
Application de l'AEEP à une usine de fabrication de fromages

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, l'étape AP a été appliquée à plusieurs opérations unitaires génériques. Dans ce chapitre, une AEEP complète sera effectuée sur une usine de fabrication de fromages. Comme déjà démontré, et étant donné que le but de l'AEEP est de simplifier et systématiser l'audit énergétique, l'AP est une étape fondamentale. Par ailleurs, il sera montré que, pour la fabrication du fromage, plusieurs des opérations consommatrices d'énergies ont déjà été traitées dans le chapitre 3. L'application de l'AEEP dans ce chapitre est un cas réel, où l'auditeur est confronté à un système de production dont l'AP a déjà été effectuée, et par suite nécessite un travail préalable minimal. En effet, les résultats de l'AP de ces opérations peuvent être utilisés pour l'usine étudiée, l'AP doit être revisitée pour adapter certains paramètres aux niveaux exacts d'utilisation de l'énergie.

Par ailleurs, l'AP déjà réalisée est effectuée par opération unitaire, et non par système de production. Deux points essentiels seront montrés dans ce chapitre :

- une comparaison des analyses opération unitaire versus une analyse système de production. En effet, l'analyse système de production permet d'identifier des potentiels d'économie d'énergie non visibles lors de l'analyse par opération unitaire
- ensuite, ce chapitre montre comment se servir des résultats de l'AP effectuée sur les opérations unitaires, en vue de simplifier l'analyse système, de manière à limiter les données nécessaires et donc à appliquer l'analyse aux faibles niveaux d'audits énergétiques.

2. Analyse Procédé

Comme déjà décrit, cette étape débute par une description générique du procédé de fabrication, servant à identifier les opérations consommatrices d'énergie, et à déterminer les critères de qualité et leur effet sur la méthode de transformation. Pour ce faire, un procédé générique de fabrication de fromages à pâtes pressées est présenté à la Figure 4-1 ([GOU01], [RUI02]). Comme le montre cette figure, deux opérations sont particulièrement consommatrices, la pasteurisation du lait (pour épuration bactérienne) et la concentration du lactosérum. Cependant, selon les sites industriels, la concentration peut ou non être incluse dans le système de production [NEA08]. Quelle que soit la localisation, la concentration a lieu est fait partie intégrante du procédé de transformation allant du lait au fromage, incluant le traitement de ce coproduit.

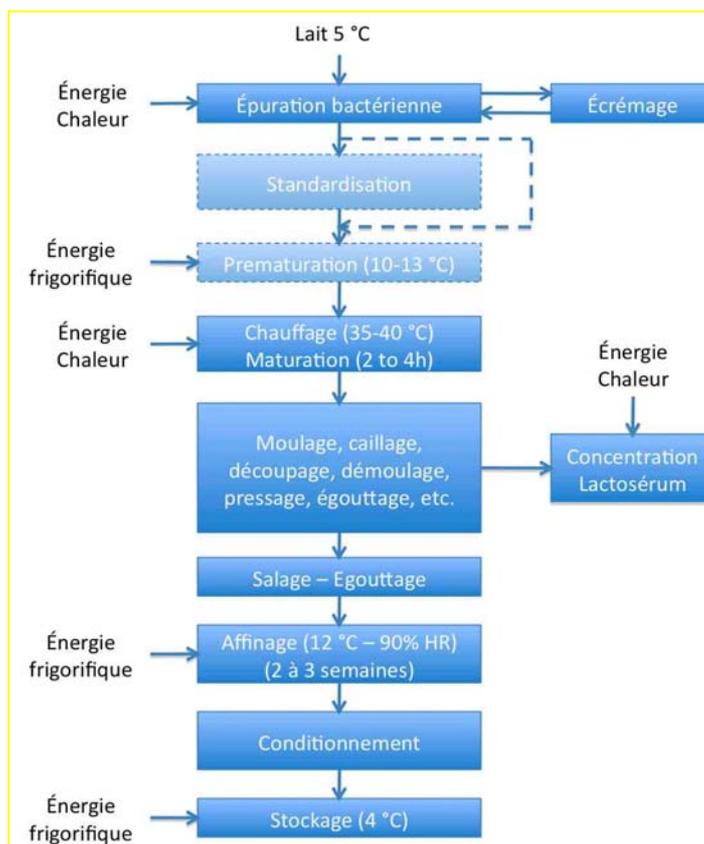


Figure 4-1. Description générique du procédé de fabrication de fromages

Par ailleurs, une opération existe dans toutes les activités du secteur agro-alimentaire, qui n'intervient pas directement sur le produit. Cette opération est le nettoyage du matériel et des équipements utilisés. Elle sera traitée lors de l'analyse de cette usine.

De plus, les opérations d'affinage et de stockage à froid sont susceptibles de consommer une quantité non négligeable d'énergie. Par contre, ces opérations ont longuement été étudiées par le passé, et trouver des améliorations radicales reste peu probable. Une analyse particulière en vue de la détermination des pertes énergétiques non fatales est la seule applicable pour ces opérations là, elles ne seront donc pas traitées lors de l'AP. Cependant, l'énergie cédée par le produit pendant ces opérations se retrouve au niveau des groupes frigorifiques. Une possibilité existe alors pour la récupération de cette énergie lors de l'analyse système, et cette récupération est possible au niveau des condenseurs des groupes frigorifiques.

Pour effectuer l'analyse, il faut revenir au schéma général du procédé de fabrication du produit, et adapter l'AP au système particulier. Cette étude sera effectuée lors de l'analyse des résultats (étape 3) après la collecte des données et la description du système de production particulier appliqué à l'usine.

3. Synoptique de l'usine

Cette étape définie au chapitre 2, consiste en une collecte de données du système de production, en décrivant les différentes opérations de transformation du produit, spécifiques à l'unité de production. Pour des raisons de confidentialité, seules les opérations consommatrices d'énergies seront présentées dans cette étude. Le synoptique est tracé à la Figure 4-2. Il faut maintenant décrire ces opérations selon les données collectées et les mesures réalisées, présentées au Tableau 4-1.

Tableau 4-1. Consommations et productions annuelles de l'usine

Fromage fabriqué (t/an)	Lait traité (t/an)	Electricité (MWh/an)	Fioul (MWh/an)	Vapeur (MWh/an)	Eau (m ³ /an)
7 355	73 547	8 669	46 200	31 073	315 002

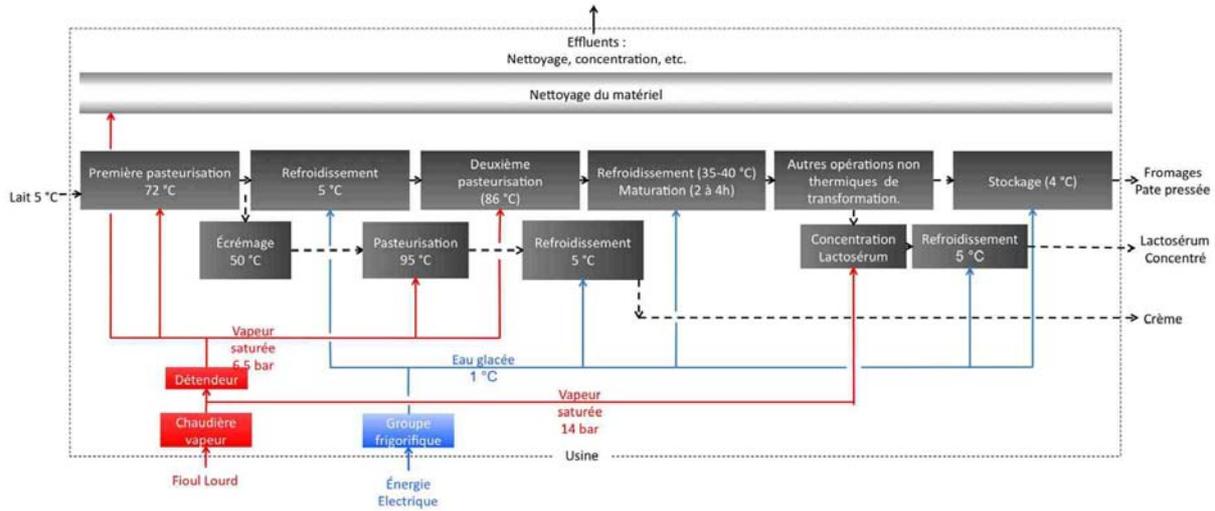


Figure 4-2. Synoptique du système de production de la fromagerie étudiée

3.1. Epuration bactérienne et maturation

Cette opération est effectuée par un double traitement thermique. Elle est similaire à l'opération de double traitement thermique étudiée dans le chapitre 3 paragraphe 5.2.2.1. Cependant, lors de l'étude précédente, le traitement de la crème n'était pas pris en considération. Cette étude est alors adaptée en ajoutant les opérations de réchauffage et de refroidissement de la crème. Le schéma du procédé est présenté à la Figure 4-3.

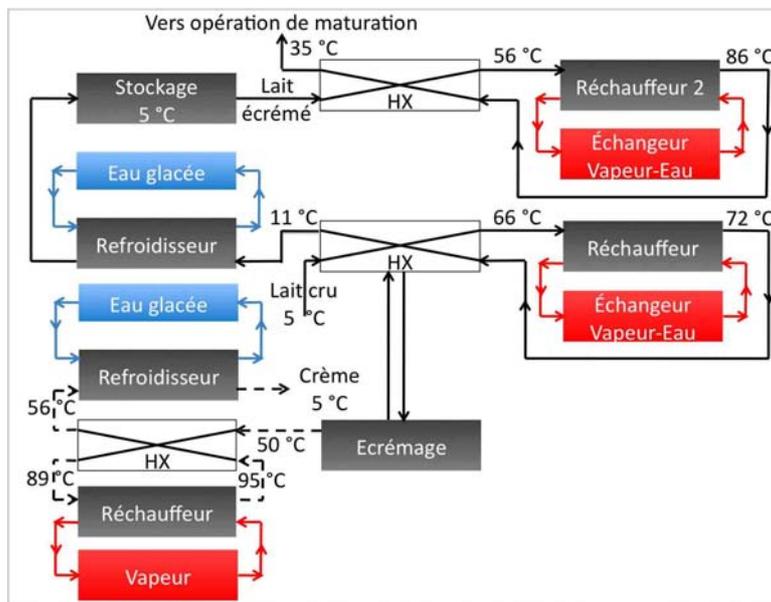


Figure 4-3. Procédé de double pasteurisation du lait associé à la pasteurisation de la crème

Dans les différents pasteurisateurs, les températures internes à l'entrée et à la sortie des échangeurs récupérateurs ne sont pas accessibles sans intrusion (interdites lors de l'audit effectué). De ce fait, selon les températures mesurées (entrée et sortie des pasteurisateurs) les températures intermédiaires ont été déduites, en se servant du pincement fourni par les

manuels de chaque pasteurisateur. Les différents flux énergétiques sont présentés au Tableau 4-2.

Tableau 4-2. Flux mesurés du procédé de traitement thermique du lait et de la crème [ABO06]

Produit	Opération	m (kg/kg_lait)	Te (°C)	Ts (°C)	c _p (kJ/kg.K)	ΔH (kJ/kg_lait)
Lait entier	Chauffage	1	5	72	3,77	252,59
	Refroidissement	1	72	50	3,77	-82,94
Lait écrémé	Refroidissement	0,91	50	5	3,77	-154,3815
	Chauffage	0,91	5	86	3,77	277,8867
	Refroidissement	0,91	86	35	3,77	-174,9657
Crème	Chauffage	0,09	50	95	3,77	6,786
	Refroidissement	0,09	95	5	3,77	-13,572

L'EMR dans ce cas est calculée selon la variation de l'enthalpie du produit entre l'entrée et la sortie du procédé. L'équation (3.24) du chapitre 3 est utilisée, avec une variation prenant en considération l'ajout de l'opération de traitement de la crème. L'équation devient alors l'équation (4.1).

$$Q = m_{Lec,s} h_{Lec,s} + m_{c,s} h_{c,s} - m_{Le,e} h_{Le,e} \quad (4.1)$$

Avec :

- « Le » : lait entier
- « Lec » : lait écrémé
- « c » : crème.

Cette EMR est calculée et elle est de l'ordre de 103 kJ/kg.K. Pour calculer l'énergie réellement consommée par le système actuel, il faut déterminer les apports d'énergie au système, et calculer les différentes valeurs. Ces apports sont visibles sur le schéma de la Figure 4-3, et sont répartis comme suit :

- chauffage du lait entier de 66 à 72 °C
- chauffage du lait écrémé de 56 à 86 °C
- chauffage de la crème de 89 à 95 °C

La somme de ces 3 apports de chaleur détermine la consommation totale du système. Elle est de l'ordre de 133 kJ/kg_lait, ce qui donne un rendement du procédé de l'ordre de 77 %. Ensuite, la différence entre la consommation réelle et l'EMR constitue des pertes énergétiques. Ces pertes sont alors décomposées en deux types, les pertes fatales et les pertes non fatales. Les pertes non fatales sont déterminées par la différence entre la consommation réelle et la consommation minimale du procédé actuel sans changement, tandis que les pertes fatales sont déterminées par la différence entre la consommation optimale du procédé actuel et celle du procédé optimal.

3.2. Concentration de lactosérum

La concentration du lactosérum est effectuée dans 2 concentrateurs séparés, l'un comprenant 5 effets avec thermocompression et l'autre 4 effets sans thermocompression. La répartition de la charge de concentration sur les 2 concentrateurs est calculée selon la puissance de chacun, associée au temps de fonctionnement journalier, données prises lors de la collecte. Le tableau présente les puissances et les temps de fonctionnement journaliers pour en déduire la répartition de la charge en pourcentage. Ce pourcentage est ensuite utilisé pour déterminer la quantité de lactosérum traitée dans chaque concentrateur par

tonne de lait entrant à l'usine. Comme le nombre de jours travaillés par an est légèrement variable, le nombre d'heures de fonctionnement des concentrateurs n'est qu'un indicateur de la répartition de la charge, le rendement de production sera utilisé pour déterminer la quantité de lactosérum traitée par kg de lait. Il est dans ce cas supposé que les pertes en matières du lactosérum sont nulles, et la quantité totale de lactosérum traitée par an sera calculée par la différence entre la masse de lait traité et la masse de fromage annuelles sortant de l'usine (voir Tableau 4-1).

Tableau 4-3. Répartition de la concentration sur les deux concentrateurs existants

Concentrateur	Débit traité (t/h)	Temps de fonctionnement (h/jour)	Débit journalier (t/jour)	Débit total (%)	Débit total (kg_lacto / kg_lait)
5 effets	22	20	440	82	0,74
4 effets	8	12	96	18	0,16

Le lactosérum est concentré identiquement dans les deux concentrateurs d'une concentration initiale de 5 % de matières sèches à une concentration finale de 32 % de matières sèches, imposant une masse de 0,84 kg_{ee} par kg de lactosérum traité (kg_{lacto}), ou 0,756 kg_{ee}/kg_{lait}.

La source de chaleur utilisée est de la vapeur saturée à une pression de 1,4 MPa (température saturante d'environ 195 °C). Les pressions des différents effets ne sont pas connues, et donc le pincement au niveau des évaporateurs ne peut pas être connu. Pour les calculs des différentes consommations, un pincement de 5 K sera pris comme hypothèse. Compte tenu du niveau élémentaire de l'audit mené, des grandeurs comme le pincement des évaporateurs ne peuvent pas être mesurées, et seront remplacées par des estimations.

La consommation énergétique des concentrateurs ne pouvait pas être mesurée avec précision pour chacun. Il aurait fallu disposer d'un débitmètre installé sur chacun d'eux, ce qui n'était pas le cas. Par contre, les courbes de variation des débits de vapeur pour l'atelier de concentration sont mesurées par un débitmètre général. L'analyse de cette courbe permet alors de déterminer le débit de vapeur entrant dans chacun des concentrateurs. Cette consommation mesurée était de l'ordre de 406 kJ/kg_{ee} pour le concentrateur à 5 effets, et de 600 kJ/kg_{ee} pour le concentrateur à 4 effets [ABO06]. En prenant en compte la répartition de la charge de concentration sur les deux concentrateurs, la consommation moyenne de l'opération de concentration est de l'ordre de 441 kJ/kg_{ee}.

Cependant, cette consommation est rapportée uniquement à la concentration de lactosérum. Or, les concentrateurs fonctionnent aussi pour concentrer du lait. La quantité et les concentrations du lait sont inconnues. Pour déterminer la consommation totale de l'opération de concentration, il est plus précis d'utiliser la consommation totale annuelle de cette dernière, et de la rapporter à l'unité de masse de lait traité dans l'usine. La consommation totale de l'opération de concentration est estimée par l'industriel à 40 % de la consommation totale en vapeur, ce qui implique une consommation moyenne de l'ordre de 607 kJ/kg_{lait}, et la quantité d'eau éliminée par les 2 concentrateurs est de l'ordre de 1,38 kg_{ee}/kg_{lait}. Le concentrateur à 5 effets avec thermocompression consomme alors 559 kJ/kg_{lait}, tandis que celui possédant 4 effets consomme 826 kJ/kg_{lait}. Le Tableau 4-4 reprend les consommations des concentrateurs individuellement et regroupés.

Tableau 4-4. Consommation totale et individuelle des concentrateurs

Consommation totale moyenne kJ/kg _{lait}	Consommation 4 effets kJ/kg _{ee}	Consommation 4 effets kJ/kg _{lait}	Consommation 5 effets kJ/kg _{ee}	Consommation 5 effets kJ/kg _{lait}
607	600	826	406	559

Le concentrateur à 5 effets avec thermocompression présente un fonctionnement particulier. La compression d'une partie des buées sortant du premier effet est effectuée par injection de vapeur haute pression (1,4 MPa). La thermocompression permet un taux de compression faible et qui dépend fortement de la haute pression de la vapeur d'alimentation [LEL92]. Les buées sortant du premier effet sont généralement en partie comprimées, et le reste est utilisé pour chauffer l'effet suivant.

Il est important de noter que les relevés de données sur la consommation des concentrateurs sont associés à des incertitudes non négligeables. De ce fait, les valeurs des pertes non fatales et celles des gains associés seront aussi associées d'incertitudes non négligeables.

3.3. Nettoyage du matériel

Le nettoyage du matériel constitue, comme déjà montré au chapitre 3, une opération consommatrice d'énergie dans toutes les industries alimentaires. Cependant, déterminer la consommation précise de chaque élément de nettoyage revient à un travail long et difficile à réaliser dans un cadre d'audit énergétique de faible niveau. Il est donc plus judicieux de déterminer la consommation actuelle totale de l'ensemble des opérations, la comparer à la consommation optimale d'un système proche et déterminer ensuite les pertes fatales liées à ce procédé de nettoyage, et donc les gains énergétiques réalisables par installation du nouveau procédé. Ensuite, dans le cas où le procédé proposé est retenu, une étude poussée peut être effectuée, éliminant ainsi les imprécisions résultant des mesures.

La consommation de la totalité des opérations de nettoyage de matériels du site étudié est donnée par une répartition propre à l'industriel de sa consommation énergétique totale en vapeur. Le nettoyage constitue environ 23 % de la consommation totale, ce qui donne environ 7 130 MWh de vapeur par an [ABO06]. Il faudrait ensuite se servir du rendement calculé de la chaudière à vapeur pour déterminer la consommation de cette opération en combustible.

Le cycle de nettoyage appliqué aux différents équipements est semblable au cycle étudié dans le chapitre 3. En effet, il comprend les étapes de pré-nettoyage, de nettoyage basique, de rinçage, de nettoyage acide et finalement d'un dernier rinçage. Il est donc possible de proposer le cycle de nettoyage optimisé lors de l'AP, et de déterminer les gains réels accessibles. Cependant, l'AP générique est effectuée par unité de masse d'objet traité. Il faut donc déterminer la masse totale des objets lavés sur site. Cette mission n'est pas facile à réaliser lors d'un audit énergétique. Cependant, selon la consommation totale d'énergie des différentes opérations de nettoyage, cette grandeur peut être déterminée, en supposant que les opérations réelles ne présentent pas de pertes énergétiques par rapport à la consommation calculée par l'étude du cycle (voir chapitre 3 paragraphe 4). D'autre part, les gains réalisables par installation du cycle optimal peuvent être pondérés en se référant à la consommation initiale du cycle fonctionnant à la vapeur. Les gains réalisables peuvent ensuite être calculés par rapport à la consommation totale réelle des différentes opérations.

3.4. Les utilités associées au système de production

Les énergies calorifique et thermique apportées aux opérations unitaires du système de production sont assurées par les utilités. Ces utilités convertissent l'énergie de l'énergie achetée (électricité ou combustible) à l'énergie acheminée au produit (dans ce cas vapeur d'eau saturée pour la chaleur, ou eau glacée pour l'énergie frigorifique). Il est donc important d'étudier le fonctionnement de ces utilités avec deux buts principaux :

- l'évaluation du rendement de conversion de l'énergie par les utilités. Ce rendement sert à déterminer les consommations réelles et les gains potentiels au niveau des différentes opérations en termes d'énergie achetée

- l'analyse du fonctionnement de ces utilités, en vue de déterminer les pertes énergétiques que présentent celles-ci et de déterminer des améliorations possibles.

Pour cela, les utilités de production de vapeur et d'énergie frigorifique ont été étudiées.

3.4.1. La production de vapeur

La production de vapeur d'eau est assurée par deux chaudières fonctionnant au fioul lourd, et ce choix est dû à l'absence de réseaux d'acheminement de gaz naturel dans la zone géographique considérée. Les chaudières sont d'une puissance de 5,44 MW chacune, produisant ainsi un débit de 10 t/h de vapeur d'eau saturée à 1,4 MPa. Les mesures sur les chaudières n'étaient pas possibles lors de l'audit, mais les données de production de vapeur et de consommation de combustible (fioul lourd) sur une année référence étaient disponibles. Le rendement de production de vapeur est ainsi calculé.

Il faut toutefois préciser que le rendement calculé n'est pas le rendement optimal de la chaudière, qui serait plus élevé que la valeur calculée. Ce rendement est en effet calculé à partir de la vapeur produite et du combustible consommé sur un an. Il comprend la production et la distribution de la vapeur, ainsi que le retour des condensats. La valeur de ce rendement est de l'ordre de 68 %. Les pertes énergétiques de la production et de la distribution de vapeur ne peuvent pas être déterminées et localisées ; cette étude nécessite des mesures sur les chaudières, non disponibles lors de l'audit.

3.4.2. La production de froid

L'énergie frigorifique nécessaire à l'usine est utilisée sous forme d'eau glacée. L'eau glacée est produite par un groupe frigorifique constitué de 4 compresseurs à ammoniac (NH_3) à pistons. Durant la période des mesures, un des 4 compresseurs était à l'arrêt pour réparation.

Les groupes frigorifiques fonctionnent avec des condenseurs à eau. L'eau utilisée est celle d'un ruisseau proche du site. Ce condenseur à eau limite la capacité de production d'eau glacée pendant l'été, à cause de la diminution du débit d'eau de ruisseau et de l'augmentation de sa température. La répartition de la charge des compresseurs sur la production d'eau glacée est représentée schématiquement par la Figure 4-4.

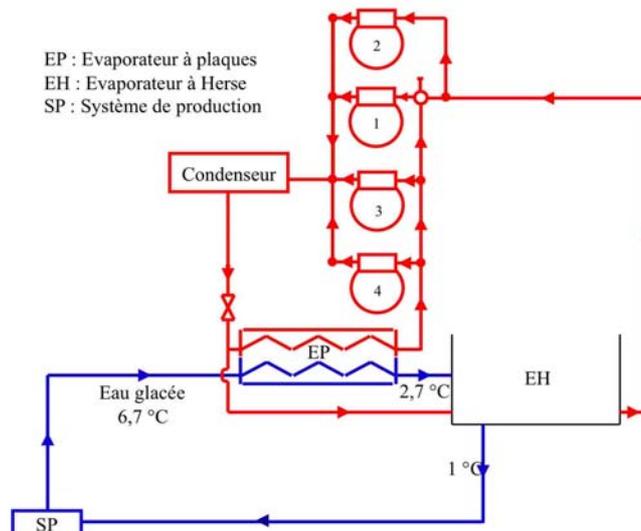


Figure 4-4. Production d'eau glacée

L'eau glacée possède 3 utilisations principales :

- le refroidissement du lait dans l'opération de pasteurisation

- la climatisation des caves d'affinage (12°C 95 % HR). En hiver la climatisation nécessite du chauffage, assuré par de la vapeur pour certaines caves et par des résistances électriques pour d'autres
- la climatisation des ateliers (18/22°C). Les ateliers climatisés sont les ateliers de production de fromage après pasteurisation. En hiver, le chauffage est assuré par de l'air chaud produit par la vapeur.

Déterminer le rendement de production d'eau glacée revient à déterminer le COP moyen du groupe frigorifique. Ceci revient à déterminer le COP de Carnot (COP_c) moyen de ce dernier sur l'année, pour l'associer ensuite à un rendement exergetique moyen selon le type de compresseurs utilisé.

Pour déterminer le COP_c il faut déterminer les températures d'évaporation et de condensation du système. La température de condensation dépend fortement de la température de l'environnement. En effet, comme déjà indiqué, le fluide frigorigène est refroidi dans le condenseur par de l'eau du ruisseau. La température de condensation dépend donc de la température de l'eau du ruisseau, qui varie avec la saison.

Par ailleurs, les mesures sur les échangeurs ne permettent pas de déterminer les pincements précis. Cependant, les pressions d'évaporation et de condensation sont mesurées par des capteurs de pressions installés sur le système. Un relevé des pressions de condensation est enregistré pour les mois de juin et de juillet. Selon cette pression de condensation, la température peut être déterminée.

Le Tableau 4-5 présente les différentes grandeurs relevées de l'usine, ainsi que le calcul du COP associé. La valeur de 50 % est prise pour le rendement exergetique du système frigorifique [SIC06].

Tableau 4-5. Mesures et calculs du COP de production d'énergie frigorifique

Date	Température d'évaporation (°C)	Température de Condensation (°C)	COP _c	COP	Puissance compresseurs (kW)	Puissance froid (kW)
Janvier 2006	-9,1	31,1	6,57	3,3	197	647
Juin 2005	-1,7	18	13,78	6,9	197	1357

Pour déterminer le COP frigorifique annuel du système, les équations (3.25) à (3.27) données au chapitre 3 doivent être utilisées. Elle sont rappelées ci-dessous.

$$COP_{c,a} = \frac{Q_a}{W_a} \quad (3.25) \quad W_{i,a} = \sum_{j=1}^N W_{i,j} = \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{COP_{c,j}} \quad (3.26) \quad Q_j = n_j Q_a \quad (3.27)$$

Avec :

- Q : demande énergétique
- COP_{c,a} : COP de Carnot annuel
- COP_{c,j} : COP de Carnot journalier calculer selon le pincement du condenseur et la température de l'eau de ruisseau du jour
- W : travail total du compresseur
- N : nombre de jours de production dans l'année
- n : facteur de correction selon la production journalière. Il est égal à la production journalière du jour considéré divisée par la production totale sur l'année, en

supposant une production uniforme sur l'année. Dans le cas contraire, le facteur n peut être calculé d'après la répartition réelle de la production annuelle.

Et les indices « i » pour idéal(e) et « a » pour annuel(le).

Par contre, les données requises pour calculer avec précision le COP annuel ne sont pas disponibles, notamment le pincement moyen des échangeurs et les températures journalières de l'eau du ruisseau. Seules sont disponibles les données de fonctionnement en conditions climatiques extrêmes (janvier pour l'hiver et juin pour l'été). L'utilisation d'une valeur moyenne du COP dans ce cas risque d'impliquer des erreurs non négligeables sur les résultats. Il est donc plus judicieux d'utiliser les valeurs extrêmes pour déterminer des intervalles de consommations et de gains énergétiques sur les installations de production de froid.

Par ailleurs, la possibilité de récupération d'énergie au niveau des condenseurs des groupes frigorifiques semble difficile. En effet, la disposition géographique de l'usine nécessite un transport non négligeable de l'énergie d'un endroit à l'autre. De plus, la quantité d'énergie disponible au niveau de ces condenseurs n'est pas mesurable avec ce niveau d'audit. Une approche utilisant les opérations consommatrices d'énergie frigorifique peut servir pour estimer cette quantité d'énergie, mais celle-ci s'avère aussi difficile à réaliser, car certaines de ces opérations comme le traitement de l'air de l'ambiance des ateliers, ou même des caves d'affinage et de stockage sont difficilement calculables sans mesures précises. Pour cette partie de l'étude, cette énergie ne sera pas prise en compte. Cependant, notons que cette quantité d'énergie n'est pas négligeable, et que lors d'une étude approfondie suivant l'AEEP, il est nécessaire de la prendre en considération.

4. Analyse des résultats

L'analyse des résultats consiste à analyser les pertes énergétiques fatales et non fatales des différentes opérations unitaires en vue de déterminer les améliorations possibles de la performance énergétique du système de production. Cependant, cette analyse repose sur les résultats de la première étape (effectuée normalement une fois par opération ou par type de produit) pour déterminer les améliorations possibles de la performance énergétique.

Toutefois, le MPT dépend fortement des hypothèses prises en considération lors de l'AP. Ces hypothèses sont en général utilisées pour remplacer des données particulières au système de production étudié. Il est donc important d'adapter les résultats de l'analyse procédé aux données particulières du système.

Il faut mener l'étude sur les différentes opérations consommatrices d'énergies, en étudiant les changements. Le modèle de calcul élaboré lors de l'AP reste invariable, mais les valeurs prises comme hypothèses auparavant sont adaptées au nouveau système de production. De plus, les critères de qualité et de productivité prédéfinis lors de l'« analyse procédé » sont susceptibles de changer selon l'entreprise ; il faut aussi intégrer ce changement dans le modèle de calcul utilisé. Ensuite, le procédé optimal étant déterminé, le calcul et la définition des pertes énergétiques et exergétiques servira à déterminer les améliorations incrémentales (relevant des pertes non fatales) et les améliorations radicales (relevant des pertes fatales).

Par ailleurs, comme déjà indiqué, l'analyse système est importante, dans la mesure où elle permet l'identification de la quantité d'énergie totale disponible au niveau des différentes opérations. Cette analyse doit intégrer la qualité du produit. Comme indiqué au chapitre 1, l'intégration thermique risque d'être limitée par la disposition géographique des flux énergétiques présents. Pour remédier à ce problème, il est conseillé dans ce cas d'analyser les différentes opérations unitaires, et de prendre en compte l'énergie disponible après optimisation. Cette approche permet alors de maintenir la qualité du produit, et aussi de déterminer la meilleure intégration des différentes opérations consommatrices.

L'AP menée au chapitre 3 pour les opérations d'épuration bactérienne, de concentration et de nettoyage de matériel, montre que l'énergie disponible à la sortie de l'opération d'épuration et de nettoyage possède un faible niveau d'énergie (donc un faible niveau de température) contrairement à l'opération de concentration à la sortie de laquelle une quantité d'énergie non négligeable à un niveau de température relativement élevée est présente. L'analyse de l'opération de concentration doit être menée en premier lieu, en vue de déterminer la quantité d'énergie disponible à sa sortie.

4.1. Analyse système

L'adaptation de l'AP de l'opération de concentration au système étudié est nécessaire. Pour un procédé à multiples effets, le meilleur procédé de remplacement était une concentration à 2 effets utilisant une CMV pour comprimer les buées, dans le cas d'un retard à l'ébullition de 5 K, et de l'utilisation du compresseur utilisé comme exemple. Cette option peut être réalisée pour l'usine étudiée, à condition de déterminer la nouvelle consommation par unité de masse de lait.

Le MPT déterminé au préalable avec un pincement imposé par la capacité des évaporateurs actuellement installés (5 K) consomme environ $93 \text{ kJ}_{\text{méca}}/\text{kg}_{\text{ee}}$, ce qui revient à environ $127 \text{ kJ}_{\text{méca}}/\text{kg}_{\text{lait}}$, pour le système étudié. L'adaptation du procédé déjà déterminée au cas particulier du système étudié se fait par une modification des débits d'eau évaporée pour déterminer les grandeurs calculées par rapport au débit de lait traité. La Figure 4-5 présente la GCCNE de ce procédé, avec la consommation de la CMV en énergie mécanique. Lors de la réalisation de cette étude, les données nécessaires (comme le retard à l'ébullition, l'évolution du rendement global du compresseur ou le pincement au niveau des évaporateurs) ont été remplacées par des estimations, pour remédier au manque de données associé au niveau d'audit. Dans le cas d'une étude plus poussée pour l'amélioration de l'un ou l'autre des procédés, les données nécessaires seraient disponibles ; il suffira alors de les appliquer au modèle de calcul déjà déterminé.

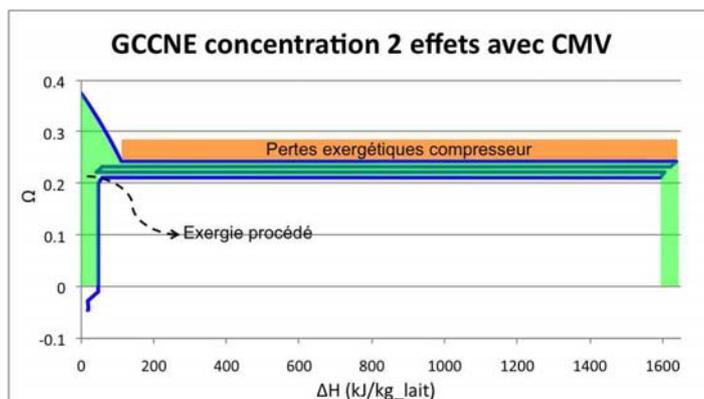


Figure 4-5. GCCNE du procédé de concentration à 2 effets avec CMV

De cette figure deux éléments principaux peuvent être tirés :

- la consommation optimale de l'opération de concentration après application du MPT, elle est de l'ordre de $128 \text{ kJ}_{\text{méca}}/\text{kg}_{\text{lait}}$.
- l'énergie disponible dans les flux de refroidissement des condensats ainsi que la désurchauffe de la vapeur peuvent servir pour le chauffage d'autres opérations. L'énergie disponible sortant de l'opération de concentration est de l'ordre de $20 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{lait}}$. Cette quantité d'énergie est négligeable devant la quantité d'énergie disponible à la sortie de cette opération dans le cas d'absence d'une CMV.

Il est aussi à remarquer que compte tenu de l'absence de besoin énergétique à haute température, la consommation en combustible est éliminée, et l'échelle de la GCCNE ne doit

pas obligatoirement être de 1. Une échelle de 0,4 a été utilisée pour permettre de visualiser l'effet de la désurchauffe de la vapeur comprimée.

Lors de l'analyse système, il est important de distinguer deux cas : celui de l'installation d'une CMV et celui du maintien du système actuel.

4.1.1. Système de concentration actuel maintenu

Dans le cas du maintien du système actuel, l'énergie restante est présente dans les condensats des deux concentrateurs. Le niveau de température maximal que peuvent atteindre ces condensats est calculé selon le pincement du procédé et le nombre d'effets. Il est aussi important de noter que selon l'effet concerné, les condensats sortent à une température différente.

L'opération de concentration est alors décrite schématiquement pour chaque concentrateur (Figure 4-6 et Figure 4-7) en vue de déterminer le niveau de température et la quantité d'énergie disponible dans ces flux de condensats.

➤ Concentrateur à 5 effets avec thermocompression (TC)

Les hypothèses suivantes ont été prises lors de la détermination des masses et températures des condensats et buées disponibles.

- Le premier effet effectue 1/3 de la concentration totale. Lors du calcul de la consommation optimale du concentrateur 5 effets avec TC, la consommation d'un concentrateur à 6 effets a été utilisée, ce qui signifie que le premier effet comprenant la TC, agit comme 2 effets combinés. La masse des buées sortant du premier effet et passant au second est de 1/6 de la masse totale et donc, dans ce cas, de 0,23 kg/kg_lait.
- Les condensats sortant du premier effet sont retournés à la chaudière, ce qui est un cas général. Les condensats du premier effet sont constitués d'un mélange des buées du premier effet et de vapeur Haute Pression (HP).
- Le pincement reste constant, à 5 K, sur tous les évaporateurs.

La Figure 4-6 présente schématiquement ce procédé avec les températures des condensats et des buées disponibles à chaque effet.

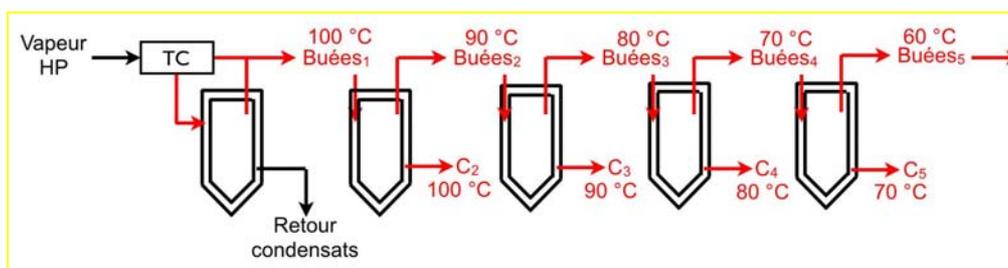


Figure 4-6. Schéma du concentrateur 5 effets avec TC

Avec :

- HP : Haute Pression
- C_i : condensats sortant de l'effet i .

Les condensats des effets 2 à 5 sont disponibles pour la récupération, ainsi que les buées sortant de l'effet 6. Ce concentrateur sera appelé C1 dans la suite.

➤ Concentrateur à 4 effets

Les mêmes hypothèses sont utilisées pour déterminer les masses et niveaux de température, à l'exception de l'hypothèse concernant la masse de condensats aux différents

effets. Dans ce cas, la répartition de la charge de concentration est uniforme, la masse de 0,25 kg/kg_{ee} est alors prise comme référence, donnant lieu à une masse de 0,345 kg/kg_{lait} à chaque effet. La Figure 4-7 présente le schéma de ce concentrateur.

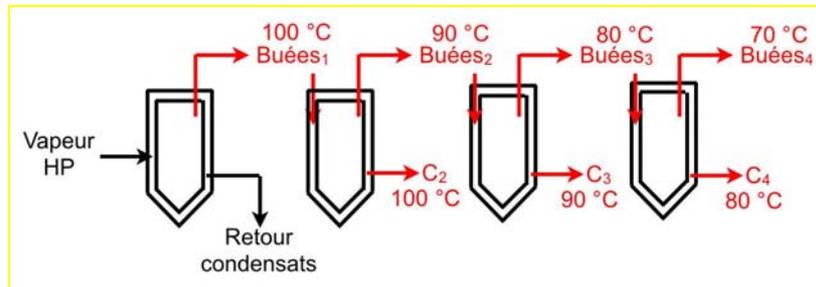


Figure 4-7. Schéma du concentrateur 4 effets

A l'image de l'analyse du concentrateur à 5 effets, les condensats des effets 2 à 4 sont disponibles, ainsi que les buées sortant de l'effet 4. Ce concentrateur sera appelé C2 par la suite.

Par ailleurs, les besoins en chaleur des autres opérations (traitement thermique et nettoyage) doivent maintenant être déterminés, afin de tracer la courbe composite globale.

Pour les opérations de traitement thermique, la totalité des flux chauds et froids sont considérés. Ces opérations sont de simples opérations de chauffage et de refroidissement du lait et de la crème, et si les différents flux échangent avec d'autres, cela ne risque pas de créer de problèmes de dégradation de la qualité.

Cependant, l'opération de nettoyage est particulière. En effet, les flux sortants de cette opération sont les eaux sales. Ces flux ne peuvent pas être récupérés sans un fluide intermédiaire. Par ailleurs, les flux chauds sortant de l'opération de concentration constituent une quantité d'énergie largement supérieure à celle contenue dans les eaux sales, et sont plus que suffisants pour assurer la quantité totale d'énergie requise par les deux opérations. Donc les flux chauds sortant de l'opération de lavage ne sont pas indispensables, et pour simplifier le calcul, ces flux ne seront pas pris en compte lors de la construction des courbes composites. Ces courbes sont tracées à la Figure 4-8. Un pincement de 6 K est maintenu pour respecter la capacité des échangeurs déjà existants dans les opérations de traitement thermique.

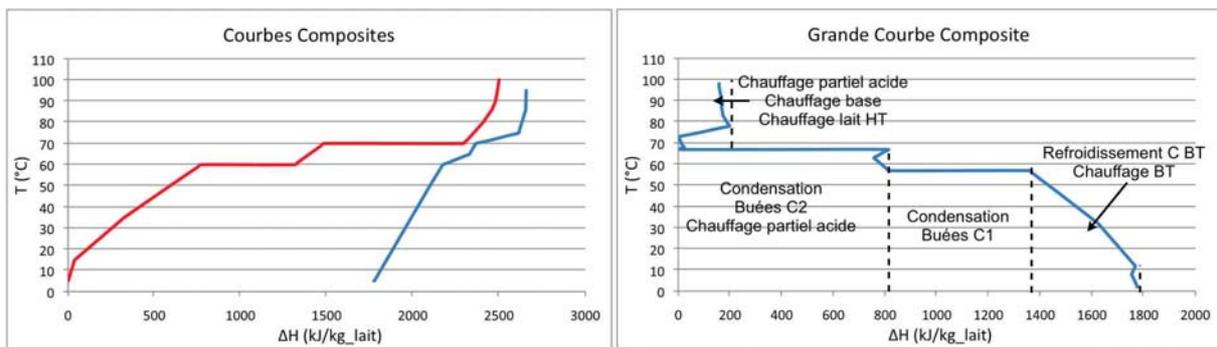


Figure 4-8. CC et GCC de l'intégration des besoins et disponibilité des opérations

Avec HT pour haute température et BT pour basse température.

Comme remarqué sur les courbes, l'énergie disponible sortant de l'opération de concentration et de traitement thermique, permet de chauffer une partie de la solution acide, et de chauffer d'autres fluides pour des températures inférieures à la température du pincement (température corrigée de 73 °C). Par ailleurs, un besoin énergétique persiste au niveau de l'opération de nettoyage, qui nécessite un niveau de température supérieur

niveaux de température des effluents des concentrateurs. Cependant, une pompe à chaleur permet d'obtenir un COP élevé dans le cas de l'utilisation de la condensation des buées du 4^{ème} effet du concentrateur C2 comme source de chaleur.

Une analyse exergétique permet alors de déterminer le COP de cette PAC éventuelle. Pour limiter les pertes exergétiques à l'évaporateur, l'eau peut être utilisée comme fluide frigorigène de cette PAC. En effet, la condensation des buées du 4^{ème} effet du concentrateur C2 n'est nécessaire qu'en partie pour chauffer la solution acide (voir GCC Figure 4-8). Une partie de cette buée peut être utilisée en condensation pour assurer ce besoin en chaleur, et une autre partie peut être comprimée pour assurer le besoin en chaleur haute température.

Le COP calculé selon la méthode introduite au chapitre 3 paragraphe 2.2.1 est de l'ordre de 19,3, en utilisant un rendement global du compresseur de l'ordre de 60 %. Ceci implique une consommation totale d'environ 8,15 kJ/kg_lait. La Figure 4-9 présente la consommation totale selon la GCCNE du système.

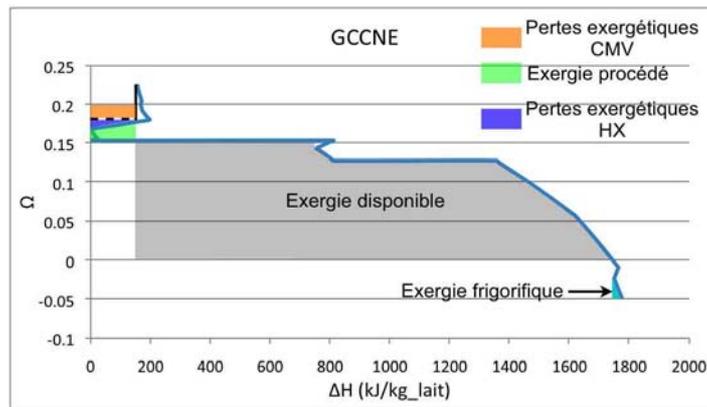


Figure 4-9. GCCNE de l'intégration des besoins et disponibilité des opérations

L'installation des différents échanges dans ce procédé, ainsi que l'installation de la CMV pour le chauffage des solutions de nettoyage éliminent les besoins énergétiques en chaleur des opérations de traitement thermique et des opérations de nettoyage. Les gains sont résumés au Tableau 4-6.

Tableau 4-6. Gains énergétiques par intégration des disponibilités de concentration

Consommation actuelle moyenne kJ/kg_lait	Consommation CMV kJ/kg_lait	Gain fioul MWh/an	Gain électrique MWh/an	Gain économique (k€/an)	Gain émissions (teqCO ₂ /an)
482	8	14481	-166	605	2828

Les contraintes qui s'opposent à l'installation de cette solution sont les suivantes.

- La disparité temporelle des besoins et disponibilités énergétiques. En effet, les besoins énergétiques de l'opération de nettoyage sont variables avec le temps, selon le nettoyage ou non d'un ou plusieurs équipements. Cependant, les effets de cette contrainte peuvent être limités par un stockage de l'énergie disponible sous forme de fluide caloporteur (l'eau semble le fluide le mieux adapté dans ce cas). Il est nécessaire par contre d'effectuer cette étude selon les demandes en énergies et leurs variations avec le temps. Ceci doit faire l'objet d'une étude complémentaire.
- La disposition géographique. En effet, les ateliers de concentration et de traitement thermique ne sont pas à proximité. Un transport de l'énergie serait donc nécessaire pour utiliser l'énergie des condensats dans le chauffage du lait et de la crème. Les pertes énergétiques (mécaniques et thermiques) doivent être évaluées.

Il est important de noter que l'installation de ce système élimine toute autre solution pouvant être proposée pour les opérations individuelles, notamment la CMV pour la concentration. Il faut choisir le système optimal d'un point de vue économique ou environnemental, en prenant en considération les investissements nécessaires.

4.1.1. Système de concentration avec CMV

Pour l'installation du procédé proposé utilisant la CMV pour la concentration, la quantité d'énergie disponible à la sortie est nettement inférieure à celle disponible dans le cas où la concentration reste dans l'état actuel. En effet, cette énergie disponible à déjà été calculée à la Figure 4-5, elle est de l'ordre de 20 kJ/kg_lait. Cette énergie est disponible au niveau de la désurchauffe et est généralement difficile à récupérer totalement, à cause des infiltrations d'air. De plus, le besoin énergétique des opérations de traitement thermique et de nettoyage est de l'ordre de 133 et de 349 kJ/kg_lait respectivement. Cette énergie est par la suite négligeable devant la demande totale du système, et sa récupération coûterait plus qu'elle ne rapporte. Pour l'installation d'une CMV, il vaut donc mieux analyser les opérations d'une manière individuelle, et déterminer les gains énergétiques potentiels en se servant de l'AP du chapitre 3.

4.2. Analyse individuelle

4.2.1. Concentration de lactosérum

Le meilleur procédé pour la concentration d'un produit liquide a été déterminé lors de l'AP effectuée au chapitre 3, et l'adaptation effectuée au paragraphe 4.1.

4.2.1.1. Pertes non fatales et améliorations incrémentales

Les pertes non fatales sont déterminées par la différence entre la consommation actuelle du système et la consommation minimale de ce même système optimisé. Les pertes seront analysées pour chaque concentrateur indépendamment.

➤ Concentrateur à 4 effets

Ce concentrateur consomme 826 kJ/kg_lait, tandis qu'un concentrateur à 4 effets optimisé devrait consommer 776 kJ/kg_lait. Ceci donne lieu à des pertes énergétique non fatales de l'ordre de 50 kJ/kg_lait. Cependant, ce calcul est associé à des incertitudes non négligeables sur les mesures des consommations réelles. De plus, les pertes non fatales sont quantifiées mais non identifiées, et par suite leur diminution ou élimination relève d'une étude plus précise sur le concentrateur en question.

➤ Concentrateur à 5 effets avec TC

Ce concentrateur consomme 559 kJ/kg_lait. Cependant la consommation optimale d'un tel concentrateur ne peut être calculée sans connaître le débit de vapeur comprimée, donnée inconnue. Pour calculer la consommation optimale du système installé, il faut connaître la capacité de compression du thermocompresseur, ce qui n'était pas accessible lors de l'audit énergétique.

Dans un tel cas, une consommation moyenne d'un concentrateur similaire peut servir. En moyenne, un thermocompresseur agit comme un effet ajouté aux effets du concentrateur, le concentrateur 5 effets avec TC aurait alors la même consommation qu'un concentrateur à 6 effets sans TC, de l'ordre de 376 kJ/kg_ee ou 518 kJ/kg_lait. Dans ce cas les pertes énergétiques non fatales sont d'environ 41 kJ/kg_lait, mais les incertitudes sur le calcul de ces pertes ne permettent pas d'évaluer une solution d'amélioration incrémentale du concentrateur, cas similaire au cas du concentrateur à 4 effets.

Les améliorations incrémentales sur les concentrateurs individuels n'existent pas ou ne sont pas calculables avec le degré d'incertitude existant sur les mesures. Cependant, une combinaison des deux concentrateurs est envisageable. Ceci relève de l'analyse des pertes énergétiques fatales.

4.2.1.2. Pertes fatales et amélioration radicale

Les pertes fatales sont formées par la différence entre la consommation actuelle du système et l'EMR déterminée lors de l'AP. Or, l'EMR est nulle dans le cas d'une concentration (voir chapitre 3). En effet, le calcul de l'EMR suppose une récupération totale de l'énergie et cette dernière est calculée par la différence de l'énergie interne du produit entre l'entrée et la sortie. L'énergie théorique minimale requise pour la concentration du lactosérum est nulle, pourvu que le produit soit refroidi à la température initiale, ce qui est le cas.

Par la suite, les pertes énergétiques fatales sont la consommation énergétique du système. Éliminer ces pertes revient à récupérer la totalité de l'énergie contenue dans l'eau éliminée sous forme de vapeur, et nécessite un pincement nul ou un nombre d'effets infini. Un pincement nul implique une surface d'échange infinie, impossible à réaliser dans la pratique. Cependant, l'augmentation du nombre d'effets est possible, avec une limite supérieure imposée par la température et la pression d'évaporation du dernier effet, ainsi que par l'investissement réalisé pour l'installation des effets supplémentaires. Cependant, dans le cas étudié, cet investissement peut être diminué en se servant des deux concentrateurs existants.

Ceci revient à utiliser ces concentrateurs en série, pour former un concentrateur multiple effet avec un Ne supérieur à 5, se servant toujours de la TC. Cependant, la faisabilité d'un tel système repose sur l'étude de la capacité évaporatoire de chaque effet, et des pressions d'évaporation, données inconnues pour le moment.

Théoriquement le nombre d'effets maximal que peut atteindre ce concentrateur combiné est de 9. Cependant, la pression d'évaporation du dernier effet serait de 2,3 kPa. Cette amélioration doit alors être étudiée détail, en vue de déterminer le nombre d'effets optimal à installer. Un concentrateur à 9 effets avec TC, consomme 226 kJ/kg_{ee} ou 311 kJ/kg_{lait}, les gains potentiels sont donc de l'ordre de 296 kJ/kg_{lait}. Ces gains sont présentés au Tableau 4-7.

Tableau 4-7. Gains maximaux potentiels par fonctionnement en série

Consommation actuelle moyenne kJ/kg _{lait}	Consommation 9 effets avec TC kJ/kg _{lait}	Gains énergétiques kJ/kg _{lait}	Gains fioul MWh/an	Gain économique (k€/an)	Gain émissions (teqCO ₂ /an)
607	310	296	8907	379	1746

4.2.1.3. Pertes exergetiques et optimisation verticale

Comme déjà montré, l'analyse des pertes exergetiques du système permet d'identifier des gains exergetiques et énergétiques supplémentaires. L'optimisation verticale est alors réalisée par installation du procédé optimal identifié et calculé lors de l'AP. Cette optimisation consiste à utiliser une CMV installée sur 2 effets (cf. Figure 4-5). Le pincement dans ce cas ne sera pas modifié et est égal au pincement des évaporateurs existants (supposé de 5 K). La consommation totale de ce procédé est de l'ordre de 128 kJ/kg_{lait}.

Tableau 4-8. Gains énergétiques par installation de CMV sur 2 effets

Consommation actuelle moyenne kJ/kg_lait	Consommation CMV kJ/kg_lait	Gain fioul MWh/an	Gain électrique MWh/an	Gain économique (k€/an)	Gain émissions (teqCO ₂ /an)
607	128	18480	-2615	604	3465

Les gains calculés dans ce tableau restent indicatifs, en absence de mesures des consommations énergétiques. Cependant, les gains minimaux réalisables par installation d'une CMV sont calculables par comparaison à la consommation optimisée des deux concentrateurs, cette consommation étant inférieure à la réelle.

Par ailleurs, la consommation énergétique de la CMV est donnée pour un type de compresseur possédant la courbe de rendement utilisée au chapitre 3. Celle-ci est susceptible de changer dans le cas de l'installation d'un compresseur différent. Le choix du compresseur dépend du taux de compression, de la puissance demandée ainsi que du coût d'investissement. Cette partie de l'analyse est réservée à l'étude de faisabilité effectuée normalement à la suite de l'audit énergétique.

4.2.2. L'épuration bactérienne

Les critères de qualité sont déjà définis par les études menées sur le produit (voir chapitre 3 paragraphe 5.1). De plus, lors de cette étude, un critère de productivité susceptible d'être imposé par le site industriel a été identifié. Ce critère relève de la nécessité du double traitement thermique du lait à la réception. Comme décrit au paragraphe 3 Figure 4-2, le système de production applique un double traitement thermique du lait. Les opérations comprenant les premier et second traitements thermiques, l'écémage et le traitement de la crème doivent alors être étudiés ensemble. Il faut adapter l'AP déjà effectuée au cas particulier, puis déterminer les pertes énergétiques et exergétiques associées, en vue de déterminer les solutions d'amélioration possibles.

4.2.2.1. Adaptation de l'AP au cas particulier

Les données relatives aux différents flux énergétiques sont obtenues par les mesures et données collectées (voir Tableau 4-2). En utilisant ces flux, les courbes composites déjà tracées de l'opération de double traitement thermique peuvent être modifiées. Les changements sont à effectuer au niveau du traitement de la crème, qui n'était pas pris en considération lors de l'AP. Les courbes composites et la Grande Courbe composite sont présentées Figure 4-10. Le pincement actuel des échangeurs du premier traitement (6 K) est pris comme pincement du procédé. Cependant, dans le fonctionnement actuel du système, lors du deuxième traitement thermique, les échangeurs fonctionnent avec un pincement de 30 K. Ces échangeurs ne sont donc pas forcément adaptés à ce mode de fonctionnement. Dans le cas d'une étude approfondie, ces échangeurs doivent probablement être remplacés. Ce pincement local au niveau du deuxième traitement thermique déplace le besoin en énergie thermique à une température élevée, nécessitant ainsi l'utilisation de la vapeur, il n'affecte cependant pas la quantité d'énergie nécessaire au fonctionnement de l'opération, mais crée des pertes exergétiques liées à la production de chaleur par la vapeur. Les courbes composites adaptées au procédé étudié servent alors à déterminer la consommation optimale du système actuel en énergie thermique.

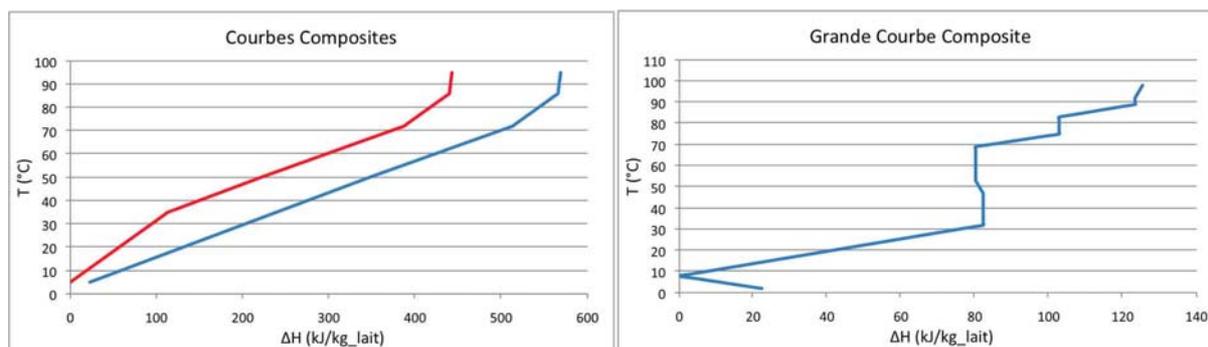


Figure 4-10. CC et GCC des procédés de traitement thermique du lait et de la crème

L'étude préalable du procédé de double traitement thermique montre que la stratégie à appliquer consiste à réaliser un échange entre les différents flux de manière à diminuer le pincement procédé jusqu'à la valeur minimale permise par les échangeurs en place, et d'associer une PAC pour le préchauffage du lait à la température de 35 °C. Cependant, et comme indiqué lors de l'AP du chapitre 3, la PAC ne peut pas assurer à elle seule le besoin total en énergie, compte tenu du besoin de chauffage à haute température. Ce besoin sera donc assuré par la vapeur déjà présente à l'usine.

Le Tableau 4-9 présente les différentes grandeurs calculées. L'optimisation effectuée n'affecte pas le besoin en énergie frigorifique du système. Les gains en énergie frigorifique sont donc nuls dans ce cas, et par suite cette consommation ne sera pas prise en compte. Seule la consommation en énergie thermique sera calculée, en vue de déterminer les gains par rapport au système actuel calculé au paragraphe 3.1.

Tableau 4-9. Besoins et consommations énergétiques du système amélioré

Besoin basse Température (kJ/kg_lait)	Besoin haute température (kJ/kg_lait)	COP	Consommation électrique PAC (kJ/kg_lait)	Consommation Combustible (kJ/kg_lait)
80	45	5,3	15	66,5

4.2.2.2. Pertes non fatales et amélioration incrémentale

Lors de l'analyse des courbes composites, les pertes énergétiques dans les échangeurs sont supposées nulles [LIN98]. Cependant, en comparant la consommation énergétique actuelle du procédé à la consommation énergétique du même procédé optimisé, les pertes énergétiques non fatales peuvent être déduites.

La consommation minimale du procédé actuel sans changement est calculée en traçant les courbes composites de celui-ci avec le pincement actuel. Ces courbes sont tracées à la Figure 4-10. La consommation optimale du procédé actuel est donc de l'ordre de 126 kJ/kg_lait. Les pertes énergétiques non fatales sont de l'ordre de 7 kJ/kg_lait. Ces pertes énergétiques permettent de déterminer les gains potentiels en appliquant des échanges de chaleur supplémentaires. Elles constituent la première amélioration énergétique incrémentale pour l'opération de traitement thermique. Le Tableau 4-10 reprend les différentes consommations énergétiques ainsi que les gains réalisables. Les consommations en fioul sont déterminées en divisant les consommations de vapeur par le rendement de production de vapeur déterminé au paragraphe 3.4.1.

Tableau 4-10. Consommations et gains énergétiques par amélioration incrémentale

Consommation actuelle kJ/kg_lait	Consommation améliorée k _{vap} /kg_lait	Gains fioul MWh/an	Gain économique k€/an [DGE08]	Gain émissions teqCO ₂ /an [ADE07]
133	126	210	9	41

Pratiquement, ces pertes sont dues à la répartition des échanges de chaleur dans ce procédé. Cette répartition ne permet pas de récupérer la quantité d'énergie maximale récupérable, ce qui est dû à la récupération locale par opération, ainsi qu'au pincement local de 30 K au niveau du deuxième traitement.

4.2.2.3. Pertes fatales et amélioration radicale

Les pertes énergétiques fatales du système sont déterminées par la différence entre la consommation optimisée et l'EMR. Elles sont de l'ordre de 23 kJ/kg_lait. Ces pertes sont nécessaires au fonctionnement du système actuel. En effet, les pertes énergétiques représentent le besoin énergétique pour chauffer le lait lors de la première pasteurisation de la température de sortie du récupérateur de chaleur à la température de première pasteurisation (voir Figure 4-3). Elles sont directement proportionnelles au pincement de l'opération de première pasteurisation et donc les éliminer revient à éliminer ce pincement, ce qui est impossible en pratique, parce que ceci nécessiterait une surface d'échange infinie. Par ailleurs, le pincement du procédé est de 6 K. Pour le diminuer, il faut installer des échangeurs permettant une valeur plus faible, nécessitant un investissement sur le prix des échangeurs non négligeable. Par contre, il est important de noter le gain énergétique potentiel par cette diminution ; il est donné relativement à cette dernière, et est de l'ordre de 3,77 kJ/K.kg_lait.

D'autre part, comme déjà montré lors de l'AP effectuée au chapitre précédent, ces pertes énergétiques fatales sont éliminables en supprimant la première pasteurisation. En effet, selon la courbe de croissance des micro-organismes et la durée de stockage du lait avant production, cette pasteurisation peut être identifiée comme nécessaire ou non pour la qualité du produit. De plus, le critère de productivité représenté par la sécurité alimentaire selon l'avis du site industriel, peut imposer cette pasteurisation. Cette étude montre alors les gains énergétiques possibles par cette élimination. Ces gains sont de l'ordre de 23 kJ_{vapeur}/kg_lait, et la même valeur de 23 kJ_{froid}/kg_lait en termes d'énergie frigorifique. Le Tableau 4-11 reprend les gains énergétiques possibles en énergie achetée par an. Cependant il faut noter que, compte tenu des incertitudes sur le calcul du COP du groupe frigorifique, les gains en électricité seront donnés en intervalle utilisant les valeurs extrêmes du COP calculées au paragraphe 3.4.2.

Tableau 4-11. Gains énergétiques par élimination de la première pasteurisation (optimisation horizontale)

Intervalle	Gain chaud (kJ/kg_lait)	Gain froid (kJ _f /kg_lait)	Gain fioul (MWh/an)	Gain électrique (MWh/an)	Gains économiques (k€/an)	Gains émissions (teqCO ₂ /an)
Limite inférieure	23	23	680	67	34	137
Limite supérieure	23	23	680	140	39	142

4.2.2.4. Pertes exergetiques et optimisation verticale

L'évaluation des pertes exergetiques du système permet d'identifier des gains exergetiques et énergétiques supplémentaires. En effet, les analyses des pertes énergétiques permettent l'optimisation horizontale du procédé, tandis que les analyses des pertes exergetiques permettent l'optimisation verticale (voir chapitre 2 paragraphe 2.2).

Cette analyse a déjà été effectuée lors de l'AP, est permet de tracer la GCCNE du procédé optimisé, en vue de visualiser les gains énergétiques possibles. Cette GCCNE est présentée à la Figure 4-11.

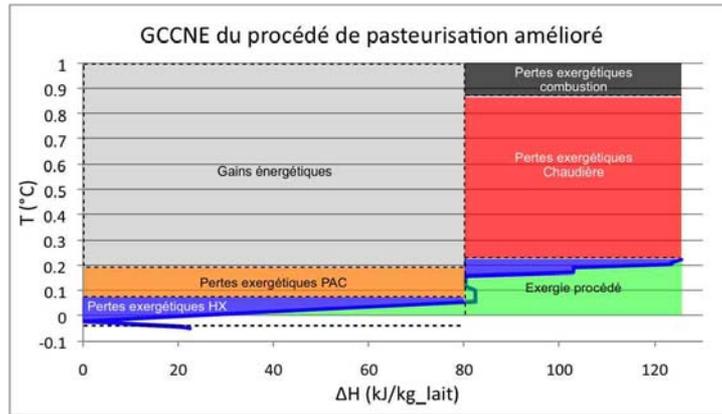


Figure 4-11. GCCNE des procédés de traitement thermique avec intégration de PAC

Cette amélioration radicale permet d'éliminer à la fois les pertes énergétiques non fatales et les pertes **exergétiques** fatales. La consommation finale du procédé serait de l'ordre de $15 \text{ kJ}_{\text{méca}}/\text{kg_lait}$ et de $45 \text{ kJ}_{\text{vapeur}}/\text{kg_lait}$. En prenant compte du rendement de la chaudière à fioul lourd, la consommation en énergie combustible serait de l'ordre de $76,7 \text{ kJ}_{\text{fioul}}/\text{kg_lait}$. Le tableau reprend les différentes consommations et les gains énergétiques réalisable par l'installation de ce procédé.

Tableau 4-12. Consommations et gains énergétiques par installation de la PAC

	Fioul (MWh/an)	Électricité (MWh/an)	Gains fioul (MWh/an)	Gains électricité (MWh/an)	Gains économiques (k€/an)	Gains émissions (teqCO_2/an)
Actuelle	3 995,81	x	2 643,8	-306	91	500
Optimisée	1 351,97	x+306				

Avec x la consommation électrique actuelle de l'opération.

4.2.3. Nettoyage du matériel

Comme déjà déterminé au paragraphe 3.3, le cycle de nettoyage amélioré est applicable à l'usine. Il faut cependant déterminer la consommation de ce cycle rapportée au débit de matière première.

4.2.3.1. Adaptation de l'AP au cas particulier

La seule grandeur connue (à part les températures requises des solutions de nettoyage) est la consommation totale de l'opération. Il n'existe qu'un moyen pour exprimer la consommation du nouveau cycle par rapport à la matière première. Ce moyen consiste à comparer le cycle classique, dont la consommation est connue par unité de masse de matériel lavé et par unité de masse de matière première, au cycle innovant, dont seule la consommation par unité de masse de matériel est connue.

Le cycle de nettoyage optimal déterminé lors de l'AP consomme $9,57 \text{ kJ}_{\text{méca}}/\text{kg_matériel}$, tandis que le cycle classique consomme environ $40 \text{ kJ}_{\text{cal}}/\text{kg_matériel}$. La consommation totale de l'opération de nettoyage selon le cycle classique appliqué à l'usine est de $349 \text{ kJ}/\text{kg_lait}$, ce qui implique que $8,7 \text{ kg}$ de matériel sont lavés par kg de lait traité.

Le procédé proposé consommerait donc environ $83,5 \text{ kJ}_{\text{méca}}/\text{kg_lait}$, pour assurer un besoin en chaleur de $247 \text{ kJ}/\text{kg_lait}$. Ce procédé, comme montré dans le chapitre 3, consiste en un préchauffage de l'eau du premier rinçage à une température de 45 °C , par une récupération de chaleur des effluents du premier rinçage. Ensuite, une PAC utilisant l'énergie disponible dans ces effluents assure l'énergie nécessaire au chauffage de la solution basique et de la solution acide de nettoyage.

Il s'agit donc d'adapter la GCCNE pour exprimer le besoin énergétique et la consommation finale par unité de masse de matière première. Cette GCCNE est présentée à la Figure 4-12.

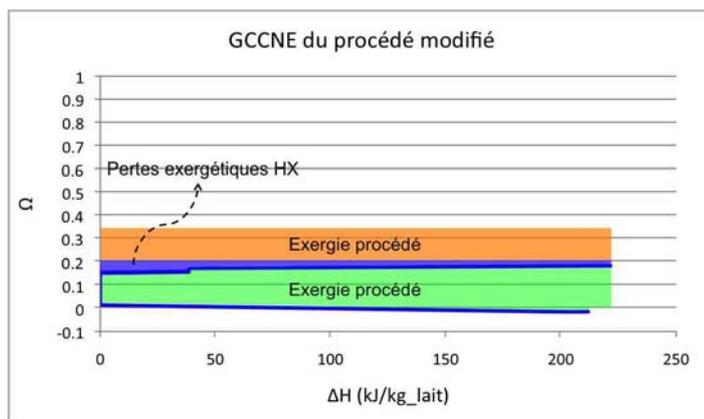


Figure 4-12. GCCNE adaptée du procédé optimal de nettoyage de matériel

4.2.3.2. Pertes énergétiques non fatales et améliorations incrémentales

Les pertes énergétiques non fatales, déterminées par la différence entre la consommation énergétique actuelle réelle du système et celle du même système optimisé, ne peuvent pas être calculées dans ce cas. En effet, la consommation actuelle réelle du système a été calculée à partir de la consommation du système optimisé, par manque de données. Donc les améliorations incrémentales, dans ce cas, ne peuvent être déterminées dans le cadre de l'audit énergétique, mais plutôt dans une étude complémentaire.

4.2.3.3. Pertes énergétiques fatales et améliorations radicales

Les pertes énergétiques fatales sont déterminées par la différence entre la consommation du système actuel optimisé et l'EMR déterminée lors de l'AP. Cependant, cette partie de l'étude ne traite que des pertes énergétiques et de l'optimisation horizontale. Par ailleurs, l'EMR de ce procédé est nulle à l'image de l'EMR de l'opération de concentration de produits liquides, et ce parce que le but de l'opération n'est pas de chauffer le produit mais de le nettoyer. La consommation calculée du système (349 kJ/kg_lait) représente la totalité des pertes énergétiques fatales.

La source de ces pertes fatales, comme déjà montré lors de l'AP (voir chapitre 3 paragraphe 4), est l'impossibilité de récupérer l'énergie absorbée par le produit lors de son lavage avec de la solution chaude (basique à 75 °C et acide à 65 °C). Cependant, le procédé proposé sert à augmenter la quantité d'énergie récupérable en préchauffant l'eau du premier rinçage. Ce préchauffage permet de déplacer le besoin énergétique de chauffage de l'acide à 65 °C à un besoin de préchauffage de l'eau du premier rinçage à une température de 45 °C, énergie alors récupérable par les eaux de rinçage sales, à condition de respecter les conditions de sécurité et d'installer un (voire deux) circuits intermédiaires, ce qui implique un pincement élevé (dans ce cas il a été fixé à 8 K).

Le besoin final serait de l'ordre de 247 kJ/kg_lait, créant ainsi un gain énergétique de l'ordre de 100 kJ/kg_lait. Les gains énergétiques sont présentés au Tableau 4-13.

Tableau 4-13. Gains énergétiques par préchauffage de l'eau de rinçage

Consommation actuelle kJ/kg_lait	Consommation Horizontalement optimale kJ/kg_lait	Gain fioul MWh/an	Gain économique (k€/an)	Gain émissions (teqCO ₂ /an)
349	249	3015	128	181

4.2.3.4. Pertes exergetiques et optimisation verticale

L'optimisation verticale sert à installer une PAC utilisant les effluents de l'opération de nettoyage (eaux des rinçages sales) comme source de chaleur, et les solutions de nettoyage à chauffer comme puits. La consommation de celle-ci a été calculée lors de l'AP, et serait de l'ordre de 83,5 kJ/kg_lait.

Les contraintes s'opposant à l'installation d'un tel procédé se résument par les points suivants.

- La contrainte imposée par le site industriel, qui risque de ne pas accepter le préchauffage de l'eau de rinçage par l'énergie contenue dans les eaux sales. Cependant, l'utilisation d'un fluide intermédiaire sert justement à éliminer les risques de contamination de l'eau de rinçage propre. Dans le cas contraire, le préchauffage peut ne pas être appliqué, et les eaux sales seront alors utilisées en tant que source de chaleur pour une PAC produisant l'énergie thermique nécessaire au chauffage des solutions de nettoyage. Le niveau de température de sortie des eaux sales sera plus élevé et donc le COP de la PAC sera aussi plus élevé. En utilisant la même méthode de calcul des températures moyennes d'évaporation et de condensation, le COP pouvant être atteint est alors de l'ordre de 3, et la consommation finale de l'ordre de 116 kJ_{méca}/kg_lait, supérieure à la consommation optimale d'environ 40 %. Le gain économique sera de l'ordre de 250 k€/an, et le gain en émissions de GES est d'environ 1 908 teqCO₂/an. Le Tableau 4-14 reprend les gains énergétiques par l'installation de la pompe à chaleur avec et sans préchauffage de l'eau du premier rinçage.
- La contrainte des durées de fonctionnement. L'opération de nettoyage des matériels n'est pas une opération continue, le nettoyage est effectué selon le matériel particulier à une heure précise ou l'autre de la journée. Cette disparité temporelle nécessite alors un stockage des différents flux énergétiques. Le stockage des solutions de nettoyage existe déjà dans l'usine, il faut envisager le stockage des eaux sales, et dans l'impossibilité éventuelle de cette procédure (pour des raisons de sécurité alimentaire par exemple) le stockage d'un fluide intermédiaire, l'eau propre qui pourra être réutilisée plus tard lors du besoin. Les contraintes de disparité temporelle ne peuvent pas être déterminées à ce stade de l'étude, mais doivent être prises en compte lors d'une étude poussée sur l'installation de l'un ou l'autre des procédés proposés.

Tableau 4-14. Gains énergétiques par installation de PAC avec et sans préchauffage de l'eau de rinçage

Procédé	Consommation actuelle kJ/kg_lait	Consommation PAC kJ/kg_lait	Gain fioul MWh/an	Gain électrique MWh/an	Gain économique (k€/an)	Gain émissions (teqCO ₂ /an)
Avec préchauffage	349	83	10 626	-1 706	333	1 980
Sans préchauffage	349	142,6	10 626	-2 913	249	1 908

5. Conclusions

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cette étude de cas. Elles sont réparties selon les étapes de l'AEEP appliquées au système étudié.

➤ Analyse procédé

L'analyse procédé effectuée au chapitre 3 sur les opérations d'épuration bactérienne, de concentration de produit liquides et de nettoyage des matériels industriels, est suffisamment