

Systeme Expert pour une Fourniture Intelligente
de l'Energie Thermique dans l'Industrie
et autres Applications à Grande Echelle

**Guide pour
les Audits d'Énergie
Thermique
EINSTEIN**



Guide pour les Audits d'Énergie Thermique EINSTEIN

Version: 2.0

Dernière révision: 13/06/2012

Coordinateur:

Hans Schweiger

energyXperts.NET, Barcelone, Espagne / Berlin, Allemagne

Auteurs (version actuelle):

Auteur(s)	Établissement/Société	Auteur responsable du(es) chapitre(s)	E-Mail
Hans Schweiger Claudia Vannoni Cristina Ricart	energyXperts.NET, Espagne / Allemagne	1, 2.1-2.4, 3.1-3.4, 3.5.1- 3.5.3, 3.5.5-3.5.6, 3.6.1-3.6.4, 3.7.4,3.8, 3.10-3.12, 4.1, 4.2, 4.4	hans.schweiger@energyxperts.net claudia.vannoni@energyxperts.net
Bettina Muster Christoph Brunner	AEE Intec, Autriche	2.5-2.6, 3.5.4, 3.7.1-3.7.3, 3.7.4.6, 3.9, 4.3	b.muster@aee.at c.brunner@aee.at
Konstantin Kulterer	Austrian Energy Agency, Autriche	3.1	konstantin.kulterer@energyagency.at
Alexandre Bertrand Frank Minette	CRP Henri Tudor, Luxembourg	Plusieurs paragraphes sur le refroidissement et la climatisation	alexandre.bertrand@tudor.lu frank.minette@tudor.lu

Auteurs (versions antérieures):

Auteur(s)	Établissement/Société	Auteur responsable du(es) chapitre(s)	E-Mail
Stoyan Danov	energyXperts.NET, Espagne	1, 2.1-2.4, 3.1-3.4, 3.5.1-3.5.3, 3.5.5-3.5.6, 3.6.1-3.6.4, 3.7.4,3.8, 3.10-3.12, 4.1, 4.2, 4.4	sdanov@gmail.com
Enrico Facci	Université de Rome, Italie	1, 2.1-2.4, 3.5.1-3.5.3, 3.6.1- 3.6.2, 3.7.4, 4.4	enrico.facci@uniroma1.it
Damjan Krajnc	Université de Maribor, Slovénie	3.5.4, 3.6.5	dkrajnc@uni-mb.si
Thomas Bouquet Stefan Craenen	COGEN Europe	3.7.4.3	thomas.bouquet@cogeneurope.eu stefan.craenen@cogeneurope.eu



Cet ouvrage est sous licence Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported (paternité-pas d'utilisation commerciale-partage des conditions initiales à l'identique). Pour consulter une copie de cette licence, veuillez visiter

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Vous êtes libre :

de Partager — de reproduire, distribuer et communiquer cet ouvrage

de Remodeler — d'adapter cet ouvrage

Selon les conditions suivantes:

Paternité. Vous devez citer le nom de l'auteur original de la manière indiquée par l'auteur de l'ouvrage ou le titulaire des droits (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous approuvent ou approuvent votre utilisation de l'ouvrage).

Pas d'utilisation commerciale. Vous n'avez pas le droit d'utiliser cet ouvrage à des fins commerciales

Partages des conditions initiales à l'identique. Si vous modifiez ou transformez cet ouvrage ou développez à partir de celui-ci, vous n'avez le droit de distribuer le travail qui en résulte que sous une licence identique ou similaire à celle-ci.

Avis de non-responsabilité

Le contenu de cette publication n'engage que la responsabilité de ses auteurs. Il ne représente pas l'opinion de la Communauté. La Commission Européenne n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qui y figurent.

Remerciements

La méthodologie et l'ensemble des outils EINSTEIN ont été développés dans le cadre des projets européens "EINSTEIN (système expert pour une fourniture intelligente de l'énergie thermique dans l'industrie)" et "EINSTEIN-II (système expert pour une fourniture intelligente de l'énergie thermique dans l'industrie et autres applications à grande échelle)" avec le soutien financier de la Commission Européenne.*

- EINSTEIN (Contrat N°: EIE/07/210/S12.466708, coordinateur de projet : Christoph Brunner, Joanneum Research - Institut des Techniques et Systèmes Durables, Autriche), 2007-2009.
- EINSTEIN-II (Contrat N°: IEE/09/702/S12.558239, coordinateur de projet : Hans Schweiger, energyXperts.NET, Espagne), 2010 – 2012.

Des parties de ces travaux ont en outre bénéficié du soutien de:

- la *Generalitat de Catalunya* (Espagne) Departament d'Educació i Universitats. Subventions *Beatriu de Pinós* No. 2006 BP-B2 0033 et 2007 BP-B2 00012



- le Ministère Espagnol des Sciences et de l'Innovation, Projet N°:DEX-590000-2008-84



- la Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (société Autrichienne pour le soutien à la recherche), Project No. 821907 ("EINSTEIN in Österreich")



* [N.d.T. : EINSTEIN est l'acronyme de "expert-system for an intelligent supply of thermal energy in industry"]

Table des matières

Introduction	6
1 Méthodologie d'audit thermique – notions fondamentales	7
1.1 L'énergie thermique dans l'industrie et autres applications et grande échelle	7
1.2 Domaine d'application	8
1.3 Une approche intégrale de l'efficacité énergétique	8
1.4 Les avantages de la procédure d'audit EINSTEIN	9
1.5 La boîte à outils EINSTEIN	10
1.6 Aperçu de ce guide	11
2 $E = mc^2$. Les concepts théoriques d'EINSTEIN	12
2.1 Energie, efficacité énergétique et source d'énergie renouvelables	12
2.2 Flux énergétiques – définitions	15
2.3 Niveaux de température dans la fourniture de chaleur et de froid	21
2.4 Modèles de processus et courbes de demande	22
2.5 Intégration de la chaleur et analyse Pinch	26
2.6 Evaluation du coût total - TCA	32
3 Comment mettre en œuvre un audit énergétique EINSTEIN	36
3.1 Contacts préliminaires : motiver	38
3.2 Acquisition des données de pré-audit	40
3.3 Préparation de l'audit : traitement des informations préliminaires	42
3.4 Préévaluation rapide	45
3.5 Visite sur site (ou sinon : seconde acquisition de données à distance)	46
3.6 Analyse du statu quo	52
3.7 Conception d'options d'économie et projet de ciblage énergétique	60
3.8 Calcul de performance énergétique et analyse environnementale	87
3.9 Analyse économique et financière	89
3.10 Création de rapport et présentation	91
3.11 Apprentissage collectif	93
3.12 Suivi	94
4 Exemples	95
4.1 Overall procedure	95
4.2 Consistency checking and data estimation	102
4.3 Heat recovery: dairy example	109
Nomenclature	115

“Il ne suffit pas que vous entendiez les sciences appliquées pour que vos travaux puissent contribuer au bien de l’homme. Le souci de l’homme lui-même et de son destin doit toujours être l’intérêt premier de toute entreprise technique, le souci des grands problèmes irrésolus de l’organisation du travail et de la distribution des biens - afin que les créations de notre esprit soient une bénédiction et non une malédiction pour l’humanité. N’oubliez jamais cela au milieu de vos diagrammes et de vos équations.”

Albert Einstein

Extrait d’un discours prononcé devant les étudiants du California Institute of Technology en 1931.

Introduction

La demande d'énergie thermique (chaleur et froid) dans l'industrie constitue autour de 20% de la demande finale totale d'énergie en Europe. Le chauffage et la climatisation des locaux dans les bâtiments représentent quant à eux 27% de la demande finale d'énergie. Bien que l'efficacité énergétique se soit améliorée dans l'industrie européenne au cours des dernières décennies, un grand potentiel demeure inexploité en ce qui concerne la réduction de la demande d'énergie ; la combinaison intelligente de solutions et technologies existantes pourrait permettre d'exploiter ce potentiel. Pour optimiser la fourniture de l'énergie thermique, il est requis d'adopter une approche intégrale holistique comprenant les possibilités de réduction de la demande au moyen de la récupération de la chaleur et de l'intégration des processus associées à une combinaison intelligente de technologies existantes de fourniture de chaleur (et de froid) au coût raisonnable, en adéquation avec les contraintes économiques données.

La *méthodologie EINSTEIN pour audit d'énergie thermique* qui est décrite dans le présent document a été développée dans le cadre des projets Européens EINSTEIN et EINSTEIN-II (Energie intelligente Europe - EIE). Ces projets sont le fruit d'une précédente collaboration entre les partenaires des projets, *AEE INTEC (Autriche)* et *energyXperts.NET (Espagne)*, pendant la période 2003 – 2007 dans le cadre des programmes Chauffage et réfrigération solaires et SolarPACES de l'AIE (Agence internationale de l'énergie), Task 33/IV sur la Chaleur solaire pour processus industriels (www.iea-ship.org). Les éléments et concepts fondamentaux qui composent cette méthodologie avaient déjà été produits dans le cadre du projet européen (5^{ème} programme-cadre) POSHIP (*The Potential of Solar Heat for Industrial Processes – Le potentiel de la chaleur solaire pour les processus industriels*) et du projet national autrichien PROMISE (*Produzieren mit Sonnenenergie – Produire avec l'énergie solaire*).

Un des aspects intéressants du groupe de recherche Task 33/IV de l'AIE était la *collaboration interdisciplinaire* entre des experts en *technologies d'énergie renouvelable* (énergie héliothermique) d'une part, et des *ingénieurs en procédés industriels* d'autre part. Au cours des travaux sur plusieurs études de cas dans l'industrie, dans le cadre de ladite Task 33/IV, il est clairement apparu que l'on manquait d'outils appropriés pour l'audit de la fourniture de l'énergie thermique dans l'industrie :

- * *complexité* du problème que pose l'optimisation de la fourniture de l'énergie thermique requiert de réunir les connaissances en matière de technologie des processus, d'intégration des processus et de techniques de récupération de chaleur, et un savoir étendu au sujet des différentes technologies à haut rendement énergétique pour la fourniture de chaleur et de froid, y compris les énergies renouvelables.
- * Ceci se heurte souvent à la fois au *manque de temps disponible* pour les audits ou les études préalables indicatives de faisabilité et au *manque de connaissances* des techniciens impliqués. Dans le cas spécifique des projets de chauffage solaire à usage industriel étudiés dans le cadre de la Task 33/IV de l'AIE, il s'agissait du manque de connaissances des experts en héliothermie dans le domaine des technologies de processus, de l'intégration de la chaleur et des aspects généraux de la fourniture de chaleur à l'industrie. Mais le problème est plutôt d'un ordre général : il est très difficile qu'une même personne, particulièrement les jeunes techniciens intervenant souvent dans la pratique des audits énergétiques, ait les connaissances globales requises du vaste éventail de concepts technologiques pour élaborer des solutions véritablement intégrales et optimisées.

Par conséquent, fondées sur l'expérience pratique d'un grand nombre d'audits énergétiques dans différents secteurs industriels et autres applications à grande échelle, par exemple de grands immeubles du secteur tertiaire, les méthodologies d'audit appliquées par les différents partenaires ont été standardisées au fur et à mesure pour aboutir à ce qui est présenté ici comme la méthodologie d'audit EINSTEIN.

En outre, plusieurs outils ont été développés pour permettre l'accès rapide aux informations requises et la semi-automatisation des calculs et décisions de conception nécessaires (système expert), depuis les simples tableurs jusqu'aux outils logiciels traitant des parties spécifiques du problème. La majorité de ces outils sont maintenant intégrés dans l'outil logiciel EINSTEIN sur lequel est basée la méthodologie d'audit EINSTEIN. L'implémentation de cette méthodologie sous forme de boîte à outils d'audit complète, incluant un système expert logiciel, la rend facile à utiliser ou distribuer et contribue à réduire la durée (et donc le coût) et à accroître la standardisation (et donc la qualité) des audits énergétiques.

L'outil logiciel EINSTEIN, ainsi que certaines bases de données complémentaires, est en train d'être développé comme projet logiciel libre et gratuit disponible dans toutes les langues¹ des partenaires du projet IEE sur le site Web du projet ou auprès de certains membres du consortium. Nous espérons que cette forme de diffusion entraînera son utilisation étendue au sein de la communauté des cabinets d'audit énergétique, ingénieurs, consultants et chercheurs qui s'occupent de la fourniture d'énergie thermique dans des applications à grande échelle, et que la présente version pourra continuer d'être enrichie de nouvelles expériences et contributions de la part de cette communauté.

¹ *Anglais, Bulgare, Tchèque, Français, Allemand, Italien, Polonais, Slovaque, Slovène, Espagnol*

1 Méthodologie d'audit thermique EINSTEIN – notions fondamentales

1.1 L'énergie Thermique dans l'industrie et autres applications à grande échelle

La demande d'énergie thermique (chaleur et froid) dans l'industrie (chiffres 2002 : environ 2 300 TWh/8400 PJ) représente autour de 28% de la demande finale totale d'énergie (Tableau 1) et 21% des émissions de CO₂ en Europe².

Tableau 1. Distribution de la demande d'énergie finale dans l'UE en 2002. Source : Livre vert de l'UE sur l'efficacité énergétique.

2002	Buildings (residential and tertiary)		Industry		Transport		All final demand sectors	
	Mtoe	% of final demand	Mtoe	% of final demand	Mtoe	% of final demand	Mtoe	% of final demand
Solid fuels	12.2	1.1	38.7	3.6	0.0	0.0	50.9	4.7
Oil	96.8	8.9	46.9	4.3	331.5	30.6	475.2	43.9
Gas	155.6	14.4	105.4	9.7	0.4	0.0	261.5	24.2
Electricity (incl. 14 % from RES)	121.3	11.2	91.2	8.4	6.0	0.6	218.5	20.2
Derived heat	22.8	2.1	7.5	0.7	0.0	0.0	30.3	2.8
Renewables	29.0	2.7	16.2	1.5	1.0	0.1	46.2	4.3
Total	437.8	40.4	306.0	28.3	338.9	31.3	1082.6	100.0

Bien que l'efficacité énergétique se soit améliorée dans l'industrie Européenne au cours des dernières décennies, un grand potentiel demeure inexploité en ce qui concerne la réduction de la demande d'énergie ; la combinaison intelligente de solutions et technologies existantes pourrait permettre d'exploiter ce potentiel. Dans le Livre vert de l'UE sur l'Efficacité Energétique, le gisement d'économies d'énergie dans l'industrie (cogénération non prise en compte) est estimé s'élever à 350 TWh/1260 PJ (Commission européenne [2005]). Le plan d'action en matière d'efficacité énergétique de la Commission Européenne indique que 40% des objectifs de Kyoto pour l'UE doivent être réalisés au moyen de l'efficacité énergétique pour garantir la réussite de ces objectifs.

L'amélioration de l'efficacité énergétique ne conduit pas seulement aux évidents bénéfices environnementaux mais représente aussi un intérêt économique pour les entreprises industrielles : dans beaucoup de cas, il est possible de parvenir à des délais de retour sur investissement allant de quelques mois à quelques années. Dans une petite ou moyenne entreprise type, l'énergie représente 3% à 12% des coûts d'exploitation avec un gisement d'économies d'énergie compris entre 15% et 30% [source : E-Check 2006].

Fréquemment néanmoins, les investissements correspondants ne sont pas réalisés pour certaines des raisons suivantes :

²Chiffre comprenant la production d'électricité dans l'industrie. Source : <http://ghg.unfccc.int>. Combustion totale de combustible par les industries manufacturières et la construction dans l'UE en 2002 : 583 070 millions de tonnes de CO₂

- × Le manque de connaissances des entreprises en ce qui concerne les solutions énergétiquement efficaces possibles.
- × Les coûts d'Énergie bien qu'ils soient importants, ne sont pas la première priorité des entreprises. Les Investissements relatifs à l'énergie sont en concurrence avec les investissements visant à améliorer la production et les produits. Cela aboutit à une situation dans laquelle les investissements en vue d'économiser l'énergie ne sont pas effectués : ils sont économiques en soi mais perdent la course aux financements disponibles.
- × De plus, la plupart des entreprises industrielles ne perçoivent pas l'efficacité énergétique comme un enjeu à part entière mais comme un élément d'enjeux plus larges comme la réduction des coûts de fabrication, le respect des normes environnementales, la sécurité et la productivité. L'efficacité énergétique est en concurrence avec d'autres enjeux pour ce qui est de l'accès aux ressources au sein d'une entreprise. Bien que le capital soit la ressource la plus souvent citée, les moyens en personnel peuvent avoir une importance égale voire supérieure. La réduction des effectifs au sein des entreprises a pour résultat que celles-ci disposent d'un personnel moins nombreux pour régler toutes les questions.
- × Le budget disponible pour un audit énergétique est faible (voir nul)
- × Même dans les cas où des audits énergétiques sont réalisés, les auditeurs n'ont souvent qu'une connaissance limitée des options technologiques et n'osent pas ou ne disposent pas des moyens pour proposer des solutions innovantes non conventionnelles..

La méthodologie d'audit thermique EINSTEIN vise à surmonter certains des obstacles cités ci-dessus et à contribuer à une mise en œuvre généralisée de solutions intégrales énergétiquement efficaces pour la fourniture de l'énergie thermique.

1.2 Domaine d'application

La méthodologie d'audit thermique EINSTEIN s'adresse aux industries et autres consommateurs à grande échelle ayant une forte demande d'énergie thermique (chaleur et froid) dans une plage de basses et moyennes températures jusqu'à 400°C, par exemple :

a) secteurs industriels:

- × industrie alimentaire
- × industrie chimique
- × industrie du papier
- × construction de machines, d'équipements et d'automobiles
- ×
- × industrie de transformation du plastique et de transformation du bois
- × traitement des surfaces métalliques
- × industrie textile - de nombreux autres secteurs industriels

b) applications non industrielles:

- × réseaux de chauffage et de refroidissement urbains, y compris l'intégration des demandes sous forme de production centralisée d'électricité et de chaleur pour des groupements ou réseaux d'industries qui intègrent des entreprises industrielles avec d'autres secteurs
- × bâtiments du secteur tertiaire, comme les grands immeubles de bureaux, galeries commerciales, centres commerciaux, hôtels, hôpitaux, palais des congrès, écoles, stations thermales, etc.
- × autres installations consommant de l'énergie thermique, comme les stations de dessalement de l'eau de mer, stations d'épuration des eaux, etc.

EINSTEIN présente particulièrement de gros avantages pour les petites et moyennes entreprises, pour lesquelles le coût d'un audit classique d'une profondeur et d'une qualité comparables forme un obstacle important à l'introduction de technologies énergétiquement efficaces.

1.3 Une approche intégrale d'efficacité énergétique

Pour optimiser la fourniture d'énergie thermique, il est requis d'adopter **une approche intégrale holistique** (Figure 1) qui intègre :

- * Les possibilités en matière de **réduction de la demande** au moyen de l'optimisation des processus et de l'application de technologies compétitives consommant moins d'énergie.
- * Des **mesures d'efficacité Energétique** par le biais de la récupération de la chaleur et de l'intégration des processus.
- * Une **combinaison intelligente des technologies disponibles pour la fourniture de chaleur et de froid** (chaudières et brûleurs efficaces, cogénération, pompes à chaleur), **comprenant** l'utilisation **d'énergies renouvelables** (l'énergie solaire et l'énergie tirée de la biomasse sont particulièrement bien appropriées pour un usage thermique).
- * La considération des contraintes économiques données.

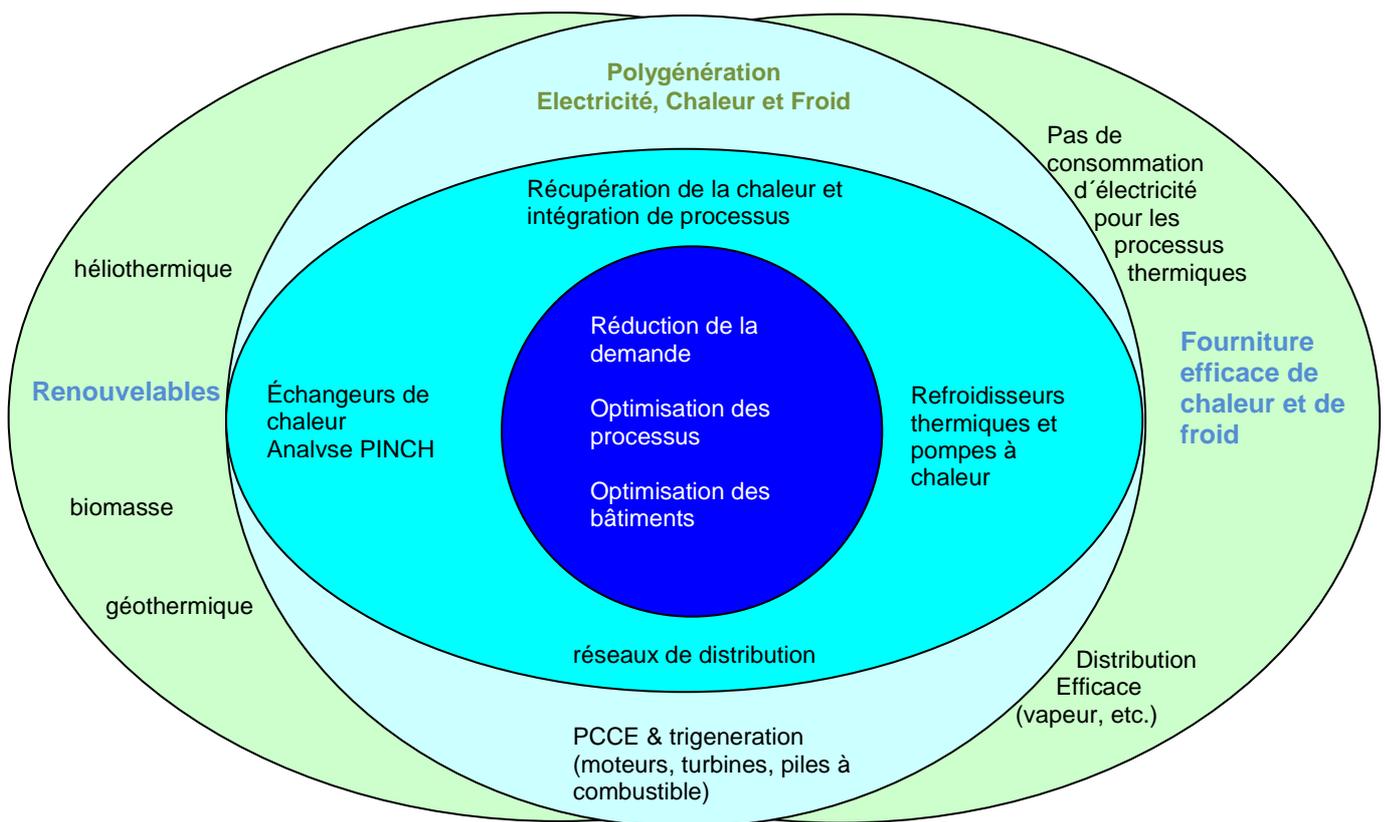


Figure 1: Approche holistique des audits d'énergie thermique ("voir avec l'œil d'EINSTEIN"), combinant réduction de la demande, récupération de la chaleur et intégration des processus et une combinaison intelligente des technologies de fourniture.

1.4 Les avantages de la procédure d'audit EINSTEIN

Guide pour les audits d'énergie thermique EINSTEIN

Contrairement à de nombreux aspects de la consommation d'électricité, par exemple les pompes, moteurs, éclairages, etc., où une liste de recommandations et de mesures standards peut souvent conduire à de bons résultats, la tâche consistant à optimiser la fourniture d'énergie thermique dans l'industrie est plutôt complexe du point de vue technique :

- * Dans de nombreuses compagnies, particulièrement les petites et moyennes entreprises, les informations disponibles sur la consommation réelle d'énergie sont très succinctes et générales (factures de combustible, caractéristiques techniques des chaudières, etc.). La consommation des processus et sous-processus individuels doit donc être estimée ou déterminée moyennant des mesurages coûteux qui prennent beaucoup de temps.
- * L'exploitation des potentiels de récupération de chaleur existants requiert souvent l'intégration de plusieurs processus à différents niveaux de température et avec différents timings de temps de fonctionnement (intégration d'échangeurs de chaleur et de systèmes de stockage de chaleur).
- * Les différentes technologies disponibles pour la fourniture de chaleur doivent être combinées afin d'obtenir des solutions optimales.

La complexité technique du problème à traiter contraste avec la nécessité d'appliquer une méthodologie d'évaluation à faible coût et donc forcément accélérée. C'est là une des principales raisons pour lesquelles le gisement d'économies d'énergie thermique est encore bien moins exploité que le gisement d'économies d'électricité.

Pour surmonter ces contraintes, la boîte à outils EINSTEIN s'appuie sur les concepts décrits ci-après et permet de traiter les données et de générer des propositions relatives aux petites et moyennes entreprises types, d'une complexité moyenne en demandant 4 à 8 heures de temps de travail d'un jeune expert. Les principaux avantages de la boîte à outils EINSTEIN, aussi exposés à la Figure 2, sont les suivants :

- * **standardisation du problème et des solutions possibles** : l'acquisition des données et la génération des propositions sont toutes deux exécutées en utilisant des modèles standardisés d'opérations unitaires (processus) représentant un processus industriel générique applicable aux branches de l'industrie et aux types de bâtiments sur lesquels porte le projet, ainsi que des modules standardisés pour les sous-systèmes de fourniture de chaleur et de froid.
- * Des estimations "grossières" ("**quick and dirty**") : **des aides pour estimer et calculer les données qui sont nécessaires mais non disponibles sur la demande de chaleur**. Dans de nombreux cas, il est possible d'obtenir au moins des chiffres approximatifs sur la demande de chaleur des différents processus en combinant plusieurs informations différentes –souvent incomplètes, fragmentées et parfois seulement qualitatives– collectées au cours des visites et des entretiens avec le personnel technique de l'entreprise. Ces calculs, souvent fastidieux et prenant beaucoup de temps, mais nécessaires pour le traitement de ces données, peuvent être considérablement allégés en utilisant un ensemble limité de données comme entrées pour la procédure standardisée. De cette manière, un travail de calcul de moins d'une heure peut souvent se substituer à la réalisation de mesures in situ, avec une précision suffisante grâce aussi à une fonction interne de recoupement des données, au moins pour la phase d'avant-projet.
- * **semi-automatisation de la procédure d'audit et de la génération de propositions** : l'outil logiciel EINSTEIN incorpore des bases de données, qui contiennent par exemple les paramètres techniques des composants standards, et aide au processus décisionnel de sorte que même des techniciens ne possédant toutes les qualifications requises seront capables d'utiliser l'outil pour traiter des problèmes relativement complexes. Des critères de référence aideront l'utilisateur à évaluer la situation avant et après les interventions proposées. Des listes de contrôle rapide et de mesures standards sont aussi incorporées. Les rapports d'audit sont produits automatiquement à partir du logiciel, dans un format permettant que l'auditeur externe les transmette directement au client ou que le département technique les communique directement au chef de l'entreprise.
- * **soumission des données via Internet ou par le biais d'un court questionnaire** : en considérant que dans beaucoup de cas il est suffisant de traiter un petit nombre de données pour effectuer une

première évaluation grossière, un *court* questionnaire a été mis au point. Il permet la collecte de données in situ et, le cas échéant, il peut être facilement rempli pendant un appel téléphonique. On peut aussi accéder au questionnaire via une page Internet pour communiquer les données à distance.

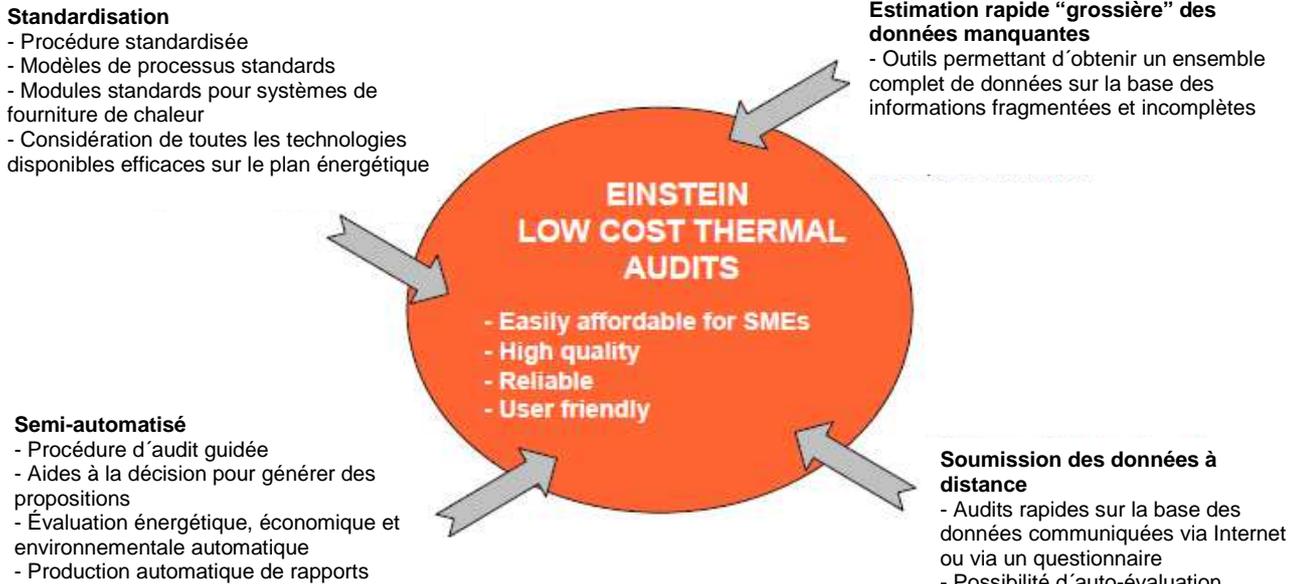


Figure 2 : Vue d'ensemble des fonctions de l'audit thermique EINSTEIN pour la réalisation d'audits d'énergie thermique rapides et peu coûteux, mais de haute qualité

1.5 La boîte à outils EINSTEIN

La méthodologie d'audit EINSTEIN est basée sur un outil logiciel incluant aides à la décision et lignes directrices qui forme un **système expert³ complet pour audit d'énergie thermique**. Ce système expert logiciel facile à utiliser, associé au guide d'audit EINSTEIN, constitue une **boîte à outils d'audit énergétique** qui dirige le consultant tout au long de la procédure d'audit : depuis le relevé de la situation (préparation de la visite et acquisition des données), puis le traitement des données, jusqu'à l'élaboration, la conception et l'évaluation quantitative (énergétique et économique) des solutions alternatives.

Le cœur du système expert logiciel et le manuel sont mis à disposition gratuitement sous forme de **projet logiciel libre** (www.sourceforge.net/projects/einstein). Ce type de développement de logiciels a prouvé sa grande efficacité en termes de propagation des connaissances et pour la maintenance continue, le débogage, la mise à jour et le perfectionnement du logiciel au moyen des contributions des utilisateurs [FLOSS 2002].

La boîte à outils EINSTEIN permet de produire des solutions pour réaliser des économies d'énergie thermique et des économies financières en s'appuyant sur un système expert logiciel facile à utiliser présentant une interface conviviale.

Le système expert logiciel comprend les modules suivants :

³ Un **système expert** est une "catégorie de programmes informatiques (...) constitués d'un ensemble de règles qui analysent les informations (généralement fournies par l'utilisateur du système) (...), fournissent une analyse du(des) problème(s) et (...) recommandent une série d'actions à effectuer par l'utilisateur (...)." (wikipedia.org).

- a) Un bloc pour l'acquisition et le traitement des données

L'acquisition des données est essentiellement basée sur un court questionnaire. Un module complémentaire aide l'auditeur à estimer les données non disponibles. Un lien avec des sources d'information sur les meilleures pratiques et des critères de référence aide à évaluer l'état de la technique dans l'entreprise.

- b) Un bloc pour la génération d'une nouvelle proposition

Ce bloc est constitué du module d'optimisation des processus, le module de récupération de chaleur, qui aide à concevoir et optimiser un réseau adéquat d'échangeurs de chaleur pour la récupération de la chaleur et l'intégration des processus, et du module de fourniture de chaleur et de froid qui aide à sélectionner et à dimensionner l'équipement d'alimentation et les systèmes de distribution de chaleur et de froid les mieux adaptés.

- c) Un bloc pour l'évaluation énergétique, économique et environnementale de la nouvelle proposition

La performance énergétique du système est déterminée par un module de simulation de système. Sur la base de la performance énergétique, une évaluation économique et environnementale est générée automatiquement par le module d'*analyse économique*.

- d) Un bloc pour la production de rapports servant à la présentation de la nouvelle proposition à l'entreprise

Des rapports automatiques sont produits dans un format qui permet de les présenter directement à l'entreprise. Le rapport contient des informations sur la conception technique de la nouvelle proposition, les coûts d'investissement de l'aménagement et une feuille de route économique pour sa mise en œuvre.

Le système expert guide l'auditeur pour chaque décision qui doit être prise, au moyen de menus d'aide, de suggestions des meilleures options à choisir, etc. Ces aides, associées au présent guide d'audit d'énergie thermique avec recommandations et meilleures pratiques, rendent la boîte à outils accessible aussi aux utilisateurs non experts.

1.6 Aperçu de ce guide

Le Chapitre 2 de ce guide d'audit présente les concepts théoriques sur lesquels s'appuie la méthodologie d'audit EINSTEIN. Ce chapitre est essentiel pour la compréhension des détails des étapes de l'audit et des procédures de calcul.

Le Chapitre 3 décrit la méthodologie d'audit EINSTEIN étape par étape, dans l'ordre chronologique depuis le premier contact avec l'entreprise jusqu'à la remise du rapport d'audit et au suivi. Pour chacune des étapes de l'audit, les principaux aspects requérant une attention particulière sont mis en relief.

Le chapitre 4 décrit l'application de la méthodologie d'audit EINSTEIN à certaines études de cas servant d'exemples.

En annexe de ce guide, Vous trouverez le Questionnaire de base EINSTEIN qui peu être utilisé pour l'acquisition des données.

Références du chapitre 1 :

Commission Européenne (2005) : *Doing more with Less: Green Paper for Energy Efficiency*, Brussels, p.31.

E-Check in CRAFT-SME (2006) : *Energy Checks from Small and Medium Craft Enterprises*. IEE project EIE/04/066/S07.38641.

DG INFSO (2008). Commission Européenne – DG INFSO: *Impacts of Information and Communication Technologies on Energy Efficiency (Impacts des Technologies de l'Information et de la Communication sur l'Efficacité Energétique)*. Rapport final, Septembre 2008.

FLOSS (2002). Free/Libre and Open Source Software: Survey and Study. Final report. International Institute of Infonomics, Université de Maastricht, Pays-Bas, Berlecon Research GmbH, Berlin, Allemagne
Juin 2002 Projet Européen N° IST –29565 (5ème programme-cadre).

2 $E = mc^2$. Les concepts théoriques d'EINSTEIN

2.1 Énergie, efficacité énergétique et sources d'énergie renouvelables

2.1.1 Consommation d'énergie en fonction du type d'énergie et du type d'usage

Dans l'industrie et dans les grands bâtiments du secteur tertiaire, l'énergie est consommée principalement sous forme d'électricité, de combustibles (combustibles fossiles, comme le gaz naturel, le mazout ; mais aussi la biomasse et le biogaz) et dans certains cas sous forme de chaleur ou de froid (générés extérieurement) provenant de réseaux urbains.

La consommation d'énergie peut s'exprimer en termes d'énergie finale ou d'énergie primaire :

- * *Énergie finale* : c'est la quantité d'énergie contenue dans les différentes sources d'énergie qui entrent dans l'entreprise, indépendamment de leur forme (Dans EINSTEIN, le contenu énergétique des combustibles est comptabilisé en termes de leur pouvoir calorifique inférieur ou PCI -*lower calorific value* ou LCV).
- * *Énergie primaire* : c'est la quantité totale d'énergie nécessaire pour générer cette fourniture d'énergie, en prenant en compte les pertes à toutes les étapes de la production, depuis l'extraction jusqu'à la conversion et au transport. La différence entre le contenu énergétique final et primaire est particulièrement grande dans le cas de l'électricité : dans l'état actuel de la technologie de l'approvisionnement en électricité en Europe, entre 2,5 et 3 unités d'énergie primaire sont nécessaires pour générer une unité d'électricité.

L'Énergie peut être utilisée à usage *thermique* et *non thermique*. La méthodologie d'audit d'énergie thermique EINSTEIN a trait à la partie thermique de l'usage de l'énergie. Les *usages thermiques* de l'énergie sont définis dans EINSTEIN comme suit :

- * Chauffage et refroidissement de processus (y compris l'énergie servant aux réactions chimiques, si celles-ci sont activées par la chaleur)
- * Chauffage et refroidissement des locaux des bâtiments (halls de production, bureaux, etc.)
- * Demande d'eau chaude sanitaire (par ex. douches, cuisines, etc.)

Les *usages non thermiques* sont :

*Consommation d'énergie électrique (et autre) pour l'éclairage, les machines (par ex. moteurs, compresseurs) et autres équipements électriques, à l'*exclusion* des systèmes électriques de climatisation, de refroidissement et de chauffage, qui sont pris en compte dans l'usage thermique de l'énergie.

Malgré leur importance dans le bilan énergétique global, EINSTEIN *ne prend pas en considération* les usages suivants :

- * L'usage non énergétique des combustibles, par ex. comme matière première dans les processus de traitement chimique
- * La consommation d'énergie pour le transport des matières premières et des produits finis et pour les trajets travail/domicile du personnel.
- * L'énergie contenue dans les matières premières (provenant des étapes précédentes de processus industriel).

La consommation d'énergie à usage thermique dans l'industrie Européenne représente près de 70% de la consommation totale en termes d'énergie finale et plus de 50% en termes d'énergie primaire. Dans les bâtiments aussi, plus de 50% de l'énergie finale est consommée pour le chauffage et le refroidissement des locaux et pour la demande d'eau chaude sanitaire.

2.1.2 Énergie renouvelable

Les sources d'énergie renouvelables qui conviennent le mieux pour la conversion directe dans les systèmes de fourniture de chaleur et de froid à des fins industrielles sont :

- × L'énergie solaire thermique (y compris la cogénération solaire thermique : électricité et chaleur),
- × La Biomasse et les biogaz,
- × L'énergie Géothermique.

Toutes les autres technologies d'énergie renouvelable ont seulement un intérêt indirect, car elles ne peuvent réduire l'impact de la consommation d'électricité d'une entreprise qu'à une échelle globale (au-delà des limites de l'entreprise proprement dite). C'est également vrai pour les systèmes photovoltaïques (PV), même s'ils sont installés sur le toit de l'entreprise, parce que ces systèmes sont généralement raccordés à un réseau et ne contribuent pas directement à la consommation d'électricité de l'entreprise.

L'énergie utilisée par l'entreprise sous forme d'énergie renouvelable n'est pas prise en compte dans la consommation d'énergie primaire. Néanmoins, il faut prendre en compte la différence entre les sources d'énergie renouvelables et la contribution de ces différentes sources. C'est pourquoi elles sont comptabilisées séparément dans EINSTEIN :

- × L'énergie solaire thermique est une énergie pratiquement infinie et infiniment renouvelable
- × La biomasse et les biogaz sont des sources d'énergie renouvelables mais finies. L'utilisation de ces sources d'énergie à usage thermique peut entrer en concurrence avec l'utilisation de ces mêmes matières dans d'autres systèmes (par ex. centrales électriques, conversion en biocombustibles) et avec l'utilisation des sols pour la production agricole..

2.1.3 Impact environnemental de la consommation d'énergie des entreprises

La consommation d'énergie à usage industriel en Europe représente environ 28% de la consommation totale d'énergie finale (sans tenir compte de la consommation d'énergie du transport lié à la production industrielle)⁴. Le chauffage et le refroidissement des locaux dans les bâtiments contribuent pour leur part à 27% de la demande d'énergie finale.

L'impact environnemental de l'utilisation de l'énergie est attribuable à une grande variété de facteurs parmi lesquels :

- × Les *émissions* de différentes substances résultant de la conversion de l'énergie (CO₂, autres émissions de gaz à effet de serre (GES), NO_x, CO, émissions radioactives, déchets nucléaires, etc.)
- × La *consommation* de ressources finies et non renouvelables (combustibles fossiles, matières premières)
- × Le *risque* associé à la fourniture de l'énergie et au système de conversion (par ex. accidents nucléaires, transport de combustibles, ...)
- × La *consommation d'eau* (par ex. tours de refroidissement)

⁴ Informations EuroStat (2004)

- * *L'utilisation des sols* (par ex. l'utilisation des sols pour la production de biocarburants ou de biomasse en concurrence avec l'utilisation des sols pour la production agricole).

Se lancer dans une évaluation exhaustive de l'impact environnemental en prenant en compte tous les facteurs susmentionnés signifierait sortir du cadre d'EINSTEIN. Les paramètres suivants servent de principaux indicateurs pour l'évaluation environnementale :

- * La consommation d'énergie primaire comme principal indicateur pour l'évaluation environnementale
- * La production de CO₂
- * La production de déchets nucléaires hautement radioactifs (HR) (associée à la consommation d'électricité)
- * La consommation d'eau

2.1.4 Stratégies axées sur la demande et axées sur la fourniture pour réduire la consommation d'énergie

La consommation d'énergie dans les entreprises (et en général) n'est pas un besoin en soi, mais fréquemment un *moyen* de réaliser certains objectifs, par exemple :

- * Maintenir la propreté de certains locaux ou équipements
- * Séparer deux fluides par distillation.

Ces mêmes objectifs, par ex. le nettoyage, peuvent souvent être réalisés de manières très variées auxquelles sont associées des consommations d'énergie très différentes. Par exemple, la propreté d'un local ou d'un équipement peut être maintenue :

- * En chauffant une grande quantité d'eau à 80 ou 90°C pour un lavage quotidien
- * En lavant à une température plus basse, mais en utilisant des détergents ou un appareil à pression
- * En évitant le besoin excessif de nettoyage, par exemple en plaçant un processus qui génère beaucoup de poussière dans un local séparé
- * etc.

Dans ce sens, comme cela a déjà été exposé à la section 1.3, il faut, dès le commencement de chaque audit EINSTEIN, chercher les possibilités de *réduction de la demande* à son origine. C'est en règle générale la manière la plus économiquement rentable, et dans le même temps la plus respectueuse de l'environnement, d'économiser l'énergie.

Il faut ensuite seulement couvrir la demande *résiduelle* de chaleur et de froid au moyen d'un système de fourniture de chaud et de froid optimisé sur le plan énergétique et environnemental.

2.2 Flux énergétiques – définitions

Pour l'analyse de la demande d'énergie thermique dans le cadre de la méthodologie EINSTEIN, les grandeurs de base suivantes sont utilisées :

- *Consommation finale d'énergie (FCE) et consommation finale d'énergie à usage thermique (FET) : pouvoir calorifique inférieur (LCV) de la consommation de combustible, consommation de chaleur et d'électricité (à usage thermique).*
- *Fourniture de chaleur/de froid utile (USH / USC) : chaleur ou froid généré dans le système de fourniture de chaleur ou de froid (par ex. chaudières, brûleurs, refroidisseurs) et qui est distribué aux différents processus consommant de la chaleur ou du froid sous forme de vapeur, d'air chaud, d'eau chaude, d'eau réfrigérée, etc.*
- *Chaleur/Froid utile du processus (UPH / UPC) : chaleur ou froid fourni à un processus (mesuré à l'entrée de l'échangeur de chaleur du processus).*

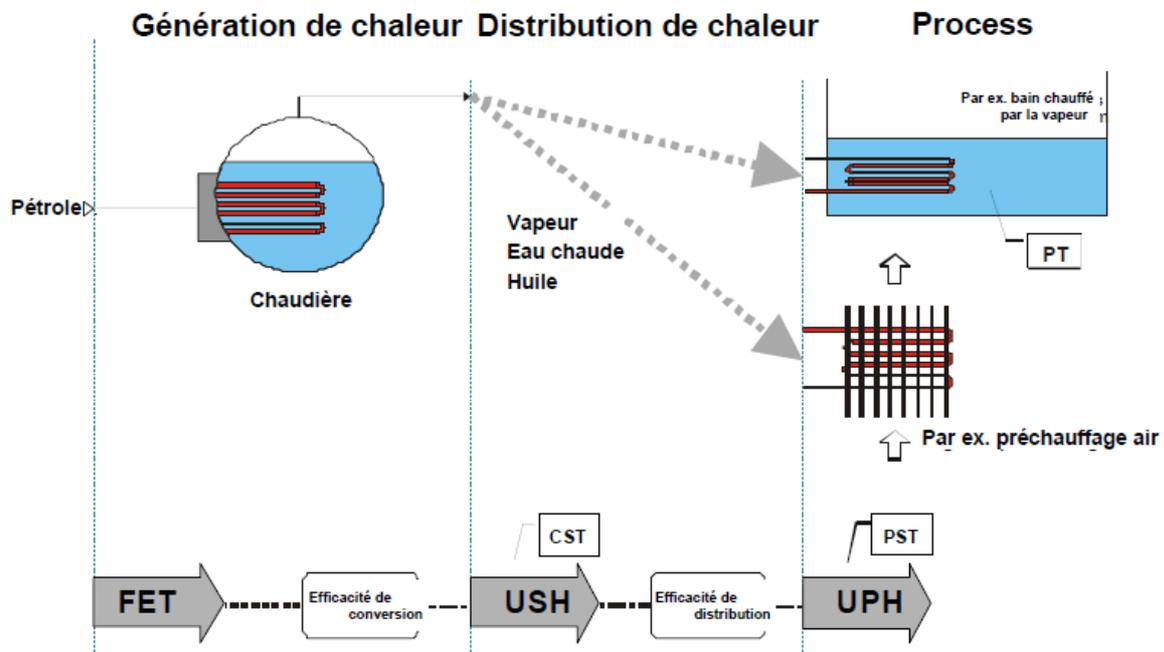


Figure 3 : Définitions EINSTEIN des flux énergétiques dans un système de fourniture de chaleur (analogues pour le refroidissement).

Les ratios USH/FET (ou USC/FET) et UPH/USH (ou UPC/USC) définissent l'efficacité de la conversion et l'efficacité de la distribution du système (Figure 4).

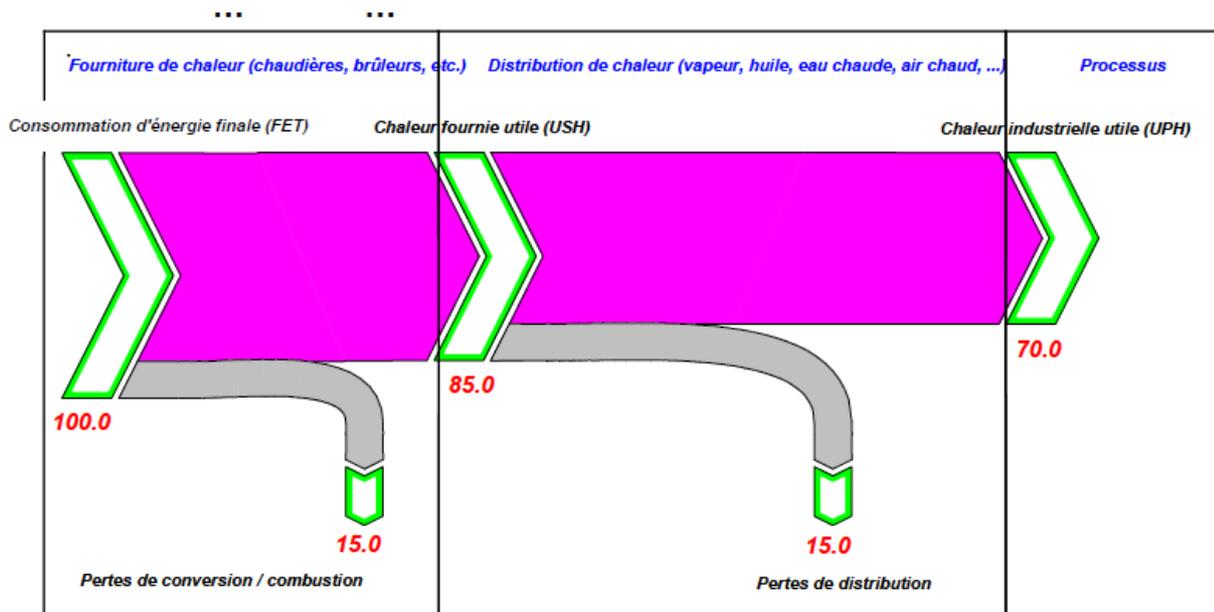


Figure 4 : Diagramme de Sankey des flux énergétiques avec efficacités types de conversion et distribution.

Si l'on considère de surcroît les différents flux de chaleur résiduelle ou de froid résiduel, le schéma des flux d'énergie devient un peu plus complexe (Figure 6). Un exemple de processus industriel avec différents types de récupération de chaleur résiduelle est représenté à la Figure 5.

Dans EINSTEIN, nous appelons chaleur résiduelle disponible (QWH) un flux énergétique produit par un quelconque des sous-systèmes (fourniture / distribution / processus / autre) qui n'est pas la sortie principale dudit système. Les flux de chaleur résiduelle peuvent être par exemple :

- × La chaleur contenue dans les gaz d'échappement d'une chaudière ou dans le cycle d'évacuation de chaleur d'une machine de réfrigération
- × Le condensat récupéré d'une conduite de vapeur
- × La chaleur contenue dans les eaux usées d'un processus de lavage

De manière analogue, il peut y avoir du froid résiduel (QWC) comme l'air froid évacué d'un local climatisé, etc.

Par ailleurs, nous appelons *chaleur résiduelle récupérée (QHx)* ou *froid résiduel récupéré (QCx)* un flux d'énergie utilisé comme entrée pour un sous-système quelconque (fourniture / distribution / processus) et qui provient du système de récupération de chaleur résiduelle (y compris l'air ambiant et le sol). Les flux de chaleur résiduelle récupérée peuvent être par exemple :

- × Le préchauffage de l'air de combustion et/ou de l'eau d'alimentation d'une chaudière
- × Le préchauffage de l'eau à l'entrée d'un processus de lavage
- × Le préchauffage du retour dans un circuit de distribution d'eau chaude
- × Le pré-refroidissement de l'air à l'entrée d'un processus de germination dans la production de malt

Les sections suivantes donnent une définition mathématique des quantités utilisées dans les bilans énergétiques EINSTEIN.

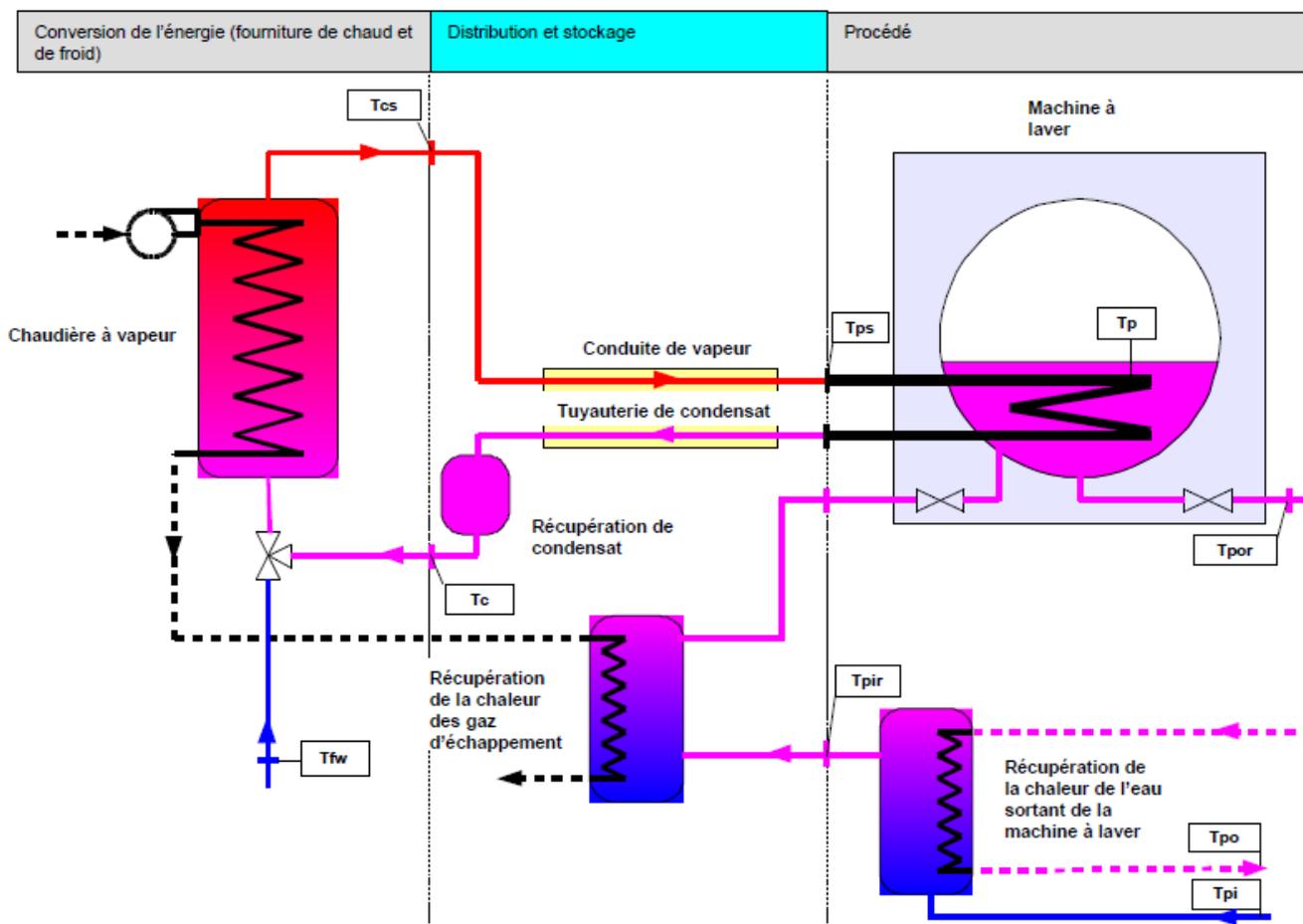


Figure 5: Exemple d'un processus de lavage industriel représenté selon le modèle EINSTEIN, avec différents types de récupération de chaleur : récupération de la chaleur des gaz d'échappement de la chaudière pour le préchauffage de l'eau ; récupération de la chaleur des eaux usées pour le préchauffage de l'eau ; récupération des condensats pour le préchauffage de l'eau d'alimentation de la chaudière

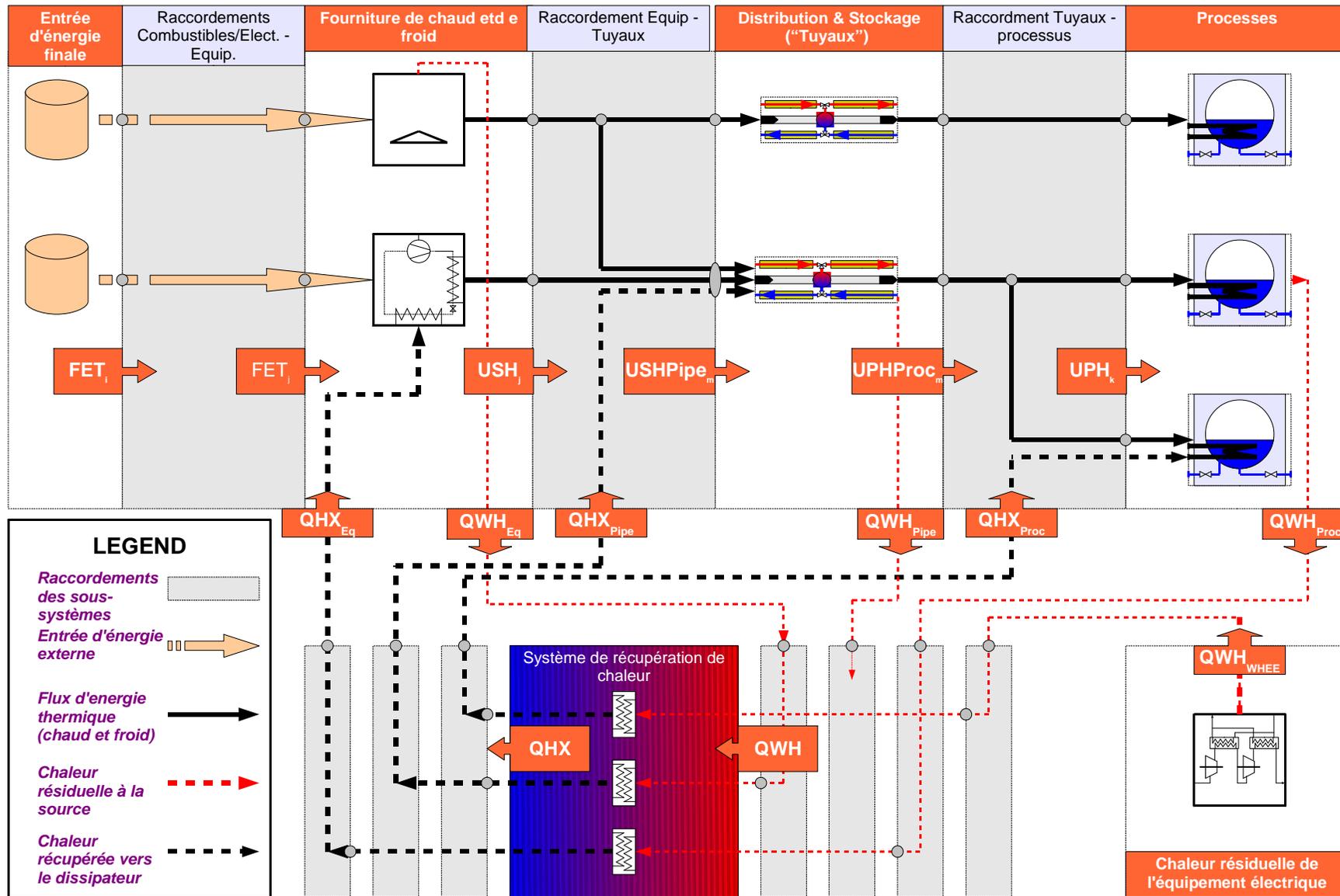


Figure 6 : Définitions EINSTEIN dans un système de fourniture de chaleur avec récupération de chaleur (analogue pour système de distribution de froid).

2.2.1 Consommation finale d'énergie et consommation d'énergie primaire

La consommation finale d'énergie totale (FEC) sert à représenter l'énergie finale totale qui entre dans l'entreprise sous forme de carburants (exprimée en termes de LCV – pouvoir calorifique inférieur), d'électricité et de chauffage urbain.

$$E_{FEC} = E_{FEC,el} + \sum_{i=1}^{N_{car}} E_{FEC, fuel(i)} + E_{FEC,heat} \quad (2.1)$$

La consommation d'énergie primaire (PEC) se déduit de cette équation en appliquant les différents facteurs de conversion pour chaque type d'énergie :

$$E_{PEC} = f_{PE,el} E_{FEC,el} + \sum_{i=1}^{N_{car}} f_{PE,j} E_{FEC, fuel(i)} + f_{PE,heat} E_{FEC,heat} \quad (2.2)$$

où $f_{PE,el}$ est le facteur de conversion en énergie primaire pour l'électricité et $f_{PE,j}$ est le facteur de conversion en énergie primaire pour les différents types de combustible (voir Tableau 2 pour les valeurs types).

Tableau 2. Facteurs types de conversion en énergie primaire pour différentes sources d'énergie⁵.

Type de combustible	Facteur de conversion en énergie primaire
Bois	0.2
Chauffage urbain avec production combine de chaleur à 70% au gaz naturel	0.6
Gaz naturel	1.1
Mazout	1.1
Electricité	3.0

L'énergie est consommée à usage thermique (chauffage ou refroidissement) et non thermique (éclairage, fonctionnement des moteurs, etc.).

L'électricité consommée par les refroidisseurs pour la climatisation et le refroidissement et par les équipements de chauffage électrique est comptabilisée comme énergie à usage thermique.

Les quantités d'énergie correspondantes sont appelées :

- × PET/FET : Énergie primaire/finale à usage thermique
- × PEO/FEO : Énergie primaire/finale à autre usage (non thermique)

L'équation suivante s'applique (et de manière analogue pour l'énergie primaire) :

$$E_{FEC} = E_{FET} + E_{FEO} \quad (2.3)$$

L'énergie finale totale à usage thermique est la somme des énergies consommées par les équipements de chauffage et de refroidissement dans l'entreprise :

$$E_{FET} = \sum_{j=1}^{N_{eq}} E_{FET,j} \quad (2.4)$$

⁵Schramek E.-R. (éditeur), Recknagel, Sprenger, Schramek – Taschenbuch für Heizung- und Klimatechnik 07-08, éditions Oldenburg, 2007

où N_{eq} est le nombre d'unités d'équipement thermique dans l'entreprise (chaudières, refroidisseurs, machines de cogénération, etc.)

Cas particulier de la cogénération :

Du point de vue de la méthodologie EINSTEIN, une machine de cogénération est traitée comme un équipement de fourniture de chaleur (pour de plus amples détails, voir section 3.7). La consommation finale d'énergie d'un équipement de cogénération est considérée comme étant la consommation nette résultant de la consommation de combustible et de la *consommation négative* sous forme d'électricité autogénérée :

$$E_{FET,j} = E_{FET,combustible(j)} - E_{FET,elgen,j} \quad (2.5)$$

Remarque : si l'efficacité de conversion électrique d'un équipement de cogénération est supérieure à la valeur de référence du réseau électrique de référence, la consommation d'énergie de cet équipement de cogénération en termes d'énergie primaire peut être négative !

2.2.2 Fourniture de chaleur et de froid utile (USH/C)

La fourniture de chaleur utile (USH) ou de froid utile (USC) est l'énergie fournie par l'équipement de conversion (chaudières, brûleurs, etc.), mesurée à la sortie de l'équipement (local des machines). Le bilan énergétique est exprimé par

$$\dot{Q}_{USH,j} = \dot{Q}_{USH,eq,j} + \dot{Q}_{QHx,j} \quad (2.6)$$

$\dot{Q}_{QHx,j}$ étant la chaleur résiduelle récupérée utilisée dans cet équipement (par ex. pour le préchauffage de l'air de combustion ou de l'eau d'alimentation) et $\dot{Q}_{USH,eq}$, la chaleur additionnelle générée dans cet équipement par conversion à partir de l'énergie finale.

L'efficacité de conversion nette de l'équipement est définie par :

$$\eta_{conv,j} = \frac{\dot{Q}_{USH,eq,j}}{E_{FET,j}} \quad (2.7)$$

La quantité de chaleur totale qui entre dans les différents circuits de distribution est exprimée par :

$$\dot{Q}_{USH,pipe,m} = \dot{Q}_{USH,m} + \dot{Q}_{QHx,m} \quad (2.8)$$

où $\dot{Q}_{USH,m}$ est la fourniture de chaleur utile de l'équipement de conversion au tuyau m et $\dot{Q}_{QHx,m}$ la chaleur résiduelle récupérée amenée directement dans le tuyau m (par ex. par préchauffage du circuit de retour).

L'enthalpie dans les dispositifs de fourniture de chaleur qui ne sont pas des boucles fermées (par ex. vapeur sans récupération de condensats, préparation et distribution directe d'eau chaude) est définie sur la base de certaines températures de référence (externes) par défaut (entrée d'eau froide, entrée d'air) :

$$\dot{Q}_{USH,pipe,m} = q_{m,o} h_o - q_{m,ret} h_{ret} - q_{m,i} h_i \quad (2.9)$$

où les indices font référence à la sortie (o), au retour (ret) et à l'entrée (i), ce dernier étant la référence externe pour les boucles ouvertes. Pour les boucles fermées où $q_m = q_{m,o} = q_{m,ret}$ l'équation (2.9) se simplifie pour devenir :

$$\dot{Q}_{USH,pipe,m} = q_m (h_o - h_{ret}) \quad (2.9a)$$

Des équations analogues s'appliquent à la fourniture de froid utile (USC).

2.2.3 Chaleur et froid utile de processus (UPH/C)

La demande nette de chaleur utile de processus (UPH) est définie comme la différence entre la demande de chaleur totale (brute) du processus (UPH_{gross} , voir section 2.4 ci-après) et la chaleur résiduelle récupérée intérieurement⁶.

$$Q_{UPH} = Q_{UPH, gross} - Q_{HX, internal} \quad (2.10)$$

D'autre part, la chaleur utile de processus (nette) s'obtient aussi comme la chaleur externe totale fournie au processus, soit par le système de fourniture de chaleur ($Q_{UPH, proc}$), soit sous la forme de chaleur résiduelle récupérée extérieurement et amenée directement dans le processus ($Q_{HX, proc}$) :

$$Q_{UPH} = Q_{UPH, proc} + Q_{HX, proc} \quad (2.11)$$

Ici encore, des équations similaires s'appliquent au froid utile de processus (UPC) et au froid résiduel récupéré (QCX).

2.2.4 Chaleur/froid résiduel(le) récupérable (QWH / QWC) et chaleur/froid résiduel(le) récupéré(e) (QHx / QCX)

Pour le calcul du potentiel de récupération de chaleur, il est important de faire la distinction entre la quantité totale de chaleur résiduelle et les flux de chaleur résiduelle qui peuvent techniquement être utilisés. En ce qui concerne les flux qui sont utilisés comme entrées dans un autre processus, la chaleur résiduelle récupérable est en outre limitée par la température finale à laquelle le flux peut être refroidi, ce qui détermine l'enthalpie minimum h_{min} . La chaleur résiduelle récupérable d'un processus donné ($Q_{QWH, Proc}$) est exprimée par :

$$Q_{QWH, Proc} = m_o (h_{po} - h_{min}) \quad (2.12a)$$

La quantité de chaleur résiduelle récupérable des équipements ($Q_{QWH, Eq}$, par ex. gaz d'échappement) ou de la tuyauterie ($Q_{QWH, pipe}$, par ex. condensats) se calcule de manière analogue, sur la base de la température d'entrée du fluide d'alimentation dans les circuits ouverts comme température de référence.

Hormis les flux de chaleur résiduelle, la chaleur résiduelle peut également être contenue (stockée) dans la masse thermique des équipements du processus ou du fluide du processus qui demeure dans les limites du processus. La quantité totale de chaleur résiduelle peut se calculer comme suit, N_d étant le nombre total de démarrages et en conséquence d'interruptions du processus :

$$Q_{QWH, Proc} = m_o (h_{po} - h_{min}) + m c_p (T_p - T_{min}) N_d \quad (2.12b)$$

Des équations analogues s'appliquent au froid résiduel.

Dans un système complexe de récupération de chaleur, avec à la fois des demandes de chauffage et de refroidissement, il peut exister la possibilité d'un échange direct de chaleur entre les demandes de refroidissement à haute température et les demandes de chauffage à basse température. À cet effet, les demandes de refroidissement de tous les sous-systèmes (processus, tuyaux, équipements), $Q_{D, cooling}$, doivent être ajoutées comme source de chaleur potentielle pour la récupération de chaleur résiduelle, et vice

⁶ La distinction entre récupération de chaleur interne et externe dépend de la spécification des limites du processus et est censée s'appliquer dans le cas d'équipements compacts comportant des échangeurs de chaleur internes : par exemple, la demande de chaleur brute dans un pasteurisateur traitant du lait froid correspond au chauffage de 4°C à 72°C, tandis que la demande de chaleur nette correspond seulement au chauffage résiduel après récupération de la chaleur, c'est-à-dire de 50°C à 72°C.

versa, les demandes de chauffage de tous les sous-systèmes, $Q_{D,heating}$, doivent être ajoutées comme source de froid potentielle.

La chaleur résiduelle réellement récupérée, Q_{QHx} , dépend de la configuration du système de récupération de chaleur et est toujours inférieure ou égale au total des sources de chaleur et de froid disponibles s

$$\sum_{h=1}^{N_{sys}} Q_{QHx,h} \leq \sum_{source} Q_{QWH,source} + \sum Q_{D,cooling}$$

et au total des dissipateurs de chaleur disponible :

$$\sum_{h=1}^{N_{sys}} Q_{QHx,h} \leq \sum_{source} Q_{QWC,source} + \sum Q_{D,heating} \tag{2.12c}$$

2.3 Niveaux de température dans la fourniture de chaleur et de froid

Dans l'analyse EINSTEIN, on considère non seulement la quantité d'énergie (*quantité*) dans chacun des sous-systèmes, mais on prête aussi une attention particulière à l'analyse des niveaux de température (*qualité*) de l'énergie (demande et fourniture).

Bien que l'analyse de la demande de chaleur devienne de ce fait beaucoup plus complexe, cela est absolument nécessaire pour la mise au point de solutions efficaces sur le plan énergétique :

- X Le potentiel de récupération de chaleur et d'intégration de chaleur dépend fortement des niveaux de température de la demande et de la fourniture (chaleur résiduelle disponible ou froid résiduel disponible)
- X Beaucoup de technologies de conversion efficaces sur le plan énergétique, comme la cogénération et les pompes à chaleur, et de sources d'énergie renouvelables (énergie solaire thermique) se limitent pratiquement aux basses et moyennes températures. La conception d'un système de fourniture qui exploite au maximum les sources de basses températures est par conséquent un préalable nécessaire pour l'utilisation de ces technologies.
- X L'efficacité de conversion des équipements de fourniture de chaleur classiques s'améliore, et les pertes de chaleur des équipements de distribution, de stockage et du processus sont diminuées, si les niveaux de température sont abaissés.
- X La production de froid est la plus efficace : plus les températures auxquelles l'énergie frigorifique doit être fournie sont élevées, plus les températures d'évacuation de la chaleur sont basses.

Tableau 3. Classification par niveau de température des technologies possibles de fourniture de chaleur

Plage de température [°C]	Niveau de température de la chaleur	Technologie de fourniture de chaleur applicable
< 60	Bas	Pompes à chaleur basse température Solaire thermique basse température
< 90	Moyen-Bas	Chaleur résiduelle des moteurs de cogénération (eau de refroidissement) Limite pratique pour solaire thermique à capteurs plans Pompes à chaleur haute température
< 150	Moyen	Vapeur basse pression
< 250	Moyen-Haut	Limite pour le solaire thermique moyenne température
< 400	Haut	Limite pratique pour la chaleur résiduelle des turbines à gaz, de la biomasse...

Nous devons faire la distinction entre les températures suivantes dans les processus et les systèmes de fourniture de chaleur :

- *Température du processus (TP)* : température du fluide de travail dans un processus.
- *Température de fourniture au processus (TFP)* : température d'entrée du fluide caloporteur utilisé pour le chauffage ou le refroidissement du processus (par ex. : température de la vapeur à l'entrée de l'échangeur de chaleur du processus)
- *Température de fourniture centrale (TFC)* : température du fluide caloporteur à la sortie du système de fourniture centrale de chaleur ou de froid (par ex. chaudière, refroidisseur). La différence entre TFC et TFP représente les pertes de température dans le circuit de distribution.

2.4 Modèles de processus et courbes de demande

2.4.1 Modèles de processus

Dans EINSTEIN, les processus sont modélisés en utilisant un modèle de processus générique décrit initialement dans POSHIP⁷ (Figure 7). Le modèle de processus générique présenté ci-après a trait aux processus de chauffage, mais ce même modèle – avec signes inverses – s’applique aussi aux processus de refroidissement. La majorité des processus requièrent non seulement le chauffage (ou refroidissement) d’un flux de fluide (par ex. flux d’air chaud, eau chaude ou réfrigérée, renouvellement de l’eau dans des bains, ...) mais aussi le chauffage (ou refroidissement) de certains réservoirs (fours, bains liquides). Ce dernier peut être subdivisé en préchauffage (ou pré-refroidissement) avant le début de l’opération et en maintien de la température (compensation des pertes thermiques au cours de l’exécution du processus).

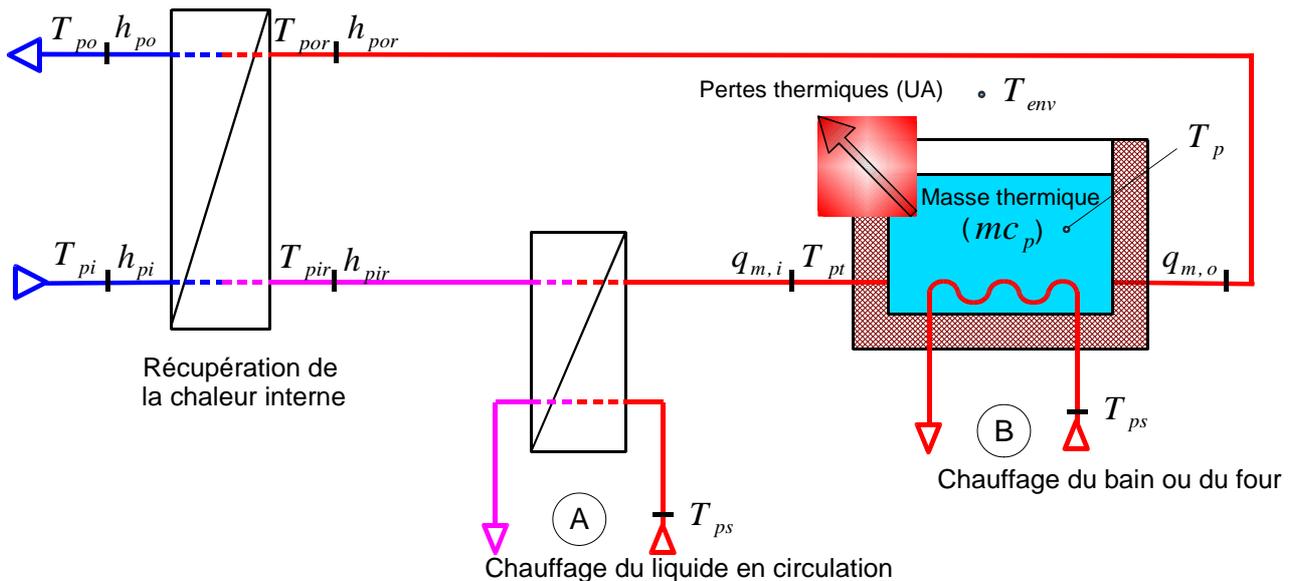


Figure 7 : Modèle de processus générique EINSTEIN comportant un flux entrant et un flux sortant

Par conséquent, la demande totale de chaleur d’un processus peut être, du point de vue conceptuel, scindée en trois composantes comme mentionné ci-dessus :

a) Chaleur de circulation (UPH_c)

La chaleur associée au flux massique de fluide entrant (flux d’entrée). C’est la chaleur nécessaire pour chauffer le fluide entrant à la température du processus, indépendamment de l’endroit physique où la chaleur est apportée (avant ou au sein du processus). La chaleur de circulation peut être définie pour des processus continus et des processus par lots, et elle est indépendante sur le plan conceptuel de l’intervalle physique pendant lequel le flux massique circule. Le temps de circulation peut être différent du temps d’exécution du processus.

La chaleur brute associée au fluide en circulation se calcule par la formule suivante

$$Q_{UPH,c}^{gross} = m_c c_p (T_p - T_{pi}) \quad (2.13)$$

où m_c est la masse totale du fluide de processus qui circule pendant la période considérée (un jour ou un an). La chaleur utile de processus nette pour le fluide en circulation s’obtient en soustrayant la récupération de chaleur interne :

$$Q_{UPH,c} = Q_{UPH,c}^{gross} - Q_{HX, internal} = m_c c_p (T_p - T_{pv}) \quad (2.14)$$

b) *Chauffage initial au démarrage (CUP_d)*

La quantité de chaleur nécessaire pour amener la masse de processus *qui demeure dans les limites de l'équipement du processus* (ne comprend donc pas la chaleur apportée pour amener le flux d'entrée à la température de processus dans un processus par lots ou continu) à la température de processus après une interruption du processus (par ex. arrêt pendant la nuit ou le week-end ; arrêts entre différents cycles de fonctionnement, etc.) :

$$Q_{UPH,s} = N_s (m c_p)_e (T_p - T_s) \quad (2.15)$$

où $(m c_p)_e$ est la masse thermique effective ou équivalente du processus en considérant l'inertie thermique non seulement du fluide proprement dit contenu dans le processus mais aussi de l'équipement environnant, et N_s le nombre de démarrage au cours d'une plage de temps donnée.

c) *Chaleur de maintien (UPH_m)*

La chaleur nécessaire pour maintenir la température du processus constante. Elle est équivalente aux pertes thermiques au travers des limites du processus vers l'atmosphère ambiante et à la fourniture de chaleur latente pour les processus d'évaporation ou chimiques.

$$Q_{UPH,m} = [(UA)(T_p - T_{env}) + Q_L] t_{op} \quad (2.16)$$

où (UA) est le coefficient de pertes thermiques de l'équipement du processus, T_{env} est la température de l'environnement du processus (généralement la température à l'intérieur des locaux de l'usine), Q_L est la puissance requise pour le changement de phase ou les réactions chimiques, et t_{op} est le temps de fonctionnement du processus.

Pour récapituler, la chaleur utile de processus totale nette peut se calculer à partir des trois composantes décrites ci-dessus :

$$Q_{UPH} = Q_{UPH,c} + Q_{UPH,m} + Q_{UPH,s} \quad (2.17)$$

Le modèle de processus EINSTEIN simple peut être facilement généralisé à des processus comportant plusieurs flux de processus entrants et sortants (Figure 8).

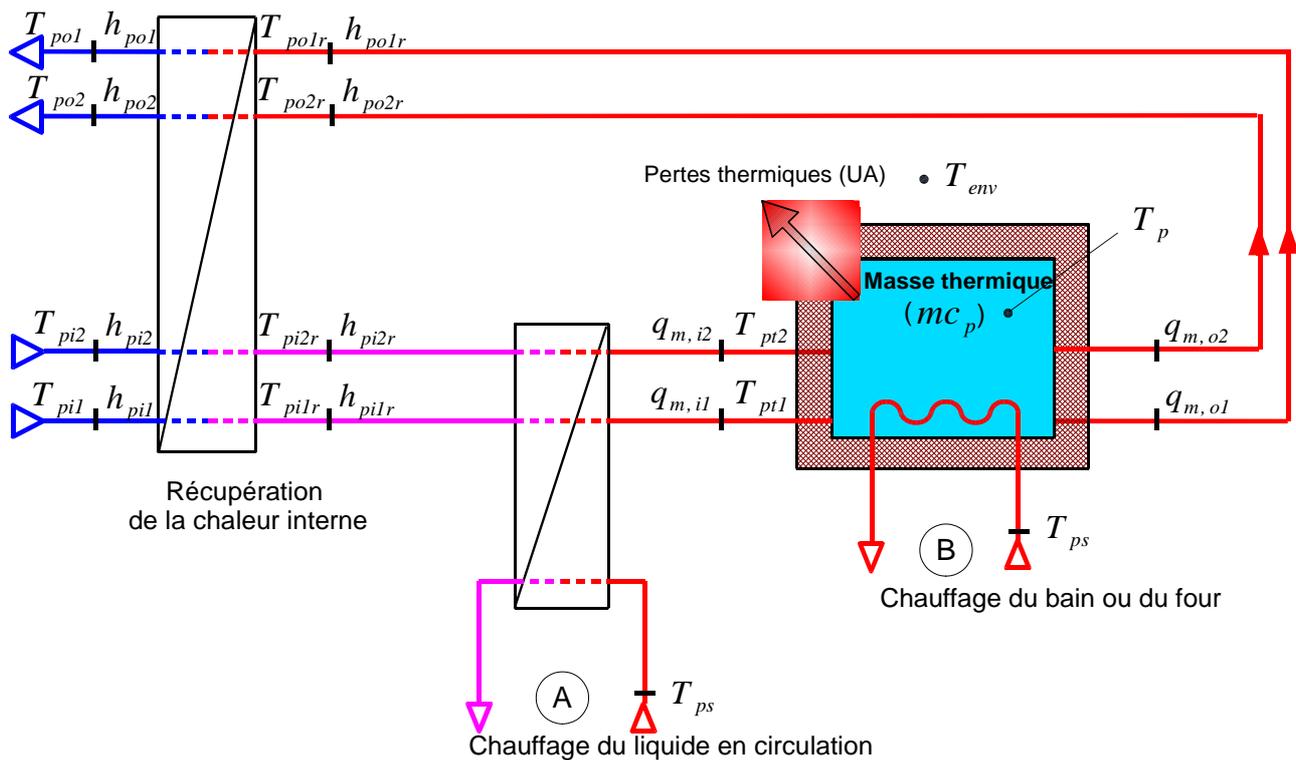


Figure 8 : Modèle de processus EINSTEIN standard avec plusieurs flux entrants et sortants

2.4.2 Simplification des hypothèses pour un audit EINSTEIN rapide

Pour effectuer une analyse rapide et afin de réduire le nombre de données d'entrée requises, les modèles de processus généraux sont simplifiés dans EINSTEIN de la manière suivante :

- ✗ niveaux de température constants : toutes les températures d'entrée, de processus et de sortie (chaleur résiduelle) sont considérées constantes.
- ✗ la dépendance par rapport au temps est seulement déterminée par le planning du processus. Toutes les composantes de la demande de chaleur varient proportionnellement dans le temps.

Pour la plupart des processus industriels, cette approximation à un niveau constant de température est suffisante. Les processus réels à température variable peuvent être approximés en scindant le processus réel en deux ou plusieurs sous-processus dans le modèle.

2.4.3 Profils de demande standards

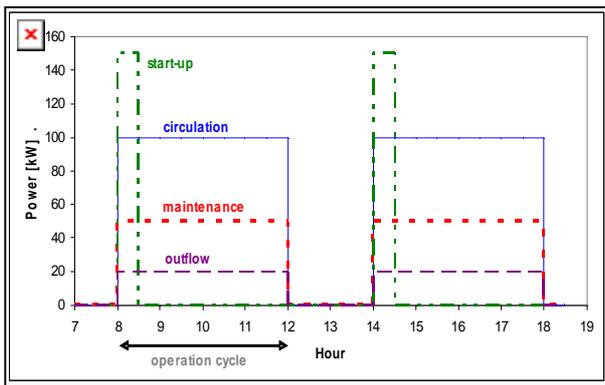
La dépendance par rapport au temps de la demande de chaleur et de la disponibilité de chaleur résiduelle dans les processus génériques EINSTEIN est déterminée par les plannings suivants :

- ✗ Planning de fonctionnement du processus : le temps pendant lequel une température de réglage constante T_p doit être maintenue
- ✗ Planning de chauffage initial au démarrage : la durée du chauffage initial au démarrage.
- ✗ Planning des flux entrants
- ✗ Planning des flux sortants

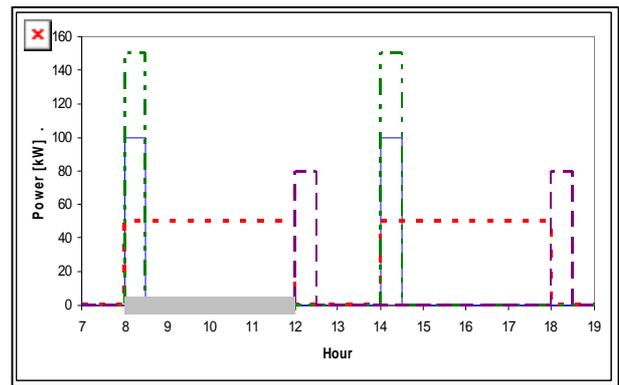
Si aucun planning détaillé n'est donné en annexe du questionnaire de base EINSTEIN (voir Annexe), on adopte des plannings par défaut définis selon que le processus est continu ou par lots (Tableau 4).

Tableau 4. Plannings de processus par défaut

	Processus continu	Processus par lots
Circulation (flux d'entrée)	Continue pendant t_{op}	Les premiers 20% de la durée totale <u>dans les limites de</u> t_{op}
Démarrage	Les premiers 20% de la durée totale <u>dans les limites de</u> t_{op}	Les premiers 20% de la durée totale <u>dans les limites de</u> t_{op}
Maintien	Continue pendant t_{op}	Continue pendant t_{op}
Évacuation du fluide résiduel (flux de sortie)	Continue pendant t_{op}	Les premiers 20% de la durée totale <u>après</u> t_{op}



(a)



(b)

Figure 9 : Profil de demande standard pour processus continu (a) et processus par lots (b). Exemple : processus avec $t_{op} = 2 \times 4h$.

2.4.4 Demande de chauffage et de refroidissement des bâtiments dans EINSTEIN

Les demandes de chauffage et de refroidissement des bâtiments peuvent être modélisées dans EINSTEIN comme des cas particuliers du modèle de processus générique (Tableau 5).

Tableau 5. Représentation des demandes de chaleur et de froid des bâtiments sous forme de processus dans EINSTEIN.

Composante de la demande du processus	Chauffage des locaux	Refroidissement des locaux	Eau chaude sanitaire
Circulation (flux d'entrée)	Chauffage de l'air frais	Refroidissement de l'air frais Déshumidification de l'air frais	Chauffage de l'eau froide
Démarrage	Chauffage / refroidissement initial avant les périodes d'occupation		-
Maintien	Demande d'énergie pour le chauffage / refroidissement, à l'exclusion du renouvellement de l'air		-
Flux de sortie	Air évacué (seulement utile pour la récupération dans le cas d'une ventilation contrôlée)		Eaux usées
Température de processus	Température souhaitée à l'intérieur des locaux		Température de l'eau chaude (aux points de consommation)
Température de fourniture au processus	Température d'entrée du fluide caloporteur dans le système de chauffage / refroidissement (par ex. eau, air chaud / froid)		Température de l'eau chaude (distribution)

2.5 Intégration de la chaleur et analyse Pinch

La manière adéquate pour intégrer la chaleur (perte) dans un système est décrite par la théorie de Pinch [Schnitzer, Ferner 1990] qui a été développée par Linhoff et al. dans les années 70. Avec l'analyse Pinch, la demande en chaleur et en froid du système tout entier est présentée dans un diagramme simple qui montre la demande énergétique (chaleur ou froid) des processus dans lesquels cette énergie est nécessaire. Quelques conclusions très importantes peuvent être tirées de cette analyse :

- X Quelle est la quantité d'énergie pouvant être théoriquement économisée par la récupération de chaleur ?
- X De quelle quantité de chauffage externe le processus de production dispose-t-il ? A quels niveaux de température cette chaleur est-elle nécessaire ?
- X De quelle quantité de refroidissement externe le processus de production dispose-t-il ? A quels niveaux de température ce refroidissement est-il nécessaire ?

L'analyse est, par conséquent, un outil puissant pour une première estimation de l'économie d'énergie potentielle grâce à la récupération de chaleur (laquelle, ultérieurement, doit être adaptée pour raisons pratiques et/ou économiques). Ensuite, l'analyse montre parfaitement bien à quel niveau la chaleur/le froid extérieur est nécessaire – information importante pour l'intégration idéale de nouveaux systèmes d'approvisionnement en énergie.

2.5.1 Analyse d'un système au moyen de l'analyse Pinch

La théorie Pinch sépare les flux de chaleur dans le système par niveaux de température en une partie froide avec un surplus d'énergie calorifique qui doit être refroidi et une partie chaude qui a besoin d'être chauffée. Ce processus est réalisé en combinant les courbes de température d'enthalpie de tous les flux qui doivent être chauffés (courbe froide composée) et tous les flux qui doivent être refroidis (courbe chaude composée) à une certaine température - Diagramme de charge (voir la Figure 10 - Associations des flux « froids »). De ce fait, les flux du processus peuvent être définis comme tout flux de masse devant être chauffé (flux froid) ou devant être refroidi (flux chaud). Les flux qui ne sont pas nécessairement requis par le processus (comme le déversement des eaux usées) peuvent être inclus s'il est possible de les utiliser comme agent de refroidissement ou de chauffage d'autres flux.

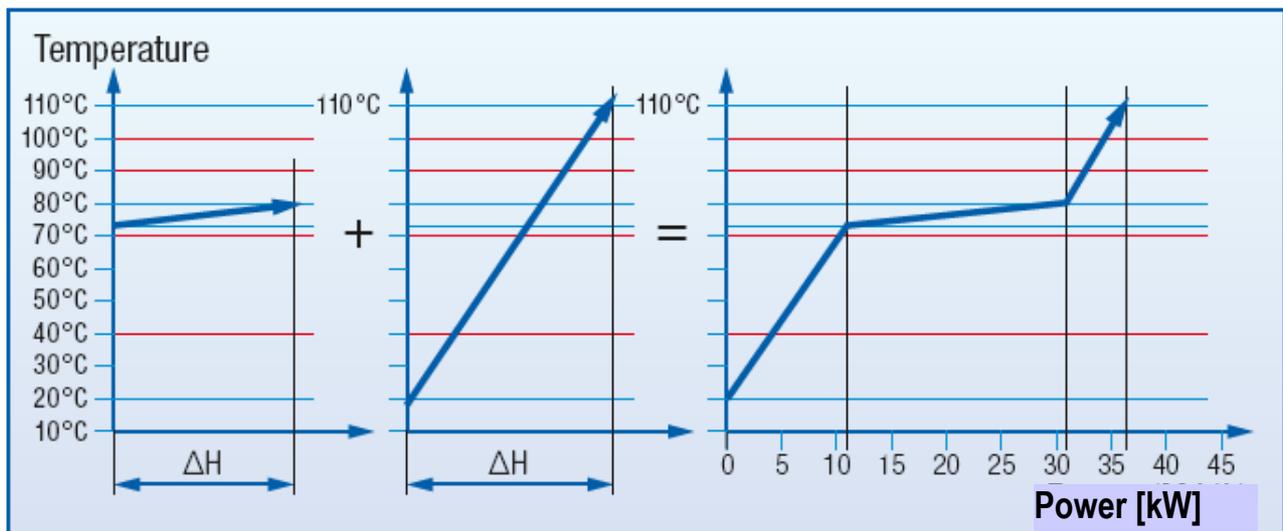


Figure 10. Combinaison thermodynamique des flux froids. La courbe composée est constituée en ajoutant les modifications d'enthalpie des flux individuels dans chaque intervalle de température.

Les flux chauds sont combinés de la même manière. Les deux courbes sont alors dessinées sur le même tracé, de sorte que les flux froids se trouvent à une température inférieure à celle des flux chauds sur tout le diagramme. Cela peut être réalisé en déplaçant les courbes le long de l'axe puissance (abscisse), car la différence d'enthalpie représente toujours une mesure relative et non absolue.

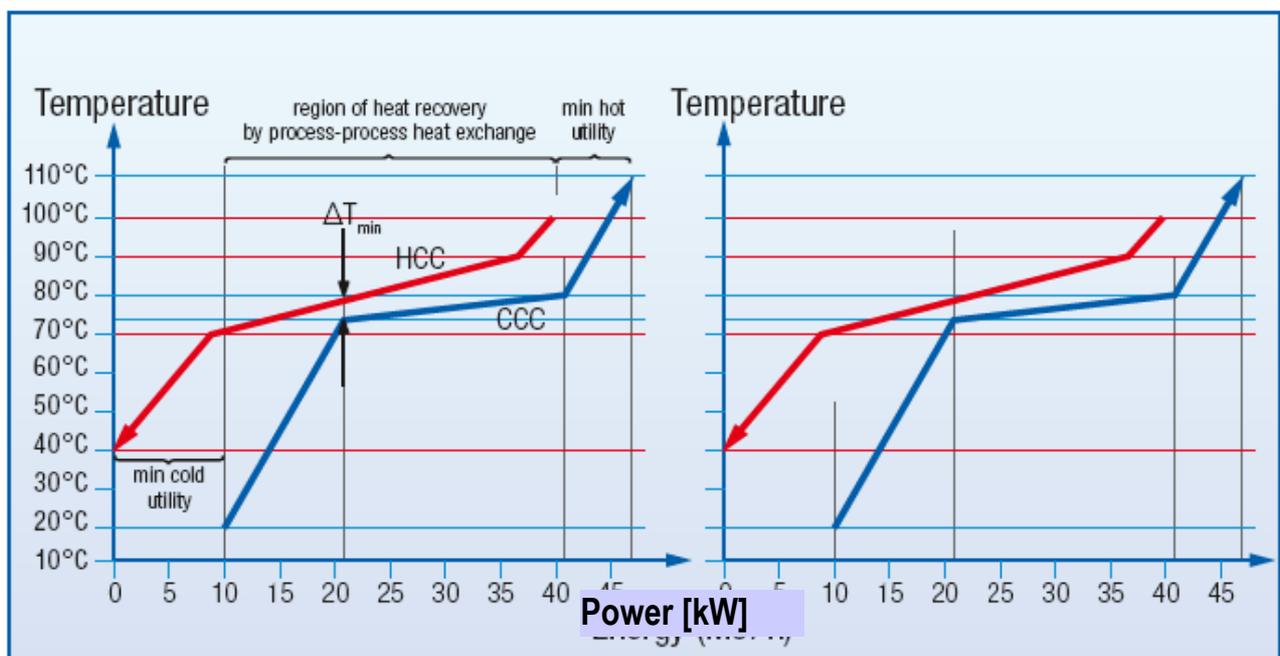


Figure 11. Représentation de l'association des courbes composées chaudes et froides.

A l'aide de ces courbes composées, il est possible de déterminer quelques faits essentiels concernant le processus. Les courbes sont séparées par un point de différence inférieure en température ΔT_{\min} , lequel est choisi par l'utilisateur comme la ΔT minimale sur un échangeur de chaleur potentiel dans le système. Cette ΔT_{\min} définit le niveau de température dans le système, lequel est le goulot thermodynamique (voir Figure 11) du processus, ce qu'on appelle le « pinch » (pincement).

La température de pincement coupe le système en deux valves : dans la zone située sous la température de pincement, il existe un surplus de chaleur qui doit être supprimé par refroidissement ou qui est dissipé dans l'air ambiant ; et au-dessus de la température de pincement, il existe une déficience énergétique qui doit être comblée en ajoutant de la chaleur. Ainsi, il existe trois règles importantes pour l'intégration de la chaleur :

X Aucun chauffage externe sous la température de pincement (la perte de chaleur est suffisante)

X Aucun refroidissement externe au-dessus de la température de pincement (le refroidissement peut être atteint en chauffant d'autres flux du processus)

X Aucun échange de chaleur dans le pincement : n'utilisez pas de source de chaleur (perte) au-dessus de la température de pincement (une amplitude de température avec un déficit en chaleur) pour chauffer un dissipateur sous la température de pincement (une amplitude de température qui comprend déjà un surplus de chaleur).

Le chevauchement des courbes dans la Figure 11 indique la récupération de chaleur du processus maximale. La demande en chaleur minimale $Q_{H, \min}$ et la demande de refroidissement minimale $Q_{C, \min}$ peuvent également être identifiées dans la figure. La différence minimale de température ΔT_{\min} est déterminée par l'optimisation économique, car une ΔT_{\min} inférieure augmente l'efficacité de l'échange de chaleur, mais aussi la chaleur des surfaces de l'échangeur de chaleur et, par conséquent, le coût. Les différences énergétiques types ΔT_{\min} des processus typiques dans les différents secteurs industriels sont indiquées Tableau 6.

Tableau 6. Valeurs ΔT_{\min} types pour les différents types de processus [Linhoff, mars 1998]

Secteur industriel	Valeurs ΔT_{\min} de l'expérience
Raffinage du pétrole	20 – 40 °C
Pétrochimie	10 – 20°C
Produit chimique	10 – 20 °C
Processus à température faible	3 – 5 °C

En pratique, les valeurs théoriques pour $Q_{C, \min}$ et $Q_{H, \min}$ sont rarement atteintes, en raison des difficultés de gestion des flux du processus pollués, corrosifs ou simplement hors de portée. Mais l'analyse Pinch donnera une bonne représentation de ce qui est thermodynamiquement possible.

Une autre manière de démontrer la demande de chaleur des processus dans un système est la grande courbe composée (GCC). Pour tracer la courbe GCC, la courbe composée chaude (HCC) et la courbe composée froide (CCC) sont déplacées d' $\frac{1}{2} \Delta T_{\min}$ l'une vers l'autre, pour qu'elles se touchent à l'endroit du pincement. La différence horizontale entre les deux courbes représente maintenant un nouveau graphique T-H qui donne alors la GCC. Il existe une autre manière de représenter un profil de source/dissipateur de chaleur d'un processus. Si le flux de chaleur augmente en même temps que la température, le processus agit comme dissipateur thermique (la température demande davantage d'énergie que celle qui lui est fournie). Si le flux de chaleur augmente alors que la température baisse, le processus peut agir comme source calorifique.

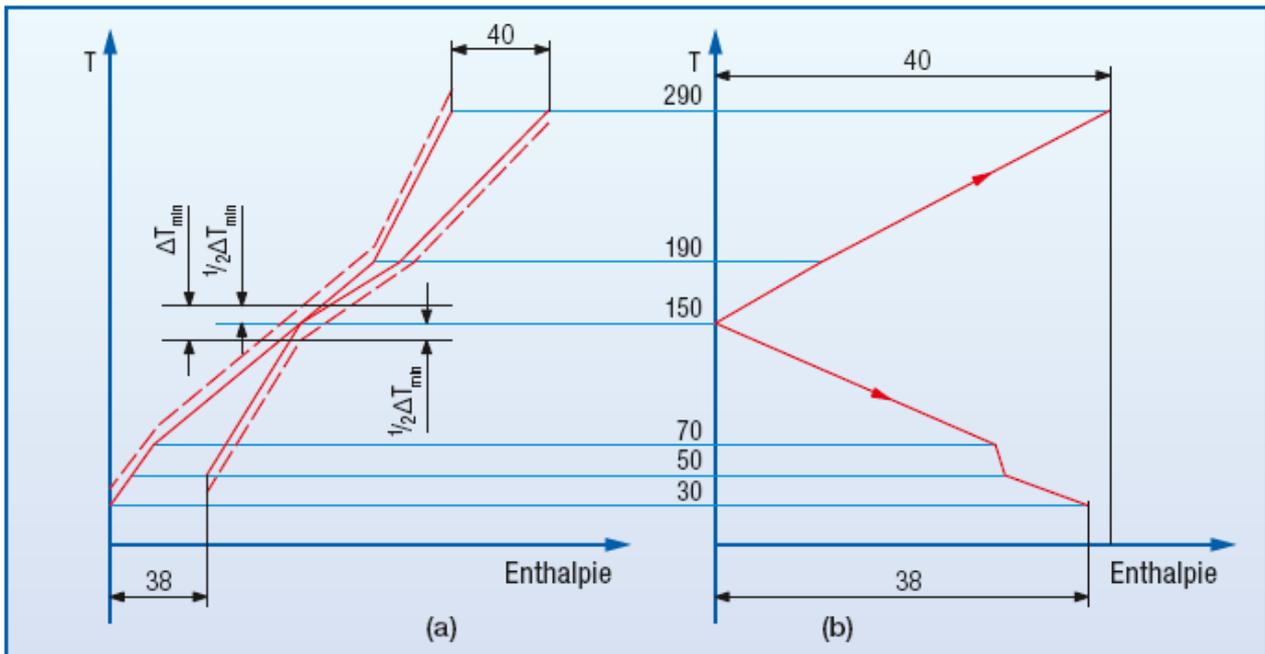


Figure 12: Chevauchement de HCC et de CCC (a) et tracé de la GCC (b).

Le principal objectif de la GCC est d'identifier les sources énergétiques externes idéales nécessaires pour chauffer ou refroidir différents flux. En analysant les sources de chaleur qui peuvent transférer de la chaleur vers les dissipateurs des processus, la demande calorifique restante est uniquement couverte par les sources énergétiques externes, si aucune chaleur dissipée n'est disponible. Nous pouvons également voir à quelle température la ressource externe doit être fournie (voir les Figures 13 et 14). Il est important de mentionner que la GCC est dépendante du choix de ΔT_{\min} .

2.5.2 Quelques exemples d'intégration de systèmes d'alimentation calorifique externes sur la grande courbe composée

Fourniture de chaleur

Pour plus d'efficacité, la fourniture de chaleur doit être placée au niveau de température le plus bas possible (voir Figure 13). Dans le cas représenté dans la Figure, 2 niveaux de température seraient idéals pour la fourniture de chaleur H1 et H2.

Machine de refroidissement

Une situation similaire existe pour la fourniture de froid, en ce qui concerne les niveaux de température idéale. L'énergie de refroidissement doit être intégrée à la température la plus haute possible. Les niveaux de température des unités de refroidissement doivent, par conséquent, être situés respectivement entre K1 et K2 (voir figure 13).

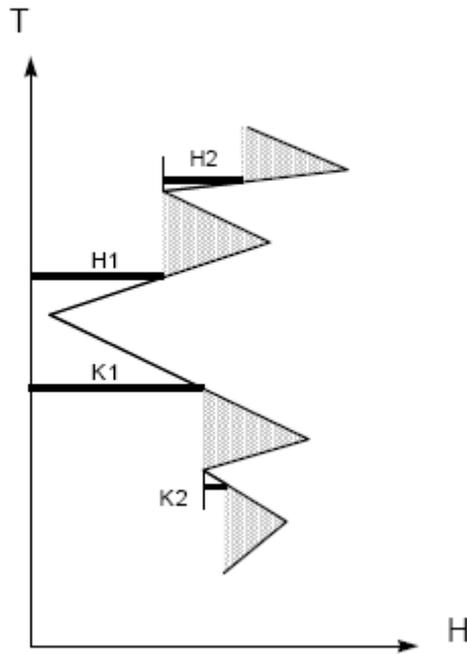


Figure 13: Intégration de la fourniture de chaleur et de froid (Source : Morand et al., 2006)

Pompe à chaleur

La grande courbe composée montre aussi les possibilités thermodynamiques idéales pour intégrer une pompe à chaleur. La région située sous la chaleur de pincement est disponible et peut servir de guide énergétique pour la pompe à chaleur. Le compresseur permet d'élever le niveau de température au-dessus de la température de pincement, où la demande énergétique est requise. Ainsi, comme indiqué plus précisément dans la section 3.7, le compresseur de la pompe à chaleur fonctionne sur le pincement. L'énergie électrique est ajoutée à la chaleur basse température et donne une chaleur haute température au-dessus du pincement. A partir de ces relations, les niveaux de température idéale pour la pompe à chaleur peuvent être identifiés (voir Figure 14). Une pompe à chaleur fonctionnant à des températures supérieures ne sera pas intégrée idéalement dans la centrale et fonctionnera avec un COP (coefficient de performance) inférieur et une demande électrique supérieure.

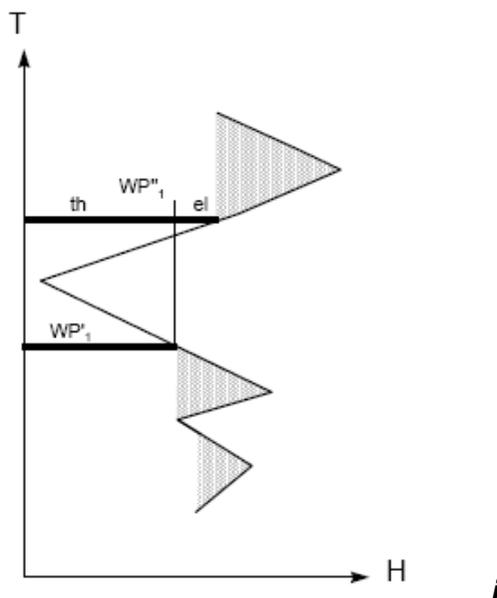


Figure 14 : Intégration des pompes à chaleur (Source : Morand et al., 2006).

2.5.3 Conception des échangeurs de chaleur

Dans l'analyse de pinch, le choix d' ΔT_{\min} est décisif pour la conception d'échangeurs de chaleur. Plus la ΔT_{\min} est basse, plus la température finale du flux froid peut s'approcher de la température de démarrage du flux chaud (assumant un échange de chaleur à contre-courant). L'image suivante devrait être plus explicite :

- ✗ Dans un échangeur de chaleur à contre-courant, la température finale du flux froid peut atteindre au maximum la température de démarrage du flux chaud moins ΔT_{\min} .
- ✗ Dans un échangeur de chaleur à contre-courant, la température finale du flux chaud peut atteindre au minimum la température de démarrage du flux froid plus ΔT_{\min} .

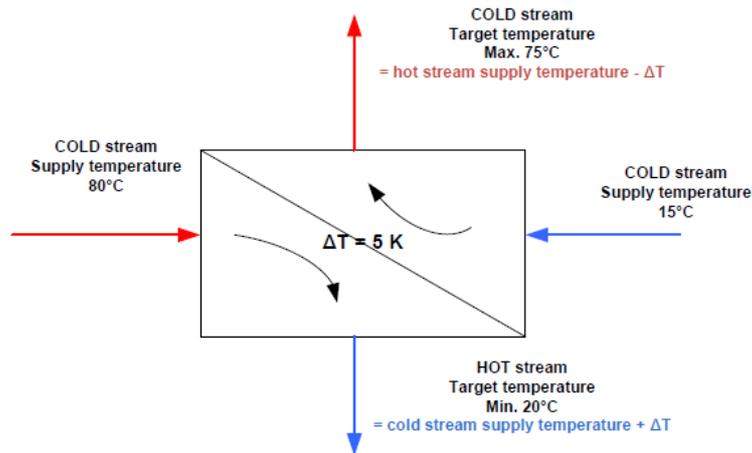


Figure 15 : Influence de ΔT_{\min} sur la conception de l'échangeur de chaleur.

Bien évidemment, la puissance échangée entre les flux chauds et froids doit être la même.

$$\dot{Q} = m_{hs} c_{p,hs} (T_{supply,hs} - T_{target,hs}) = m_{cs} c_{p,cs} (T_{target,cs} - T_{supply,cs}) \quad (2.18)$$

Supply (Alimentation) = Température de démarrage / Cible = Température de fin

Indice hs (flux chaud) : Flux chaud = source chaude

Indice cs (flux froid) : Flux froid = dissipateur de chaleur

La formule de base de calcul de la zone nécessaire pour l'échange de chaleur est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= UA \Delta T_m \\ A &= \text{heat transfer area} \\ \Delta T_m &= \text{temperature difference} \\ U &= \text{heat transfer coefficient} \end{aligned} \quad (2.19)$$

A= surface de transfert de chaleur
 ΔT_m = différence de température
 U= coefficient de transfert de chaleur

2.5.4 Influence de ΔT_{\min} sur l'analyse Pinch

Influence sur l'échange de chaleur (thermodynamique)

Comme expliqué ci-dessus, le choix de ΔT_{\min} est crucial pour la conception d'un réseau d'échangeur de chaleur. Plus la valeur ΔT_{\min} est basse, plus la température de fin d'un flux froid peut se rapprocher de la température de démarrage d'un flux chaud. Cela devient évident dans cet exemple simple : l'eau usée à 50°C peut chauffer l'eau fraîche à une température de $(50 - \Delta T_{\min})^\circ\text{C}$. Plus la ΔT_{\min} est basse, plus la température de l'eau fraîche peut se rapprocher de 50°C après l'échange de chaleur. (Cet exemple n'est, bien évidemment, valide que si le flux d'eau fraîche est inférieur ou égal à celui de l'eau usée.)

Il devient clair que le changement de ΔT_{\min} peut modifier considérablement la conception de l'échangeur de chaleur. Poursuivons avec l'exemple du chauffage de l'eau fraîche au moyen de l'eau usée : Si ΔT_{\min} est définie à 5°C, l'eau fraîche peut être chauffée à 45°C. Dans le cas d'une température cible de l'eau fraîche à 60°C, une autre source de chaleur mieux adaptée pour chauffer l'eau fraîche de 45°C à 60°C doit être ajoutée. Maintenant, si ΔT_{\min} est modifiée à 7°C, les critères du flux chaud changent, parce que l'eau fraîche doit être chauffée de 43°C à 60°C. Cela peut influencer considérablement sur la solution idéale en ce qui concerne le flux chaud susceptible de satisfaire cette demande en chauffage. C'est la raison pour laquelle un réseau mathématique d'échangeur de chaleur doit toujours être calculé depuis le début, si la valeur ΔT_{\min} est modifiée.

Influence sur la zone et sur le coût de l'échangeur de chaleur

Dans l'analyse Pinch, les graphiques des courbes composées chaudes et froides sont généralement affichées à partir d'une valeur générale ΔT_{\min} . Plus tard dans la phase de conception des échangeurs de chaleur, la valeur ΔT_{\min} sera définie selon les caractéristiques des flux. Un flux gazeux aura une valeur ΔT_{\min} supérieure à celle d'un flux liquide, car les liquides ont généralement de meilleurs coefficients de transfert de chaleur. Comme il a été décrit dans la section « Conception d'échangeurs de chaleur », la valeur spécifique ΔT_{\min} d'un échangeur de chaleur influence l'espace nécessaire pour l'échange de chaleur requis. Ainsi, les coûts d'investissement sont également affectés.

Généralement, pendant l'étape de conception finale de la zone des échangeurs de chaleur, ΔT_{\min} est défini comme un compromis entre les coûts d'investissement et les économies des coûts d'exploitation. Plus ΔT_{\min} est élevée, plus la surface de l'échangeur de chaleur et les coûts d'investissement sont réduits, et plus les économies d'énergie sont faibles (Figure 16).

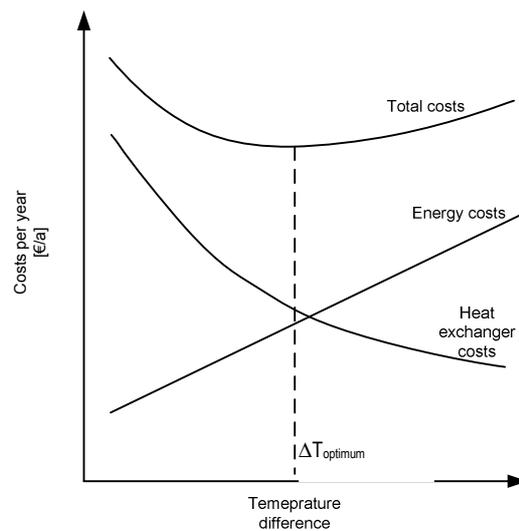


Figure 16 : Coûts totaux en fonction de ΔT_{\min}

2.6 Evaluation du coût total – TCA

L'évaluation du coût total est une méthode qui permet une analyse économique conventionnelle en fonction de paramètres micro-économiques, mais qui peut aussi être utilisée pour une analyse plus complexe, en prenant en compte des paramètres macro-économiques, pour une analyse économique sur une période plus longue, en prenant également en compte, par exemple, les questions de sécurité et d'environnement. Cela signifie qu'une TCA peut prendre en compte d'autres catégories de coût qu'une analyse de coût conventionnelle et peut intégrer des aspects macroéconomiques (comme des frais à long terme, lesquels deviennent décisifs dans le cycle de vie de l'investissement).

Une évaluation du coût total comprend ainsi les caractéristiques suivantes, par rapport à une analyse conventionnelle :

X Catégories de coût : En plus de tous les coûts pris en compte dans l'analyse conventionnelle et de tous les coûts indirects, les économies et les revenus sont pris en compte, comme les coûts qui découlent des pertes d'image, etc.

X Attribution du coût : Tous les coûts sont attribués exactement à l'investissement et non aux frais généraux.

X Période : La période de temps prise en compte dans une analyse de coût total est plus longue que dans les analyses conventionnelles, afin de prendre en compte les influences à long terme.

X Indicateurs : Dans la TCA, des indicateurs économiques sont utilisés, lesquels peuvent aussi démontrer la performance économique à long terme d'un investissement.

Il devient évident qu'une méthode destinée à une TCA peut tout aussi bien être utilisée pour une analyse conventionnelle, en modifiant quelques paramètres. C'est pourquoi EINSTEIN intègre une méthode qui est applicable à une analyse conventionnelle, mais qui peut être étendue pour prendre en compte des paramètres macroéconomiques, si nécessaire.

Dans EINSTEIN, les analyses économiques comparent généralement les coûts du processus existant (fourniture de chaud et de froid existant) avec l'investissement escompté et d'autres coûts du système de production d'énergie alternative proposé. En général, l'horizon du calcul économique est défini sur la durée de vie du projet (la durée de vie de l'équipement du système de production d'énergie). Toutefois, il peut être modifié selon les besoins.

Analyse de coût conventionnelle dans EINSTEIN (analyse microéconomique)

Le calcul économique est basé sur les coûts du système de production de chaleur et de froid existant devant être remplacé et ceux des nouvelles alternatives proposées. Les principales catégories de coûts comprennent l'investissement, les coûts énergétiques, les coûts d'exploitation et de maintenance, les éventualités et autres coûts ponctuels.

Les éventualités sont des coûts ou des revenus possibles qui produisent un effet sur l'analyse économique, comme l'augmentation des parts de marché, des avantages fiscaux, etc. Il existe également d'autres coûts non récurrents, qui surviennent une fois seulement dans la vie du projet, comme les coûts d'autorisation pour la réalisation de l'investissement.

Pour chaque proposition d'un nouveau système de production de chaleur ou de froid, la trésorerie sera calculée année par année pendant la durée de vie du projet, selon l'équation :

$$CF_t = \sum_{i=1}^n EX_i^t - \sum_{i=1}^n S_i^t \quad (2.20)$$

Où :

t = l'année du calcul

CF_t = la trésorerie au moment du calcul

n = le nombre de catégories de coût

EX = les dépenses nettes du projet, calculées à partir des coûts du processus proposé.

S = les économies que le projet permettra de réaliser, calculées à partir des coûts du processus actuel à remplacer.

Ensuite, la valeur actuelle nette du projet pendant la durée de vie du projet sera calculée à partir de l'équation suivante :

$$NPV_t = \sum_{i=0}^t \frac{CF_i}{(1+r)^i} \quad (2.21)$$

Où :

t = l'année du calcul

NPV_t = la valeur actuelle nette du projet pour l'année t

r = le taux d'intérêt réel du financement externe

L'un des paramètres économiques les plus importants de tout projet est le taux de retour interne (IRR). L'IRR est défini comme le taux de retour composé effectif annualisé pouvant être gagné sur le capital investi, et déterminé comme un [taux de remise](#) donnant une [valeur actuelle nette](#) de zéro dans une série de flux monétaires. Pour chaque proposition, le [taux de retour interne](#) (IRR) est calculé pour chaque année de la vie du projet après la période de remboursement :

$$\sum_{i=0}^t \frac{CF_i}{(1+IRR_t)^i} = 0 \quad (2.22)$$

Où :
t = l'année du calcul
IRR_t = le taux de retour interne de l'année t

Dans les calculs TCA EINSTEIN, le [taux de retour interne modifié](#) (MIRR) est utilisé afin de déterminer l'efficacité des différents choix alternatifs. Plus important que le paramètre IRR, le MIRR prend en compte le potentiel de réinvestissement de flux de trésorerie positifs immédiats. Pour chaque alternative, le MIRR est calculé pour chaque année de la vie du projet après la période de remboursement :

$$MIRR_t = q_t^{1/t} - 1 \quad (2.22a)$$

Où :
q = la valeur à l'année t des flux de trésorerie positifs, calculée selon le taux de réinvestissement (ici, nous avons le taux de remise spécifique de l'entreprise), divisée par la [valeur actuelle nette](#) des flux de trésorerie négatifs, calculés selon le taux financier (ici, nous avons le taux d'intérêt du financement externe) :

$$q_t = \frac{\sum_{i=0}^t CF_i^+ (1+d)^{t-i}}{-\sum_{j=0}^t CF_j^- (1+r)^j} \quad (2.22b)$$

Où :
CF⁺ = les flux de trésorerie positifs
CF⁻ = les flux de trésorerie négatifs
d = le taux de remise spécifique de l'entreprise (taux réel)
r = le taux d'intérêt réel du financement externe (taux réel)

Dans le module TCA de l'outil EINSTEIN, la période de remboursement (PBP) est également calculée pour chaque alternative. La période de remboursement se rapporte à la période de temps requise pour obtenir un retour sur investissement et « rembourser » le montant de l'investissement d'origine. Elle est calculée de la manière suivante :

$$\sum_{i=0}^{PBP} \frac{CF_i}{(1+r)^i} = 0 \quad (2.23)$$

Un autre paramètre est également pris en compte pour chaque alternative, le Ratio avantage/coût (BCR).

Approche alternative : le coût total annuel du système énergétique est calculé en fonction du montant énergétique dépensé pour les carburants et l'électricité, l'exploitation et la maintenance (O&M) et le remboursement annuel de l'investissement.

$$C_{Total} = C_{ed} + C_{fuel} + C_{O\&M} + aI_0 \quad (2.24)$$

Ici, l'annuité est obtenue ici comme une fraction de $a = A/I_0$ du paiement annuel (constant) A requis. Ainsi, après une période donnée, la totalité de la dette et des intérêts correspondants de l'investissement initial ont été remboursés⁸ :

$$\sum_{i=1}^N \frac{a}{(1+r)^i} = 1$$

(2.25)

Où les paramètres sont définis comme suit :

a: Annuité de l'investissement

N: Amortissement

Extension des paramètres macroéconomiques pour une TCA

Pour prendre en compte les aspects macroéconomiques, les catégories de coût, les coûts d'exploitation et de maintenance, les éventualités et autres coûts non récurrents peuvent être étendus, afin d'inclure tous les aspects macroéconomiques possibles.

La catégorie des coûts éventuels pour le nouveau système de production énergétique peut comprendre l'augmentation de la part de marché, grâce à des améliorations macroéconomiques de la région via une production plus durable. Les coûts non récurrents pour le système de production énergétique courant peuvent représenter des activités de prévention des dangers environnementaux susceptibles de survenir si la fourniture énergétique n'était pas modifiée, mais laissée telle quelle.

Point de vue microéconomique ou de l'entreprise vs. point de vue macroéconomique ou social

L'une des principales différences entre le *point de vue* macroéconomique ou *social* et le *point de vue* microéconomique ou *de l'entreprise* est la prise en compte (ou non) des subventions⁹ et des facteurs externes dans les calculs économiques :

✗ Alors que pour l'analyse avantages/coût de l'entreprise, *l'investissement net* (= investissement brut moins subvention) est le paramètre coût de l'investissement cohérent, d'un point de vue social, le coût d'investissement total (brut) doit être pris en compte, car les subventions *sont* un coût réel pour l'entreprise. Si l'investissement proposé n'était pas réalisé, le montant des subventions pourrait être dédié à d'autres économies d'énergie ou mesures de protection environnementale.

✗ D'autre part, le coût des facteurs externes (dangers écologiques, etc., voir ci-dessus) n'apparaissent pas dans un bilan d'entreprise, mais doivent être pris en compte dans un bilan social.

Voir Tableaux 7 et 8 pour une comparaison des différents points de vue pour optimisation.

Tableau 7. Paramètres de coût les plus cohérents dans l'analyse micro et macroéconomique.

	Analyse micro-économique (du point de vue de l'entreprise)	Analyse macro-économique (du point de vue de l'administration publique)
Investissement	Investissement net (investissement net moins les subventions/ financements)	Investissement brut (financement qui aurait pu être utilisé pour d'autres mesures de protection de l'environnement)
Coûts énergétiques	Coûts énergétiques comprenant l'augmentation prévue des coûts énergétiques	
Autres opérations et coûts de maintenance	Services, maintenance, main-d'œuvre, conformité légale, etc.	
Hypothèses	Ex. Impact positif sur la part de marché, économie des certificats d'émission de CO ₂ , etc.	
Coûts non récurrents	Economie des coûts de réparation qui auraient été supportés si l'on n'avait pas changé de système de production ; coûts administratifs (permis de construire)	

Tableau 8 : Indicateurs et objectifs les plus cohérents en fonction de l'optimisation dans l'analyse micro et macroéconomique.

	Analyse micro-économique (du point de vue de l'entreprise)	Analyse macro-économique (du point de vue de l'administration publique)
Principal objectif	Réduction du coût énergétique (coût annuel et annuité propre/investissement net)	Économie sur la consommation énergétique primaire
Indicateurs concernés	IRR / MIRR Durée du remboursement NPV BCR	Coût annuel du système énergétique supplémentaire par unité d'énergie primaire économisée. (IRR minimal requis en ENTREE)
Impact des contraintes économiques sur les critères d'optimisation	Economie absolue maximale vs. IRR/MIRR maximal	Économie d'énergie primaire absolue maximale vs. coût minimal absolu supplémentaire par unité d'énergie économisée.

Références Chapitre 2 :

R. Morand, R. Bendel, R. Brunner, H. Pfenninger (2006) : Prozessintegration mit der Pinchmethode, Handbuch zum BFE-Einführungskurs. Bundesamt für Energie, Bern, 2006.

Schnitzer H., Ferner H. (1990) : Optimierte Wärmeintegration in Industriebetrieben DBV Verlag, Graz, 1990.

3 Comment mettre en œuvre un audit énergétique EINSTEIN

L'audit d'énergie thermique EINSTEIN et la conception de systèmes énergétiques améliorés commencent en dehors de l'entreprise, avec quelques activités préliminaires rapides que vous pouvez lancer pendant vous êtes à votre bureau. La phase dite de « pré-audit » est très importante, car elle vous donne la possibilité d'améliorer vos connaissances sur le *statu quo* (c'est-à-dire le profil de demande énergétique actuel, les processus thermiques en exploitation, l'équipement utilisé, les factures énergétiques, etc.) et de vous préparer avant de vous rendre dans l'entreprise. Après un appel téléphonique préliminaire au client, vous devez envoyer à votre contact uniquement un questionnaire électronique pour la collecte de données. Lorsque celui-ci a été rempli, ce modèle peut être automatiquement importé dans un logiciel de calcul pour obtenir une première évaluation brute de la demande énergétique et sur les domaines d'amélioration potentielle.

Par conséquent, ce que vous avez la possibilité de faire dans la phase préliminaire est simple, rapide, mais fondamental, pour économiser du temps ensuite : préparer l'entreprise et vous-même pour l'audit énergétique sur site.

Cette seconde phase comprend deux étapes de mise en œuvre :

- X une visite sur site de l'entreprise
- X une analyse des résultats calculés grâce au logiciel Einstein.

L'objet de la visite dans l'entreprise est, principalement, d'acquérir des informations manquantes, grâce à des interviews et à des mesures directes ; d'inspecter les centrales et les programmes hydrauliques, etc. Grâce à l'évaluation préliminaire et à la définition des priorités d'audit, la visite sur site ne vous prendra que quelques heures.

Ensuite, vous rentrez chez vous et vous ouvrez simplement l'outil de calcul EINSTEIN. Il vous aidera à utiliser les informations rassemblées et à estimer les économies d'énergie et financières. Grâce à EINSTEIN, vous pourrez :

- X vérifier la cohérence et l'exhaustivité des données acquises
- X estimer (rappel) les chiffres qui vous manquent
- X élaborer une répartition détaillée de la consommation calorifique par procédé, niveaux de température, carburants, etc.
- X analyser la performance d'exploitation réelle de l'équipement existant
- X effectuer des comparaisons avec les références disponibles.

Une fois que vous avez une image claire des flux d'énergie réels et des inefficacités de l'entreprise, EINSTEIN vous aidera à la mise en œuvre de la troisième phase de cette procédure d'audit : la conception et l'évaluation des alternatives énergétiques efficaces. Cette tâche consiste à comparer les différentes options, grâce aux étapes suivantes :

- X conception préliminaire des mesures totales d'économies financières et énergétiques et définition des objectifs énergétiques ;
- X calcul de la performance énergétique et analyse de l'impact environnemental des solutions faisables ;
- X analyse des aspects économiques et financiers.

Au final, vous aurez sur votre portable toutes les informations requises pour réaliser une présentation claire et efficace des résultats de votre étude. Le rapport avec EINSTEIN (la quatrième phase de l'audit) est simple pour vous et convaincant pour le client.

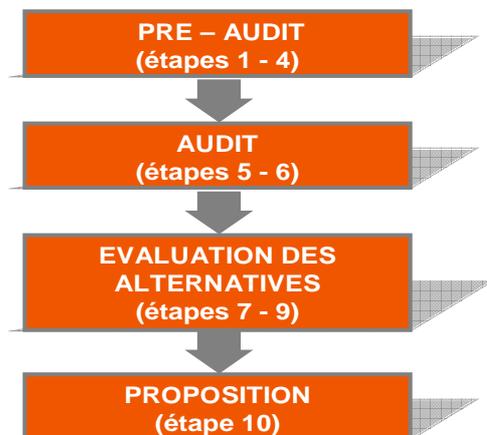


Figure 17. Phases d'un audit énergétique EINSTEIN.

Les quatre phases d'un audit énergétique EINSTEIN peuvent être sous-divisées en 10 étapes d'audit EINSTEIN, indiquées dans la Figure 18. Chacune de ces étapes d'audit est décrite en détail dans les sections suivantes. Pour chaque étape d'audit, vous trouverez les différentes tâches qui la composent, les indications sur la manière de réaliser chacune de ces tâches et les outils de la boîte à outils EINSTEIN que vous pouvez utiliser. Pour des instructions plus détaillées sur l'utilisation du logiciel EINSTEIN, veuillez consulter le [Manuel Utilisateur du Logiciel EINSTEIN](#).

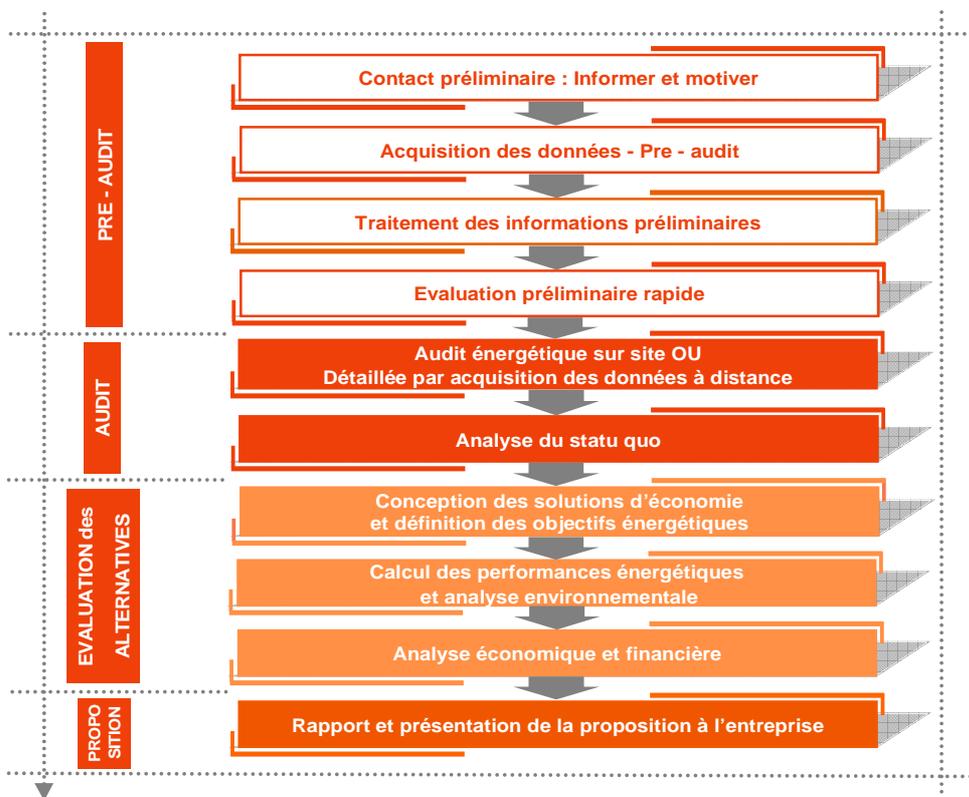


Figure 18. Dix étapes d' EINSTEIN vers l'efficacité énergétique.

3.1 Contacts préliminaires : motiver

3.1.1 Contact initial

L'objet du premier contact est d'éveiller l'intérêt du client, de donner quelques informations à l'avance et de prendre rendez-vous.

L'un des meilleurs moyens pour cela, ce sont les contacts personnels que vous possédez déjà. Vous connaissez probablement déjà des entreprises qui souhaitent améliorer leur système thermique ou agrandir, restructurer ou changer leur installation.

En outre, vous pouvez mentionner EINSTEIN dans des présentations au public ou dans des discussions, distribuer la brochure EINSTEIN et gagner quelques nouveaux contacts lors de foires, formations auxquelles vous participez ou événements sur les économies d'énergie dans le secteur. Vous pouvez également entrer en contact avec des associations locales du secteur ou avec la Chambre de commerce, si elles sont intéressées à soutenir votre travail (par exemple, en publiant un article dans leur lettre d'information, en envoyant votre offre à leurs entreprises membres...)

Vous devriez envoyer de la documentation à vos contacts ou aux responsables énergétiques d'un groupe de sociétés identifiées (par exemple aux secteurs : industries alimentaires, métallurgie, chimique, papier, bois, textile, etc.). Et l'Audit EINSTEIN sera un nouveau produit pour votre entreprise de conseil que vous pouvez proposer à vos clients réguliers.

Ces informations doivent comprendre les principaux aspects d'EINSTEIN (comme indiqué dans la brochure EINSTEIN, avec, par exemple, quelques statistiques sur les coûts énergétiques), mais aussi la possibilité d'une assistance financière que vous pouvez probablement proposer, par exemple grâce au soutien financier d'institutions publiques, de la Chambre de commerce, etc.

Après une ou deux semaines, vous devriez contacter par téléphone la personne à laquelle vous avez envoyé les informations. Votre objectif est de persuader l'entreprise de poursuivre et de vous envoyer les premières données, afin que vous puissiez vérifier si cette entreprise est un candidat possible pour un audit EINSTEIN. Vous devez aussi essayer d'obtenir un rendez-vous personnel dans l'entreprise et/ou l'accord de remplir le questionnaire basique.

Vérifiez d'abord si votre contact est la bonne personne. Cela peut également être fait à l'avance, en collectant des informations sur internet, ou dans des rapports d'activité ou environnementaux, des articles de presse, etc. Vous devez connaître la fonction, le nom, le titre, le numéro de téléphone du contact et les produits et taille du site industriel avant d'appeler la personne concernée.

Vous devez définir les premières phrases, les avantages et réfléchir aux réponses à apporter aux objections comme : « Je n'ai pas le temps, je ne suis pas intéressé, envoyez-nous des informations... ».

3.1.2 Rendez-vous préliminaire (en option)

Si l'entreprise est assez proche de votre bureau, vous pouvez envisager une visite préliminaire pour obtenir les coordonnées du contact et présenter votre entreprise et l'instrument EINSTEIN. Sinon, vous devrez avoir une conversation téléphonique plus approfondie. Pour le rendez-vous, vérifiez que les personnes concernées sont présentes (par exemple le responsable de site, le responsable de la chaudière, le technicien en chef, etc.) Vous pouvez également envoyer le questionnaire basique à l'avance. (Pour plus d'informations, consultez la section 3.2.)

Généralement, pour le premier rendez-vous, vous devez collecter autant d'informations que possible depuis internet. Vous devez également essayer de comprendre qui est le client, et ce qu'il/elle attend (par exemple, ils ont des problèmes techniques, les dépenses énergétiques sont trop élevées, répondre à des exigences légales de l'entreprise, se distinguer...). Puis vous pouvez définir les principaux avantages et votre objectif de réunion : lancez l'audit EINSTEIN, faites une rapide visite de l'usine.

Pour cette première réunion, vous devez demander au client s'il/elle souhaite commencer par sa présentation de l'entreprise ou si vous devez présenter votre propre entreprise. Puis vous devez demander au client quelle est la situation spécifique, ses souhaits, ses problèmes et ses attentes. Vous pouvez discuter des problèmes que vous connaissez déjà ou demander par exemple : « Est-ce que les coûts énergétiques ont augmenté, et pourquoi ? Existe-t-il des problèmes techniques ou organisationnels avec le

système thermique, par exemple, avec les pouvoirs publics ou les voisins ou les services publics ? Qui est responsable de la maintenance ? Quel est l'âge de la chaudière ? Existe-t-il des contraintes de temps, de budget, de savoir-faire ? Existe-t-il des projets pour l'avenir ? Qui sera responsable d'un projet potentiel ? »

Pour la présentation de l'outil EINSTEIN, vous pouvez utiliser la présentation EINSTEIN, la brochure promotionnelle EINSTEIN et la brochure technique EINSTEIN (comprises dans la boîte à outils EINSTEIN), mais aussi quelques résultats de l'étude rapide, s'ils sont déjà disponibles.

Quelques conseils généraux :

✗ Lancez la conversation avec quelques informations que vous obtiendrez du site internet ou dites « Page internet très intéressante, qui en est responsable ?... »

✗ Ne répondez jamais directement à une objection, mais demandez si vous l'avez comprise, notez-la et réfléchissez-y. Essayez de définir d'autres avantages principaux.

✗ Essayez de poser des questions ouvertes, afin d'obtenir autant d'informations que possible.

✗ Ne parlez pas trop. Présentez simplement des informations précises et concises sur les principaux avantages que l'entreprise peut obtenir.

EINSTEIN Etape 1 : Contacts préliminaires. Informer et motiver

> Matériel promotionnel

> Auto-évaluation possible

3.2 Acquisition des données de pré-audit

Avant de commencer un audit énergétique dans un secteur (ce qui requiert généralement un contrat entre l'entreprise et l'auditeur), il est très utile de rassembler quelques informations préliminaires. Ces informations peuvent aider à décider s'il est utile ou non de poursuivre le processus d'audit.

Vous préparerez l'utilisateur aux données que vous lui demanderez avant la visite ou un entretien téléphonique détaillé. Cela permet de gagner du temps pour l'entreprise utilisatrice et l'auditeur. De plus, de cette manière, il est plus facile d'obtenir des données détaillées et complètes.

Dans ce nombreux cas, l'acquisition des données à distance peut être suffisante pour réaliser une évaluation rapide et générer quelques idées de mesures d'économie d'énergie possibles.

3.2.1 Préparation de l'entreprise utilisatrice

Afin de préparer l'entreprise utilisatrice, informez-les du type de données requis, afin qu'ils puissent collecter les informations nécessaires. Une check-list des données les plus importantes est fournie :

X Situation générale de l'entreprise :

- situation économique (passée et présente)
- prospects futurs (évolution du volume de production prévu, autres modifications importantes ou projets).

X Factures d'électricité et de carburant :

- obtenir une présentation quantitative de la consommation d'énergie actuelle et des coûts
- données historiques des années précédentes, si disponibles
- données mensuelles, si disponibles, ou informations qualitatives sur la saisonnalité de la demande.

X Description du processus de production (schéma dynamique) :

- quelles sont les lignes de production qui existent dans l'entreprise
- quels sont les flux de produit et les différentes étapes de traitement.

X Description des différents processus :

- quels sont les processus qui consomment de la chaleur et du froid
- quelles sont les quantités de produit traitées
- quels sont les niveaux de température utilisés (dans l'alimentation en chaleur, dans le processus même)
- combien de fois le processus est-il exploité et pendant combien de temps.

X Description du système d'approvisionnement en chaleur et en froid

- données techniques de l'équipement (chaudière, refroidisseur, etc.)
- niveaux de pression et de température dans la distribution de chaleur et dans les processus

X Description des bâtiments, des halls de production et des boutiques :

- données sur la consommation pour le chauffage et le refroidissement de l'espace si disponible
- superficie, occupation.

Cette check-list de pré-audit est également disponible dans la boîte à outils EINSTEIN et peut être envoyée à l'entreprise. Si vous choisissez de réaliser une visite préliminaire, vous pouvez l'utiliser pour noter les informations qui sont déjà disponibles, parmi celles figurant ci-dessus. Une brève visite peut également être utile pendant cette étape.

3.2.2 Préparation de l'auditeur

Généralement, l'auditeur énergétique EINSTEIN est un expert en systèmes énergétiques (fourniture de froid et de chaud), mais il ne peut pas être un expert dans tous les secteurs industriels qu'il/elle rencontrera.

Néanmoins, il est important d'obtenir des informations de base sur les problèmes spécifiques du secteur, au mieux avant de contacter l'entreprise, et au moins avant la première visite.

Une grande quantité d'informations est disponible pour la plupart des secteurs et sous-secteurs industriels, mais dans de nombreux cas, l'accès aux bonnes informations est difficile et prend du temps.

La boîte à outils EINSTEIN vous aide en fournissant des liens utiles pour un accès rapide et simple à des informations de base dans la plupart des secteurs, que vous pourrez ensuite approfondir selon le temps disponible et les besoins spécifiques. Vous trouverez également un grand nombre de liens internet et de références bibliographiques dans la documentation supplémentaire.

L'auditeur doit rassembler les informations de base dans les sujets suivants :

X Quels sont les processus les plus concernés en matière de consommation énergétique dans une entreprise type de ce secteur industriel spécifique ou dans ce type de bâtiment ?

X Quelles sont les options existantes pour les technologies du processus (meilleures technologies disponibles – BAT) et ses principaux avantages et inconvénients ?

3.2.3 Check-list et questionnaire basique pour l'acquisition des données à distance

La méthodologie d'audit EINSTEIN utilise une check-list (voir la section 3.2.1) et/ou un questionnaire de base pour l'acquisition de données qui, ultérieurement, peuvent être complétées avec des informations plus détaillées (« annexes détaillées »). Cette check-list et ce questionnaire peuvent être envoyés à l'entreprise, ainsi qu'un texte explicatif, afin qu'un technicien de l'entreprise puisse le remplir avec les données. Le questionnaire est disponible au format imprimable et électronique (voir Annexes).

Il est important de prendre en compte qu'une première évaluation rapide peut être réalisée de manière semi-automatique, avec très peu de données. Toutefois, en règle générale, la fiabilité de l'analyse et les recommandations correspondantes s'amélioreront avec l'exhaustivité des données.

En alimentant l'outil EINSTEIN avec des données incomplètes, celui-ci tentera d'estimer les paramètres manquants dans la mesure du possible, effectuera les calculs possibles avec les informations disponibles et générera une check-list avec les données supplémentaires les plus importantes, qui doivent être obtenues par l'auditeur (voir la description du menu « contrôle de cohérence » dans le manuel utilisateur).

EINSTEIN Etape 2 : acquisition des données de pré-audit

> **préparer l'entreprise**

> **se préparer**

> **recueillir les données de base à distance**

3.3 Préparation de l'audit : Traitement des informations préliminaires

3.3.1 Traitement des données de pré-audit

Une simple pré-vérification des données fournies par l'industrie peut être réalisée à l'aide du logiciel EINSTEIN. Une fois que les données disponibles ont été saisies, les statistiques de besoin et de fourniture

énergétiques sont automatiquement créées, les informations disponibles sont évaluées et la cohérence des données est contrôlée.

A cette étape de premier traitement des données de pré-audit, les informations suivantes peuvent être obtenues :

- X une liste d'incohérences graves en ce qui concerne les données (par exemple, la consommation d'un type de carburant est spécifiée, alors qu'il n'est pas utilisé dans les équipements...)

- X une liste des données nécessaires qui sont manquantes et ne peuvent pas être calculées ni estimées à partir d'autres informations disponibles.

3.3.2 Compléter les informations lors d'interviews téléphoniques ou par e-mail

Si, pendant le traitement des données de pré-audit, des incohérences graves ont été détectées ou s'il manque des données très basiques indispensables, même pour une première évaluation, contactez par e-mail ou par téléphone l'entreprise pour obtenir quelques données supplémentaires ou pour clarifier des doutes.

Après avoir modifié les données de base, le contrôle de cohérence (section précédente) doit être répété.

Après cette étape, les informations suivantes doivent, au minimum, être disponibles :

- X les principaux produits et les quantités produites doivent être identifiés
- X le montant de la consommation énergétique totale dans l'entreprise pour les utilisations thermiques
- X les principaux processus consommant du chaud et du froid doivent être identifiés et, au minimum, une estimation de la consommation énergétique de chacun d'eux doit être disponible
- X le principal équipement de fourniture de chaud et de froid doit être identifié et, au minimum, la puissance nominale doit être disponible ; une brève présentation du système de distribution du chaud et du froid doit être faite (quelle chaudière alimente quel processus, etc.)
- X les niveaux de température de la fourniture de chaleur et dans les principaux processus de consommation doivent être connus.

3.3.3 Acquisition des données de référence

A cette étape, nous disposons déjà de quelques informations détaillées sur l'industrie, sur les processus qu'elle utilise et sur les produits. Nous pouvons obtenir des valeurs de référence d'autres industries similaires (références).

Les sources d'information, pour ce faire, sont les suivantes :

- X le logiciel EINSTEIN contient une base de données de référence qui vous aide à trouver rapidement des valeurs de référence pour de nombreux secteurs industriels.

- X de plus amples informations peuvent être obtenues dans les documents référencés dans le rapport EINSTEIN sur les pratiques et les outils d'audit d'énergie thermique [Vannoni et al., 2008].

Pour plus d'informations sur le Benchmarking, voir section 3.6.5.

Références du chapitre 3.3.3 :

C.Vannoni et al. (2008): EINSTEIN Report: Review of Thermal Energy Auditing Practices and Tools. IEE Project EINSTEIN, Project deliverable D2.2. Disponible au téléchargement sur www.einstein-energy.net

3.3.4 Acquisition de connaissances de base sur le secteur industriel spécifique ou le type d'entreprise

Avec les informations dont vous disposez maintenant sur le secteur industriel spécifique ou sur le type d'entreprise, vous pouvez approfondir vos connaissances sur les types spécifiques de processus et les machines que vous trouverez pendant l'audit, comme décrit antérieurement dans la section 3.2.2.

✗ Obtenez des informations sur la machinerie spécifique utilisée et les alternatives technologiques possibles

✗ Obtenez des informations sur l'équipement de production spécifique utilisée et les alternatives technologiques possibles

3.3.5 Identification des mesures possibles

Avec les informations dont vous disposez déjà sur l'entreprise, vous pouvez probablement réaliser un cycle d'audit complet à partir de l'acquisition des données, afin de générer une proposition.

Même si les données sont toujours très incomplètes et si les résultats que vous attendez ne sont pas très précis, vous devez effectuer cette opération, afin d'obtenir une première idée de l'ampleur des économies possibles, de l'importance approximative de l'investissement possible nécessaire, etc. Cela peut être très utile pour une première discussion avec l'entreprise pendant l'audit.

Cela prend peu de temps, car le logiciel EINSTEIN peut le faire (presque) automatiquement seul.

Lorsque vous réfléchissez aux améliorations possibles, vous devez également consulter la documentation disponible sur les meilleures technologies disponibles (BAT) pour les secteurs et les problèmes spécifiques. La boîte à outils EINSTEIN vous aide à accéder facilement aux informations disponibles.

3.3.6 Liste des priorités pour une recherche supplémentaire et l'acquisition de données

Si vous souhaitez réaliser un audit rapide, vous devez vous concentrer sur l'essentiel. Si vous souhaitez effectuer un audit de haute qualité, n'oubliez pas les données importantes. Dans certains cas, il peut y avoir un conflit entre deux objectifs. Ainsi, une fois que vous avez à l'esprit ce que vous souhaitez probablement proposer à l'entreprise, vous devez établir une liste de priorités en ce qui concerne les informations dont vous avez besoin en premier pendant l'audit, et les points sur lesquels vous devez insister, même si l'accès aux informations peut être difficile.

Après l'audit, vous devez disposer de toutes les informations nécessaires pour évaluer la faisabilité des technologies et des solutions que vous pourriez proposer (ou exclure), et vous devez éviter de collecter des données inutiles, en particulier si leur accès est difficile. Par exemple, si vous souhaitez proposer un système thermique solaire pour la production de chaleur, vous devez obtenir toutes les informations nécessaires pour l'évaluation de cette technologie, à savoir les surfaces disponibles au sol et sur les toits, les problèmes possibles d'ombrage, les détails structurels du toit, etc. ; et si la solution probable est un échangeur de chaleur pour améliorer la récupération de chaleur de certains processus, ce n'est probablement pas la meilleure stratégie d'ennuyer l'entreprise avec les plans d'architecte du toit... ; de même, il n'est pas nécessaire de demander de nombreux détails techniques sur un processus qui ne consomme que 0,3 % du besoin énergétique total.

EINSTEIN Etape 3 : Préparation de l'audit. Mettre en place les informations préliminaires

> Données de processus d'audit

> Appeler l'entreprise pour vérifier les données

> comparer avec les données du benchmark

> apprendre les processus/entreprises spécifiques

> identifier les mesures possibles

> Fixer les priorités pour l'audit

3.4 Préévaluation rapide

A la suite du traitement des informations préliminaires, un premier rapport de préévaluation rapide peut être généré. Ce rapport doit fournir des informations sur :

- × L'identification des processus consommant le plus de chaleur et de froid et la quantification approximative de consommation énergétique.
- × Une première analyse des besoins en chaleur et en froid par niveaux de température et par période ; les courbes de demandes de chaleur cumulées.

- × Et à partir de cette analyse des besoins en chaleur et en froid :
- × L'identification des options technologiques possibles pour un approvisionnement efficace en chaleur et en froid
- × L'importance de l'équipement requis
- × L'estimation des performances énergétiques et économiques à attendre.

Cette première ébauche de « *ce qui est réalisable* » dans l'industrie peut aider l'auditeur et l'entreprise utilisatrice à se concentrer sur les informations spécifiques requises pour évaluer les options technologiques les plus prometteuses.

3.4.1 Comment créer un rapport « rapide » de préévaluation ?

Le rapport « rapide » de préévaluation EINSTEIN peut être généré automatiquement en utilisant la fonction « rapport » du logiciel EINSTEIN.

Les estimations économiques pour les conceptions de système proposées qui sont données par le logiciel EINSTEIN ne sont correctes que si les données sur les coûts de l'équipement et des sous-systèmes ont été saisies précédemment dans les bases de données correspondantes. Ces données peuvent varier fortement selon les conditions locales et nationales, et les valeurs par défaut données doivent être interprétées uniquement en tant que chiffres informatifs.

3.4.2 Ne promettez pas trop au début !

Comme mentionné précédemment, dans certains cas, la présentation d'un premier rapport de préévaluation à l'entreprise peut être très utile pour les informer des options possibles et des étapes futures nécessaires à parcourir. Les chiffres estimatifs de la préévaluation peuvent aider le personnel technique ou les directives locales à convaincre la direction de l'entreprise à poursuivre l'audit et à approfondir l'analyse ou même à demander un financement.

Néanmoins, veillez à ne pas présenter trop d'informations détaillées (en particulier de données économiques) qui n'ont pas encore une base solide. Dans tous les cas, vous devez informer explicitement l'entreprise que les chiffres présentés sont uniquement un ordre d'idée qui peut beaucoup changer avec une analyse plus détaillée.

EINSTEIN Etape 4 : "rapport de pré-évaluation "rapide et sommaire"

> créer un rapport de pré-évaluation

> en option : présentation à l'entreprise

3.5 Visite sur site (ou sinon : seconde acquisition de données à distance)

3.5.1 Optionnel : Présenter et discuter de l'étude rapide

Si vous avez décidé de présenter à l'entreprise quelques résultats préliminaires de votre première étude rapide, il est peut-être temps de commencer à convenir d'une visite. Vous pouvez résumer les résultats que vous avez rassemblés à distance et expliquer vos conclusions préliminaires à l'entreprise.

3.5.2 Entretien et visite du site pour collecter des données détaillées

3.5.2.1 Collecte des données dans le bureau

Lorsque vous arrivez dans une entreprise, la première étape doit toujours être de vous asseoir dans le bureau, de vous présenter, de présenter ce que vous pouvez apporter à l'entreprise et de collecter des informations de base. Si possible, demandez à ce que quelques personnes du technique, qui connaissent les détails techniques des processus et des équipements de l'entreprise, soient présentes pendant cette première réunion.

Vous pouvez utiliser la structure du questionnaire basique d'EINSTEIN ou la check-list de données d'EINSTEIN (vous devez apporter une copie papier avec vous, éventuellement préremplie avec les informations rassemblées lors des étapes précédentes), afin de structurer l'entretien, en demandant les informations suivantes :

- * *Informations générales* sur l'entreprise : Ce qu'ils produisent et en quelle quantité ; décrire le processus de production ; quels sont les chiffres généraux (chiffre d'affaires, consommation énergétique, nombre d'employés) ; quels sont horaires de travail et les périodes de vacances, etc. Dans ce contexte, il est également important d'obtenir des informations sur les futurs prospects de l'entreprise : les projets d'expansion possibles qui peuvent complètement changer les données, ou au contraire, le risque de fermeture de certaines chaînes de production ou de toute l'usine à cause de la concurrence.
- * *Factures d'électricité et de carburant et tarifs énergétiques* : Essayez d'obtenir des informations sur plusieurs années, et si des informations détaillées sont déjà disponibles, quelle part de la consommation correspond à quel équipement / processus / chaîne de production.
- * *Données sur les processus* : Comme dans de nombreuses industries, seule la consommation énergétique globale est connue, et aucune répartition sur les différents processus ne l'est. Et les informations détaillées sur les processus sont souvent la seule manière de déterminer la distribution du besoin en chaleur (les moyens permettant généralement d'obtenir ces informations sont indiqués Figure 19). Il est important que vous compreniez globalement comment fonctionnent certains processus ; quels sont les calendriers de production et la température des processus.

De plus, il est souhaitable de rassembler des informations supplémentaires sur les différents composants qui participent au besoin en chaleur du processus :

- admission et sortie des liquides : Volume ou masse et niveaux de température (admission / sortie).
- masse ou volume à chauffer (ou refroidir) au début d'un processus, nombre de cycles ou de pauses et température initiale à partir de laquelle l'équipement doit être chauffé (ou refroidi).
- pertes thermiques de l'équipement du processus en fonctionnement : la puissance requise pour maintenir le processus à une température donnée. Cela peut comprendre la puissance requise pour la compensation des pertes thermiques, le besoin en puissance pour la phase de changement des fluides de travail (ébullition, séchage) ou les besoins en puissance pour les réactions chimiques. Il s'agit souvent de la partie la plus difficile à finaliser, car par exemple, généralement, aucun coefficient de perte thermique de l'équipement du processus n'est connu. Vous pouvez obtenir quelques informations qui vous permettront de réaliser quelques calculs. Par exemple, si vous savez que l'équipement après une période Δt (ex. pendant la nuit) refroidit par rapport à la température du processus T_P jusqu'à une certaine température T' , vous pouvez estimer le coefficient de perte thermique correspondant ; ou si vous connaissez la taille approximative de l'équipement et l'épaisseur de l'isolant, vous pouvez essayer de le calculer ; dans des processus secs, la différence d'humidité contenue dans un produit sec et un produit humide vous donne une idée de la quantité que vous devez imputer à l'évaporation, etc.

Le logiciel EINSTEIN vous apporte quelques outils vous permettant de réaliser ce type de calculs auxiliaires pour les cas les plus fréquents.

- * *Données sur l'équipement de fourniture de chaleur et de froid* : Effectuez un inventaire de l'équipement existant et des données techniques les plus importantes (y compris l'âge et l'état de conservation, afin de décider s'il est judicieux de suggérer une substitution) ; essayez d'obtenir au moins des informations indicatives, pas uniquement pour la puissance nominale, mais aussi sur l'énergie (froid ou chaud) produite par cet équipement (heures d'exploitation, facteur de charge),

même s'il s'agit de quelque chose de très qualitatif, comme « Nous l'utilisons que quelques heures par an ; est principalement utilisé en secours » ou « Les deux chaudières fonctionnent pratiquement toujours à pleine charge et parfois, nous sommes à court de vapeur... » ; et n'oubliez pas de réaliser un schéma clair montrant quel équipement fournit de la chaleur ou du froid pour quel processus.

- * *Données sur l'équipement de distribution et de stockage de chaleur et de froid* : Longueur et diamètre des conduits et tuyaux ; niveaux de température et de pression et débits – chaque fois que vous pouvez obtenir des informations supplémentaires, cela peut vous aider à obtenir une image plus précise de la consommation de l'usine ; identifiez le stockage de chaleur lorsqu'il existe (volume, niveaux de température et de pression, isolation).
- * *Systèmes de récupération de chaleur existants* : Identifiez les échangeurs de chaleur existants pour la récupération de chaleur. Cela inclut les données techniques et les conditions d'exploitation réelles (type) (débit et température du côté chaud et du côté froid).
- * *Energies renouvelables* : Identifiez les zones disponibles (surfaces au sol ou sur le toit) pour une utilisation possible de l'énergie thermique solaire (taille, orientation, capacité statique du toit, distance par rapport à la salle des machines et/ou des processus) ; évaluez la disponibilité de la biomasse ou du biogaz (la biomasse résiduelle issue de la production même ou issue d'autres fournisseurs voisins) ; existe-t-il une motivation pour l'utilisation des énergies renouvelables en plus des possibles économies financières (par exemple contribution à la protection de l'environnement, aspects marketing...) ?
- * *Besoin en chaleur et en refroidissement du bâtiment* : Dans certaines entreprises, le besoin en chaleur et en refroidissement des bâtiments peut représenter une partie importante du besoin total ; effectuez un inventaire des bâtiments existants, du système de chauffage et d'air conditionné utilisé ; les niveaux de température et les périodes d'utilisation, etc. ; demandez des croquis des bâtiments lorsque cela est possible.
- * *Paramètres économiques et financiers* : Quels sont les coûts O&M de l'entreprise (en plus des factures énergétiques) ? Comment les systèmes d'approvisionnement énergétiques (en externe ou en interne) sont-ils financés ? Quelles sont les exigences concernant le remboursement ou les taux de retour ?

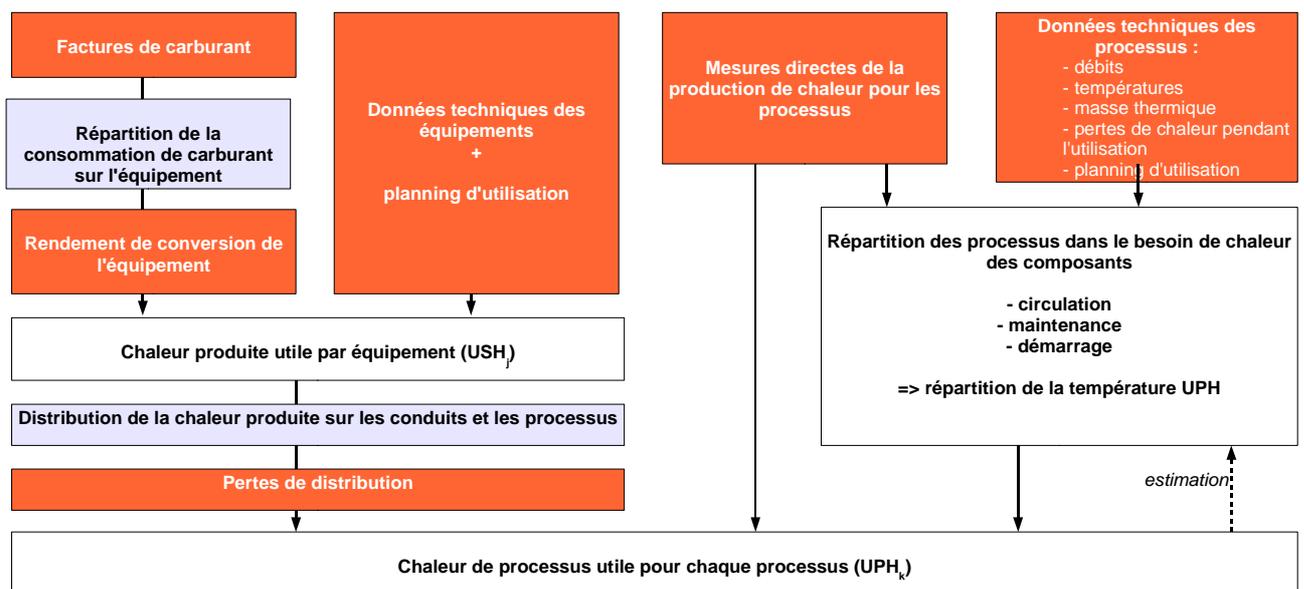
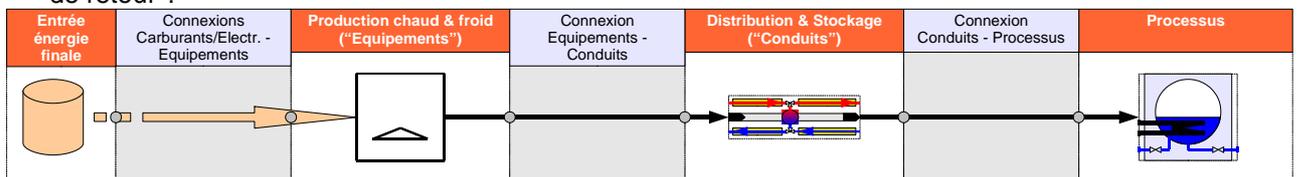


Figure 19 : Manières possibles d'obtenir des informations sur le besoin en chaleur ou en froid pour les différents processus.

Vous devez avoir ces différentes données à l'esprit comme une check-list mentale (et c'est encore mieux si vous les avez aussi sur papier), afin de ne pas quitter l'usine sans avoir posé toutes les questions utiles. Mais dans la plupart des cas, l'entretien ne suit pas votre planification (mentale). Vous obtenez des informations par bribes, au cours d'une discussion informelle déstructurée.

Pour garder une vue d'ensemble, il est utile de conserver des notes déjà structurées pendant la visite, groupées d'après les blocs mentionnés ci-dessus. Ainsi, après une demi-heure ou une heure de discussion informelle, vous avez obtenu beaucoup d'informations sur les différents processus et équipements, mais aussi sur les relations entre le technicien de maintenance et les problèmes avec la concurrence auxquels doit faire face le propriétaire de l'usine. Vous conserverez ainsi une trace et contrôlerez rapidement que vous avez toutes les données nécessaires ou si (et où) quelque chose d'important manque.

3.5.2.2 Visite

Lorsque vous avez le sentiment que vous avez obtenu tout ce qui est possible du bureau, proposez une visite dans les installations de l'usine. Assurez-vous que vous visitez au moins les processus et l'équipement de fourniture de chaleur concernés. Chaque fois que cela est possible, prenez un appareil photo numérique et prenez des photos qui, plus tard, vous aideront à vous rappeler les détails.

Utilisez la visite pour approfondir votre vision de la manière dont les différents processus fonctionnent, et posez toutes les questions détaillées auxquelles vous n'avez pas pensé pendant la discussion dans le bureau.

Essayez d'anticiper les problèmes potentiels que vous aurez peut-être à résoudre pour les modifications des systèmes que vous avez déjà à l'esprit :

- × Les points de connexion possibles des nouveaux conduits de distribution ou équipements de chaleur et froid
- × L'espace disponible pour les nouveaux équipements ou le stockage.

Si, lorsque vous étiez dans le bureau, vous avez parlé uniquement avec le directeur technique, pendant la visite, essayez d'entrer en contact avec le personnel de maintenance de l'entreprise qui pourra vous donner des informations importantes sur la pratique quotidienne (par exemple, posez des questions comme « ... *Le matin, lorsque vous entrez dans l'usine, à quelle température se trouve ce réservoir de stockage ?* », etc.)

3.5.3 Contrôle rapide sur site d'exhaustivité et de cohérence

Si vous avez utilisé votre ordinateur portable pendant cet entretien et avez profité de l'opportunité de saisir déjà quelques données dans le logiciel EINSTEIN, vous pouvez utiliser l'option « *Contrôle de cohérence* » du logiciel EINSTEIN, afin de contrôler :

a) si les données sont cohérentes ou s'il existe des contradictions dans les informations que vous avez obtenues (par exemple, confusions entre les unités)

b) si des données importantes manquent (et quelles données), vous pouvez demander explicitement plus d'informations sur ces données.

Peut-être disposez-vous de suffisamment d'informations et pouvez-vous lancer le logiciel de génération automatique de proposition, qui vous donnera une idée de l'importance des systèmes d'approvisionnement alternatifs possibles (par exemple, si vous connaissez le volume de stockage supplémentaire dont vous pourrez avoir besoin pour un système, pendant la visite, vous pouvez déjà étudier s'il existe suffisamment d'espace...).

3.5.4 Mesures pendant la visite

Dans de nombreux processus de production, le besoin énergétique annuel total (et même souvent mensuel) est connu à partir des factures des services publics de l'entreprise, mais la demande ne peut pas être

attribuée à des équipements et à des processus spécifiques. Toutefois, ces informations – au moins pour quelques processus importants et pour le principal équipement de fourniture de chaud et de froid – sont essentielles pour appliquer la méthodologie EINSTEIN.

Toutes les données disponibles issues des mesures prises sur site de l'entreprise même peuvent aider à analyser les profils énergétiques détaillés, incluant le besoin énergétique et les périodes de disponibilité de rejet de chaleur. C'est pourquoi il est important de contrôler avec l'entreprise quelles sont les données déjà contrôlées et quelle est l'association de données qui peut être utilisée pour analyser le flux d'énergie.

Dans de nombreuses entreprises, certaines mesures supplémentaires seront nécessaires pour compenser le manque de données. Selon les variations des processus, quelques mesures peuvent déjà être prises pendant la première visite de l'entreprise. Les mesures rapides et simples permettant de calculer les flux de chaleur et de froid pendant la visite du site comprennent :

Mesures de température

Des pistolets infrarouges appliqués sur des récipients ou des conduits (non isolés) donnent une première estimation des températures pendant l'exploitation. Dans le cas où la température de processus change rapidement, des thermocouples avec des enregistreurs de données peuvent être rapidement installés pour enregistrer les données pendant la durée de la visite. S'ils sont appliqués sur les récipients ou les conduits isolés, la température mesurée donnera une base pour le calcul des pertes de chaleur.

Si le débit massique des conduits est connu (flux de fourniture de chaleur, courant de produit ou flux de fourniture de froid), en mesurant le débit, la température avant et retour des conduits pendant quelques heures peut donner suffisamment d'informations pour calculer la chaleur ou le froid fourni par le conduit.

Mesures de débit massique

Des mesures sans contact des débits d'eau/de support utilisant, par exemple, des principes de mesure à ultrasons peuvent facilement être installés, sans interférer avec les processus. En association avec les mesures de thermiques, les flux énergétiques peuvent être rapidement calculés. Sachez que des mesures de courtes durées (par exemple quelques heures) vous donnent une image restreinte de l'ensemble de la production, en particulier s'il existe une grande dépendance temporelle des processus de production.

La mesure des flux d'énergie peut être réalisée du côté primaire de la fourniture d'énergie (eau chaude, conduit de condensat) ou du côté secondaire (mesure du support du processus). Généralement, le choix dépend de la disponibilité des points de mesure (accès aux conduits, isolation, état du conduit, réglementation, etc.). Une liste de mesures possibles (non exhaustive) donnera à l'utilisateur une idée des points de mesures possibles :

1. Mesures du côté du support du processus (« côté secondaire ») :

- * Mesure du *support du processus* (débit d'eau, d'air, du produit) qui est chauffé dans le processus.
- * Mesure de *l'eau fraîche* ajoutée dans un récipient, qui est constamment chauffée à une certaine température (par exemple dans les unités de lavage).

2. Mesures du côté de l'alimentation en chaleur (« côté primaire ») :

- * Mesures du conduit d'alimentation en eau chaude et des températures avant et après l'échangeur de chaleur (pour une alimentation énergétique indirecte).
- * Mesures du conduit d'alimentation d'eau chaude et de la température de l'eau chaude (pour une alimentation énergétique directe).
- * Mesure du conduit de condensat d'un processus (ou de plusieurs processus, si le modèle de régulation est tel que les données de mesure peuvent être collectées ensuite pour chaque processus).

- * Mesure de l'eau fraîche ajoutée dans le système de fourniture de vapeur (pour l'identification de l'énergie utilisée comme vapeur directe).

3.5.5 Programme de mesures pour l'utilisateur

Si vous constatez que des informations manquent, que vous ne pouvez pas les obtenir instantanément en effectuant des mesures sur le site, vous pouvez laisser des « devoirs » à l'entreprise :

- * Enregistrer des températures, des pressions ou des compteurs de capteurs déjà existants à certains intervalles de temps.
- * Vous pouvez aussi laisser quelques appareils de mesure que vous avez amenés et demander à l'entreprise d'enregistrer les valeurs mesurées pendant une période de temps.
- * Vous pouvez définir quelques « expériences » simples qui peuvent être réalisées par l'entreprise (par exemple, déterminer les courbes chaudes ascendantes ou froides descendantes de certains équipements, etc.).

3.5.6 Discuter des informations collectées pendant la visite

Après la visite, vous devez donner quelques informations à l'entreprise sur vos impressions et la manière dont vous pensez procéder :

- * Définissez et décidez avec l'entreprise quelles sont les mesures possibles que vous souhaitez analyser en détail et quelles sont les possibilités que vous excluez *a priori*.
- * Définissez un calendrier pour les étapes à venir : une échéance pour la livraison des informations supplémentaires par l'entreprise ; une échéance pour la livraison du rapport d'audit.

EINSTEIN Etape 5 : Balade sur site – via l’audit

> présentation de l’étude rapide et sommaire à l’entreprise

> faire des questionnaires et visiter le site

> vérification rapide des nouvelles données

> prendre des mesures

> définir un programme de mesures

> discuter une nouvelle compréhension

3.6 Analyse du *statu quo*

3.6.1 Contrôle de cohérence et d'exhaustivité des données

Une analyse systématique du *statu quo* est le point de départ de l'identification ultérieure d'opportunités d'économies d'énergie pour une entreprise. Toutefois, la répartition de la consommation totale d'énergie en différents composants et la définition des principaux flux, sources et dissipateurs d'énergie requiert généralement l'acquisition d'un nombre assez important de données. Outre la quantité, la précision et la cohérence des données disponibles affectent de manière importante la fiabilité des solutions alternatives envisagées.

Comme déjà décrit dans la section précédente, il existe souvent plusieurs manières de déterminer les mêmes informations. En voici quelques exemples (voir aussi la Figure 19) :

- * La consommation de carburant dans une entreprise peut être donnée directement sous forme d'énergie, ou elle peut être disponible sous forme de quantité de carburant consommé (en m³, litres, etc.), puis vous pouvez calculer la consommation énergétique depuis cette information en utilisant le LCV du carburant.
- * La chaleur produite par une chaudière d'eau chaude peut être déterminée d'une part par le carburant consommé, et d'autre part par le volume d'eau chaude consommé ; de plus, il peut même y avoir un thermomètre mesurant directement la chaleur fournie à la sortie de la chaudière.

En rassemblant les données sur le *statu quo* (l'état actuel de demande énergétique, etc.), vous pouvez rencontrer – et devoir résoudre – l'un des problèmes suivants (ou les deux) :

- * *Redondance* d'informations et conflits possibles entre les données : La redondance existe si, comme dans l'exemple ci-dessus, vous avez au moins deux manières différentes de déterminer ou de calculer le même paramètre. Si les différentes manières conduisent au même résultat, tout va bien : Cela vous confirme que la valeur obtenue est la bonne. Mais dans le cas contraire, si des méthodes de calcul différentes conduisent à des résultats différents, vous avez un problème de choix (quelle est la bonne ou la mauvaise ?), et quelle que soit votre décision, vous douterez des deux options.
- * *Manque d'informations*. Il est possible que vous ne disposiez pas de toutes les informations que vous souhaitez pour effectuer un calcul détaillé. Par exemple, vous pouvez connaître le besoin total en chaleur (calculé à partir de la consommation en carburant) et le besoin du processus consommant le plus de chaleur, mais n'avoir aucune information sur le besoin restant, partagé par deux autres petits processus.

Le contrôle de la redondance et de l'exhaustivité dans un système complexe peut être assez difficile et prendre du temps. En général, pour cette tâche, vous disposez des outils suivants :

a) *Relations mathématiques et physiques* entre les différentes quantités obtenues à partir des lois physiques de base (conservation de l'énergie, seconde loi de thermodynamique) et les *propriétés physiques* des matériaux :

- * *Soldes énergétiques et massiques* des équipements et sous-équipements (admission = production + pertes). Dans de nombreux cas, les paramètres d'efficacité ou les ratios de débit massique doivent se situer entre 0 et 1, en raison des lois de conservation.
- * *Contraintes de la seconde loi* : Flux de chaleur uniquement du chaud vers le froid. Cela peut vous aider à définir les valeurs potentielles minimales et maximales pour certaines quantités (par exemple les températures).
- * *Propriétés physiques des matériaux*, en particulier les propriétés des liquides et des carburants. Par exemple : l'énergie transportée par un liquide est fonction du débit massique et de la différence spécifique d'enthalpie entre le mouvement avant et le retour, ce qui dépend de la capacité de chaleur spécifique et de la fraction de vapeur et de la chaleur d'évaporation latente (dans le cas d'un changement de phase).

- * *Les heures d'exploitation* des processus et de l'équipement sont tributaires de la durée d'une journée (24 h) et d'une année (8 760 h) et des périodes de vacances et de week-ends spécifiés.

b) *Informations d'ingénierie sur les valeurs types ou les limites pratiques pour certaines quantités :*

- * Mathématiquement, l'efficacité d'une chaudière doit se situer entre 0 et 1 (ou entre 0 et quelque chose comme 1,1, si la LCV est utilisée comme référence). Mais en pratique, il sera très étrange de trouver une chaudière ayant une efficacité aussi mauvaise que 0,1. De même, en pratique 0,999 ne sera jamais atteint. Alors, quelque chose comme 0,7 ... 0,95 peut être considéré comme une limite pratique pour les chaudières sans condensation. Le même raisonnement peut être appliqué pour l'efficacité de la distribution dans les conduits et les tuyaux.
- * *Les chutes de température* dans les échangeurs de chaleur (LMTD) (selon la seconde loi de thermodynamique) doivent, théoriquement, être supérieures à 0 K. Mais en pratique, la limite est supérieure, quelque chose comme 3-5 K pour les échangeurs de chaleur liquide sur liquide et comme 10 K pour les échangeurs de chaleur liquide-air ou air-air. Un raisonnement similaire peut être appliqué pour la différence entre les températures avant et de retour des circuits liquides : personne ne concevra un circuit avec un liquide de transport de chaleur circulant à un débit massique ayant uniquement 0,1 K de différence entre l'avant et le retour. Les limites pratiques peuvent aussi représenter quelque chose comme 1-2 K.
- * *Les pertes de chaleur* de certains équipements de processus sont difficiles à déterminer de manière exacte. Mais il existe des limites supérieures données par la surface totale de l'équipement (qui peuvent être facilement estimées à partir de la taille) et le fait que le transfert de chaleur total (rayonnement + convection naturelle) d'un corps non isolé et à des températures pas trop élevées (sous 100 °C) est inférieur à environ 8 W/m²K à l'intérieur et 20 W/m²K à l'extérieur (en tenant compte du vent), s'il n'existe pas de pertes supplémentaires à cause du changement de phase ou des réactions chimiques (ex. bouillonnement...).
- * *La durée de chauffage ou de remplissage/vidage* de certains équipements du processus dure rarement plus de 50 % de la durée totale d'un lot dans les processus de lot ou plus de 2-3 heures dans les processus continus qui sont arrêtés pendant la nuit.

Alors que les limites mathématiques permettent un jugement précis et clairement défini (oui/non), à savoir si la valeur (dans le contexte des données globales) est possible ou non, les limites des connaissances en ingénierie sont diffuses, dans une certaine mesure. En raison de ces contraintes d'ingénierie, dans EINSTEIN, nous faisons la distinction entre :

- * *Les valeurs limites pratiques* : Il s'agit du large éventail de valeurs possibles (d'un point de vue de l'ingénierie), qui comprend 99,9 % des cas pratiques.
- * *L'éventail des valeurs types* : Il s'agit d'un éventail de valeurs beaucoup plus restreint qui doit être valide pour environ 90 % des cas pratiques (mais en ayant à l'esprit que 10 % des situations peuvent se trouver hors de cette plage).

Le contrôle de cohérence basique d'EINSTEIN est le contrôle de la cohérence des données transmises par l'entreprise, du point de vue des *relations mathématiques et physiques* et en ce qui concerne les *valeurs limites pratiques* fournies par les connaissances en ingénierie.

Avec l'aide du logiciel EINSTEIN, ce contrôle de cohérence basique peut être réalisé automatiquement. S'il existe un conflit entre les données saisies et les limites données, les données seront automatiquement corrigées, et une liste de messages d'erreurs sera produite.

Le contrôle de cohérence basique du logiciel EINSTEIN complète toutes les données qui ne sont pas fournies explicitement dans le questionnaire, mais qui peuvent être calculées à partir des mêmes corrélations et contraintes.

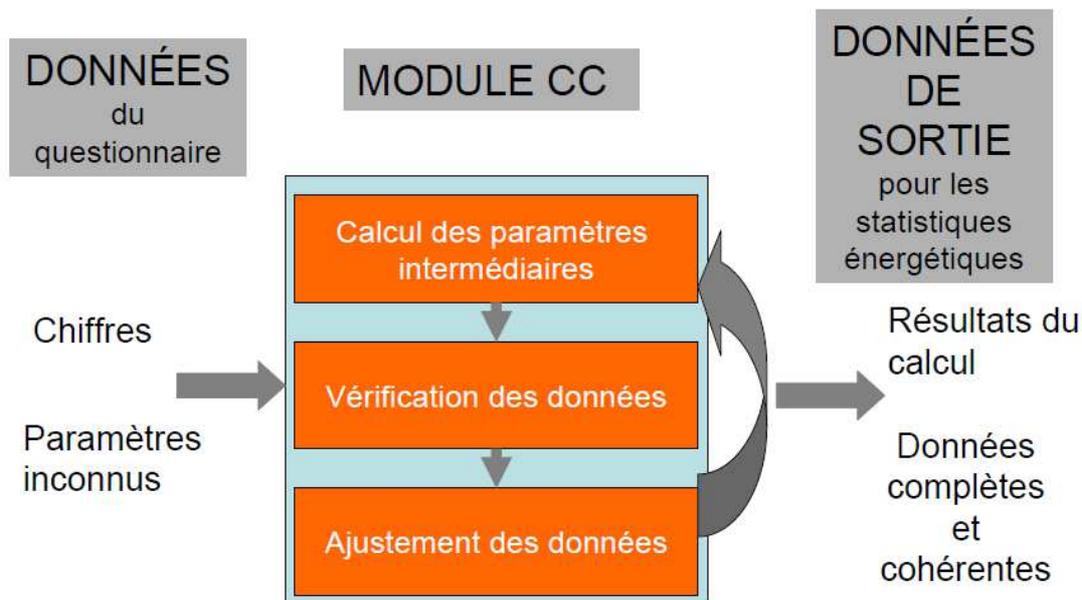


Figure 20 : Schéma de la procédure de contrôle de cohérence basique dans le logiciel EINSTEIN.
 « Aucune » signifie « Aucune donnée connue » (cellules vides).

3.6.2 Acquisition d'informations manquantes

La quantité d'informations et le niveau de précision nécessaire pour un audit énergétique dépendent de la minutie de l'audit. Dans le cadre des évaluations préliminaires (études rapides), les informations nécessaires sont moindres, alors que pour une analyse détaillée, un grand nombre de paramètres doit être pris en compte.

Toutefois, dans de nombreux cas, tous les chiffres théoriquement requis peuvent être facilement connus. Parfois, en particulier dans les petites entreprises, même des données très basiques peuvent être difficiles à obtenir, et ainsi, après un contrôle de cohérence basique et la saisie des données, il peut toujours y avoir des manques, ou des données qui ne peuvent être déterminées qu'avec un très faible degré de précision.

Si c'est le cas, en ce qui concerne les paramètres toujours inconnus, nous pouvons utiliser ce que nous appelons *l'éventail des valeurs types* issues de nos connaissances en ingénierie. Avec l'aide de ces « valeurs types », nous pourrions compléter la plupart des blancs toujours existants, mais nous devons être conscients qu'en utilisant ces estimations, nous décrivons des hypothèses qui ne coïncident pas nécessairement avec la réalité.

Par conséquent, chaque fois que nous procédons ainsi, cela doit se refléter clairement et être indiqué dans les rapports que nous produisons :

« Les conclusions ne sont valides que dans le cadre des hypothèses A, B et C... »

Et chaque fois que cela est possible, nous devons confirmer, au moins *a posteriori*, si les hypothèses étaient correctes ou non.

Si, même avec vos connaissances en ingénierie, vous ne pouvez pas obtenir au moins quelques estimations des données de base dont vous avez absolument besoin pour votre analyse, vous pouvez faire deux choses :

a) Appeler l'entreprise et leur dire qu'avec les quelques informations dont vous disposez, il est absolument impossible de réaliser une proposition raisonnable.

b) Définir quelques hypothèses ou scénarios concernant les informations manquantes : supposez juste quelques chiffres qui, au moins, semblent raisonnables. Vous pouvez essayer de saisir les cas limites : un très bon scénario (pour le système que vous voulez proposer), un très mauvais et un intermédiaire.

Cela est parfois meilleur que de ne rien faire, mais dans ce cas, toutes les mises en garde ci-dessus doivent être mentionnées deux fois et toujours identifiées en caractères gras.

Quantité et précision des données requises pour les différents niveaux d'analyse

La méthodologie EINSTEIN distingue trois niveaux d'analyse avec un niveau croissant de détails et de précision :

✖ *Niveau 1 : Analyse rapide*

Pour une analyse rapide, il suffit de connaître avec une précision minimale¹⁰ la consommation d'énergie et le principal niveau de température (température du processus) de la plupart des processus consommateurs d'énergie de l'entreprise.

✖ *Niveau 2 : Niveau d'analyse standard EINSTEIN*

Pour le niveau d'analyse standard EINSTEIN, les paramètres suivants, au minimum, doivent être connus, avec un niveau minimum de précisions :

- consommation d'énergie des principaux processus consommateurs d'énergie et décomposition de cette consommation en besoin chaud/froid pour la circulation, la maintenance et le démarrage.

- Tous les niveaux de température (admission, processus, sortie) et les heures d'exploitation de ces processus, ainsi que l'équipement de fourniture de chaud/froid correspondant.

- Flux de chaleur résiduelle issus des principaux processus consommateurs d'énergie.

✖ *Niveau 3 : Analyse détaillée*

Pour un niveau d'analyse détaillé, l'ensemble des informations doit au moins être fourni par le questionnaire de base EINSTEIN, avec la précision requise.

La précision des données disponibles, au sens qualitatif de fiabilité (leur faites-vous confiance ou non ?) et au sens quantitatif de marge d'erreur ($\pm xy$ %), dépend fortement des facteurs suivants :

- ✖ *La source d'informations.* Parfois, dans les grandes entreprises, les chiffres de la consommation d'énergie sont directement mesurés par des équipements de mesure précis et stockés dans des systèmes de gestion énergétique sophistiqués, alors qu'au contraire, dans de petites entreprises, on ne connaît que la moyenne des conditions d'exploitation de l'usine et la consommation énergétique globale tirée des factures d'énergie. Des données sur une année ou même sur un mois peuvent ne pas être représentatives de la consommation moyenne future.
- ✖ *La procédure d'acquisition des données.* Des erreurs peuvent facilement être commises pendant la saisie des données ou en copiant des chiffres, en entrant des données dans un outil de calcul, etc. (ex. avez-vous [ou l'entreprise a-t-elle] saisi correctement les données dans le questionnaire ? Une erreur est-elle possible dans les unités de mesure ? Le questionnaire a-t-il été rempli par l'entreprise, ou les avez-vous aidés ? etc.).
- ✖ *Le niveau de détail.* Plus le niveau d'analyse est élevé, plus les données requises doivent être précises et détaillées, et ainsi, plus le risque d'obtenir des chiffres moins précis est élevé (par exemple avez-vous besoin de chiffres annuels ? Horaires ? Etes-vous intéressé par la consommation énergétique globale ? Ou par la répartition des différents processus ? etc.).

¹⁰ Comme précision minimum nous considérons une marge d'erreur de moins de +/- 50% !

Si vous doutez de la validité d'un paramètre, vous devez l'indiquer dans le rapport, de la manière décrite ci-dessus, pour les estimations et les valeurs définies par estimations dans vos scénarios.

3.6.3 Répartition détaillée de la consommation

La répartition de la consommation énergétique par processus, équipement, carburant et niveau de température est très importante pour avoir une vue d'ensemble de tous les aspects concernant l'utilisation d'énergie dans le secteur analysé. Les informations statistiques obtenues dans l'état actuel sont un point de départ pour les décisions relatives à des applications de mesures et de technologies d'économies d'énergie.

La consommation énergétique globale permet à l'auditeur de situer rapidement le niveau de consommation énergétique et les possibilités (*a priori*) d'économies d'énergie, par rapport aux données de référence disponibles pour le secteur industriel (références). Lorsque des propositions alternatives différentes pour les améliorations d'efficacité d'énergie sont envisagées, le besoin énergétique actuel et sa composition sont utilisés comme référence pour l'analyse de l'effet des mesures proposées.

Ici, les statistiques énergétiques les plus importantes sont décrites, et l'utilisation des données est commentée.

- * *Répartition de l'énergie par processus, équipement et type de carburant* : Identifie les principaux processus consommateurs d'énergie, équipements et types de carburant responsables de la facture énergétique la plus élevée. Des efforts d'amélioration concentrés sur ceux-ci auront l'impact le plus important.
- * *Analyse de la consommation énergétique par niveau de température*. Permet d'évaluer le potentiel de récupération de perte de chaleur et l'application de technologies à faible température, comme la thermie solaire, les pompes à chaleur, le refroidissement de l'eau grâce à des moteurs électrocalogène (CHP), etc.
- * *Analyse de l'impact de la consommation énergétique en termes de consommation énergétique primaire, CO₂ et autres émissions* : Permet l'évaluation de l'impact environnemental du secteur.
- * *Répartition par taux de consommation énergétique spécifique* : Intensité énergétique (IE) et consommation énergétique spécifique (SEC) : Permet la comparaison avec des données de référence. Permet également de fixer des objectifs de consommation énergétique réalistes. Les statistiques énergétiques (répartitions) à différentes échelles temporelles sont très utiles pour avoir une meilleure représentation :
- * *Les données annuelles* indiquent les principaux processus de consommation énergétique, équipements et types d'énergie, et donnent des indications générales sur les points qui doivent, en priorité, faire l'objet des mesures de rendement énergétique.
- * *Les données mensuelles* sont nécessaires pour prendre en compte les variations de température ambiante ou saisonnière requises (par exemple le chauffage de l'espace, les processus de séchage, les variations saisonnières de production, comme dans le secteur des boissons...) et dans l'approvisionnement (par exemple les systèmes thermosolaires) et sont requises pour évaluer la faisabilité des technologies spécifiques.
- * *Les données horaires* des besoins et de l'approvisionnement en chaleur sont importantes pour déterminer les pics de consommation d'énergie, analyser les possibilités de récupération des déchets, en particulier pour déterminer les besoins en accumulation de chaleur et de froid.

Toutes ces répartitions du besoin énergétique des entreprises peuvent être créées automatiquement en utilisant le logiciel EINSTEIN pour l'état actuel du secteur et les scénarios futurs, en fonction des différentes propositions alternatives.

3.6.4 Analyse de l'exploitation réelle de l'équipement existant

Les données techniques des équipements sont très importantes pour évaluer la performance du système énergétique. Les paramètres de performance les plus représentatifs sont les coefficients de conversion énergétique et les capacités de chauffage/refroidissement.

En ce qui concerne ces données, dans la plupart des cas, les seules informations accessibles sont les valeurs nominales fournies par les fiches techniques des fabricants de l'équipement ou les données fournies sur les équipements eux-mêmes.

Néanmoins, la performance réelle de l'équipement peut être assez différente de ces données, à cause d'erreurs et de pannes, de conditions d'utilisation extrêmes dans des applications spécifiques et de plusieurs autres facteurs possibles. Ainsi, chaque fois que des données sont disponibles et le permettent, il est intéressant de comparer le niveau de performance réel des équipements avec les données de performance nominales.

Il est possible d'évaluer la performance réelle en mesurant l'admission/sortie. Par exemple, si la consommation de carburant et la production de chaleur d'une chaudière sont connues grâce à des mesures, le taux de conversion moyen peut être déterminé par des calculs.

Pour l'équipement de combustion, la mesure des gaz d'échappement est une autre manière d'obtenir des informations sur le taux de conversion de l'équipement, car la chaleur contenue dans les gaz d'échappement et la combustion incomplète sont les facteurs dominants de la perte de conversion énergétique.

Si les données de mesure sont disponibles, les calculs nécessaires sont réalisés automatiquement par le logiciel EINSTEIN, et en cas de différences importantes entre la performance nominale et réelle de l'équipement correspondant, des messages d'avertissement en informeront l'auditeur.

3.6.5 Comparaison avec les références

3.6.5.1 Qu'est-ce que le Benchmarking ?

Le *Benchmarking* est un processus structuré permettant de comparer et d'analyser les pratiques, afin d'améliorer les processus en identifiant, partageant et utilisant les meilleures pratiques. Le but du Benchmarking est de permettre l'évaluation du rendement énergétique dans une entreprise, par rapport aux références ou aux objectifs définis.

Dans EINSTEIN, les valeurs de référence suivantes sont utilisées :

- * Une *référence* est une échelle donnée par une valeur minimale et maximale (B_{\min} , B_{\max}) qui décrit la meilleure consommation énergétique des industries existantes dans un secteur donné.
- * Un *objectif* est une valeur cible (B_{tar}) pour l'intensité énergétique ou la consommation énergétique spécifique qui peut être atteinte si les meilleures technologies disponibles et économiquement utilisables sont mises en œuvre. Lorsqu'aucune valeur cible explicite n'est donnée, on estime que les industries ayant de bonnes pratiques sont celles dont la consommation énergétique est inférieure à 10 % par rapport à l'échelle B_{\min} et B_{\max} .
- * Les *bonnes pratiques* sont des stratégies et des tactiques documentées employées par des entreprises qui réussissent. Elles peuvent être identifiées au moyen d'entretiens exhaustifs avec les responsables énergétiques, d'une étude minutieuse des documents des entreprises et d'analyses des documents et des sources secondaires.

3.6.5.2 Classification des indicateurs par quantité de référence

Pour effectuer un Benchmarking dans EINSTEIN, trois types de taux de référence sont utilisés systématiquement, selon la quantité utilisée comme référence :

- * *Intensité énergétique* : Par intensité énergétique, nous entendons la consommation énergétique par rapport à la valeur monétaire du produit. La valeur du produit peut être exprimée en fonction du chiffre d'affaires (prix de vente) ou de coûts de production (le prix de vente moins les retombées

industrielles). Si cela n'est pas précisé explicitement, le chiffre d'affaires (prix de vente) est utilisé. Puisque ces références sont exprimées en unités monétaires, la devise et l'année des données doivent être clairement indiquées.

- * *Consommation énergétique spécifique par unité* : La consommation énergétique spécifique par quantité de produit est la consommation énergétique relative à la ligne de production analysée, basée sur la quantité de produits fabriqués (mesurée en unités, tonnes, litres, etc. ; par exemple, la consommation d'énergie totale par kg de jus concentré, consommation énergétique par litre de produit chimique, etc.).¹¹
- * *Consommation énergétique spécifique par produit intermédiaire dans une exploitation* : Outre les taux concernant les produits finaux, les taux de consommation énergétique des unités d'exploitation sont également intéressants. La consommation énergétique spécifique par quantité de produit intermédiaire traitée est la consommation énergétique relative à cette exploitation par rapport à la quantité de produit (mesurée en unités, tonnes, litres, etc. Ex. la consommation énergétique par kg ou litre de solution distillée). Lorsque ces ratios sont identifiés, la référence est indiquée (par exemple dans un processus de séchage, la consommation énergétique peut être indiquée en kg de produit humide ou en kg de produit sec, ce qui peut conduire à des valeurs numériques très différentes).

3.6.5.3 Classification par type d'énergie

- * *Electricité vs. carburants* : Dans le module de Benchmarking, les données de consommation énergétique sont classées en électricité ou en carburants, car ces données sont plus facilement disponibles en pratique (sur les factures d'électricité et de carburant de l'entreprise) que la distinction entre l'énergie consommée pour les utilisations thermiques et celle consommée pour les utilisations non thermiques.
- * *Consommation énergétique finale totale* : Les données portant sur la consommation énergétique totale sont obtenues en ajoutant l'énergie finale contenue dans l'électricité et l'énergie finale contenue dans les carburants.
- * *Consommation énergétique primaire totale* : La consommation énergétique totale en termes d'énergie primaire. Ce paramètre doit être utilisé chaque fois que cela est possible pour des comparaisons globales interentreprises.

3.6.5.4 Procédure de Benchmarking dans EINSTEIN

Les comparaisons des rendements énergétiques dans une entreprise sont réalisées en comparant la valeur réelle de l'indicateur spécifique (par exemple consommation énergétique spécifique par tonne de produit) avec une cible référence B_{tar} basée sur la structure du secteur donné. Cela signifie que le I réel et la B_{tar} de référence sont affectés de manière similaire par les changements de la structure sectorielle.

La cible référence B_{tar} est définie comme indiqué ci-dessus. La différence entre l' I réel et la B_{tar} de référence est utilisée comme mesure du rendement énergétique, car elle montre le niveau de rendement énergétique qui devrait être atteint dans votre entreprise lorsque les meilleures technologies d'usine sont utilisées. Plus la différence est petite, meilleur est le coefficient de rendement énergétique. Le ratio entre l' I réel et la B_{tar} de référence (appelée indice du coefficient énergétique EEI ; Eq. 3.1) peut être comparé entre les entreprises.

$$EEI = \frac{I}{B_{tar}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Où I est l'indicateur spécifique de la consommation énergétique et B_{tar} est la valeur cible de référence.

¹¹ *Consommation générale d'énergie dans l'entreprise qui ne peut pas être associée à une ligne de production donnée ou un produit devrait être pris en considération de façon proportionnelle, et tout en respectant la valeur du produit donné pour un chiffre d'affaires total.*

Si un secteur utilise exclusivement la meilleure technologie, l'*EEI* équivaut à 100. Un *EEI* de 105 signifie que *I* est en moyenne 5 % supérieur au niveau de référence, et que 5 % d'énergie peuvent être économisés pour une structure donnée, en mettant en œuvre la technologie de référence.

3.6.5.5 Sources des données des références

Des données sur les références ont été sélectionnées à partir des documents de référence BAT existants [BREF], ainsi que d'autres documents et sources, afin de constituer une base de définition d'indicateurs et de références/cibles. Elles sont disponibles dans la base de données par défaut du logiciel EINSTEIN. Pour chaque référence de cette base de données, la référence d'origine est indiquée.

Les références sont également disponibles dans les documents des *secteurs ou des sous-secteurs industriels*, de certains *produits* ou de certaines *unités d'exploitation*.

a) Classification par secteur ou sous-secteur industriel

La base de données EINSTEIN par défaut comprend quelques références pour les secteurs industriels suivants, identifiés par leur code NACE. D'autres secteurs pourront être inclus à l'avenir ou peuvent être ajoutés par l'utilisateur.

b) Classification par exploitation

Dans la production industrielle de biens, une unité d'exploitation est une étape de base d'un [processus](#) de production. Par exemple, dans le traitement du lait, [l'homogénéisation](#), [la pasteurisation](#), le refroidissement et [l'emballage](#) sont tous des unités d'exploitation qui sont associées pour créer un processus de production global. Un processus de production peut compter de nombreuses unités d'exploitation pour obtenir le produit désiré.

Références du chapitre 3.6.5 :

Documents de référence BAT [BREF] pour différents secteurs industriels. Edités par l'Union Européenne sur <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>. Vannoni et al. (2008): Review of Thermal Energy Auditing Practice and Tools. IEE Project EINSTEIN, Document D2.2, 2008. Téléchargeable sur www.einstein-energy.net

EINSTEIN Etape 6 : analyse du status quo

> Vérification de la cohérence des données

> estimer et/ou acquérir des informations manquantes

> rupture de consommation

> performance réelle de l'équipement

> comparaison avec les benchmarks

3.7 Conception d'options d'économie d'énergie et projet de ciblage énergétique

Comme décrit précédemment dans la section 1.3, l'analyse systématique du potentiel d'économie d'énergie requiert les étapes suivantes :

- * Réduction des besoins des processus en chaud et en froid par optimisation des processus.
- * Réduction de l'approvisionnement requis en chaud et en froid par récupération de la chaleur et intégration du processus.
- * Cogénération et polygénération.
- * Approvisionnement des besoins restants en chaud et en froid, grâce aux technologies à fort rendement énergétique, en utilisant autant que possible des sources d'énergie renouvelable.

La première étape est la conception et la taille d'un système alternatif de production de chaud et de froid. Différentes alternatives possibles doivent être élaborées qui, dans les étapes suivantes, seront comparées selon leur performance énergétique et économique, afin de sélectionner la solution optimale.

L'analyse des besoins en chaud et en froid et le potentiel de récupération de chaleur/d'intégration du processus permet également de définir des objectifs énergétiques *a priori*, qui peuvent être utilisés comme référence pour évaluer la performance réelle calculée du système.

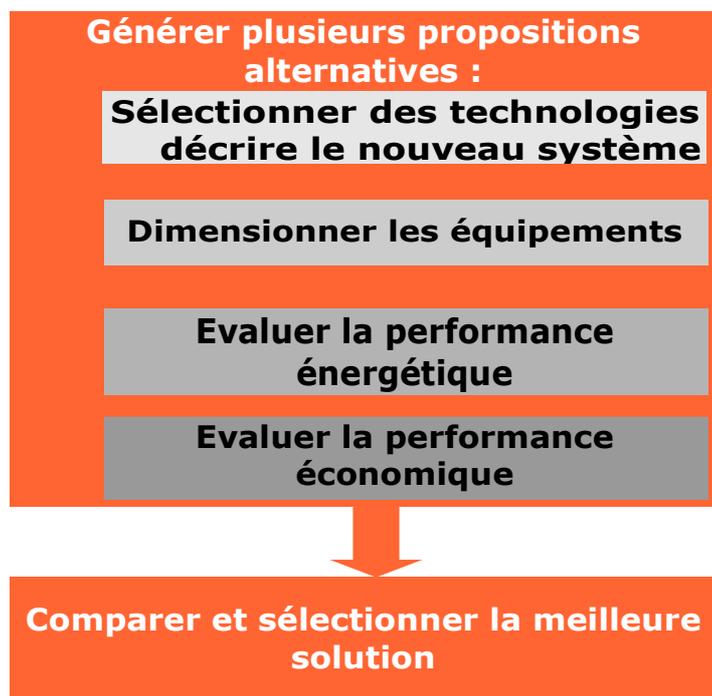


Figure 21 : Etapes de création et d'évaluation des propositions alternatives (Audit EINSTEIN étapes 7-9).

3.7.1 Check-list de recommandations pour des économies d'énergie potentielles

Lorsque les données de la demande énergétique ont été collectées et documentées, la première étape après l'analyse et l'étape du Benchmarking permet de montrer à l'utilisateur les mesures permettant aux économies d'énergie des processus de production d'être énergétiquement améliorées.

Il existe de nombreux manuels et rapports d'études de cas sur le rendement énergétique. Ils présentent les possibilités des différentes mesures destinées à réaliser des économies du point de vue des besoins. Une grande liste de documents a été compilée dans le rapport EINSTEIN sur les *Pratiques et Outils d'Audit Energétique* [Vannoni et al., 2008]. Dans ce document, ces mesures ont été listées par secteurs et par technologies de fourniture de chaud/froid, afin de donner une présentation structurée des potentiels d'économie.

Les solutions de ménage sont des actions de gestion énergétique qui sont effectuées régulièrement, à un intervalle ne dépassant jamais un an. Vous trouverez ci-après des opportunités d'économie d'énergie types :

- Réglage et serrage des accouplements de registres, en apportant un soin particulier aux registres extérieurs, aux registres de zone d'unités multizones et aux registres de déviation, ainsi qu'aux serpentins de chauffage.
- Contrôle et ajustement des moteurs des ventilateurs et des pompes pour la tension de la courroie et l'alignement du couplage.
- Remplacement des filtres du système d'air pour éviter la restriction des flux d'air.
- Extinction des systèmes d'échappement et d'appoint dans les cuisines et les blanchisseries lorsque les processus ne sont pas requis.
- Extinction des éclairages et autres équipements produisant de la chaleur lorsqu'ils ne sont pas requis.
- Contrôle et recalibrage des composants de contrôle, comme les thermostats ambiants, les contrôleurs de température d'eau et d'air et vérification des réglages des minuteriers.
- Remplacement de l'isolation endommagée ou manquante sur les conduits et les tuyaux.
- Remplacement ou réparation des conduits abîmés ou fuyants des systèmes d'aération.
- Nettoyage des surfaces des échangeurs de chaleur, des unités de chauffage et des serpentins de chauffage.
- Définition de règles d'utilisation de l'espace pour réduire l'entrée de l'air extérieur.
- Définition des températures minimales et maximales pour le chauffage et le refroidissement et réajustement des contrôles en conséquence.
- Réglage du flux d'air selon les conditions d'occupation et l'utilisation de l'espace.

Références :

C.Vannoni et al. (2008): EINSTEIN Report: *Review of Thermal Energy Auditing Practices and Tools*. IEE Project EINSTEIN, Document du projet D2.2. Téléchargeable sur www.einstein-energy.net

3.7.2 Optimisation des processus : liste des technologies efficaces pour les unités d'exploitation spécifiques, possibilités d'économies du point de vue des besoins

3.7.2.1 Optimisation du processus industriel

Une seconde étape consiste à analyser les possibilités d'économies du point de vue des besoins pour chaque processus. Chaque unité de traitement peut être évaluée en fonction de son efficacité et de son rendement. Les mesures possibles qui permettent d'améliorer les processus sont :

- changer la technologie utilisée
- améliorer les processus grâce à de meilleures réglementations.

De nombreuses sources documentaires existent et décrivent les mesures de rentabilité énergétique de différents secteurs et les nouvelles avancées qui sont développées par les ingénieurs, les opérateurs, les fournisseurs de technologies et la recherche. L'Union européenne a développé des documents pour chaque secteur qui résument les *meilleures techniques actuellement disponibles*¹² ayant pour cible, entre autres, l'utilisation efficace de l'énergie.

Ces documents de référence BAT [BREF] pour différents secteurs industriels et spécifiques sont édités par l'Union européenne sur <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>. D'un grand intérêt pour ce projet, les rapports BREF traitent de :

A. Rendement énergétique :

-Prévention et contrôle intégrés de la pollution, projet de document de référence sur les techniques de rendement énergétique, juin 2008.

B. Systèmes d'approvisionnement chaud et froid :

- Prévention et contrôle intégrés de la pollution (IPPC), document de référence sur l'application des meilleures techniques disponibles pour les systèmes de refroidissement industriels, décembre 2001.
- Contrôle et prévention intégrés de la pollution, document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour les grandes unités de combustion, juillet 2006.

C. Documents sectoriels spécifiques pour les différents secteurs industriels

Dans l'IEA Tâche 33/IV sur la *Chaleur Solaire pour les Processus Industriels*, une *matrice d'indicateurs* a été créée et sert d'outil. Elle comprend systématiquement l'ingénierie des processus et l'information énergétique des secteurs industriels avec une application potentielle de systèmes thermosolaires. Ce système d'aide à la prise de décision offre à l'utilisateur une vaste base de données pour toutes les étapes importantes qui ont été prises pour la conception d'un système de chauffage solaire pour les processus industriels. Ces étapes comprennent la présentation des processus, des paramètres importants d'alimentation énergétique pour les unités d'exploitation, des données de référence sur la consommation énergétique, des technologies compétitives, des plans hydrauliques pour l'intégration solaire et des études de cas réussies. Dans la section sur les technologies compétitives de la matrice, les technologies énergiquement efficaces sont listées pour différentes unités d'exploitation. Cette matrice a été développée par l'Université de technologie de Graz et l'AEE INTEC et est maintenant accessible en tant que base de données via internet à l'adresse <http://wiki.zero-emissions.at>.

L'outil EINSTEIN se sert de ces sources d'informations existantes (partiellement collectées dans le projet EINSTEIN). Une base de données, que peut consulter l'utilisateur, est intégrée dans l'outil EINSTEIN :

- a) Mesures générales d'économie d'énergie
- b) Mesures spécifiques d'économie documentées pour les unités d'exploitation appliquées au système de production.

La structure basée sur les unités d'exploitation et reliée par affinité aux différents secteurs permet de filtrer dans la base de données les technologies ou les méthodologies efficaces appliquées à des unités d'exploitation spécifiques, des mesures d'économies d'énergie ou des technologies efficaces. Le Tableau 9 présente quelques exemples d'informations de la base de données, dans le but de montrer sa structure (hors attribution des secteurs concernés dans lesquels ces technologies et ces mesures d'économie sont déjà appliquées).

¹² Comme défini dans l'[Article 2.11](#) de la Directive IPPC, « Meilleures techniques disponibles » qualifie l'étape la plus efficace et la plus avancée dans le développement d'activités et ses modes de fonctionnement qui indiquent le potentiel de techniques particulières permettant d'offrir, en principe, les valeurs limites d'émission conçues pour empêcher, et lorsque cela n'est pas possible, réduire les émissions et l'impact sur l'environnement dans son ensemble. « Techniques » comprend la technologie utilisée et la manière dont l'installation est conçue, construite, entretenue, exploitée et désaffectée ; les techniques « disponibles » sont celles qui sont développées dans une mesure qui permet leur mise en œuvre dans le secteur industriel concerné, dans des conditions économiques et techniques viables, en tenant compte des coûts et des avantages, que les techniques soient ou non utilisées ou produites dans l'Etat membre en question, tant qu'elles sont raisonnablement accessibles par l'opérateur ; « meilleure » signifie la plus efficace pour atteindre un niveau global élevé de protection de l'environnement.

Tableau 9: Exemple d'informations issues de la base de données d'EINSTEIN traitant des mesures générales d'économies et des meilleures technologies disponibles pour l'industrie alimentaire.

UNIT OPERATION	TYPICAL PROCESS	TECHNOLOGY	ENERGY EFFICIENCY MEASURE
01-CLEANING	0101-Cleaning of bottles and case	General measures	Install heat exchangers to recover thermal energy from condensate in its bottle washing section and fuel oil heater condensate
01-CLEANING	0101-Cleaning of bottles and case	Methodology	Cascaded use of wash water
01-CLEANING	0103-Cleaning of production halls	General measures	Low temperature detergents in washing; Use of final rinsing water for pre-rinsing, intermediate rinsing or the preparation of cleaning solution (often used in CIP systems); turbidity detectors can optimize the reuse of water
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Flash pasteurization	Reuse pasteurizing overflow water
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Use store heat / solar heat for heating system for start up
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	High efficiency pumps, VS drives
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Preheat incoming containers (ambient air, solar)
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Local generation of hot water
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Use of hot water instead of steam (no distribution losses, no HEX losses etc.)
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Insulating high temperature zones of unit
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Thinner glass / more conductive materials lower the driving temperature (temp drop across glass now: 5-15°C)
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Even heating/cooling increase heat transfer and shorten process times
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Immersion, spraying from below, or other heat transfer systems may increase internal convection and allow process time to be shorter
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Aiming at very little temperature increase of containers leaving the unit (normally +20°C compared to entrance temp)
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Tunnel pasteurization	Evaporatively cooled water, absorption or ejector cooling with waste heat or other strategies may be used for cooling, if necessary
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Microwave pasteurization	Reuse pasteurizing overflow water
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Microwave pasteurization	Possible use in conjunction with heat recovery or at variable basis to achieve specified temperatures where variable heat sources are available or flow rates vary. Efficiency at 90% (conversion from electricity). Power from cogeneration can enhance economic/ecological performance.
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Mechanical pasteurisation	Reducing pressure drop over filters is decisive. Strategies using centrifuges
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Irradiation for pasteurisation	
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Ultrasonic pasteurisation	
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Ultraviolet radiation for sterilization	
05-PASTEURISATION	0501-Pasteurization	Microfiltration for sterilization and clarification	
07-COOKING	0701-Cooking and boiling	General measures	Use of vapour condensers in wort boiling to collect hot water from condensate
07-COOKING	0701-Cooking and boiling	Wort boiling with mechanical vapour recompression	
07-COOKING	0701-Cooking and boiling	Wort boiling with thermal vapour recompression	
07-COOKING	0701-Cooking and boiling	Steineker Merlin wort boiling system	
07-COOKING	0701-Cooking and boiling	Brewing at high specific gravity	

La base de données a été mise en place pour résumer les meilleures technologies disponibles et les possibilités d'optimisation des processus pour les différentes unités d'exploitation des différents secteurs. Cela permet à l'utilisateur de connaître d'autres solutions appliquées dans d'autres secteurs industriels pour des problèmes d'ingénierie similaires.

Pour plus d'informations sur les technologies et les mesures d'efficacité proposées, un lien vers le *Site Wiki sur le Rendement Énergétique* peut être suivi. Sur ce site Wiki, la matrice d'indicateurs de processus industriels (développés dans la tâche IEA 33/IV) est publiée, et les sections sur les technologies compétitives sont constamment développées pour inclure davantage de détails sur les technologies efficaces et les meilleures techniques disponibles.

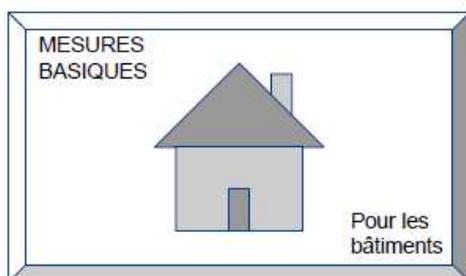
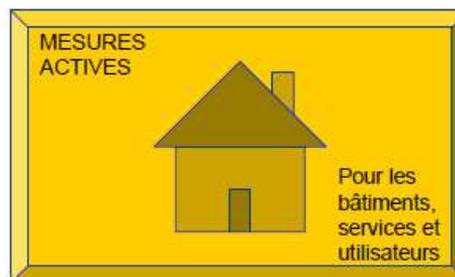
Outils du module d'optimisation des processus

- ✗ Base de données des meilleures technologies disponibles et mesures d'optimisation des processus pour les différentes unités d'exploitation
- ✗ Outil d'identification pour les possibilités d'optimisation de la technologie et de l'équipement utilisés pour les processus.

3.7.2.2 Réduction des besoins dans les bâtiments

Les principales mesures d'amélioration énergétique dans les bâtiments peuvent être divisées en mesures BASIQUES et en mesures ACTIVES (voir Figure 22).

- ✓ système de chauffage optimisé
- ✓ utilisation de sources d'énergies renouvelables
- ✓ système de contrôle du chauffage optimisé
- ✓ système de ventilation optimisé
- ✓ comportement / briefing de l'utilisateur



- ✓ isolation extérieure complète
- ✓ optimisation thermique des portes et fenêtres
- ✓ étanchéité à l'air
- ✓ ombre externe
- ✓ refroidissement naturel

Figure 22 : Deux niveaux de mesures d'amélioration, les MESURES BASIQUES et les MESURES ACTIVES, conduisent à l'efficacité énergétique et à un bon environnement intérieur (Référence : AEE INTEC)

Selon l'implantation des bâtiments dans une zone climatique chaude, tempérée ou froide (régulée par des températures extérieures les plus basses et moyennes pendant la période de chauffage, des températures extérieures moyennes pendant l'été, le chauffage solaire pendant la journée et le rayonnement solaire), six mesures principales peuvent être suggérées pour optimiser le rendement du chauffage et du refroidissement des bâtiments (mesures suggérées pour les zones climatiques européennes [Knotzer et Geier, 2010]).

Isolation extérieure complète

Sous tous les climats, il faut isoler les bâtiments ; l'épaisseur de la couche varie de 5 cm dans le sud de l'Europe à 40 cm dans le nord. Avant l'isolation, il est vital d'étudier les composants du bâtiment (murs au sol, plafonds...) minutieusement, pour détecter les montées capillaires et l'humidité absorbée. Si l'un de ces phénomènes est détecté, ils doivent être immédiatement déshumidifiés. Pour des raisons physiques, la couche d'isolation doit être positionnée à l'extérieur de la structure porteuse. Ensuite, il est plus facile d'éviter les ponts thermiques, de couvrir les cadres des fenêtres avec de l'isolation, de conserver la chaleur et le tampon d'humidité des composants du bâtiment dans la coquille thermique. L'isolation intérieure est principalement utilisée pour les bâtiments anciens, mais il est plus difficile de gérer les défis physiques du bâtiment. Grâce à ces mesures, les pertes de chaleur sont réduites et les ponts thermiques peuvent être évités, ce qui conduit à une réduction des besoins énergétiques du bâtiment allant jusqu'à 70 %. Le confort thermique dans le bâtiment est également amélioré.

Fenêtres et portes thermiquement optimisées

Sous tous les climats européens, nous avons besoin d'une meilleure isolation des vitrages, des fenêtres et des portes. Cela est très important sous les climats froids et tempérés, mais aussi de plus en plus courant sous les climats chauds. Non seulement la valeur de l'isolation des fenêtres et des portes est très importante pour améliorer le rendement énergétique du bâtiment, mais aussi leur fixation dans le bardage – la couche d'isolation extérieure doit couvrir une grande partie du cadre de la fenêtre (sur site) pour le protéger de la chaleur et protéger les joints de la sécheresse, etc. Ainsi, les pertes de chaleur sont réduites et l'énergie solaire « passive » est contenue, ce qui conduit à une réduction du besoin énergétique du bâtiment allant jusqu'à 25 %. L'environnement intérieur est amélioré par un confort thermique, ainsi que la réduction de la sécheresse, des surfaces froides et du risque de condensation.

Étanchéité

Sous tous les climats européens, mais principalement sous les climats les plus froids et tempérés, nous avons besoin d'une enveloppe étanche du bâtiment. La chose la plus importante est de décider l'endroit où l'enveloppe étanche sera située (côté intérieur du mur extérieur ou entre l'ancienne et la nouvelle façade, etc.) et comment les fenêtres, les portes et les ouvertures du bâtiment seront intégrées dans l'enveloppe étanche. Avec ces mesures, les pertes par infiltration/ventilation peuvent être réduites et l'environnement intérieur sera positivement influencé en améliorant le confort intérieur, réduisant la sécheresse et les surfaces froides ainsi que le risque de condensation.

Ombrage extérieur

Cette mesure est nécessaire pour conserver le confort thermique intérieur pendant la saison chaude. Bien sûr, elle est importante sous les climats chauds, mais son importance s'accroît sensiblement sous les climats froids. Il existe différentes raisons pour cela, comme la charge de chaleur intérieure supérieure (équipement technique, éclairage), les grandes baies vitrées sans possibilité d'utiliser un dispositif d'ombrage, etc. Grâce à l'ombrage extérieur, les besoins en refroidissement ainsi que la consommation électrique pour la lumière artificielle peuvent être réduits, en associant l'utilisation de la lumière du jour. De plus, l'environnement intérieur peut être amélioré en évitant les sur-températures pendant l'été et en utilisant l'éclairage naturel.

Refroidissement naturel

Sous les climats européens chauds, les toits ventilés et les toits et les façades peints de couleur claire sont très utiles pour protéger le bâtiment de la chaleur. La ventilation naturelle croisée et le refroidissement nocturne associés à l'isolation externe et au stockage de la chaleur intérieure sont utilisés pour maintenir un climat intérieur adapté pendant la saison estivale et aussi pendant les climats tempérés froids. Ainsi, le besoin en refroidissement peut être réduit et les sur-températures estivales évitées.

Information/comportement de l'utilisateur

Tout processus de rénovation d'un bâtiment résidentiel représente un effort technique et organisationnel, mais aussi social et communicatif, visant à guider les résidents (les utilisateurs) pour améliorer la consommation d'énergie et l'environnement intérieur. La compréhension des utilisateurs en ce qui concerne les actions pendant la rénovation, mais aussi en ce qui concerne l'utilisation du bâtiment après celle-ci est très importante pour obtenir toutes les performances du processus. Il est très important de donner aux résidents des outils et des informations, afin qu'ils puissent appréhender ce qu'ils gèrent (les services du bâtiment, les besoins en électricité des différents appareils, le système de ventilation, etc.). Ainsi, l'utilisation finale d'énergie décroît, le rendement augmente et le climat intérieur devient plus stable.

Chauffage solaire des bâtiments d'usine

Dans un bâtiment d'usine, les besoins spécifiques en énergie de chauffage varient selon la température du bâtiment, le taux d'échange d'air, la qualité de l'isolation et les gains internes. Dans le cadre de la tâche IEA 33/IV, l'AEE INTEC a simulé différents scénarios dans un bâtiment d'usine de référence en Autriche (besoin en chauffage de 70 kWh/(m²a), 1 000 m² de superficie, 6 m de hauteur, 1 équipe, 15 ouvriers et un gain interne d'éclairage de 5 W/m²). Il a été démontré que par rapport au bâtiment de référence, le besoin en chauffage a augmenté jusqu'à 105 kWh/(m²a) en réduisant l'isolation, et même jusqu'à 150 kWh/(m²a) lorsqu'en plus de la réduction de l'isolation, l'échange d'air a été augmenté. Grâce aux gains internes produits par les machines dans le bâtiment, les besoins en chauffage ont été réduits à environ 50 kWh/(m²a). En se basant sur les travaux réalisés par l'IEA Tâche 33/IV, l'énergie thermosolaire semble une bonne solution pour le chauffage de l'espace des bâtiments industriels s'il n'y a pas suffisamment de perte de chaleur disponible dans le cadre des opérations de l'entreprise (pour plus d'informations, consultez Jähniq et Weiss [2007]).

Références et documentation :

Knotzer, A., Geier, S. (2010) : *SQUARE – A System for Quality Assurance when Retrofitting Existing Buildings to Energy Efficient Buildings, Energy Improvement Measures and their Effect on the Indoor Environment*, SQUARE project (EIE/07/093/SI2.466701), Work Package 5 Energy Improvement Measures, Deliverable 5.1 report, AEE INTEC, Gleisdorf, Austria

Jähmig, D., Weiss W.(2007): *Design Guidelines – Solar Space Heating of Factory Buildings – With Underfloor Heating Systems*, Booklet prepared as part of the IEA Task 33/IV – Solar Heat for Industrial Processes, published by AEE INTEC, Gleisdorf, Austria

3.7.3 Préconception d'échangeur de chaleur et réseau de stockage

Après avoir collecté toutes les données relatives à ce sujet et avoir analysé le potentiel d'économies d'énergie réalisables grâce à l'utilisation de technologies de processus énergétiquement plus efficaces, l'étape suivante de la méthodologie d'audit est une analyse structurée du potentiel d'économies supplémentaires grâce à la récupération de chaleur. Cela est très important, car l'application de toutes mesures d'efficacité énergétique avant de changer de systèmes de fourniture d'énergie assure un concept global efficace pour un approvisionnement futur durable et évite le surdimensionnement de l'équipement.

L'intégration de la chaleur est une méthodologie bien développée pour l'optimisation des processus thermiques depuis les années 70 [Linnhoff et Hindmarsh, 1983]. Grâce à l'analyse Pinch (décrite en détail dans la section 2.5), le potentiel de récupération de chaleur peut être présenté dans un système de flux d'énergie. Sur la base des données collectées à partir des processus et de l'équipement d'approvisionnement de l'entreprise et sur la base du bilan énergétique, « des flux d'enthalpie » peuvent être définis, qui indiquent le besoin énergétique ou l'énergie disponible pour un processus.

Par exemple, les flux d'énergie dans une machine de nettoyage de bouteilles, avec les paramètres suivants, sont détaillés dans le Tableau 10 :

- * Volume des récipients dans la machine : 5 m³ au total
- * Température de l'eau froide = 10°C
- * Température de l'eau dans la machine = 60°C
- * Entrée d'eau froide pendant l'utilisation continue = 10 m³/j
- * Entrée de chaleur pendant l'utilisation (chauffage de l'eau d'admission et pertes thermiques, évaporation négligeable) = 90 kW
- * Planification de l'opération : Démarrage de 6 h à 6 h 30, utilisation continue de 6 h 30 à 16 h.
- * Température de l'eau rejetée = 50°C
- * Température à laquelle l'eau rejetée peut être refroidie : 5°C

Tableau 10 : Flux d'enthalpie pour l'exemple d'une machine de nettoyage de bouteilles.

Nom	Température de départ	Température de fin	Flux	Puissance requise/ chaleur perdue	Planification de l'opération
	°C	°C	kg/h	kW	
Démarrage	10	60	10.000	582	6 h 00-6 h 30
Chauffage continu de l'eau entrante	10	60	1.053	61	6 h 30 à 16 h 00
Chauffage supplémentaire pendant l'utilisation pour compenser les pertes thermiques	60	60	-	29	6 h 30 à 16 h 00
Eau rejetée	50	5	1.053	55	6 h 30 à 16 h 00
Eau rejetée après l'arrêt de la machine	50	5	10.000	524	16 h 00-16 h 30

Ces flux peuvent être définis pour tous les processus et tous les équipements. L'accent sera mis sur les flux ayant l'impact thermique le plus important. A partir d'un tel tableau de flux, la courbe composée froid et chaud peut facilement être tracée et montre le potentiel maximal théorique de récupération de chaleur pour une ΔT_{min} définie sur les échangeurs de chaleur (voir aussi la section 2.5).



Figure 23 : Courbe composée chaud et froid pour une chaîne de production de lait, de fromage, de fromage blanc et de beurre.

La grande courbe composée montre le potentiel de récupération de chaleur du processus sous une forme légèrement différente, mais basée sur les mêmes données (voir la section 2.5 pour plus de détails). Ici, la différence entre la courbe composée chaud et froid est tracée, et de cette manière, la fourniture externe de chaud/froid nécessaire à différents niveaux de température est indiquée.

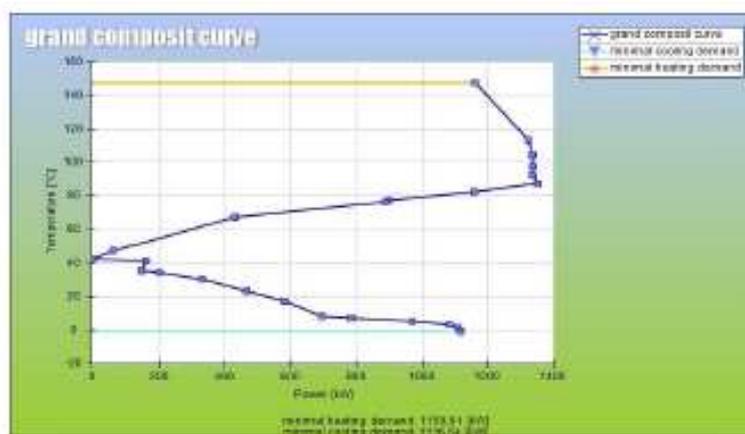


Figure 24 : Grande courbe composée pour une chaîne de production de lait, de fromage, de fromage blanc et de beurre.

A partir du potentiel théorique, un réseau d'échangeur de chaleur économiquement et techniquement adapté doit être identifié. Vous trouverez ici quelques critères généraux à prendre en compte :

- ✗ Utilisation de la chaleur à un certain niveau de température pour le chauffage d'autres flux à un niveau de température similaire (la destruction d'énergie à haute valeur – à des températures élevées – pour des applications à températures basses doit être évitée).
- ✗ Puissance d'échange de chaleur
- ✗ La totalité de l'énergie transférable sur les échangeurs de chaleur
- ✗ Planification des opérations des processus – Quand se produit chaque flux qui peut être utilisé pour un échange direct de chaleur ?
- ✗ Stockages – Les stockages sont-ils nécessaires pour un certain échange de chaleur entre deux flux ? Quelle est la quantité de pertes de stockage et quelle est la quantité totale d'énergie transférable ?
- ✗ L'intégration de la chaleur dans le même processus doit être prioritaire – Utilisation directe de la chaleur perdue.
- ✗ L'utilisation de chaleur qui doit être refroidie par une machine à refroidir pour que les processus de chauffage augmentent les économies d'énergie par l'échange de chaleur, car l'alimentation en énergie externe de la source de chaleur et le dissipateur de chaleur peuvent être réduits.
- ✗ Distance entre la source de chaleur (flux chaud) et le dissipateur de chaleur (flux froid).
- ✗ Problèmes pratiques, comme les facteurs d'erreur, la nécessité d'échange de chaleur indirect *via* un support de transfert de chaleur, les aspects de température et de pression, etc.
- ✗ Coûts d'investissement et coûts énergétiques économisés.

Ces calculs peuvent être réalisés à la main, mais pour les systèmes complexes, cette étape peut être assez longue. Des algorithmes pour une proposition automatique de réseaux d'échangeur de chaleur ont été développés par différents groupes de recherche. Cependant, la prise en compte des plannings et de la conception du stockage a rarement été intégrée. Aussi, la récupération de la chaleur interne avec pour but des économies d'énergie supérieures sur le réseau global n'est généralement pas prise en compte.

Grâce à EINSTEIN, une méthode basée sur la stratégie d'un réseau de récupération maximale d'énergie [Kemp, 2007] qui utilise les éléments de base de la *méthode de conception par pincement* [Linhoff et Hindmarsh, 1983] est appliquée pour une conception automatique d'un réseau d'échangeur de chaleur. Les échangeurs de chaleur sont sélectionnés à partir des valeurs nominales $q_m c_p$ des flux d'énergie. Plus tard, lors de la simulation du réseau d'échangeur de chaleur, la performance de l'échangeur de chaleur est simulée avec des enthalpies et des températures variant dans le temps. Dans cette simulation, la taille approximative d'un réservoir de stockage est également calculée.

Concepts de stockage

La prise en compte des processus par lots et des concepts de stockage est importante pour le développement des réseaux de récupération de chaleur dans l'industrie. Tout d'abord, les plannings d'utilisation générale des différents processus doivent être définis pour une semaine type. Ici, non seulement l'heure de début et de fin d'une équipe est importante, mais aussi le nombre de lots produits, la durée de chaque lot, etc., pour déterminer le véritable planning opérationnel. La Figure 25 donne un exemple portant sur un fermenteur de fromage.

Dans le fermenteur, le lait chaud est d'abord préchauffé, puis le lait reste dans le fermenteur alors que de l'eau préchauffée est ajoutée et enfin le petit-lait est extrait et refroidi. Pour ce délicat processus, nous prenons comme hypothèse un nettoyage du fermenteur tous les deux lots. Dans le cas où deux fermenteurs fonctionnent en parallèle, le planning devient plus continu, car les chaînes parallèles peuvent fonctionner en équipe.

Il est évident que la gestion de l'opération et une planification intelligente du besoin en chaleur peuvent non seulement réduire les pics de charge, mais aussi augmenter la continuité des flux.

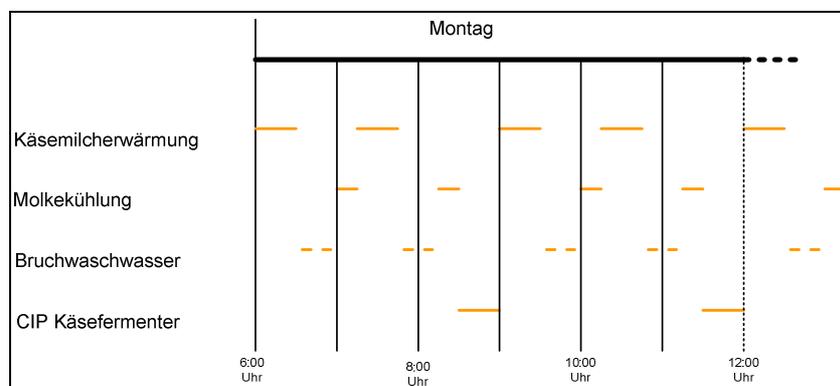


Figure 25 : Planning d'un fermenteur de fromage

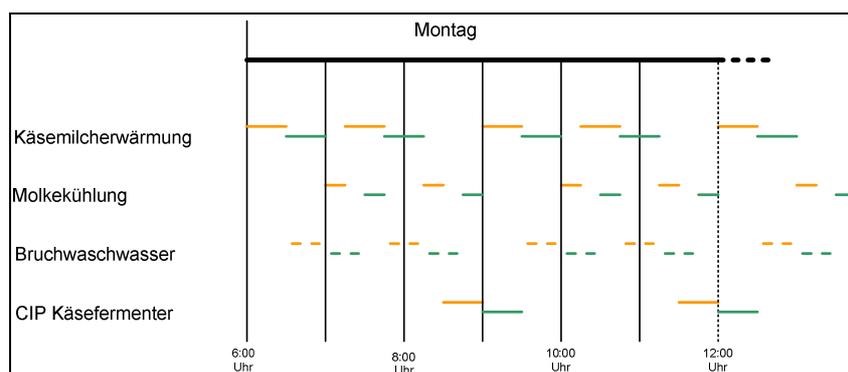


Figure 26 : Planning de deux fermenteurs de fromage fonctionnant en équipe

Toutefois, il existe de nombreux exemples où la continuité totale des processus ne peut pas être réalisée. Dans notre exemple du fermenteur, nous pouvons voir que nous avons toujours des pauses dans les plannings de production. Disons que si nous voulons échanger de la chaleur entre le lait à préchauffer et le petit-lait à refroidir, nous ne pouvons pas satisfaire notre échange de chaleur sans stockage.

Maintenant, un modèle par tranche horaire peut être appliqué. Les tranches horaires sont définies par les heures de début et de fin des processus. Quatre types de tranches horaires peuvent être définis :

1. Seule la source de chaleur est disponible
2. Seul le dissipateur de chaleur a besoin d'énergie
3. La source et le dissipateur fonctionnent simultanément
4. Aucun flux n'est observé

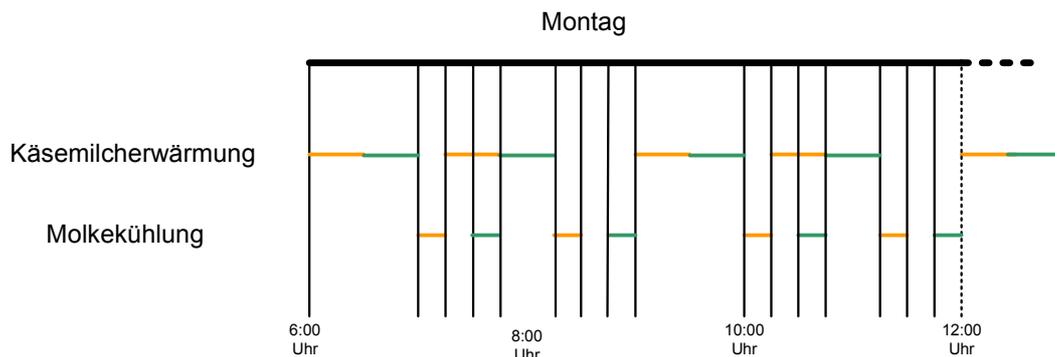


Figure 27 : Modèle par tranches horaires appliqué au préchauffage du lait de fromagerie et refroidissement du petit-lait.

Il existe des méthodologies qui appliquent les tranches horaires au réseau général de flux, puis calculent les réseaux d'échangeur de chaleur de chaque tranche horaire. Ici, une méthodologie différente est proposée. Elle sélectionne d'abord deux flux pour un échangeur de chaleur en fonction de quelques critères mentionnés ci-dessus, calcule leur capacité de stockage tout au long du modèle par tranche horaire, et enfin, calcule l'énergie totale transférable entre les deux flux. Cela est réalisé pour de nombreuses combinaisons de flux et finalement, la meilleure est sélectionnée (économie d'énergie la plus élevée avec un échangeur de chaleur).

Au sein de chaque tranche horaire, la différence entre le besoin énergétique et la disponibilité peut être calculée. Ces surplus ou besoins énergétiques forment la base de la conception du stockage. La conception est réalisée lors d'une simulation qui prend en compte le cumul, la taille adaptée du stockage, le volume courant du stockage et les pertes respectives de chaque période de temps.

Il est important d'indiquer que la première préconception des stockages est uniquement basée sur une simulation énergétique pour un réservoir de stockage standard et indique la capacité de stockage proposée pour chaque échangeur de chaleur. Sur cette base, l'expert peut choisir la quantité de stockage avec quels niveaux de température doit être installée en pratique.

Conception et échangeurs de chaleur proposés

Dans le but d'obtenir le transfert d'énergie le plus élevé possible, les échangeurs de chaleur proposés à cette étape conceptuelle seront tous des échangeurs de chaleur à contre-courant.

Pour une première estimation des coûts d'investissement des échangeurs de chaleur, la surface de l'échangeur de chaleur doit être définie. Comme indiqué ci-dessus (voir la section 2.5), il existe un échange entre l'énergie économisée et le coût de l'investissement qui dépend du choix de ΔT_{\min} . Ici, certaines valeurs standard existent dans les documents indiquant que ΔT_{\min} doit être choisie en fonction de la température et du statut physique des flux de masse (liquide, gazeux, condensat).

De plus, le coefficient de transfert de chaleur doit être défini pour calculer la surface nécessaire de l'échangeur de chaleur. Pour réaliser une première évaluation, les valeurs moyennes peuvent être définies

pour différents statuts physiques de flux. Dans une étape ultérieure, ces besoins doivent être recalculés en prenant en compte les caractéristiques réelles du flux.]

Le tableau suivant résume quelques valeurs standard appliquées dans EINSTEIN.

Tableau 11 : Valeurs standard pour ΔT_{min} et la coefficient de transfert de chaleur a

Etat physique	ΔT_{min} [°C]	Coefficient U de transfert de chaleur [W/m²K]
Liquide	5	5.000
Gazeux	10	100
Condensation	2,5	10.000

En pratique, les coefficients de transfert global de chaleur $U = (1/\alpha_1 + s/k + 1/\alpha_2)^{-1}$ dépendent du type d'échangeur de chaleur et de la turbulence créée, ainsi que du matériau de l'échangeur de chaleur. Cependant, les coefficients de transfert de chaleur moyens de chaque flux dans l'échangeur de chaleur indiqués dans le tableau ci-dessus sont la base de bonnes évaluations des coefficients du transfert total de chaleur dans différents types d'échangeurs de chaleur. L'inox peut être choisi comme matériau standard pour les échangeurs de chaleur.

Tableau 12 : Types d' échangeur de chaleur et coefficient de transfert global de chaleur

Echange de chaleur	Type d' échangeur de chaleur choisi dans EINSTEIN	Coefficient de transfert global de chaleur (matériau = inox) U [W/m²K]	Valeurs moyennes données dans l'abrégé de chaleur VDI [W/m²K]
Liquide - Liquide	Echangeur de chaleur à plaque	2.143	1000 – 4000
Gaz – liquide	Coque & tube	97	15-70
Condensation – liquide	Coque & tube	2724	500 – 4000
Gaz – gaz	Coque & tube	50	5-35
Condensation – gaz	Coque & tube	99	20 - 60

On observe que pour une première évaluation, seuls les échangeurs de chaleur à plaque et les échangeurs de chaleur coque & tube sont pris en compte. Lorsque la surface du transfert de chaleur est estimée, le choix du type d'échangeur de chaleur est également important pour effectuer une première estimation financière. Ici, les méthodes de calcul du coût issues des documentations peuvent être utilisées, ou les données recueillies auprès des fournisseurs.

Besoin en chaleur et courbes de disponibilité

Après la conception des échangeurs de chaleur et la définition des économies réalisées par la récupération de chaleur, le reste du besoin en chaleur et les courbes de disponibilités peuvent être tracés comme base d'une conception ultérieure des systèmes de fourniture énergétique. Les courbes de charge annuelle sont une bonne base pour la conception du nouvel équipement, car elles indiquent la quantité de chaleur requise et pendant combien d'heures par an. La taille idéale de l'équipement et ses heures en pleine charge respectives peuvent être déterminées à partir de cette base.

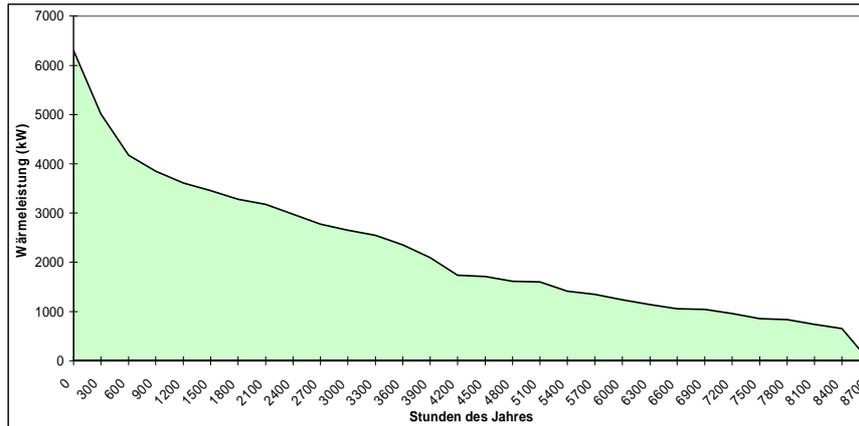


Figure 28 : Courbe de charge annuelle

A partir des données de flux énergétiques et de leur planning opérationnel, les courbes de charge peuvent être tracées après l'analyse Pinch. Puisque les températures sont également définies dans les flux énergétiques, les courbes de charge des besoins en chaleur jusqu'à différents niveaux de température peuvent être tracés. De cette manière, l'expert peut concevoir des équipements de production adaptés en fonction du besoin en chaleur qui existe à différents niveaux de température (voir la section 3.7.4 pour plus d'informations).

Modification du réseau d'échangeur de chaleur à la suite d'un remplacement des systèmes de production en énergie

Il peut être important dans certains cas de modifier le réseau d'échangeur de chaleur lorsque les systèmes de production en énergie ont été remplacés. Cela peut être le cas, par exemple, si l'échangeur de chaleur utilise le gaz de dégagement de la chaudière existante, laquelle est ensuite remplacée par une combinaison de chaudière à biomasse et une centrale solaire. Dans de nombreux cas, l'expert doit contrôler le réseau d'échangeur de chaleur proposé après la modification du système de production énergétique. Dans EINSTEIN, il est aussi possible de refaire les calculs du réseau d'échangeur de chaleur à partir du futur solde énergétique avec de nouveaux équipements de production.

Références et documentation :

Brienza, Gandy, Lackenbach (Eds.) (1983): *Heat Exchanger Design Handbook*. Hemisphere Publishing, New York, 1983.

Kemp, I.C. (2007): *Pinch Analysis and Process Integration*. Elsevier, Amsterdam, 2007.

Linnhoff B., Hindmarsh E. (1983): *The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks*, Chemical Engineering Science 38, No.5, 745-763.

Morand R., Bendel R., Brunner R., Pfenninger H. (2006): *Prozessintegration mit der Pinchmethode*, Handbuch zum BFE-Einführungskurs. Bundesamt für Energie, Bern, 2006.

Schnitzer H., Ferner H. (1990): *Optimierte Wärmeintegration in Industriebetrieben*. DBV Verlag, Graz, 1990.

Richard Turton, Richard C. Bailie, Wallace B. Whiting, Joseph A. Shaeiwitz (1998). *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes*. Prentice Hall International Series, Old Tappan, 1998.

Verein Deutscher Ingenieure (2006). VDI Wärmeatlas

3.7.4 Préconception de solutions alternatives de systèmes de production (incluant des changements de carburant et des changements dans le système de distribution)

L'objectif

Une fois les solutions de récupération de chaleur et les modifications des températures des processus examinées et appliquées (celles-ci nécessitent généralement moins d'investissement que les modifications du système de production de chaleur et de refroidissement et peuvent générer des réductions importantes des besoins énergétiques), la prochaine étape essentielle de la méthodologie d'audit EINSTEIN est la génération et la préconception de solutions alternatives d'approvisionnement, dans le but d'une réduction supplémentaire de la consommation énergétique.

Une solution ou une proposition alternative de fourniture de chaleur et de refroidissement est un ensemble alternatif d'équipement de production de chaleur et de refroidissement et un système de distribution qui peut remplacer l'existant, offrant des économies d'énergie et des avantages écologiques et économiques. La préconception de ce système alternatif implique la sélection de l'équipement adapté et l'évaluation de ses performances énergétiques, en prenant en compte les besoins en chaleur et en refroidissement et la disponibilité des processus et de la distribution temporelle.

Le point de départ de la conception du système de produit chaud & froid est l'analyse (la répartition) des besoins énergétiques généraux après l'optimisation du processus, la récupération de chaleur et la préconception du stockage, en prenant en compte les aspects suivants :

- * Le niveau de température du besoin en chaleur restant (après la récupération de chaleur).
- * La quantité de chaleur nécessaire et la disponibilité en rejet de chaleur.
- * La distribution temporelle du besoin en chaleur et la disponibilité en rejet de chaleur.
- * La disponibilité en espace.
- * La disponibilité en sources d'énergie alternative et leur coût (biomasse, etc.).

Approche méthodologique

L'optimisation du système général de production chaud & froid est basée sur l'hypothèse d'une *cascade de production de chaleur* pour les besoins généraux en chaud & froid :

- * Les équipements les plus efficaces fournissent de la chaleur en charge de base (grand nombre d'heures opérationnelles) et à des niveaux de température relativement faibles.
- * Le pic de charge restant et/ou le besoin restant de températures élevées est alors couvert par un équipement moins efficace, adapté à cette opération.

L'approche de la cascade de production de chaleur ne conduit pas nécessairement à une solution optimale et ne prend pas en compte les spécificités d'un système de distribution de chaleur particulier, mais donne une bonne approximation, qui peut alors être manuellement optimisée et adaptée au cas spécifique, selon l'expérience de l'auditeur.

Le processus de conception du système de production global est réalisé selon les différentes étapes ci-dessous :

- * La sélection du type d'équipement à utiliser dans la cascade de production de chaleur et l'ordre dans la cascade. Cette étape doit être réalisée manuellement par l'auditeur, même si le logiciel EINSTEIN propose, par défaut, un ordre pour l'équipement.
- * Le dimensionnement de l'équipement pour chaque type d'équipement dans la cascade. Dans ce but, le logiciel EINSTEIN dispose d'*assistants de conception* pour plusieurs technologies. Cette préconception automatique ou semi-automatique peut ensuite être affinée manuellement si besoin.

- × Sélection de la combinaison optimale de « l'ensemble ». Cette étape doit être réalisée essentiellement *a posteriori* grâce à une stratégie « essai et erreur » : différentes combinaisons alternatives de technologies peuvent être conçues de manière consécutive, puis comparées en fonction de leurs performances énergétiques, écologiques et économiques.
- × Dans de nombreux cas, l'optimisation de la séquence de récupération de chaleur – production chaud & froid doit être effectuée de manière itérative (en répétant la même séquence plusieurs fois), car un changement dans le système de production peut entraîner des changements dans la chaleur rejetée disponible, et peut ainsi affecter le potentiel de récupération de chaleur rejetée.

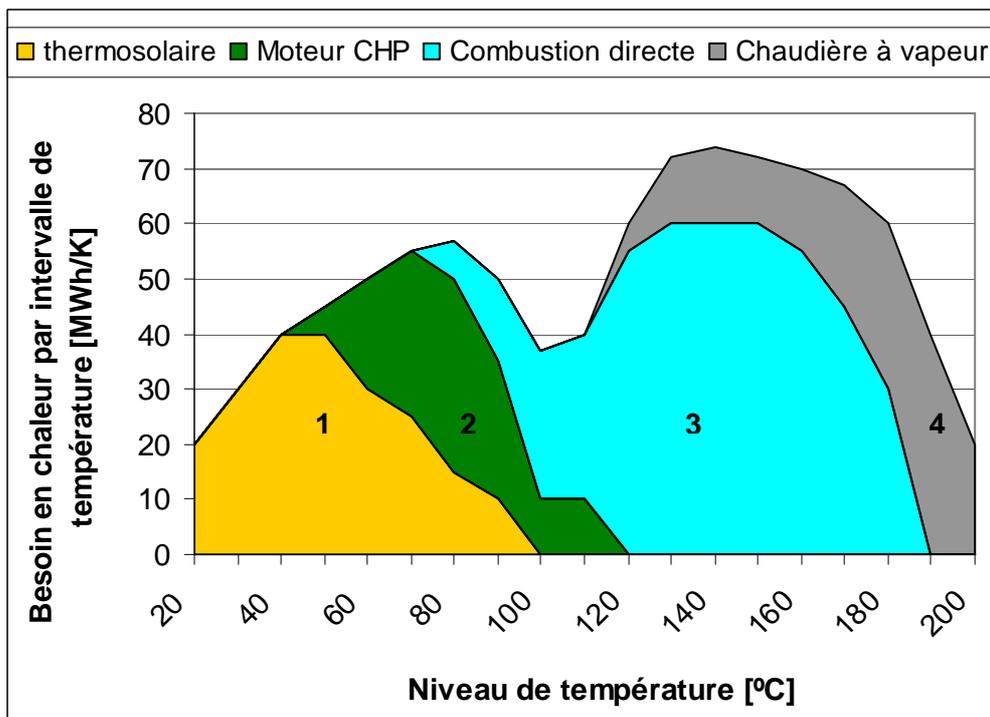


Figure 29 : Exemple : Participation au besoin général en chaleur pour différents niveaux de température, grâce à une cascade de production de chaleur formée par différents types d'équipement.

3.7.4.1 Stockage du chaud et du froid

La plupart des technologies de production énergétiquement efficaces (chaud et froid) – comme la cogénération, les pompes à chaleur, les énergies renouvelables qui seront décrites dans les sections suivantes – se distinguent des technologies « standard » (d'aujourd'hui) par :

- × Une consommation énergétique moindre et donc des coûts opérationnels inférieurs.
- × Des coûts d'investissement initial généralement supérieurs.

Alors que l'investissement initial est fixe (ne dépend que du type d'équipement), les économies énergétiques augmentent avec les heures d'utilisation annuelles de l'équipement. Cela signifie que la faisabilité économique de ces technologies dépend fortement du degré de continuité d'utilisation (nombre d'heures d'utilisation).

Par conséquent, généralement, ces équipements doivent être utilisés pour les applications de charge de base, alors que le pic de charge peut être plus efficacement couvert par des technologies énergétiquement moins efficaces.

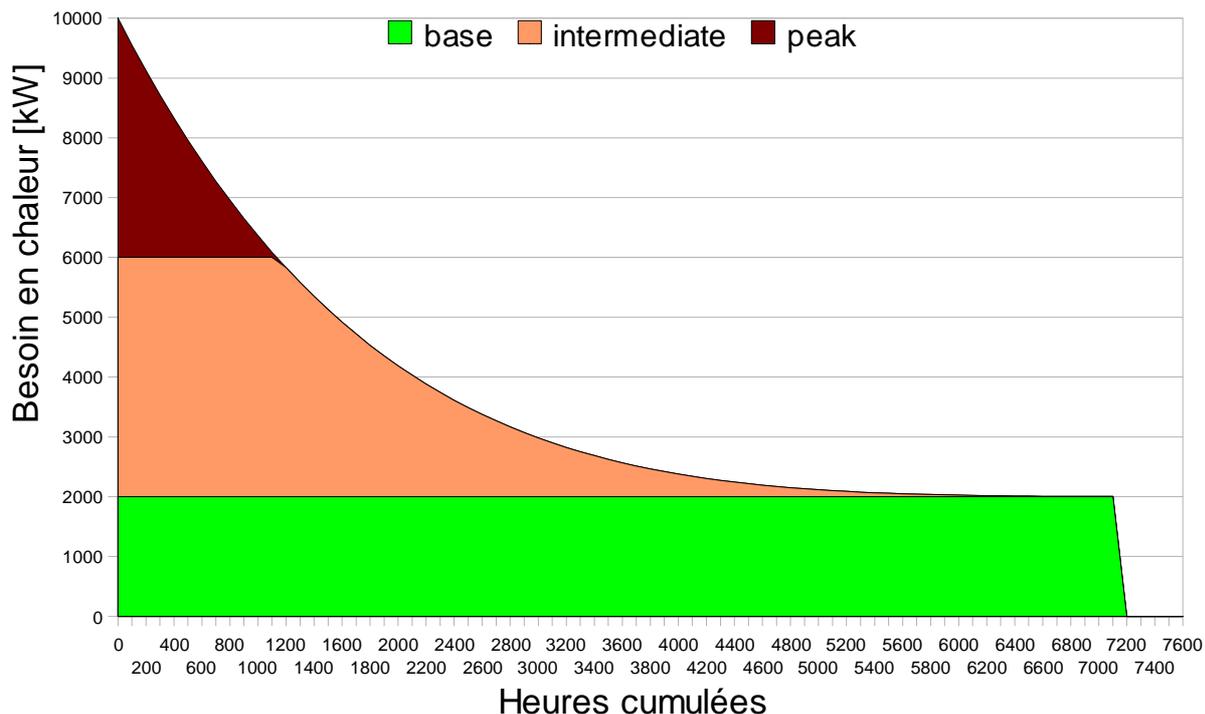


Figure 30 : Dimensionnement de l'équipement pour la charge de base, la charge intermédiaire et le pic de charge.

Les stockages de chaud et froid peuvent être utilisés dans de nombreux cas pour réduire le pic de charge et augmenter la fraction de la charge de base, permettant ainsi de couvrir une fraction supérieure du besoin total avec un équipement de production énergétiquement efficace.

Un système de stockage de chaud et froid optimisé ne doit donc pas être pris en compte seul, comme une technologie indépendante, mais comme faisant partie intégrante de toutes les solutions de production chaud et froid (HC) énergétiquement efficaces.

Les systèmes de stockage de chaud et froid (HC) les plus adaptés sont :

- * les stockages d'eau chaude/froide (le stockage de chaleur sensible dans des réservoirs pressurisés à des températures de stockage dépassant 150°C est possible),
- * les réservoirs de stockage de vapeur saturée,
- * le stockage d'huile thermique,
- * le stockage de matières solides (céramiques, lits de pierres, etc.),
- * le stockage de chaleur latente avec différents matériaux fusibles (stockages PCM),
- * le stockage de glace et le stockage de refroidissement latent dans d'autres PCM,
- * les stockages thermochimiques.

3.7.4.2 Distribution chaud et froid énergétiquement efficace

Dans de nombreux cas, un changement dans la distribution chaud et froid peut aider à réduire la consommation énergétique. Quelques-unes des possibilités suivantes doivent être analysées :

- * *Réduction du niveau de température* : Une réduction du niveau de température dans les systèmes de distribution peut aider à réduire les pertes dans les conduits et les stockages et à augmenter l'efficacité de conversion de l'équipement de production (chaudières, etc.). La réduction du niveau de température peut également être nécessaire pour appliquer des technologies à fort rendement énergétique (par exemple moteurs CHP, pompes à chaleur, thermosolaire).
- * *Combustion directe* : Dans certains cas (par exemple processus de séchage, chauffage de bains), la combustion directe ou l'utilisation directe des gaz d'échappement (des turbines de gaz, par exemple) peut augmenter le rendement du système, d'une part en éliminant les pertes de distribution, et d'autre part (pour le chauffage du bain, par exemple) grâce à l'utilisation de la chaleur de condensation de la vapeur d'eau contenue dans le gaz d'échappement. La combustion directe / l'utilisation directe des gaz d'échappement n'est généralement possible qu'avec des carburants propres, comme le gaz naturel ou le biogaz.

3.7.4.3. Chaleur, refroidissement et électricité combinés

Actuellement, la production combinée de chaleur et d'électricité est la manière la plus énergétiquement efficace de produire de l'électricité (mise à part la production d'électricité grâce aux sources d'énergie renouvelables), car elle optimise le processus de conversion du carburant en énergie en produisant de la chaleur et de l'électricité au lieu de la chaleur ou de l'électricité uniquement. En termes thermodynamiques, il n'est pas possible d'être plus efficace qu'avec un système combiné de chaleur et d'électricité, car pour une quantité de carburant (qu'il s'agisse de gaz naturel, de biomasse ou de tout carburant liquide), les systèmes combinés à haut rendement de chaleur et d'électricité produiront de la chaleur et de l'électricité avec des pertes minimales (généralement de 10 à 25 %). Généralement, les systèmes électriques seuls connaissent des pertes de conversion d'au moins 45 %.

Afin d'optimiser les économies d'énergie, une installation de cogénération devrait être conçue, afin de fournir la charge de chaleur au site industriel auquel elle appartient. Grâce à cela, le système combiné de chaleur et d'électricité sera optimisé. L'excès d'électricité produit peut être exporté sur le réseau électrique public et, généralement, reçoit un tarif ou des certificats (attention, les législations nationales requièrent souvent un pourcentage minimal de consommation électrique propre !) L'utilisation des centrales CHP pour la production d'électricité en dissipant seulement l'excès de chaleur dans l'air ambiant doit être évitée d'un point de vue d'efficacité énergétique, sauf si le rendement électrique de la centrale CHP est supérieur au rendement de conversion moyen du réseau électrique de référence.

Il existe de nombreuses manières de calculer les économies d'énergie primaire obtenues grâce à des installations combinées de chaleur et d'électricité : il est possible de comparer les quantités d'énergie économisées en comparant la production séparée de chaleur et d'électricité en utilisant le même carburant (par exemple, la biomasse solide si le système CHP utilise de la biomasse solide), ou on peut utiliser les chiffres moyens du réseau électrique (par exemple le mélange de production national ou UCTE) pour les calculs. Comme le CHP produit de la chaleur et de l'électricité, les économies d'énergie peuvent être attribuées à la chaleur produite, à l'électricité générée ou, dans certaines proportions, aux deux. Actuellement, nous distinguons deux approches majeures en Europe :

- * L'approche cogénération, selon la Directive 2004/8/CE, qui compare les systèmes CHP avec une production séparée de la chaleur et de l'électricité (basée sur les rendements de référence pour la production séparée). Cette approche est « symétrique » en chaleur et en électricité.
- * L'approche « *rendement électrique équivalent* » utilisée dans les pays comme l'Espagne et le Portugal, qui soustrait la quantité d'énergie qui aurait été nécessaire pour produire la chaleur avec un système conventionnel à partir d'une quantité de carburant, et ensuite calcule un rendement électrique théorique (qui peut être très élevé, généralement supérieur à 60 %).

Comme dans EINSTEIN, nous sommes concernés principalement par la production d'énergie *thermique* et, comme indiqué ci-dessus, l'exploitation énergétiquement optimale des centrales CHP devant être régie par le propre besoin en énergie *thermique*, nous sommes intéressés par la consommation nette spécifique d'énergie primaire par unité de chaleur produite avec la CHP, donnée par :

$$\frac{\Delta E_{PE}}{\Delta Q} = \frac{f_{PE}}{\eta_{th}^{CHP}} \left(1 - \frac{\eta_{el}^{CHP}}{\eta_{el}^{grid}} \right) \quad (3.2)$$

La consommation nette spécifique en énergie primaire peut même être négative (!), si le rendement électrique de la centrale CHP est supérieur au rendement électrique moyen des centrales électriques utilisées sur le réseau électrique.

A moyen terme, néanmoins, cette situation change, car le rendement du réseau électrique devient plus élevé (car le rendement de la centrale électrique augmente et – on l'espère – une quantité croissante d'électricité est générée à partir de sources d'énergie renouvelable). Comparées à un réseau électrique plus efficace, les économies relatives associées au CHP baissent.

Comme avec la plupart des équipements énergétiquement efficaces, l'exploitation économique d'un système CHP nécessite un grand nombre d'heures d'exploitation (généralement plus de 4 000 h/an). Ainsi, la CHP doit être conçue pour une charge de base et/ou en fonction du stockage de chaud ou froid.

Mis à part le besoin en chaleur produit par la CHP, le besoin en froid peut aussi être couvert (appelé *trigénération ou froid, chaleur et électricité combinés - CCHP*), en association avec des refroidisseurs thermiques (par exemple absorption ou refroidisseurs par absorption) qui convertissent la chaleur en froid. Les refroidisseurs thermiques nécessitent généralement une entrée de chaleur à un niveau de température compris entre 80°C et 180°C, selon la technologie.

Le choix de la technologie adaptée pour la CHP dépend de l'importance, de la continuité et du niveau de température du besoin en chaleur.

Tableau 13 : Technologies CHP disponibles

Technologie CHP	Niveau de Température	Rendement (él./thermique)
Moteur à gaz ou carburant	< 95 °C (eau de refroidissement) < 400 °C (gaz d'échappement)	(40% / 45 %)
Turbine à gaz	< 400 °C	(30 % / 60 %)
Turbine à vapeur	< 250 °C (limite pratique, selon la contre-pression)	(20 – 30 % / 65 %)
Cycle combiné (turbine à gaz + générateur de vapeur à récupération de chaleur + turbine à vapeur)	< 250 °C (limite pratique, selon la contre-pression dans la turbine à vapeur)	(50 - 55 % / 35 - 40%)
Turbine ORC (cycle organique de Rankine)	< 250 °C	(27- 50% / 30-55 %)
Moteur Stirling	<90 °C	(10-25 % / 60 – 80 %)
Pile à combustible	<80 °C (Technologie PEM) <400 °C (Technologie SOFC)	(45-60 % / 30 – 50 %)

Pour plus de renseignements :

OPET: Combined heat and power and district heating project. www.opet-chp.net.

COGENchallenge: The European information campaign on small-scale cogeneration. www.cogen-challenge.org.

COM 2004/8/EC: Directive on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market. www.managenergy.net/products/R81.htm.

UK Department for Environment, Food and Rural Affairs: Action in the UK - Combined heat and power. www.defra.gov.uk/environment/climatechange/uk/energy/chp/index.htm.

American Council for an Energy Efficient Economy: CHP – Capturing wasted Energy. www.aceee.org/pubs/ie983.htm.

3.7.4.4 Pompes à chaleur

Les pompes à chaleur sont utilisées pour augmenter le niveau de température de certaines sources de chaleur rejetée (ou de chaleur extraite de l'environnement : air ambiant ou sol) à un niveau suffisant pour que cette température puisse être utilisée dans le système de production de chaleur.

Les pompes à chaleur peuvent varier en taille et en concept, mais les types de pompes à chaleur les plus adaptées aux applications industrielles sont :

- * *Les pompes à chaleur à compression mécanique de vapeur*, qui utilisent généralement l'énergie électrique comme source moteur.
- * *Les pompes à chaleur à absorption*, qui utilisent l'énergie thermique sous forme d'eau chaude ou de vapeur.
- * *Les pompes à jets de vapeur*, qui utilisent la vapeur comme source moteur.

Les applications industrielles types sont le chauffage et le refroidissement de l'eau de processus, les processus de séchage, le chauffage de l'espace, les processus d'évaporation et de distillation et la récupération de la chaleur rejetée.

Points importants devant être pris en compte en ce qui concerne les applications utilisant des pompes à chaleur :

- * *Température de sortie*. Elle dépend du type de pompe à chaleur et des fluides de travail, mais elle se situe, normalement, entre 55 et 120°C. Quelques applications de type compression utilisant de l'eau comme un réfrigérant peuvent être utilisées à des températures supérieures, allant généralement de 80 à 150°C. Des températures allant jusqu'à 300°C ont été atteintes dans des centrales tests.
- * *Augmentation de la température*. Le coefficient de performance (COP) des pompes à chaleur dépend fortement de l'augmentation de température, c'est-à-dire de la différence de température entre la source de chaleur et la chaleur fournie, avec des COP supérieurs obtenus pour des augmentations de température plus faibles. Les augmentations de température types sont de 20 à 40 K dans la plupart des applications.
- * *Heures d'utilisation*. Les pompes à chaleur, comme d'autres technologies énergétiquement efficaces économisent des coûts énergétiques et opérationnels, mais représentent un investissement initial important. Ainsi, leur application sera davantage adaptée lorsque le besoin en chaleur est continu et assure des facteurs d'utilisation plus importants.
- * *Température de pincement*. La température de pincement (voir section 2.5) divise le besoin de chaleur global en deux parties : pour des températures supérieures au pincement, l'apport de chaleur externe est requis, alors que sous le pincement, il y a un excès de chaleur (rejet). Le bon positionnement d'une pompe à chaleur est « sur le pincement ». Cela signifie : utiliser la chaleur à une température sous le pincement (lorsqu'un excès est disponible) et la libérer pour des niveaux de température plus élevés au-dessus du pincement, lorsque l'apport de chaleur externe est requis.
- * *Forme de la production de chaleur et courbes de besoin en chaleur*. L'application de la pompe à chaleur peut être adaptée si, après l'application de la récupération de chaleur, il existe toujours un chevauchement dans le besoin global de chaleur et la disponibilité d'un rejet de chaleur, ou si l'amplitude de température est suffisamment petite (requis pour l'augmentation de température).

Pour plus de renseignements :

Des informations sur les technologies et les fournisseurs de pompes à chaleur sont disponibles sur le site internet du Centre de Pompe à Chaleur IEA : www.heatpumpcentre.org.

3.7.4.5 Energie thermosolaire

Couplage du système thermosolaire aux processus

Les systèmes de chauffage existants basés sur la vapeur ou sur l'eau chaude des chaudières sont souvent conçus pour des températures bien supérieures (150-180°C), comparativement à celle utilisée par les processus (100 °C ou même inférieures). Au contraire, le thermosolaire doit toujours être couplé au système de production de chaleur existant aux températures les plus basses possible. Néanmoins, la chaleur solaire doit être fournie au caloporteur uniquement après le préchauffage par la chaleur de rejet. En fait, l'association des deux systèmes produit de meilleurs résultats qu'un système thermosolaire pour des températures inférieures, mais sans la récupération de chaleur. Le système thermosolaire peut être couplé avec le système de production de chaleur conventionnel de plusieurs manières, y compris le couplage direct sur un processus spécifique, le préchauffage de l'eau ou la génération de chaleur dans le système central.

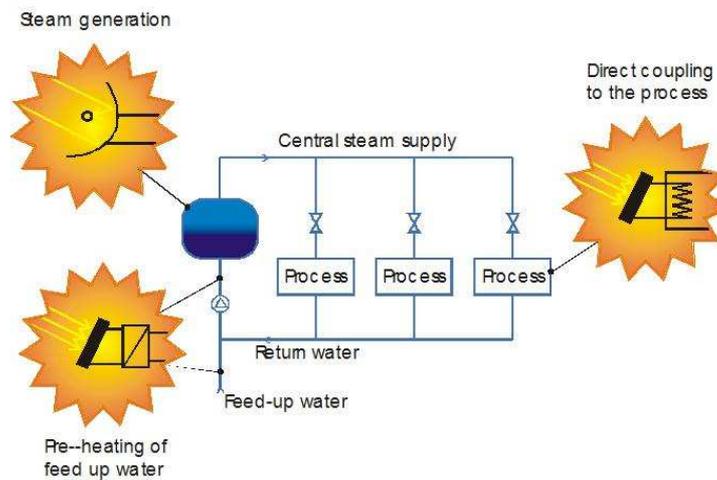


Figure 31. Couplage du système thermosolaire à la production de chaleur conventionnelle [Schweiger et al., 1999]

Chaque fois que cela est possible, un *couplage direct* des systèmes thermosolaires à un ou plusieurs processus est préférable, car les températures de travail sont inférieures. Le couplage direct à un processus peut être fait, principalement, des deux manières suivantes :

- × *Préchauffage d'un liquide circulant* (ex. eau « rentrante », retour de circuits fermés, préchauffage de l'air, etc.). En général, dans cette application, la température opérationnelle moyenne du système thermosolaire est inférieure à la température finale requise par le processus. Si la circulation est discontinue, l'installation d'un réservoir de stockage peut aussi être étudiée.
- × *Chauffage de baignoires, récipients et/ou chambres chaudes* (ex. séchage). L'énergie thermique est requise pour chauffer le liquide à la température de démarrage opérationnelle et aussi pour maintenir la température du processus constante. Les échangeurs de chaleur existants intégrés dans les récipients du processus sont généralement conçus pour fonctionner à des températures qui sont trop élevées pour un système thermosolaire. Lorsque les changements de machine ne sont pas possibles en raison de contraintes techniques, un échangeur de chaleur externe couplé à une pompe de circulation peut être utilisé. Si les baignoires des processus sont bien isolés, ils peuvent être utilisés pour le stockage de la chaleur solaire. Par exemple, en maintenant la température pendant l'arrêt du processus (généralement pendant le week-end), le système thermosolaire peut réduire le besoin en chaleur pour le démarrage.

Les unités d'exploitation les plus adaptées à l'intégration d'un système thermosolaire sont le nettoyage, le séchage, l'évaporation et la distillation, le blanchissement, la pasteurisation, la stérilisation, la cuisson, la peinture, le dégraissage et le refroidissement. En plus des processus de fabrication, le chauffage de l'espace et le refroidissement des bâtiments doivent être compris dans les applications cibles qui nécessitent de

l'énergie à basse ou moyenne température. Ultérieurement, les systèmes thermosolaires pourront être reliés aux refroidisseurs à pilotage thermique (refroidissement solaire).

Dans la plupart des industries, le couplage d'un système thermosolaire à la chaudière est également possible. Cela peut être fait soit en préchauffant l'eau « rentrante » des chaudières à vapeur ou grâce à un générateur de vapeur solaire. Dans le premier cas, la chaleur solaire peut être utilisée pour préchauffer l'eau fraîche à une température inférieure (si aucune autre solution de récupération de chaleur n'est possible) ou en augmentant davantage la température du condensat. La génération de vapeur solaire est viable uniquement sur des sites bénéficiant d'un rayonnement solaire élevé et si des collecteurs de concentration sont utilisés.

Collecteurs thermiques solaires pour la chaleur de processus

Le rendement instantané (η) d'un collecteur est défini par :

$$\eta = c_0 - (c_1 + c_2 \Delta T) * \frac{\Delta T}{G_T} \quad (3.3)$$

Où c_0 est l'efficacité optique, c_1 , c_2 sont les coefficients de perte de chaleur linéaires et quadratiques (c_1 [W/K m²] ; c_2 [W/K²m²]), ΔT [K] est la différence entre la température moyenne du caloporteur solaire et la température atmosphérique et G_T [W/m²] est la quantité de rayonnement solaire frappant le collecteur solaire.

A partir de cette définition, on peut facilement conclure que le rendement dépend fortement du site (c'est-à-dire de l'irradiation) et de la température opérationnelle, à cause des pertes thermiques dans le collecteur et dans les conduits.

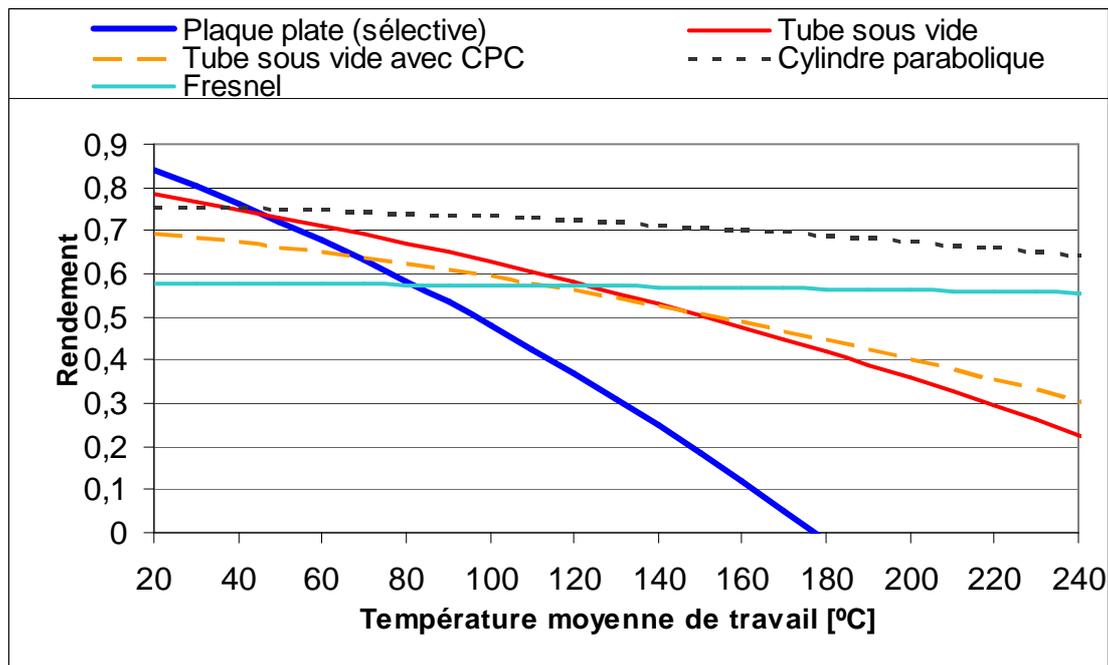


Figure 32. Rendement instantané pour des types de collecteurs solaires différents (se rapportant à la surface d'ouverture, au faisceau de rayonnement pour une incidence normale, $G_T = 1000 \text{ W/m}^2$) [energyXperts 2010]

Actuellement, pour les températures basses de processus (jusqu'à environ 80°C), les collecteurs plats à plaque (avec ou sans absorbeurs sélectifs) sont les solutions les plus viables. Il existe d'autres types de collecteurs, principalement utilisés pour les températures supérieures à cette amplitude (jusqu'à 250°C). Ce sont : les collecteurs plats à plaque à fort rendement (par exemple avec double vitrage antireflet), à tube évacué, à CPC stationnaire à faible concentration et les petits collecteurs paraboliques de Fresnel traversants et linéaires à concentration. De plus, d'autres technologies à concentration, comme les collecteurs à réflecteur stationnaire, sont en cours de développement.

Dimensionnement d'une centrale thermosolaire

En général, il existe une relation contraire entre la fraction solaire (c'est-à-dire la participation solaire au besoin global en chaleur) et le rendement thermosolaire spécifique du système (la chaleur solaire générée en fonction de la puissance thermique installée ou par unité de collecteurs solaires). Ainsi, lorsque vous dimensionnez une centrale thermosolaire, une optimisation techno-économique doit être réalisée. En règle générale, plus la fraction solaire augmente, plus le rendement énergétique spécifique décroît, en raison des températures opérationnelles des collecteurs solaires qui augmentent et d'une fréquence supérieure aux situations (en particulier l'été) dans lesquelles la disponibilité en énergie solaire dépasse le besoin.

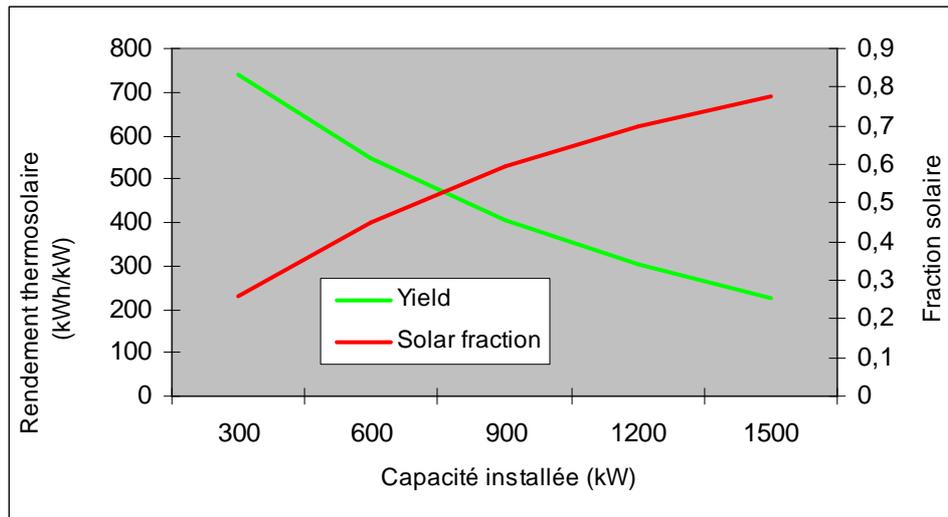


Figure 33. Fraction solaire et rendement thermosolaire pour différentes tailles de centrale

Profil de charge et stockage de la chaleur solaire

Lorsque le besoin en chaleur de processus est continu pendant la journée et la semaine (par exemple sans pause pendant le week-end), la centrale thermosolaire n'a pas besoin de stockage de chaleur, et la chaleur solaire peut être fournie directement à l'utilisateur final (processus ou système de production de chaleur). Il s'agit de la situation la plus favorable, car plus la conception du système est simple, plus le rendement énergétique est important et moins l'investissement est important.

Dans des cas où la charge est continue pendant la semaine, mais où il existe des fluctuations importantes de la demande quotidienne, un stockage de chaleur de 30 à 120 l/kW des collecteurs est recommandé. Si le profil de charge indique des pauses importantes (par exemple pendant le week-end), le volume du stockage recommandé est 120 à 200 l/kW. Le stockage pendant des périodes plus longues (stockage saisonnier) peut être pris en compte uniquement pour des systèmes très importants (> 3 000 kW).

Leçons apprises

Pour l'étude de faisabilité d'une centrale solaire de production de chaleur de processus, n'oubliez pas de vérifier :

- × Les températures de processus
- × Le profil de charge (lot, continu)
- × La disponibilité des stockages de chaleur intrinsèque au processus (ex. bains, conduits)
- × Les possibilités de couplage du solaire à l'équipement industriel existant (ex. les échangeurs de chaleur, la machinerie, etc.) et de connexion aux systèmes conventionnels de production de chaleur
- × Le potentiel de récupération de chaleur

- * La disponibilité de la surface au sol et/ou sur le toit pour l'installation (des images satellites peuvent être utilisées comme support supplémentaire).

Concernant ce dernier point, l'expérience montre que les espaces d'installation disponibles dans les sites industriels sont l'un des facteurs limitatifs de la mise en œuvre de centrales thermosolaires à grande échelle. Alors, n'oubliez pas d'étudier toutes les surfaces potentiellement utilisables pour l'installation !

Tableau 14. Critères de conception pour les centrales solaires de production de chaleur pour les processus industriels

Critère	Influence sur les performances énergétiques et économiques des systèmes thermosolaires
Température opérationnelle	Pour les températures opérationnelles inférieures à 200 °C, les performances sont les meilleures sous 100 °C
Climat	Très bonnes conditions dans les pays d'Europe centrale et du sud.
Continuité de la demande Variation annuelle Variation quotidienne	Les pauses en été réduisent les performances du système. Les pertes en gains solaires sont plus que proportionnelles à la durée de la pause. Les besoins continus ou avec des pics pendant la journée sont favorables. Des interruptions courtes (plusieurs heures) peuvent être compensées par un faible volume de stockage, avec une petite augmentation du coût du système.
Taille du système	Les performances économiques des systèmes thermosolaires dépendent fortement de la taille du système. Les coûts d'énergie solaire en résultat sont jusqu'à 50 % inférieurs pour les systèmes importants que pour les petits systèmes.
Rendement énergétique annuel	Le rendement énergétique annuel d'un système solaire doit être d'au moins 600 kWh/kW pour être rentable.
Fraction solaire	Les systèmes doivent être conçus pour les fractions solaires inférieures ou égales à environ 60 % (pour les besoins continus).
Superficie disponible au sol ou sur le toit	Il doit y avoir suffisamment de superficie disponible au sol ou sur le toit, afin d'obtenir des fractions solaires de 5 à 60 %. L'orientation au sud avec une inclinaison d'environ - 10° (latitude) est optimale pour optimiser la production annuelle d'énergie. De petites déviations par rapport à ces valeurs sont tolérables ($\pm 45^\circ$ par rapport à l'orientation sud, $\pm 15^\circ$ par rapport à l'inclinaison optimale). Les longs conduits doivent être évités.
Structure du toit	Le besoin de renfort des structures du toit augmente le coût du système et réduit donc la performance économique. La charge statique supplémentaire des collecteurs solaires est de 25 – 30 kg/m ² pour les collecteurs standard.
Récupération de la chaleur rejetée	Il faut d'abord étudier l'amélioration des possibilités d'augmenter le rendement énergétique par récupération de la chaleur rejetée. Les systèmes solaires doivent être conçus pour couvrir (une partie) du besoin restant en chaleur.

Références sur les technologies thermosolaires pour la chaleur de processus :

C.Vannoni, R. Battisti, S. Drigo (2008): *Potential for Solar Heat in Industrial Processes*. Published by CIEMAT, Madrid (Spain) 2008. Website: www.iea-shc.org/task33/index.html

D. Jaehnig, W.Weiss (2007): *Design Guidelines – Solar space heating of factory buildings. With underfloor heating systems*. Published by AEE INTEC with financial support of the Austrian Ministry for Transport, Innovation and Technology, Gleisdorf (Austria) 2007. Website: www.iea-shc.org/task33/index.html

energyXperts.NET (2010): *Elaboration based on manufacturer data for group of best market available solar collectors in Spain*.

ESTIF (2008): *Solar Thermal Action Plan for Europe (STAP)*. ESTIF Website: www.estif.org/281.0.html

H.Schweiger et al. (2001), POSHIP (Project No. NNE5-1999-0308): *The Potential of Solar Heat for Industrial Processes*, Final Report. Available for download at www.energyxperts.net/docs/POSHIP_FinalReport.zip

W. Weiss, M. Rommel (eds., 2007): *Process heat collectors*. State of the art within Task 33/IV, Editors:, Published by AEE INTEC with financial support of the Austrian Ministry for Transport, Innovation and Technology, Gleisdorf (Austria) 2007. Website: www.iea-shc.org/task33/index.html

3.7.4.6 Biomasse et biogaz

La biomasse et le biogaz sont des ressources qui peuvent avoir le potentiel d’approvisionner de grandes parties des processus industriels avec de l’énergie renouvelable. La biomasse utilisée par les brûleurs industriels comprend principalement des copeaux et des granulés de bois. La paille est également utilisée, mais requiert un équipement techniquement plus sophistiqué. Tout autre résidu biogénique issu du processus de production peut être utilisé. Toutefois, son utilisation dépendra largement de la valeur calorifique atteignable. De nouveau, cela dépend fortement du contenu en eau et du rendement du processus de séchage de la biomasse.

En général, les brûleurs de biomasse pour les applications d’eau chaude et d’eau surchauffée sont à la pointe. L’expérience est moindre pour les chaudières à vapeur utilisant la biomasse, mais ces types de chaudière ont été utilisés avec succès au cours des dernières années.

La fermentation des résidus biogéniques en biogaz offre de nouvelles possibilités pour son utilisation. Un avantage important est que la nécessité de sécher la biomasse avant la combustion n’existe pas pour le biogaz. Ici, le rendement dépend du processus de conversion, du rendement en méthane dans la phase gazeuse et du nettoyage nécessaire du biogaz (particulièrement important pour l’utilisation dans les moteurs). Au-delà de la production de chaleur, le biogaz peut aussi être utilisé dans différentes technologies, comme les chaudières à gaz CHP (ou gaz-solide combinés), les turbines à gaz et les piles à combustible.

Informations sur le biogaz

Le biogaz est un mélange de méthane, de CO₂, de H₂S, d’eau et d’autres gaz, qui est produit à partir de matières organiques dans des conditions d’anaérobie et à l’aide de micro-organismes. Le processus de production du biogaz est complexe et suit plusieurs étapes de fermentation. La qualité du produit dépend du type de substrat, des micro-organismes utilisés, des paramètres du processus (en particulier des températures et du niveau du PH) et du traitement du biogaz brut produit.

Dans des centrales de production de biogaz récentes, l’association de différents substrats est à la pointe (cofermentation). Cela implique la fermentation des fertilisants biologiques, comme le lisier, avec d’autres matières biogéniques brutes et déchets. Pour les applications industrielles, les utilisations de ces matériaux supplémentaires ont un potentiel important pour la production de biogaz sur site, pour réduire la dépendance vis-à-vis d’un approvisionnement énergétique extérieur. Dans le Tableau 15, vous trouverez listés les substrats possibles et leurs différentes sources :

Tableau 15 : Substrats de biogaz de différentes sources

Agriculture industry	Slaughter houses	Industry (e.g. food)	Canteen kitchen	commune
<ul style="list-style-type: none"> •Residues of harvesting •Energy plants •Liquid manure •Solid and liquid dung 	<ul style="list-style-type: none"> •Slaughter house waste water (grease,..) •Slaughter house solid waste (bowels) 	<ul style="list-style-type: none"> •mash •Brewer grains •yeast •Fruit pulp 	<ul style="list-style-type: none"> •Food residues •Kitchen waste •Waste grease 	<ul style="list-style-type: none"> •grass •Biogenic waste •Sewage sludge

Tableau 16 : Technologies de prétraitement du biogaz

Pre-treatment	examples
Mechanical/physical	Milling, chaffing, ultra sonic
chemical	Acids, base, wet oxidation
Bio-technological	Enzymes, fungi,
Thermal	Steam explosion, thermal pressure hydrolysis

Tableau 17 : Composition du biogaz à partir de différents substrats

components	Wood gas		Sewage gas	landfill gas	biogas	Biogas av.
	air	steam				
CH ₄	3 – 6 %	9 – 11 %	60 – 75 %	45 – 55 %	50 – 75 %	55 %
CO ₂	12 – 16 %	20 – 25 %	30 – 40 %	30 – 40 %	25 – 45 %	43,9 %
H ₂ S			< 1 %	50 – 300 ppm	0 – 1 %	0,05 %
H ₂ O			saturated	saturated	saturated	saturated
H ₂	11 – 16 %	33 – 40 %	traces		0 – 1 %	0,5 %
O ₂			< 1 %		0 – 1 %	0,1 %
N ₂	45 – 60 %	< 3 %	< 4 %	5 – 15 %	0 – 3 %	0,4 %
NH ₃					0 – 0,5 %	0,05 %
CO	13 – 18 %	25 – 30 %	traces		-	-
Heating value [kWh/m ³]	1,1 – 1,7	3,3 – 4,2	6 – 7,5	4,5 – 5,5	5 – 7,5	5,5

* Vol% on dry gas

Différentes technologies de traitement, comme le processus de fermentation à une ou deux étapes, les conditions mésophiles ou thermophiles et une fermentation humide ou sèche ont une influence sur la qualité et la quantité du produit. Le prétraitement du substrat, en particulier pour les matières en cellulose et en hémicellulose, a une influence positive importante sur le rendement du biogaz. Les technologies de pointe en matière de prétraitement sont détaillées dans le Tableau 16.

Afin d'augmenter la « valeur énergétique » du biogaz, et selon l'utilisation future du gaz, le biogaz brut doit être conditionné dans la plupart des cas. C'est principalement la suppression du CO₂, du H₂S et du H₂O qui augmente la valeur calorifique du biogaz et le rend ainsi applicable à différents domaines. Le gaz naturel a une valeur calorifique d'environ 10 kWh/m³, alors que le biogaz a généralement une valeur calorifique d'environ 6 kWh/m³. Cela signifie que pour la production de la même quantité d'énergie (pour un même rendement de conversion équivalent de l'équipement), 1,7 fois plus de biogaz est nécessaire par rapport au gaz naturel.

Pour plus de renseignements :

Ross, Charles C.; T. J. Drake (1996): Handbook of Biogas Utilization Vol. III, Second Edition.; Environmental Treatment Systems, Inc. July 1996

3.7.4.7 Chaudières et brûleurs à haut rendement

Afin d'évaluer la performance globale d'une chaudière existante pendant un audit énergétique, il est recommandé de contrôler : l'année d'installation ; les données techniques (fabricants, puissance nominale, etc.) ; l'état de l'isolation ; les fuites possibles ; la stratégie de contrôle de la chaudière.

Plusieurs mesures peuvent être mises en œuvre pour réduire la consommation énergétique d'un système de production de chaleur existant ou nouveau (par exemple chaudières, chaudières à vapeur, chaudière à condensation, etc.). Plus précisément, les éléments suivants doivent être pris en compte :

- ✗ L'utilisation d'électricité pour le chauffage des processus est très inefficace. Le rendement de conversion de l'énergie primaire en électricité utilisée dans le processus (y compris les pertes de distribution) est d'environ 30 %, par rapport à plus de 90 % pour les chaudières ou les brûleurs à gaz à haut rendement.
- ✗ Les chaudières d'eau chaude ont un rendement de conversion supérieur à celui des chaudières à vapeur, et pour les températures basses, même les chaudières à compensation peuvent être utilisées. Les pertes thermiques dans la distribution sont également réduites. De plus, le circuit d'eau chaude permet l'utilisation d'autres technologies à haut rendement, comme les CHP, les pompes à chaleur et l'énergie thermosolaire.
- ✗ Un niveau de pression de vapeur (et de température) moindre conduit à une réduction des pertes et des coûts thermiques.
- ✗ L'utilisation du gaz naturel, ou GPL, permet l'utilisation de technologies à haut rendement, comme les chaudières à condensation, la combustion directe, etc.
- ✗ Le rendement d'une chaudière décroît rapidement lorsqu'elle fonctionne avec une charge inférieure à 30 %. Ainsi, il peut être cohérent d'installer au moins deux chaudières en cascade pour fournir les besoins totaux en chaleur. Le surdimensionnement des chaudières doit être évité. Plus particulièrement, les chaudières à rendement supérieur doivent être utilisées comme chaudières avec une charge de base, alors que les chaudières à rendement moindre doivent couvrir seulement les pics de consommation.
- ✗ L'optimisation du contrôle peut aider à augmenter l'efficacité.
- ✗ Si les chaudières ou les fours sont régulièrement éteints à cause du changement de charge, la perte de chaleur causée par le tirage tirant l'air froid dans la chaudière peut être réduite de manière importante par l'utilisation des registres.
- ✗ Les principaux facteurs influençant le rendement sont les pertes de gaz d'évacuation et le rayonnement du bouclier. La réduction de la température du gaz d'évacuation et l'isolation de la chaudière conduisent toujours à une augmentation du rendement. Le réglage de l'excès du taux d'air contribue également à réduire les pertes en gaz d'évacuation et à améliorer le rendement de la chaudière.
- ✗ Le retour du condensat vers la chaudière à vapeur permet la récupération de l'énergie qu'il contient (jusqu'à 15 % de l'énergie requise pour la génération de vapeur).
- ✗ Afin de réduire la chaleur rejetée par le soufflage, le flux soufflé doit être réduit (en traitant de manière préliminaire l'eau « rentrante »), et la chaleur contenue dans le soufflage doit être récupérée. L'eau « rentrante » fraîche et traitée réduit d'autant plus le dépôt de calcaire, maintenant ainsi un bon échange de chaleur entre le gaz de combustion et le liquide à chauffer.
- ✗ L'installation d'un économiseur (un échangeur de chaleur supplémentaire pour le préchauffage de l'eau alimentant la chaudière par la récupération de la chaleur rejetée par les gaz d'évacuation) et/ou d'un préchauffeur d'air (récupérateur) augmentent le rendement global en récupérant la chaleur rejetée dans les gaz de dégagement.

Pour plus de renseignements :

The Energy Research Institute Department of Mechanical Engineering University of Cape Town. *How to save money and energy in boiler and furnaces systems*. Website: <http://www.3e.uct.ac.za>

Lawrence Berkeley National Laboratory Washington, DC for DOE, *Improving Steam system Performance a sourcebook for industry*. April 2004. Website: <http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/steamsourcebook.pdf>.

Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants. July 2006. Website: <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>

Ralph L. Vandagriff. Practical guide to industrial Boiler systems. 2001. Marcel Dekker, Inc. Website: www.dekker.com

V. Ganapathy ABCO Industries. Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators Design, Applications, and Calculations. 2003 Marcel Dekker, Inc. Website: www.dekker.com

3.7.4.8 Génération de froid à haut rendement

Les refroidisseurs industriels sont utilisés pour contrôler le refroidissement des produits et des machines de production, ou pour refroidir l'air conditionné dans les espaces de production. Il existe deux groupes de refroidisseurs, distingués en fonction du principe du cycle de réfrigération qu'ils utilisent :

- * *Les refroidisseurs par compression de la vapeur* utilisent l'énergie mécanique pour leur fonctionnement et sont alimentés par des moteurs électriques (la plupart du temps) ou par des turbines à vapeur ou à gaz. Selon le type de compresseur utilisé, les refroidisseurs par compression de la vapeur peuvent être classés dans les refroidisseurs inversés, à hélice, à vis et centrifuges. Le rendement énergétique (EER) des grandes applications de refroidissement par compression de la vapeur est généralement d'au moins 4,0.
- * *Les refroidisseurs thermiques* utilisent l'énergie thermique pour leur fonctionnement, fournie sous forme de vapeur, d'eau chaude ou de gaz d'échappement issus de la combustion. Les refroidisseurs thermiques les plus couramment utilisés sont les refroidisseurs par absorption. Les EER des refroidisseurs par absorption sont de 0,5 à 0,8 (simple effet) jusqu'à 1,0 à 1,3 (double effet)¹³.

Les refroidisseurs libèrent l'énergie absorbée par le support refroidi dans l'environnement. Ils peuvent libérer l'énergie dans l'air (refroidi par air) ou l'eau (refroidie par eau). Les refroidisseurs refroidis par eau utilisent généralement des tours de refroidissement humides qui améliorent leur efficacité thermodynamique par rapport aux refroidisseurs refroidis par air, grâce à une réduction du niveau de température du rejet de chaleur, mais engendrent un coût et une consommation d'eau supplémentaires.

Points importants à prendre en compte dans les applications et la conception d'un refroidisseur :

- * *Température de la production de froid.* Le rendement de conversion de la production de froid dépend fortement de la température d'évaporation (ou de la température à laquelle le froid est produit). Une température d'évaporation supérieure donnera un rendement énergétique supérieur. Dans de nombreuses applications, une unité de refroidissement produit du froid pour différents processus. Si des processus avec des niveaux différents de température froide existent, regroupez-les par température et produisez du froid avec la température la plus haute possible pour chacun des groupes. Une température d'eau refroidie supérieure permettra aussi d'augmenter l'utilisation du refroidissement libre (voir ci-dessous).
- * *Différence de température entre l'évaporation et la condensation.* Abaisse la différence de température entre le refroidissement produit et le niveau de température des résultats de rejet de chaleur avec un EER supérieur. Une conception adaptée de la tour de refroidissement et du circuit de retour du liquide de refroidissement peut en améliorer l'efficacité. Dans le cas où la chaleur des refroidisseurs est rejetée dans l'air ambiant, la température de condensation ou la température de l'eau de refroidissement traversant les tours de refroidissement sèches ou humides n'a pas besoin de rester à un niveau constant. Au lieu de cela, le niveau de température du liquide peut être adapté en fonction de la température extérieure, afin de réduire la différence entre l'évaporation et la condensation du refroidisseur.
- * *Exploitation partie-charge réduite - utilisation de cascades d'équipement.* La plupart des refroidisseurs voient généralement leur rendement chuter lors de l'exploitation avec une charge

¹³ Prend en considération que les refroidisseurs par absorption utilisent l'énergie thermique plutôt que l'énergie électrique ou mécanique dans le cas des refroidisseurs à compression mécanique de vapeur. Par conséquent les valeurs de COP ne peuvent être directement comparées

partielle. Si les charges de refroidissement sont fortement variables, par exemple pour l'air conditionné d'un bâtiment, il peut être utile d'utiliser un ou plusieurs refroidisseurs fonctionnant à une puissance nominale pour couvrir la charge de base, et d'utiliser un refroidisseur (de préférence en utilisant un turbocompresseur, qui a un meilleur comportement à charge partielle) pour couvrir les pics de refroidissement. L'exploitation à charge partielle peut aussi être réduite, et les heures d'utilisation peuvent être augmentées en utilisant le stockage du froid (élimination des pics).

- * *Disponibilité de chaleur à basse température de 80 à 90 °C.* La chaleur dans cette échelle de température peut être disponible dans la récupération de la chaleur rejetée, dans les centrales CHP (par exemple les moteurs) ou dans un système thermosolaire. Dans ces cas, l'application des refroidisseurs à entraînement thermique doit être prise en compte, en particulier dans les applications à grande échelle avec des facteurs d'utilisation élevés.
- * *Possibilité de refroidissement libre.* Les refroidisseurs doivent être utilisés uniquement dans des cas où la température de refroidissement nécessaire ne peut pas être atteinte directement en libérant la chaleur dans l'environnement. Sous de nombreux climats, la température ambiante peut être inférieure à la température du besoin en froid pendant des périodes importantes (pendant la nuit et/ou l'hiver). Différentes conceptions de refroidisseurs permettent le refroidissement libre pendant des périodes de température extérieure basse, en créant une boucle directe entre le support à refroidir et l'air extérieur. L'utilisation de ce type de refroidisseur peut donner lieu à d'importantes économies d'énergie. Les bons candidats pour les applications à refroidisseurs libres sont les processus qui ont une charge relativement constante sous des climats où les températures nocturnes ou hivernales sont basses.
- * *Utilisation de réfrigérants naturels et écologiques.* Lorsque vous sélectionnez un équipement par compression de vapeur, les aspects environnementaux concernant les réfrigérants utilisés doivent être pris en compte, en ayant à l'esprit les accords internationaux en la matière. Il est préférable d'utiliser des réfrigérants sans ODP (potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone) et à faible GWP (potentiel de réchauffement de la planète) et des réfrigérants naturels comme l'ammoniaque, le dioxyde de carbone, qui ont aussi d'excellentes propriétés thermophysiques assurant un haut rendement.
- * *Utilisation de la chaleur rejetée par le refroidisseur.* La chaleur rejetée par les condensateurs des refroidisseurs, et dans certains cas par le circuit de refroidissement du compresseur, qui est généralement dissipée dans les tours de refroidissement, peut être réutilisée pour le (pré-) chauffage des liquides à basse température (jusqu'à environ 50 °C, en utilisant le refroidisseur comme une pompe à chaleur ; l'augmentation de la chaleur jusqu'à 40 K entre la température de l'eau refroidie et la température du condensateur est possible). Le niveau de température de la chaleur rejetée peut être encore augmenté en utilisant une pompe à chaleur supplémentaire.

Pour plus de renseignements :

EU BREF. *Document de référence sur l'application des meilleures techniques disponibles pour les systèmes de refroidissement industriels.* Décembre 2001. La Commission européenne.

Cahier ASHRAE – Systèmes et équipement HVAC. ASHRAE, 2008.

EINSTEIN Etape 7 : design conceptuel des options de sauvegarde et définition des objectifs de l'énergie préliminaire

> check list des recommandations pour les sauvegardes d'énergie potentielles

> optimisation des processus et demandes concernant les opportunités

> analyser le potentiel de récupération de la chaleur

> pré-conception de l'échangeur de chaleur et réseau de stockage

> pré-conception du système de fourniture alternatif

3.8 Calcul de performance énergétique et analyse environnementale

Afin d'évaluer la consommation énergétique d'un système donné de chauffage et de climatisation, il convient de mettre en œuvre un modèle de calcul (simulation) du système. Pour ce faire, l'outil logiciel EINSTEIN propose un module de simulation de système disponible pour toutes les technologies.

3.8.1 Module de simulation de système EINSTEIN

Le calcul de performance énergétique interne d'EINSTEIN s'appuie sur la demande en chaleur et en climatisation des différents tuyaux ou conduites d'alimentation du système, et sur la puissance potentielle de sortie du matériel d'alimentation sous la forme d'une cascade d'alimentation en chauffage et en climatisation.

La demande en chauffage de chaque équipement $Q_{D,j} = Q_{D,j}(T, t)$ dépend des critères de température et de temps, selon les caractéristiques et programmations de processus. La puissance potentielle de sortie P_{nom} des différents équipements d'alimentation thermique dépend en règle générale des niveaux de température d'alimentation, et également, dans le cas des pompes à chaleur, de la disponibilité de chaleur résiduelle $Q_A = Q_A(T, t)$. La chaleur utile fournie par chacun des équipements à une position donnée j dans la cascade d'alimentation en chaleur peut ensuite être calculée en s'appuyant sur la demande en chaleur et sur la puissance nominale :

$$Q_{USH,j}(T, t) = \min [P_{nom}(T), Q_{D,j}(T, t)] \quad (3.4)$$

où

$$Q_{D,j} = Q_{D,j}(T, t) = \sum_{\text{conduites reliées}} Q_{D,m\text{res}}(T, t) . \quad (3.5)$$

et $Q_{D,m\text{res}}(T, t)$ est la demande en chaleur ou en climatisation résiduelle au niveau de la conduite ou du tuyau m , après qu'il/elle ait déjà bénéficié de l'alimentation en chaleur ou en climatisation des précédents équipements de la cascade, équipements 1 à $(j-1)$.

Les calculs effectués par l'outil de simulation de système EINSTEIN sont effectués par défaut par phases d'1 heure pour toute l'année, et prennent en compte la variation de la demande en temps et en température à diverses heures de la journée, selon les variations saisonnières, pendant les week-ends et les périodes de vacances.

La principale limite imposée par cet outil de calcul interne réside dans l'approche de « cascade d'alimentation en chaleur et en climatisation » utilisée : les détails et singularités de la stratégie réelle de contrôle et de régulation du système ne sont pas pris en compte dans les calculs énergétiques¹⁴, et peuvent uniquement être déterminés de façon approximative par une classification adaptée des équipements au sein de la cascade.

Pour obtenir un calcul plus détaillé et plus précis, il est possible d'utiliser un logiciel de simulation de système externe.

3.8.2 Simulation de système à l'aide d'un logiciel externe spécifique

Dans les cas où le module de simulation de système interne d'EINSTEIN pourrait ne pas être suffisamment précis, il convient d'utiliser un logiciel de simulation de système externe. Vous trouverez des références d'outils de simulation existants dans le rapport EINSTEIN des pratiques d'audit et des outils en lien avec l'énergie thermique [Vannoni et al., 2008].

¹⁴ Les pertes thermiques lors de la distribution sont prises en compte de façon approximative dans les calculs, en s'appuyant sur un rendement de distribution moyen global.

3.8.3 Analyse environnementale

Comme nous l'indiquions déjà dans le Chapitre 2.1., EINSTEIN utilise les paramètres suivants comme indicateurs principaux dans son évaluation environnementale :

- x *Consommation énergétique primaire* comme principal indicateur dans l'évaluation environnementale
- x *Production de CO₂*

x *Production de déchets nucléaires hautement radioactifs (HR)* (associée à la consommation électrique)

- x *Consommation en eau*

La quantité de paramètres liés à l'impact environnemental est directement tirée de la composition de la consommation énergétique finale du secteur résultant de l'analyse de performance énergétique décrite dans les précédentes rubriques.

Les paramètres de conversion à utiliser peuvent être configurés par l'utilisateur au sein des bases de données EINSTEIN pour les carburants et pour le mix électrique représentatif à appliquer.

En règle générale, on peut dire que la *consommation énergétique primaire* est le paramètre à utiliser de préférence comme indicateur principal, et qui doit être minimisé, car elle représente une moyenne (relativement pondérée) des différents types d'émissions.

Le paramètre des émissions de CO₂ – souvent utilisé comme indicateur environnemental – ne prend pas en compte les autres types d'émissions, comme par exemple les déchets radioactifs, et sous-estime par conséquent l'impact environnemental (généralement négatif) du passage de l'utilisation de carburants à celle de l'électricité au sein de pays présentant une forte contribution d'énergie nucléaire à la production d'électricité.

Références du chapitre 3.8.2

C.Vannoni et al. (2008): EINSTEIN Report: Review of Thermal Energy Auditing Practices and Tools.IEE Project EINSTEIN, Project deliverable D2.2. Disponible en téléchargement sur : www.einstein-energy.net

EINSTEIN Etape 8: Calcul de performance énergétique et analyse environnementale

> **Calcul rapide**

> **Simulation du système avec logiciel externe spécifique**

> **Analyse énergétique et environnementale**

3.9 Analyse économique et financière

L'analyse économique de la consommation énergétique donnée constitue l'une des questions les plus importantes pour l'entreprise. Il convient donc de mettre l'accent sur cette étape. En outre, plus les données récupérées aux fins de cette analyse seront détaillées, plus les résultats obtenus seront précis.

Pour procéder à l'analyse économique d'un système d'alimentation énergétique, il convient de comparer les coûts d'exploitation (énergétiques) avec ceux de l'équipement actuel. Par conséquent, une des méthodologies adaptées consiste à calculer tous les coûts qui apparaîtront dans le futur en cas d'utilisation de l'alimentation en chaleur et en climatisation actuelle, et de les comparer aux prévisions de coûts d'investissement et autres coûts en cas d'utilisation du système d'alimentation énergétique alternatif proposé. La différence de coûts correspond alors à la marge pouvant être réalisée grâce au changement de l'équipement d'alimentation.

En règle générale, il est nécessaire de prendre en compte les catégories de coût suivantes :

x Coûts d'investissement :

- offres de fournisseurs ou utilisation d'équipements d'occasion
- subventions et financement
- revenus pouvant être encaissés grâce à la vente de l'équipement remplacé

x Coûts d'exploitation :

- coûts énergétiques, y compris hausse attendue des prix de l'énergie
- entretien, coûts de la main d'œuvre, assurance, services, etc.

x Frais accessoires

- dans le cas où l'équipement actuel n'est pas remplacé : pénalités fiscales, coûts des actions correctives, coûts liés à la mise en conformité imposée par la loi, impacts négatifs sur les parts de marché, éligibilité au système d'échange de quotas d'émissions de CO₂, etc.
- dans le cas où le système d'alimentation énergétique est remplacé : avantages fiscaux, impacts positifs sur les parts de marché, amélioration de l'image de l'entreprise

x Coûts non récurrents

- travaux de réparation des équipements, échange des collecteurs, entretien irrégulier, coûts juridiques, coûts de prévention, etc.

Dans les évaluations de coûts traditionnelles, l'accent est souvent mis sur les coûts d'investissement et d'exploitation. Cependant, pour prendre en compte l'ensemble réel et global des coûts, il convient d'intégrer les frais accessoires et les coûts non récurrents, qui peuvent avoir un impact important sur le résultat final. L'analyse de coût doit être adaptée afin de détecter tous les paramètres ayant une influence sur la performance économique du rendement énergétique et sur l'installation de systèmes d'alimentation énergétique au sein des processus industriels, en plus des coûts énergétiques.

Pour réaliser une évaluation totale des coûts (ETC) basée sur une plus longue période et prenant également en compte les paramètres macroéconomiques, il convient d'intégrer les frais accessoires et les coûts non récurrents.

Il est évident que les paramètres suivants sont essentiels dans le résultat de l'évaluation des coûts :

x Taux d'intérêt nominal du financement externe

x Taux d'escompte spécifique de l'entreprise

x Prédiction de progression des prix de l'énergie

x Taux général d'inflation

x Durée de la période choisie pour l'analyse économique

Le résultat de l'analyse économique intègre l'investissement, la période de recouvrement et l'indice de rentabilité, mais doit également inclure les paramètres économiques qui représentent la performance économique sur une plus longue période.

Le taux de rendement interne et la progression de la valeur nette actualisée au fil des années sont ici extrêmement importants. (Pour connaître les détails du calcul, consulter la rubrique 2.6.

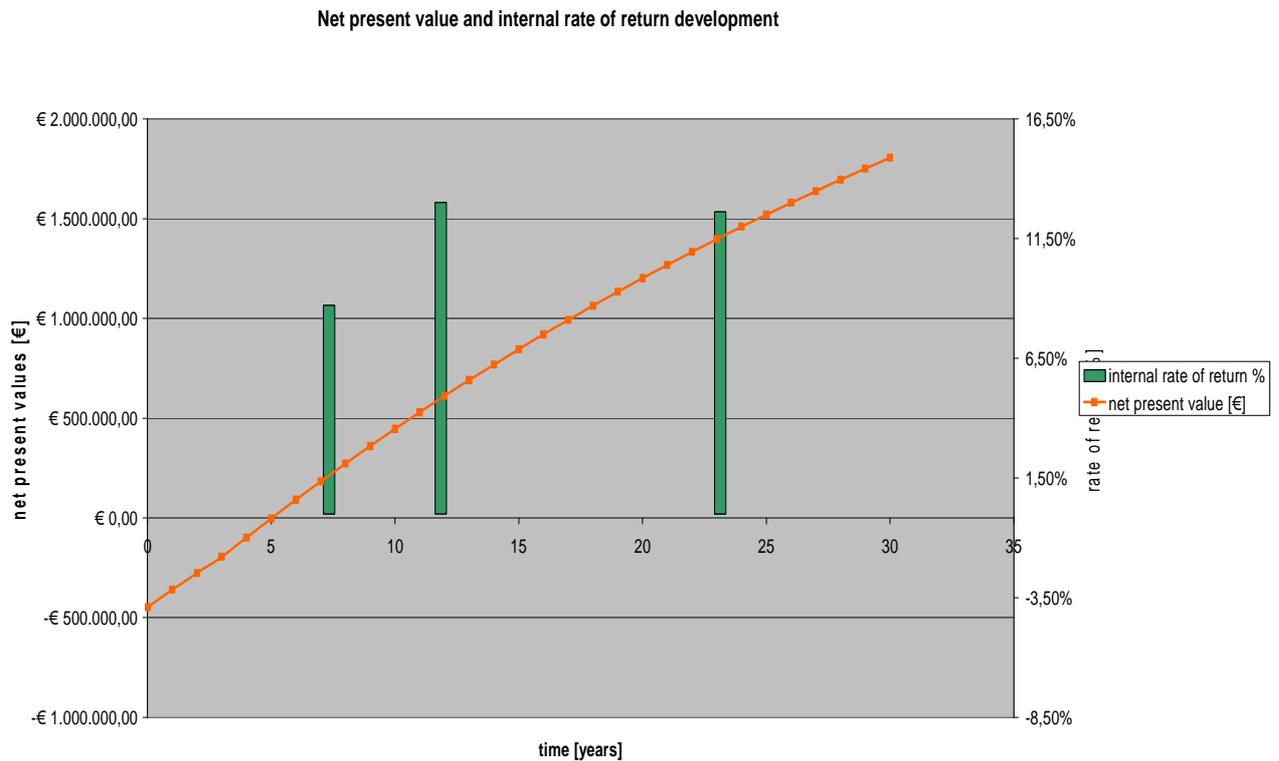


Figure 34 : Résultat de l'analyse économique

EINSTEIN Etape 9 : Analyse économique et financière

> calculer les principaux paramètres économiques

> évaluer les possibilités de financement externe et interne

> mettre au point un plan de financement adapté

3.10 Rédaction de rapport et présentation

3.10.1 Contenu du rapport

Une fois l'audit terminé, un *rapport d'audit* doit être rédigé, qui constituera le principal document produit au cours de ce processus.

Le rapport d'audit doit contenir (au minimum) les informations suivantes :

- x Une *synthèse de direction* mettant en avant les principaux résultats de l'audit

- x Les données ayant été rassemblées et/ou estimées au cours du processus d'audit et ayant été utilisées comme point de départ de l'analyse. Les *estimations* et les *hypothèses* produites par le responsable de l'audit et non intégrées aux données rassemblées doivent tout particulièrement être mises en avant.

- x Le détail de la consommation énergétique en l'état actuel des choses, comme définie dans le chapitre 3.6, et sa comparaison avec les données de référence repère.

- x Une description des différentes propositions alternatives analysées, mettant en avant les modifications requises en rapport avec l'état actuel de la situation, et les différentes caractéristiques de chacune des propositions alternatives.

Chaque proposition alternative devra être désigné par un acronyme court mais explicite qui servira à l'identification dans les tableaux et graphiques comparatifs.

*La description des propositions alternatives doit être accompagnée de schémas (schémas fonctionnels et/ou schémas hydrauliques) qui indiquent clairement la position du nouvel équipement au sein du système existant.

- x Tableaux comparatifs et figures présentant les principaux résultats (énergétiques, environnementaux, économiques) des différentes alternatives étudiées

- x Présentation d'une analyse financière détaillée de la solution finalement proposée (ou des solutions : dans certains cas, il peut être intéressant de ne pas proposer uniquement une « meilleure » alternative à l'entreprise, mais de la laisser faire le choix final). Dans ce cas-là, vous devez également indiquer la possibilité du financement par un tiers des investissements requis, de sources potentielles de financement externe et d'autres types d'avantages.

- x Une indication claire et une identification des aléas éventuels qui existent toujours à l'issue de la conduite d'un audit rapide, en particulier si ces derniers peuvent avoir un impact de taille sur la faisabilité des systèmes proposés.

Souligner les aspects devant faire l'objet d'une analyse plus détaillée avant prise de décision relative au changement de système.

L'outil logiciel EINSTEIN génère automatiquement un rapport d'audit standard contenant toutes ces informations. Ce rapport est produit sous la forme d'une feuille de calcul (OpenOffice) que vous pouvez éditer et modifier, en ajoutant manuellement du contenu, etc.

3.10.2 Présentation de l'entreprise

La présentation du rapport à l'entreprise doit toujours, dans la mesure du possible, être faite en personne, afin de vous permettre d'expliquer vos propositions, d'éviter tout malentendu, et de mettre en avant les avantages de votre proposition auprès des décisionnaires de l'entreprise.

Cependant, le rapport d'audit EINSTEIN doit être suffisamment clair pour pouvoir être transmis par courrier ou par e-mail, dans le cas où une présentation en personne n'est pas envisageable (par exemple, si l'éloignement de l'entreprise et le budget réduit ne permettent pas d'effectuer une seconde visite,...).

EINSTEIN Etape 10: création de rapport et présentation à l'entreprise

> mettre au point un rapport d'audit court et clair

> le présenter à l'entreprise

3.11 Apprentissage collectif

3.11.1 Partager son expérience avec la communauté

Chaque étude de cas que vous menez constitue une nouvelle expérience, qui présente des particularités, et doit être intégré à votre stock d'expérience, qui pourra être consulté par vos soins ou par les autres responsables d'audit lors de futurs audits. Ce processus d'apprentissage collectif peut être mené à différents niveaux, et de différentes façons :

x Partage des informations au sein de votre entreprise, de votre institut, de votre réseau. Une fois entrées dans la base de données EINSTEIN, les données sont accessibles lors de futurs audits : elles peuvent par exemple être utilisées comme repères supplémentaires au sein de secteurs similaires, comme source d'inspiration pour le type de mesures à proposer, etc.

x Partage des informations au sein de la communauté d'utilisateurs EINSTEIN. Les nouveaux projets mis au point par les utilisateurs seront intégrés aux versions suivantes du kit d'outils EINSTEIN. La confidentialité peut être respectée en rendant les données fournies anonymes (l'outil EINSTEIN offre dans ce domaine différentes options/différents niveaux de confidentialité qui permettent de supprimer certaines données des projets). La transmission des projets peut être effectuée par le biais de la page Web EINSTEIN www.einsteinenergy.net, ou par l'envoi d'une copie par e-mail aux développeurs EINSTEIN à l'adresse suivante : info@energyxperts.net.

x Les utilisateurs s'entraident : il existe un forum par e-mail au sein duquel les utilisateurs d'EINSTEIN peuvent partager leurs opinions, être aidés ou aider les autres. Inscrivez-vous simplement sur le site Web de l'outil EINSTEIN :

<https://lists.sourceforge.net/lists/listinfo/einstein-users>

3.11.2 Participer à l'amélioration de la méthodologie et de l'outil logiciel

EINSTEIN est quasiment parfait, mais pas encore totalement. Il y a toujours quelque chose à améliorer ; de nouvelles technologies ou de nouvelles données qui viennent de faire leur apparition ; des éléments qui n'ont pas encore été pris en compte ; des cas particuliers qui peuvent difficilement être correctement représentés à l'aide des systèmes traditionnels d'EINSTEIN, etc.

Utilisez le site Web EINSTEIN web (einstein.sourceforge.net) pour signaler les bugs dans la création de rapports, les pistes d'amélioration, etc.

3.11.3 Devenir développeur EINSTEIN

L'outil EINSTEIN est en cours de développement sous la forme d'un projet de logiciel open source gratuit. Vous pouvez télécharger et modifier le code source, développer et créer vos propres modules.

Une fois leur qualité et leur compatibilité vérifiées par l'équipe EINSTEIN, ces modules seront intégrés à la prochaine édition EINSTEIN.

Comment ? Envoyez simplement à l'équipe EINSTEIN, par l'un des biais cités ci-dessus, une demande pour devenir développeur EINSTEIN.

3.12 Suivi

3.12.1 De l'audit à l'installation du nouveau système

Le suivi consécutif à l'audit est aussi important que l'audit lui-même. Le principal objectif, évidemment, est de convaincre l'entreprise de réaliser l'investissement proposé et d'installer les nouveaux systèmes à rendement énergétique.

Cependant, vous pouvez également apprendre et renforcer votre expérience grâce aux réponses négatives : tentez toujours d'obtenir des informations sur les raisons pour lesquelles un projet, que vous estimiez énergétiquement et économiquement réalisable, n'a pas été mené. Dans le cas où vous ne parviendriez pas à inverser cette décision, vous pourrez au moins prendre en compte ces informations dans votre façon de présenter la prochaine étude.

3.12.2 Performance prévue et réelle des nouveaux systèmes

Si tout s'est bien passé et que vous avez bien travaillé, l'entreprise a finalement décidé d'améliorer son système de chauffage et de climatisation en installant (plus ou moins) le nouveau système que vous lui avez proposé. Vous pouvez donc vous poser tranquillement, vous détendre, savourer votre réussite, puis après un certain temps...recommencer à plancher sur le prochain audit.

Mais vous devriez garder une archive de cet audit et faire bon usage de l'expérience pratique acquise lors de celui-ci pendant plusieurs années après la mise en œuvre des nouveaux systèmes (certaines anomalies liées à certaines technologies n'apparaissent qu'après un certain temps). Pour ce faire, le meilleur moyen est d'adopter un suivi systématique :

- x Dans le meilleur des cas, tentez de signer un contrat d'entretien avec l'entreprise, afin d'être en contact direct avec l'installation au cours des premières années d'exploitation.

- x Appelez l'entreprise à intervalles réguliers et demandez à connaître leur expérience.

- x Si vous avez la possibilité de recueillir des données de mesure de performance du système, c'est encore mieux. Utilisez ces données pour comparer vos prévisions et les résultats réels.

- x Conservez un registre répertoriant les contacts menés, les problèmes rapportés, indiquant votre opinion sur la façon d'éviter l'apparition desdits problèmes, etc.

4 Exemples

4.1 Procédure générale

Point de départ :

Après avoir présenté les mesures d'efficacité énergétique et les énergies renouvelables dans l'industrie, vous discutez brièvement avec la directrice technique de la société EINSTEIN Container Washing Ltd., Mme Cleanton. Elle vous indique être vivement intéressée par le potentiel qu'ont à offrir les énergies renouvelables en termes de réduction des coûts énergétiques, au vu des récentes hausses de tarif de l'énergie qui sont devenues un élément de coût considérable. Vous échangez vos cartes de visite et lui promettez de lui transmettre de plus amples informations.

4.1.1 EINSTEIN Étape 1 : Motiver

De retour au bureau, vous envoyez un court e-mail à Mme Cleanton avec en pièce-jointe la documentation EINSTEIN.

Quelques jours plus tard, vous lui téléphonez. Elle vous indique être vivement intéressée par un audit énergétique EINSTEIN et vous propose de venir visiter la société, qui, malheureusement, se situe à Railway City, à 150 km de votre bureau. Il est convenu qu'elle vous envoie à l'avance des données et des schémas se rapportant à l'usine de sorte que vous puissiez mettre sur pied une proposition préliminaire avant de procéder à la visite.

4.1.2 EINSTEIN Étape 2 : Acquisition des données de pré-audit

Vous envoyez la "check-list EINSTEIN pour la société" à Mme Cleanton afin qu'elle puisse se faire une idée des informations que vous lui demanderez au cours de la visite. Vous envoyez cette check-list accompagnée du questionnaire de base EINSTEIN, en lui demandant de le compléter avec des données qui lui seront faciles à obtenir et de vous les renvoyer par fax ou par e-mail.

Quelques jours plus tard, vous recevez le questionnaire contenant très peu d'informations :

quelques données d'ordre général concernant la société : données administratives, chiffres d'affaires, etc.

un seul processus :	le lavage de conteneurs
besoins en eau chaude :	100 m ³ / jour à 80 °C
équipement de fourniture de chaleur :	chaudière à vapeur, aucune autre donnée
combustibles utilisés :	gaz naturel, pas de données concernant la consommation

Bien que le cas de EINSTEIN Container Washing Ltd. semble être un cas relativement simple, vous tentez d'obtenir des informations sur des industries semblables, et consultez les recommandations fournies dans les documents EINSTEIN BAT au cas où vous pourriez trouver des idées quant à des améliorations possibles. Parmi bien d'autres recommandations, celles les mieux adaptées à votre cas sont :

l'optimisation des processus dans le cadre des processus de lavage :

- "contrôler si la consommation d'eau et/ou la température de l'eau peuvent être réduites à l'aide d'autres détergents"
- "vérifier s'il est possible d'instaurer un système de réutilisation des eaux usées ou un circuit d'eau fermé"

les recommandations concernant la fourniture de chaleur :

- "vérifier s'il est possible de récupérer la chaleur des eaux usées"
- "le chauffage à eau chaude à basse température est adapté à l'application de l'énergie solaire thermique"

4.1.3 EINSTEIN Étape 3 : Traitement des informations préliminaires

Tout d'abord, vous entrez les données dans l'outil logiciel EINSTEIN afin de déterminer le niveau de précision des constats que vous êtes en mesure d'établir avec les données collectées jusqu'à présent. Grâce à l'expérience que vous avez acquise, vous savez qu'hormis les informations fournies par la société, vous allez devoir établir des estimations quant à l'utilisation de la chaleur résiduelle. Pour une première approximation, vous supposez la chose suivante (même si vous êtes conscient que ces données sont susceptibles d'être erronées et qu'elles devront être confirmées avant de faire une proposition à la société) :

- volume d'eaux usées = le même volume que l'eau chaude consommée 100 m³ / jour
- température des eaux usées : 50°C

Comme vous souhaitez seulement établir une première estimation rapide, vous sélectionnez le mode automatique d'EINSTEIN et paramétrez le niveau de précision des estimations sur "grossières" ("quick and dirty"). Vous obtenez les résultats suivants :

- vous avez de la chance : il y a suffisamment de données pour établir une étude "grossière" et elles sont cohérentes
- pour une analyse plus détaillée, il est nécessaire de connaître la puissance nominale de la chaudière actuelle
- les besoins annuels en chaleur de processus sont estimés à 2118 MWh et la consommation de combustible à 2729 MWh ; 71 % des besoins en chaleur ou environ 1500 MWh ont une température inférieure à 60 °C
- la fourniture de chaleur externe requise peut être réduite à 1435 MWh grâce à la récupération de chaleur en matière de solutions supplémentaires adaptées et économes en énergie, voici ce qui s'offre à vous :
 - a) un système solaire thermique avec une capacité nominale de 490 kW couvrant 46% des besoins en chaleur résiduelle
 - b) une pompe à chaleur couvrant 22% des besoins en chaleur restants
 - c) une combinaison des deux systèmes



Figure 35 : Comparaison des besoins en énergie primaire estimés en l'état actuel des choses et réduction possible avec les différentes mesures en faveur de l'efficacité énergétique.

En vue de confirmer ces résultats préliminaires, vous appelez la société et demandez la puissance nominale de la chaudière actuelle. On vous informe que la chaudière à vapeur installée dans l'usine présente une puissance de 3 MW.

Étant donné que vous n'êtes pas un expert dans le domaine des énergies renouvelables, vous appelez un de vos collègues spécialisé dans ce domaine afin qu'il vous transmette des informations complémentaires.

Vous avez désormais une idée approximative de la consommation énergétique de la société, vous pouvez alors chercher des données de référence afin de savoir si la consommation énergétique actuelle entre dans les critères des bonnes pratiques.

En raison des éventuelles mesures que vous avez pu identifier au cours de la courte étude préliminaire, vous établissez les priorités suivantes quant à l'acquisition de données supplémentaires :

- déterminer la température des eaux usées et le degré de contamination (problèmes éventuels pour la récupération de chaleur)
- déterminer la superficie disponible et les caractéristiques d'ordre structurel de la toiture en vue de l'éventuelle installation d'un système solaire thermique
- déterminer l'efficacité de la conversion de l'énergie, l'âge et l'état de conservation de la chaudière actuelle afin d'opter pour un éventuel remplacement de la chaudière à vapeur

4.1.4 EINSTEIN Étape 4 : Préévaluation rapide

Dans le cas présent, les données disponibles sont suffisantes afin d'établir une première proposition rapide qui pourra être présentée à la société et analysée. Par conséquent, vous imprimez le rapport d'audit standard de l'outil logiciel EINSTEIN. Vous décidez de ne pas l'envoyer par e-mail mais plutôt de le présenter en personne lors de votre visite sur le site.

4.1.5 EINSTEIN Étape 5 : Visite sur site

A votre arrivée, vous êtes reçu par Mme Cleanton, accompagnée d'un opérateur de l'usine de lavage. Vous présentez et détaillez l'étude préliminaire et obtenez la confirmation que la société est vivement intéressée par la mise en place des mesures proposées en faveur des économies d'énergie, notamment par les possibilités permettant de réaliser les plus fortes économies : la récupération de chaleur et l'énergie solaire thermique.

Par conséquent, vous vous concentrez ensuite sur la collecte d'informations supplémentaires, notamment portant sur les sujets de votre liste de priorités. Vous obtenez les informations supplémentaires suivantes :

- la chaudière à vapeur actuelle est très ancienne, et la société réfléchissait déjà à la remplacer. Mme Cleanton, pendant ce temps, a recueilli des informations concernant les factures énergétiques de la société : la consommation de gaz naturel durant les trois dernières années est comprise entre 300 000 et 350 000 m³ par an.
- la société dispose d'un toit plat en béton d'une superficie d'environ 2000 m² ne présentant aucun problème statique concernant l'installation d'un système solaire thermique.
- l'intégralité des eaux usées est collectée dans un petit réservoir avant d'être traitée dans une station de traitement des eaux usées afin de séparer les produits chimiques et les autres contaminants. Vous ne pouvez pas obtenir d'autres informations concernant la température. Vous apprenez que les eaux usées ne sont pas corrosives et qu'elles contiennent un faible volume d'autres contaminants comme par exemple les fibres qui pourraient être un problème pour les échangeurs de chaleur.

Comme vous avez emmené votre ordinateur portable afin d'effectuer une présentation, vous en profitez pour saisir les nouvelles données recueillies dans l'outil logiciel EINSTEIN et vérifiez qu'elles sont cohérentes

avec les informations préliminaires. Dans le cas présent, elles le sont. Néanmoins, les nouvelles données relatives à la consommation d'énergie vous laissent penser que la chaudière actuelle est vraiment inefficace (Vous obtenez une estimation pour l'efficacité de la conversion de la chaudière de l'ordre de 67 % !).

En faisant le tour des installations de la société, vous mesurez la température des eaux usées situées dans le collecteur d'eaux usées. Vous effectuez deux mesures différentes, l'une au début de la visite et l'autre à la fin de la visite, juste avant de quitter le site de la société. Vous obtenez les valeurs suivantes :

- Mesures de la température des eaux usées dans le réservoir : (a) 51,3 °C (alors qu'en parallèle, trois processus de lavage étaient en cours) ; (b) 42,8 °C (à cet instant précis, seul un processus de lavage était en cours).

Les valeurs ne sont pas très éloignées de votre estimation initiale. Mais, quoi qu'il en soit, vous suggérez à la société de suivre et d'enregistrer cette température pendant une semaine, ainsi que l'heure de départ et d'arrêt des cycles de lavage et la consommation d'eau.

Après la visite, vous faites rapidement part de vos observations à Mme Cleanton. Vous lui indiquez que, de votre point de vue, les principaux aspects de l'étude de pré faisabilité initialement présentée restent valides. Vous proposez d'attendre les données des mesures manquantes. L'opérateur de la ligne de lavage vous promet de procéder à ces mesures durant la semaine suivante, vous promettez alors à Mme Cleanton de lui transmettre le rapport d'audit final dans les deux semaines.

4.1.6 EINSTEIN Étape 6 : analyse du status quo

Après analyse des résultats qu'ont donné les mesures de la société reçues par fax, vous obtenez une température moyenne des eaux usées de 45,2 °C, vous décidez alors de corriger votre estimation initiale dans l'étude finale destinée à la société, de 50 °C, vous passez à 45 °C. Vous obtenez une répartition détaillée de la consommation de chaleur de processus par température, comme illustré par la Figure 36.

De plus, vous confirmez que le système de fourniture de chaleur actuel présente une très faible efficacité : environ 67%.

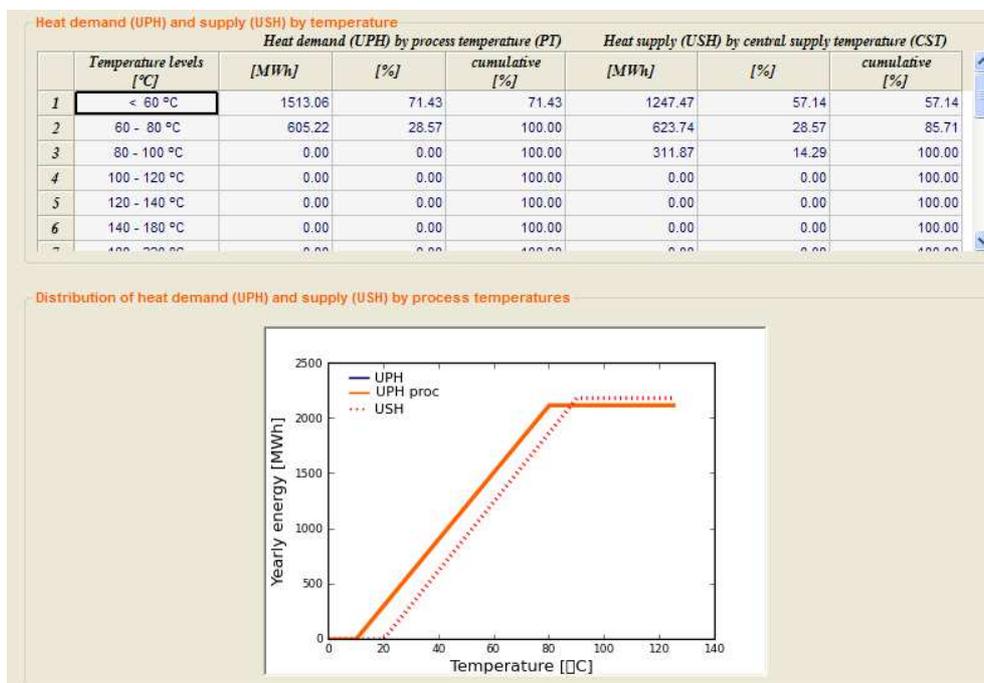


Figure 36: Répartition détaillée de la consommation énergétique (exemple) : chaleur de processus et fourniture de chaleur par niveau de température (Remarque : la température minimum requise est donnée en cas de fourniture de chaleur et pas la température de fourniture de vapeur réelle).

4.1.7 EINSTEIN Étape 7 : Conception d'options d'économie

4.1.7.1 Optimisation des processus

Après avoir discuté avec la société, vous avez conclu que dans le cas présent, il n'était pas possible d'améliorer le processus de lavage en lui-même. Vous avez alors décidé de vous concentrer sur la récupération de chaleur et l'optimisation de la fourniture.

4.1.7.2 Récupération de chaleur

La première mesure que vous proposez pour améliorer l'efficacité énergétique consiste à récupérer la chaleur à partir des eaux usées afin de préchauffer l'eau « rentrante » fraîche. Vous utilisez l'outil logiciel EINSTEIN pour trouver le modèle adéquat d'échangeur de chaleur et le moyen de stockage. Les besoins en chaleur restants servent de base pour toutes les propositions de fourniture de chaleur optimisée.

4.1.7.3 Fourniture de chaleur

Comme vous ne souhaitez effectuer qu'un audit rapide, vous décidez de ne prendre en compte que certaines des options automatiquement générées par l'outil logiciel EINSTEIN. Néanmoins, vous procédez à quelques ajustements concernant la proposition que vous préférez alliant récupération de chaleur, système solaire thermique et remplacement de la chaudière actuelle inefficace et démesurée par une nouvelle chaudière de plus petite taille.

La proposition automatiquement créée prévoit un système solaire thermique de 490 kW avec des capteurs tubulaires sous vide. Vous décidez de changer manuellement cette caractéristique :

- × Vous arrondissez à 500 kW
- × Vous comparez différents types de collecteurs : collecteur plan (FPC) et capteurs tubulaires sous vide (ETC)
- × Vous étudiez une 3^{ème} proposition de solution solaire thermique avec un système solaire plus petit (FPC 250 kW)



Figure 37 : Comparaison des besoins en énergie primaire en l'état actuel des choses et réduction possible avec les différentes mesures en faveur de l'efficacité énergétique. Toutes les propositions de solutions solaires thermiques sont fondées sur l'alternative "Récup. de chaleur et nouvelle Chaudière" et comprennent la récupération de chaleur et le remplacement de la chaudière.

4.1.8 EINSTEIN Étape 8 : Calcul des performances énergétiques

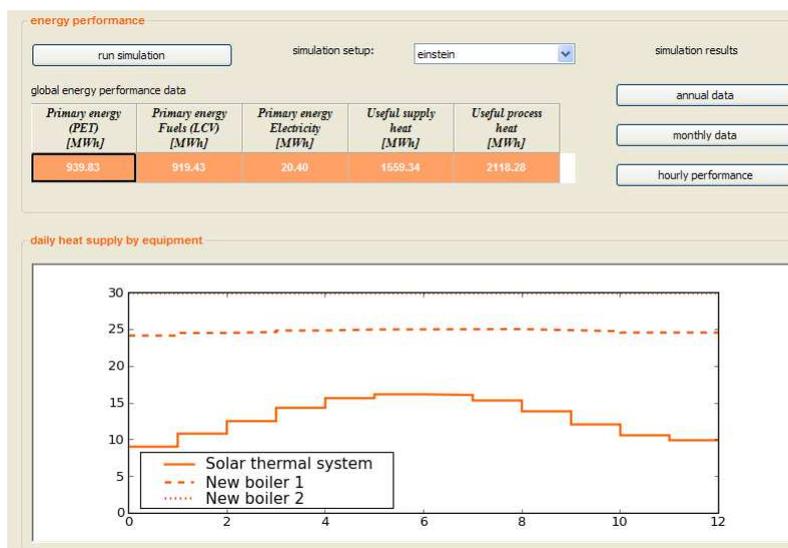


Figure 38 : Comparaison des besoins en énergie primaire en l'état actuel des choses et réduction possible avec les différentes mesures en faveur de l'efficacité énergétique. Toutes les propositions de solutions solaires thermiques sont fondées sur l'alternative "Récup. de chaleur et nouvelle Chaudière" et comprennent la récupération de chaleur et le remplacement de la chaudière.

Afin d'en savoir davantage sur les performances saisonnières du système, vous procédez à une simulation du système avec l'outil de calcul de la performance énergétique interne EINSTEIN. A partir des résultats, vous pouvez visualiser la performance mensuelle du système (Figure 38).

4.1.9 EINSTEIN Étape 9 : Analyse économique et financière

Finalement, vous effectuez une comparaison en termes d'économies des alternatives proposées. Vous obtenez alors des données semblables à celles présentées dans le tableau 18. Concernant les coûts énergétiques, l'ensemble des alternatives proposées permettent d'économiser plus de 60% sur les coûts énergétiques actuels et près de 29-30% des dépenses totales annuelles en fourniture d'énergie, en prenant en compte les coûts d'exploitation et de maintenance et l'amortissement de l'investissement initial. En prenant en considération les éventuelles futures hausses tarifaires de l'énergie, la solution économiquement optimale serait celle présentant la consommation d'énergie primaire minimum (ETC 500 kW).

Tableau 18 : Résumé de l'analyse économique. L'amortissement est calculé avec une période d'amortissement économique de 15 ans et un taux d'intérêt réel de 6%.

	Present state	Heat Rec. + new boiler	FPC 500 kW	ETC 500 kW	FPC 250 kW
Total investment	0	200 000	450 000	550 000	340 000
Funding (50 % of solar thermal)	0	0	125 000	175 000	70 000
Total own investment	0	200 000	325 000	375 000	270 000
Yearly energy cost	124 590	65 730	50 400	46 170	58 020
Yearly O&M cost	2 000	2 500	5 000	5 000	4 000
Depreciation of investment	0	20 600	33 475	38 625	27 810
Total yearly cost (incl. depreciation)	126 590.0	88 830.0	88 875.0	89 795.0	89 830.0
Yearly savings	-	29.8%	29.8%	29.1%	29.0%

4.1.10 EINSTEIN Étape 10 : Rédaction de rapport et présentation

Ce résultat vous satisfait. La proposition que vous devez présenter à la société semble attrayante et permet de réaliser une réduction des coûts de près de 30%. Vous imprimez le rapport d'audit EINSTEIN automatiquement généré par l'outil et appelez Mme Cleanton afin de fixer un rendez-vous consacré à la présentation des résultats.

4.2 Contrôle de cohérence et estimation des données

Dans cette partie, vous trouverez des exemples d'utilisation de l'outil EINSTEIN pour le contrôle de la cohérence des données. Un modèle simplifié de laiterie avec seulement trois processus sera utilisé afin de présenter les options les plus pertinentes de l'outil EINSTEIN. Les exemples illustrés sont inclus dans la base de données par défaut de la Version 1.0 de l'outil EINSTEIN.

4.2.1 Description du modèle de laiterie

4.2.1.1 Processus

Trois processus caractéristiques de laiterie sont envisagés :

- * pasteurisation (processus 1)
- * coagulation (caillage du lait) (processus 2)
- * filage de la mozzarella (processus 3)

La pasteurisation est le processus consommant le plus d'énergie. Ce modèle de laiterie fonctionne 280 jours par an, produisant principalement deux produits : du fromage normal et de la mozzarella. Les produits intermédiaires sont : du lait pasteurisé (provenant de la pasteurisation), du petit-lait et du caillé (provenant tous deux de la coagulation)

Pasteurisation

La pasteurisation est un processus de chauffage contrôlé utilisé afin d'éliminer les formes viables de tous les micro-organismes, c'est-à-dire les micro-organismes pathogènes ou responsables de la détérioration, susceptibles d'être présents dans le lait. Pour la pasteurisation à haute température de brève durée (HTST), une température de 72 à 75 °C est appliquée pendant 15 à 240 secondes. Pour la pasteurisation à haute chaleur de brève durée (HHST), une température de 85 à 90 °C est appliquée pendant 1 à 25 secondes. Pour la pasteurisation continue, des échangeurs de chaleur à écoulement, comme des échangeurs tubulaires, à plaques et à cadres sont utilisés. Ceux-ci présentent des parties dédiées au chauffage, au chambrage et au refroidissement.

Pour la pasteurisation, il faut prévoir la récupération de la chaleur interne et la fourniture de chaleur externe pour chauffer et refroidir un liquide circulant dans le système (lait). Le volume quotidien de lait étant pasteurisé s'élève à 400 m³. Le processus est continu et dure 5h/jour de 6h à 11h. Le moyen utilisé pour la fourniture de chaleur externe est l'eau chaude.

Le lait entre dans la machine à 4°C, puis circule dans un échangeur de chaleur à contre-courant où le lait chaud sortant préchauffe le lait froid entrant pour qu'il atteigne la température de 38°C. Ensuite, le lait préchauffé est à nouveau chauffé à l'aide d'eau chaude pour atteindre la température de 72°C, il est maintenu à cette température pendant un certain laps de temps au cours de son passage dans l'échangeur de chaleur, et enfin, il est refroidi pour atteindre à nouveau la température de 38°C. Nous partons du principe que les besoins en énergie causés par les pertes de chaleur et le démarrage du pasteurisateur sont négligeables.

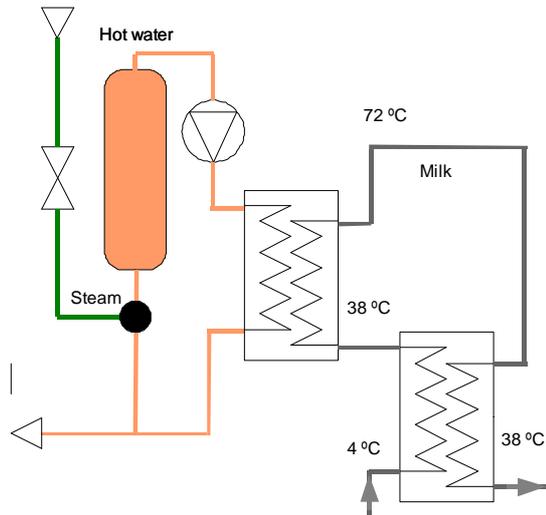


Figure 1: Schéma simplifié du pasteurisateur

Coagulation

La technique de la coagulation est utilisée au cours du traitement du lait afin de séparer le caillé du petit-lait, ce principe est également connu sous le nom de caillage du lait. Le caillage du lait est exécuté dans des cuves adaptées ou des citernes où des starters et d'autres ingrédients sont ajoutés au lait pour la production d'un *coagulum*. Le caillé provient de la séparation du petit-lait, il est ensuite recueilli et envoyé pour subir d'autres traitements, le cas échéant. La température représente l'un des facteurs clés influençant le caillage du lait. La température exigée est obtenue par le biais des échangeurs de chaleur ou par le biais d'une injection directe de vapeur dans la cuve dédiée au caillage.

Le caillage du lait est un procédé discontinu et, dans ce cas, le traitement de chaque lot dure 1,5 h. Chaque jour, 4 lots sont traités de 10h00 à 16h00. Dès le début du lot, la chaleur est nécessaire pour faire passer le lait pasteurisé de la température d'entrée (37°C) à la température de processus (40°C). Durant la coagulation, de l'énergie thermique est nécessaire afin de maintenir constamment la température de processus à 40°C.

Le volume total quotidien de lait (400 m³) passe à la coagulation après avoir été pasteurisé. Par le biais de la séparation, 240 m³ de petit-lait à 37°C sont obtenus chaque jour.

Filage de la mozzarella

Le filage de la mozzarella requiert chauffage et fusion. Le caillé est placé dans une cuve de traitement et mélangé avec de l'eau chaude à haute température, généralement entre 75 et 95°C. L'eau chaude est principalement utilisée pour mélanger le *coagulum*. Un pourcentage défini d'eau de traitement est également absorbé par le caillé en vue d'accroître son élasticité. L'eau chaude est obtenue par le biais des échangeurs de chaleur ou par le biais d'une injection directe de vapeur.

Le filage est également un procédé discontinu et, dans ce cas, le traitement de chaque lot dure 1h. Chaque jour, 4 lots sont traités de 12h à 18h. De l'énergie thermique est requise afin de faire monter la température de l'eau de traitement de 10°C à 90°C. 50% du volume de lait pasteurisé quotidiennement sont utilisés après la coagulation pour la production de mozzarella. En considérant que pour 100 L de lait, 26 L d'eau chaude sont nécessaires à la production de 13 kg de mozzarella, pour 200 m³/jour de lait pasteurisé, il faut chaque jour 50 m³ d'eau à 90°C. La température de sortie des eaux usées est de 70°C, alors que l'écoulement est supposé représenter 80% de la quantité quotidienne d'entrée, c'est-à-dire 40 m³.

4.2.1.2 Fourniture et distribution de chaleur

La Figure 40 est un schéma représentant la fourniture et la distribution de chaleur, système constitué de deux chaudières à vapeur au gaz naturel et d'une tuyauterie indépendante pour chacun des trois processus.

La chaudière B1 (puissance nominale de 3 MW) alimente uniquement le processus de pasteurisation (P1). L'efficacité moyenne s'élève à 80% alors que le facteur d'utilisation moyen est de 80% et la consommation nominale de gaz naturel est de 377 m³/h. La chaudière B1 fonctionne 6 heures par jour de 5h00 à 11h00.

La chaudière B2 (puissance nominale de 2MW) alimente les trois processus (P1 : pasteurisation, P2 : coagulation ; P3 : filage de la mozzarella). L'efficacité moyenne s'élève à 88% alors que le facteur d'utilisation moyen est de 58% et la consommation nominale de gaz naturel est de 230 m³/h. La chaudière 2 fonctionne 8 heures par jour de 10h00 à 18h00.

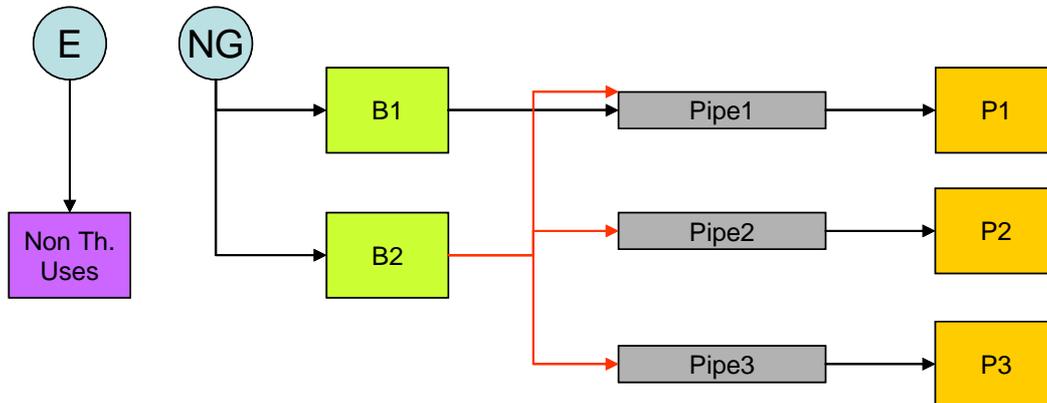


Figure 2: Schéma fonctionnel du système de distribution et de fourniture de chaleur et des processus thermiques au sein de la laiterie.

Le moyen utilisé pour la fourniture de chaleur est la vapeur à basse pression à 140°C. La longueur de la tuyauterie est de 200 m (un sens) pour le tuyau 1, alors que pour le tuyau 2 et le tuyau 3, la longueur est de 300 m.

En termes de factures énergétiques, la quantité annuelle de combustible (gaz naturel) s'élève à 805 000 m³. La consommation énergétique finale de gaz naturel (GN) à usage thermique (c'est-à-dire la consommation annuelle (LCV)) est de 8 000 MWh. Le coût du gaz naturel est de 30 €/MWh et le coût énergétique total pour le gaz est de 250 000 €/a.

L'électricité est uniquement nécessaire dans le cadre d'usages non thermiques et la consommation est d'environ 4 000 MWh : 3 000 pour le fonctionnement des machines et 1 000 MWh pour l'éclairage.

4.2.1.3 Scénario de base : répartition de la consommation énergétique avec l'outil logiciel EINSTEIN.

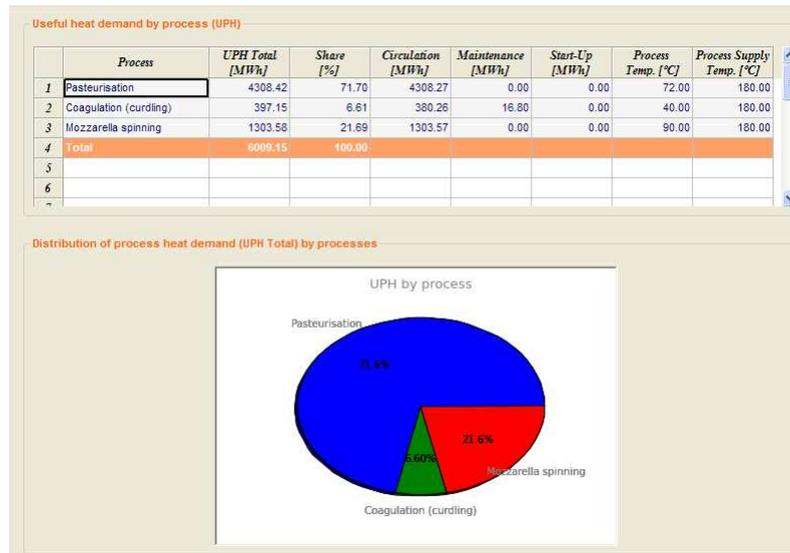


Figure 41 : Répartition de la consommation de chaleur de processus pour ce modèle de laiterie (Exemple de projet "Guide d'audit EINSTEIN 42 Scénario de base").

Si les données sont correctement saisies dans l'outil logiciel EINSTEIN, vous pouvez obtenir une répartition complète de la consommation énergétique avec les données tel qu'illustré ci-dessus (Figure 41). Les principaux flux d'énergie dans le système sont présentés Figure 42.

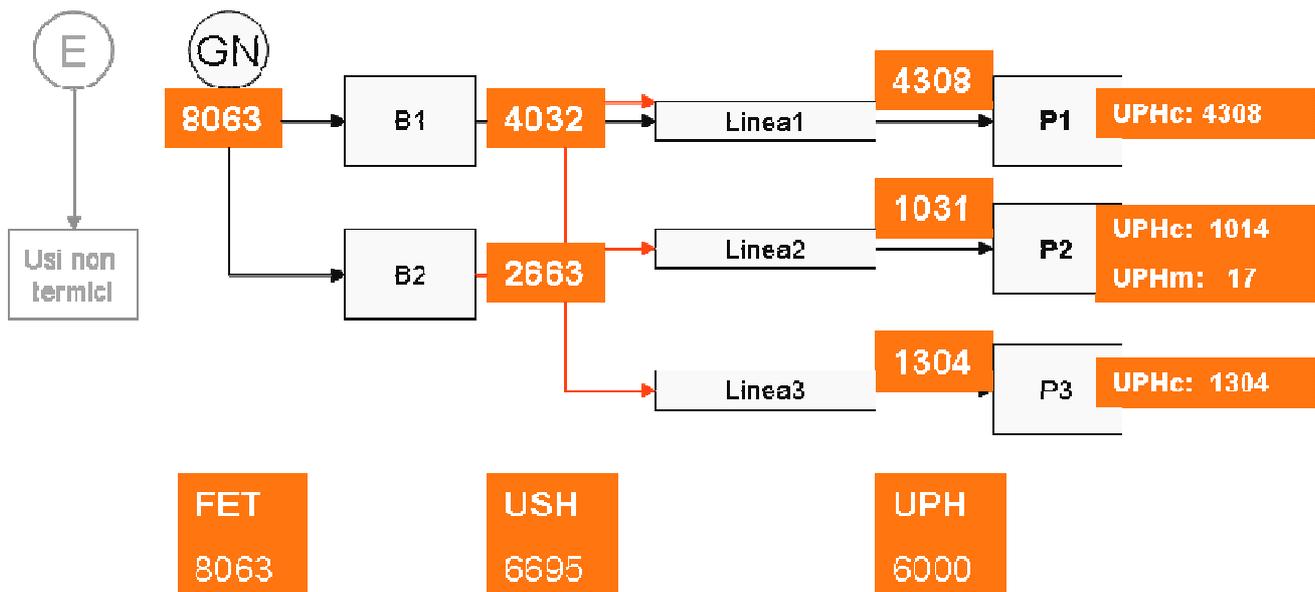


Figure 3 : Flux d'énergie dans le système (scénario de base).

4.2.2 Détection des conflits parmi les données

Comme cela a déjà été souligné dans le chapitre 2, l'une des premières étapes à franchir concernant le contrôle des données consiste à vérifier si les données disponibles sont cohérentes, ou si elles présentent des contradictions. Nous allons illustrer ceci à partir de deux exemples.

4.2.2.1 Conflits entre deux données spécifiant directement la même quantité

Un conflit très simple au sein de données saisies peut par exemple provenir d'une erreur d'unité (ex : utilisation de kWh au lieu de MWh). Dans le cadre de notre exemple, la consommation énergétique totale de 8000 MWh correspond à une consommation de gaz naturel d'environ 805 000 m³. Si l'utilisateur commet une erreur au niveau de la lecture des unités et saisit 8000 kWh au lieu de 8000 MWh, cette erreur sera alors facilement détectée par l'outil EINSTEIN (Figure 43).

	parameter (values in conflict)	data group (accuracy)	description (calculated from)
1	FECFuel [=>FECFuel]	Fuel[1]	total own fuel consumption (LCV)
2	8000.00	+/- 1.00%	FECFuel;
3	8001700.00	+/- 0.00%	MFuelYear;
4			

Figure 4 : Message d'erreur de l'outil logiciel EINSTEIN dans le cadre de données contradictoires au niveau de la consommation de combustible (Exemple de projet : "Guide d'audit EINSTEIN 42 1a").

4.2.2.2 Conflits généraux des données système

Tous les conflits de données ne sont pas aussi simples à détecter que dans le cadre de l'exemple susmentionné. Parfois, pour détecter les contradictions, il faut calculer les bilans énergétiques du système ou évaluer les débits, les niveaux de température etc. En tant que deuxième exemple, nous pouvons saisir une consommation totale de combustible plus élevée que la somme de tous les besoins en chaleur de processus (en prenant en compte toutes les valeurs raisonnables pour l'efficacité de la conversion et de la distribution).

	parameter (values in conflict)	data group (accuracy)	description (calculated from)
1	USH[2] [=>USH-Matrix]	USH[-]	Useful Supply Heat by equipment
2	4364810.54	+/- 2.27%	FuelConsum; ExcessAirRatio; TExhaustGas; TEnvEq; HPerYearEq; PartLoad; 1; HCGTEfficiency; FECFuel; FEOFuel
3	2367340.66	+/- 35.45%	dUAAPipe; TotLengthDistPipe; DTForwLoss2; HPerYearPipe; 1; UPHProc[1][1]; QOpProc; QEvapProc; QLoss; NDays
4	USH [=>USH]	USH[-]	Useful Supply Heat for industry (total)
5	6645209.52	+/- 6.50%	FuelConsum; ExcessAirRatio; TExhaustGas; TEnvEq; HPerYearEq; PartLoad; 1; HCGTEfficiency; FECFuel; FEOFuel
6	8000969.68	+/- 2.02%	FuelConsum; ExcessAirRatio; TExhaustGas; TEnvEq; HPerDavCo; NDavsCo; PartLoad; 1; HCGTEfficiency; FECFuel

Figure 5 : Message d'erreur de l'outil logiciel EINSTEIN dans le cadre de données contradictoires concernant les bilans énergétiques – fourniture de chaleur utile totale (Exemple de projet "Guide d'audit EINSTEIN 42 1b").

4.2.3 Saisie des données avec EINSTEIN

Dans l'exemple de scénario de base ci-dessus, un ensemble complet de données a été saisi dans l'outil EINSTEIN, cela signifie que pour la détermination de nombreux paramètres, des informations redondantes sont également disponibles (ce qui peut engendrer des conflits, comme illustré dans les parties précédentes).

Mais comme nous le savons, EINSTEIN est intelligent et n'a pas besoin de toutes les données pour savoir ce qui lui reste à faire. Il est capable de déterminer seul ce qui lui manque. Les données calculées ou estimées présentent néanmoins un certain degré de fiabilité, qui vous est indiqué dans la fenêtre d'analyse de recoupement. Avant de les accepter et de procéder à l'audit, vous devez évaluer et décider si le degré d'incertitude est acceptable ou non en fonction de vos objectifs.

Cette partie traitera de la manière d'utiliser le module de contrôle de cohérence EINSTEIN afin de saisir les informations sur l'industrie en fonction d'un ensemble de données réduit ou incomplet.

4.2.3.1 La consommation de chaleur de processus est uniquement connue pour les processus principaux

En pratique, il est très fréquent de constater que seule la consommation énergétique des principaux processus consommant de la chaleur est connue, et qu'il y a un ou plusieurs processus mineur(s) pour lesquels les besoins en chaleur ne sont pas connus. Afin de présenter la manière de procéder dans ce cas, nous avons modifié notre exemple, de manière à ce que la consommation énergétique du processus 2 (coagulation) soit indéterminée :

- les besoins en chaleur du processus en fonctionnement (pour le maintien de la température du récipient) ne sont pas spécifiés. Cela signifie que Q_{UPHm} peut avoir n'importe quelle valeur, même une valeur très élevée.
- le facteur de charge de la chaudière B2 n'est pas spécifié. Cela signifie que la chaleur fournie par la chaudière B2 est également inconnue. Néanmoins, dans ce cas, la chaleur totale fournie par cet équipement est limitée par la puissance nominale de la chaudière, qui est connue, et par le nombre maximum d'heures d'exploitation.

La situation générale est quelque peu indéterminée : il n'est pas possible de trouver une solution précise à ce problème, étant donné que les pertes de chaleur de la tuyauterie ne sont pas précisément connues. Mais le problème n'est pas insurmontable, étant donné que la consommation énergétique totale est connue, EINSTEIN peut donc estimer les paramètres manquants, c'est-à-dire les besoins en chaleur du processus 2, par soustraction. Dans ce cas, les besoins en chaleur du processus 2 peuvent être estimés à 680 MWh avec une marge d'erreur de $\pm 50\%$, en raison des incertitudes concernant les pertes de chaleur de la tuyauterie.

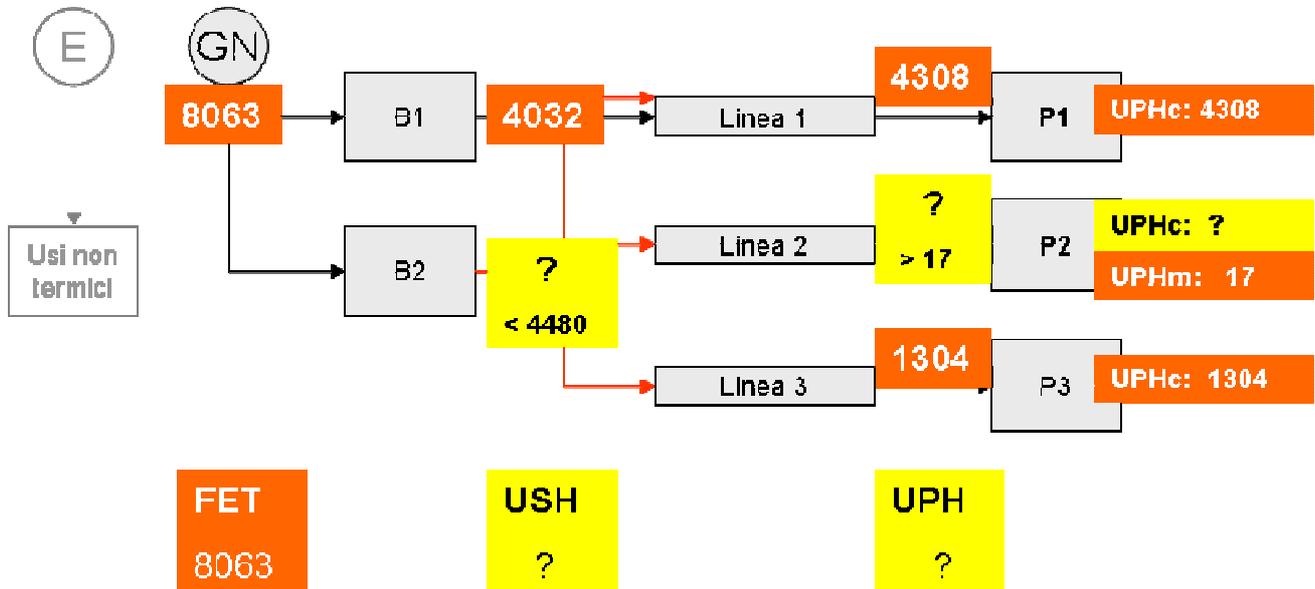


Figure 45: Point de départ de l'analyse : consommation énergétique inconnue pour un petit processus (Exemple de projet "Guide d'audit EINSTEIN 42 2a").

4.2.3.2 Le total des besoins en chaleur n'est pas connu

Le problème est un peu plus important si nous ne disposons pas d'informations concernant le total de la consommation énergétique finale et, comme c'était le cas dans la partie précédente, si nous ne connaissons pas les besoins en chaleur du processus 2. Mais dans ce cas, à nouveau, le problème n'est pas insurmontable, étant donné que la puissance nominale de la chaudière 2 impose un maximum absolu.

Maintenant, seules des limites très approximatives peuvent être communiquées pour les besoins en chaleur de processus du processus 2 avoisinant les 2000 MWh $\pm 90\%$. Cela signifie qu'une grande incertitude plane sur les besoins en chaleur du processus 2 avec des valeurs pouvant aller de 200 MWh à 3800 MWh.

Néanmoins, la relative incertitude qui concerne le *total* des besoins en chaleur (USH) est beaucoup moins importante (8080 MWh $\pm 32\%$). Cela signifie, que même si les besoins d'un des processus sont complètement indéterminés, il est toujours possible d'effectuer une toute première estimation très raisonnable du total des besoins en chaleur.

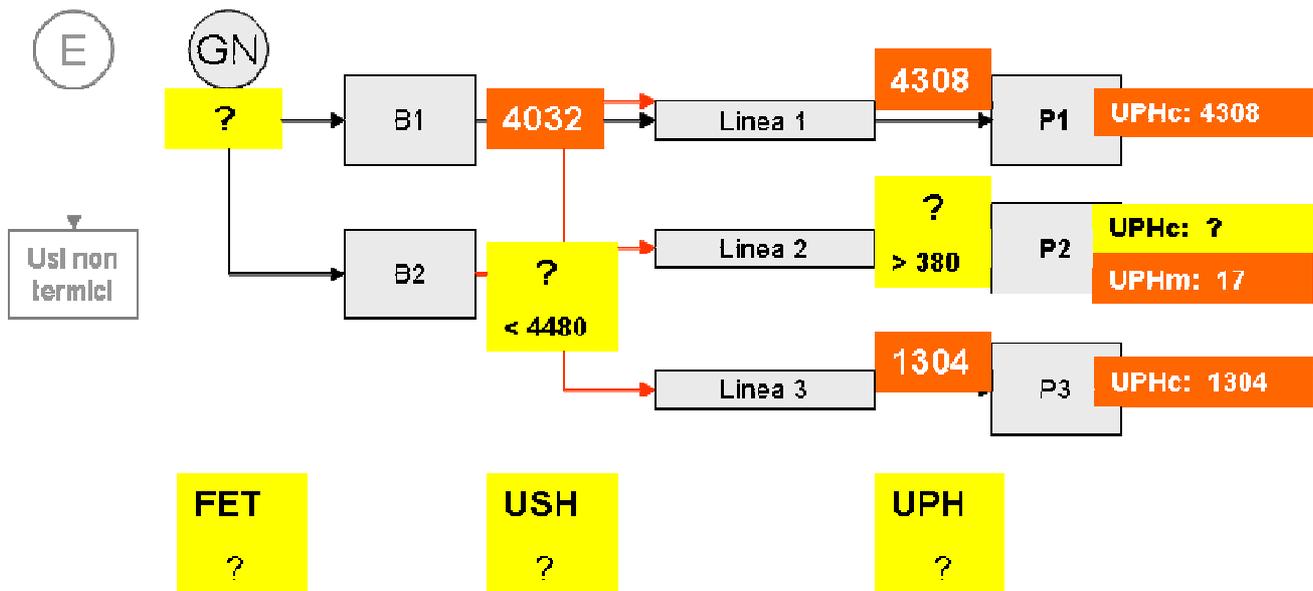


Figure 6: Point de départ de l'analyse : consommation énergétique totale et consommation énergétique pour un petit processus inconnues (Exemple de projet "Guide d'audit EINSTEIN 42 2b").

4.2.3.3 Le total des besoins en chaleur et les données techniques des chaudières ne sont pas connus

La situation est totalement dépourvue d'indications, si la puissance nominale de la chaudière est également inconnue, aucune contrainte raisonnable ne peut alors être établie pour les besoins en chaleur du processus 2 (Exemple de projet "EINSTEIN Audit Guide 42 2c").

4.2.4 Utilisation des estimations de données

Certains des résultats des exemples de la partie précédente peuvent être améliorés, si, à part les relations mathématiques (bilans énergétiques), des estimations basées sur les informations d'ingénierie sont également utilisées.

Parmi nos exemples, il peut s'agir par exemple de ceci :

- * les pertes de chaleur, et par conséquent la puissance requise pour le maintien de la température dans la citerne dédiée à la coagulation, peuvent être estimées à partir de la taille de la citerne à l'aide de coefficients de perte de chaleur par défaut.
- * nous pouvons supposer que les facteurs de charge de la chaudière se situent dans une amplitude de valeurs plus réduite que de 0 à 100%, étant donné qu'en pratique, les deux extrêmes sont peu probables.

L'option 'Utilisation des estimations de données' de l'outil EINSTEIN s'exécute automatiquement, et dans le cadre de l'exemple 2b, les besoins en chaleur de processus pour le processus de coagulation (processus 2) peuvent être évalués avec une grande précision à 396 MWh. Seuls les besoins en chaleur de maintien de ce processus restent plus ou moins indéterminés (en raison d'incertitudes concernant le coefficient de perte de chaleur et la superficie du récipient) : $Q_{UPHm} = 15 \pm 100 \%$, mais comme cette valeur est faible par rapport au total des besoins en chaleur de ce processus, la marge d'erreur globale concernant Q_{UPH} est seulement de 5 %.

4.3 Récupération de chaleur : exemple de la laiterie

Une laiterie est choisie afin de servir d'exemple de projet pour l'utilisation concrète du Module de récupération de chaleur.

Dans ce module, les données des processus sont converties en ce que l'on appelle des *flux d'énergie* qui peuvent être froids (qui doivent être chauffés, ce qui nécessite alors de l'énergie) ou chauds (qui doivent être refroidis, servant ainsi de source d'énergie pour d'autres processus). Ces flux sont ensuite comparés à un algorithme qui aboutit à une suggestion d'échangeurs de chaleur pour le système visant à réaliser un maximum d'économies d'énergie au cours de l'année.

4.3.1 Schéma et description du processus

L'exemple de projet est une laiterie, dans laquelle les processus consommant le plus d'énergie sont les processus de fermentation et l'évaporation du petit-lait pour la production de poudre de sérum. La figure **Error! Reference source not found.** présente les processus sous forme de schéma. Le lait froid est tout d'abord pasteurisé puis stocké. Pour la production de fromage, le lait est préchauffé et ajouté dans le fermenteur, dans lequel on ajoute de l'eau chaude à 65°C. De plus, on introduit de la chaleur externe au sein du fermenteur. Le petit-lait est extrait et après quelques étapes de purification, il est refroidi, de 45°C il passe à la température de stockage. Pour l'évaporation, le petit-lait est chauffé en externe, puis entre dans l'évaporateur, qui, dans le cas présent, est un évaporateur à recompression thermique. Le petit-lait est séché, de 6% de masse sèche, il passe à 60% de masse sèche au cours du processus d'évaporation, alors, le petit-lait concentré sortant représente 1/10 de la masse de petit-lait entrant en évaporation. Le condensat chaud est collecté à 75°C (condensat chaud issu de l'évaporation (162 m³ par jour), plus eau chaude obtenue des vapeurs résiduelles quittant le compresseur (140 m³)) et représente la plus grosse quantité de chaleur résiduelle du processus par rapport à la chaleur quittant le processus via le petit-lait concentré chaud. Le concentré chaud quitte l'évaporateur et par conséquent, il est séché dans une tour de séchage pour atteindre la masse sèche finale.

Étant donné que pour le processus de pasteurisation, la laiterie est déjà équipée d'un échangeur de chaleur interne, la priorité en termes d'économies d'énergie est donnée au processus de fermentation et à l'évaporation du petit-lait. Par conséquent, seuls ces processus sont pris en compte dans l'exemple suivant.

Pour la récupération de chaleur, il est important de prendre en compte les calendriers concernant les flux. Les calendriers de production suivants sont envisagés pour le projet :

- × Fermentation : 10 lots par jour, chacun durant 2 heures, 5 jours par semaine
Préchauffage du lait : 45 minutes avant chaque lot
Eau de lavage : 20 minutes durant chaque lot
- × Évaporation : processus continu, 14h/jour, 5 jours par semaine

4.3.2 Saisie de données de processus dans EINSTEIN

Dans EINSTEIN, les processus suivants sont alors définis depuis le module de saisie de données (Tab 19) :

Tableau 19. Résumé des processus dans l'exemple de la laiterie.

Processus	Type de processus	Flux de processus entrant	Chaleur résiduelle sortante	Énergie fournie au processus durant le fonctionnement
Préchauffage du lait	lot	Lait, 6°C à 32°C 180 m ³ par jour 10 lots pendant 30 min	Aucune (le lait chaud entre dans le fermenteur)	Aucune
Préchauffage de l'eau de lavage	lot	Eau, 10 à 65°C 18 m ³ par jour 10 lots pendant 20 min	Aucune (l'eau chaude entre dans le fermenteur)	Aucune
Fermenteur	lot	Lait, 32°C à 45°C 180 m ³ par jour 10 lots pendant 48 min	Petit-lait chaud à 45°C, refroidi à 8°C ~ 170 m ³ par jour	200 kW
Préchauffage du petit-lait	continu	Petit-lait, 8°C à 80°C 180 m ³ par jour	Aucune (le petit-lait chaud entre dans l'évaporateur)	Aucune
Évaporation	continu	Petit-lait, 80°C à 100°C	Condensat chaud 75°C,	2 400 kW

		180 m ³ par jour	400 m ³ par jour	
--	--	-----------------------------	-----------------------------	--

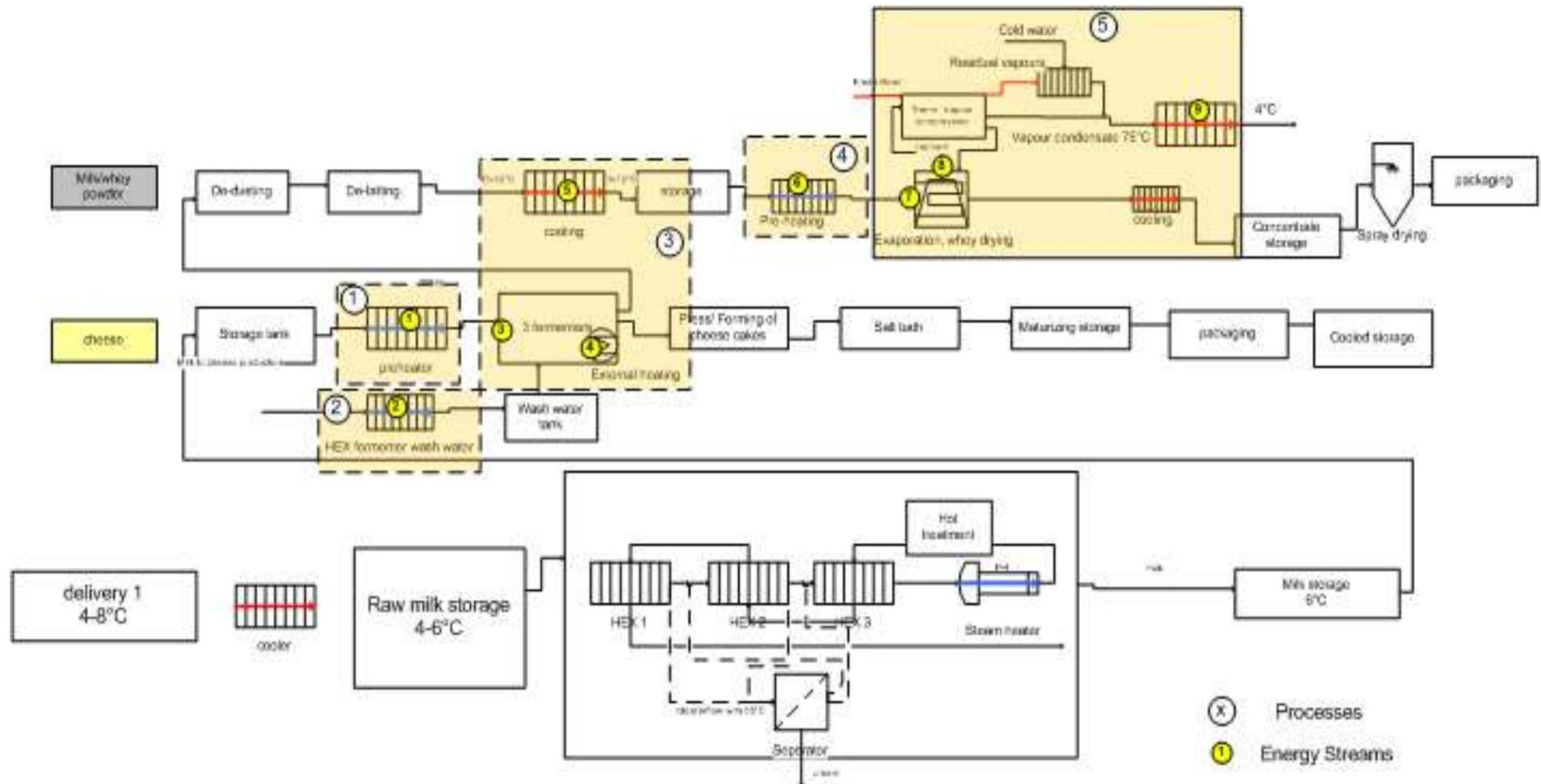


Figure 47: Schéma de la production de fromage et de poudre de sérum de laiterie

4.3.3 Calcul de la récupération de chaleur

Le module de calcul de la récupération de chaleur transforme les données de processus saisies en flux d'énergie (Tableau 20).

Tableau 20. Flux d'énergie obtenus suite aux calculs :

N° de flux	Nom du flux	Description	Température de départ °C	Température de fin °C	Chaud/ Froid	Enthalpie kW	Heures de fonctionnement h/a
1	Préchauffage du lait		6	32	Froid	1362	1040
2	Eau de lavage pour le fromage		10	65	Froid	576	520
3	Démarrage du fermenteur	Chauffage du lait de 32 à 45°C	32	45	Froid	681	1040
4	Fermenteur en fonctionnement	Maintien de la température à 45°C	45	50 (la température nécessaire au maintien de la température de fonctionnement est supérieure de 5°C pour le transfert de chaleur)	Froid	200	5200
5	Chaleur résiduelle du fermenteur	Petit-lait chaud	45	8	Chaud	-388	5200
6	Préchauffage du petit-lait		8	80	Froid	1077	3640
7	Chauffage continu pour l'évaporation du petit-lait	Chauffage du petit-lait à plus de 100°C	80	100	Froid	299	3640
8	Évaporation du petit-lait durant le fonctionnement	Évaporation à 100°C	100	100	Froid	2200	3640
9	Chaleur résiduelle de l'évaporation du petit-lait	Eau chaude générée par les condensats	75	4	Chaud	-2355	3640
10	Chaleur sensible résiduelle des effluents gazeux de la chaudière	Chaleur résiduelle des effluents gazeux de la chaudière jusqu'à température de condensation	140	58	Chaud	-170	5200

La chaleur latente des effluents gazeux de la chaudière à température de condensation est exclue de cet exemple par souci de simplicité.

Selon la méthodologie d'audit et le principe de *prévention avant recyclage*, des mesures d'économies générales et d'optimisation possibles via les nouvelles/meilleures technologies disponibles doivent être mises en place avant d'envisager l'intégration de la chaleur. Dans le cadre de l'exemple de projet proposé, il faut réfléchir à des moyens permettant de réduire la quantité d'énergie requise pour l'évaporation, comme par exemple le concept d'osmose inverse ou d'évaporation sous vide. La réduction des besoins en énergie engendrera par la même occasion une réduction de la chaleur résiduelle disponible, ce qui conduira alors à un processus plus compact dont les besoins globaux en énergie seront réduits. La pertinence des nouvelles technologies dépend évidemment des paramètres des processus et de la volonté de la société de mettre en œuvre de tels changements technologiques.

Les courbes chaudes et froides composées, la somme de tous les vecteurs d'enthalpie/de température de l'ensemble des flux froids (courbe froide composée) et des flux chauds (courbe composée chaude), révèlent les possibilités générales en matière d'échange de chaleur.

L'importante quantité d'énergie nécessaire à l'évaporation est bien visible sur la courbe composée froide. Toutefois, il y a toujours un important chevauchement entre la chaleur résiduelle disponible et les flux froids devant être chauffés. Cette zone de chevauchement révélant en théorie l'échange de chaleur potentiel couvre une plage de températures atteignant 40°C sur la courbe froide composée. Le maximum thermodynamique pour l'échange de chaleur selon les courbes de pincement s'élève à environ 2400 kW. La température de pincement se situe entre 8 et 18°C.

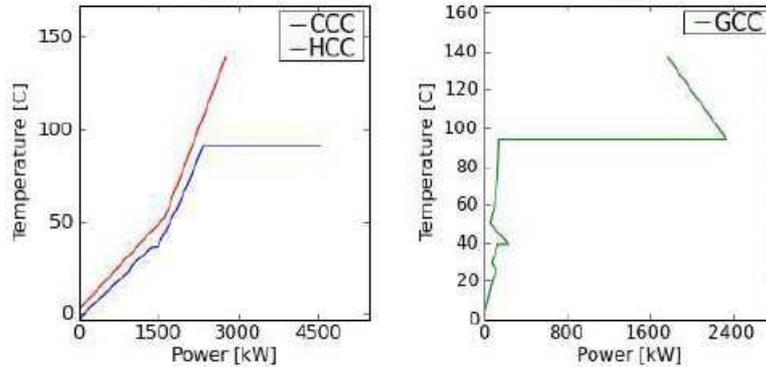


Figure 7: Courbe froide et chaude composée du processus susmentionné ($\Delta T_{min} = 10 \text{ K}$)

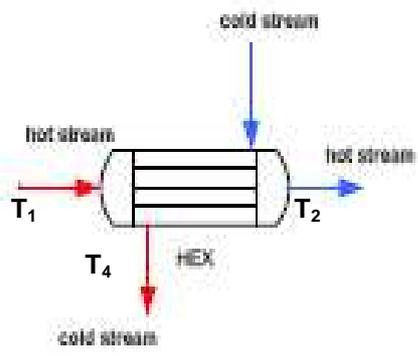
4.3.4 Résultats

L'algorithme destiné à désigner les échangeurs de chaleur éventuels prend en compte des critères tels que les températures adaptées à la récupération de chaleur, la disponibilité et les économies d'énergie maximum. Il est important de savoir qu'en fonction des critères thermodynamiques, le réseau d'échangeurs de chaleur situé en-dessous et celui situé au-dessus du pincement sont évalués séparément avant d'analyser scrupuleusement les résultats (Tableau 21).

Tableau 21. Échangeurs de chaleur proposés

Échangeurs de chaleur	Puissance	Flux chaud	T1 °C	T2 °C	Flux froid	T3 °C	T4 °C	Stockage requis en m ³
Nouvel Échangeur de chaleur N° 0	230	5, Chaleur résiduelle du fermenteur	45	20	2, Eau de lavage pour le fromage	10	32	5,5
Nouvel Échangeur de chaleur N° 1	200	8, Chaleur résiduelle de l'évaporation du petit-lait	75	69	4, Fermenteur durant le fonctionnement	45	50	28,5
Nouvel Échangeur de chaleur N° 2	1257	8, Chaleur résiduelle de l'évaporation du petit-lait	69	30	1, Préchauffage du lait	8	32	5,7
Nouvel Échangeur de chaleur N° 3	18	5, Chaleur résiduelle du fermenteur	20	18	6, Fonctionnement du préchauffage du petit-lait	8	9	3,4
Nouvel Échangeur de chaleur N° 4	149	8, Chaleur résiduelle de l'évaporation du petit-lait	30	25	6, Fonctionnement du préchauffage du petit-lait	9	20	29,17
Nouvel Échangeur de chaleur N° 5	64	8, Chaleur résiduelle de l'évaporation du petit-lait	19	16	1, Préchauffage du lait	6	7	9,3
Nouvel Échangeur de chaleur N° 6	41	5, Chaleur résiduelle du fermenteur	18	13,5	1, Préchauffage du lait	7	8	

T₃



Calculs liés au stockage

Le stockage peut être calculé grâce à une simulation semi-continue depuis EINSTEIN, toutefois, le degré d'exactitude dépendra fortement du calendrier proposé.

Pour une saisie de données en toute simplicité, la première version de EINSTEIN ne nécessite pas la saisie des calendriers de production détaillés mais attribue régulièrement les temps de fonctionnement et les lots (indiqués dans la saisie de données) tout au long de la journée. Par conséquent, les calculs de la contenance des réservoirs de stockage proposent une première estimation, mais devront faire l'objet d'une nouvelle simulation lors de la phase de conception du projet. Ici, l'expert doit également prendre en compte l'utilisation d'un réservoir de stockage central pour plusieurs flux de besoins en chaleur.

Échangeurs de chaleur

Il semble évident pour le lecteur que la chaleur résiduelle du processus d'évaporation doit être bien intégrée aux besoins. EINSTEIN propose alors le Nouvel échangeur de chaleur N°1, Nouvel échangeur de chaleur N°2, Nouvel échangeur de chaleur N°4, Nouvel échangeur de chaleur N°5.

D'un point de vue exergétique, il serait judicieux d'utiliser cette chaleur à 75°C, tout d'abord pour chauffer l'eau nécessaire au fermenteur durant son fonctionnement, processus actuellement effectué par la vapeur. D'un point de vue technique, ceci est réalisé par le biais d'un système de chauffage à eau chaude à double paroi pour le fermenteur.

Le processus d'évaporation est un processus continu, mais son temps de fonctionnement (14 heures/jour) est inférieur au temps de fonctionnement du fermenteur (20 heures/jour). Ainsi, un réservoir de stockage sera nécessaire au stockage de l'eau chaude.

Le condensat chaud est par conséquent suggéré afin de servir pour chauffer le lait du fromage à 32°C. Le préchauffage du lait engendre une consommation d'énergie considérable en raison de son fonctionnement discontinu. Toutefois, l'eau chaude peut couvrir l'intégralité de ces besoins. De ce fait, le stockage de l'eau chaude est uniquement requis pour les moments où l'eau chaude n'est pas disponible (les heures durant lesquelles le processus d'évaporation n'est pas en marche).

En règle générale, l'eau chaude issue de la récupération du condensat est déjà utilisée à 30°C. Sa température est supérieure uniquement lorsque le fermenteur et/ou le préchauffage du lait ne fonctionnent pas. L'énergie restante (au-dessus du pincement) est utilisée pour le préchauffage du petit-lait entrant dans le processus d'évaporation.

L'échangeur de chaleur N° 5 est finalement l'échangeur de chaleur correspondant à la fourniture de lait pour le fromage en-dessous de la température de pincement.

Le petit-lait chaud quittant le fermenteur est le second flux important devant être intégré au réseau d'échangeurs de chaleur. Son utilisation est très intéressante en termes d'économies et les besoins en refroidissement qu'il engendre peuvent également être réduits. Il en est ainsi car le petit-lait doit être refroidi pour le stockage. Il est suggéré d'avoir recours à ce dernier pour préchauffer l'eau de lavage pour le fromage à 32°C. L'eau de lavage est ajoutée pendant le fonctionnement du fermenteur, seule une petite quantité de chaleur devra être stockée. Le transfert de chaleur pourrait être réalisé via un fluide caloporteur (dans ce cas, l'eau est envisageable) qui refroidirait le petit-lait tout en se chauffant et qui ensuite, réaliserait un transfert de chaleur vers l'eau de lavage entrant dans le processus de fermentation.

Un autre petit échangeur de chaleur est suggéré pour l'utilisation finale de la chaleur dans le petit-lait au-dessus de la température de pincement, mais l'augmentation de la température et de la puissance est négligeable. Cependant, étant donné que le traitement de l'eau de lavage est beaucoup moins important que le refroidissement du petit-lait, la génération d'eau chaude supplémentaire (par exemple à 40°C) doit être envisagée à des fins de nettoyage ou à d'autres fins.

Comme nous pouvons le constater, EINSTEIN offre une première proposition de réseau d'échangeurs de chaleur avec pour objectif la réalisation d'un maximum d'économies d'énergie. Les échangeurs de chaleur proposés par le programme doivent faire l'objet d'une vérification en termes de praticabilité et de faisabilité technique en fonction de la réglementation, de la distance physique entre les flux d'énergie, de l'espace requis ou des aspects hygiéniques. La sensibilité des résultats dépendra en grosse partie de la saisie de données et de l'ensemble des données disponibles.

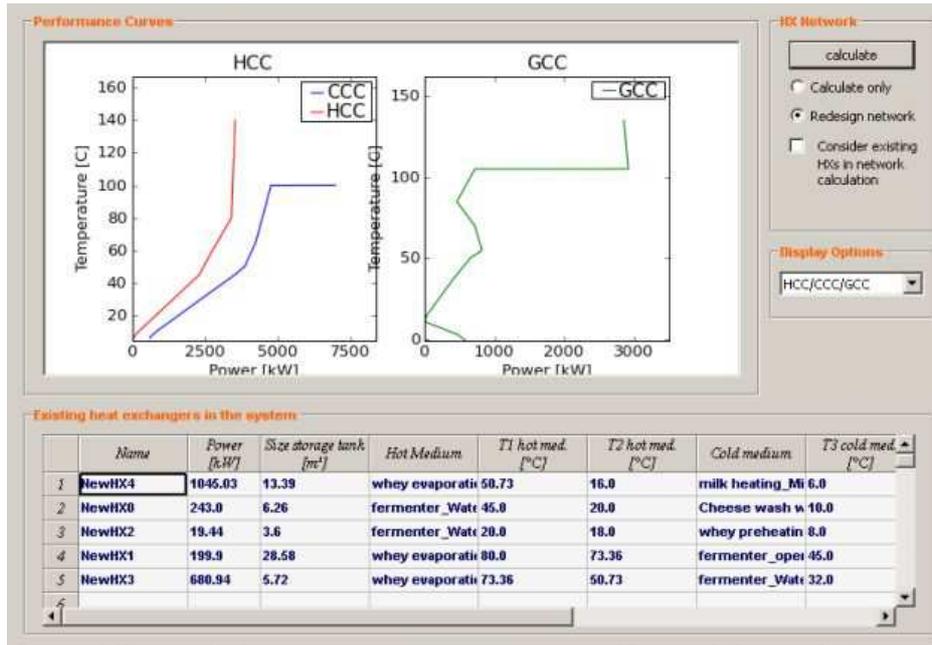


Figure 49 : Écran de résultat du module de récupération de chaleur EINSTEIN

Nomenclature

Abréviation et acronymes

BCR	ratio avantage/coût
CF	flux de trésorerie
CST	température de fourniture centrale
CHP	production combinée de chaleur et d'électricité
COP	coefficient de performance (rapport de la chaleur utile à l'entrée de guide énergétique)
EHD	besoins en chaleur équivalents
EEI	indice du coefficient énergétique
EER	rendement énergétique (rapport du froid utile à l'entrée de guide énergétique)
EX	dépenses nettes du projet
FEC	consommation énergétique finale totale
FEO	consommation d'énergie finale à autre usage (non thermique)
FET	consommation finale d'énergie à usage thermique
IRR	taux de retour interne
LCV	pouvoir calorifique inférieur
MIRR	taux de retour interne modifié
NPV	valeur actuelle nette
PBP	période de remboursement
PEC	consommation énergétique primaire totale
PEO	consommation d'énergie primaire à autre usage (non thermique)
PET	consommation d'énergie primaire à usage thermique
PSW	préchauffage de l'eau fournie
PT	température du processus
QCX	froid résiduel récupéré
QHX	chaleur résiduelle récupérée flux de chaleur au niveau des échangeurs de chaleur
QWH/C	chaleur résiduelle disponible/froid résiduel disponible
ST	température de fourniture
UPH/C	chaleur/froid utile de processus
USH/C	fourniture de chaleur/de froid utile

Symboles

A	zone
c	coefficients de la courbe de rendement des collecteurs
c_p	capacité de chaleur spécifique
d	taux d'escompte spécifique de l'entreprise
E	énergie
f	facteur de conversion
h	enthalpie spécifique
k	conductivité thermique
m	masse
n	nombre (ex : combustibles)
q	chaleur
\dot{Q}	flux thermique
q_m	débit massique

r	taux d'intérêt réel du financement externe
S	économies du projet
T	température
t	temps
U	coefficient global du transfert de chaleur par unité de surface
α	(convection) coefficient de transfert de chaleur
η	rendement
λ	

Index

c	circulant, condensat
cs	fourniture centrale ; flux froid
e	efficace
el	électrique
elgen	électricité autogénérée
env	environnement
Eq	unités d'équipement
Esources	sources d'énergie
f	final(e)
fue	combustibles
fw	eau d'alimentation
hs	flux chaud
HX	récupération de chaleur, échangeur de chaleur
i	entrée, entrant(e), index utilisé pour la source d'énergie (type de combustible, électricité)
j	index utilisé pour l'unité d'équipement thermique
L	chaleur latente (utilisée pour l'évaporation (+), la condensation (-), les réactions chimiques endothermiques ou exothermiques)
m	index utilisé pour les conduites d'eau ou les canalisations
o	sortie, sortant(e)
op	en fonctionnement
p	processus
pi	entrée du processus
pir	entrée du processus après récupération de chaleur
po	sortie du processus
por	sortie du processus après récupération de chaleur
proc	processus
pt	objectif du processus
PE	énergie primaire
PS	fourniture du processus
m	maintien
min	minimum
ref	référence
ret	retour
s	démarrage
tch	refroidisseur thermique
w	résidus

Annexe : Questionnaire de base EINSTEIN