
État de l'art des méthodologies d'analyses énergétiques et exergétiques de procédés industriels

1. Introduction

L'efficacité énergétique est maintenant considérée non seulement pour utiliser les ressources énergétiques d'une manière sobre, mais aussi pour limiter les émissions des Gaz à Effet de Serre (GES). Cette modification est essentielle quant aux perspectives d'amélioration de l'efficacité énergétique qui va se décliner à différentes échelles de temps et des objectifs de plus en plus ambitieux. Les rapports du Groupe d'Experts Intergouvernementaux sur l'Evolution du Climat (GIEC), aussi bien sur la connaissance scientifique de l'évolution du climat que sur ses conséquences et les mesures d'atténuation, servent de référence pour les progrès à accomplir en matière d'économie d'énergie.

1.1. Le changement climatique : causes, conséquences et moyens d'évitement

Des douze années allant de 1995 à 2006, onze ont été parmi les douze années les plus chaudes depuis 1850 [GIE07A]. Entre 1906 et 2005, la température de la terre a augmenté d'environ 0,74 K [GIE07A]. Le réchauffement climatique affecte la terre entière, plus intense sur les régions nordiques à latitude élevée. La vitesse moyenne d'élévation du niveau des mers et océans est passée de 1,8 mm/an en 1961 à 3,1 mm/an depuis 1993 [GIE07A]. Cette élévation est conforme au réchauffement climatique, et est principalement liée à la dilatation thermique de l'eau de mer et à la fusion des glaciers. La diminution des niveaux de neige et de glace est de même conforme au réchauffement climatique. Depuis 1978, d'après des données de satellites, l'étendue moyenne annuelle de la glace de l'océan Arctique a diminué de 2,7 % par décennie. Dans les deux hémisphères, en moyenne, les glaciers montagnards et la quantité de neige a aussi diminué [GIE07A]. La sécheresse liée aux précipitations est aussi affectée par le changement climatique. En effet, le 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC annonce une augmentation du taux de précipitations dans les zones humides de la terre et une diminution dans les zones sèches comme les déserts de l'Afrique. Globalement, la surface affectée par la sécheresse a augmenté depuis 1970.

La température moyenne de la terre résulte de l'équilibre entre le flux de rayonnement qui lui parvient du soleil et le flux de rayonnement infrarouge renvoyé vers l'espace. Un Gaz à Effet de Serre (GES) est transparent sur la majorité des longueurs d'onde du spectre solaire, mais absorbant sur une grande partie du spectre infrarouge émis par la terre. Le flux sortant refroidit la terre, le piégeage dans l'atmosphère d'une partie du flux normalement sortant contribue donc au réchauffement de la planète. Sans les GES, la température moyenne de la terre serait de l'ordre -18 °C. La présence de ces gaz entraîne une température moyenne de la terre de l'ordre de 15 °C. Mais une augmentation de leur concentration atmosphérique entraînera une augmentation de la température moyenne de la terre [MIE07]. Par ailleurs, d'après le 4^{ème} rapport du groupe de travail 1 du GIEC¹ la concentration atmosphérique des

¹ Le GIEC est organisé en trois groupes de travail : le Groupe I, qui étudie les principes physiques et écologiques du changement climatique ; le Groupe II, qui étudie les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique et le Groupe III, chargé d'étudier les moyens d'atténuer le changement climatique. S'y ajoute une équipe spéciale pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre.

GES (CO₂, CH₄, NOx et autres) a largement augmenté depuis la période préindustrielle en raison de l'activité humaine [GIE07B]. Pour résumer, le GIEC affirme avec un degré non négligeable de certitude, que « *L'essentiel de l'accroissement des températures globalement moyennées depuis le milieu du 20^{ème} siècle résulte très probablement de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre anthropogènes (liés aux activités humaines)* ».

Les conséquences de ce réchauffement sur l'avenir de l'humanité ont été étudiées selon plusieurs scénarios. Les résultats des différents scénarios [IPC00] montrent une augmentation de 25 à 90 % des émissions de GES d'ici à 2030 et par suite une accélération du réchauffement planétaire. D'après le 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC, sur une variété de scénarios de projection des émissions de GES, la température de la terre continuera à augmenter d'une valeur moyenne entre 0,1 K par décennie si les concentrations de GES dans l'atmosphère sont maintenues constantes (et donc pour un scénario à émissions nulles) à 0,2 K par décennie [GIE07A] pour les deux prochaines décennies (si l'on poursuit nos émissions comme aujourd'hui). En résumé, selon différents scénarios d'émissions et de politiques environnementales, l'augmentation de la température moyenne de la terre d'ici l'an 2100 sera comprise entre 2 et 3,5 K (Figure 1-1). En ce qui concerne l'augmentation du niveau de la mer, les différents scénarios projettent une augmentation comprise entre 0,18 m et 0,59 m. Le 4^{ème} rapport du GIEC met en garde les décideurs politiques sur les conséquences qui peuvent toucher quelques régions particulières (comme l'Afrique, l'Arctique, et les petites îles) et même à l'extérieur de ces zones, certaines personnes ou certains groupes de personnes (comme les populations les plus âgées ou les plus pauvres et les enfants) peuvent courir des risques particuliers [GIE07A].

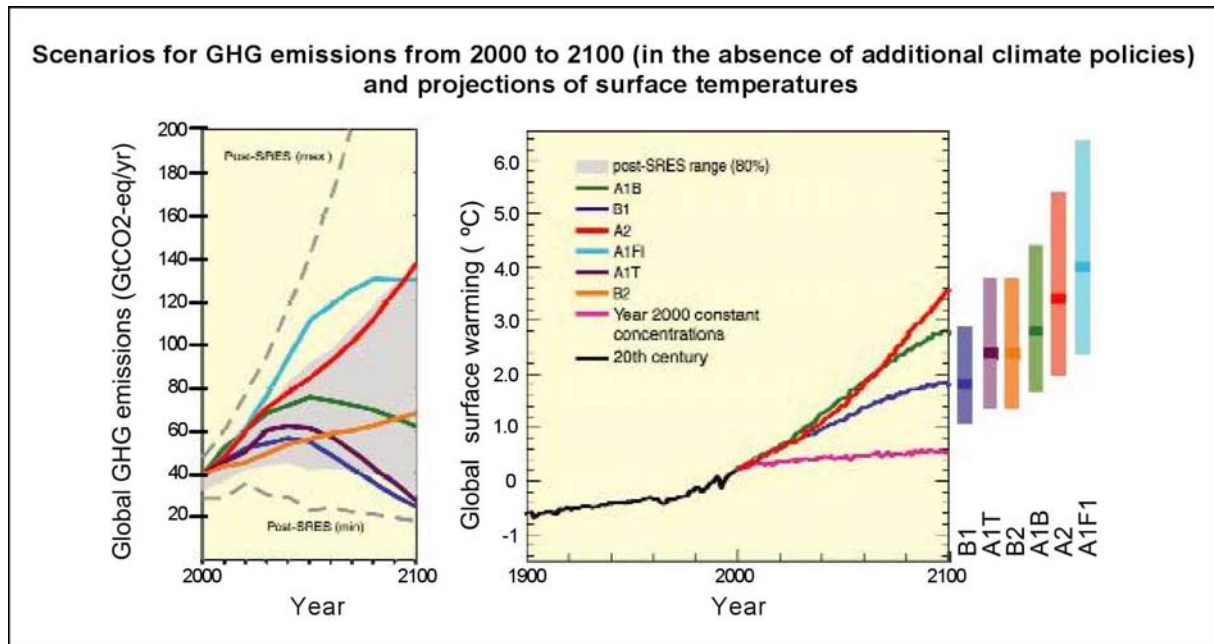


Figure 1-1. Scénarios des émissions de GES (en l'absence de politique climatiques) et projections de la température moyenne de la surface de la terre [GIE07A]

Le Protocole de Kyoto (entériné en Décembre 2007) a été une suite de la prise de conscience mondiale sur les conséquences des émissions de GES sur le climat. Le Protocole de Kyoto assigne aux pays signataires des objectifs quantifiés de réduction de leurs émissions de GES² : entre 2008 et 2012, ces émissions doivent être réduites de 5 % par rapport au niveau des émissions de 1990 dans le monde [NU98].

² Ces GES sont : le Dioxyde de carbone (CO₂), le Méthane (CH₄), l'Oxyde nitreux (N₂O), les Hydrofluorocarbones (HFC), les Hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'Hexafluorure de soufre (SF)

À partir du 1^{er} janvier 2005, l'union européenne a mis en place un programme d'échange de permis d'émissions de CO₂, ou « quotas d'émissions de CO₂ ». Ce mécanisme économique est mis en place pour le CO₂, d'autres politiques et mesures de réduction sont en cours de préparation pour les cinq autres GES du Protocole de Kyoto, sauf qu'elles ne comprennent pas de mécanismes économiques.

Les émissions de CO₂ constituent plus de 70 % des émissions de tous les GES. Ces émissions proviennent surtout des combustions de matières fossiles, utilisées en grande partie pour la production d'énergie. Il est donc nécessaire de différencier les émissions directes d'une activité, industrielle ou domestique, des émissions indirectes liées à la consommation de l'énergie électrique.

Pour cela, il est indispensable de diminuer l'intensité énergétique (E/PIB), c'est-à-dire de découpler l'accroissement de la consommation de combustibles de la croissance économique.

1.2. La gestion des ressources pétrolières

En 2006, plus de 80 % de la consommation énergétique mondiale est attribuée aux énergies fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) [UPS], dont 35 % en pétrole, 28 % en charbon et 23 % en gaz naturel. Selon le rapport de perspectives sur les consommations énergétiques mondiales de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) [IEA07], l'augmentation de la consommation énergétique sera de l'ordre de 55 % entre 2005 et 2030. En parallèle, la part de l'énergie fossile restera constante (84 % de l'augmentation est directement liée à la demande en énergie fossile).

L'ASPO (Association for the Study of Peak Oil and gas) estime le pic pétrolier, également connu comme « Peak Oil » (PO) en 2015. D'autre part, selon l'Institut Français du Pétrole (IFP), le pic de production de pétrole sera atteint vers l'année 2028 au plus tard [IFP06]. Ce pic commence entre 2006 et 2028 pour des causes technico-économiques et se poursuit à partir de 2028 pour des raisons géologiques. Après le PO, la capacité de production journalière de pétrole diminuera bien que la demande en consommation ne fera que croître [IEA07]. Ceci entraînera sans aucun doute une augmentation des prix de l'énergie, qui a commencé à se manifester ces dernières années.

1.3. L'évolution des prix de l'énergie

Les prix de l'énergie, en général, ont augmenté d'une valeur non négligeable depuis 10 ans. Pour l'industrie, le prix des produits pétroliers a plus que doublé entre 1996 et 2006 [INS07]. Cette hausse est conforme à la théorie du PO. En France, il faut distinguer l'énergie importée, dont l'augmentation des prix est directement liée à l'augmentation du prix du pétrole [INS07] de l'électricité, dont le prix n'a que très légèrement augmenté par rapport aux prix de 1996, principalement en raison de l'origine nucléaire de l'électricité produite en France. La Figure 1-2 représente l'évolution des différents types d'énergie entre 1996 et 2006.

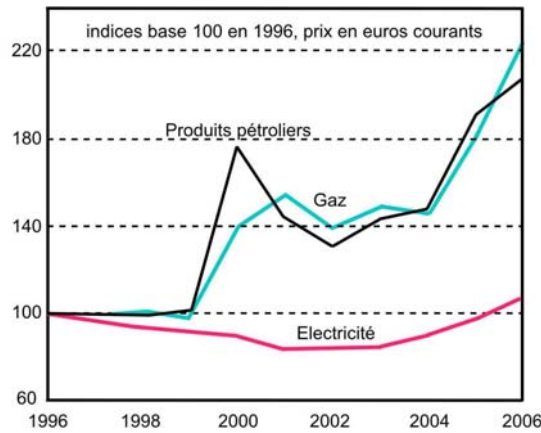


Figure 1-2. Evolution des prix de l'énergie en France depuis 1996 (base 100 en 1996) [INS07]

1.4. Les Certificats d'Economie d'Energie

L'effet de serre, le Protocole de Kyoto, la disponibilité restreinte et l'augmentation inévitable des prix des énergies fossiles, ont entraîné la prise de mesures tant au niveau européen que français. Le gouvernement français a, entre autres, introduit un programme de Certificats d'Economie d'Energie (CEE).

Le programme CEE vise à améliorer l'efficacité énergétique dans les secteurs industriel, résidentiel/tertiaire et celui des transports. L'objectif d'économie d'énergie est fixé par l'état. Des acteurs obligés (les fournisseurs d'énergie) doivent effectuer des économies d'énergie sur leur propre site ou chez leurs clients. Des actions standards sont directement éligibles aux CEE (comme le remplacement des ampoules traditionnelles par des lampes basse consommation), tandis que des actions spécifiques nécessitent une étude du dossier au cas par cas. Cette étude spécifique est une propriété importante des procédés industriels, où une variété de procédés peut exister et par la suite une variété d'actions visant l'économie d'énergie [ATE06].

L'objectif d'économie d'énergie est fixé par l'état. Des acteurs obligés (pour le moment les fournisseurs d'énergie) doivent effectuer des économies d'énergie sur leur propre site ou chez leurs clients. Quatre secteurs d'activités sont éligibles : les secteurs résidentiel et tertiaire, le secteur des transports, et le secteur de l'industrie. L'économie d'énergie réalisée est exprimée en kWh cumac, ou kWh cumulé actualisé.

Deux types d'actions peuvent donner droit à un certificat d'économie d'énergie.

- Les actions standards : ensemble d'actions définies par la DRIRE³ permettant l'obtention d'un CEE. Le remplacement d'une lampe ancienne par une lampe basse consommation est un exemple d'une action standard permettant l'obtention d'un certificat d'économie d'énergie.
- L'action spécifique : une action ne figurant pas sur la liste des actions standards, et pour laquelle il faut monter un dossier spécifique qui doit être validé par la DRIRE.

L'entreprise EDF, en tant que fournisseur d'énergie, est soumise aux obligations des CEE. Dans ce cadre, elle offre son expertise énergétique aux industriels. Le département EPI (Eco efficacité et Procédés Industriels) de la R&D d'EDF s'occupe de l'efficacité énergétique dans l'industrie, où d'importants gisements d'économies d'énergie peuvent être trouvés.

Pour les grandes entreprises (consommation électrique supérieure à 40 GWh par an), une étude approfondie sur les différents sites industriels, en vue de déterminer des ratios d'économies d'énergie. Il est cependant difficile, car très cher, de dédier des études

³ DRIRE : Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement

spécifiques pour les Petites et Moyennes Industries (PMI), dont la consommation électrique est comprise entre 4 et 40 GWh par an. Pour cela, il est nécessaire de développer une méthode systématique pour l'identification des gisements d'économie d'énergie sur site. Cette méthode doit aller au-delà de l'approche de l'amélioration de l'efficacité énergétique des seules utilités ou opérations particulières, visant le procédé et les lignes de fabrication.

Cette méthodologie donnera accès aux importants gisements d'économies d'énergie à des coûts exploitables. De plus, elle analysera les gains énergétiques potentiels, ainsi que les gains économiques et le Temps de Retour sur Investissements (TRI) qui doivent être rentables pour les clients.

Durant les dernières décennies, et surtout après les chocs pétroliers des années 70, différentes méthodes servant à identifier les gisements d'économies d'énergie dans l'industrie ont été développées. Pour identifier des solutions d'amélioration dans une usine, on distingue deux actions séparées mais interdépendantes, la collecte des données et l'analyse de ces données [THU95].

2. La collecte des données

Plusieurs auteurs ont proposé des méthodes systématiques pour la collecte de données énergétiques sur site industriel. En général, le coût et le but d'un audit énergétique déterminent son niveau [THU95], et par la suite la durée des mesures et la qualité des données mesurées.

Thumann propose les trois niveaux d'audit énergétique ci-après [THU95].

- Le pré diagnostic (« walk through » audit) : inspection visuelle visant à déterminer des économies sur les opérations de maintenance et d'exploitation des différents équipements. Ce niveau d'audit sert aussi à déterminer le besoin pour un audit de plus haut niveau, où des mesures plus précises sont nécessaires.
- Le mini-audit : ce niveau d'audit demande des mesures et des essais sur les différents équipements, en vue de déterminer la consommation exacte en énergie, ainsi qu'une quantification des potentiels d'économie d'énergie, effectuée durant la phase d'analyse des données.
- Le maxi-audit : plus détaillé que le mini-audit, ce niveau d'audit énergétique demande des mesures précises sur les consommations énergétiques par produit, ainsi qu'une modélisation et des simulations numériques en vue de déterminer les différentes configurations sur l'utilisation de l'énergie, et une estimation de la consommation sur un an. En contrepartie, cet audit donne des résultats précis sur les différents moyens possibles pour économiser l'énergie dans l'usine étudiée, et doit normalement être accompagné d'une étude technico-économique sur la faisabilité des solutions d'améliorations proposées.

La collecte de données diffère selon le niveau choisi. Les facteurs prépondérants de cette étape sont le nombre et la durée des mesures. Plus les mesures sont nombreuses et plus elle durent, plus leur coût augmente. Des mesures instantanées peuvent induire en erreur les calculs des consommations énergétiques des différentes opérations de l'usine, et il s'agit donc de trouver des facteurs moyens d'extrapolation des données mesurées sur une période d'un an, prenant ainsi en compte les facteurs temporels qui peuvent influencer le déroulement des différentes opérations, comme le climat, les débits de production de l'usine...etc.

Plusieurs démarches ont été développées pour systématiser les démarches d'audit de site industriel [THU95, IPP07, AFN06]. Par exemple, le référentiel de bonnes pratiques concernant le diagnostic énergétique dans l'industrie publié en 2006 par l'Agence Française

spécifiques pour les Petites et Moyennes Industries (PMI), dont la consommation électrique est comprise entre 4 et 40 GWh par an. Pour cela, il est nécessaire de développer une méthode systématique pour l'identification des gisements d'économie d'énergie sur site. Cette méthode doit aller au-delà de l'approche de l'amélioration de l'efficacité énergétique des seules utilités ou opérations particulières, visant le procédé et les lignes de fabrication.

Cette méthodologie donnera accès aux importants gisements d'économies d'énergie à des coûts exploitables. De plus, elle analysera les gains énergétiques potentiels, ainsi que les gains économiques et le Temps de Retour sur Investissements (TRI) qui doivent être rentables pour les clients.

Durant les dernières décennies, et surtout après les chocs pétroliers des années 70, différentes méthodes servant à identifier les gisements d'économies d'énergie dans l'industrie ont été développées. Pour identifier des solutions d'amélioration dans une usine, on distingue deux actions séparées mais interdépendantes, la collecte des données et l'analyse de ces données [THU95].

2. La collecte des données

Plusieurs auteurs ont proposé des méthodes systématiques pour la collecte de données énergétiques sur site industriel. En général, le coût et le but d'un audit énergétique déterminent son niveau [THU95], et par la suite la durée des mesures et la qualité des données mesurées.

Thumann propose les trois niveaux d'audit énergétique ci-après [THU95].

- Le pré diagnostic (« walk through » audit) : inspection visuelle visant à déterminer des économies sur les opérations de maintenance et d'exploitation des différents équipements. Ce niveau d'audit sert aussi à déterminer le besoin pour un audit de plus haut niveau, où des mesures plus précises sont nécessaires.
- Le mini-audit : ce niveau d'audit demande des mesures et des essais sur les différents équipements, en vue de déterminer la consommation exacte en énergie, ainsi qu'une quantification des potentiels d'économie d'énergie, effectuée durant la phase d'analyse des données.
- Le maxi-audit : plus détaillé que le mini-audit, ce niveau d'audit énergétique demande des mesures précises sur les consommations énergétiques par produit, ainsi qu'une modélisation et des simulations numériques en vue de déterminer les différentes configurations sur l'utilisation de l'énergie, et une estimation de la consommation sur un an. En contrepartie, cet audit donne des résultats précis sur les différents moyens possibles pour économiser l'énergie dans l'usine étudiée, et doit normalement être accompagné d'une étude technico-économique sur la faisabilité des solutions d'améliorations proposées.

La collecte de données diffère selon le niveau choisi. Les facteurs prépondérants de cette étape sont le nombre et la durée des mesures. Plus les mesures sont nombreuses et plus elle durent, plus leur coût augmente. Des mesures instantanées peuvent induire en erreur les calculs des consommations énergétiques des différentes opérations de l'usine, et il s'agit donc de trouver des facteurs moyens d'extrapolation des données mesurées sur une période d'un an, prenant ainsi en compte les facteurs temporels qui peuvent influencer le déroulement des différentes opérations, comme le climat, les débits de production de l'usine...etc.

Plusieurs démarches ont été développées pour systématiser les démarches d'audit de site industriel [THU95, IPP07, AFN06]. Par exemple, le référentiel de bonnes pratiques concernant le diagnostic énergétique dans l'industrie publié en 2006 par l'Agence Française

de NORMALISATION (AFNOR) présente une démarche systématique pour le diagnostic énergétique, comportant 3 étapes [AFN06].

- Analyse préalable : une première collecte de données est réalisée en vue de déterminer une première approche du bilan énergétique du site, d'établir les ratios des consommations énergétiques par unité de production et de déterminer les postes les plus énergivores.
- Analyse détaillée : cette analyse est orientée, selon les résultats de l'analyse préalable vers tout ou partie des gisements d'économies d'énergie identifiés. Elle permet d'approfondir les résultats préalables sur les gisements d'économies d'énergie et le bilan énergétique, en vue de déterminer les solutions d'amélioration de l'efficacité énergétique globale du site.
- Recherche des solutions d'amélioration : cette étape est destinée à déterminer les solutions d'amélioration de la consommation énergétique. Il s'agit de trouver les moyens d'exploiter les gisements d'économies d'énergie déterminés dans l'analyse détaillée. On notera néanmoins que cette étape fait partie de l'analyse des données plus que de la collecte.

Dans ce document de l'AFNOR, une systématisation de la démarche à suivre est présentée, sans les détails de l'analyse technique. En ce qui concerne la collecte de données, le document présente une démarche systématique selon les différents équipements.

Cependant, le coût et la durée de la collecte des données sont affectés par plusieurs facteurs, et non pas seulement par la systématisation de cette collecte. Le plus important de ces facteurs, est le type et la quantité des données à collecter. En effet, le coût global de l'audit pourra être minimisé en réduisant la quantité des données à collecter. Le choix des données indispensables doit donc être mûrement réfléchi en fonction des résultats attendus.

D'autre part, l'étude préalable du procédé de transformation du produit s'avère importante en vue de déterminer des améliorations génériques se concentrant sur le procédé de fabrication. Cette analyse a priori permet de déterminer des améliorations de l'efficacité énergétique du procédé dès « l'analyse préalable » (encore appelée pré-diagnostic). Ceci sera démontré dans les chapitres suivants. Il semble plus judicieux de travailler sur le développement d'une méthodologie d'analyse qui prend en compte la généricité des différentes opérations, et donc qui minimisera les collectes de données nécessaires.

3. L'analyse des données

En dissociant la collecte de l'analyse des données, il est important de rappeler que ces deux actions sont bien sûr dépendantes l'une de l'autre. Les données relevées sur site sont déterminées par le type d'analyse et le niveau de précision souhaités. En même temps, le niveau de précision et la fiabilité des résultats de l'analyse dépendent directement du niveau de précision des données relevées.

Plusieurs auteurs ont présenté des méthodologies différentes pour l'identification des économies d'énergie possibles sur site industriel. Une grande partie de ces méthodologies se concentrent sur les utilités du site industriel (production et distribution de vapeur, production et distribution d'énergie frigorifique, etc.) [KIS07]. Cependant, quelques auteurs ont proposé d'identifier d'abord les besoins du procédé industriel pour ensuite identifier les pistes d'améliorations du procédé lui-même et adapter les utilités à ce dernier ([FRA06], [KIS07] [LIN98], [MUL07], [STA96]). Dans ce travail, seront retenues les méthodes les plus importantes en terme d'identification des solutions d'amélioration et en terme de systématisation des démarches à suivre, en analysant leurs avantages et leurs limitations.

3.1. La méthode du pincement

3.1.1. Définition

La Méthode du Pincement (MP) a été structurée en 1979 par Linnhoff et al. [LIN98]). Cette méthode a pour but l'optimisation des échanges thermiques au sein d'un site et permet de viser des réductions de consommation d'énergie réalistes. Elle fait la synthèse des besoins énergétiques (appelés flux froids) et des énergies disponibles (appelés flux chauds) pour optimiser l'échange entre ces différents flux selon un critère économique optimisé entre coûts d'exploitation et coûts d'investissement. L'étude thermo-économique est basée sur les courbes composites.

3.1.2. Courbes composites et pincement

Les courbes composites représentent l'évolution des flux d'énergie, chauds et froids dans un diagramme (température, puissance thermique). L'évolution de la température du flux thermique en fonction de l'enthalpie est linéarisée selon l'équation (1.1). La linéarisation se fait sur la base de la pente de la courbe composite de chaque flux le débit thermique, (voir équations (1.1) et (1.2)) [LIN98]. La différence minimale de températures entre les deux courbes est appelée pincement (voir Figure 1-3 a)).

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (1.1)$$

$$CP = \dot{m} c_p \quad (1.2)$$

Avec :

- \dot{Q} la variation de l'enthalpie
- \dot{m} le débit massique
- c_p la chaleur spécifique du produit
- ΔT la variation de la température
- CP le débit thermique qui constitue la pente de la courbe composite, et qui est calculé par le produit du débit massique par la chaleur spécifique.

Les courbes composites indiquent un schéma d'échanges de chaleur à contre-courant entre les flux thermiques chauds et les flux thermiques froids du procédé. La valeur du pincement (ΔT_{\min}) détermine les valeurs des énergies minimales à apporter au système (voir Figure 1-3 b)). En déplaçant la courbe des flux froids à gauche ou à droite, le pincement diminue ou augmente respectivement (Figure 1-3), et par la suite les besoins en énergie thermique et frigorifique diminuent ou augmentent respectivement. Ce phénomène est dû au changement de la surface d'échange (proportionnellement au pincement) et par la suite la quantité de chaleur récupérée sur le procédé.

L'optimisation par la MP se fait, selon la cible de l'optimisation, entre coûts d'investissement (directement lié au coût des échangeurs) et coûts d'exploitation (directement lié à la consommation énergétique).

Le coût des échangeurs est proportionnel à la surface d'échange, et par suite proportionnel à la quantité de chaleur échangée [LIN98A]. Comme le montre la Figure 1-3 a), la variation de la surface d'échange (directement proportionnelle à la quantité de chaleur récupérée) est inversée par rapport à la variation du pincement. Il s'ensuit que le coût d'investissement minimal est atteint pour le pincement maximal et inversement.

La consommation énergétique du procédé étudié est proportionnelle aux besoins thermiques et frigorifiques (quand il existe un besoin de refroidissement à une température inférieure à la température ambiante) [LIN98A]. Comme le montre la Figure 1-3, la variation de ces besoins énergétiques suit la variation du pincement. Il s'ensuit que le coût d'exploitation minimal est atteint pour le pincement minimal et inversement. Par suite, la plus grande efficacité énergétique du système est atteinte pour le pincement minimal, ce pincement étant déterminé par les contraintes technologiques et la nature des flux énergétiques considérés. La relation entre surface d'échange, coûts d'investissement, consommation énergétique et coûts d'exploitation est expliquée dans le paragraphe 3.1.7.

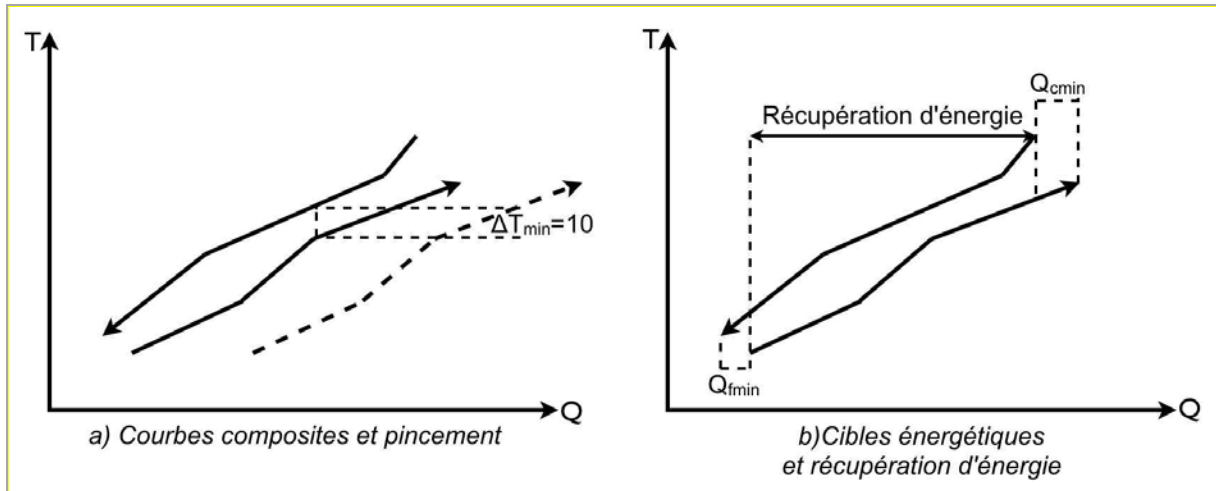


Figure 1-3. Courbes composites et cibles énergétiques [LIN98A]

avec :

- Q_{\min} : Quantité de chaleur minimale requise pour un pincement ΔT_{\min}
- $Q_{f\min}$: Quantité d'énergie frigorifique minimale requise pour un pincement ΔT_{\min}

3.1.3. Zones puits et zones sources

La température de pincement sépare le système en deux sous systèmes distincts :

- La zone puits, située à droite du pincement, et où il y a un manque d'énergie. Dans cette zone, il existe un manque de chaleur pour chauffer les flux froids à la température requise par le procédé. Ce manque de chaleur est compensé par l'utilité chaude Q_{\min} .
- La zone source, située à gauche du pincement, et où il y a un surplus d'énergie. Le surplus d'énergie réside dans le besoin de refroidir les flux chauds à la température nécessaire au procédé. Ce surplus d'énergie est compensé par l'utilité froide $Q_{f\min}$.

La Figure 1-4 montre clairement les deux zones (puits et source) formées par le pincement. La zone située entre les deux courbes composites est la zone d'échange interne du système (échange entre flux chauds et flux froids). Pour chauffer (resp. refroidir) les flux à l'extérieur de cette zone, une utilité thermique (resp. frigorifique) est nécessaire (exemple vapeur et eau froide). Plus le pincement ΔT_{\min} diminue, plus la puissance nécessaire des utilités diminue, mais aussi la surface d'échange augmente et donc les coûts d'investissement. La théorie du pincement sert à établir le compromis entre coûts d'investissement et coûts des utilités pour trouver la solution optimale. Il est clair cependant que, du point de vue énergétique, un ΔT_{\min} minimisé serait optimal. Cependant, en intégrant une étude économique, il faut faire le compromis pour trouver la solution technico-économique optimale.

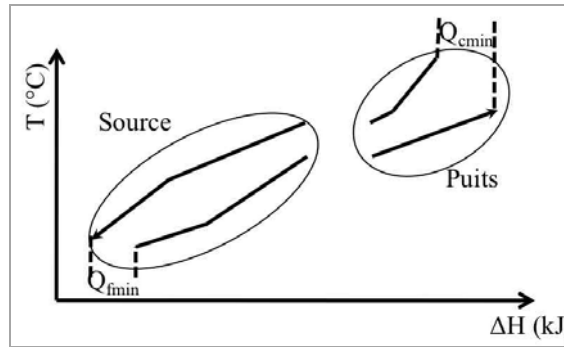


Figure 1-4. Zone puits et zone source formées par le pincement [LIN98A]

3.1.4. Les règles de la méthode du pincement

La Figure 1-5 montre différents scénarios de transferts de chaleur sur les courbes composites et la conséquence de chacun, d'où les règles de la MP.

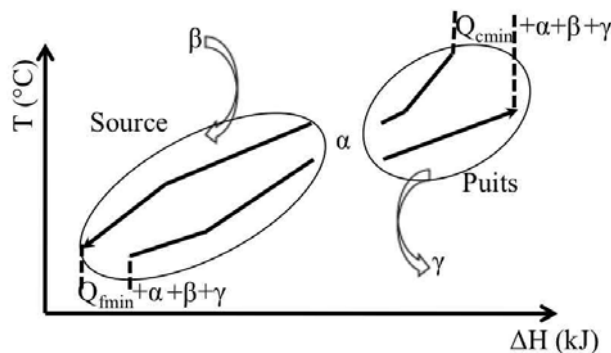


Figure 1-5. Les règles de transferts de chaleur dans la MP [LIN98A]

Sur la Figure 1-5, α est une quantité de chaleur transférée de la zone puits vers la zone source. Le système au-dessus du pincement, qui était avant en équilibre énergétique avec Q_{cmin} , perd une valeur α d'énergie. Pour compenser cette perte, l'énergie fournie par l'utilité chaude doit être augmentée de la même valeur α . Par ailleurs, une quantité de chaleur d'une valeur α est rajoutée à la zone source qui possède déjà un surplus de chaleur, ce surplus doit alors être augmenté d'une valeur α , augmentant ainsi Q_{fmin} .

γ est la valeur d'un refroidissement externe de la zone puits. Cette zone, déjà en déficit de chaleur aura besoin alors d'une quantité d'énergie calorifique de la même valeur γ pour compenser cette perte, ce qui augmente l'énergie fournie par l'utilité chaude d'une valeur γ . Avec le même raisonnement, si β est une quantité de chaleur ajoutée à la zone source, cette valeur doit être compensée par une augmentation de l'utilité froide. De même, refroidir la zone puits (resp. chauffer la zone source) implique un déséquilibre énergétique de la zone source (resp. zone puits). Ce déséquilibre doit donc être compensé par une augmentation de l'utilité froide (resp. utilité chaude).

En résumé, un transfert de chaleur entre les deux zones, un refroidissement de la zone puits ou un chauffage de la zone source résulte en une augmentation des consommations énergétiques des utilités chaudes et froides, d'où les trois règles de base de la théorie du pincement :

- aucun transfert de chaleur ne doit prendre place entre la zone puits et la zone source
- aucun refroidissement externe n'est permis au niveau de la zone puits
- aucun chauffage externe n'est permis au niveau de la zone source.

3.1.5. Optimisation utilités multiples et Grande Courbe Composite

La Grande Courbe Composite (GCC) est une représentation simplifiée des courbes composites chaude et froide. Elle sert à simplifier l'optimisation des utilités multiples. La Figure 1-6 montre une représentation schématique de sa construction.

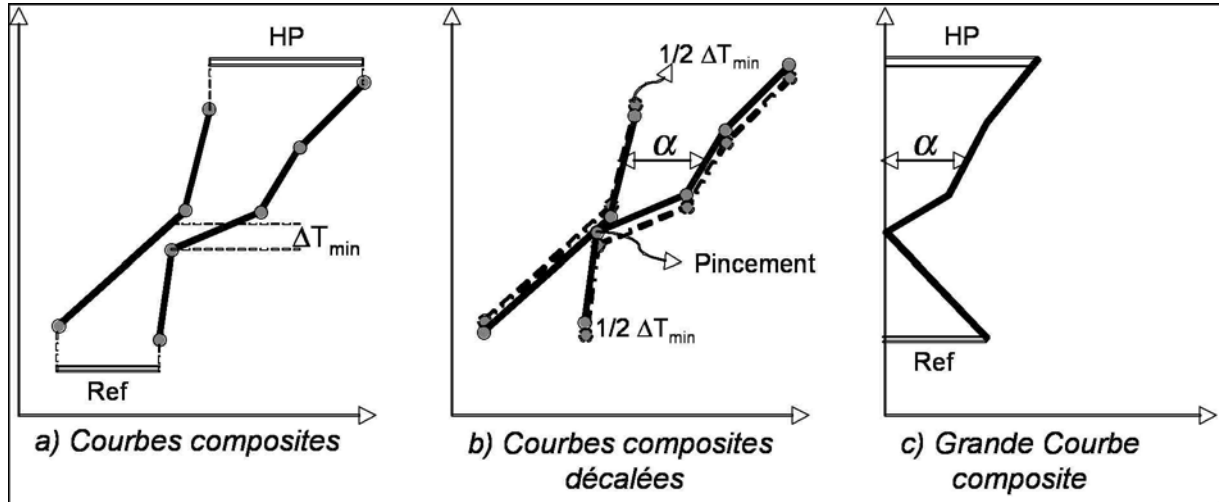


Figure 1-6. Représentation schématique de la construction de la grande courbe composite [LIN98A] avec :

- HP : Chaleur Haute Pression
- Ref : Réfrigération

La GCC est construite en 2 étapes (voir Figure 1-6). La première consiste à rapprocher les courbes composites l'une de l'autre de manière à ce qu'elles se touchent au niveau du pincement. Les températures des différents flux de la courbe composite froide sont alors augmentées d'une valeur de $\frac{1}{2} \Delta T_{\min}$, et celles des flux de la courbe composite chaude sont diminuées de la même valeur. Cette étape sert essentiellement à assurer le gradient de température minimal représenté par ΔT_{\min} entre les utilités (représentées par les segments HP et REF sur la Figure 1-6 c) et les flux du procédé (la grande courbe composite de la même figure).. Ces courbes sont alors appelées les courbes composites décalées.

La deuxième étape consiste à construire la GCC à partir des différences d'enthalpie (horizontale) entre les deux courbes (ceci est représenté par la valeur α).

La GCC sert principalement à l'optimisation des utilités multiples. Cette optimisation est appliquée quand plusieurs niveaux de températures sont possibles pour l'apport d'énergie thermique ou frigorifique au procédé. La Figure 1-7 a) montre le cas d'un procédé, où la vapeur haute pression (HP) est utilisée pour l'apport calorifique et la réfrigération (Ref) est utilisée pour l'apport frigorifique au procédé. La Figure 1-7 b) montre le remplacement d'une partie de la HP par de la vapeur Moyenne Pression (MPr), et la réfrigération par de l'Eau de Refroidissement (ER). Les nouvelles utilités apportées au système sont des utilités moins chères que celles appliquées dans le premier cas (Figure 1-7 a)). Il est remarquable sur la GCC que les utilités représentent l'apport en énergie au procédé, cette visualisation graphique n'est pas possible avec les courbes composites normales. La différence de températures minimale entre les utilités et le procédé est assurée par le décalage de ΔT_{\min} des courbes avant la construction de la GCC.

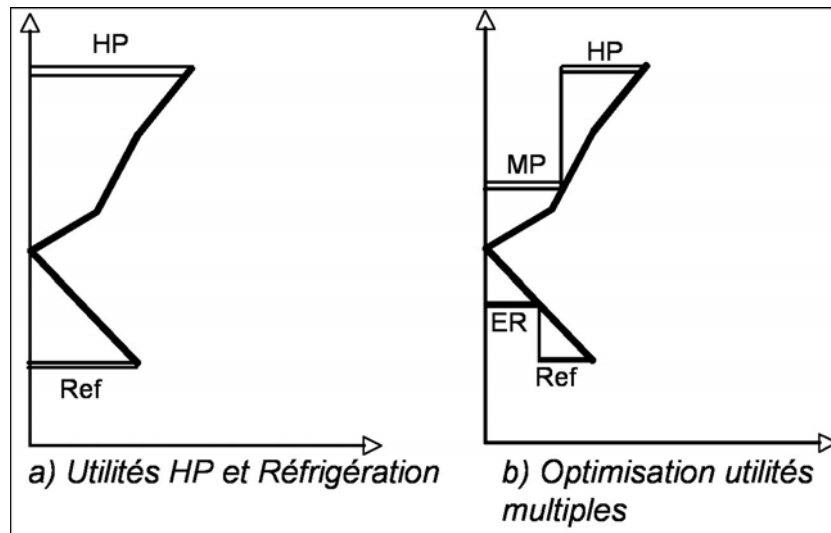


Figure 1-7. Optimisation utilités multiples [LIN98A]

avec :

- MPr : Utilité chaude Moyenne Pression
- ER : Eau de Refroidissement

3.1.6. L'intégration des Pompes A Chaleur

Les cibles énergétiques d'un procédé étudié par la MP sont fixées par le pincement. Comme démontré dans le paragraphe 3.1.4, l'échange à travers le pincement est interdit, provoquant une perte énergétique au niveau des utilités chaude et froide. Cependant, les deux zones formées par le pincement peuvent échanger entre elles par le moyen d'une Pompe A Chaleur (PAC). Cette PAC utilisera comme source froide le procédé lui même, selon différentes configurations. Dans le cas d'un besoin de refroidissement au dessous de la température ambiante, l'énergie absorbée au niveau de l'évaporateur est une demande en énergie frigorifique du procédé, et l'énergie rejetée au niveau du condenseur est alors une demande calorifique du procédé, et par suite cette PAC est considérée comme une ThermoFrigoPompe (TFP) où les énergies frigorifique et calorifique sont toutes les deux valorisées. Dans le cas où un besoin de refroidissement à une température inférieure à la température ambiante n'existe pas, la PAC n'assure pas un besoin frigorifique et par suite ne sera pas appelée TFP mais simplement Pompe à Chaleur.

La PAC peut être installée au niveau du procédé, selon trois configurations différentes [LIN98A]. La Figure 1-8 montre les trois configurations de l'installation d'une PAC au niveau du procédé.

- Installation d'une PAC sur la zone puits.** Cette installation transfère de la chaleur de la zone puits vers la zone puits elle-même à plus haute température. Comme le montre la Figure 1-8, cette configuration économise de l'énergie thermique d'une valeur W (travail du compresseur de la PAC) en diminuant l'énergie dépensée à une valeur de $A-W$, mais en même temps nécessite une dépense électrique (ou mécanique) de la même valeur W . Le remplacement de l'énergie thermique nécessaire par une même quantité d'énergie mécanique ou électrique n'est cependant pas rentable, l'énergie électrique étant plus chère que l'énergie thermique. L'analyse exergétique qui permet de comparer les types d'énergies consommées est présentée plus loin.
- Installation d'une PAC sur la zone source.** La zone source présente un surplus de chaleur. L'installation d'une PAC sur cette zone revient à rajouter de l'énergie thermique d'une valeur W à cette zone déjà en surplus de chaleur. Ceci entraînera

une augmentation de l'énergie frigorifique nécessaire à l'évacuation de ce surplus, l'installation est donc à proscrire.

- c) **Installation d'une PAC à travers le pincement.** La zone source présente un surplus de chaleur, et la zone puits présente un déficit de chaleur. Une PAC installée à travers le pincement revient à transférer le surplus de chaleur de la zone source vers la zone puits à plus haute température. En d'autres termes, cette installation revient à déplacer le surplus de chaleur de la zone source du procédé à une température plus élevée permettant ainsi de la transférer au déficit en chaleur de la zone puits. Cette configuration est la seule configuration rentable.

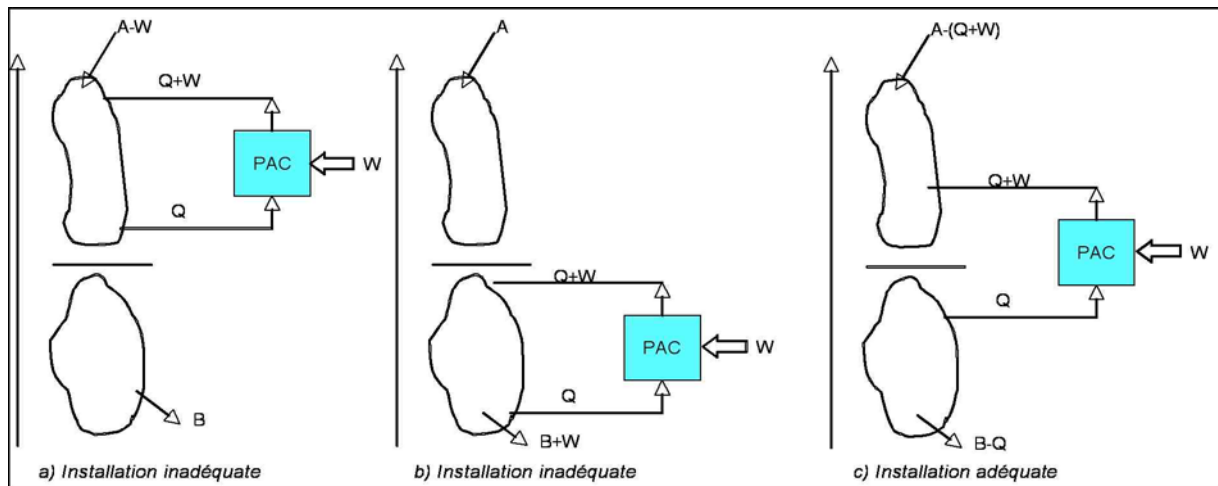


Figure 1-8. Différentes configurations pour l'installation d'une TFP au niveau du procédé [LIN98A]

La configuration c) montrée Figure 1-8 revient à effectuer un transfert thermique à travers le pincement, puisque l'énergie est transférée de la zone source à la zone puits. Dans ce cas, la règle interdisant ce transfert (voir paragraphe 3.1.4) ne s'applique pas puisque ce transfert est assuré à l'aide d'un système thermodynamique externe utilisant du travail mécanique. Sur ce sujet, Linnhoff présente une règle « visuelle » pour détecter le potentiel d'intégration d'une PAC ou TFP au niveau du procédé. Ceci est représenté par la Figure 1-9.

En effet, un système thermodynamique à cycle de réfrigération diphasique est plus efficace quand la différence de températures entre la source et le puits est faible. Plus cette différence de température augmente, plus l'efficacité énergétique du cycle et de la machine diminue. Linnhoff propose une règle utilisant la visualisation graphique du procédé. Dans la Figure 1-9 a) deux grands besoins en énergie thermique et frigorifique sont présents de part et d'autre du pincement avec une différence de températures relativement faible. Cette différence permet une installation d'une PAC rentable. Ceci n'est cependant pas possible dans le cas du procédé représenté à la Figure 1-9 b) où la différence de températures est relativement élevée, ce qui implique un Coefficient de Performance (COP) faible de la PAC. En effet, pour une bonne intégration de la PAC, il est nécessaire d'avoir un besoin en énergie thermique et une disponibilité énergétique avec des différences de température faibles, ce qui n'existe pour le procédé de la courbe Figure 1-9 b). Il existe cependant pour ce même procédé des potentiels d'utilisation d'utilités multiples, qui ne sont pas représentées dans cette figure, car le but est de montrer la différence entre un procédé présentant un potentiel d'intégration d'une PAC (procédé a)) et un procédé qui ne permet pas une telle intégration (procédé b)).

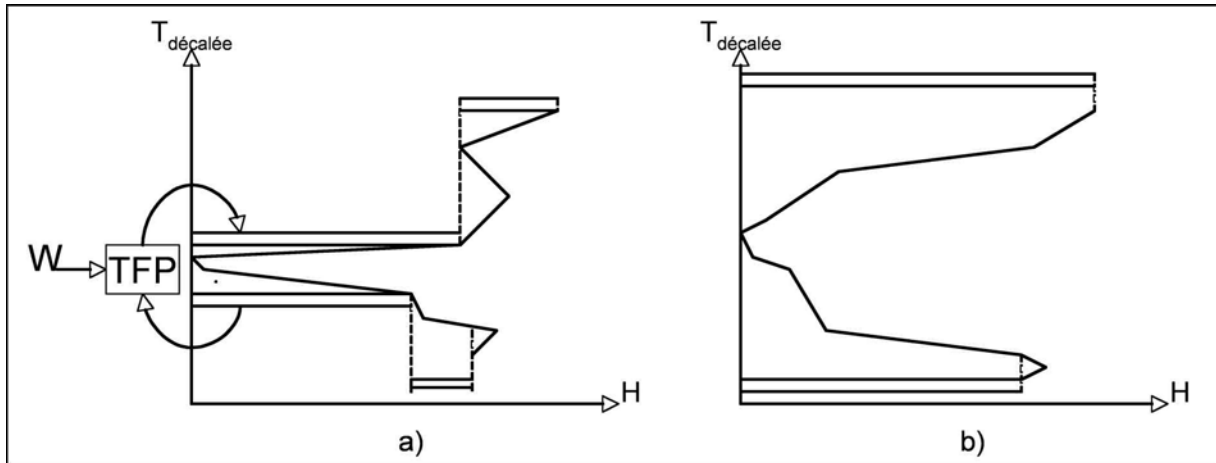


Figure 1-9. Représentation graphique de l'insertion d'une TFP

Cependant, la représentation d'un système thermodynamique n'est possible au niveau des courbes composites ou même au niveau de la GCC, que d'une manière qualitative à l'image de la Figure 1-9.

Les courbes composites ne peuvent représenter que des échanges thermiques. En effet, une représentation dans un même graphe (T-H) de l'énergie thermique et de l'énergie électrique ou mécanique n'est pas possible. Cependant, en introduisant l'analyse exergétique, cette représentation devient possible grâce aux niveaux d'énergie qui seront présentés plus tard dans le chapitre. Il serait donc intéressant de développer un moyen d'identification rapide et systématique des potentiels d'intégrations de PAC ou de TFP, avec une quantification des gains réalisables.

3.1.7. Coût d'investissement

Comme déjà montré, le coût d'investissement sur le réseau d'échangeurs dépend directement de la surface d'échange et par suite du pincement. L'équation (1.3) sert à calculer la surface d'échange minimale requise pour atteindre les objectifs de consommation énergétique fixés par les courbes composites.

$$A_{\min} = \sum_i \left[\frac{1}{\Delta T_{LM}} \sum_j \frac{q_j}{h_j} \right] \quad (1.3)$$

avec :

- A la surface d'échange
- ΔT_{LM} la différence de température logarithmique moyenne
- q la variation d'enthalpie du flux
- h le coefficient global d'échange de chaleur pour le flux

et les indices :

- i : intervalle d'enthalpie
- j : flux j

Cette équation est basée sur l'hypothèse de transfert de chaleur vertical entre flux chauds et flux froids (voir Figure 1-4), par l'intermédiaire d'échangeurs de chaleur à contre-courant. Linnhoff [LIN98A] montre que le transfert vertical fournit une surface d'échange minimale.

Le coût d'investissement est déterminé par la surface d'échange et le nombre d'échangeurs. Il s'agit de concevoir le système selon la surface d'échange et le nombre d'échangeurs minimaux. Le nombre minimal d'échangeurs est calculé d'une manière générale en utilisant l'équation (1.4) basée sur le théorème d'Euler. Cependant, dans le cas réel, il est parfois nécessaire d'introduire des sous-systèmes (divisant certains flux en plusieurs pour diminuer leur CP afin d'assurer un pincement supérieur ou égal au pincement choisi du procédé), ces sous-systèmes impliquent une augmentation du nombre d'unités d'échangeurs. Plus de détails sur la conception du réseau d'échangeurs peuvent être trouvés dans la référence [LIN98].

$$U_{\min} = N - 1 \quad (1.4)$$

avec :

- U_{\min} : Nombre minimal d'échangeurs
- N : Nombre total de flux (appartenant au procédé ou aux utilités)

En utilisant les équations (1.3) et (1.4), ainsi que les équations de coûts d'échangeurs selon les surfaces d'échange, le coût d'investissement peut être calculé. Ainsi la représentation schématique de la Figure 1-10 illustre la détermination du pincement optimal pour le coût minimal.

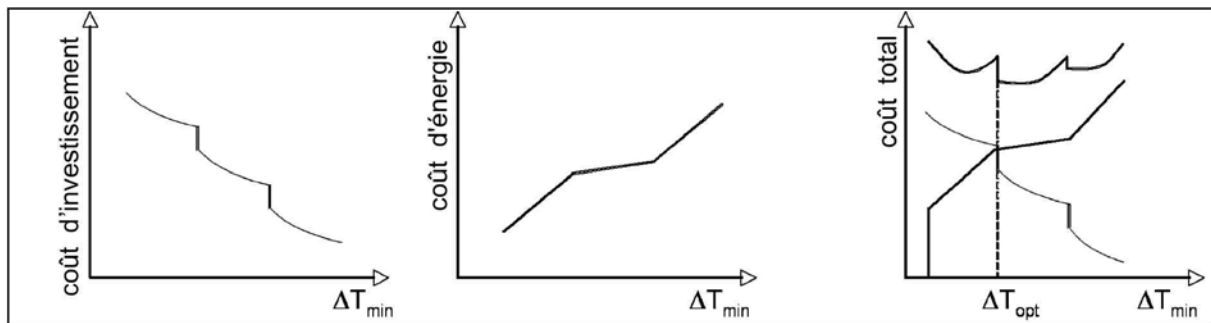


Figure 1-10. Détermination du pincement optimal pour un coût total minimal

D'autre part, le coût de la consommation d'énergie (et par conséquent le coût d'exploitation) est un coût récurrent, à l'inverse du coût d'investissement qui, lui, est ponctuel. Aussi, pour l'optimisation, il est nécessaire de fixer la durée sur laquelle le coût énergétique est calculé. Cette durée peut être fixée selon plusieurs critères. Deux cas se présentent : la conception d'un nouveau système ou le remplacement d'un système existant.

- Nouveau système. Dans ce cas, et selon les intérêts de l'industriel, la durée peut être calculée selon deux critères :
 - Le TRI. Pour un nouveau système, ce TRI est calculé en comparant le système proposé à un système standard présentant un coût d'investissement moins élevé mais un coût énergétique plus élevé. Dans ce cas, l'industriel fixe son critère de TRI, et le pincement optimal est calculé pour l'atteindre.
 - La durée de vie des équipements. Ce critère peut servir pour les calculs des CEE. En effet, les CEE sont calculés selon l'économie d'énergie présentée par le nouveau système sur la durée de vie de l'équipement, actualisée par an [ATE06] (voir paragraphe 1.4).
- Remplacement d'un système existant. Dans ce cas, le TRI est un critère important, fixé par l'industriel, selon lequel l'optimisation et le choix du pincement doivent être effectués. Linnhoff présente des méthodes pour le calcul du TRI dans le cas du remplacement d'un système existant, ainsi qu'un logiciel appliquant la MP [LIN98] ; ces points ne seront pas détaillés ici.

3.1.8. Analyse des avantages et des limites de la MP

La MP présente plusieurs avantages permettant d'améliorer la performance énergétique des procédés industriels.

- Le critère principal de la MP revient au procédé de fabrication. Les courbes composites servent à calculer l'Energie Minimale Requise (EMR) pour le fonctionnement du procédé étudié. Cette EMR est calculée en fixant un pincement minimal et déterminant les besoins énergétiques correspondants. Le calcul de cette EMR est avantageux en ce qui concerne l'optimisation énergétique du procédé, l'étude peut alors rapprocher l'énergie consommée le plus possible de l'EMR calculée.
- La MP permet l'intégration des procédés, ou l'analyse de la totalité des flux et consommations énergétiques du procédé. Cette intégration permet d'avoir une vision globale de l'usine, optimisant la récupération d'énergie souvent perdue en minimisant ainsi les pertes énergétiques présentes dans les flux chauds non refroidis.
- La MP permet à partir des courbes composites d'adapter les consommations d'énergie des utilités aux besoins du procédé. Contrairement aux méthodes traditionnelles, qui portent en premier lieu sur les utilités en les séparant du procédé de fabrication lui-même, la MP propose une liaison logique entre le procédé et les utilités.
- La simplicité de la représentation graphique permet la visualisation des consommations énergétiques. Cette représentation simplifie en effet le problème et aide l'expert et l'industriel à visualiser les gains potentiels et les gains réalisés par l'étude.

Cette méthode présente cependant quelques limitations.

- Du point de vue pratique, la disposition géographique des flux (chauds et froids) dans l'usine peut imposer des contraintes à l'intégration de ces flux. Par exemple, certains flux identifiés du côté des utilités peuvent être très éloignés de l'atelier de production, ce qui nécessite un réseau d'échangeurs avec de longs tuyaux créant ainsi des pertes énergétiques et exergetiques, pouvant être parfois non négligeables, voire supérieures aux gains énergétiques identifiés par la méthode du pincement.
- D'autre part, la disparité temporelle des flux s'oppose parfois aux solutions de récupération de chaleur, par exemple l'appel de puissance irrégulier des flux (chauds et froids). Ce problème est souvent rencontré pour les procédés Batch, où les flux énergétiques (chauds et/ou froids) ne sont pas disponibles simultanément, et requièrent l'installation de systèmes de stockage thermique. Bien que dans certains cas une réorganisation des horaires de travail peut permettre de surmonter cette difficulté, cette solution n'est pas toujours évidente pour l'industriel [KRU01].
- Les difficultés technologiques de l'application de la théorie sur les différents types de flux énergétiques. Cette difficulté est particulièrement rencontrée lorsque l'échange entre les différents flux énergétiques est difficile par le moyen de simples échangeurs de chaleur. Un exemple particulier de cette difficulté est présent dans les Industries Agro Alimentaires (IAA). En effet, dans ce type d'industries, le lavage du matériel est indispensable pour des raisons sanitaires et bactériologiques. Cette opération s'effectue à une température moyenne comprise entre 60 et 70 °C [ABO06]. Une grande partie de l'énergie thermique est transférée de l'eau chaude de lavage vers les objets lavés. Les flux chauds sont transférés vers des solides plus froids. Ces flux peuvent être « oubliés » lors de l'établissement des courbes composites, et cela est dû au fait que le chauffage du matériel lavé n'est pas nécessaire, contrairement à la solution de lavage qui doit être intégrée dans l'analyse. La MP reste neutre sur ce sujet, visant plutôt les procédés possédant des flux énergétiques liquides ou gazeux.

- La MP seule ne présente pas une évaluation des pertes dues aux irréversibilités dans les différentes opérations (pertes exergetiques) [ANA05]. Ces pertes sont cependant importantes puisqu'elles servent en premier lieu à identifier si les sources d'énergies utilisées sont appropriées au procédé, voire le(s) produit(s), désiré(s). De plus, l'analyse exergetique présente un avantage vis-à-vis de la comparaison des pertes énergétiques les unes par rapport aux autres. D'autre part, elle permet d'identifier et de quantifier les pertes liées à la dégradation du niveau d'énergie (voir paragraphe 3.2), permettant ainsi la détection de pertes thermodynamiques liées par exemple à la production de vapeur à une pression de 700 kPa ($T = 165\text{ °C}$) pour une utilisation à une température de 60 °C. Cet avantage présenté par l'analyse exergetique n'est pas traitable par la MP seule, une combinaison de l'analyse exergetique et de l'analyse du pincement est nécessaire, elle sera présentée dans les paragraphes suivants.

De plus, des contraintes technologiques, s'opposant à l'application de la MP aux procédés industriels, s'ajoutent des contraintes économiques. Ces contraintes sont particulièrement importantes dans le cadre de cette étude, compte tenu de son objectif principal. D'après l'« Integrated Pollution Prevention and Control » (IPPC), la MP ou l'intégration des procédés s'avère coûteuse dans les cas « non simples » [IPP07]. La MP est essentielle car elle donne une vision système tant du point de vue de l'existant que pour les nouvelles options techniques.

3.1.9. Méthode d'intégration indirecte et mixte directe/indirecte des procédés batch

Le problème de la disparité temporelle des flux énergétiques présents dans les procédés batch implique une nécessité de stockage d'énergie pour permettre l'intégration des procédés et l'application de la MP. Ces systèmes de stockage serviront de fluides intermédiaires vers lesquels l'énergie est transférée des flux chauds et desquels l'énergie est transférée vers les flux froids après stockage. Ce type de récupération est appelé transfert indirect, à l'opposition du transfert direct courant dans les procédés continus où les flux sont disponibles simultanément, et partiellement pour les flux batch où ce type de transfert est appliqué aux flux simultanément disponibles.

Krummenacher et al. ont proposé une méthodologie combinant le transfert direct et le transfert indirect de chaleur, basés sur la MP. La méthodologie consiste en une optimisation technico-économique de systèmes de stockage d'énergie [KRU01]. Différentes méthodes traitant ce sujet ont été proposées avant, comme [MIK98, STO95], mais celles-ci n'étaient pas basées sur la MP, et par la suite se sont avérées difficiles à appliquer. La méthode de Krummenacher et al. est basée sur la MP et tire avantage de la simplicité de la représentation visuelle que fournit cette dernière.

Pour simplifier le travail de l'ingénieur, cette méthode propose une représentation graphique modifiée de courbes composites en insérant une courbe composite de stockage entre les deux courbes (flux chauds et flux froids). Cette courbe est représentée Figure 1-11. La composite de stockage représente en d'autres termes les flux énergétiques présents au niveau des fluides intermédiaires.

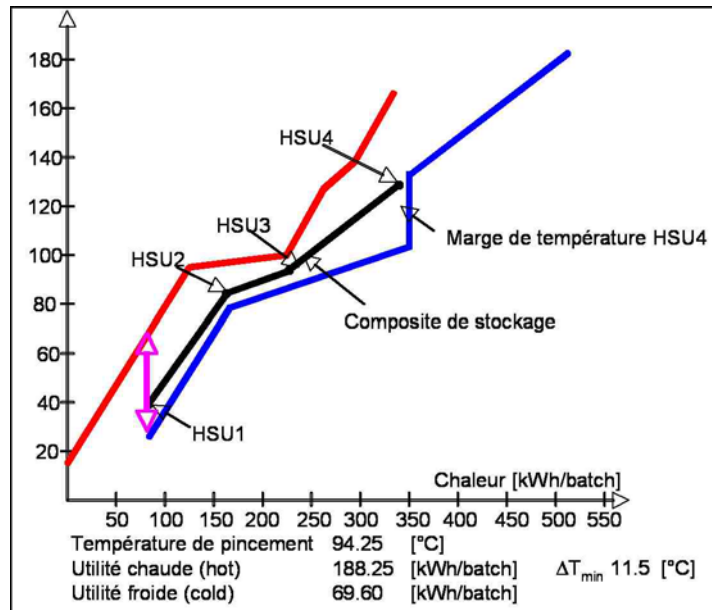


Figure 1-11. Schéma exemple des courbes composites chaude, froide et de stockage [KRU01]

Chaque unité de stockage est supposée à température constante et masse variable (Fix Temperature Variable Mass, FTVM). Le fluide stocké est transféré d'une unité de stockage HSU (Heat Storage Unit) vers la suivante (exemple de l'unité de stockage HSU4 vers HSU3 et vice versa). Le système de transfert indirect fonctionne selon la méthode suivante .

En premier lieu, un transfert de chaleur du flux chaud vers le flux de stockage est effectué. Le fluide de stockage est alors chauffé à la température de l'unité de stockage de destination. Ensuite, et selon les horaires du procédé , l'énergie contenue dans le fluide de stockage est transférée vers le flux froid correspondant, le fluide de stockage est alors refroidi et passe de l'unité de stockage k à l'unité de stockage k-1 (voir Figure 1-11). Krummenacher introduit alors ce qu'il appelle le « sous-système de stockage » (Sss) qui est formé par deux unités de stockage adjacentes.

Cette méthode est basée sur la loi présentée par Sadr-Kazemi et al. [SAD96]. Elle utilise la représentation graphique et permet de déterminer le nombre minimal d'unités de stockage ainsi que les limites de leurs températures d'opération.

Il s'agit ensuite de déterminer la configuration présentant le coût annuel minimal, comme illustré sur la Figure 1-12. Krummenacher et al. démontrent ainsi que le coût annuel minimal n'est pas forcément lié au nombre minimal d'unités de stockage. Ceci est dû au fait que la quantité de chaleur récupérable est directement liée au nombre de HSUs (voir Figure 1-12).

Figure 1-12, les coûts sont calculés pour différents nombre d'unités de stockage. Le coût est tout d'abord maximal puis diminue au fur et à mesure que la quantité d'énergie récupérée augmente (cette quantité détermine le coût d'exploitation ou le coût annuel de consommation énergétique). Pour un nombre d'unités de stockage fixe, le coût varie inversement à la variation de l'énergie récupérée, pour atteindre un coût minimal correspondant à la valeur maximale d'énergie récupérable par le nombre déterminé d'unités de stockage. Ce coût augmente ensuite avec une pente rapide. Cette augmentation est due à l'introduction d'un flux froid qui oblige à augmenter la quantité d'énergie stockée et donc les coûts, En effet, en se référant à la Figure 1-11, augmenter la quantité d'énergie récupérée revient à déplacer la courbe froide vers la gauche. L'augmentation rapide du coût dans ce cas provient du changement de pente de la courbe froide qui implique un accroissement des quantités d'énergie stockées.

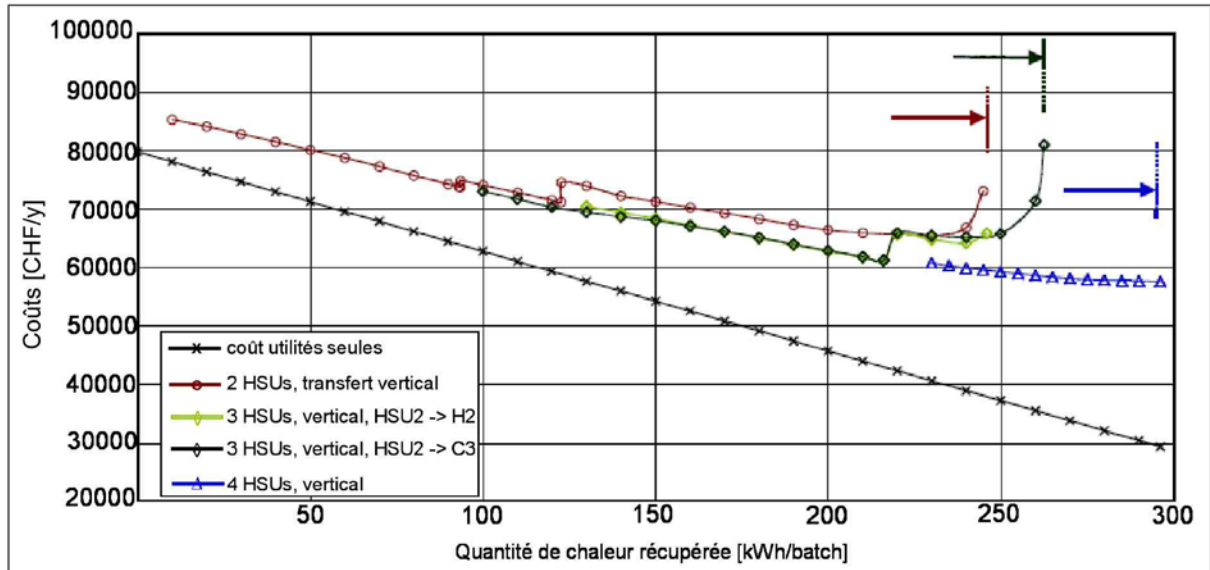


Figure 1-12. Courbes du coût annuel pour différentes configurations

Une démarche de transfert de chaleur mixte (direct/indirect) est ensuite proposée. Cette méthode est basée sur un critère important pour les procédés batch : la flexibilité des opérations, directement liée aux horaires de production. Il est donc souvent difficile de modifier les horaires de production pour permettre un échange direct entre différents flux chauds et froids. Cependant, le transfert de chaleur mixte direct/indirect permet de diminuer les coûts d'investissement du système global par rapport au système de transfert indirect, et ceci grâce à la diminution du nombre de HSUs et du nombre d'échangeurs de chaleur.

L'introduction du transfert direct entre flux chauds et flux froids est uniquement possible, lorsque ces flux sont présents simultanément, et n'affectent pas la flexibilité des opérations. Par ailleurs, 4 critères sont proposés par Kruppenacher et al. pour détecter facilement la faisabilité et la rentabilité de l'opération de transfert de chaleur mixte direct/indirect.

- La présence simultanée de deux flux chaud et froid, possédant un gradient de température suffisant pour la mise en place d'un transfert de chaleur.
- L'existence d'une quantité de chaleur récupérable par le système global significative comparée au système de transfert indirect. En effet, si la quantité de chaleur récupérable est affectée par l'introduction du transfert mixte, ceci peut conduire à une augmentation du coût total.
- La présence d'un des deux cas amène à l'introduction du transfert direct. En effet, le transfert direct peut être utile dans deux cas : le premier étant lorsque ce transfert permet l'élimination d'une unité de stockage et par suite la diminution du coût d'investissement ; le second étant lorsque le transfert indirect possède un coefficient de transfert thermique global faible. Dans ce dernier cas, le transfert direct peut améliorer l'efficacité d'échange grâce à l'augmentation du gradient de température, et par conséquent la diminution de la surface totale d'échange et donc du coût des échangeurs. L'introduction du transfert direct doit impliquer l'une de ces deux conséquences pour assurer la rentabilité de l'opération.
- La superposition des flux en terme d'horaires de production. La superposition totale des flux, accompagnée de niveaux de température adéquats présente un avantage.

Les différentes méthodes d'intégration énergétique des procédés batch par des systèmes de stockage et un transfert direct et/ou indirect répondent aux limitations de la MP vis-à-vis de la disparité temporelle des flux énergétiques traités. Ces méthodes restent avantageuses du point de vue de la récupération d'énergie des flux chauds présents dans l'usine.

3.2. La théorie de l'exergie

Le premier principe de la thermodynamique énonce que l'énergie ne se détruit pas. Cependant, une énergie disponible à une température élevée ne peut pas être comparée à une énergie disponible à une température plus basse, d'où le concept de disponibilité de l'énergie (ou l'exergie), basée sur la combinaison du premier et deuxième principes de la thermodynamique.

3.2.1. Définition

Un travail utile peut être tiré de deux systèmes à des états thermodynamiques différents interagissant entre eux pour arriver à un état d'équilibre. Un système ou une source d'énergie se trouvant à un état différent de l'état de son environnement, produira du travail utile pour arriver à l'état d'équilibre avec ce dernier. Le travail maximal pouvant être tiré de cette interaction entre le système (ou la source d'énergie) et l'environnement est défini comme étant l'exergie disponible dans la source d'énergie [BEJ96].

3.2.2. Bilan d'exergie

Contrairement à l'énergie, l'exergie peut être détruite durant un procédé particulier. Cette destruction résulte principalement des irréversibilités du procédé lui-même [BOR87, LEG79] et de la génération d'entropie par le procédé. Il s'agit donc de combiner le premier et le deuxième principes de la thermodynamique pour établir le bilan d'exergie. L'équation (1.5) [BOR87] donne le bilan général d'exergie pour un volume de contrôle.

$$\sum_k [W_k^+] + \sum_i \left[\int \left(1 - \frac{T_a}{T_i} \right) \delta \dot{Q}_i^+ \right] + \sum_n \left\{ \sum_j \left[(h_{czj} - T_a s_j) \dot{M}_j^+ \right] - \frac{d}{dt} (U_{ecz} - T_a S) \right\} - T_a \frac{\delta S^i}{dt} = 0 \quad (1.5)$$

Avec :

- W_k^+ : puissance-travail effective reçue par le système au niveau de la machine k
- \dot{Q}_i^+ : puissance-chaleur reçue de la source à température T_i
- h_{cz} : enthalpie totale massique
- s_j : entropie massique de la matière j entrant au volume de contrôle
- \dot{M}_j^+ : débit massique de la matière j entrant au volume de contrôle
- U_{ecz} : énergie interne totale du système ($U_e = U + P_a V$)
- S : entropie du système
- T_a : température de l'environnement
- $\frac{\delta S^i}{dt}$: génération interne d'entropie

La destruction de l'exergie est donnée par l'équation (1.6).

$$Ex_D = T_a \frac{\delta S^i}{dt} \quad (1.6)$$

L'analyse exergétique sert donc à déterminer les pertes exergétiques (ou pertes de disponibilité de l'énergie) au cours d'un procédé étudié.

3.2.3. Valeur ajoutée de l'analyse exergétique

Les imperfections de la plupart des systèmes thermodynamiques sont dues principalement aux irréversibilités internes du système. Ces irréversibilités sont causées par les différents transferts de chaleur entre les fluides du système, ainsi que par les dissipations dues aux frottements ou aux pertes de charges... Le premier principe de la thermodynamique ne permet pas la quantification de ces pertes, d'où l'utilisation de la combinaison des premier et deuxième principes. La comparaison des sources d'énergie interagissant dans un système et la détermination de la compatibilité de celles-ci permet l'évaluation de la dégradation de l'énergie et ainsi la quantification des pertes thermodynamiques d'un système [STA95].

D'autre part, pour déterminer l'exergie disponible dans une source d'énergie thermique, ou dans une quantité de chaleur transférée au système étudié à une température T_s , il faut revenir à la définition initiale de l'exergie (paragraphe 3.2.1). Le travail maximal qui peut être généré par le passage de cette source d'énergie à l'état d'équilibre avec l'environnement peut être calculé théoriquement en utilisant un cycle moteur idéal réversible (donc pas de génération d'entropie). Le cycle idéal de Carnot (Figure 1-13) présente ces critères.

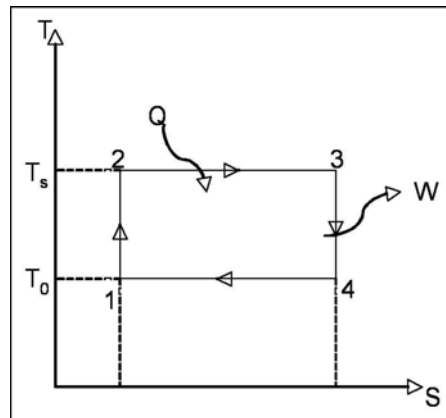


Figure 1-13. Diagramme entropique du cycle moteur idéal de Carnot

L'exergie disponible dans la source d'énergie peut alors être calculée par l'équation (1.7)

$$Ex = W = \eta_c Q \quad (1.7)$$

avec :

- Ex : exergie disponible dans la quantité de chaleur
- Q : quantité de chaleur disponible dans la source d'énergie étudiée
- η_c : rendement du cycle de Carnot (appelé aussi facteur de Carnot)

Le facteur de Carnot est donné par l'équation (1.8)

$$\eta_c = 1 - \frac{T_0}{T_s} \quad (1.8)$$

avec T_s la TEMPERATURE de la source d'énergie étudiée.

Cette méthode de calcul de l'exergie contenue dans une source d'énergie thermique montre que l'énergie thermique est ainsi transformée en une énergie équivalente en travail. Il s'ensuit alors que l'exergie disponible dans une source d'énergie mécanique ou électrique est égale à l'énergie contenue dans cette source avec un facteur de Carnot de valeur 1.

A l'aide de l'exergie, les énergies mécaniques et thermiques peuvent être représentées par les mêmes équations et les mêmes graphes, d'où une valeur ajoutée de l'Analyse Exergétique (AEx).

3.2.4. La méthode « Inside-out » de Kissock

Cette méthode propose une étude exergetique de l'usine à l'image de la Figure 1-14.

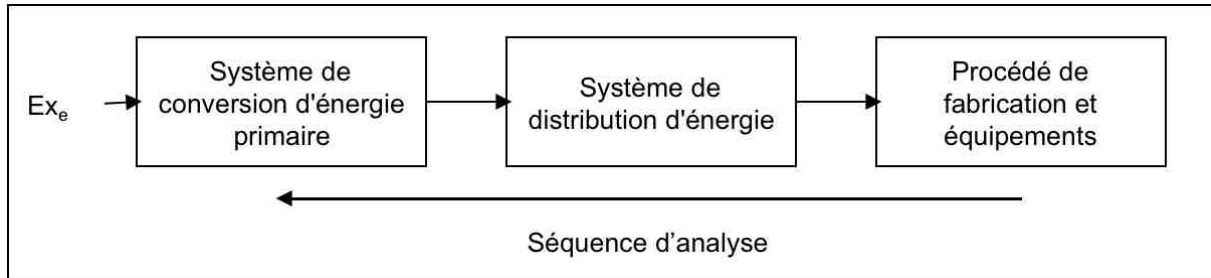


Figure 1-14. Schéma du système d'analyse selon la méthode de Kissock [KIS07]

La majorité des méthodes d'analyse énergétique des procédés industriels existantes propose des analyses des équipements de conversion d'énergie de l'unité de production. Ces équipements, comme les chaudières de production de vapeur ou des groupes frigorifiques, ne sont parfois pas adaptés au procédé qui les utilise. Kissock et al. [KIS07] proposent une analyse exergetique dont le point de départ est le procédé de fabrication étudié.

Cette méthode est principalement basée sur l'équation (1.9), qui montre que minimiser l'exergie détruite revient à adapter la source d'énergie à l'utilisation finale de celle-ci.

$$Ex_D = (Ex_e - Ex_{utile}) - Ex_p \quad (1.9)$$

avec :

- Ex_D : exergie détruite
- Ex_e : exergie entrante
- Ex_{utile} : exergie utile
- Ex_p : exergie perdue par les effluents ou déchets ou différentes pertes énergétiques

La méthode consiste donc en une analyse exergetique des différents équipements, en partant du procédé de fabrication et en remontant à l'énergie entrant dans l'usine. Cette analyse exergetique servira à identifier les sources de dégradation d'énergie (et donc de destruction de l'exergie) en vue d'adapter la source d'énergie primaire⁴ au procédé étudié.

En se basant sur cette méthode, Frazier propose un moyen de systématisation de l'analyse des procédés industriels, en combinant les analyses énergétique et exergetique.

⁴ Dans ce contexte, l'énergie primaire est l'énergie achetée par l'usine. Cette source d'énergie peut être une énergie électrique ou combustible.

3.2.5. La méthode de Frazier

Frazier propose comme point de départ de l'analyse, l'Energie Minimale Requise (EMR) par le procédé industriel étudié [FRA06]. Cette EMR est calculée en analysant les différentes étapes de transformation du produit et en calculant sa variation d'énergie interne. La méthode est ciblée aux grandes industries et démontrée notamment pour les industries automobiles et métallurgiques.

Deux phases importantes délimitent cette approche ; l'analyse du rendement énergétique basé sur l'EMR et l'analyse exergetique.

En se basant sur l'EMR, l'analyse propose un moyen de sélection des opérations présentant les rendements énergétiques les plus faibles combinés à des consommations énergétiques non négligeables, ces rendements énergétiques étant définis par l'équation(1.10).

$$\eta_{en} = \frac{EMR}{ER} \quad (1.10)$$

avec :

- η_{en} : rendement énergétique
- EMR : Energie Minimale Requise
- ER : Energie Réelle dépensée

L'EMR sert ensuite à répartir la consommation énergétique en deux composantes : l'EMR appelée « énergie à valeur ajoutée » et les pertes énergétiques appelées « énergie sans valeur ajoutée » (voir Figure 1-15).

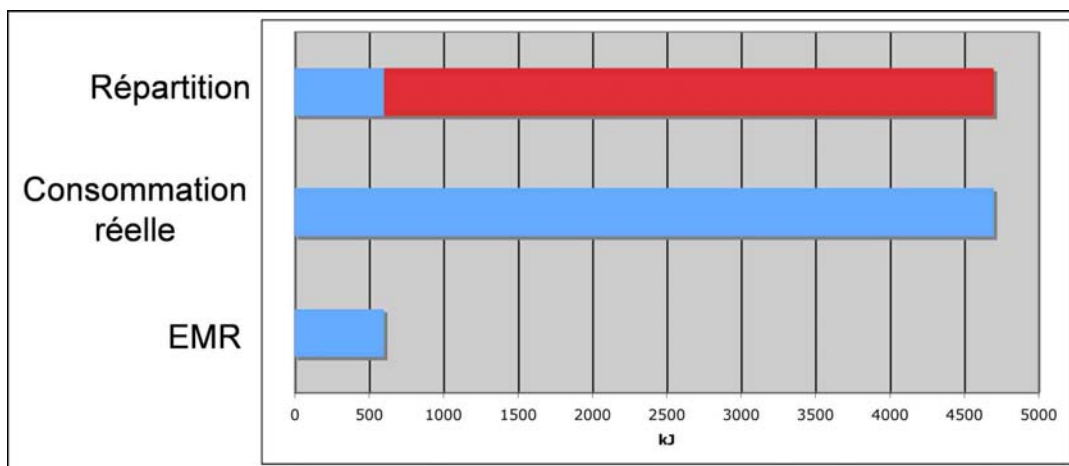


Figure 1-15. Exemple de répartition de la consommation énergétique [FRA06]

La deuxième phase repose sur une approche exergetique des différentes opérations de transformation du produit. Pour découpler l'analyse exergetique de l'analyse énergétique des différents systèmes, ainsi concentrant l'analyse exergetique sur les pertes thermodynamiques par irréversibilités, Frazier utilise l'équation (1.11). Cette équation définit le rendement exergetique comme étant le produit de deux rendements :

- le rendement énergétique traditionnel qui prend en compte les pertes énergétiques, et qui est basé sur le premier principe de la thermodynamique ;
- Le rendement du deuxième principe (qu'il appelle aussi « efficacité d'utilisation de l'exergie ») qui prend en compte la destruction de l'exergie.

$$\eta_{ex} = \eta_I \eta_{II} \quad (1.11)$$

Avec

- η_{ex} : rendement exergetique
- η_I : rendement du premier principe
- η_{II} : rendement du deuxième principe

Il s'ensuit que le rendement du deuxième principe pour une opération thermique est défini par l'équation (1.12) [FRA06].

$$\eta_{II} = \frac{(1 - T_0/T_u)}{(1 - T_0/T_s)} \quad (1.12)$$

avec les indices :

- u : usage (procédé)
- s : source d'énergie appliquée

Cette dissociation entre rendement énergétique et efficacité d'utilisation de l'exergie permet de découpler clairement les pertes énergétiques des pertes dues à la destruction de l'exergie. Cette approche permet de cibler plus facilement les pertes dues à l'inadaptation entre la source d'énergie fournie au procédé et l'énergie nécessaire au procédé.

Elle présente cependant un inconvénient au niveau du lien existant entre l'analyse des données selon cette méthodologie et la collecte des données nécessaires à son application. En effet, cette méthodologie nécessite un synoptique détaillé de l'usine et un relevé de l'intégralité des flux énergétiques des différentes opérations. Il reste qu'à partir de cette méthode, une étude préalable de principe pourrait conduire à l'identification de quelques opérations énergivores.

3.3. La MP étendue aux facteurs exergetiques

Comme déjà démontré dans les paragraphes précédents, la MP présente des avantages non négligeables en terme d'optimisation énergétique des procédés industriels, mais en même temps elle présente des inconvénients. D'autre part, l'analyse exergetique présente un remède aux insuffisances du premier principe de la thermodynamique sur lequel est basée la MP. Plusieurs auteurs ont proposé des combinaisons de l'analyse exergetique avec la MP, pour bénéficier de la simplicité de la représentation graphique de la MP à l'aide des courbes composites [ANA05]. Dans ce paragraphe, une revue des méthodologies les plus importantes est présentée.

3.3.1. La MP étendue à l'analyse exergetique pour le ciblage de l'énergie travail des compresseurs frigorifiques

La première méthode utilisant une combinaison entre l'AEx et la MP a été proposée par Linnhoff et al. [LIN92]. Cette méthode a pour but de minimiser le travail des compresseurs des groupes frigorifiques sur les procédés à température inférieure à la température ambiante.

En effet, la méthode du pincement ne permet pas d'intégrer la consommation en énergie mécanique ou électrique, et ceci parce qu'elle est concentrée sur les flux thermiques. L'AEx permet d'intégrer ces deux types d'énergie dans un même calcul (voir paragraphe 3.2.3). En remplaçant l'axe de température dans les courbes composites par un axe représentant le facteur de Carnot, la Grande Courbe Composite d'Exergie (GCCE) permet de déterminer les pertes exergetiques du système étudié. La Figure 1-16 représente schématiquement la construction de la GCCE.

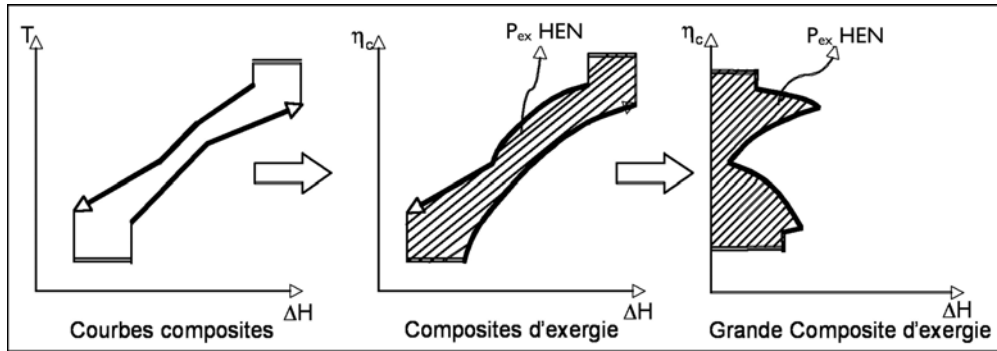


Figure 1-16. Construction de la Grande Courbe Composite Exergétique (GCCE) [LIN92]

avec :

- η_c : facteur de Carnot
- P_{ex} : pertes exergetiques
- HEN : réseau d'échangeurs de chaleur

L'équation (1.7) [LEG79] montre que l'aire de la surface comprise entre les deux composites représente les pertes exergetiques dans le réseau d'échangeurs de chaleur, puisque cette aire représente le produit du facteur de Carnot par l'énergie (ici représentée par ΔH).

Pour les systèmes à basse température (inférieure à la température ambiante), Linnhoff propose une méthode pour la diminution de la consommation énergétique des compresseurs des groupes frigorifiques. Cette méthode ne nécessite pas une étude de conception du système frigorifique, et fournit une méthode de calcul pour la cible énergétique en termes de travail des compresseurs. La Figure 1-17 représente les flux d'exergie dans un système à basse température. Une amélioration est introduite entre le cas A et le cas B. Cette amélioration consiste à refroidir une partie du procédé par de l'eau de refroidissement (exemple eau de forage à 15 °C) disponible sans système de réfrigération. Il est cependant à noter que les pertes exergetiques par irréversibilités internes aux différents échangeurs de chaleur ne sont pas prises en compte, vu que la représentation de la grande courbe composite exergetique sert uniquement à représenter les pertes exergetiques par transfert de chaleur.

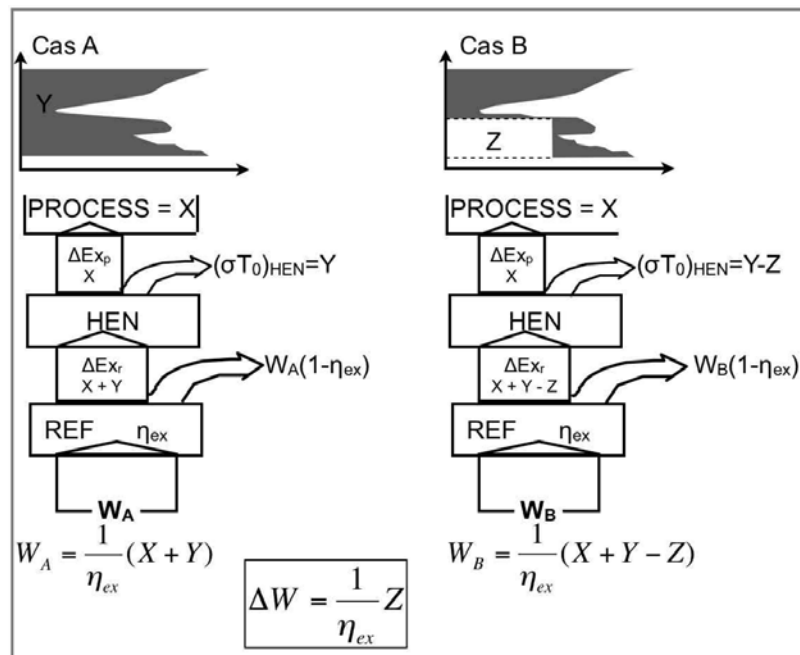


Figure 1-17. Flux d'exergie dans les systèmes à basse température [LIN92]

avec :

- ΔEx_p : exergie transférée au procédé
- ΔEx_r : exergie fournie par le système de réfrigération
- η_{ex} : rendement exergetique du système de réfrigération
- W_A : travail des compresseurs pour le cas A
- W_B : travail des compresseurs pour le cas B

Le calcul de la nouvelle consommation énergétique ne nécessite pas une reconception du système de réfrigération. Ce calcul est basé sur l'hypothèse d'un rendement exergetique constant des systèmes de réfrigération avec les mêmes températures et les mêmes fluides frigorigènes [DHO91].

Dans une analyse énergétique classique, l'énergie thermique ne peut pas être comparée à l'énergie mécanique ou électrique alors que l'analyse exergetique le permet. La méthode de Linnhoff a montré son intérêt pour l'optimisation de la consommation énergétique des systèmes demandeurs et accepteurs d'énergie thermique ou mécanique. Cette méthode se basant sur la GCCE et le facteur de Carnot a été étendue par Feng et al. [FEN97] en vue de déterminer les pertes exergetiques dans les systèmes mécaniques (comme les compresseurs et turbines), et ceci pour identifier les modifications possibles au niveau du procédé conduisant à des économies d'énergie.

3.3.2. Modifications du procédé par la MP étendue aux facteurs exergetiques

Feng et al. introduisent le concept du « niveau d'énergie » Ω , basé sur l'AEx, pour déterminer l'évolution exergetique d'une opération mécanique. L'équation (1.13) introduit le calcul de Ω . Les équations (1.14) à (1.16) sont des applications particulières de l'équation générale (1.13) pour des procédés thermodynamiques souvent rencontrés.

$$\Omega = \frac{Ex}{E} \quad (1.13)$$

Pour le travail :

$$\Omega = 1 \quad (1.14)$$

Pour la chaleur :

$$\Omega = \eta_c = 1 - \frac{T_0}{T} \quad (1.15)$$

Pour le transfert de chaleur :

$$\Omega = \frac{\Delta Ex}{\Delta H} \quad (1.16)$$

avec :

- Ω : niveau d'énergie de la source d'énergie
- T_0 : température ambiante (généralement prise égale à 15 °C)

La Figure 1-18 montre les courbes composites « niveau d'énergie » pour les mêmes procédés évoqués dans les équations (1.14) à (1.16).

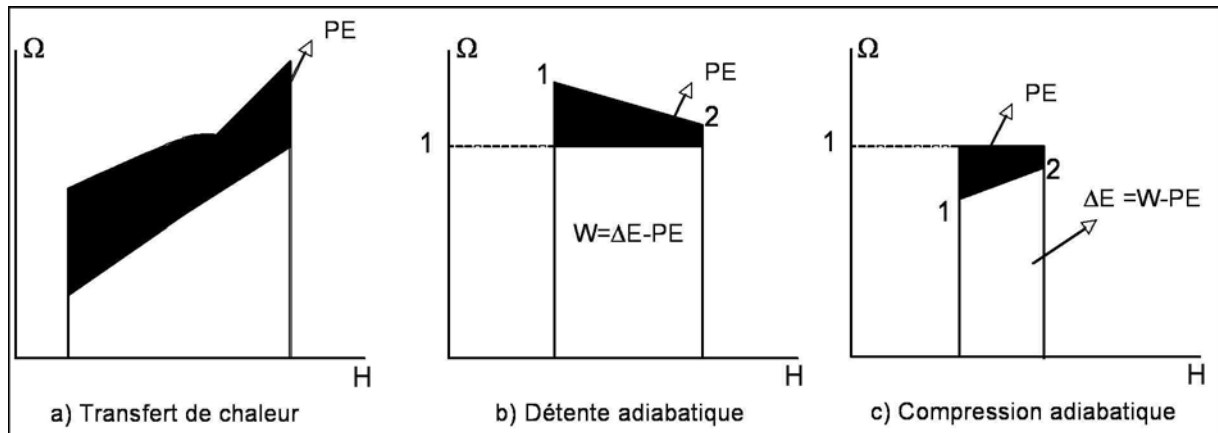


Figure 1-18. Courbes du niveau d'énergie pour des procédés usuels [FEN97]

avec :

- PE : Pertes Exergetiques
- W : travail
- ΔE : variation d'exergie de la transformation

La méthode proposée par Feng et al. [FEN97] consiste en une analyse exergetique selon les courbes du niveau d'énergie des différents procédés de l'usine. Les pertes exergetiques sont classées en deux catégories différentes.

- Les pertes exergetiques inévitables : il s'agit des pertes exergetiques dont l'élimination ne répond pas aux critères de faisabilité technologiques ou économiques. Par exemple, les pertes exergetiques dues à un écart de températures minimum pour assurer un transfert de chaleur. En effet, ces pertes ne peuvent être éliminées que si l'écart de températures est nul, ce qui nécessite une surface d'échange infinie, technologiquement infaisable. Dans un tel cas, le pincement minimal pouvant être atteint par les technologies d'échangeurs de chaleur existantes est pris en considération, et les pertes exergetiques dues à cet écart minimum de températures seront les pertes exergetiques inévitables.
- Les pertes exergetiques évitables : pertes exergetiques dont l'élimination est faisable technologiquement ainsi qu'économiquement.

Cette classification des pertes exergetiques du procédé permet de cibler les modifications à faire au niveau du procédé, en vue d'éliminer les pertes exergetiques évitables. Les pertes exergetiques inévitables représentent donc la force motrice minimale pour le fonctionnement du procédé. Elles déterminent le procédé idéal et la limite des améliorations pouvant être appliquées à ce procédé.

La valeur ajoutée de cette méthode se présente sous deux volets :

- l'introduction de l'analyse exergetique, servant à analyser en même temps les systèmes thermiques/thermodynamiques ainsi que les systèmes mécaniques (voir Figure 1-19) ;
- la classification des pertes exergetiques en « évitables » et « inévitables », servant à sélectionner les équipements présentant des pertes évitables, et non pas les équipements présentant des pertes inévitables.

La Figure 1-19 représente les courbes composites des niveaux d'énergie pour un procédé de production d'énergie électrique par cycle combiné. Par la décomposition des pertes exergetiques, les équipements présentant des pertes exergetiques non négligeables mais inévitables peuvent être éliminés de l'étude comme étant bien optimisés. Cependant l'étude

peut être redirigée vers les équipements présentant davantage de pertes exergetiques évitables, économisant ainsi un temps de travail non négligeable.

Note : A la Figure 1-18, la détente adiabatique est représentée comme étant une évolution à $\Omega > 1$, parce que l'exergie utile tirée de cette transformation est du travail, ce qui correspond à un niveau d'énergie égal à 1. Cependant, dans la représentation de Feng (Figure 1-19), les transformations correspondantes (turbine Haute Pression, turbine Basse Pression et turbine Pression Intermédiaire) sont représentées avec un $\Omega < 1$. Ceci est dû au fait que la représentation introduite à la Figure 1-19 est une représentation schématique servant à représenter sous forme de surfaces les pertes exergetiques par opérations mécaniques et par transferts de chaleur.

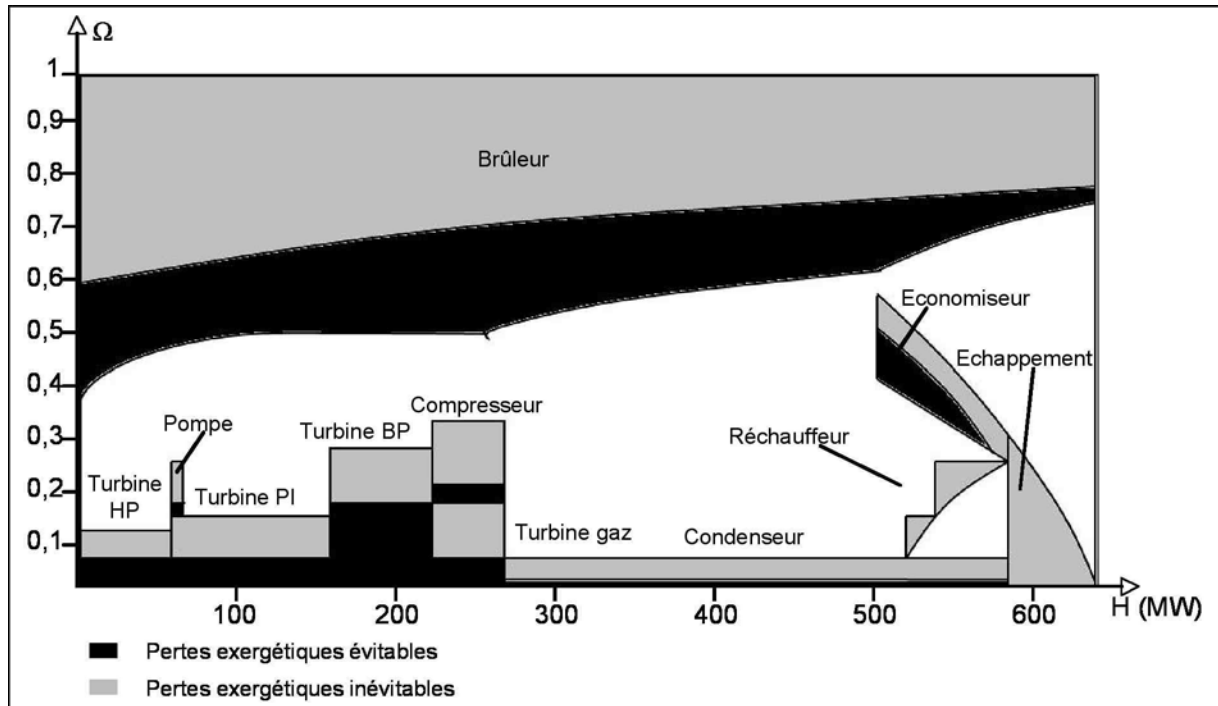


Figure 1-19. Pertes exergetiques évitables et inévitables [FEN97]

L'inconvénient de cette méthode vis-à-vis de la présente étude est sans doute la quantité de données nécessaires pour son application, ce qui augmente considérablement son coût. Elle reste cependant intéressante du point de vue de la détermination du mode de fonctionnement idéal du procédé et des limitations des améliorations possibles.

3.3.3. Extension de la MP vers les facteurs exergetiques pour l'étude de l'impact environnemental

Une étude de l'extension de la MP vers les facteurs exergetiques en vue de la détermination de l'impact environnemental du procédé a été proposée par Staine et al. [STA96]. Cette méthode propose l'étude des pertes exergetiques dues à l'échange de chaleur entre les différents flux du procédé, incluant les pertes exergetiques ayant lieu lors du cycle de vie des différents échangeurs comme durant leurs fabrications.

En effet, pour inclure l'impact environnemental dans la MP, Staine et al. ont proposé une analyse du cycle de vie des équipements du procédé, en se concentrant sur les échangeurs. L'analyse du cycle de vie des échangeurs est concentrée sur les pertes exergetiques. Les pertes exergetiques sont ensuite reliées à l'impact environnemental des différents équipements, grâce à des méthodes comme celles introduites par Frangopoulos et al. [FRA93]. La Figure 1-20 résume les courbes composites étendues aux facteurs exergetiques (diagramme $\eta_c - H$) où les pertes exergetiques sont représentées pour les différentes phases du cycle de vie des échangeurs.

Le choix du pincement optimal et le placement des échangeurs répondront donc au critère de pertes exergetiques minimales sur le cycle de vie du système, ces pertes étant fortement liées à l'impact environnemental de ce système sur son cycle de vie total.

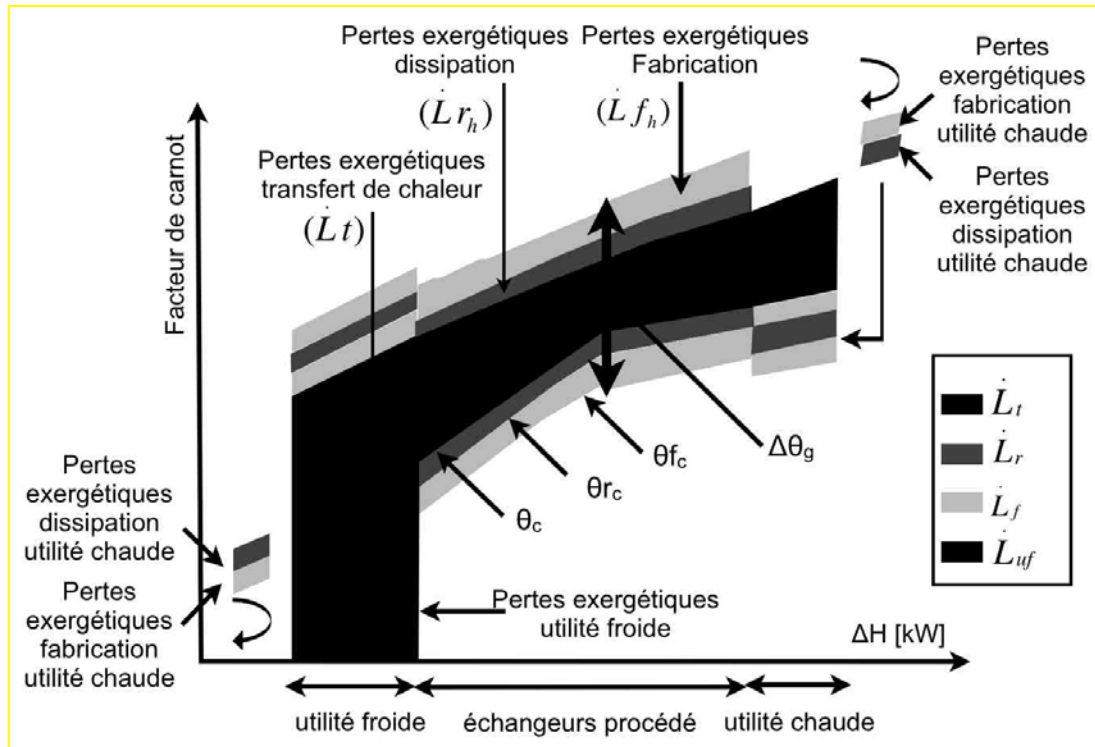


Figure 1-20. Pertes exergetiques d'un procédé étudié étendues au cycle de vie des échangeurs de chaleur [STA96]

Avec $L = Ex_D$ l'exergie détruite

Les méthodes présentées dans ce chapitre possèdent un point commun important qui n'est autre que l'énergie minimale requise par le procédé industriel. D'autres méthodes, généralement utilisées dans le domaine, prennent comme point de départ l'énergie entrant dans le site industriel étudié ; elles sont appelées les méthodes « outside-in » ou « top-down ». Ces méthodes présentent des limitations vis-à-vis de la détermination de l'énergie minimale requise par le procédé industriel, parce qu'elles consistent en une simple analyse des différents équipements de transformation d'énergie dans l'usine (ou les utilités).

4. L'Analyse du Cycle de Vie

Les méthodes présentées se concentrent sur le procédé industriel. Cependant, l'objectif principal d'une usine est de fabriquer le produit et non de faire fonctionner le procédé. Il est donc important de concentrer l'étude sur le produit et non le procédé de fabrication. Pour ceci, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) présente des avantages, bien qu'elle soit concentrée sur l'impact environnemental du produit sur son cycle de vie et non nécessairement sur l'impact énergétique ou exergetique.

L'ACV a été d'abord introduite par Harold Smith au début des années 1963 par un calcul des coûts énergétiques cumulés pour la fabrication des produits et produits intermédiaires chimiques [CIA97]. Après cette présentation, l'ACV connut un développement jusqu'en 1997, où ISO 14040 définit l'analyse et ses étapes [SON04]. Il s'agit d'étudier tous les impacts environnementaux d'un produit ou procédé sur toute la durée de son cycle de vie « du berceau à la tombe », prenant en compte l'extraction des ressources et matières premières, le recyclage et la fin de vie du produit et toutes les étapes de son cycle de vie entre ces deux points.

ISO 14040 définit les étapes de l'ACV :

- définition du cadre et du but de l'étude
- inventaires des consommations/émissions
- évaluation des impacts
- interprétation des résultats

4.1. Définition du cadre et du but de l'étude

Cette étape sert à définir l'objectif de l'étude de l'ACV sur un produit ou sur un procédé bien déterminé. L'objectif servira à identifier les grandeurs ciblées par l'analyse ainsi que ses frontières. Cette étape s'effectue en trois phases essentielles [SON04] :

- Définition de l'objectif de l'étude servant à définir la (les) grandeur(s) cible(s).
- Définition des frontières du système en établissant deux points essentiels :
 - Les limites spatiales entre le produit et son voisinage plus tard appelé environnement.
 - Le synoptique des différentes étapes du cycle de vie du produit ou procédé étudié. Ce synoptique sert à établir les différents flux (matières premières, flux de matières et d'énergie du produit vers l'environnement ou de l'environnement vers le produit, effluents, déchets...etc.). Cette phase sert uniquement à établir les différents flux et non pas à les quantifier.
- Définir les données nécessaires pour l'analyse. Ces données sont impératives pour effectuer l'inventaire des émissions et consommations, ainsi que l'analyse de l'impact.

4.2. Inventaire des consommations/émissions

L'inventaire des consommations et des émissions représente une collecte de toutes les données nécessaires définies dans la première étape (voir paragraphe 4.1). Pour accomplir cette tâche, quatre phases essentielles sont définies.

- Collecte des données sur la totalité des flux entrant et sortant. Ces flux peuvent être des flux entre les différents procédés du cycle de vie, comme ils peuvent être des flux entre le système lui-même et l'environnement.
- Normalisation de la fonction (grandeur) principale. Ceci veut dire que toutes les données relevées ou calculées doivent être liées au calcul de cette grandeur principale, en suivant une unité de base prédéfinie ; généralement les différentes grandeurs sont rapportées à une unité de masse (1 kg par exemple) de matière première, ou une unité du produit étudié.
- Allocation des différentes activités et opérations indirectement liées au procédé étudié. Ces activités et opérations sont les opérations traitant différentes matières entrant dans le procédé, comme les émissions liées à l'extraction de l'énergie primaire utilisée dans le cycle de vie du produit ou procédé étudié.
- Evaluation des données. Elle sert à déterminer la qualité et la précision des données relevées, le calcul des incertitudes sur les différentes données ainsi qu'une étude de sensibilité.

La Figure 1-21 représente un exemple de synoptique du cycle de vie de la fabrication de chaises en bois.

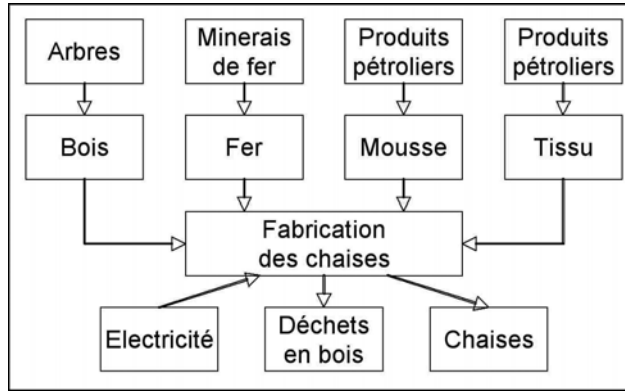


Figure 1-21. Cycle de vie simplifié de la fabrication des chaises en bois [SON04]

4.3. Evaluation des impacts

Cette étape sert à relier les résultats de l'inventaire des consommations et des émissions aux impacts sur la santé humaine, la disponibilité des ressources et l'environnement. Il s'agit de concentrer l'étude sur un nombre d'indicateurs représentatifs parmi les indicateurs relevés de l'étape 2. Trois phases essentielles sont définies pour accomplir cette tâche.

- Sélection et définition des catégories d'impacts. Ces catégories sont des classes comportant un nombre d'impacts environnementaux comme le réchauffement climatique, la pollution des eaux...etc.
- Classement en liant les différents résultats de l'inventaire aux différentes classes d'impacts.
- Caractérisation des différents impacts en choisissant une unité commune pour chaque impact (comme les kg équivalents CO₂ pour les émissions de GES).

4.4. Interprétation des résultats

Cette étape sert à dresser le rapport final de l'ACV et d'en tirer les conclusions. Elle consiste en trois phases essentielles :

- identification des résultats les plus importants de l'inventaire et de l'analyse des impacts
- évaluation des résultats de l'étude. Cette évaluation consiste à déterminer les incertitudes sur les différents calculs, les études de sensibilité des différentes grandeurs...etc.
- conclusions à tirer du rapport. Les conclusions sur l'impact environnemental du produit ou procédé étudié ainsi que les recommandations pour l'amélioration et la diminution des impacts négatifs sur l'environnement.

L'ACV, bien que concentrée sur les impacts environnementaux d'un produit, est transposable à l'analyse de la transformation spécifique d'un produit dans un procédé particulier de production. Il s'agit alors d'étudier le produit fabriqué par l'usine « de la matière première au produit fini ».

La matière première représente l'état du produit à son entrée à l'usine ; ce produit peut représenter une matière première (comme le lait dans une usine de fromage) ou peut même représenter un produit semi fini (comme le fromage semi fini servant à fabriquer le fromage fondu).

Le produit fini est aussi redéfini. Il s'agit du produit sortant du procédé de fabrication étudié.

5. Conclusions tirées de la revue bibliographique

Dans ce chapitre, les méthodes les plus importantes d'analyse et d'optimisation énergétique des procédés industriels ont été présentées, avec une analyse de leurs avantages et de leurs inconvénients vis-à-vis de l'objectif principal de cette thèse.

La méthode du pincement présente une vision globale des consommations énergétiques au sein d'une usine, et permet le ciblage énergétique des consommations minimales. De plus, la combinaison de la MP avec l'AE_x, ainsi que la méthode d'analyse proposée par Feng et al. [FEN97], qui sert à déterminer les modes de fonctionnement optimaux du procédé ciblant les pertes exergetiques minimales inévitables, présentent des moyens adéquats pour minimiser les pertes énergétiques ainsi que les pertes exergetiques au sein des procédés.

D'autre part, la proposition de Frazier en ce qui concerne la répartition de la consommation énergétique de l'usine entre EMR et pertes énergétiques présente un moyen de cibler les opérations non seulement énergivores, mais celles qui présentent des potentiels d'amélioration. De plus, l'analyse exergetique utilisant le « rendement du deuxième principe » découple l'analyse exergetique de l'analyse énergétique et définit les procédés présentant le plus d'irréversibilités.

Le concept de l'énergie minimale requise est essentiel car il sert à cibler le minimum d'énergie nécessaire pour le fonctionnement du procédé. Cependant, plusieurs définitions existent pour ce concept, bien qu'elles ne soient pas explicites dans la littérature scientifique disponible.

- Selon la MP, l'EMR est l'énergie minimale requise pour le fonctionnement du procédé. Cela veut dire que le minimum requis pour le passage du produit de la phase initiale à la phase finale selon les étapes pré-définies par le procédé est calculé en intégrant les flux énergétiques du procédé et par suite optimisant la récupération d'énergie [LIN98].
- Selon la proposition de Frazier [FRA06], l'EMR est calculée en analysant la variation de l'énergie interne du produit sur les différentes opérations de transformations. Elle reste cependant neutre vis-à-vis de l'intégration des flux énergétiques et la récupération d'énergie. Cela est dû à la séparation des différentes opérations de transformation du produit, contrairement à l'intégration proposée par la MP et ces extensions.

D'autre part, ces méthodes présentent des limitations.

- Il n'existe pas de moyens systématiques pour comparer les différents procédés de fabrication d'un même produit. Cette comparaison est importante dans la mesure où elle sert à proposer un procédé optimal pour la fabrication du produit. En effet, les différentes méthodologies et approches d'analyses énergétiques et exergetiques des procédés industriels restent neutres sur ce sujet. Il faut donc baser l'étude sur l'évolution du produit de la matière première au produit final, de manière à pouvoir comparer les différents moyens de transformation ce dernier.
- Les méthodes existantes considèrent le procédé comme invariable et sont donc limitées par la consommation énergétique minimale du procédé lui-même. Il sera démontré dans les chapitres suivants que certaines modifications dans le procédé sont souvent possibles sans affecter la qualité du produit mais en diminuant la consommation énergétique, et par la suite le choix des options techniques est essentiel pour définir le procédé le plus économe.

En s'inspirant de l'ACV, l'optimisation énergétique de la fabrication du produit doit alors être concentrée sur le produit lui-même et non pas le procédé. Il s'agit donc de proposer une méthode d'analyse énergétique de la transformation du produit et non pas une analyse du procédé industriel.

Dans le chapitre suivant, une méthode d'analyse systématique est proposée, concentrée sur le produit. Les critères de base sont la qualité du produit et la productivité de l'usine, critères imposés par l'industriel.

6. Références

1. [ABO06] B. Abou Khalil, J.F. Bérail, « Analyse Énergétique de Procédés, Fromagerie Bel Cléry Le Petit », EDF R&D, 2006.
2. [AFN06] AFNOR, « Référentiel de bonnes pratiques, Diagnostic énergétique dans l'industrie », 2006.
3. [ANA05] R. Anantharaman, O.S. Abbas, T. Gundersen. « Energy Level Composite Curves—a new graphical methodology for the integration of energy intensive processes », Applied Thermal Engineering, vol. XX, 2005.
4. [ASPO] Association for the Study of Peak Oil and gas : <http://aspofrance.org/news/le-pic-de-production-de-petrole>
5. [ATE06] ATEE, Seminaire « CEE : Mode d'emploi », 25-26 avril 2006
6. [BEJ96] A. Bejan, G. Tsatsanoris et M. Moran, « Thermal Design and Optimization », Wiley-Interscience Publication, 1996.
7. [BOR87] L. Borel, « Thermodynamique et énergétique », Presses Polytechniques Romances, 1987.
8. [CIA97] D. Ciambone, « Environmental Life Cycle Analysis », Lewis Publishers, 1997.
9. [DHO91] V.R. Dhole., « Distillation column integration and overall design of subambient plants », thèse de doctorat, UMIST, 1991.
10. [FEN97] X. Feng et X. X. Zhu, « Combining Pinch and Exergy Analysis for Process modifications », Applied Thermal Engineering, 1997
11. [FRA06] R. S. Frazier, « An exergy diagnostic methodology for energy management in manufacturing », thèse de doctorat, Oklahoma State University, 2006.
12. [FRA93] C.A. Frangopoulos, M. R. Von Spakovsky, « A global environomic approach for energy systems analysis and optimization (Part I and Part II) », International Conference on Energy Systems Analysis and Ecology, Cracow, Poland, 1993.
13. [GIE07A] GIEC, « Résumé à l'intention des décideurs », 4^{ème} rapport d'évaluation, 2007.
14. [GIE07B] GIEC Groupe de travail I « Rapport du Groupe de travail I du GIEC », 4^{ème} rapport d'évaluation, 2007.
15. [IEA07] International Energy Agency, « World energy outlook ».
16. [IFP06] Y. Mathieu, « Quelles réserves de pétrole et de gaz », conférence débat pics pétrolier et gazier : conséquences et enjeux, 11 mai 2006.
17. [INS07] M. Beudaert « L'énergie en 2006 : nouvelle hausse des prix, recul de la consommation, INSEE, Première No1152 juillet 2007 (<http://www.insee.fr>)
18. [IPC00] IPCC, SPECIAL REPORT EMISSIONS SCENARIOS
19. [IPP07] IPPC, « Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Energy Efficiency », 2007.
20. [KIS07] K. Kisssock, K. Hallinan, W. Bayder, M. Braungart, « Energy and Waste Reduction Opportunities in Industrial Processes », Strategic planning for energy and the environment, 2007.

21. [KRU01] P. Kruppenacher, D. Favrat, « Indirect and Mixed Direct-Indirect Heat Integration of Batch Processes Based on Pinch Analysis », International Journal of Applied Thermodynamics, 2001.
22. [LEG79] P. Le Goff, « énergétique industrielle », tome 1, Technique et documentation, 1979.
23. [LIN92] B. Linnhoff, V.R. Dhole, « shaftwork target for low temperature process design », Chemical Engineering Science, 1992.
24. [LIN98] Linnhoff and March : « Introduction to pinch technology », 1998
25. [MIE07] Mission interministérielle sur l'effet de serre (MIES), http://www.effet-de-serre.gouv.fr/l__essentiel
26. [MIK98] J.B Mikkelsen, « Thermal energy storage systems in batch processing », Thèse de doctorat , Technical University of Denmark, 1998.
27. [MUL07] D. Muller, F. Marechal, T. Wolewinski, P.J. Roux, « An energy management method for the food industry », Applied Thermal Engineering, 2007.
28. [NU98] Texte du Protocole de Kyoto, <http://unfccc.int>
29. [SAD96] N. Sadr-Kazemi, G.T. Polley, « Design of energy storage systems for batch process plants », Journal of Chemical Engineering, 1996.
30. [SON04] G. Sonnemann, F. Castells, M. Schumacher, « Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes », Lewis Publishers, 2004.
31. [STA96] F. Staine, D. Favrat, « Energy integration of industrial processes based on the pinch analysis method extended to include exergy factors », Applied Thermal Engineering, 1996.
32. [STA95] F.Staine, « Intégration Energétique des Procédés Industriels Par la Méthode du Pincement Etendue aux Facteurs Exergetiques », Thèse de doctorat N° 1318, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1995.
33. [STO95] S. Stolltze et al., « Waste heat recovery in batch processes using heat storage », Journal of Energy Resources Technology, vol. XX,1995.
34. [THU95] A. Thumann, P. Mehta, « Handbook of Energy Engineering » 3^{ème} édition, The Fairmont Press, 1995.
35. [UPS] Union Pétrolière suisse :
<http://www.mazout.ch/site/erd565106/fra674237/fra600155056.asp?osLang=2#frage1>