ces données sont également utiles pour évaluer si une recommandation proposée par l'analyse Pinch peut être réalisée à l'aide des équipements existants et déterminer, au besoin, quels équipements additionnels seraient nécessaires.

À cette étape, il est essentiel d'avoir la collaboration des opérateurs du procédé. En premier lieu parce que ces personnes valideront les données recueillies grâce à leur connaissance de l'usine. Ensuite, parce que les opérateurs et les ingénieurs sont les mieux placés pour indiquer les contraintes particulières d'exploitation. Par exemple, ils connaîtront la température maximale à laquelle une unité de production peut être alimentée ou encore la pression maximale à laquelle elle peut fonctionner. Enfin, parce que ces personnes connaissent bien les dynamiques du procédé, comme le rythme d'encrassement des équipements par exemple. Rappelons qu'en impliquant le personnel de l'usine dès le début de l'analyse, on augmente les chances que les projets recommandés soient réellement implantés, ce qui est un facteur clé pour l'atteinte de résultats concrets.

Les informations ainsi recueillies sont utilisées pour bâtir une représentation (ou modélisation) du procédé. Selon les objectifs de l'analyse et la complexité du procédé étudié, cette représentation peut se limiter à de simples bilans (de matière, d'énergie) ou comprendre des modèles des procédés et des réseaux d'utilités de l'usine, notamment des modèles de type Pinch (voir le chapitre 3 qui traite en détails de ces modèles).

Les raisons pour lesquelles on modélise un procédé et que l'on en fait une représentation de type Pinch sont les suivantes :

### **Pour aider à comprendre l'ensemble des enjeux**

C'est souvent grâce à l'utilisation de modèles que l'on peut comprendre quelles sont les interactions entre les utilités et un procédé. Par exemple, on peut en arriver à démontrer que le mode d'exploitation d'un procédé est inefficace sur le plan énergétique, et à proposer une méthode plus performante d'exploitation.

### **Pour simuler les différents procédés**

Il est important de pouvoir déterminer à l'avance les conséquences de toute modification qui pourrait être apportée à un procédé. Par exemple, il pourrait paraître intéressant de changer la pression de fonctionnement d'une colonne à distiller pour améliorer les possibilités de récupération de chaleur, mais il est primordial de savoir si cette colonne pourra continuer à fonctionner avec le même rendement dans ces nouvelles conditions.

### **Pour déterminer les véritables coûts**

Les modèles sont utiles pour déterminer les véritables coûts des utilités (vapeur basse, moyenne et haute pression, eau de refroidissement, réfrigération, etc.) et permettent d'identifier les endroits où des améliorations seront les plus payantes. Par exemple, le coût de la vapeur basse pression pourrait être évalué à 5 \$ la tonne, mais s'il y a une perte permanente aux événements de l'usine, la véritable valeur de cette vapeur n'est pas la même en réalité. Ainsi, si on réduit la consommation de vapeur basse pression en un point du procédé, et que cette même quantité de vapeur est rejetée aux événements car elle ne peut être utilisée ailleurs dans le procédé, aucune économie ne sera vraiment réalisée. La vapeur basse pression n'aura une valeur bien réelle que si on peut trouver des projets qui permettront d'utiliser cette vapeur. On évite ainsi une erreur courante qui consiste à recommander des mesures d'efficacité énergétique en un point particulier de l'usine mais qui n'améliorent pas la consommation globale de l'ensemble de l'usine.

### **Pour confirmer les résultats**

Finalement, les modèles permettent de confirmer que les modifications proposées permettront d'atteindre les économies d'énergie estimées, en tenant compte de l'ensemble des contraintes d'exploitation des équipements existants ou nouvellement acquis.

### **Phase de conception**

Les modèles et les bilans de matière et d'énergie, développés au cours de la phase d'analyse, deviennent les outils de base de la phase de conception où l'on identifie de manière systématique les possibilités d'amélioration (voir *figure 2.3*).

En produisant des schémas d'intégration optimale et en les comparant aux procédés existants, il est possible d'identifier les causes d'inefficacité dans le système (voir chapitre 3). Dans la phase de conception, l'objectif est de développer et de générer des idées de projets qui corrigeront ces inefficacités. À ce stade, il est encore primordial d'impliquer le personnel de l'usine ayant une grande expérience dans l'exploitation du procédé, et si nécessaire, de procéder à des mesures ou à des simulations additionnelles. L'apport du personnel de l'usine permet de définir avec plus d'exactitude les projets envisagés et d'apporter de nouvelles idées qui seront intégrées dans la modélisation du procédé. La recherche de solutions se fait souvent de façon itérative, où le développement des idées de projets amène certaines modifications au modèle qui génèrent à leur tour de nouvelles idées.

Les résultats de la phase de conception sont un ensemble de projets d'améliorations compatibles entre eux, réalisables en pratique et validés par le personnel de l'usine.

L'analyse Pinch permet ainsi d'aborder le problème de la gestion optimale des ressources dans son intégralité. En effet, une fois l'analyse terminée, on est assuré d'avoir identifié les causes de toutes les sources d'inefficacité, de connaître celles qui peuvent être corrigées d'une manière économiquement rentable et de savoir quelles modifications au procédé seraient bénéfiques. De plus, on aura comparé les différentes solutions envisageables sur une même base de référence.

### 2.3 Une approche qui permet de répondre à l'ensemble des enjeux

La **figure 2.1** montre plusieurs enjeux liés à l'exploitation d'un site industriel. Certains de ces enjeux tels que la réduction des coûts d'opération, l'augmentation de l'efficacité énergétique et la réduction des émissions gazeuses ou des rejets d'effluents sont des applications courantes de l'analyse Pinch. D'autres applications sont moins évidentes, par exemple :

#### **Intégrer une nouvelle unité de production ou un nouveau procédé**

Tel que mentionné précédemment, l'analyse Pinch permet d'identifier les besoins minimums d'énergie, d'eau et/ou d'hydrogène nécessaire au fonctionnement d'une nouvelle unité de production ou d'un nouveau procédé. Ce qui est encore plus important, c'est que cette approche permet de déterminer la meilleure manière de l'intégrer aux unités existantes, de façon à déterminer les augmentations minimales de capacité qui devront être apportées aux infrastructures (production et distribution de vapeur, d'eau ou d'hydrogène), si nécessaire, et quels investissements cela représente.

#### **Augmenter la production ou respecter de nouvelles spécifications sur les produits**

Comme pour l'intégration d'une nouvelle unité de production, l'augmentation de la capacité de production ou le respect de nouvelles spécifications de production peut nécessiter de nouveaux besoins d'énergie, d'eau et/ou d'hydrogène. Ceci peut avoir un impact significatif sur les coûts d'exploitation, mais cela peut être encore plus critique si on a déjà atteint les limites de capacité des infrastructures existantes (chaudières, tours de refroidissement, etc.).

Par exemple, la rentabilité d'accroître la capacité de production pourrait être fortement affectée si on devait construire une nouvelle usine de traitement des eaux usées résultant de l'augmentation de la quantité d'effluents produits. L'utilisation de l'analyse Pinch appliquée à l'eau a montré que l'on pouvait fortement réduire et parfois même complètement supprimer le besoin d'investir dans une capacité additionnelle de traitement des effluents.

Un autre problème courant est la limite de capacité des chaudières et des systèmes de refroidissement (tour de refroidissement, refroidisseur à air, eau d'une rivière, etc.). En appliquant l'analyse Pinch aux utilités, on peut réduire la consommation d'eau et d'énergie de l'usine et dans certains cas, éviter les importants investissements qu'il aurait fallu réaliser dans le système d'utilités.



de l'énergie, des projets d'expansion de l'usine, l'ajout d'une nouvelle unité de production ou la suppression d'une ancienne, etc. Cette difficulté dans la prise de décision peut être résolue en mettant au point une planification des investissements qui permettra de répondre aux objectifs de développement à long terme de l'entreprise (*figure 2.4*).

La stratégie d'investissements proposée fournit certains détails sur les projets d'amélioration du procédé et sur les projets reliés aux utilités, notamment au niveau :

- des économies sur les coûts d'exploitation ;
- de la réduction des émissions ;
- des coûts d'investissements ;
- de la compatibilité avec les autres projets.

Des chemins différents sur la stratégie d'investissements représentent des planifications différentes d'investissements. On y trouve le détail des coûts et des bénéfices des options disponibles. Par exemple, la *figure 2.4* montre que les projets 1 et 2 sont des projets à temps de retour sur investissements court et qu'ils peuvent être implantés quelle que soit la stratégie retenue. À partir de ce point, on distingue deux stratégies :

La première option consiste à implanter la série de projets 3 à 9. Tous ces projets sont compatibles entre eux et ont un temps de retour sur investissements combiné inférieur à deux ans. Si les budgets d'investissements sont limités et que le temps de retour sur investissements maximum acceptable est de deux ans, on choisira cette stratégie.

L'autre option montre ce qui pourrait être réalisé en repoussant les contraintes sur les temps de retour sur investissements. Dans ce cas, la stratégie ne consiste pas à réaliser l'ensemble des projets 3 à 9, mais uniquement certains des projets sélectionnés. Le projet 10 remplace les projets 3 et 8, mais dépasse le temps de retour sur investissements maximum de deux ans. Cependant, il offre un potentiel d'économies d'énergie beaucoup plus important que les autres projets. Cela pourrait être dû, par exemple, au fait que ces économies sont réalisées en réduisant suffisamment la consommation de vapeur pour qu'une chaudière à vapeur puisse être arrêtée totalement.

# 3 LES PRINCIPES FONDAMENTAUX DE L'ANALYSE PINCH

## 3.1 Les principes de l'analyse Pinch

L'analyse Pinch (ou technologie Pinch) est une approche rigoureuse et structurée qui permet d'identifier plusieurs types de projets d'amélioration des procédés et des utilités. On peut l'utiliser, par exemple, pour réduire les frais d'exploitation, désengorger certaines étapes de procédés, améliorer l'efficacité énergétique, réduire l'impact environnemental ou planifier des investissements.

La simplicité des principes qui sont à la base de cette approche, et les résultats impressionnants qui ont été obtenus dans le monde entier, expliquent le succès de l'analyse Pinch. Elle permet d'optimiser l'utilisation des ressources d'un site industriel, principalement l'énergie (analyse Pinch appliquée à l'énergie), l'hydrogène (analyse Pinch appliquée à l'hydrogène) et l'eau (analyse Pinch appliquée à l'eau). Étant donné que le coût d'utilisation d'une ressource est fonction de la quantité et de la qualité nécessaire au bon fonctionnement du procédé, l'analyse Pinch se concentre essentiellement sur ces deux aspects.

Dans un procédé industriel, la consommation d'une ressource suit le schéma de la **Figure 3.1** : on utilise une ressource de grande qualité que l'on rejette ensuite dans l'environnement sous une forme dégradée. Par exemple, dans le cas de l'énergie, on peut consommer du gaz naturel, un produit ayant une haute qualité énergétique, pour fournir au procédé de la chaleur à haute température, puis rejeter, dans l'eau d'une rivière ou dans l'air, de la chaleur à basse température. Dans le cas d'une consommation d'eau, on peut alimenter le procédé en eau propre que l'on devra ensuite assainir dans une usine de traitement d'effluents préalablement à son retour dans l'environnement. En ce qui concerne les gaz de procédé comme l'hydrogène, la ressource consommée est un gaz de haute pureté produit sur le site ou acheté à l'extérieur.

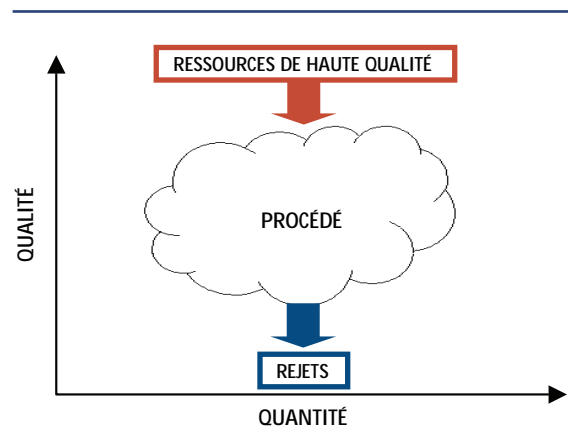


Figure 3.1

Illustration de l'utilisation d'une ressource

L'analyse Pinch est maintenant reconnue pour avoir permis de réduire la consommation d'énergie et d'eau ainsi que l'optimisation de l'utilisation de l'hydrogène dans de nombreux sites industriels. Que ce soit pour l'eau, l'énergie ou l'hydrogène, le principe fondamental de la démarche consiste à combler les besoins de chaque équipement ou procédé par une source appropriée (produites en un autre point du procédé ou par les utilités). La capacité de faire correspondre l'offre et la demande dépend du niveau de qualité demandé par un équipement et du niveau de qualité disponible dans l'usine. Dans le contexte de la gestion des utilités, la qualité s'exprime sous la forme du niveau de température pour l'énergie et du degré de pureté pour l'eau et l'hydrogène. En faisant correspondre du mieux possible l'offre et la demande, on diminue les besoins d'approvisionnement extérieur de ces ressources ; en d'autres termes, on favorise une utilisation durable des ressources (**Figure 3.2**).

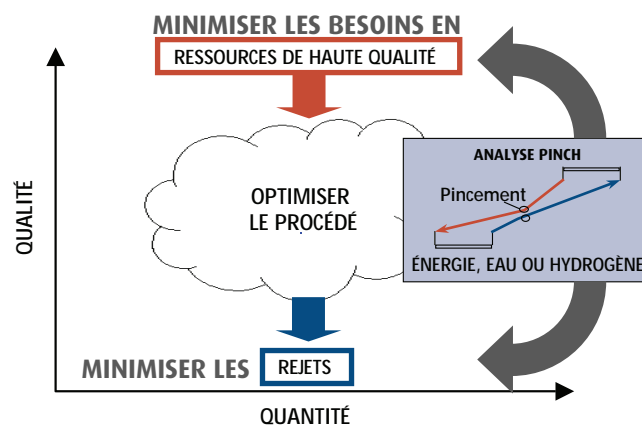
Par exemple, appliquée à la réduction de la consommation d'énergie, l'analyse Pinch permet d'identifier les cibles de consommation minimale de chaleur et de refroidissement dans un procédé ainsi que les projets concrets qui permettent d'atteindre ces cibles en pratique (ou de s'en rapprocher le plus possible).

Lorsque l'on aborde un problème avec la méthode Pinch, ce sont toujours les mêmes principes qui s'appliquent, que l'on s'intéresse à la gestion de l'énergie, de l'eau ou de l'hydrogène :

- On peut représenter le procédé en fonction de ses besoins et de ses rejets (puits et sources) pour une ressource donnée (énergie, eau, etc.)
- La solution optimale est obtenue en réalisant la meilleure adéquation possible entre les sources et les puits compatibles.
- Le paramètre qui permet de savoir si une source et un puits sont compatibles est la qualité, par exemple, la température dans les cas de l'énergie, la pureté pour l'eau et l'hydrogène ;

**Figure 3.2**

Réduction  
de l'utilisation  
d'une ressource





- Tout transfert inefficace d'une ressource entre deux points du procédé empêche l'atteinte de la solution optimale. En fait, la somme de l'ensemble des transferts inefficaces d'une ressource est égale à l'excédent de cette même ressource qui doit être achetée ou prélevée à l'extérieur (ce principe est présenté de façon plus détaillé à la **Figure 3.6**) ;

La prochaine section décrit les principes fondamentaux de l'analyse Pinch appliquée à l'énergie alors que les deux chapitres qui suivent présentent brièvement l'élargissement de ce concept à l'utilisation de l'eau et de l'hydrogène.

## 3.2 L'analyse Pinch appliquée à l'énergie

L'énergie est fondamentale à l'économie des pays industrialisés mais les possibilités d'en réduire la consommation pour augmenter la rentabilité d'une entreprise sont encore trop peu exploitées. Les récents événements tels que la dérèglementation des marchés de l'énergie, l'augmentation des prix du pétrole et du gaz naturel ainsi que les changements climatiques provoqués par les gaz de combustion (le dioxyde de carbone - CO<sub>2</sub> - est un gaz à effet de serre), sont autant de raisons d'accorder plus d'importance à la gestion efficace de l'énergie.

L'analyse Pinch est une démarche rigoureuse et structurée qui permet de détecter les inefficacités dans l'utilisation de l'énergie dans un procédé industriel. C'est une méthode éprouvée et reconnue pour identifier des projets d'économie d'énergie rentables mais aussi pour réduire les investissements nécessaires à l'amélioration aussi bien d'une unité de production que d'une usine complète.

La principale utilisation de cette méthode a pour but de réduire la consommation d'énergie dans chacun des procédés d'une usine. Avant la phase de conception détaillée, on peut identifier la quantité minimale d'énergie nécessaire à la conduite du procédé (cible de consommation minimale). On peut également utiliser l'analyse Pinch pour évaluer les besoins pour chaque type d'utilités (vapeur haute, moyenne et basse pression, eau de refroidissement, etc.). Ceci permet d'optimiser non seulement la quantité totale d'énergie consommée, mais aussi l'efficacité avec laquelle elle est produite pour combler les besoins du procédé. Les techniques utilisant la technologie Pinch peuvent être étendues à l'analyse d'un site complet comprenant plusieurs procédés alimentés par les mêmes utilités. Les principes fondamentaux de cette approche élargie à l'échelle d'un site industriel seront présentés plus tard dans ce document.

Comme l'analyse Pinch est une méthode très structurée, le résultat est une évaluation systématique de toutes les options pratiques et rentables qui peuvent être implantées individuellement ou en combinaison. Ces projets sont alors présentés sous forme d'une stratégie d'investissements qui détaillera les économies réalisées, les investissements nécessaires et la réduction des émissions attendues. De plus, cette approche permet aussi d'identifier la compatibilité des projets les uns avec les autres. Ce dernier point peut aussi être pris en compte dans la stratégie d'investissement proposée par la méthode.

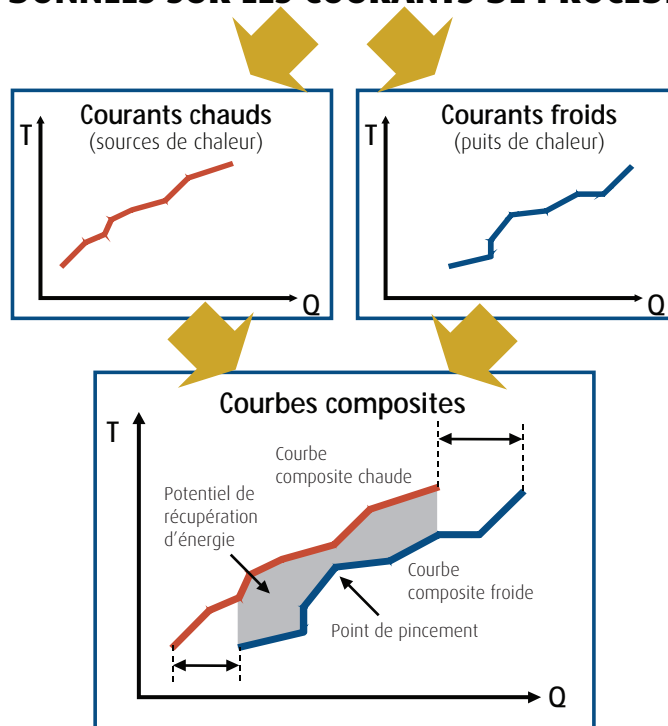
Les économies typiques résultant de l'utilisation de l'analyse Pinch, exprimées en pourcentage de la quantité totale d'énergie consommée (sauf dans le cas des pâtes et papier où elles sont exprimées en pourcentage de la quantité totale de vapeur produite), sont les suivantes :

- Raffineries de pétrole 10-25%
- Pétrochimie 15-25%
- Sidérurgie 10-30%
- Chimie 15-35%
- Agroalimentaire 20-35%
- Pâtes et papiers 15-30%

Dans la pratique, on n'atteint pas toujours ces valeurs d'économies d'énergie parce que certains projets ne sont pas implantés par le personnel de l'usine. Ceci est dû au fait que certains projets ne respectent plus les critères de rendement financier établis par la direction ou qu'ils sont perçus comme pouvant affecter la contrôlabilité de l'usine ou la qualité de la production.

### Construction des courbes composites

Un des principaux outils utilisés dans l'analyse Pinch est le diagramme des courbes composites. La construction de ces courbes est simple mais les informations qu'elles fournissent sont des plus intéressantes. En effet, les courbes composites sont utilisées pour établir les valeurs cibles de consommation minimale en énergie d'un procédé. Elles représentent le profil des sources de chaleur disponibles ("courbe composite chaude") et le profil des besoins thermiques du procédé ("courbe composite froide"). Selon leur forme et leur emplacement, ces courbes renseignent sur les possibilités de récupération de chaleur au sein du procédé (**Figure 3.3**).

**DONNÉES SUR LES COURANTS DE PROCÉDÉ****Figure 3.3**

Les courbes composites

Pour construire les courbes composites, on a besoin d'un bilan de masse et d'énergie complet et précis du procédé étudié. Les données du bilan de masse et d'énergie sont d'abord utilisées pour représenter les courants de matière au sein du procédé en fonction de leur niveau de température et de leurs besoins de chauffage ou de refroidissement. Comme on l'a vu à la *section 2.2*, ces données peuvent être obtenues par :

- mesures réalisées sur site ;
- simulations ;
- données de conception.

Une fois identifiés, ces courants de matière deviennent alors des sources ou des puits d'énergie.

Une « source » correspond à un courant de matière (produits pétroliers, pâte, lait, etc.) qui contient une quantité d'énergie récupérable ou qui doit être refroidi pour satisfaire les besoins du procédé, tandis qu'un « puits » représente un courant de matière qui doit être chauffé avant d'être utilisé dans le procédé. Comme l'énergie

peut être récupérée à partir des « sources », ce type de courant s'appelle « courant chaud ». De même, comme on a besoin de chaleur pour réchauffer les « puits », ce type de courant s'appelle « courant froid ». L'étape qui consiste à identifier les courants et à les répartir en sources et en puits de chaleur s'appelle Extraction des données. C'est une partie essentielle de l'analyse Pinch qui en conditionne la qualité des résultats. Les principes de base de cette procédure sont présentés plus loin dans ce chapitre.

L'exemple illustré au **tableau 1** présente deux courants chauds (courants 1 et 2) et deux courants froids (courants 3 et 4). La valeur CP est définie comme le produit du débit de matière par sa chaleur spécifique. Elle est illustrée par la pente de la courbe sur la **figure 3.4**.

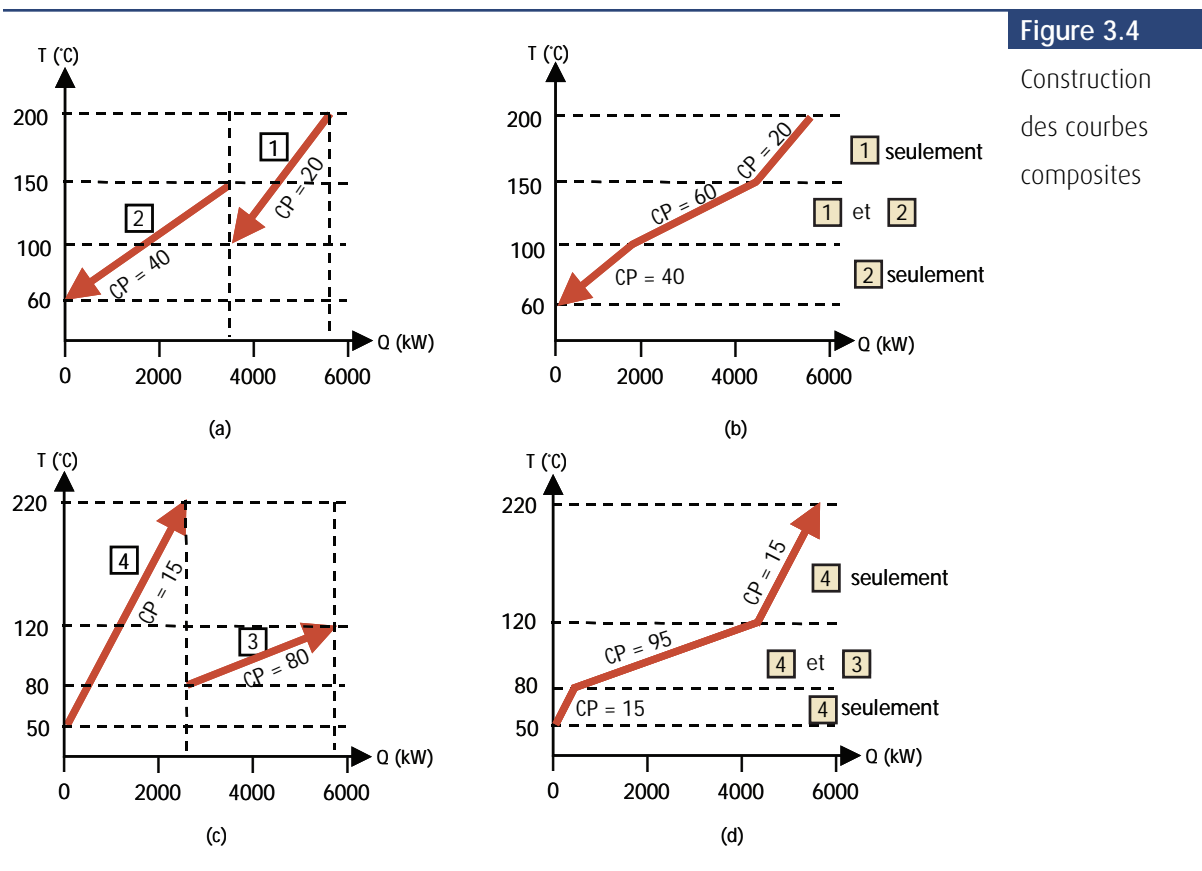
Courant	Type de courant	Température d'alimentation (°C)	Température désirée (°C)	Charge thermique (kW)	CP (kW/°C)
1	Chaud	200	100	2 000	20
2	Chaud	150	60	3 600	40
3	Froid	80	120	3 200	80
4	Froid	50	220	2 550	15

**Tableau 1** : Exemple des données nécessaires à la construction des courbes composites.

Par exemple, le courant 1 est refroidi de 200 °C à 100 °C en dégageant une puissance thermique de 2000 kW, ce qui donne une valeur CP de 20 kW/°C.

La **figure 3.4(a)** montre les courants chauds représentés graphiquement sur un diagramme température-charge thermique. La courbe composite chaude illustrée à la **figure 3.4(b)** est construite tout simplement en ajoutant, pour chaque intervalle de température, les changements de charge thermique de chacun des courants pris individuellement. Pour des températures comprises entre 200°C et 150°C, on a seulement le courant 1. La valeur CP de la courbe composite (c'est à dire sa pente dans cet intervalle de température) est égale à la valeur CP du courant 1, c'est-à-dire 20. Pour des températures comprises entre 150°C et 100°C, on retrouve les deux courants 1 et 2. La valeur CP de la courbe composite chaude est alors la somme des CP des deux courants, soit  $20 + 40 = 60$ . Pour des températures comprises entre 100°C et 60°C, on a seulement le courant 2 et la valeur CP est de 40.

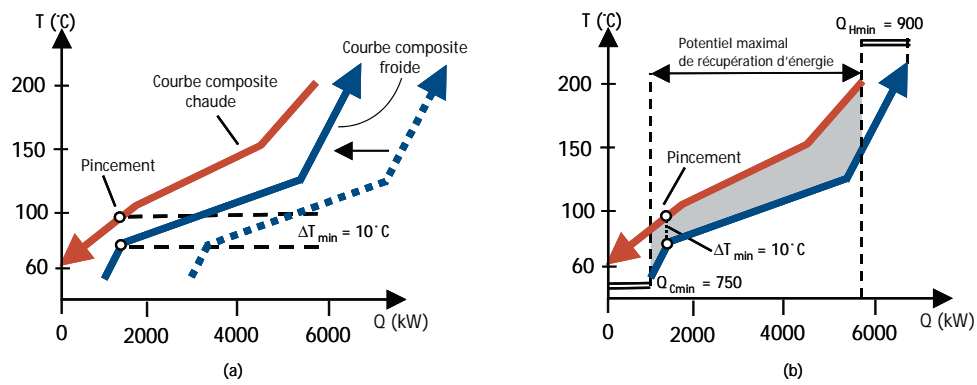
La construction de la courbe composite froide se fait sur le même modèle, en combinant les courbes du diagramme température-charge thermique des courants froids tel qu'illustré aux **figures 3.4(c)** et **(d)**.



### Détermination des besoins minimums d'énergie

Pour établir la cible de consommation minimale d'énergie du procédé étudié, on positionne la courbe composite froide sur le même diagramme que celui de la courbe composite chaude. On notera que l'axe de la charge thermique représente des quantités relatives, il indique donc la différence de charge thermique d'un courant de matière d'un point à un autre. On peut donc positionner indifféremment une courbe composite par rapport à cet axe. En effet, en déplaçant une courbe composite horizontalement, on ne change aucunement les caractéristiques thermodynamiques des courants de matière. L'écart vertical le plus faible entre les deux courbes est déterminé par la différence  $\Delta T_{\min}$ , minimum admissible tel qu'illustré dans la **figure 3.5(a)**. Cette valeur indique la différence de température minimale qui est acceptable entre les deux fluides d'un échangeur de chaleur. Une valeur  $\Delta T_{\min}$  de 10 °C a été utilisée dans cet exemple. La prochaine section indique comment choisir la bonne valeur de  $\Delta T_{\min}$  en fonction des différentes caractéristiques du procédé.

**Figure 3.5**  
Utilisation des courbes composites pour déterminer les cibles de consommation minimale d'énergie



La zone de recouvrement des courbes composites indique la quantité maximale d'énergie thermique qui peut être récupérée au sein du procédé (voir **figure 3.5(b)**). Les quantités d'énergie à l'extérieur (extrémités à la gauche et à la droite de la figure) de cette zone indiquent les charges de chauffage et de refroidissement qui devront être comblées par les utilités de l'usine. Pour la différence minimale de température  $\Delta T_{min}$  sélectionnée, on indique ainsi sur le graphique les besoins minimums requis par le procédé en chauffage ( $Q_{Hmin}$ ) et les besoins minimums de refroidissement ( $Q_{Cmin}$ ). Dans cet exemple, la charge thermique minimale de chauffage ( $Q_{Hmin}$ ) est de 900 kW et la charge thermique minimale de refroidissement ( $Q_{Cmin}$ ) est de 750 kW. Elles sont obtenues moyennant une récupération maximale d'énergie au sein du procédé et pour une valeur  $\Delta T_{min}$  de 10 °C.

L'analyse Pinch permet donc d'établir les cibles de consommation minimale d'énergie nécessaire pour satisfaire les besoins d'un procédé, et ce, avant même de commencer la conception du réseau d'échangeurs de chaleur. Cela nous permet d'identifier rapidement l'ampleur des économies d'énergie qui peuvent être envisagées à un stade préliminaire de l'analyse. Cet avantage est probablement le plus intéressant qu'offre l'analyse Pinch.

Le lieu où les courbes composites sont le plus rapprochées, c'est à dire lorsque l'on a atteint  $\Delta T_{min}$ , est appelé « point de pincement » (« Pinch Point » en anglais d'où le nom de cette technique d'analyse). Le point de pincement correspond donc à la différence de température minimale acceptable entre les deux courants traversant un échangeur de chaleur dans le procédé. De plus, le point de pincement permet de séparer le problème en deux zones distinctes.

En principe, la région au dessus du point de pincement (c'est à dire la partie droite de la **figure 3.6**) nécessite uniquement un apport de chaleur pour satisfaire les besoins du procédé, alors que la région en-dessous du point de pincement (c'est à dire la partie à gauche de la **figure 3.6**) ne nécessite que du refroidissement. Une conception idéale devrait prendre en compte cette réalité. Les règles de conception

de l'analyse Pinch nous enseignent de ne pas transférer de la chaleur d'un courant chaud au-dessus du point de pincement vers un courant froid en dessous du point de pincement. Si de la chaleur était transférée d'en haut du point de pincement vers un courant en bas de ce point, les cibles de consommation minimale ne pourraient être atteintes pour le refroidissement et le chauffage du procédé. En effet, si une quantité d'énergie ( $\alpha$ ) traversait le point de pincement, il faudrait compenser cette quantité d'énergie par de

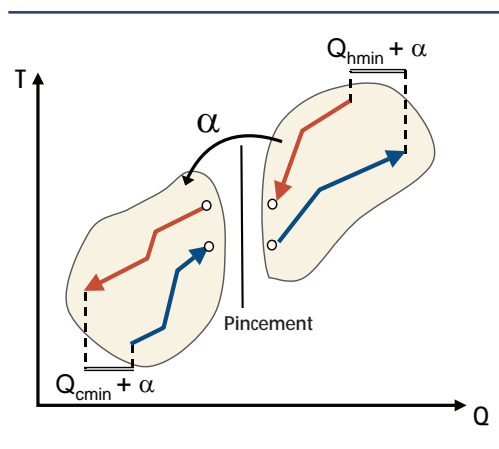
l'énergie thermique qui devrait être fournie par les utilités de l'usine (qui passerait de  $Q_{Hmin}$  à  $Q_{Hmin} + \alpha$ ) et il faudrait augmenter les besoins en refroidissement (air, eau de refroidissement, etc.) de la même quantité (voir *figure 3.6*).

On aurait alors inutilement créé une « cascade » d'énergie, d'une quantité  $\alpha$ , qui traverserait complètement le procédé depuis les utilités utilisées pour chauffer le procédé jusqu'à celles servant à son refroidissement.

Pour atteindre les objectifs de consommation minimale d'énergie, il faut donc associer, au-dessus du point de pincement, les courants de matière qui doivent être chauffés (puits de chaleur) à ceux devant être refroidis (source de chaleur) de façon à maximiser la récupération de chaleur et éviter de « cascader » de l'énergie sous le point de pincement. En analysant les courbes composites représentant une usine existante, les ingénieurs spécialisés en analyse Pinch peuvent rapidement identifier les mauvaises utilisations de la chaleur (mauvaise association d'une source et d'un puits de chaleur menant à une « cascade » de chaleur) qui conduisent à une augmentation inutile de la consommation d'énergie pour le chauffage du procédé et à l'utilisation excessive des systèmes de refroidissement (air, eau, réfrigération). Les principes de l'analyse Pinch qui permettent d'atteindre ces objectifs de consommation minimale d'énergie seront présentés plus en détails dans la suite de ce chapitre.

### Choix de $T_{min}$

Les ingénieurs de procédés savent qu'il y a généralement un compromis à réaliser entre les économies d'énergie et les investissements en capital à réaliser. Bien que l'analyse Pinch puisse, dans certains cas, permettre de réaliser à la fois des économies sur la consommation d'énergie et sur les coûts d'investissement, il est généralement nécessaire d'augmenter les investissements pour augmenter les économies d'énergie, surtout à l'occasion de modifications apportées à des procédés existants.



**Figure 3.6**

Conséquences  
d'un transfert  
d'énergie  
à travers  
du point  
de pincement

Une analyse des courbes composites permet d'observer cette réalité. Lorsque l'écart  $\Delta T_{\min}$  augmente entre les courbes composites chaude et froide, la zone de recouvrement des courbes diminue et les possibilités de récupérer de l'énergie des courants chauds vers les courants froids diminuent en même temps, menant à une hausse des besoins de chauffage et de refroidissement (*figure 3.7*).

Par contre, lorsque les deux courbes s'éloignent, les écarts de température entre les courants chauds et les courants froids (la distance verticale entre les deux courbes) augmentent, ce qui offre une plus grande différence de température entre les fluides circulant dans les échangeurs de chaleur. Il devient alors possible de réduire les surfaces d'échange des échangeurs de chaleur et donc, d'en réduire le coût. Dans ce cas, les coûts plus élevés consacrés à l'énergie sont pondérés par un coût d'investissement plus faible en ce qui concerne les échangeurs de chaleur. La *figure 3.8* montre

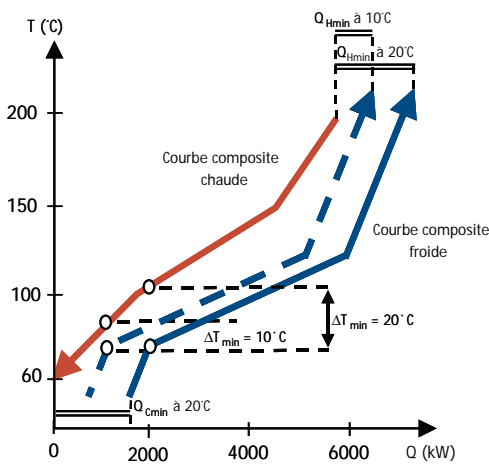
la relation générale qui existe entre les coûts d'investissement et les coûts liés à la consommation d'énergie en fonction de  $\Delta T_{\min}$  : il existe donc une valeur optimale de  $\Delta T_{\min}$  qui minimise le coût total (capital + énergie) pour une usine donnée.

Pour une usine donnée, si le coût de l'énergie (en \$/an) et le coût des échangeurs de chaleur (en \$/m<sup>2</sup> de surface d'échange) sont connus, il est possible de choisir une valeur optimale pour  $\Delta T_{\min}$  avant même la conception des projets d'économies d'énergie (aussi bien pour les projets modifiant une usine existante que pour une nouvelle usine). On économise ainsi un grand nombre d'heures perdues dans l'analyse de projets non-optimaux d'un point de vue technique et/ou économique.

La démarche, pour choisir la valeur optimale de  $\Delta T_{\min}$  en cherchant le meilleur compromis entre la consommation d'énergie et les investissements, est présentée au chapitre 4 dans un exemple d'application de l'analyse Pinch dans l'industrie des pâtes et papiers.

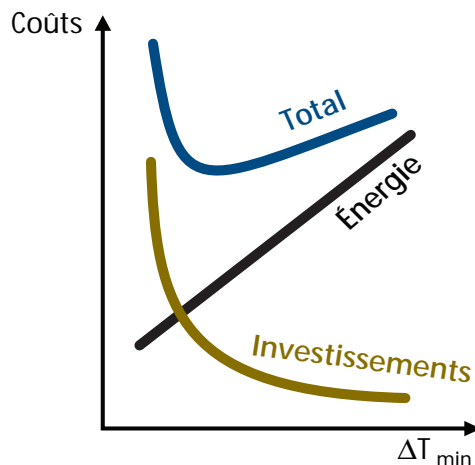
**Figure 3.7**

Effet d'une augmentation de  $\Delta T_{\min}$



**Figure 3.8**

Compromis entre la consommation d'énergie et les Investissements





En pratique, pour un procédé donné, le spécialiste en analyse Pinch choisira souvent la valeur du  $\Delta T_{\min}$  en se basant sur deux critères :

- La forme des courbes composites : typiquement, une valeur plus élevée de  $\Delta T_{\min}$  sera choisie pour des procédés ayant des courbes composites presque parallèles par rapport à ceux ayant des courbes composites qui divergent. En effet, la différence de température entre les courants chauds et les courants froids, dans chacun des échangeurs de chaleur du procédé, est proche de la valeur  $\Delta T_{\min}$  lorsque les courbes composites sont presque parallèles. Dans ce cas, un plus petit  $\Delta T_{\min}$  augmentera les surfaces d'échange de chaleur de tous les échangeurs et pas seulement la surface de l'échangeur de chaleur qui est le plus proche du point de pincement. Les coûts en capital seraient alors très élevés si un faible  $\Delta T_{\min}$  était choisi.
- L'expérience : pour les procédés où les échangeurs de chaleur sont sujets à l'encrassement ou lorsque les coefficients de transfert de chaleur sont faibles, des valeurs de  $\Delta T_{\min}$  comprises entre 30 et 40°C sont généralement utilisées. Dans les procédés chimiques ou lorsque des utilités (vapeur, eau de refroidissement, air) sont utilisées dans un échangeur de chaleur, les valeurs de  $\Delta T_{\min}$  sont plutôt de l'ordre de 10 à 20°C. Enfin, dans les procédés à basse température ayant besoin de réfrigération, de faibles valeurs de  $\Delta T_{\min}$  (3 à 5°C) sont généralement sélectionnées pour réduire la consommation d'électricité des systèmes de réfrigération.

### Extraction des données nécessaires à l'analyse

La quantité d'informations disponibles, provenant de mesures prises dans l'usine, de systèmes d'acquisition de données, de modèles de simulation ou de systèmes de contrôle des procédés, peut être très importante et une bonne partie de ces données peut n'avoir aucune utilité pour l'analyse Pinch. Il est donc nécessaire d'identifier et d'extraire uniquement l'information qui permettra de caractériser les sources et les puits de chaleur ainsi que leurs interactions dans le procédé. Pour une étude Pinch appliquée à l'énergie, les parties du procédé qui nécessitent du chauffage et du refroidissement sont les plus importantes. L'étape d'extraction des données consiste donc à identifier les courants de matières devant être réchauffés, refroidis ou pour lesquels il y a un changement de phase (évaporation ou condensation), et à en extraire, parmi toutes les informations disponibles, seulement les caractéristiques essentielles à l'analyse. La discussion ci-dessous pourrait être élargie aux autres types d'analyse Pinch (eau et hydrogène) et les paramètres à extraire devraient être ajustés en conséquence pour s'adapter au type d'analyse.

Avec les étapes d'acquisition de données et de simulation de procédés, l'étape d'extraction des données est peut être la partie qui demande le plus de temps dans une analyse Pinch. Dans les procédés existants, il n'est pas toujours évident d'obtenir une information précise. Aussi, l'ingénieur peut avoir à se rendre souvent sur le site pour l'obtenir. Les outils facilitant la modélisation, comme la simulation et la réconciliation de données, peuvent être très utiles pour s'assurer que les données recueillies sont fiables et cohérentes.

Comme mentionné plus haut, l'information la plus importante qui doit être recueillie comprend les niveaux de température des courants de matière ainsi que la charge thermique qu'il est nécessaire de mettre en jeu pour atteindre le changement de température désiré (chauffage ou refroidissement). La capacité calorifique (chaleur spécifique) et le débit sont des données indispensables pour calculer la variation de charge thermique d'un courant de matière donné dans le procédé.

En résumé, les données nécessaires pour chaque courant de matière comprennent :

- Le débit massique (kg/s) ;
- La capacité calorifique (kJ/(kg.°C)) ;
- la température à laquelle le courant est disponible ainsi que la température à laquelle il doit être amené dans le procédé (°C) ;
- la chaleur latente pour les courants où un changement de phase se produit (kJ/kg).

De plus, il est nécessaire de recueillir les données suivantes sur les équipements et utilités disponibles :

- Les surfaces d'échange des échangeurs de chaleur existants (m<sup>2</sup>) ;
- Les coefficients de transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur aussi bien du côté chaud que du côté froid (kW/(m<sup>2</sup>. °C)) ;
- Les utilités existantes dans le procédé (température de l'eau et de l'air de refroidissement, niveaux de pression de vapeur, etc.) ; et
- Le coût marginal pour chacune des utilités (différent du coût moyen).

L'extraction de données doit être réalisée avec soin car la qualité des résultats de l'analyse Pinch dépend essentiellement de la qualité des données utilisées. Lors de l'extraction des données, il est essentiel de savoir quelles parties de l'usine peuvent être modifiées (ex. modification à la tuyauterie, possibilité d'installer un nouvel échangeur de chaleur, possibilité de changer les températures de consigne, modification de la source de chaleur utilisée pour chauffer un équipement, etc.). Si aucune partie de l'usine ne peut être modifiée, il n'y aura clairement pas de place à amélioration, même à l'aide d'une analyse Pinch.

Au début de l'analyse, il est recommandé que tous les courants de matière qui ont besoin de chauffage ou de refroidissement soient inclus à l'étape d'extraction des données. Des contraintes telles que la distance entre les différentes parties du procédé, sa flexibilité d'exploitation, son contrôle ou des préoccupations relatives à la sécurité pourront être incluses plus tard. En procédant de cette manière, il est possible d'avoir une évaluation objective du coût d'imposer de telles contraintes puisqu'une comparaison peut être faite entre le cas « sans contrainte » et le cas « avec contraintes ». Les spécialistes en analyse Pinch prennent généralement en compte certaines contraintes dès le début de l'analyse. Cela permet d'accélérer l'analyse mais nécessite beaucoup d'expérience pour éviter d'éliminer des options de récupération d'énergie qui pourraient s'avérer intéressantes.

Il y a de nombreuses spécificités sectorielles pour l'extraction des données et on ne peut pas toutes les aborder dans ce document. L'expérience acquise dans le domaine de l'analyse Pinch a permis d'établir certaines règles génériques qui permettent de faciliter l'extraction des données nécessaire à l'analyse. Les plus importantes sont :

- Les courants de températures différentes qui sont mélangés dans un procédé donné devraient être considérés indépendamment lors de l'étape d'extraction des données. Le mélange direct non-isotherme peut être considéré comme un transfert de chaleur et un tel mélangeur peut avoir comme conséquence de transférer de la chaleur à travers du point de pincement. Par exemple, si le point de pincement se situe à 70 °C, en mélangeant un courant de matière à 90 °C avec un courant à 50 °C, on crée un transfert de chaleur à travers le point de pincement ce qui augmentera les besoins en énergie du procédé. Ces courants devraient donc être traités séparément, c'est à dire un courant allant de 90°C à la température souhaitée (température du point de mélange) et un autre allant de 50°C à la température souhaitée (température du point de mélange).

- Ne pas inclure les courants provenant des utilités dans les données extraites (vapeur, gaz de combustion, eau de refroidissement, réfrigérant, air de refroidissement, etc.) à moins que ces courants ne soient absolument requis par le procédé et qu'ils ne puissent être remplacés par d'autres. L'un des objectifs, lorsqu'on a recours à l'analyse Pinch, est de réduire les besoins énergétiques de l'ensemble du procédé. Si les courants provenant des utilités sont traités de la même façon que les courants de procédé, ils seront considérés comme indispensables et il ne sera plus possible d'en réduire l'utilisation via des projets de récupération d'énergie. Certains courants d'utilités peuvent toutefois être inclus dans l'extraction de données parce qu'il n'est pas pratique ou possible d'en réduire l'utilisation suite à une meilleure récupération de chaleur. Par exemple, c'est souvent le cas avec les séchoirs à vapeur, les éjecteurs ou les turbines à vapeur couplées directement à un entraînement.
- Ne pas tenir compte de la configuration actuelle de l'usine. Pour identifier les cibles de consommation minimale d'énergie indépendamment de la configuration de l'usine, il ne faut pas tenir compte des échangeurs de chaleur existants lorsque l'on détermine les caractéristiques des sources et des puits de chaleur (courants chauds et courants froids). Il est alors possible de comparer la consommation actuelle de l'usine avec ces valeurs cibles. La configuration existante (les échangeurs de chaleur existants, la tuyauterie, les distances en jeu, la capacité de pompage, etc.) est prise en considération dans un deuxième temps pour pouvoir identifier les projets rentables et réalisables en pratique.
- Faire la distinction entre les températures qui doivent être absolument respectées pour satisfaire les besoins du procédé et celles pour lesquelles il y a une certaine flexibilité. Par exemple, la température d'alimentation d'un réacteur est généralement une valeur qu'il est nécessaire de respecter. En revanche, la température de stockage d'un produit qui sort d'un réacteur est souvent une donnée sur laquelle on a plus de flexibilité. Il est alors parfois possible de changer le potentiel de récupération d'énergie d'un procédé en modifiant certaines températures lors de l'étape d'extraction des données (voir section sur les modifications au procédé plus loin dans le document).

L'extraction de données est une étape complexe qui fait largement appel à l'expérience du spécialiste en analyse Pinch. De la qualité du travail accompli à cette étape dépendra la qualité du modèle de type Pinch qui sera utilisé pour optimiser l'usine lors de l'analyse Pinch.

### Calcul des cibles de consommation minimale d'énergie lorsque plusieurs utilités sont disponibles : la courbe "grand composite"

La plupart des procédés sont chauffés et refroidis à l'aide de plusieurs utilités fournissant différents niveaux de température (vapeur à différents niveaux de pression, circuits d'huile chaude, gaz chauds de combustion, eau de refroidissement, systèmes de réfrigération, etc.). Pour réduire les coûts d'énergie, le concepteur doit utiliser le plus possible les utilités les moins coûteuses et devra diminuer la consommation de celles plus onéreuses. Par exemple, il est préférable d'utiliser de la vapeur à basse pression plutôt que de la vapeur à haute pression, de même de l'eau de refroidissement plutôt qu'avoir recours à des systèmes de réfrigération.

Les courbes composites permettent d'établir des cibles globales de consommation minimale d'énergie. Elles n'indiquent cependant pas clairement quelle quantité d'énergie a besoin d'être fournie par chaque utilité de façon à maximiser l'utilisation des utilités moins coûteuses. L'outil utilisé pour identifier les cibles de consommation minimale de chaque utilité est appelé la courbe "grand composite". Il s'agit d'une courbe générée à partir des courbes composites et qui illustre, en fonction de la température, les besoins d'énergie (au-dessus du point de pincement) et les surplus d'énergie à évacuer (au-dessous du point de pincement).

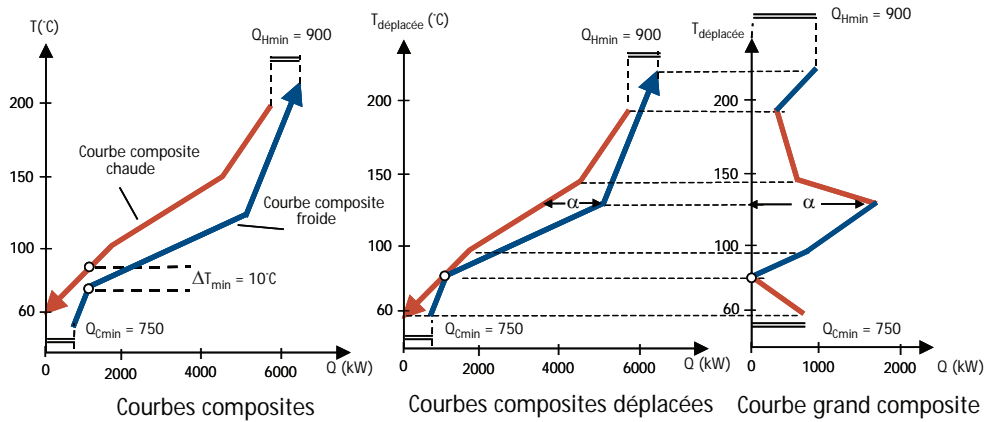
Un léger ajustement mathématique des courbes composites doit être réalisé avant de les utiliser pour générer la courbe "grand composite". Les deux courbes composites (chaude et froide) sont déplacées de manière à les rapprocher l'une de l'autre. La courbe composite chaude est déplacée vers le bas et la courbe composite froide vers le haut, chacune d'une valeur égale à  $\frac{1}{2} \Delta T_{\min}$ , de façon à ce qu'elles se touchent au point de pincement. Les courbes composites résultantes n'ont pas de réel sens physique : elles ne sont qu'une étape dans la construction de la courbe "grand composite". Cette opération permet simplement à la courbe "grand composite" de montrer un flux thermique nul au point de pincement.

La courbe "grand composite" est construite en représentant la différence de charge thermique entre les courbes composites chaude et froide en fonction de la température (*figure 3.9*). Elle donne une représentation graphique des flux d'énergie dans le procédé - des utilités servant au chauffage du procédé vers les courants situés en haut du point de pincement, et des courants situés en bas du point de pincement vers les utilités servant à refroidir le procédé.

Comme la courbe "grand composite" représente les flux d'énergie dans le cas d'un procédé idéalement conçu, il n'y a aucun courant d'énergie qui passe à travers le point de pincement (voir plus haut les règles de conception de l'analyse Pinch). Ceci explique la forme de la courbe "grand composite" qui touche l'axe des ordonnées à la température de pincement, indiquant ainsi un flux thermique nul à cette température (*figure 3.9*).

Figure 3.9

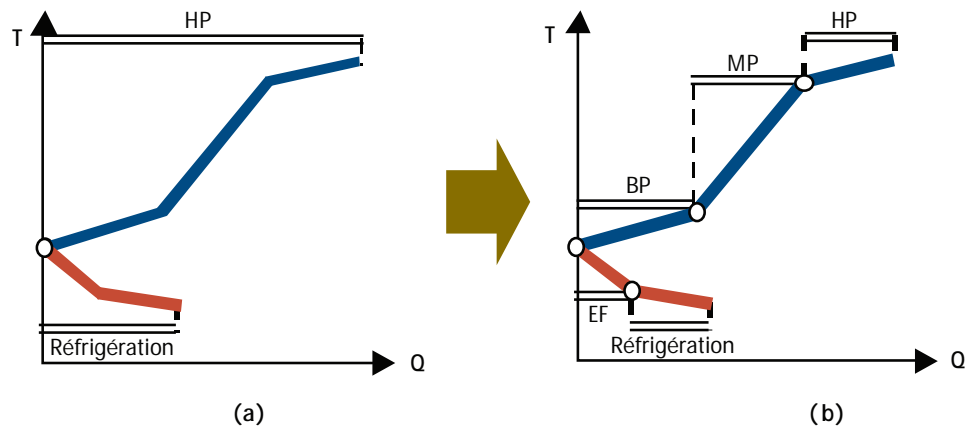
Construction de la courbe "grand composite"



La **figure 3.10(a)** illustre une courbe "grand composite" où seule de la vapeur haute pression (HP) est utilisée pour le chauffage, et où le procédé est refroidi au moyen d'un système de réfrigération. Pour réduire les coûts liés aux utilités, il est possible d'utiliser des utilités moins coûteuses comme de la vapeur moyenne pression (MP), de la vapeur basse pression (BP) et de l'eau de refroidissement (ER). La **figure 3.10(b)** montre les cibles de consommation minimale pour chacune de ces utilités.

Figure 3.10

Courbe "grand composite" illustrant les besoins minimums provenant de chacune des utilités



La cible de consommation minimale d'énergie pour la vapeur basse pression (la vapeur la moins chère) est d'abord obtenue en traçant une ligne horizontale à la température de la vapeur basse pression, depuis l'axe des ordonnées jusqu'à la courbe "grand composite". La cible pour la consommation de vapeur moyenne pression est obtenue de la même manière, mais cette fois à partir de la valeur de la

charge thermique à laquelle le segment BP touche la courbe “grand composite”. La charge thermique restante doit être satisfaite par la vapeur haute pression. Cette approche permet de réduire la consommation de vapeur haute pression au profit de vapeur moyenne et basse pression, ce qui conduit à une réduction des coûts reliés au chauffage du procédé. Une construction similaire est réalisée en dessous du point de pincement pour privilégier l'utilisation d'eau de refroidissement plutôt que d'avoir recours au système de réfrigération dont l'utilisation est plus coûteuse.

Les points où les niveaux MP, BP et EF touchent la courbe “grand composite” sont appelés les « points de pincement des utilités ». Tout comme le point de pincement du procédé défini précédemment, un transfert d'énergie d'en haut d'un point de pincement des utilités pour chauffer un courant en bas de ce point sera source d'inefficacité. Pour le point de pincement du procédé, l'inefficacité se traduit sous la forme d'une consommation d'énergie plus grande que la valeur cible (pour l'ensemble des utilités sans les considérer indépendamment). Pour les points de pincement des utilités, l'inefficacité se traduira par le besoin de fournir de l'énergie sous une forme plus coûteuse (par exemple, besoin de plus de vapeur HP que requis alors que de la vapeur MP aurait pu être utilisée). Tout comme pour le point de pincement du procédé, la valeur cible pour une utilité donnée (HP, MP, etc.) peut être atteinte en évitant des transferts d'énergie de part et d'autre de son point de pincement.

En résumé, la courbe “grand composite” est un outil essentiel utilisé dans une analyse Pinch afin de sélectionner les utilités les moins coûteuses pour satisfaire les besoins du procédé, et pour évaluer la charge thermique minimale requise pour chacune de ces utilités.

## Cogénération

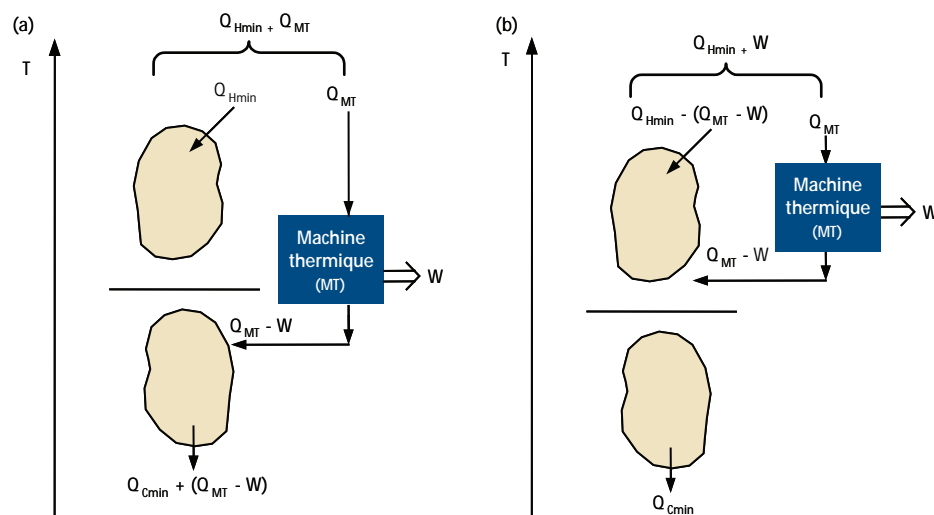
Depuis que plusieurs provinces canadiennes ont déréglementé leurs marchés de l'électricité, les systèmes de cogénération, qui produisent simultanément de l'électricité et de chaleur à partir d'une seule et même source d'énergie, se sont répandus. Dans de telles installations, la chaleur rejetée par une machine thermique comme une turbine à vapeur, une turbine à gaz (gaz naturel, gaz de procédé, etc.) ou un moteur diesel, est utilisée pour assurer une partie des besoins de chauffage du procédé. Les systèmes de cogénération offrent donc des rendements énergétiques globaux beaucoup plus élevés que les systèmes autonomes qui produisent uniquement de l'électricité.

L'efficacité avec laquelle l'énergie est utilisée sur un site peut être améliorée en intégrant le système de cogénération avec le procédé. Du point de vue d'une analyse Pinch, il y a deux façons d'intégrer les rejets de chaleur d'une machine thermique avec le procédé :

On peut, par exemple, décider d'utiliser la machine thermique (MT) de part et d'autre du point de pincement du procédé, mais il ne s'agit pas de la meilleure configuration (**Figure 3.11 (a)**). En effet, le rendement de la machine reste le même que si elle était utilisée de manière autonome pour produire uniquement de l'électricité (la machine thermique produit une quantité  $W$  d'électricité à partir d'une quantité  $Q_{MT}$  d'énergie). Le procédé, quant à lui, a besoin de la même quantité d'énergie ( $Q_{Hmin}$ ) fournie par les utilities.

**Figure 3.11**

Intégration  
d'une machine  
thermique  
de part et  
d'autre du point  
de pincement



En faisant fonctionner une machine thermique entièrement au-dessus du point de pincement, la chaleur que cette machine rejette dans cette zone est à un niveau de température encore intéressant pour satisfaire les besoins thermiques de certains courants du procédé situés au dessus du point de pincement. À la différence de l'exemple précédent, la machine thermique peut produire de l'électricité tout en rejetant des gaz chauds à une température encore valable pour être utilisée dans le procédé.

L'effet net de cet agencement est de produire une force motrice  $W$  en utilisant la même quantité  $W$  d'énergie additionnelle, i.e., avec une efficacité qui semble être de 100 % (**figure 3.11(b)**).

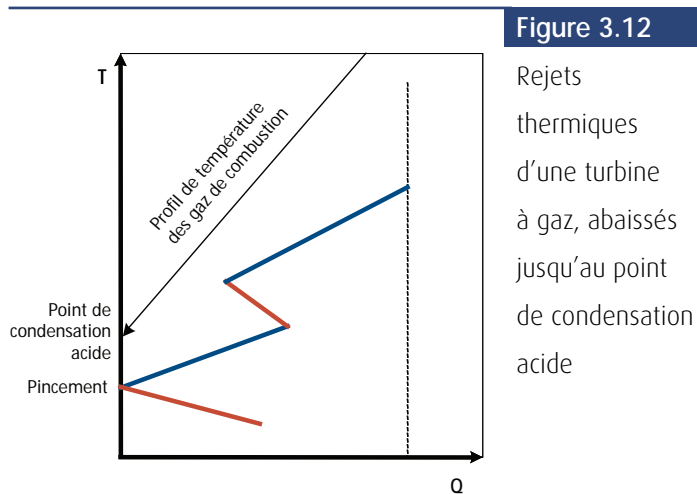
En résumé, si une machine thermique est utilisée de part et d'autre du point de pincement du procédé, alors il n'y a pas vraiment de bénéfice sur le plan de l'efficacité énergétique. Cette configuration est beaucoup moins intéressante que d'avoir un rendement proche de 100 % lorsque la machine est entièrement utilisée au-dessus du point de pincement et que ses rejets thermiques peuvent être utilisés comme une source d'énergie dans le procédé.



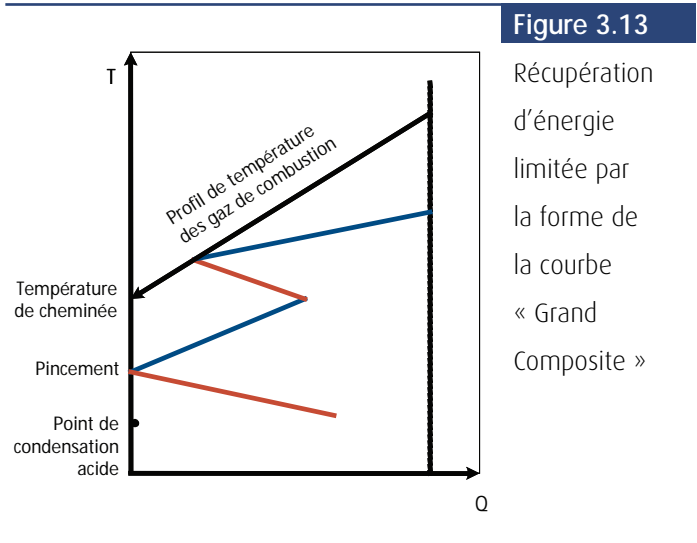
Les machines thermiques les plus couramment utilisées dans l'industrie sont les turbines à gaz (gaz naturel ou gaz de procédé) et les turbines à vapeur. Selon la façon dont la vapeur est distribuée et utilisée dans le site, et selon que la chaleur rejetée est récupérée ou non dans le procédé, il y aura plus ou moins de pertes thermiques qui réduiront le rendement énergétique en dessous de la valeur théorique de 100 %.

Dans le cas des turbines à gaz, le rendement global effectif dépendra de la température des rejets de la turbine, de la forme de la courbe « grand composite » et de la température de pincement du procédé. Par exemple, la **figure 3.12** représente une courbe « grand composite » où la récupération de chaleur est limitée par la température de condensation acide à la sortie de la turbine. La **figure 3.13** montre une autre courbe « grand composite » où la récupération de chaleur est cette fois limitée par la forme de la courbe « grand composite » elle-même, et non pas par la température du point de condensation.

La courbe « grand composite » indique clairement les paramètres essentiels au dimensionnement d'une turbine à gaz ou d'une turbine à vapeur. En effet, les besoins en vapeur du procédé, et ceci en fonction du niveau de pression, y sont identifiées (voir **figure 3.10**). La demande d'énergie primaire de la turbine peut alors être calculée ainsi que la force motrice produite. De même, la quantité de chaleur récupérable dans les rejets de la turbine à gaz sera immédiatement identifiée à l'aide de la courbe « grand composite ».



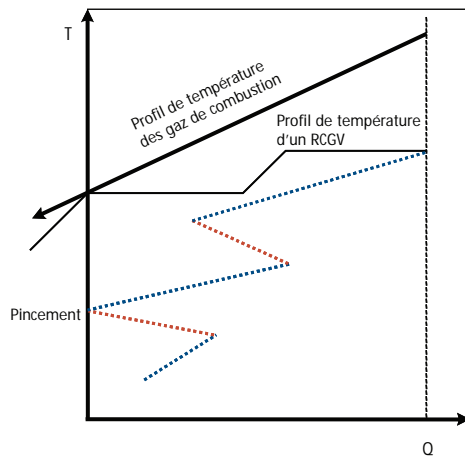
**Figure 3.12**  
Rejets thermiques d'une turbine à gaz, abaissés jusqu'au point de condensation acide



**Figure 3.13**  
Récupération d'énergie limitée par la forme de la courbe « Grand Composite »

Figure 3.14

Intégration d'un  
récupérateur  
de chaleur  
- générateur  
de vapeur



La récupération de chaleur dans les gaz de combustion d'une turbine à gaz peut être réalisée par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur à récupération de chaleur (GVRC), d'un récupérateur de chaleur combiné à une turbine à vapeur (cycle combiné) ou encore par l'intégration directe de la chaleur résiduelle avec le procédé. L'utilisation d'un GVRC procure beaucoup plus de flexibilité à l'exploitation; cependant, il génère des pertes thermodynamiques et nécessite un investissement supplémentaire par rapport au cas où on pourrait récupérer directement la chaleur dans le procédé. La

*figure 3.14* montre les profils de température des gaz de combustion d'une turbine et d'un GVRC dans lequel de la vapeur à 2 niveaux de pression est produite.

Le choix d'une turbine repose sur un compromis puisque ce n'est pas forcément la turbine la plus efficace en terme de conversion électrique qui permettra d'obtenir le meilleur rendement global de l'ensemble du système de cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur récupérable). Une analyse doit être réalisée pour faire le choix le plus rentable entre une plus grande production électrique nécessitant une turbine plus onéreuse et une plus grande production de chaleur qui nécessite une turbine moins coûteuse.

Une fois la turbine à gaz choisie, quelques modifications peuvent être apportées lors de la conception finale du système de cogénération. Par exemple, s'il y existe un surplus de chaleur dans l'usine et qu'elle ne peut pas être utilisée dans le procédé, un récupérateur pourra être considéré pour augmenter le rendement de la turbine à gaz. Un récupérateur est un échangeur de chaleur situé entre le compresseur de la turbine et la chambre de combustion. Cet élément permet d'augmenter la température de flamme et de réduire la consommation de carburant. De l'eau peut aussi être injectée en amont du récupérateur pour augmenter la masse qui traverse la turbine. Cela réduit la température de flamme, sans effet notable sur la production d'électricité, et diminue également les émissions de NOx associées à une température de flamme trop élevée.

Inversement, lorsque le procédé nécessite plus de chaleur ou de vapeur que le système de cogénération ne peut en produire, on peut avoir recours à une technique de postcombustion pour augmenter la température des gaz de combustion rejetés par la turbine à gaz afin qu'ils puissent être utiles au procédé. Ces gaz de combustion contiennent encore suffisamment d'oxygène pour pouvoir alimenter un deuxième brûleur afin d'obtenir l'élévation de température désirée des gaz de combustion.

L'approche présentée plus haut est bien adaptée à la plupart des sites industriels. Cependant, les grandes installations industrielles telles que les usines pétrochimiques, les raffineries de pétrole et les complexes sidérurgiques sont souvent desservis par des systèmes de production d'utilités centralisés qui fournissent à la fois la vapeur et l'électricité nécessaires à de nombreux procédés devant garder une grande autonomie d'opération et qui sont parfois séparés par de grandes distances. L'analyse Pinch appliquée à l'échelle complète de ce type de site permet d'optimiser les besoins en utilités du site au complet en analysant les rejets thermiques potentiellement récupérables ainsi que les besoins de chaque unité de production ou procédé. Une technique particulière de l'analyse Pinch est utilisée dans de tels cas et est décrite dans la section Analyse globale d'un site industriel plus loin dans ce chapitre.

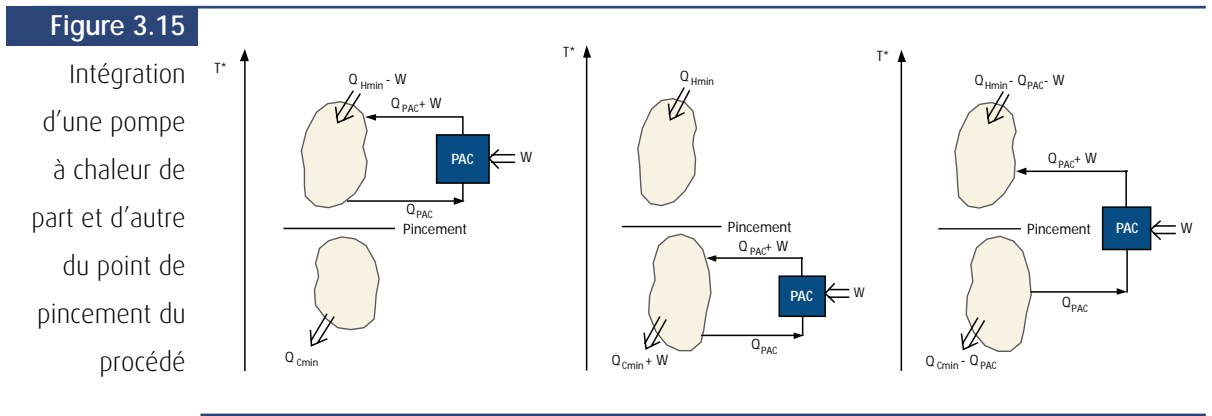
### Pompes à chaleur

Les pompes à chaleur sont des machines thermiques qui absorbent de la chaleur à un niveau de température inférieur dans un évaporateur, consomment de l'énergie mécanique pour comprimer un fluide caloporteur et rejettent de la chaleur à un niveau de température plus élevé dans un condenseur. Le fluide condensé est détendu et se vaporise partiellement. Le cycle se répète alors. Le fluide caloporteur est généralement un composant pur, ce qui signifie que son évaporation et sa condensation se font à température constante.

Comme dans le cas du système de cogénération, il y a deux façons d'intégrer une pompe à chaleur au procédé.

Si la pompe à chaleur fonctionne intégralement au-dessus du point de pincement du procédé, alors elle transforme tout simplement un travail mécanique en chaleur, ce qui n'est jamais économiquement rentable. De même, si elle est placée complètement au-dessous du point de pincement, la situation est encore pire car le travail est transformé en chaleur qui doit être évacuée par les systèmes de refroidissement du site.

La seule possibilité d'intégrer efficacement une pompe à chaleur à un procédé est de l'installer de part et d'autre du point de pincement. Ainsi, dans cette configuration, elle absorbe de la chaleur basse température en dessous du point de pincement (où il y a un excès de chaleur basse température disponible) et la rejette au-dessus du point de pincement (où il y a un déficit de chaleur) tel qu'on le voit sur la **figure 3.15**.



Les performances de la pompe à chaleur dépendent de l'écart entre les températures auxquelles elle fonctionne : plus on demande à la pompe à chaleur de relever (i.e. augmenter) le niveau de température, moins bonne sera sa performance. Enfin, il est à noter que la rentabilité d'intégrer une pompe à chaleur dans un procédé dépend essentiellement du coût de l'électricité par rapport aux autres sources primaires d'énergie.

### Modifications possibles au procédé : règles générales

Les cibles de consommation minimale d'utilités, déterminés à partir des courbes composites, dépendent du bilan de masse et d'énergie du procédé. Ces cibles, ainsi que les projets d'amélioration qui peuvent être identifiés en utilisant ces courbes, sont basées sur des conditions fixes d'exploitation du procédé, c'est à dire que toutes les modifications qui peuvent découler d'une analyse Pinch n'affectent en aucune manière les besoins fondamentaux en énergie du procédé. Ainsi, la charge thermique et le niveau de température requis par chaque opération unitaire ou équipement demeurent identiques. C'est seulement la façon de fournir cette énergie qui peut être modifiée (par de la récupération d'énergie dans le procédé notamment).

Dans ce contexte, la notion de modifications d'un procédé fait référence à toute intervention visant à changer les besoins fondamentaux du procédé. En modifiant les conditions d'exploitation du procédé, il est possible de réduire encore plus les besoins en énergie de celui-ci. Plusieurs paramètres peuvent être ainsi révisés, comme les pressions d'exploitation et les taux de reflux des colonnes à distiller,

les pressions de vaporisation, les débits de recirculation, le taux de conversion de réacteurs, etc. Ces paramètres auront un impact direct sur les températures des différentes étapes du procédé et par conséquent sur leurs besoins thermiques. Le but est donc d'identifier les paramètres qui peuvent être modifiés afin d'augmenter les possibilités de récupération de chaleur.

Les possibilités offertes sont si nombreuses qu'une recherche exhaustive permettant d'identifier les trois ou quatre paramètres essentiels permettant d'abaisser les besoins énergétiques du procédé serait extrêmement longue. Cependant, les règles de base de la thermodynamique utilisées dans une analyse Pinch permettent d'identifier les paramètres les plus importants du procédé qui peuvent diminuer sa consommation d'énergie. La démarche qui est généralement utilisée pour identifier ces occasions de modifier le procédé est appelée le « plus and minus principe ».

### **Modifications possibles au procédé : « plus and minus principe »**

Le bilan de masse et d'énergie d'un procédé a une influence directe sur la forme des courbes composites. Lorsqu'on change ce bilan, on change également les courbes composites et par conséquent, la quantité maximale d'énergie qui peut être récupérée ainsi que les cibles de consommation minimale.

En règle générale, on pourra réduire les besoins minimums en chauffage en travaillant dans la zone au-dessus du point de pincement. Deux possibilités se présentent alors au praticien en Analyse Pinch :

- Soit augmenter la charge thermique de certains courants chauds (sources de chaleur) dont la chaleur peut être récupérée en haut du point de pincement ;
- Soit réduire la charge thermique de certains courants froids (puits de chaleur) situés en haut du point de pincement.

De même, on peut réduire les besoins de refroidissement en travaillant dans la zone des échanges possibles de chaleur en dessous du point de pincement. Ici aussi, il y a deux voies possibles :

- Soit diminuer la charge thermique disponible dans les courants chauds (sources de chaleur) situés en bas du point de pincement ;
- Soit augmenter la charge thermique nécessaire pour chauffer les courants froids (puits de chaleur) en bas du point de pincement.

Cette stratégie s'appelle le « plus and minus principe » et sert à ajuster les conditions d'opération d'un procédé. Ce principe simple est à la base de tous les ajustements que l'on peut effectuer au niveau des charges thermiques des courants de procédé et indique quelles modifications auront un impact positif sur le bilan énergétique global du procédé et celles qui, au contraire, auront un impact négatif. Le nom de ce principe fait référence au fait que toute modification va augmenter ou diminuer la charge thermique requise d'un courant de matière donné.

Il est parfois possible de changer les niveaux de température requis par un procédé plutôt que les charges thermiques mises en jeu. L'analyse des courbes composites montre que des changements de température effectués d'un seul côté du point de pincement n'auront aucun effet sur les cibles de consommation minimale d'énergie. Cependant, des changements de température à travers le point de pincement peuvent changer les besoins énergétiques du procédé. Par exemple, en réduisant la température requise d'un courant situé en haut du point de pincement jusqu'à une température inférieure à celle du pincement, on déplacera une charge thermique de la zone située en haut du point de pincement vers la zone située en bas du point de pincement (où de l'énergie excédentaire est disponible pour chauffer ce courant). Ceci permettra de réduire le besoin en utilités en haut (chaleur) et en bas du point de pincement (refroidissement).

Les principes directeurs pour modifier les niveaux de température d'un procédé afin d'avoir un impact bénéfique sur la consommation d'énergie peuvent être résumés comme suit :

- Déplacer autant que possible les courants chauds (sources de chaleur) qui se trouvent au-dessous du point de pincement pour les amener au-dessus du point de pincement ;
- Déplacer autant que possible les courants froids (puits de chaleur) qui se trouvent au-dessus du point de pincement pour les amener au-dessous du point de pincement.

### La procédure de conception du système de récupération d'énergie

Jusqu'à présent, les caractéristiques et les principaux avantages de l'analyse Pinch ont été présentés de manière suffisamment détaillée pour expliquer pourquoi, dans les procédés complexes, cette approche devrait avoir une place importante dans toute étude d'économie d'énergie ou procédure de conception.

Une fois la valeur de  $\Delta T_{\min}$  choisie, les courbes composites et la courbe « grand composite » peuvent être construites et les cibles de consommation minimale de chaleur et de refroidissement peuvent être identifiées. Le spécialiste en analyse Pinch peut alors passer à la phase de conception du réseau d'échangeurs de chaleur qui permettra d'atteindre ces valeurs minimales en pratique.

Tel que mentionné précédemment, le point de pincement est déterminé par la différence minimale de température acceptable entre le courant chaud et le courant froid de tout échangeur de chaleur dans le procédé. Il divise le problème en deux zones d'étude distinctes : celle qui se situe au-dessus du point de pincement et celle qui se situe en dessous du point de pincement. La partie du procédé située au-dessus du point de pincement a un besoin d'énergie thermique, c'est donc un puits net de chaleur. La partie du procédé située en dessous du point de pincement doit évacuer de l'énergie thermique, c'est donc une source nette d'énergie (à basse température et donc, de basse qualité).

Il existe généralement trois principes de base à respecter pour atteindre les cibles de consommation minimale d'énergie :

- La chaleur ne doit pas être transférée à travers le point de pincement (sauf si c'est par le biais d'une pompe à chaleur) ;
- Il faut absolument éviter d'utiliser les utilités pour refroidir (eau de refroidissement, refroidisseur à air, etc.) un courant de procédé qui se trouve au-dessus du point de pincement ;
- Il faut absolument éviter d'utiliser les utilités pour chauffer (vapeur, gaz chauds) un courant du procédé qui se situe en dessous du point de pincement.

Lorsque l'une ou l'autre de ces règles n'est pas respectée, il en découle un transfert de chaleur qui « traverse » le point de pincement, résultant en une augmentation des besoins énergétiques pour chauffer et refroidir le procédé. Il devient alors impossible d'atteindre les cibles de consommation minimale d'énergie pour chauffer et refroidir le procédé (voir **figure 3.6**). En d'autres termes, la différence entre la consommation actuelle d'énergie et la cible de consommation minimale de chaleur est la somme de toutes les inefficacités entraînées par des transferts thermiques à travers le point de pincement. Les cibles de consommation minimale d'énergie peuvent donc être atteintes en éliminant ce type de transfert thermique au cours de la conception du système de récupération de chaleur.

### Flexibilité dans la procédure de conception

En adoptant cette démarche pour la conception du système de récupération de chaleur, le spécialiste en analyse Pinch pourra identifier plusieurs améliorations qui réduiront les besoins énergétiques de l'ensemble du procédé. Cependant, n'importe quelle procédure de conception doit demeurer flexible. En effet, un réseau d'échangeurs de chaleur qui obéirait de manière absolue aux règles de l'analyse Pinch pourrait très bien contenir un grand nombre de petits échangeurs, ce qui serait non justifiable au point de vue économique et pourrait complexifier inutilement le réseau.

La clef du succès est donc d'appliquer ces règles le plus possible, de s'en servir pour donner les principales directions que devrait prendre la conception du réseau d'échangeurs de chaleur, mais aussi d'être prêt à accepter certaines inefficacités sur le plan énergétique pour des raisons économiques et de contrôlabilité du procédé. Des logiciels d'analyse Pinch sont disponibles sur le marché pour aider les ingénieurs à concevoir des réseaux d'échangeurs de chaleur qui respectent les règles de l'analyse Pinch pour la plupart des courants de matière et des échangeurs. L'utilisation d'un logiciel est particulièrement important lorsque l'on veut modifier un réseau complexe d'échangeurs de chaleur existants puisqu'on doit prendre en compte la configuration actuelle de l'usine. L'ingénieur qui effectue l'analyse Pinch devra donc tolérer certaines inefficacités de manière à réduire les investissements que leur correction nécessiterait et conserver un maximum de flexibilité dans l'exploitation de l'usine.

Souvent, plusieurs cibles de consommation minimale d'énergie doivent être déterminées au cours d'une analyse Pinch. Le point de départ est une cible obtenue à partir des courbes composites initiales mais, au fur et à mesure que le travail évolue, il peut être nécessaire de revoir ces courbes composites pour refléter toute modification apportée au procédé (identifiées en utilisant le « plus and minus principe »). De plus, les courbes composites peuvent avoir besoin d'être révisées car certains échanges de chaleur peuvent être irréalisables en pratique (pour des raisons de sécurité, de contrôlabilité, de distance ou pour toute autre contrainte pratique).

Une caractéristique importante de l'analyse Pinch est d'associer, à chaque cible de consommation minimale, un coût en capital et un coût relié à la consommation d'énergie (voir la section sur le choix de  $\Delta T_{\min}$ ). Ainsi, tout changement apporté aux courbes composites au cours de l'analyse a un impact économique positif ou négatif qu'il est possible de quantifier rapidement. Cette information permet d'orienter les discussions afin de savoir si ces modifications sont acceptables ou non.

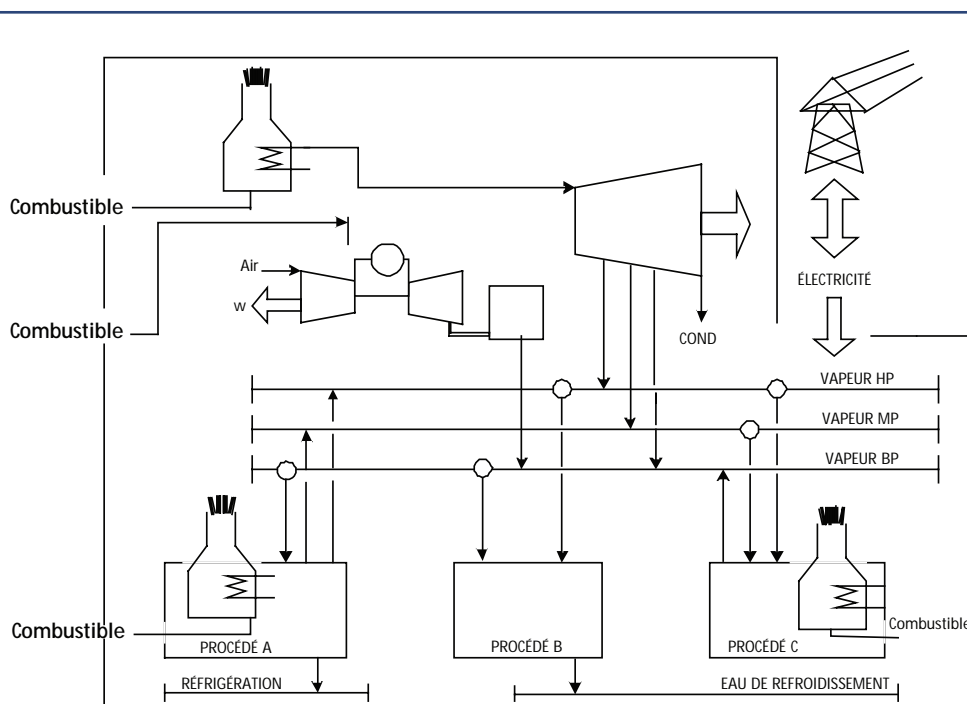
Toutes choses considérées par ailleurs, l'analyse Pinch demeure un outil efficace pour faciliter la conception des procédés car elle fournit un ensemble de principes qui orientent toujours l'ingénieur dans une direction qui conduit à une diminution des besoins énergétiques. Ainsi, même si cette analyse nécessite souvent plusieurs itérations, elle permettra de réduire l'effort nécessaire à la conception d'un bon système de récupération d'énergie en éliminant rapidement les possibilités de récupération d'énergie non-optimales. Généralement, l'analyse Pinch permet de réduire les coûts de conception pour les procédés complexes.

Il est aussi très important de rappeler que la conception d'un réseau de récupération d'énergie efficace nécessite la combinaison d'une expertise en analyse Pinch et d'une bonne connaissance du procédé.



## Analyse globale d'un site industriel

Lorsque l'on s'intéresse à plusieurs procédés sur un même site industriel, il est essentiel de prendre en compte les interactions entre les différents procédés et le système de production et de distribution des utilités. Pour les grands sites industriels, l'intégration directe des différents procédés (récupération de chaleur d'un courant chaud d'un procédé pour en chauffer un autre dans un autre procédé) peut être délicate à cause de la distance qui sépare les procédés, ou lorsqu'il est nécessaire de pouvoir maintenir les procédés indépendants les uns des autres. On pourra alors choisir de récupérer l'énergie de manière indirecte en se servant du réseau des utilités. Cette intégration indirecte de chaleur se présente généralement sous la forme de production de vapeur (à partir de la récupération de chaleur) qui pourra être utilisée dans d'autres procédés (voir *figure 3.16*).



**Figure 3.16**

Intégration indirecte, par l'intermédiaire des utilités, de plusieurs procédés différents d'un même site

La technique d'analyse globale d'un site présentée dans cette section est une approche très efficace pour les grands ensembles industriels comme les raffineries de pétrole, les complexes chimiques et pétrochimiques et les aciéries. Les techniques d'analyse Pinch présentées précédemment sont suffisantes pour les usines des autres secteurs industriels puisque ces usines peuvent généralement être considérées comme un seul grand procédé du point de vue de l'analyse Pinch. C'est pourquoi les techniques d'analyse globale qui sont présentées dans cette section ne sont que très rarement utilisées pour ces secteurs.

L'analyse globale d'un site industriel commence généralement par une réunion de travail au cours de laquelle on définit le niveau de détails nécessaire avec lequel chacun des procédés du site doit être analysé. Ce niveau de détails doit être convenu d'un commun accord entre l'expert en analyse Pinch et les responsables de l'usine. En général, tous les procédés n'ont pas besoin d'être analysés avec le même niveau de détails pour les raisons suivantes :

- Il n'y a pas assez de données disponibles pour certaines unités de production ;
- La direction de l'entreprise a décidé de ne plus investir de façon significative dans certaines parties de l'usine (âge de l'unité de production, ventes des produits qui y sont fabriqués en baisse, etc.) ;
- Les unités de petite taille ou peu complexes ne nécessitent pas une étude détaillée ;
- La récupération maximale d'énergie dans un procédé n'est pas toujours nécessaire puisque la chaleur en excès d'un procédé (procédé A) peut parfois être récupérée dans un autre procédé situé à proximité (procédé B), soit par le biais de production de vapeur du procédé A qui sera récupérée dans le procédé B (récupération indirecte), soit par l'échange thermique directe entre un courant de matière du procédé A et un autre du procédé B.

Une phase de définition des objectifs de l'analyse Pinch permet d'établir des modèles appropriés pour représenter chacune des unités de production. Ces modèles sont alors combinés pour obtenir une vision globale du site. Trois grandes catégories caractérisent le niveau de détails avec lequel un procédé (ou unité de production) peut être analysé :

### **1. Procédés considérés comme boîte noire**

Ces procédés n'ont pas besoin d'être analysés en détail car leur consommation d'énergie est très faible, parce que des projets de récupération de chaleur seraient difficiles à implanter ou encore parce que la compagnie n'est pas prête à investir dans cette partie de l'usine. Une analyse Pinch complète est inutile pour ces procédés et ils seront uniquement considérés pour leur consommation actuelle d'énergie. Par exemple, si un procédé consomme actuellement 1 t/h de vapeur à 3 bars, ses besoins énergétiques sont équivalents à 600 kW à 134 °C (cette valeur étant obtenue à partir du contenu énergétique de la vapeur à cette pression).

## 2. Procédés considérés comme boîte grise

Les procédés sont considérés comme des boîtes grise lorsqu'ils offrent peu d'occasions de récupération de chaleur au sein même du procédé mais qui utilisent une quantité notable d'utilités (vapeur, eau de refroidissement, etc.). Dans ce cas, seuls les transferts de chaleur qui impliquent les utilités sont pris en compte dans l'analyse. Cette dernière est plus détaillée que dans le cas des modèles de type boîte noire : on peut ainsi s'apercevoir par exemple que de la vapeur à 3 bars sert en réalité à chauffer de l'air ambiant (dont la température initiale est de 10°C) utilisé dans un séchoir travaillant à une température de 80 °C. Ainsi, on a la même demande de chauffage que celle présentée dans le modèle de type boîte noire plus haut (600 kW), mais elle est maintenant distribuée sur une plage de températures comprises entre 10 °C et 80 °C (qui est la plage de températures réelle à laquelle fonctionne le procédé). Une telle représentation permet la possibilité de remplacer de la vapeur à 3 bars par une simple boucle à eau chaude ou même récupérer un rejet de chaleur directement d'un autre procédé.

Tous les courants de procédé qui sont chauffés ou refroidis par les utilités doivent être traités de la même façon. Cependant, tout comme dans le cas des procédés de type boîte noire, les échanges de chaleur à l'intérieur du procédé (autre que ceux impliquant les utilités) sont exclus de l'analyse. Une analyse Pinch détaillée pour évaluer les possibilités de récupération d'énergie à l'intérieur même du procédé n'est donc pas nécessaire pour ce type de procédé. L'objectif est plutôt d'optimiser les connexions des différents équipements/procédés aux réseaux des utilités sans se préoccuper du détail des transferts thermiques à l'intérieur même de chacun des procédés ou entre ceux-ci.

## 3. Procédés considérés comme boîte blanche

Pour les procédés complexes et grands consommateurs d'énergie, une analyse Pinch complète est menée pour optimiser la récupération d'énergie à l'intérieur des procédés. Les courbes composites et « grand composite » sont construites pour définir les cibles de consommation minimale de chaque utilité (quantité de vapeur à chaque niveau de pression, eau de refroidissement, gaz chaud, etc.).

La partie de la courbe « grand composite » qui se situe au-dessus de la température de pincement représente des demandes en chauffage (puits de chaleur) et la partie qui se trouve en-dessous représente des surplus (ou des sources) de chaleur qui doivent être rejetées.

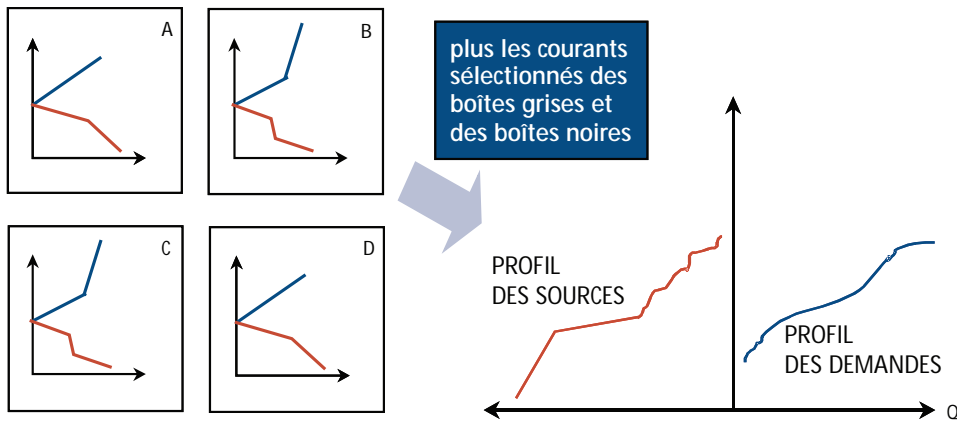
Les sources et les puits de chaleur provenant des procédés traités comme des boîtes blanches, et pour lesquels une récupération directe d'énergie à l'intérieur même du procédé n'est pas possible ou souhaitable, sont alors utilisés, au même titre que les courants chauffés ou refroidis par des utilités dans les procédés considérés comme des

boîtes noires ou grises, pour construire un modèle de l'ensemble des procédés du site. Dans ce modèle, les sources de chaleur sont représentées à gauche (valeurs négatives) du diagramme température vs. charge thermique tandis que les puits de chaleur sont représentés à droite (valeurs positives) du même graphique, ceci pour l'ensemble du site et non pas seulement pour un procédé donné comme dans le cas des courbes composites et « grand composite ». La **figure 3.17** présente ce concept pour quatre procédés où une analyse Pinch détaillée a été considérée utile et où d'autres procédés ont été représentés par des boîtes noires ou grises telles que décrites précédemment.

**Figure 3.17**

Construction des profils des demandes et des puits de chaleur pour un site complet

### Analyse Pinch détaillée pour ces procédés



Cette représentation est différente que de simplement combiner l'ensemble des sources et des puits de chaleur de l'ensemble des procédés d'un site industriel. Une telle représentation autoriserait des échanges thermiques entre tous les courants du site, ce qui est, dans la pratique, généralement loin de la réalité. Les contraintes liées à la distance entre deux procédés, la flexibilité de production, la contrôlabilité, etc. réduisent en effet le nombre de courants qui peuvent être associés pour effectuer de la récupération d'énergie.

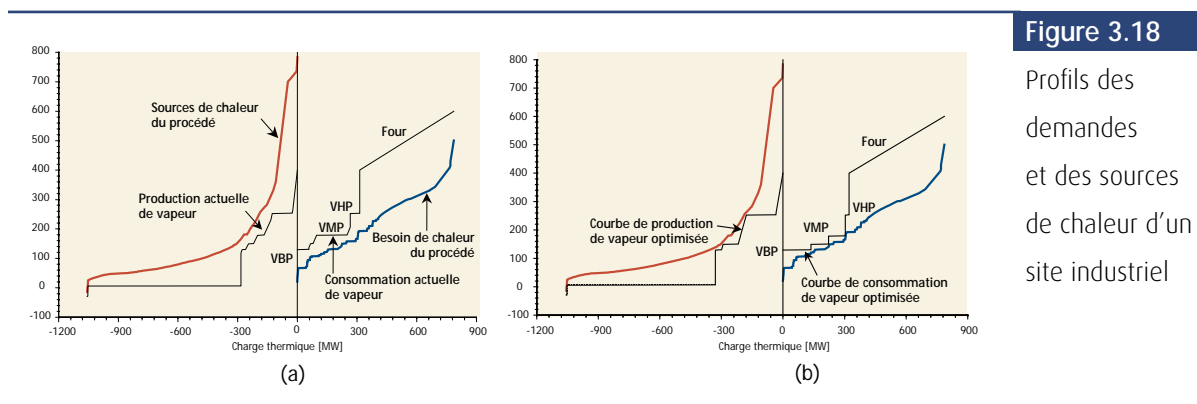
En représentant les sources et les puits de chaleur du site sur 2 parties distinctes du diagramme, le modèle reconnaît l'autonomie de chacun des procédés, et permet la récupération d'énergie entre deux procédés uniquement via le réseau des utilités. Un échange thermique entre des courants (à travers un échangeur de chaleur) de deux procédés différents n'est pas permis dans ce type de représentation (la récupération directe d'énergie entre deux courants est analysée seulement à l'intérieur même des procédés considérés comme des boîtes blanches). Cependant, il est important de noter que cette approche permet tout de même de représenter les besoins en utilités de l'ensemble du site (demande en vapeur et autre source de chaleur,

demande en eau de refroidissement et autre source de refroidissement). C'est seulement le niveau de détails qui varie selon que ces besoins proviennent d'un procédé représenté sous la forme d'une boîte blanche, noire ou grise.

La technique d'analyse globale d'un site industriel vise à identifier les meilleures stratégies d'intégration indirecte (c'est à dire, la récupération entre deux ou plusieurs procédés par le biais des utilités – généralement le réseau de distribution de vapeur) des différents procédés du site. Cette analyse permet d'identifier :

- Les possibilités de produire de la vapeur (via la récupération de chaleur dans les procédés) et de l'utiliser pour en combler la demande dans d'autres procédés ;
- Les niveaux de pression de vapeur optimaux pour maximiser la récupération d'énergie résultant de la production de vapeur.

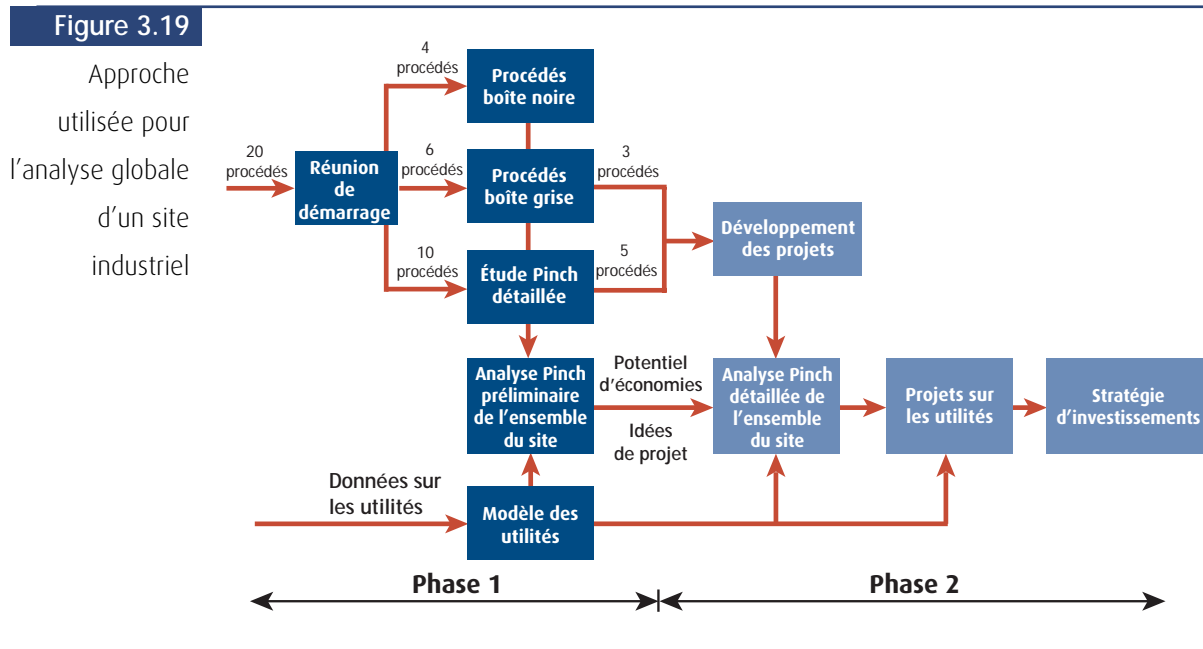
En superposant les courbes d'utilisation et de génération actuelles des utilités à l'échelle du site aux courbes présentées à la **figure 3.17**, on peut apprécier graphiquement le potentiel d'amélioration qui existe au niveau de la production et de la consommation des utilités. Par exemple, dans la **figure 3.18(a)**, l'écart entre les sources de chaleur disponibles à partir des procédés et la courbe existante de production de vapeur montre qu'il y a un potentiel de générer plus de vapeur haute pression à partir de récupération de chaleur dans les procédés. De même, l'écart entre la courbe des demandes en énergie de l'ensemble des procédés et le profil existant de consommation d'utilités montre que la majorité des besoins actuels de vapeur moyenne pression pourraient être comblés par de la vapeur basse pression.



Toujours pour le même exemple, la **figure 3.18(b)** représente la cible de production maximale de vapeur (par récupération d'énergie dans les procédés) et la cible de consommation de vapeur aux pressions optimales. Ainsi, au niveau des sources de chaleur (courbe rouge sur la partie gauche de la figure), un potentiel de production additionnelle de vapeur a été identifié, ce qui permet d'augmenter l'intégration thermique entre les différents procédés et donc, de réduire le besoin de production de vapeur à partir de combustible. L'intégration entre les procédés se fera de manière indirecte par l'intermédiaire des utilités (réseau de vapeur du site). On notera que la demande totale en chauffage est identique à celle de la situation actuelle (courbe bleue sur la partie droite de la figure).

L'optimisation des niveaux de pression de vapeur est particulièrement intéressante au stade de la conception initiale d'une usine ou si les différents niveaux de pression sont déterminés en contrôlant la pression d'échappement de turbines à vapeur dans une usine existante. Dans l'exemple de la **figure 3.18**, la production additionnelle de vapeur haute pression conduira à une plus grande production que les besoins réels du site. Dans un tel cas, pour que des bénéfices en soient retirés, il faudra faire passer la vapeur haute pression à travers une turbine qui produira de l'électricité et abaissera sa pression jusqu'à un niveau où elle pourra encore être utilisée efficacement dans les procédés.

Une analyse globale à l'échelle d'un site est généralement menée en deux phases principales illustrées sur la **figure 3.19**.



### Phase 1: Détermination des cibles de consommation minimale

L'objectif de la phase 1 (en sombre sur la **figure 3.19**) est d'établir les cibles de consommation minimale en énergie d'un site et d'identifier les procédés qui présentent les meilleurs potentiels d'économies d'énergie.

Lors de cette étape, les différents procédés du site sont classés comme étant des boîtes noires, grises ou blanches selon leur complexité, les données disponibles, les économies d'énergie que l'on peut s'attendre à y trouver, etc.

Pour chaque procédé considéré comme une boîte blanche, la cible de consommation minimale d'énergie est déterminée au moyen des courbes composites de l'analyse Pinch. Ceci permet de déterminer si, pour ces procédés, les projets de récupération de chaleur à l'intérieur même du procédé seront analysés plus en détail ou non au cours de la phase 2 (ce sera le cas si le potentiel d'économie d'énergie identifié, i.e. la différence entre la consommation actuelle d'énergie du procédé et sa cible de consommation minimale d'énergie, est significative). L'établissement des cibles de consommation minimale du site sont déterminées en utilisant les courbes des sources et des puits de chaleur tel que présenté à la **figure 3.18**. Ces cibles permettent de déterminer si des projets d'intégration indirecte de chaleur entre les procédés (par l'intermédiaire du réseau de vapeur) seront détaillés ou non lors de la phase 2.

En plus du modèle d'analyse présenté dans cette section, un modèle du réseau des utilités du site sera généralement développé pour déterminer l'influence des projets proposés sur l'utilisation et la distribution de vapeur dans l'ensemble du site ainsi que sur la production d'électricité (**figure 3.20**). Par exemple, ce modèle permettra de calculer le débit de vapeur (pour chaque niveau de pression) qui passera dans chaque turbine, la production d'électricité qui en résultera et le débit de vapeur qui passera par les stations de détente pour abaisser la pression.

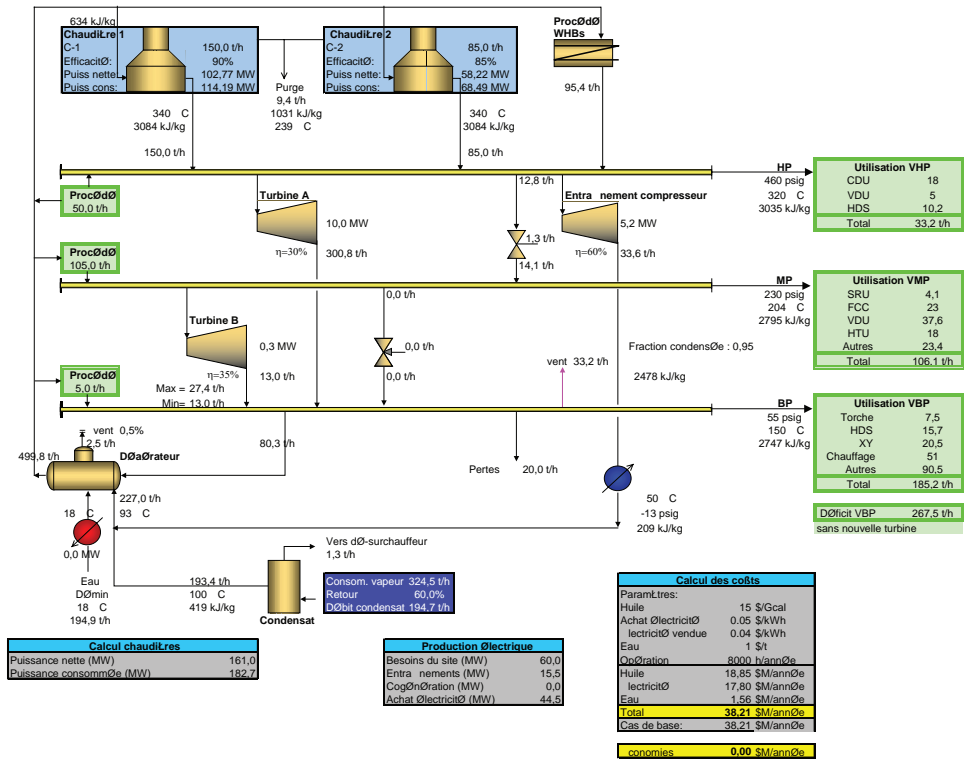
Cette approche permet de concentrer les efforts de conception sur les projets qui permettront de générer les économies d'énergie les plus importantes. La phase 1 permet d'obtenir les résultats suivants :

- Une cible fiable du potentiel d'économies d'énergie pour l'ensemble du site ;
- Une identification des procédés et équipements qui méritent des efforts plus poussés pour réaliser des économies d'énergie.

Ainsi, on réduira l'effort à consacrer à la phase 1 en répartissant judicieusement les procédés en boîtes blanches, grises ou noires. L'effort sera également réduit dans la phase 2 puisque le travail se limitera aux procédés pour lesquels un potentiel d'économies d'énergie significatif a été identifié à la phase 1.

Figure 3.20

Exemple de modèle simplifié des utilités d'une raffinerie de pétrole



### Phase 2 : Développement des projets

L'objectif de la phase 2 (boîtes en clair sur la *figure 3.19*) est d'analyser plus en détails les projets qui permettront d'atteindre les critères financiers de l'usine et d'élaborer une stratégie cohérente d'investissements. Cette stratégie comprend certains détails sur les projets comme les économies réalisées, les investissements requis, les conséquences sur les émissions et la compatibilité des projets entre eux. Elle constitue donc une base rigoureuse sur laquelle le personnel du site peut planifier une stratégie efficace en réponse aux enjeux énergétiques qui se présenteront à long terme sur le site.

La technique d'analyse globale d'un site industriel présentée dans cette section est généralement connue sous le nom de « Total Site Analysis ». Certains logiciels utilisant cette approche sont disponibles sur le marché. D'autres techniques d'analyse globale d'un site sont actuellement en développement (notamment une technique du nom de « Top Level Analysis ») et devraient être disponibles sur le marché d'ici quelques années.



### 3.3 Analyse Pinch appliquée aux réseaux d'eau

Au cours des vingt dernières années, l'impact environnemental des sites industriels est devenu une préoccupation de plus en plus importante. Les gouvernements ont introduit de nouvelles lois sur la protection de l'environnement et se sont dotés des moyens nécessaires pour les faire respecter.

Aujourd'hui, la réduction de la consommation d'eau et des rejets dans l'environnement est devenue l'un des plus grands défis auxquels les industries doivent faire face. Comme les effluents liquides constituent souvent l'un de leurs plus grands rejets, la possibilité de pouvoir réutiliser les eaux usées peut donc devenir un enjeu essentiel.

Il n'est pas facile d'identifier ni de mettre en oeuvre les possibilités d'économiser et de réutiliser l'eau. Il existe en effet de nombreuses technologies qui proposent différentes solutions plus ou moins évidentes dont l'ingénieur doit évaluer l'intérêt.

L'analyse Pinch appliquée à l'eau est une technique systématique d'analyse des réseaux d'eau d'un site industriel. Elle permet d'identifier des projets conduisant à une meilleure utilisation de l'eau dans les procédés. Les techniques les plus performantes utilisent des algorithmes puissants qui identifient et optimisent les meilleures possibilités de réutilisation ou de régénération (traitement partiel des eaux de procédé pour en permettre la réutilisation) de l'eau ainsi que d'amélioration du traitement des effluents.

Actuellement, la motivation la plus importante pour réaliser une analyse Pinch du réseau d'eau d'une usine est la réduction de la quantité d'effluents rejetés afin de réduire les investissements nécessaires à une hausse de capacité du système de traitement. La simple économie d'eau ou la simple réduction des rejets liquides à traiter ne peuvent justifier à elles seules, sur le plan économique, la réalisation d'une analyse Pinch. Cependant, comme pour l'énergie, l'analyse Pinch appliquée à l'eau devrait faire partie des méthodes de conception de tout nouveau procédé et devrait être incorporée dans les habitudes de travail des ingénieurs. En développant le réflexe de toujours essayer d'associer les sources (rejets d'eau d'un équipement ou procédé) avec les demandes (besoins d'eau d'un équipement ou procédé) dans le respect des règles de base de l'analyse Pinch, on générera des idées très intéressantes pour optimiser la conception d'un procédé.

L'analyse Pinch d'un réseau d'eau industriel peut être appliquée à la plupart des procédés industriels où il y a une utilisation d'eau propre et une production d'eaux usées. La méthode s'adresse principalement aux sites industriels ayant des réseaux d'eau complexes et a fait ses preuves dans un grand nombre de secteurs industriels.

Des réductions importantes de consommation d'eau et de production d'eaux usées ont ainsi été obtenues en appliquant l'analyse Pinch dans plusieurs secteurs de l'industrie. Par exemple, dans les raffineries de pétrole, l'industrie chimique, les secteurs des pâtes et papiers et de l'agroalimentaire, des économies possibles d'eau de 25 à 40 % ont été identifiées.

Le potentiel de réduction de la consommation d'eau dépendra largement des objectifs du projet. De bonnes solutions, identifiées avec l'analyse Pinch, auront souvent des impacts dépassant largement la simple économie d'eau. Bien souvent, elles entraîneront également la réduction des investissements en capital, la récupération de matières premières ayant une valeur intéressante et même parfois la récupération d'énergie thermique.

Cette section donne un aperçu des principes de base de l'analyse Pinch appliquée à la réduction de la consommation d'eau industrielle. L'approche permettant de réduire la consommation d'eau propre et de réduire la production d'eaux usées y est présentée. Plus de détails peuvent être trouvés dans les références présentées à la fin du guide.

### Les similarités avec l'analyse Pinch appliquée à l'énergie

Les techniques d'intégration des procédés utilisant l'analyse Pinch sont utilisées avec succès depuis de nombreuses années pour améliorer l'efficacité énergétique des procédés industriels. Des techniques analogues sont maintenant disponibles pour réduire la consommation d'eau et réduire la production d'eaux usées.

Ainsi, plusieurs outils, initialement développés dans le cadre de l'analyse Pinch sur l'énergie, réapparaissent en analyse Pinch appliquée à l'eau. C'est le cas notamment des courbes composites. La **figure 3.21** illustre la courbe composite des sources (rejets d'eau) et la courbe composite des demandes (besoins en eau) d'un procédé pour le cas où un seul contaminant important serait présent dans les courants d'eau. Alors que dans l'analyse énergétique les courbes composites ont comme coordonnées la température et la charge thermique, ici, la pureté de l'eau (qualité) est exprimée en fonction du débit d'eau (quantité). Les courbes composites représentent l'ensemble des courants d'eau d'une qualité donnée disponible sur le site (courbe des sources) ou requis par l'ensemble du procédé (courbe des demandes). Pour les construire, il est nécessaire de connaître le débit et la concentration en contaminant de chaque courant d'eau significatif de l'usine. La courbe des sources de la **figure 3.21** comprend trois courants (1, 2 et 3) et chacun d'eux est caractérisé par un débit et une concentration (par exemple, le courant 1 a une concentration de 200 ppm et un débit de 38 l/s). Chaque courant est placé sur la courbe en partant du plus contaminé vers le plus propre en prenant soin de les relier par un trait vertical pour obtenir une courbe continue. La courbe des demandes est construite de la même façon. Elle est alors positionnée arbitrairement sur l'axe des abscisses du diagramme pour être ensuite déplacée horizontalement de la droite vers la gauche jusqu'à ce que les 2 courbes se touchent au point de pincement.

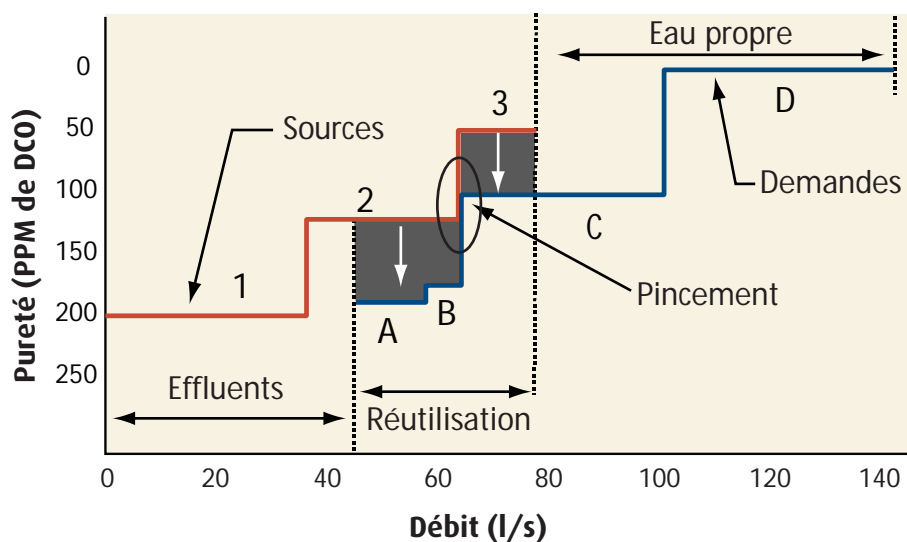


Figure 3.21

Courbes composites illustrant l'ensemble des sources et demandes d'eau d'un procédé industriel

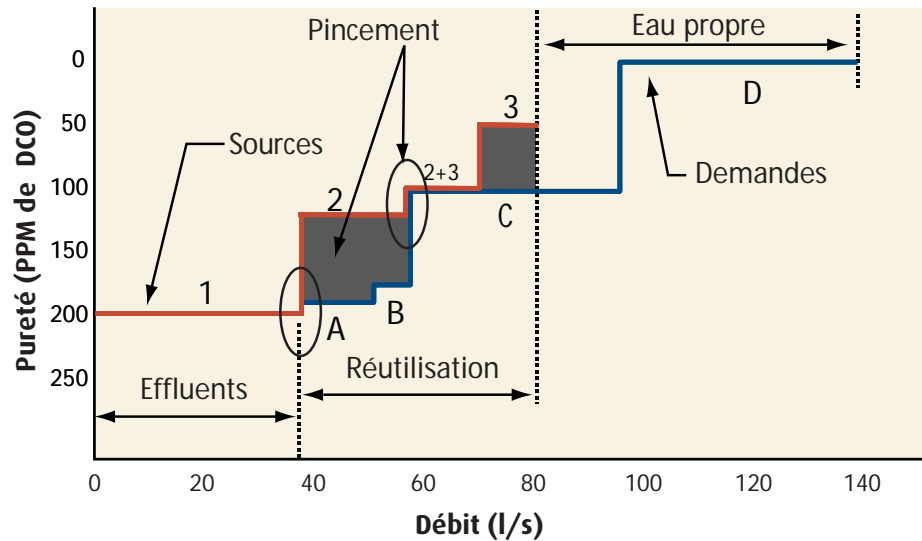
La zone de recouvrement entre la courbe des sources et celle des demandes, indique les possibilités de réutilisation d'eau. L'étendue de la zone de récupération est limitée par le point de pincement qui est l'endroit où les deux courbes se touchent. Dans la zone où il n'y a pas de recouvrement, les écarts entre les extrémités des courbes indiquent les besoins en eau propre (zone à droite des courbes) et la production d'eau usée (zone à gauche des courbes).

Pour réduire la consommation d'eau propre et la production d'effluents de l'usine, il est possible de mélanger certains courants sources (par exemple les courants 2 et 3 de la *figure 3.21*) de façon à combler les exigences de pureté du courant demande C. Ce faisant, le point de pincement est déplacé permettant ainsi à la courbe composite des demandes de glisser vers la gauche jusqu'à ce qu'un nouveau point de pincement bloque à nouveau son déplacement (*figure 3.22*). La zone de réutilisation d'eau est ainsi augmentée et la consommation d'eau propre réduite.

Pour réduire encore plus la consommation d'eau propre, les courants sources 1 et 2 (*figure 3.22*) peuvent être mélangés dans les bonnes proportions pour combler les exigences de pureté du courant demande A alors que les courants sources 2 et 3 peuvent à nouveau être mélangés pour satisfaire une plus grande partie du courant demande C. On répète ce processus jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible de déplacer la courbe composite des demandes. À ce moment, la zone de chevauchement indique la quantité d'eau maximale qu'il est possible de réutiliser alors que les extrémités gauche et droite des courbes représentent respectivement la cible de production minimale d'effluents et la cible de consommation minimale d'eau propre. Ces cibles ressemblent beaucoup à celles des besoins minimums de chaleur et de refroidissement dans l'analyse Pinch appliquée à l'énergie.

Figure 3.22

Mélange de courants sources pour réduire la consommation d'eau propre et la production d'effluents



### Analyse lorsqu'il y a plusieurs contaminants dans l'eau

Jusqu'à présent, l'application de l'analyse Pinch à la gestion de l'eau a été présentée pour un seul contaminant mais les courants d'eau que l'on retrouve dans un procédé industriel contiennent généralement plusieurs contaminants.

Théoriquement, des courbes composites pourraient être produites pour chaque contaminant. L'analyse aboutirait alors à une stratégie d'utilisation optimale de l'eau pour chacun des contaminants. Cette stratégie serait toutefois différente pour chacun des contaminants ce qui nécessiterait la conception d'un réseau d'eau pour chaque contaminant.

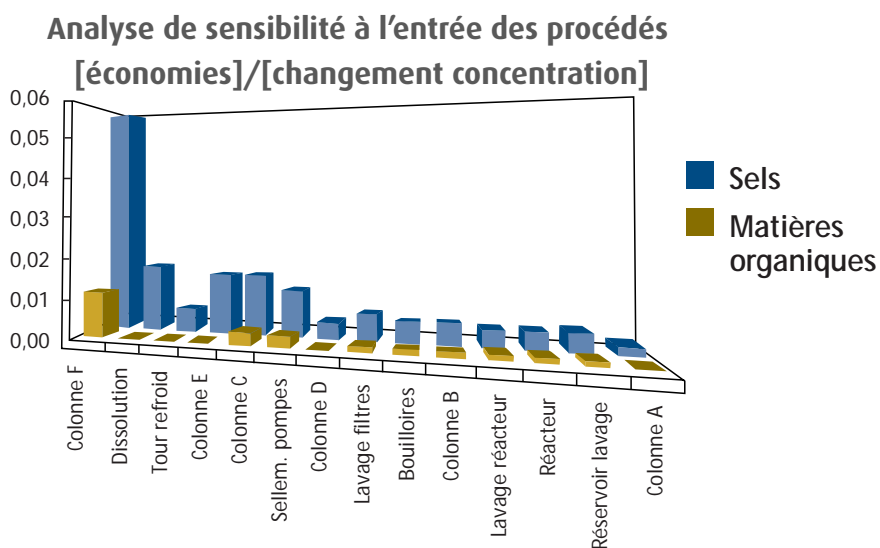
Dans la pratique, il n'est pas possible d'avoir plusieurs réseaux d'eau et une seule conception, valable pour tous les contaminants, doit être obtenue. La configuration retenue doit donc être le meilleur compromis satisfaisant les contraintes de qualité pour l'ensemble des contaminants tout en consommant le moins d'eau propre possible.

La recherche de ce compromis optimal est difficile et les méthodes graphiques traditionnelles d'analyse deviennent itératives et fastidieuses. C'est pourquoi une modélisation mathématique du problème est plutôt utilisée pour prendre en compte les différentes options possibles. Des outils d'optimisation mathématique sont alors utilisés pour déterminer la configuration du réseau d'eau qui réduira les coûts du système à leur valeur minimale tout en maximisant la réutilisation d'eau et en respectant les contraintes de débit et de concentration pour chaque contaminant et pour chaque procédé/équipement où elle est utilisée. Des logiciels spécialisés d'analyse Pinch des réseaux d'eau utilisant cette approche sont disponibles sur le marché.

## Analyse de sensibilité

La possibilité de réaliser des analyses de sensibilité est l'un des principaux avantages de l'analyse Pinch appliquée à l'eau. Alors que les courbes composites sont des graphiques en deux dimensions (concentration en contaminant en fonction du débit), l'analyse de sensibilité est le résultat d'une analyse sur plusieurs contaminants à la fois et sur chacune des opérations ou équipements clés du procédé étudié.

Généralement cette analyse est représentée sous la forme d'un histogramme (**figure 3.23**) et elle indique sur quels procédés ou équipements de l'usine une hausse de la concentration maximale de contaminant que l'on est prêt à tolérer pourrait conduire aux plus grandes économies. C'est donc à ces endroits que les efforts devraient être concentrés lors de la conception du procédé. L'analyse de sensibilité indique également les endroits du procédé peu sensibles à tout changement de concentration en contaminant et qui ne devraient pas faire l'objet d'efforts particuliers car les économies d'eau à y réaliser n'y seraient pas importantes. Par exemple, le fait d'accepter une eau plus chargée à la colonne F permettrait de réduire significativement les coûts d'opération du système alors que l'effet serait négligeable sur la colonne A.



**Figure 3.23**

Exemple  
d'analyse  
de sensibilité

Une analyse de sensibilité similaire peut être effectuée sur la concentration des courants d'eau rejetés par un procédé ou équipement. Dans ce cas, l'analyse indiquerait quels sont les courants d'eau qu'il serait intéressant de traiter avant de les réutiliser dans le procédé.

Les résultats de l'analyse de sensibilité ne sont valides que pour un réseau d'eau donné et tout changement dans la structure de ce réseau modifiera la sensibilité de chaque équipement ou procédé aux variations de concentration. Au cours de la conception d'un réseau d'eau, on pourra donc avoir recours à cette analyse de sensibilité à plusieurs reprises, i.e., à chaque fois qu'une modification est apportée au réseau.

### Types de réutilisation d'eau possibles

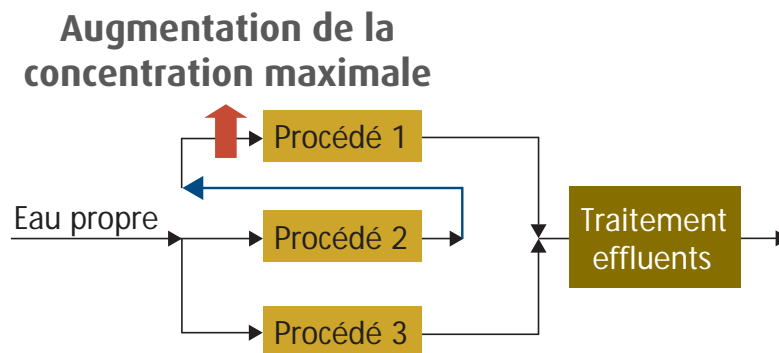
Au cours d'une analyse Pinch visant à réduire la consommation d'eau d'un site industriel, plusieurs types de solutions de réutilisation, avec ou sans traitement, sont successivement étudiés:

L'analyse débute en supposant que toutes les concentrations à l'entrée de tous les équipements ou procédés (concentrations des demandes en eau) du site sont à leur valeur admissible maximale. Cette étape indique le besoin minimum d'eau dans les conditions actuelles d'exploitation du procédé. Les projets identifiés à cette étape seront des projets à bas coût impliquant uniquement des modifications à la tuyauterie de l'usine, ce qui permet généralement d'identifier seulement quelques opportunités de réutilisation d'eau.

L'étape suivante consiste à procéder à une analyse de sensibilité afin d'identifier les projets où de grandes économies d'eau pourraient être réalisées si certains procédés ou équipements pouvaient tolérer des concentrations en contaminant plus élevées (**figure 3.24**). Le défi principal est d'identifier les concentrations maximales acceptables pour ne pas perturber le fonctionnement du procédé. Pour ce faire, il est nécessaire d'entreprendre des discussions avec les exploitants du procédé et les ingénieurs afin d'évaluer les risques que cela peut présenter au niveau de la qualité de la production ou de la corrosion de certains équipements. Dans certains cas, on devra avoir recours à des experts externes, aller chercher des données supplémentaires auprès des manufacturiers ou encore procéder à des études de faisabilité.

**Figure 3.24**

Réutilisation d'eau en acceptant une augmentation de concentration à l'entrée de certains procédés



La plupart des projets de réutilisation d'eau sont élaborés à cette étape. En général, ils consistent essentiellement à apporter des modifications relativement simples à la tuyauterie du réseau. Cette étape permet généralement d'identifier quelques projets de réutilisation d'eau de plus grande importance.

Après avoir évalué les possibilités de réutilisation d'eau sans traitement, on identifie les principaux courants d'eau (sources) pouvant être traités pour être ensuite réutilisés dans le procédé et ainsi réduire davantage la consommation d'eau de l'usine (**figure 3.25**). Pour ce faire, on évalue la possibilité d'installer de nouvelles unités de traitement et d'utiliser plus efficacement les unités existantes. À cette étape, les projets identifiés nécessiteront généralement des investissements pour installer certains équipements de traitement.

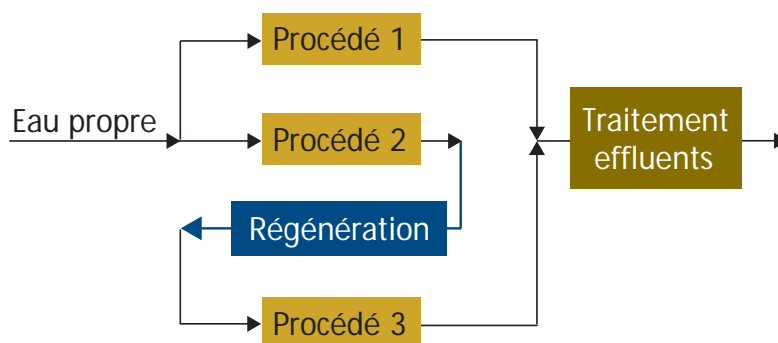


Figure 3.25

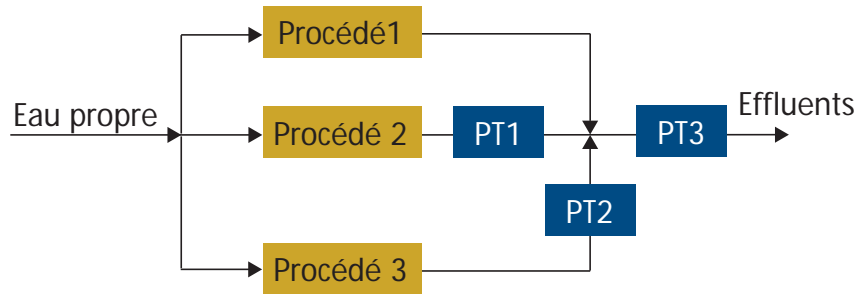
Traitement partiel et réutilisation d'eau

L'étape finale consiste à évaluer les différentes options de traitement distribué des effluents. Plutôt que de mélanger tous les courants d'eau usée pour les traiter dans une seule station de traitement, il peut être judicieux de séparer les différents courants en fonction du type et/ou de la concentration en contaminant et de les traiter séparément (**figure 3.26**). De cette manière, on peut concevoir des unités de traitement recevant chacune un plus petit débit mais plus fortement chargé en certains contaminants plutôt qu'un grand débit où chaque contaminant a été dilué.

Par exemple, si le procédé 3 rejette de l'eau très chargée en un certain contaminant A et légèrement chargée en contaminant B alors que le procédé 2 rejette de l'eau peu chargée en contaminant A mais davantage chargée en contaminant B, le système de traitement distribué présenté à la **figure 3.26** pourrait être une option intéressante pour réduire les coûts en capital et d'opération du système. Le procédé de traitement 1 (PT1) devrait alors être très performant pour éliminer le contaminant B alors que le procédé de traitement 2 (PT2) devrait être très performant pour éliminer le contaminant A.

Figure 3.26

Traitement  
distribué  
des effluents



Les systèmes de traitement distribués sont très intéressants car ils sont souvent moins coûteux à implanter et ont une plus grande efficacité de traitement.

### Déroulement d'une analyse Pinch pour réduire la consommation d'eau

Une analyse Pinch typique comprend généralement trois phases :

#### Phase 1 - Établissement des bilans de masse

Dans toute analyse Pinch d'un réseau d'eau, il est essentiel de disposer d'un bilan précis sur l'eau et les contaminants contenus dans l'eau, mais également de connaître les objectifs de l'usine pour les prochaines années, notamment au niveau des projets d'expansion.

Les principales étapes de cette phase consistent à :

- Valider les bilans d'eau existants ou en produire de nouveaux si nécessaire ;
- Identifier et résoudre les éventuelles incohérences dans les données récoltées en réalisant, si nécessaire, des mesures supplémentaires de débits d'eau et de concentrations en contaminant. A ce stade, l'utilisation de logiciels commerciaux de réconciliation de données peut être utile pour identifier les endroits du procédé d'où proviennent les incohérences ;
- Identifier les différents points du site où des eaux usées sont produites en prenant soin d'identifier les éventuels problèmes associés à ces eaux usées ainsi que les principaux contaminants qu'on y retrouve.



## Phase 2 - Analyse Pinch pour réduire la consommation d'eau

L'objectif de la phase 2 est d'identifier les économies potentielles dans le réseau d'eau actuel du site (ou de l'usine en projet si elle n'est pas encore construite) et d'identifier les principales opérations/équipements où les économies d'eau seraient probablement les plus grandes.

Les principales étapes de cette phase sont présentées en détails à la section précédente et illustrées dans les *figures 3.24* à *3.26*. Elles consistent à :

- Identifier la cible de consommation minimale d'eau propre pour les conditions d'exploitation existantes ;
- Identifier la cible de consommation minimale d'eau propre si une hausse des concentrations maximales admissibles est effectuée pour certains procédés ou équipements ;
- Identifier la cible de consommation minimale d'eau propre en régénérant certains courants de procédé avant de les réutiliser ;
- Analyser les possibilités de traitement distribué des effluents ;
- Réaliser une analyse préliminaire des projets identifiés aux points précédents ;
- Analyser de façon détaillée les options de traitement des eaux usées les plus prometteuses, notamment en évaluant les technologies disponibles (membranes, traitement biologique, décantation, etc.) et en choisissant les meilleures options pour une application donnée.

## Phase 3 - Identification des projets & établissement d'une stratégie d'investissement

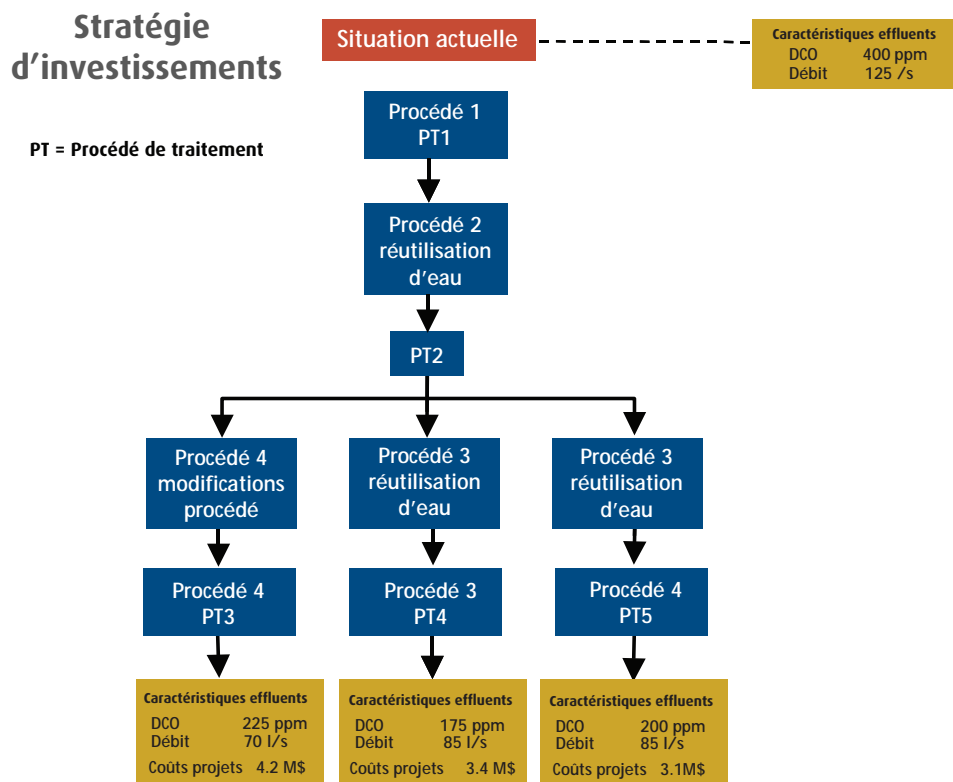
L'objectif de cette phase est d'évaluer l'ensemble des projets qui ont été identifiés au cours des phases précédentes et de développer une stratégie cohérente d'investissement qui recommande souvent plusieurs options de projets avec les économies qu'ils engendrent et les coûts qu'ils représentent.

Les étapes de cette dernière phase consistent à :

- Définir un ensemble de projets, incluant une illustration schématique des modifications proposées, avec une indication des économies qu'ils pourraient générer ;
- Réaliser la conception préliminaire des projets proposés sans entrer dans l'ingénierie détaillée (telle que le dimensionnement des pompes et des tuyaux, le choix des matériaux, etc.) ;
- Établir une stratégie d'investissements identifiant les bénéfices réalisables et les coûts qu'ils représentent. Par exemple, la **figure 3.27** illustre les stratégies possibles d'investissements suite à une étude visant à réduire le débit et la charge de contaminant de l'effluent d'une usine au moyen de stratégies de réutilisation d'eau et de systèmes de traitement distribués.

Figure 3.27

Exemple  
d'une stratégie  
d'investisse-  
ments pour  
réduire les coûts  
d'un nouveau  
système  
de traitement  
des eaux usées



### 3.4 Analyse Pinch pour réduire la consommation d'hydrogène

L'évolution récente des lois sur l'environnement et la demande des marchés forcent l'industrie du raffinage de pétrole à réviser constamment ses pratiques. La réglementation tend à réduire toujours davantage la teneur en soufre des produits pétroliers, les marchés s'orientent vers des carburants plus légers alors que le pétrole brut disponible tend à contenir de plus en plus de soufre et à être constitué de plus en plus de composés lourds. Les raffineries doivent donc s'adapter rapidement à ces variations tout en demeurant profitables. Au cœur de ces problématiques se trouve la gestion de l'hydrogène.

En effet, la demande en hydrogène ne cesse de croître afin de pouvoir satisfaire aux capacités additionnelles d'hydrotraitement nécessaires à la production de produits à basse teneur en soufre à partir de pétrole brut de plus en plus lourd et acide, ainsi que pour produire des essences plus légères par procédé de craquage. Simultanément, certaines raffineries réduisent la quantité de naphta reformé de manière à respecter les teneurs limites en composés aromatiques, ce qui a comme conséquence de produire moins d'hydrogène sur le site. En plus d'avoir à envisager une hausse de la capacité de production d'hydrogène, une conséquence de ces changements est donc que le bilan de l'hydrogène dans les raffineries a significativement changé en même temps que l'offre et la demande d'hydrogène sur le site.

La gestion de l'hydrogène devient donc un véritable défi pour l'ensemble du secteur du raffinage de pétrole. Plusieurs raffineurs se trouvent contraints d'avoir à faire des choix pénibles entre investir dans de nouveaux procédés, importer du pétrole brut de meilleure qualité mais plus cher ou encore diminuer la production de certains produits à haute valeur ajoutée. Les questions qui se posent alors sont les suivantes :

- Qu'est-ce qui peut être fait avec les équipements existants ?
- Quel scénario d'investissement est-il nécessaire d'adopter pour maintenir la rentabilité d'exploitation ?
- Est-il possible de bénéficier de nouvelles opportunités d'affaire découlant des récents changements dans les lois environnementales ?

Afin d'équilibrer l'offre et la demande, d'importants investissements sont souvent envisagés pour construire de nouvelles unités de production d'hydrogène ou pour récupérer davantage d'hydrogène au sein même des procédés de la raffinerie.

L'analyse Pinch appliquée à l'hydrogène permet d'identifier des solutions optimales pour équilibrer l'offre et la demande d'hydrogène. La méthode tient compte aussi bien des données économiques sur l'approvisionnement en hydrogène, que des capacités de production ou de récupération d'hydrogène aux différents points du site ou encore des coûts en capital des solutions envisageables. Cette démarche permet

d'obtenir des solutions pratiques et rentables tout en respectant les nouvelles spécifications exigées des raffineries. L'approche permet d'optimiser le réseau d'hydrogène d'une raffinerie et d'augmenter sa rentabilité en réduisant les coûts d'exploitation des systèmes de production et de distribution d'hydrogène et en augmentant les bénéfices tirés de la production. Comme bénéfice additionnel, on notera qu'en plus d'abaisser les coûts d'exploitation du site, une bonne gestion de l'hydrogène permet également de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> associées à sa production.

Les économies typiques qui découlent d'une analyse Pinch appliquée à l'hydrogène sont les suivantes :

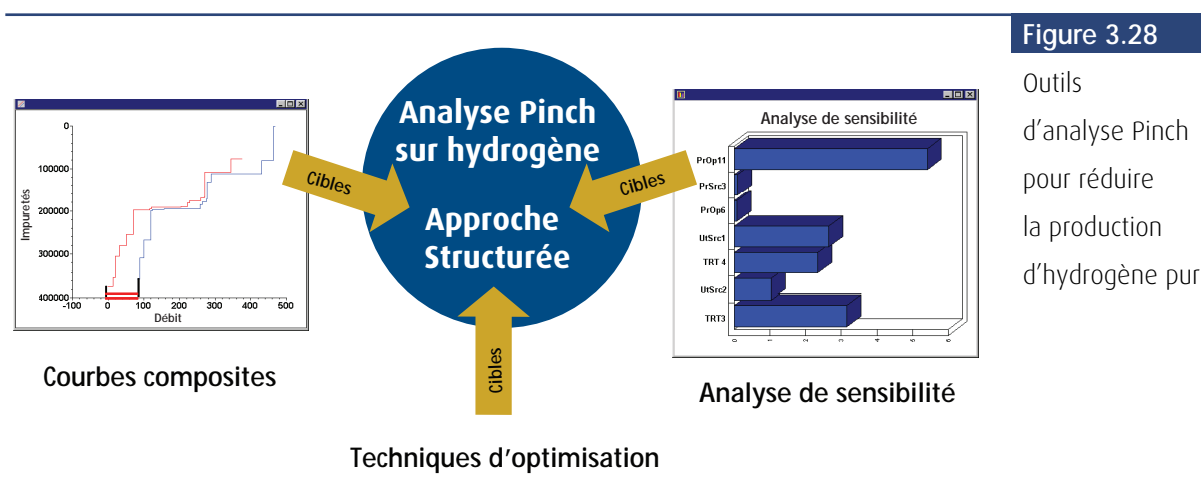
- Réduction de la demande en hydrogène jusqu'à 20 %
- Réduction des coûts d'exploitation des systèmes de production et de distribution d'hydrogène jusqu'à 15 %
- Baisse des dépenses en capital jusqu'à 15 %
- Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> jusqu'à 160 kg pour 1000 barils de brut traité

Cette section décrit brièvement les principes de base de l'analyse Pinch appliquée à l'hydrogène et l'approche utilisée pour augmenter la production de produits à haute valeur ajoutée, réduire les coûts d'exploitation des systèmes d'hydrogène et limiter les dépenses en capital entraînées par le nouveau contexte décrit précédemment. Plus de détails peuvent être trouvés dans les références présentées à la fin de ce guide.

### Les similarités avec les analyses Pinch appliquées à l'eau et à l'énergie

Les bases de l'analyse de réseaux d'hydrogène sont très proches de celles qui ont été développées pour la récupération d'énergie ou la réduction de la consommation d'eau. Les réseaux d'hydrogène et d'eau ont en commun le fait qu'ils véhiculent un fluide qui peut être caractérisé par son débit et sa pureté. Ainsi, la définition des courbes composites pour une analyse sur l'hydrogène est similaire à celle qui a été développée pour l'analyse Pinch pour l'énergie et pour l'eau où l'on représente toujours la qualité en fonction de la quantité. Dans le cas de l'hydrogène, le débit est représenté sur l'axe des abscisses et la pureté (dans un mélange gazeux constitué de plusieurs gaz, la pureté correspond à la fraction d'hydrogène dans ce mélange) sur l'axe des ordonnées.

Ainsi, comme pour les courbes composites dans l'analyse Pinch sur l'eau, le potentiel de réutilisation de l'hydrogène est représenté par la zone de recouvrement entre les courbes composites représentant les sources (débit et pureté des courants d'hydrogène sortant des procédés) et les demandes (débit et pureté requis par les procédés) d'hydrogène. Le potentiel de récupération est limité par le point de pincement, là où les courbes se touchent (*figure 3.28*). L'objectif de consommation minimale d'hydrogène pur (qui doit être préparé par une unité de production ou acheté à l'extérieur) est donné par l'écart horizontal entre les courbes au niveau de pureté supérieur (extrémité supérieure droite des courbes composites). La quantité minimale d'hydrogène qui doit être évacuée du réseau (purgée parce que sa pureté n'est pas suffisante pour être réutilisée) est, quant à elle, déterminée par l'écart entre les courbes au niveau de pureté inférieur (extrémité inférieure gauche des courbes composites). Dans le cas des réseaux d'hydrogène, la purge est généralement mélangée avec d'autres combustibles gazeux pour produire de l'énergie sur le site.


**Figure 3.28**

Outils  
 d'analyse Pinch  
 pour réduire  
 la production  
 d'hydrogène pur

Plusieurs facteurs distinguent l'utilisation de l'hydrogène de l'utilisation de l'eau ou de l'énergie :

- Les coûts** : Comme l'hydrogène est très coûteux et que les équipements de production d'hydrogène sont particulièrement onéreux, les réseaux d'hydrogène sont généralement fortement intégrés et les purges des procédés sont généralement récupérées et réutilisées sur le site.
- La pression** : Comme l'hydrogène est un gaz et qu'il est souvent utilisé à assez haute pression, les coûts de compression sont élevés. Le niveau de pression est donc un paramètre important dans l'évaluation économique globale de ce système.

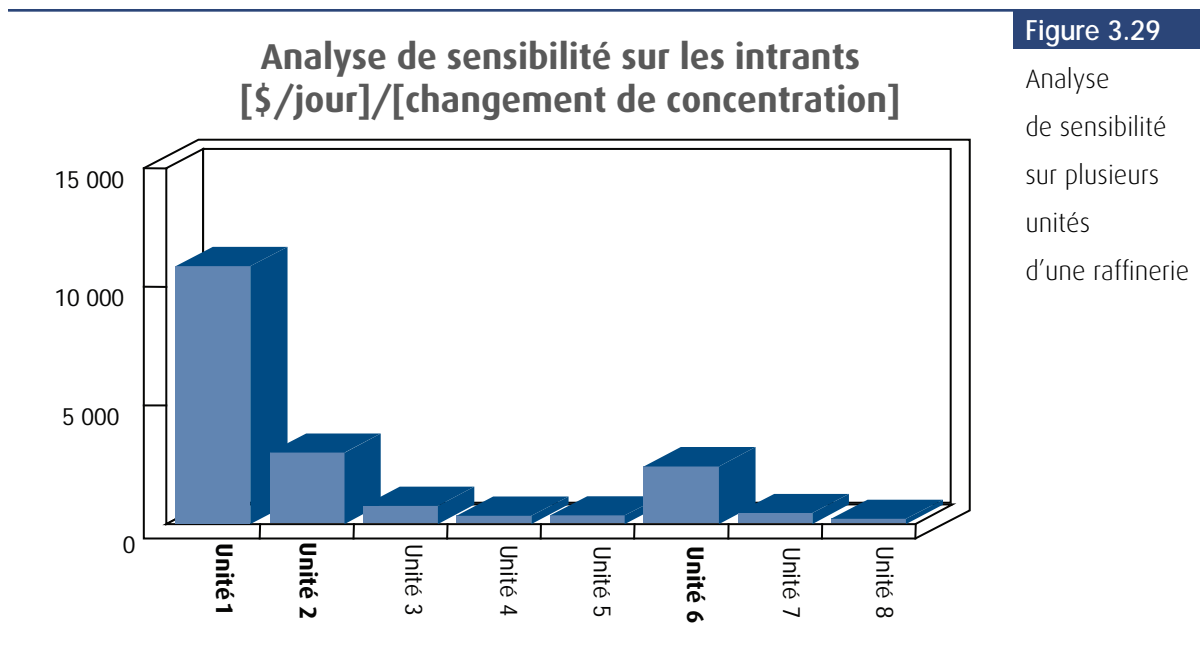
- **L'effet de la pureté sur la production** : La pureté de l'hydrogène a une influence sur la rentabilité de l'exploitation de la raffinerie, aussi bien au niveau de la capacité de production, de la qualité de la production que de la durée entre chaque arrêt pour effectuer la maintenance.

Ces trois facteurs sont difficiles à représenter sur un même graphique. On a donc recours à des techniques d'optimisation mathématique, similaires à celles utilisées pour l'analyse Pinch sur l'eau, pour optimiser les réseaux d'hydrogène (**Figure 3.28**). Cependant, ces techniques ont été adaptées de manière à prendre en compte les spécificités d'une analyse sur l'hydrogène et ainsi maximiser la profitabilité (en réduisant les coûts d'exploitation et en augmentant la valeur de la production) de la raffinerie tout en réduisant au minimum les investissements nécessaires pour réaliser un réseau d'hydrogène optimal.

### Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est également un outil très utile pour l'optimisation des réseaux d'hydrogène (**Figures 3.28 et 3.29**). Toutefois, ses enseignements sont assez différents de ceux obtenus à partir d'une analyse de sensibilité pour les réseaux d'eau. En effet, lors de l'optimisation d'un réseau d'eau, l'enjeu est de pouvoir identifier de nouvelles utilisations possibles pour l'eau lorsqu'on accepte qu'elle ait une pureté moins grande, ce qui normalement permet de réduire les coûts d'exploitation de l'ensemble du système. On pourrait appliquer cette méthode aux réseaux d'hydrogène, mais, en pratique, il est très rare que l'on retrouve une raffinerie où il est possible d'accepter une moins grande pureté d'hydrogène. En effet, une dégradation de la pureté d'hydrogène (concentration plus faible) a un impact considérable sur le rendement d'un procédé consommateur d'hydrogène, et donc sur sa rentabilité. On notera cependant que des bénéfices importants et rentables ont été identifiés grâce à cette méthode dans des cas particuliers de désengorgement de réseaux d'hydrogène.

Une analyse de sensibilité pour les unités qui produisent de l'hydrogène permet d'identifier celles pour lesquelles de meilleurs procédés de purification permettraient de produire de l'hydrogène d'une qualité suffisante pour en permettre la réutilisation dans les procédés qui en consomment. Une analyse de sensibilité sur les procédés qui consomment de l'hydrogène permet quant à elle d'identifier les procédés pour lesquels une hausse de la pureté de l'hydrogène peut être la plus profitable (considérant d'une part les bénéfices sur la production et d'autre part les coûts pour obtenir de l'hydrogène plus pur en fonction des niveaux de pureté et de pression disponibles sur le site). Cette démarche offre généralement le meilleur potentiel pour identifier des économies sur les coûts en hydrogène et des améliorations de la production du site.



### Déroulement typique d'une analyse Pinch appliquée à l'hydrogène

Une analyse Pinch appliquée à l'hydrogène comprend généralement plusieurs phases qui peuvent répondre à certains objectifs bien particuliers (par exemple, réduire les coûts du réseau d'hydrogène d'une raffinerie, améliorer la gestion de l'hydrogène sur un site, désengorger la production en certains points du procédé, améliorer l'efficacité énergétique et réduire les impacts environnementaux). Souvent, une première phase consiste à optimiser la consommation d'hydrogène pour les conditions existantes d'exploitation, tandis qu'une deuxième phase permet d'élaborer une stratégie optimale d'investissements pour des conditions d'exploitation futures.

Selon les objectifs de l'étude, jusqu'à quatre types de cible de réduction des coûts de production et d'utilisation de l'hydrogène peuvent être déterminés au cours d'une analyse Pinch :

- **Première cible - Optimisation du cas de référence**

Cette cible permet d'identifier les meilleures possibilités de réduction des coûts du réseau d'hydrogène pour la configuration et le mode d'exploitation existants. L'objectif est d'identifier des améliorations à faible coût (voire aucun coût) qui pourraient être apportées dans l'utilisation de l'hydrogène. Comme les systèmes existants sont généralement bien intégrés, cette phase peut être considérée comme une optimisation de l'exploitation du réseau existant. En général, les économies identifiées à cette étape sont faibles, mais permettent d'établir une valeur référence pour la suite du travail.

- **Deuxième cible - Réduire les investissements**

Cette phase permet d'identifier des modifications à faible coût telles que des modifications à la tuyauterie. Certains équipements comme des compresseurs et des unités de purification peuvent également être inclus dans l'analyse.

- **Troisième cible - Ajout de nouveaux équipements**

Cette analyse comporte moins de contraintes que celles qui précèdent dans la mesure où des modifications plus complexes (et plus coûteuses) au réseau d'hydrogène sont permises. En plus de modifications importantes au niveau de la tuyauterie du réseau d'hydrogène, cette cible inclut également les bénéfices liés à l'installation de nouveaux compresseurs, de nouvelles unités de purification et de nouvelles unités de production d'hydrogène.

- **Quatrième cible - Modifications aux procédés**

À cette étape, les changements aux conditions d'exploitation des procédés consommateurs et producteurs d'hydrogène sont considérés. Cette cible est celle qui pourrait conduire aux bénéfices les plus importants mais peut nécessiter de très grands investissements.

L'approche ci-dessus permet de présenter les différentes phases de l'analyse selon le niveau d'investissement qu'elles nécessitent. La première cible correspond à un investissement très faible tandis que les troisième et quatrième cibles correspondent aux investissements les plus importants. Ces quatre cibles, et les projets qui permettent de les atteindre en pratique, forment la base d'une stratégie d'investissement pour l'amélioration de la gestion de l'hydrogène sur un site.

Une analyse Pinch appliquée à l'hydrogène dans une raffinerie nécessite l'utilisation d'un logiciel d'analyse des réseaux d'hydrogène et une solide expérience dans l'analyse des procédés de raffinage du pétrole. À notre connaissance, aucun logiciel spécifiquement destiné à l'analyse Pinch des réseaux d'hydrogène n'est, à ce jour (septembre 2003), disponible sur le marché. Les consultants spécialisés dans ce domaine disposent généralement d'un logiciel qu'ils ont eux même développé à l'interne.



## RÉFÉRENCES

Les publications dans le domaine de l'intégration des procédés sont nombreuses. La liste qui suit ne fait pas nécessairement référence aux derniers travaux dans le domaine de l'intégration des procédés. Elle présente seulement quelques documents illustrant plus en détails les concepts présentés dans ce guide.

### Livres et guides

Gundersen, T., A Process Integration Primer, International Energy Agency - Implementing agreement on process Integration, 2000.

Linnhoff, B. User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, The Institution of Chemical Engineers, UK, 1994.

Rossiter, A. P., Waste Minimization Through Process Design, McGraw-Hill, 1995.

Smith, R., Chemical Process Design, McGraw-Hill, 1995.

### Publications et conférences

Dhole, V. R. and Linnhoff, B., Total site targets for fuel, co-generation, emissions and cooling, in 'ESCAPE II', Toulouse, France, 1992.

Dhole, V.R., Tainsh, R.A., Wasilewski, M., Ramchandani, N., Make your Process Water pay for itself, Chem Eng, 103, 21, 1996

Hallale, N. and Liu, F., Refinery hydrogen management for clean fuel production, Advances in Environmental Research 6, 81-98, 2001.

Klemes, J., Dhole, V. R., Raissi, K., Perry, S. J. and Puigjaner, L., Targeting and Design Methodology for Reduction of Fuel, Power and CO<sub>2</sub> on Total Sites, Applied Thermal Engineering 17(8-10), 993-1003, 1997.

Wang, Y. P. and Smith, R., Wastewater Minimization, Chemical Engineering Science, Vol. 49, No. 7, pp. 981-1006, 1994.

Wang, Y. P. and Smith, R., Wastewater Minimization with Flowrate Constraints, Trans IChemE, Vol. 73, Part A, pp. 889-904, 1995.

### Thèses

Alves, J. Analysis and Design of Refinery Hydrogen Systems, Ph.D. Thesis, UMIST, 1999.

Raissi, K. Total Site Integration, Ph.D Thesis, UMIST, UK, 1994.

