



**HAL**  
open science

# Optimisation thermique en milieu industriel : méthodologie et outils de diagnostic

Alexandre Badier

► **To cite this version:**

Alexandre Badier. Optimisation thermique en milieu industriel : méthodologie et outils de diagnostic. Génie des procédés. 2012. hal-01871277

**HAL Id: hal-01871277**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01871277>**

Submitted on 10 Sep 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Stage effectué du 20/02/2012 au 17/08/2012 au sein de l'organisme :

**INDDIGO**



à Nancy

Sur le thème :

**Optimisation thermique en milieu industriel : méthodologie et outils de diagnostic**





## *Remerciements*

*Je remercie tout d'abord, Monsieur Abdoulaye SECK, mon maître de stage, pour ses qualités humaines et pour m'avoir proposé ce sujet et avoir suivi mes travaux tout au long du stage.*

*Je remercie aussi toute l'équipe du Département Energie et Climat, Lauryane GANDIN, Céline DESTERKE et Cyril BAILLY, pour leur disponibilité tant par leur expérience, que pour avoir facilité mon intégration au sein de l'équipe.*

*Mes remerciements vont aussi aux autres membres de l'Agence Inddigo de Nancy, Séverine, Françoise, Marie, Christelle, Cyril, Michael, Jean Baptiste, Stéphane et Marc, qui ont participé activement à mon intégration au sein de l'agence.*

*Et enfin, je dis un grand merci à toutes les personnes qui m'ont soutenu, de près ou de loin, tout au long de ce stage et de ces deux années de Master MEPP.*



## **Abstract**

Nowaday, the cost of energy is constantly evolving as well as the amount of carbon tax which is expected to rise for the coming years. That's why, several industries or local authorities makes a commitment in an initiative of control of energy.

However, there are a lot of providers who proposes their knowledges in order to reduce the energy consumptions of buildings, industrial sites or processes. But, to fight against the competition and diversify their activities, Inddigo entrust me a mission which the aim is to create some applications for different processes as heat exchanger, boiler and refrigeration unit. In fact, currently, Inddigo has some applications for electricity, compressed air or electric motors but none for the processes which are previously mentioned.

This report is composed of three main parts describing:

- The applications made during the mission,
- A methodology of an energy audit inspired by the ADEME's methodology and Inddigo's practices,
- The realization of an energy audit for the leader of the metallurgy with the use of the applications and of the ADEME's methodology.



# SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	11
I. Présentation d'INDDIGO.....	
1. Historique .....	12
2. Structure et organisation d'Inddigo .....	
3. Les différents départements .....	
a. Gouvernance et gestion responsable .....	13
b. Aménagement et Territoires .....	14
c. Transports et Déplacements .....	
d. Déchets et Ecologie industrielle .....	15
e. Bâtiment Durable .....	
f. Energie et Climat .....	
4. Département Energie et Climat : « Politique » et actions menées .....	
a. Audit énergétique et mission d'accompagnement hors industrie .....	16
b. Audit énergétique et mission d'accompagnement en milieu industriel .....	
c. Quelques références d'audits réalisés .....	17
II. Diagnostic et optimisation énergétique en milieu industriel .....	
1. Origines, contexte et acteurs .....	
a. Origines et étapes marquantes de l'émergence de la notion d'efficacité énergétique .....	
a1. Evolution à l'échelle mondiale .....	18
a2. Evolution au niveau national .....	19
b. Contexte actuel .....	20
c. Les acteurs de l'optimisation énergétique .....	
2. Objectifs d'un diagnostic énergétique en milieu industriel .....	21
3. Description d'une prestation de diagnostic énergétique en Industrie .....	22
4. Démarche de réalisation d'un diagnostic énergétique en milieu industriel .....	23
5. Les Certificats d'économie d'énergie (CEE) .....	
a. Définition et principe de calcul des CEE .....	
a1. Définition d'un CEE .....	24
a2. Principe de calcul de la quantité de CEE valorisable .....	
b. Origines et historique du dispositif .....	
b1. Première période : « Phase de rodage » .....	25
b2. Deuxième période .....	
b3. Période transitoire .....	
c. Les acteurs du dispositif des CEE .....	
c1. Les « obligés » .....	
c2. Les « éligibles » .....	26
c3. Cas particulier : les entreprises .....	
c4. Le Pôle National des CEE (PNCEE) .....	
d. Actions d'économies d'énergie : opérations standardisées et opérations spécifiques .....	
d1. Les fiches d'opérations standardisées d'économies d'énergie .....	
d2. Les opérations spécifiques (« non-standard ») .....	27
d3. Les actions non éligibles au dispositif .....	
e. Informations et conditions pour déposer un dossier de demande de CEE .....	28

III.	Outils de diagnostic énergétique en milieu industriel .....	
1.	Outils de diagnostic énergétique existants en milieu industriel .....	
a.	Thermoptim .....	
a1.	Origines et intérêts du progiciel .....	29
a2.	Principe de fonctionnement et description de l'outil .....	30
a3.	Points forts et limites de l'outil .....	
b.	RETSscreen .....	
b1.	Origines et intérêts de la création de RETSscreen .....	31
b2.	Principe de fonctionnement et description de l'outil .....	
b3.	Points forts et limites de l'outil .....	32
c.	Einstein (Expert System for an Intelligent Supply of Thermal Energy in Industry) .....	
c1.	Origines, contexte et intérêts de la création de l'outil d'audit énergétique Einstein.....	33
c2.	Méthodologie d'audit énergétique de l'outil .....	
c3.	Points forts et limites de l'outil .....	34
2.	Présentation des outils élaborés au cours de la mission .....	
a.	Outil spécifique aux machines frigorifiques .....	
a1.	Périmètre d'utilisation de l'outil .....	35
a2.	Logigramme représentatif du fonctionnement de l'outil .....	36
a3.	Note de calcul – Formules et paramètres utilisés .....	
a3a.	Corrélations utilisées .....	37
a3b.	Hypothèses de préconisations et points de comparaison avec l'existant .....	38
a3c.	Solutions d'optimisation : Haute et basse pression flottante .....	42
b.	Outil échange et récupération de chaleur .....	
b1.	Périmètre d'utilisation de l'outil .....	44
b2.	Logigramme représentatif du fonctionnement de l'outil .....	
b3.	Note de calcul – Formules et paramètres utilisés .....	
b3a.	Corrélations utilisées .....	45
b3b.	Propriétés physiques utilisées .....	47
c.	Outil combustion .....	
c1.	Périmètre d'utilisation de l'outil .....	51
c2.	Logigramme représentatif du fonctionnement de l'outil .....	52
c3.	Note de calcul – Formules et paramètres utilisés .....	
c3a.	Corrélations utilisées .....	53
c3b.	Propriétés physiques des combustibles .....	55
IV.	Compte rendu du diagnostic énergétique d'un site métallurgique en Lorraine .....	
1.	Contexte de l'étude .....	56
2.	Présentation de la ligne de production étudiée .....	
a.	Description de la zone de recuit .....	
b.	Description de la zone peinture .....	57
3.	Compte rendu partiel du diagnostic énergétique du site .....	
a.	Synthèse de l'audit .....	
a1.	Présentation des scénarios .....	59
a2.	Conclusion et critique des résultats .....	62
b.	Elaboration de préconisations avec l'utilisation, pour certaines, des outils réalisés au cours de ce stage .....	
b1.	Préconisations sur le four de la zone de recuit .....	63
b2.	Préconisations sur les incinérateurs de la zone de peinture .....	70

CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....	77
Références bibliographiques .....	78
Annexe1 : Démarche de réalisation d'un diagnostic énergétique en milieu industriel inspiré de la méthodologie de l'ADEME et des pratiques d'Inddigo .....	83
Annexe 2 : Méthodologie de rédaction détaillée d'un rapport Inddigo .....	90
Annexe 3 : Exemple de fiche d'opération standardisée d'économies d'énergie .....	93
Annexe 4 : Photographie représentant la structure de l'outil échange et récupération de chaleur .....	94
Annexe 5 : Photographie représentant la structure de l'outil combustion .....	95
Annexe 6 : Photographie représentant la structure de l'outil échange et récupération de chaleur .....	97



## INTRODUCTION

Au sein du département Energie et Climat de la société Inddigo, société spécialisée dans le conseil et ingénierie en développement durable, deux missions m'ont été confiées :

- La première consistait en la réalisation d'outils de simulation voir d'optimisation dans différents domaines tels que le froid, la combustion, les échangeurs et la récupération de chaleur.
- La seconde était tournée vers la réalisation de diagnostic énergétique en milieu industriel avec notamment un diagnostic énergétique pour le leader mondial de la métallurgie, qui a monopolisé une bonne partie de ce stage ; ainsi qu'une brève contribution pour une autre affaire, pour une société, spécialisée dans la fabrication de fromage, sur le thème de la cogénération (biomasse et biogaz).

Ces missions seront détaillées dans ce rapport à travers quatre parties :

La première partie concerne la présentation de la société Inddigo et de ses activités. Une attention toute particulière sera dédiée au département Energie et Climat, département dans lequel mon stage s'est déroulé.

D'un point de vue plus théorique, le second axe de ce rapport présentera :

- Les origines de l'efficacité énergétique c'est-à-dire les évènements qui ont fait que l'efficacité énergétique est devenue un besoin et qui ont engendré une émergence considérable de prestataires dans ce domaine,
- Le contexte actuel et les raisons qui poussent les industries à se lancer dans une démarche de maîtrise de la demande en énergie,
- Les acteurs à travers les prestataires, les instigateurs de la démarche et les entreprises diagnostiquées,
- la méthodologie de réalisation d'un diagnostic en milieu industriel, une méthodologie inspirée en grande partie de celle établie par l'ADEME et utilisée par Inddigo.

Dans la troisième partie, un Benchmarking des outils existants dans le domaine de l'optimisation énergétique sera présenté suivi de la présentation des outils établis au cours de ce stage.

Et enfin, la dernière partie présente le compte rendu d'un diagnostic énergétique effectué au cours du stage pour le leader mondial de la métallurgie. Cette partie sera la mise en application de la méthodologie et des outils présentés dans les parties précédentes du rapport.

## I. Présentation d'Inddigo :

### 1. Historique :

- 1986 : **Origine d'Inddigo.** Création par Philippe VACHETTE avec le groupe ATFJ et EMMAÜS, de l'entreprise d'insertion TRIVALOR, afin d'assurer l'exploitation des déchetteries de l'agglomération chambérienne.
- 1989 : TRIVALOR, déjà connue pour ses performances et ses recherches en tri et valorisation des déchets, recrute son premier ingénieur pour une fonction études. Il s'agit de Christophe BERARD, actuel Président d'Inddigo.
- 1990 : TRIVALOR se consacre exclusivement à l'activité de conseil et passe le relais de l'exploitation à l'entreprise d'insertion TRIALP SARL.
- 1993 : Création de la filiale TRIVALOR-SOL (qui deviendra ensuite TRIVALOR Sud-Ouest) à Toulouse, pour développer l'activité dans cette région. Développement dans la conception de centres de tri et la maîtrise d'œuvre et diversification dans le domaine des énergies renouvelables. L'effectif total atteint 16 personnes.
- **1995 : Création du Groupe Inddigo, avec deux D pour Développement Durable.** Holding de TRIVALOR SA et TRIVALOR-SOL. Inddigo diversifie ses compétences de conseil et d'ingénierie en Développement Durable.
- 1998 : Création d'ALTERMODAL, filiale dédiée aux Transports et Déplacements. Inddigo réalise son premier plan de déplacement d'entreprise.
- 2000 : Création de CEDDAET, filiale dédiée aux Stratégies Territoriales.
- 2002 : Mise en place du système de management intégré d'Inddigo.
- 2006 : Création de CITÉFINANCES, filiale dédiée au conseil en matière de financement et de gestion des services publics locaux. Inddigo réunit 100 collaborateurs.
- 2007 : TRIVALOR, ALTERMODAL, CEDDAET fusionnent au sein d'INDDIGO. CITÉFINANCES demeure filiale d'Inddigo SAS.
- 2008 : 6 grands programmes de Recherche & Développement sont lancés.
- 2009 : Création de SOLIRA DEVELOPPEMENT, qui développe des projets Energies renouvelables et mobilise l'épargne citoyenne. Un collaborateur sur 5 se rend au travail à Vélo.
- 2010 : Inddigo développe son éco-système : intégration de Citéfinances, prise de participation dans ICOM, agence de communication responsable, création de la filiale Générescence.
- 2011 : Inddigo réunit plus de 223 collaborateurs au 1er janvier. Avec l'ouverture du site de Marseille à l'automne, INDDIGO est désormais implantée dans 8 villes en France.

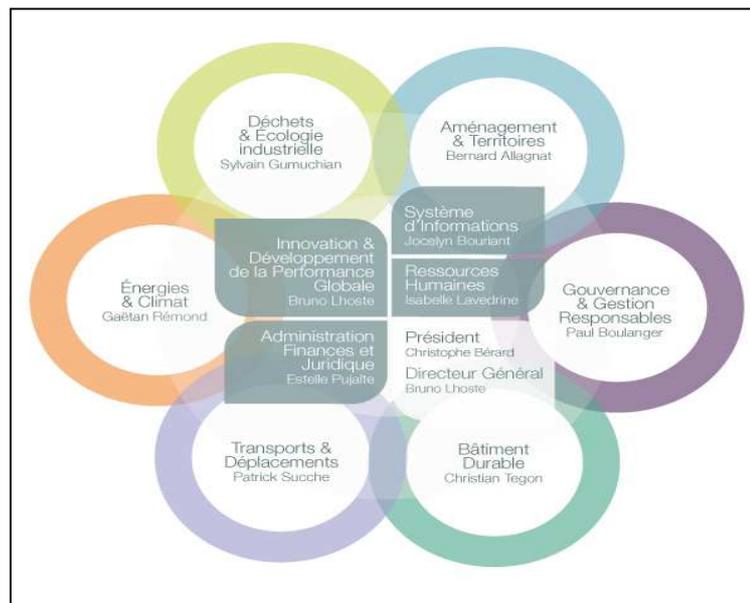
### 2. Structure et organisation d'Inddigo :

Actuellement, le groupe Inddigo est composé de 8 agences à travers la France (Chambéry (siège social), Dijon, Nantes, Paris, Toulouse, Montpellier, Nancy et Marseille).

La société Inddigo, présidée par Christophe BERARD, est l'association de plusieurs domaines de compétence répartis en six départements :

- Gouvernance et Gestion responsable,
- Aménagement et Territoires,
- Transport et Déplacements,
- Déchets et écologie industrielle,
- Bâtiment durable,
- Energies et climat.

## Organigramme de la société Inddigo :



**Figure 1 : Organisation du groupe Inddigo**

### 3. Les différents départements :

#### a. Gouvernance et Gestion responsable :

Le rôle de ce département est d'accompagner les organisations publiques et privées dans leurs choix stratégiques de développement durable et de réunir les conditions d'un déploiement efficace. Les principaux points caractérisant ce domaine sont les suivants :

- Responsabilité sociale et environnementale
  - Concept de responsabilité sociétale des entreprises (RSE) qui consiste à intégrer les préoccupations sociales, environnementales et économiques dans leurs activités,
  - Plans d'actions développement durable (achats, relations clients, gouvernance, formation...),
  - Systèmes de management,
  - Eco responsabilité des organisations,
  - Stratégie carbone (anticipation des évolutions sociétales et réglementaires, développement d'une entreprise dans un contexte de rareté de l'énergie, réduction de la dépendance énergétique).
- Animation et concertation
  - Définition des objectifs,
  - Identification des enjeux et des acteurs,
  - Méthodologie, outils et évaluation.
- Montages juridiques et financiers
  - Contrats publics et délégations, besoins et stratégies de financement,
  - Accompagnement des offres et des organisations innovantes.

## **b. Aménagement et Territoires :**

La mission première de ce département est de définir et organiser la politique de développement durable des collectivités locales et territoriales, aménageurs et porteurs de projets. Les actions de ce département sont établies selon les points suivants :

- Développement durable des territoires
  - Accompagnement à la définition de stratégie durable pour une politique environnementale,
  - Argumentaires de renforcement de l'attractivité des pôles d'excellence ou de clusters à travers l'activité économique, le commerce, le tourisme, la cohésion sociale, la culture...
  - Améliorer l'éco-responsabilité des usagers,
  - Mise en place d'un système de management environnemental (SME)...
  
- Urbanisme durable
  - Diagnostic de territoire, Analyse Environnementale Urbaine (AEU), Evaluation Stratégique Environnementale (ESE),...,
  - Conception d'aménagements Haute Qualité Environnementale (HQE), « Quartiers durables », Cœur de ville,
  - Rénovation urbaine, renouvellement, réhabilitation de friches urbaines,
  - Aménagement équilibré, fonctionnement des espaces naturels, intégration paysagère,
  - Réhabilitation de Zones d'Activités Economiques...
  
- Biodiversité et environnement
  - Conseils en aménagements et planification territoriale,
  - Diagnostic de terrain, relevé et consolidation de données,
  - Evaluation environnementale,
  - Analyse d'empreinte écologique,
  - Réalisation de schémas régionaux de cohérence écologique,
  - Appui réglementaire, code de l'environnement, étude d'impact, suivi SME,
  - Analyse de la vulnérabilité des territoires...

## **c. Transports et Déplacements :**

Le rôle de ce département est avant tout de concevoir les mobilités de demain. Il intervient dans les domaines des déplacements, du management de la mobilité, des transports, de l'urbanisme, de l'aménagement du territoire, du tourisme et de l'environnement. Le département est susceptible d'intervenir pour :

- Missions de programmation ou de planification
  - circulations douces,
  - déplacements urbains,
  - accessibilité aux réseaux de transport et aux espaces publics,
  - stationnement...
  
- Etude de faisabilité, d'expertise et d'assistance à maîtrise d'ouvrage (AMO)
  - plans de déplacements d'entreprises, d'administrations et de zones d'activités,
  - éco-mobilité scolaire,
  - accidentologie et sécurité routière,
  - gares et pôles d'échanges multimodaux,
  - réseaux de transport urbains, interurbains, scolaires...
  
- Etude de conception et de maîtrise d'œuvre
  - Aménagements cyclables et piétonniers,
  - Espaces publics,
  - Signalisation cyclable...

#### **d. Déchets et Ecologie industrielle :**

Le but de ce département est de définir, réaliser, auditer ou améliorer la réduction et la gestion des déchets des collectivités locales, groupements d'industriels, entreprises, éco-organismes ou opérateurs. Les missions menées concernent :

- Plans et programmes de prévention
  - Planification et évaluation environnementale de la gestion des déchets à différentes échelles territoriales (commune, département, région)
  - Faisabilité et accompagnement à la mise en œuvre de dispositifs innovants (habitat vertical, tarification incitative)
- Optimisation de la collecte et intégration de systèmes incitatifs
  - Assistance à la passation de contrats et au contrôle d'exploitation
- Audits de prestations et d'installations de traitement
- Maîtrise d'œuvre, ingénierie industrielle et assistance à la maîtrise d'ouvrage pour la conception, la construction et l'optimisation des équipements de valorisation et de traitement des déchets (déchèterie, tri, compostage, méthanisation, incinération, stockage, bioréacteur...).

#### **e. Bâtiment Durable :**

La mission première de ce département est d'accompagner les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et architectes à concevoir des bâtiments économes, confortables et sains. On peut voir ci-dessous les domaines de compétence de ce département :

- Assistance à maîtrise d'ouvrage
  - Diagnostic
  - Programme technique et fonctionnel environnemental,
  - Hiérarchisation des cibles,
  - Système de management de l'opération,
  - Suivi de conception,
  - Sensibilisation,
  - Evaluation.
- Maîtrise d'œuvre
  - Expertise environnementale : conception bioclimatique de l'éclairage naturel, simulation thermique dynamique, empreinte carbone des matériaux, gestion de l'eau, coût global.
  - Suivi de la réalisation et évaluation des performances énergétiques de l'enveloppe des bâtiments.
  - Accompagnement à l'usage du bâtiment (sensibilisation et communication).

#### **f. Energie et Climat :**

Le département Energie et Climat étant le département dans lequel j'effectue mon stage. Une attention particulière lui est donc dédiée dans le sous chapitre suivant.

#### **4. Département Energies et Climat : « Politique » et actions menées :**

Département dans lequel se déroule le stage, il est divisé en deux segments d'activités à travers les missions dans l'industrie (métallurgie, plasturgie, textile, bois...) et les missions hors industrie concernant les collectivités locales, les gestionnaires de patrimoine ou encore les bailleurs de logement ou de locaux tertiaires... On peut voir ci-dessous les actions menées par Inddigo sur les missions hors industrie et dans d'industrie. L'objectif du stage étant tourné vers l'optimisation énergétique en milieu industriel, il est donc important de bien cerner les actions entreprises pour répondre à cet objectif d'efficacité énergétique.

##### **a. Audit énergétique et mission d'accompagnement hors industrie:**

Le département Energie et Climat s'applique à définir, mettre en oeuvre et évaluer les politiques et actions d'efficacité énergétique des collectivités locales, gestionnaires de patrimoine, bailleurs de logement ou de locaux tertiaires. Les politiques et actions d'efficacité énergétique sont menées selon les démarches suivantes :

- Schémas énergétiques à l'échelle des territoires ou des quartiers
  - Plan Climat Energie territorial,
  - Etude d'approvisionnement énergétique,
  - Structuration des ressources locales et renouvelables
- Amélioration énergétique du patrimoine bâti
  - Audit
  - Planification
  - Ingénierie des solutions préconisées
  - Contrat de performance énergétique
  - Suivi et contrôle des performances
- Ingénierie de systèmes Energies Renouvelables
  - Maîtrise d'œuvre et assistance à maîtrise d'ouvrage de réseaux et chaufferies bois énergie, centrales solaires photovoltaïques, solaire thermique, biogaz, géothermie...
- Ingénierie énergétique des bâtiments à haute performance environnementale.

##### **b. Audit énergétique et mission d'accompagnement en milieu industriel :**

L'objectif est de permettre aux entreprises d'identifier les gisements d'économie d'énergie et de mettre en œuvre rapidement des actions de maîtrise des consommations d'énergie rentable économiquement. Basé sur une analyse détaillée de l'existant et des données du site, l'audit dressera une proposition chiffrée et argumentée de programmes d'économie et amènera le maître d'ouvrage à décider des actions et investissements appropriés.

Les interventions s'adressent à l'ensemble des industries tel que la plasturgie, la métallurgie, la mécanique, le textile, l'industrie du bois...

Les missions sont réalisées à différents niveaux de précision :

- Prédiagnostic,
- Audit énergétique,
- Accompagnement du maître d'ouvrage dans la mise en place du plan d'actions.

- Audit énergétique industriel :
  - Concertation et recueil des données existantes,
  - Visite du site, de durée adaptée à la taille et la complexité des équipements,
  - Campagne de mesures et enregistrements représentatifs : analyse de réseaux triphasés, puissances, débits, luminosité, températures, thermographie infrarouge,
  - Optimisation tarifaire des contrats de fourniture d'énergie,
  - Analyse des flux et du fonctionnement des procédés,
  - Analyse et optimisation du fonctionnement et des consommations des utilités (air comprimé, moteurs électriques, production de vapeur, production de froid),
  - Intégration des énergies renouvelables (solaire, bois énergie, cogénération...)...
- Mission d'accompagnement à la mise en œuvre d'un plan d'actions :

Elle consiste à aider le maître d'ouvrage à mettre en œuvre son plan d'actions d'économies d'énergie :

- Mise en place du suivi énergétique,
- Campagnes de mesures ciblées et approfondies,
- Etudes de faisabilité complémentaires,
- Assistance au maître d'ouvrage pour chaque projet retenu (consultation et choix de l'équipe de maîtrise d'œuvre ; suivi et contrôle des phases conception, consultation travaux, réalisation et réception),
- Elaboration de Certificats d'Economies d'Energie non standards,
- Sensibilisation et formation des collaborateurs et partenaires.

### c. Quelques références d'audits réalisés :

- Opérations collectives CRCI Lorraine et Champagne-Ardenne
- Plus de 50 audits détaillés en **Plasturgie, Métallurgie, Textile Fonderie, Ameublement, Mécanique,**
- Diagnostics de 4 sites de production SOMFY (*Automatismes Domotique*),
- Diagnostic et simulation thermique d'un site de production JOHN DEERE (*Moteurs thermiques*),
- Etude de procédé thermique pour ARCELOR MITTAL (*Métallurgie*),
- Diagnostic d'un site de production CIAT (*Echangeurs thermiques*),
- Accompagnement sur 3 ans pour la mise en œuvre de solutions d'optimisation énergétique suite au diagnostic réalisé pour FRANCE TEINTURE (*Textile*),
- Assistance à la mise en œuvre des solutions d'optimisation énergétique suite au diagnostic réalisé pour CROUVEZIER (*Ennoblement textile*), élaboration et dépose d'un dossier de Certificat d'Economie d'Energie non standard.
- Diagnostics énergétiques des ateliers LOUIS VUITTON (*Maroquinerie*)
- Diagnostic de 3 sites de production VRANKEN POMMERY (*Champagne*)...

## **II. Diagnostic et optimisation énergétique en milieu industriel :**

Dans ce chapitre, il conviendra dans un premier temps, de définir dans quel contexte les industries sont amenées à se lancer dans un projet de recherche de l'efficacité énergétique, en y définissant les origines de ce besoin ainsi que la situation actuelle. De plus, pour bien comprendre le contexte dans lequel évolue Inddigo, il y sera développé les différents acteurs qui composent le domaine de l'optimisation énergétique ainsi que le rôle et les champs d'actions attachés à chacun.

Dans un second temps, il sera présenté les objectifs, la description d'une prestation et la démarche complète (de la visite du site à la rédaction du rapport) de réalisation d'un diagnostic énergétique en milieu industriel inspirés des méthodologies de l'ADEME et des pratiques d'Inddigo.

Et enfin, ce chapitre se conclura sur la présentation du dispositif des Certificats d'Economies d'Energies (CEE), dispositif important lancé en 2006 dans le cadre de politique française de Maîtrise de la Demande en Energie (MDE) pour tous les secteurs d'activités (bâtiment, industrie, transport...), et qui représente une aide non négligeable pour les acteurs souhaitant investir dans la recherche de l'efficacité énergétique.

### **1. Origines, contexte et acteurs :**

#### **a. Origines et étapes marquantes de l'émergence de la notion d'efficacité énergétique :**

Il faut savoir que la notion d'optimisation énergétique n'est pas apparue spontanément du jour au lendemain, en effet celle-ci s'inscrit avant tout dans une politique de développement durable. Il est donc important de retracer l'évolution du concept de développement durable afin de bien comprendre le contexte actuel et les raisons qui poussent les industries, les collectivités... à entamer des démarches de maîtrise de l'énergie. On peut donc voir ci-dessous que la notion de développement durable est avant tout issue d'une prise de conscience internationale avant d'être ensuite appliquée à l'échelle nationale.

#### **a1. Evolution à l'échelle mondiale :**

##### **• Les prémisses du développement durable :**

Entre les années 1970 et 1990, plusieurs évènements témoignent de la volonté de sauvegarder la planète sans pour autant éveiller les consciences au niveau international :

- 1971 : le Club de Rome, association privée internationale créée en 1968, prône la croissance zéro c'est-à-dire qu'elle considère que le développement économique n'est pas en adéquation avec la protection de la planète à long terme.
- 1972 : Conférence des Nations Unies à Stockholm. Cette conférence est à l'origine du premier vrai concept de développement durable qui était prénommé à l'époque : éco-développement. La conférence insistera sur la nécessité d'intégrer la prudence écologique dans les modèles de développement économique du Nord et du Sud et donnera naissance au Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE).
- Les années 1980 : La population mondiale constate et déplore de nombreux bouleversements des équilibres naturels (pluies acides, trou dans la couche d'ozone, effet de serre, déforestation, Tchernobyl...) ce qui laissera place à une prise de conscience internationale aux débuts des années 1990.

##### **• La prise de conscience internationale :**

La prise de conscience quant à la nécessité de réduire les consommations liées à l'énergie et les émissions de gaz à effet de serre, a véritablement émergée il y a une vingtaine d'année. En effet, deux évènements majeurs sont le berceau réel de cette notion d'optimisation énergétique :

- Le Sommet de Rio de 1992 qui traduit une prise de conscience internationale du risque de changement climatique.
- Le Protocole de Kyoto de 1997 qui traduit en engagements quantitatifs la volonté de stabilisation des émissions des gaz à effet de serre (GES) à travers l'Agenda 21.

Cette volonté est relayée en 2002 lors du Sommet Mondial de Johannesburg, prénommé « Le géant qui a accouché d'une souris » pour son plan d'actions jugé insuffisant, mais comportant cependant des points positifs notamment pour les entreprises qui montrent leurs efforts et engagements à travers l'instauration de système de management environnemental (SME), d'indicateurs de performances environnementales tout cela en respectant les normes (ISO 14001, SD 21000...).

Et enfin, le dernier évènement, renforçant l'encrage de la notion de développement durable dans toutes les consciences, s'est déroulé lors du Sommet de la Terre (Rio+20) en juin 2012, au cours de la Conférence des Nations Unies sur le développement durable. Au-delà des critiques des associations écologiques (Greenpeace...), qui considèrent que cette conférence a juste encouragé ou renouvelé les engagements passés, de nouveaux engagements ont cependant fait leur apparition (programmes de consommation et de production durable, indicateurs de développement durable, transfert de technologies « vertes »...).

## **a2. Evolution au niveau national :**

En France, les textes de lois et les réformes qui traduisent actuellement la volonté de refonder la politique de l'écologie et de l'énergie sont :

- Les lois du Grenelle de l'Environnement 1 (promulguée le 3 Aout 2009) et 2 (promulguée le 12 Juillet 2010),
- L'Agenda 21 local.

- **L'Agenda 21 local :**

L'Agenda 21 local est un processus de réflexion stratégique proposé dans l'Agenda 21 de Rio pour mettre en place au niveau local un projet collectif de développement durable. C'est un projet global et concret, dont l'objectif est de mettre en œuvre progressivement et de manière pérenne le développement durable à l'échelle du territoire. Il est porté par la collectivité et mené en concertation avec les élus, les habitants, les associations, les entreprises...

- **Les lois Grenelle 1 et 2 :**

Les lois Grenelle 1 et 2 se sont inscrites dans la continuité de la loi POPE (loi de Programme fixant les Orientations de la Politique Energétique), loi du 13 Juillet 2005, afin de donner corps à la politique française de maîtrise de la demande en énergie.

L'objectif principal du Grenelle de l'Environnement est de contribuer à une diminution drastique des émissions de gaz à effet de serre. Pour cela de nombreux objectifs ont été établis tels que :

- L'adaptation des normes de consommation énergétique,
- La généralisation de l'étiquetage énergétique,
- Retirer progressivement les produits, les procédés les plus consommateurs,
- Soutenir le retrait des ampoules à incandescence,
- Adopter la dénomination d'agrocarburant,
- Renforcer le dispositif des Certificats d'Economie d'Energie (CEE),
- Généraliser les bilans d'énergie et de GES Pour les personnes morales employant plus de 250 salariés,
- Soutenir l'extension du système des quotas GES,
- Diversifier le bouquet énergétique (23% d'énergies renouvelables (EnR)),
- Créer un fond de soutien au développement de chaleur à base d'EnR,

- Soutenir les réseaux de chaleur alimentés à plus de 50% d'EnR,
- Mettre en cohérence les politiques de qualité de l'air et d'adaptation au changement climatique...

C'est donc suite à cette prise de conscience internationale sur l'urgence à entreprendre des actions afin de préserver la planète que des programmes de lois et de réformes ont été créés au niveau territorial et ainsi qu'est né le besoin de recherche de l'efficacité énergétique.

### **b. Contexte actuel :**

Face à une demande énergétique et un prix de l'énergie en constante augmentation et à une raréfaction indéniable des énergies primaires, l'optimisation énergétique est devenue un domaine phare, que ce soit dans les secteurs du tertiaire et de l'industrie.

Il faut savoir que suite à un diagnostic énergétique et à la mise en place d'une politique de suivi, une réduction de la facture énergétique est estimée de :

- 5 à 10 % sur les dérives journalières,
- 10 à 50 % sur les procédés et utilités énergivores,
- 5 à 30 % sur les dépenses liées aux bâtiments.

C'est donc dans le cadre de la politique de maîtrise de la demande en énergie (MDE) que l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) souhaite inciter les acteurs industriels à s'engager sur la voie de l'utilisation rationnelle de l'énergie. Pour cela, un plan d'action basé notamment sur le soutien aux études d'aide à la décision (pré-diagnostic, diagnostic, étude de faisabilité) dans l'industrie a été décidé.

Cette démarche a pour objectif de permettre aux entreprises d'identifier les gisements d'économie d'énergie et de mettre en œuvre rapidement des actions de maîtrise des consommations d'énergies rentables économiquement, et tout cela suivant un cahier des charges bien précis.

En effet, il ne faut pas se leurrer, la motivation première d'une industrie qui s'engage dans une démarche de maîtrise de l'énergie est avant tout l'aspect financier c'est-à-dire les économies réalisables, le montant de l'investissement et à partir de quand le projet devient rentable (temps de retour sur investissement). Le chiffrage des économies réalisables passe donc par un diagnostic énergétique qui a deux principaux objectifs sur le plan financier :

- Lutter contre la flambée des prix de l'énergie,
- Diminuer les rejets de CO2 et anticiper une évolution future de la Taxe Carbone prévue à plus de 100 €/tonne.

### **c. Les acteurs de l'optimisation énergétique :**

A l'heure actuelle plusieurs acteurs proposent leur service pour remédier à l'utilisation souvent excessive et inappropriée de l'énergie mais surtout dans le but de diminuer les dépenses liées à l'énergie et diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

Les principaux organismes répondant à cette demande sont :

- Les constructeurs (d'échangeurs de chaleur, de chaudières, de groupes froids...) qui proposent une optimisation de l'énergie plus axée sur l'aspect technique des procédés,
- Les fournisseurs d'énergie, qui proposent des contrats d'énergie à la hauteur des consommations du client et qui sont donc plus tournés vers l'aspect financier,
- Les associations attachées à la maîtrise de l'énergie (ATEE, ...)
- le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie par le biais de méthodologies, de normes,

- Les bureaux d'études qui regroupent les compétences précédemment citées et qui permettent une étude plus approfondie de la situation énergétique d'un site...
- L'ADEME, qui propose un cahier des charges et qui cofinance les études.

En effet, le cahier des charges, développé par l'ADEME, précise le contenu et les modalités de réalisation de ces études qui seront effectuées par des prestataires techniques extérieurs à l'entreprise diagnostiquée. Ce document rappelle notamment les investigations à mener et les données minimales que le prestataire technique doit restituer aux responsables du site concerné (ratios,...).

Ces études, répondant aux cahiers des charges de l'ADEME et généralement cofinancées par celle-ci, rentrent souvent dans le cadre d'opérations collectives menées par des Chambres de Commerce et d'Industrie (CCI), des Chambres Régionales de Commerce et d'Industrie (CRCI), des syndicats spécifiques à un domaine de compétences (métallurgie, textile ...) ou encore des fournisseurs d'énergie. Cependant, les études ne sont pas forcément faites dans le cadre d'opérations collectives, elles peuvent émaner des sociétés dans une démarche volontaire de réduction des coûts liés à l'énergie.

A savoir qu'une opération collective a pour objectifs principaux d'accompagner plusieurs entreprises lors de programmes d'actions communs dans le but de renforcer le tissu local, de sensibiliser les entreprises au développement durable et d'expérimenter à plus grande échelle un outil de sensibilisation ou de premier accompagnement.

## **2. Objectifs d'un diagnostic énergétique en milieu industriel :**

Le diagnostic énergétique entre dans le cadre d'une politique interne de réduction des consommations d'énergie. Il doit permettre, à partir d'une analyse des données disponibles sur le site, de dresser une première évaluation des gisements d'économie d'énergie envisageables et d'orienter le maître d'ouvrage vers des interventions simples à mettre en œuvre et/ou vers des études plus approfondies (diagnostic instrumenté général ou diagnostic spécialisé).

Le diagnostic doit permettre à l'entreprise auditée de remplir plusieurs objectifs :

- Mieux suivre et gérer le coût de l'énergie sur les principaux postes consommateurs,
- Sensibiliser le personnel aux économies d'énergie,
- Modifier aux mieux les procédés, les utilités et les modes d'exploitation,
- Mettre en œuvre des solutions plus performantes afin de réaliser des économies d'énergie,
- Participer à la baisse des émissions de gaz à effet de serre et protéger l'environnement,
- Donner une image valorisante de l'entreprise aux tiers.

Ces objectifs apparaissent à travers trois phases :

- **Phase 1 : Analyse de l'existant**
  - Récupération des factures énergétiques (électricité, gaz, fioul, ...), des factures d'eau,
  - Récupération des courbes de charge,
  - Visite du site,
  - Inspection des postes consommateurs d'énergie,
  - Enquête sur les modes d'exploitation (dialogue avec un responsable technique).
- **Phase 2 : Audit énergétique du site avec mesures**
  - Mesures de débits, de températures, de puissances, d'énergie, ...
  - Bilan énergétique du site avec études spécifiques des domaines potentiellement intéressants,
  - Coût global de fonctionnement des installations auditées.
- **Phase 3 : Solutions et présentation des résultats**

- Demande de devis auprès des professionnels,
- Liste des modifications à apporter et des investissements, avec temps de retour,
- Conseils d'optimisation de l'exploitation des installations,
- Préconisations d'investissements, modes opératoires, modification de l'installation existante,
- Calcul de la rentabilité pour chaque préconisation,
- Plan de suivi des résultats avec tableaux de bord,
- Remise du rapport et commentaires.

### **3. Description d'une prestation de diagnostic énergétique dans l'Industrie :**

La prestation de « diagnostic énergétique dans l'industrie » est entreprise dans le but d'effectuer une quantification précise du potentiel d'économies d'énergie d'un site industriel et de définir les travaux ou autres modifications nécessaires à la réalisation de ces économies.

Afin que le maître d'ouvrage bénéficie d'un regard d'expert extérieur à l'entreprise, le diagnostic devra être réalisé par un prestataire, ayant les compétences nécessaires et les références attestant de ces compétences.

Ce prestataire doit respecter les règles suivantes :

- Chiffrer au mieux les économies d'énergie réalisables sur les sites industriels faisant l'objet d'une étude d'aide à la décision, et en préciser les conditions économiques de réalisation,
- Suivre une démarche rigoureuse et explicitée et justifiée dans ses rapports d'études,
- Etre exhaustif dans ses recommandations et fournir toutes les informations objectives nécessaires au maître d'ouvrage pour décider des suites à donner,
- Ne pas privilégier a priori un type d'énergie ni certaines modalités de fourniture d'énergie ou de tout autre utilité (vapeur, air comprimé, froid...)
- Ne pas intervenir dans un établissement vis-à-vis duquel il ne présenterait pas toute garantie d'objectivité, notamment sur des installations conçues, réalisées ou gérées pour l'essentiel par lui-même,
- N'adjoindre aucune démarche commerciale concernant des biens ou services ayant un lien avec les recommandations effectuées au cours de son intervention.

Lors de ce diagnostic, le prestataire fera l'analyse de l'existant, en prenant en compte l'ensemble des principaux postes de consommations énergétiques dont notamment, les procédés de fabrication, les utilités et les locaux de travail sous tous leurs aspects énergétiques. Au cas où un pré-diagnostic a déjà été réalisé au préalable, le diagnostic devra permettre de valider les préconisations du pré-diagnostic et d'approfondir, notamment grâce à la mesure, les pistes d'investigation identifiées comme prioritaires lors du pré-diagnostic.

Dans tout les cas, la proposition commerciale du prestataire précisera le détail des opérations couvertes par le diagnostic proposé ainsi que les mesures qui seront effectuées. La proposition établira également la liste des matériels de mesure nécessaires et une proposition financière attachée à la fourniture de ce matériel. De plus, le prestataire peut adapter son intervention en fonction des singularités d'un site industriel. Il doit en contrepartie expliquer les raisons à l'organisme audité et les mentionner dans le rapport.

L'identification et la quantification des gisements potentiels d'économies d'énergie seront effectuées sur la base des données de consommation suffisamment précises et représentatives (factures). Lorsque ces données sont indisponibles, incomplètes ou imprécises, des campagnes de mesure seront réalisées.

Les préconisations du prestataire peuvent être classées en trois scénarios :

- Actions immédiates permettant une économie d'énergie sans nécessiter d'investissement,
- Actions prioritaires à mener à court terme avec niveau de rentabilité élevé,
- Actions utiles, à mettre en œuvre car de rentabilité certaine mais pouvant être différée du fait d'implications sur le fonctionnement de l'entreprise plus lourds à gérer ou d'interactions avec des actions prioritaires.

Par la suite, les préconisations pourront être mises en cohérence avec une éventuelle démarche de Système de Management Environnemental (SME) propre à l'entreprise.

Les préconisations pourront porter sur les aspects suivants :

- Modification d'un mode opératoire,
- Modification ou remplacement d'un ou plusieurs équipements particuliers,
- Modification et/ou création d'un système ou d'une partie d'installation,
- Modifications des modes de production ou de fourniture d'énergie,
- Adaptation éventuelles des différents contrats liant l'entreprise aux fournisseurs d'énergie, de fluides ou de services.

Cette élaboration des préconisations passe par une phase de réflexion préalable sur la réduction éventuelle des besoins énergétiques. Elle passe aussi par un contrôle du dimensionnement des équipements en place par rapport aux besoins et par l'analyse de l'état de fonctionnement, de leurs conditions d'exploitation et la recherche des modifications nécessaires. Les conditions de mise en place de ces modifications (unité de marche, arrêt programmé...) et leur coût éventuel seront également abordés.

Les investissements correspondants et leur temps de retour seront précisés à partir de l'expérience de l'expert, des données existant sur le site et de quelques consultations préliminaires auprès des fournisseurs d'équipement permettant d'établir une estimation budgétaire préliminaire à +/- 20%. La détermination précise des montants d'investissement est un des objets de l'étude de faisabilité qui, en cas de poursuite du projet, peut être décidé à l'issue du diagnostic.

#### **4. Démarche de réalisation d'un diagnostic énergétique en milieu industriel :**

La démarche de réalisation d'un diagnostic énergétique en milieu industriel, issue du cahier des charges de l'ADEME et des pratiques d'Inddigo, est détaillée dans l'annexe 1 de ce rapport suivi par une méthodologie détaillée d'un rapport de diagnostic d'Inddigo dans l'annexe 2. En effet, ces deux parties, non moins importantes mais mises en annexes pour une forte ressemblance avec la littérature existante, permettent de cerner le cadre d'un diagnostic énergétique en industrie et les résultats attendus dans un rapport de diagnostic.

## 5. Les Certificats d'Economies d'Energies (CEE) :

### a. Définition et principe de calcul des CEE :

#### a1. Définition d'un CEE :

Un CEE est un bien meuble immatériel que l'Etat délivre à un demandeur, obligé ou éligible, en contrepartie d'actions reconnues comme éligibles. La matérialisation des CEE est l'inscription sur un registre informatique national, auquel les acteurs du dispositif ont accès pour y consigner leurs certificats et effectuer des transactions de gré à gré, selon les règles du droit commercial.

Le dispositif des CEE repose sur une obligation de réalisation d'économies d'énergie, imposée par les pouvoirs publics aux vendeurs d'énergie, appelés les « obligés » (électricité, gaz naturel, GPL, chaleur, froid, fioul domestique et les carburants pour automobiles). Ceux-ci sont ainsi incités à promouvoir activement l'efficacité énergétique auprès de leurs clients : ménages, collectivités territoriales ou professionnels.

#### a2. Principe de calcul de la quantité de CEE valorisable :

Le kWh cumac est l'unité de compte des CEE. Ce nom vient de la contraction de « cumulés » afin de tenir compte des économies réalisées sur toute la durée de vie de l'opération (par exemple de l'équipement installé) et de « actualisés » afin de prendre en compte une actualisation annuelle des économies futures.

On a donc :

$$CEE = EE * C_a$$

Avec :

- CEE = quantité de certificats, exprimés en kWh cumac,
- EE = économie d'énergie réalisée, exprimée en kWh/an,
- $C_a$  = coefficient de cumul actualisé ou durée de vie actualisé

$$C_a = 1 + \frac{1}{a} * \left(1 - \frac{1}{(1+a)^{n-1}}\right)$$

Avec :

- a = taux d'actualisation égal à 4%
- n = durée de vie de l'investissement en nombre d'années

n (ans)	$C_a$ (actualisé à 4%)
1	1,000
5	4,630
10	8,435
15	11,563
20	14,134
25	16,247
30	17,984

**Tableau : Coefficients d'actualisation en fonction de l'investissement**

## **b. Origines et historique du dispositif :**

Le dispositif des CEE a été lancé en 2006 suite à la loi de Programme fixant les Orientations de la Politique Energétique (loi POPE) afin de donner corps à la politique française de Maîtrise de la Demande en Energie (MDE) dans tous les secteurs d'activités : bâtiments, industries, transports, agriculture, services et réseaux. Cette politique de MDE consiste à :

- Optimiser la performance des activités économiques,
- Réduire la vulnérabilité des approvisionnements en énergie,
- Limiter les effets du changement climatique.

Depuis la création du dispositif, on dénombre deux périodes ainsi qu'une période de transition :

### **b1. Première période : phase de « rodage » :**

Destiné à monter en puissance, le dispositif des CEE a fait l'objet d'une période de rodage du 1<sup>er</sup> Juillet 2006 au 30 Juin 2009 assortie d'un objectif d'économies d'énergie de 54 TWh. Cet objectif a été dépassé avec un montant total sur la période de 65,2 TWh cumac d'économies certifiées.

### **b2. Deuxième période :**

C'est la loi de l'Engagement National pour l'Environnement (ENE), en Juillet 2010, qui a défini la mise en place d'une seconde période du dispositif des CEE.

Tout comme la première, cette deuxième période est de trois ans. Elle a débuté le 1<sup>er</sup> Janvier 2011 et s'achèvera le 31 Décembre 2013. L'objectif d'économies d'énergie de la période est fixé à 345 TWh cumac.

### **b3. Période transitoire :**

Entre ces deux périodes triennales, une période transitoire a été instaurée au cours de laquelle les acteurs obligés et éligibles ont pu continuer à engranger des CEE valorisables en deuxième période. Cette période a permis de porter le montant des économies d'énergie accumulées depuis 2006 à 164,3 TWh cumac au 31 Décembre 2010 (dont 12,7 TWh cumac pour des non obligés).

## **c. Les acteurs du dispositif des CEE :**

### **c1. Les « obligés » :**

Les vendeurs d'énergie, astreints à une obligation d'économies d'énergie matérialisée par des CEE, à partir d'un seuil de ventes fixé par énergie, sont désignés comme les « obligés ». A la fin de la période triennale (du 1<sup>er</sup> Janvier 2011 au 31 Décembre 2013), ces obligés doivent présenter à l'Etat les CEE obtenus grâce à leurs actions.

Sont « obligés » :

- Les vendeurs d'électricité, de gaz naturel et GPL, de chaleur/froid et de fioul domestique,
- Les distributeurs de carburants pour automobiles depuis le 1<sup>er</sup> Janvier 2011.

Trois possibilités se présentent aux obligés pour satisfaire à leur obligation :

- Réaliser des économies d'énergie auprès de leurs clients, au travers d'actions et de services ad hoc ; ce qui semble au premier abord aller à l'encontre de l'activité commerciale « naturelle » de ces fournisseurs, mais qui, en réalité, permet de transformer leurs activités et d'enrichir leurs relations avec leurs partenaires et leurs clients ;

- Réaliser des économies d'énergie sur leur patrimoine ;
- Acheter le nombre de CEE nécessaires auprès d'autres acteurs du dispositif, obligés ou éligibles, disposant de CEE en surplus, car les CEE peuvent être l'objet de transactions.

Les actions d'économies d'énergie ne sont pas liées à l'énergie vendue par l'obligé, elles peuvent porter sur n'importe quelle énergie dans n'importe quel secteur d'activité.

### **c2. Les « éligibles » :**

Afin de favoriser l'émergence des CEE, le dispositif a prévu d'autres intervenants en plus des vendeurs d'énergie : les « éligibles ». Les éligibles ont le droit de déposer des dossiers de demande. Ils peuvent donc entreprendre des opérations visant à générer des CEE, et, soit les déposer en propre, soit les valoriser au travers de partenariats.

Sont éligibles au dispositif :

- Les collectivités publiques : collectivités locales et établissements publics,
- L'Agence nationale de l'amélioration de l'habitat (Anah),
- Les bailleurs sociaux.

### **c3. Cas particulier : les entreprises :**

Une entreprise qui, en tant que maître d'ouvrage, réalise une action d'économie d'énergie n'est pas éligible (contrairement à ce qui était possible avant le 12/07/2010), c'est-à-dire qu'elle ne peut pas obtenir de CEE en son nom propre. En revanche, elle peut nouer, en amont de son investissement de MDE et avant de lancer la réalisation des travaux, un partenariat avec un obligé : celui-ci présentera le dossier et obtiendra les CEE attachés à son projet ; l'entreprise bénéficiant, en contrepartie, d'une aide ou d'un soutien qu'elle aura pu négocier avec le fournisseur d'énergie.

### **c4. Le Pôle National des CEE (PNCEE) :**

Le PNCEE a été créé le 1<sup>er</sup> Octobre 2011. Les agents du PNCEE sont chargés de :

- L'instruction des demandes de CEE et la délivrance des CEE,
- L'instruction des demandes d'agrément et l'agrément des plans d'actions d'économies d'énergie,
- La mise en œuvre des opérations de contrôle,
- Le constat par les agents commissionnés des infractions et la prononciation des sanctions,
- La gestion et la fixation des obligations individuelles,
- La réconciliation administrative de fin de période triennale,
- La communication et l'information sur le dispositif,
- L'archivage des pièces justificatives...

Tout dépôt d'une demande pour l'obtention de CEE se fait auprès du PNCEE. L'ADEME apporte son expertise au PNCEE dans le traitement des demandes de CEE émises par les acteurs du dispositif.

## **d. Actions d'économies d'énergie : opérations standardisées et opérations spécifiques :**

### **d1. Les fiches d'opérations standardisées d'économies d'énergie :**

L'accomplissement d'opérations donnant lieu à des économies d'énergie, et permettant d'obtenir des CEE, se fait dans un cadre prédéfini. Un répertoire d'opérations standardisées, reproductibles et permettant d'atteindre des gisements diffus d'économies, a progressivement été constitué. Au 15 Janvier 2012, 238 opérations standardisées sont répertoriées sous forme de fiches. Ces fiches permettent de calculer de manière

forfaitaire le nombre de kWh cumac résultant de la mise en œuvre d'une opération standardisée. La durée maximale de l'instruction d'un dossier basé sur des opérations standardisées est de 3 mois.

Ces fiches sont le résultat de calculs réalisés à partir d'une situation de référence, construite avec des données statistiques reconnues au plan national (études ADEME, données du CEREN...), sur les consommations des différents usages et du niveau de performance des différents équipements.

Au 31 Octobre 2011, les opérations standardisées représentaient 97 % de tous les CEE certifiés depuis 2006.

Un exemple de fiche d'opération standardisée est exposé en annexe 3 de ce rapport.

### **d2. Les opérations spécifiques (« non-standard ») :**

Les fiches d'opérations standardisées ne peuvent pas rendre compte de tous les types d'actions d'économies d'énergie possibles car certaines actions sont plus complexes ou ne peuvent être généralisées. Le dispositif prévoit donc également la valorisation d'opérations « non-standard » faisant l'objet d'un examen par le service instructeur. La durée maximale de l'instruction du dossier est de 6 mois.

Les opérations spécifiques engagées depuis le 1<sup>er</sup> Janvier 2011 doivent suivre les exigences et les recommandations suivantes :

- La réalisation d'un diagnostic énergétique,
- L'établissement de la situation avant l'opération,
- La détermination de la situation de référence,
- La détermination de la situation prévisionnelle après l'opération en incluant des bilans énergétiques théoriques avant/après,
- La justification du montant des certificats demandés et en particulier du choix de la durée de vie de l'équipement,
- La justification du calcul du temps de retour sur investissement (TRI > 3 ans),
- La justification des économies d'énergie réelles réalisées par une campagne de mesures représentative,
- Respect de la trame de constitution du dossier de demande proposée.

### **d3. Les actions non éligibles au dispositif :**

Les actions suivantes ne permettent pas d'obtenir des CEE :

- Les actions réalisées dans les installations soumises à la directive européenne établissant un système d'échange de quotas de CO<sub>2</sub>,
- Les actions résultant d'une simple substitution d'énergies fossiles sans gain énergétique,
- Les actions résultant du seul respect de la réglementation en vigueur.

**e. Informations et conditions pour déposer un dossier de demande de CEE :**

- Pour pouvoir déposer un dossier auprès du service instructeur, les demandeurs de CEE doivent posséder un compte sur le registre EMMY ([www.emmy.fr](http://www.emmy.fr)) qui est le registre national des CEE. Une fois l'ouverture de compte effectuée, il est possible de :
  - constituer directement en ligne son dossier de demande de CEE et de le transmettre au PNCEE,
  - gérer l'ensemble des opérations effectuées sur son compte (achat, vente de CEE...).
- Sur le site mentionné ci-dessus, une liste répertorie les titulaires de compte qui souhaitent vendre ou acheter des CEE. Le site publie également le prix moyen du MWh cumac. Il était en moyenne de 3,5 €/MWh cumac en 2010 et a atteint 4,2 €/MWh cumac en fin d'année 2011.
- A savoir que dans le cas où l'obligation n'est pas atteinte, une pénalité de 2 c€ par kWh cumac manquant devra être acquittée.
- Tout dépôt de dossier de demande de CEE doit concerner un niveau minimal de 20 GWh cumac.

### **III. Outils de diagnostic énergétique en milieu industriel :**

Afin de lutter contre la concurrence qui se fait de plus en plus rude dans le domaine de l'optimisation énergétique, Inddigo doit se prémunir d'outils de diagnostic énergétique qui permettront de gagner du temps et par conséquent d'optimiser le coût de la prestation.

Inddigo possède actuellement un large panel d'outils, notamment dans les domaines de :

- l'électricité,
- l'air comprimé,
- les moteurs électriques,
- des déperditions thermiques du bâti,
- ...

Cependant, dans un contexte concurrentiel qui s'accroît, la société Inddigo souhaite accroître et compléter sa base d'outils notamment dans les domaines de la thermique et de la thermodynamique afin de diversifier ses compétences et offrir des diagnostics énergétiques se démarquant des autres.

Certes des logiciels d'optimisation et simulation existent actuellement dans ces domaines, tels que Thermoptim, RETScreen, pdeTool ou encore Einstein... ; cependant pour des raisons évidentes de coût (logiciel+formation) mais aussi de temps, Inddigo mise sur la réalisation d'outils spécifiques en interne dans de nombreux domaines.

En effet, l'un des objectifs de ce stage consistait donc à établir des outils de diagnostics énergétiques simples et ergonomiques permettant d'évaluer rapidement les performances d'un procédé (COP, rendement de combustion, efficacité énergétique...) pour trois principaux domaines :

- Le froid,
- L'échange et la récupération de chaleur,
- La combustion.

Dans cette partie du rapport, il sera donc question, dans un premier temps, de réaliser un Benchmarking des outils existants spécialisé dans l'optimisation énergétique, puis en second lieu de présenter les outils établis au cours de ce stage.

#### **1. Les outils de diagnostic énergétique existants en milieu industriel :**

##### **a. Thermoptim :**

###### **a1. Origines et intérêts du progiciel :**

Renaud Gicquel, professeur spécialisé dans l'optimisation des installations thermodynamiques complexes, est l'auteur du progiciel Thermoptim.

Cet outil a pour objectif de calculer facilement des cycles thermodynamiques relativement complexes sans être pour autant obligé de recourir à des simplifications outrancières et des calculs fastidieux. Il permet de représenter de nombreuses technologies énergétiques par simple assemblage graphique de composants prédéfinis. Sans écrire une seule ligne de code, il est possible d'établir des modèles phénoménologiques pour calculer leurs performances avec une très grande précision et de tracer leurs cycles dans les divers diagrammes thermodynamiques. Déchargés des difficultés calculatoires habituelles en la matière, Thermoptim est reconnu pour ses qualités pédagogiques.

En effet, Thermoptim a été développé afin de contribuer à résoudre certaines difficultés rencontrées dans l'apprentissage et l'approfondissement de la thermodynamique appliquée. Les objectifs principaux avoués par les créateurs de l'outil sont les suivants :

- Motiver les débutants en évitant qu'ils ne soient rebutés par les difficultés calculatoires tout en leur permettant de traiter des exemples suffisamment complexes pour qu'ils se rapprochent de la réalité,
- Faciliter la prise en main du progiciel grâce d'une part à un important effort au niveau de l'interface, et d'autre part à l'intégration dans l'outil du maximum de fonctionnalités,
- Offrir à des utilisateurs confirmés un environnement de calcul puissant et convivial leur permettant d'augmenter leur productivité.

### **a2. Principe de fonctionnement et description de l'outil :**

Il est composé de cinq principaux environnements de travail liés les uns aux autres que sont :

- **Un éditeur de schéma :** Il permet de décrire qualitativement le système étudié. Il comporte une palette présentant les différents composants représentables (échangeurs de chaleur, compresseurs, organes de détente, chambres de combustion, mélangeurs...), et un panneau de travail où ces composants peuvent être placés et interconnectés par des liens vectoriels.
- **Un simulateur :** Il permet de quantifier puis de résoudre le modèle décrit qualitativement dans l'éditeur de schémas. Le simulateur calcule pas à pas les différents éléments d'un projet. Il s'agit d'un mode de calcul séquentiel, qui le distingue d'autres environnements de modélisation (matriciels) dans lesquels l'ensemble des équations du problème est résolu simultanément.
- **Des diagrammes thermodynamiques interactifs :** Ils peuvent être utilisés pour visualiser les cycles thermodynamiques calculés par le simulateur.
- **Une méthode d'optimisation :** La méthode d'optimisation se fait par intégration systémique et est une extension au cas des systèmes énergétiques (centrales de production d'électricité, de cogénération...) de la méthode du pincement (méthode Pinch) qui sert habituellement à l'optimisation de la configuration des réseaux d'échangeurs. Cette méthode permet de visualiser les zones critiques du système. En mettant en évidence les pincements, elle identifie les endroits du système dont la conception doit faire l'objet d'un soin particulier, et constitue pour cela un guide précieux là où auparavant étaient employés des méthodes nécessitant parfois de nombreuses itérations.
- **Un éditeur de structures productives :** Il permet d'obtenir une représentation graphique très parlante des flux d'exergie dans un système énergétique.

### **a3. Points forts et limites de l'outil :**

<b>+</b>	<b>-</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Environnement de modélisation cohérent combinant les apports des approches systémiques et analytique.</li> <li>- Démarche d'analyse très rigoureuse conduisant à des gains de productivité appréciables</li> <li>- Les modèles développés peuvent être facilement vérifiés, documentés, archivés, réutilisés ou modifiés.</li> <li>- La traduction mathématique numérique et informatique du modèle généré étant assurée par l'outil de manière transparente.</li> <li>- Le modélisateur n'a pas à écrire une seule ligne de code ou à résoudre lui-même une équation.</li> <li>- Les propriétés des fluides sont calculées automatiquement...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Calculs effectués seulement en régime permanent</li> <li>- Temps de calcul assez longs, notamment pour les études en régime non-nominal,</li> <li>- Les pressions et les débits ne sont pas automatiquement calculés par l'outil c'est au modélisateur de les imposer. Cela signifie que les pertes de charges ne sont pas évaluées.</li> <li>- Pas de module d'assistance à l'apprentissage.</li> </ul>

## **b. RETScreen :**

### **b1. Origines et intérêts de la création de RETScreen :**

Au milieu des années 90, les créateurs de RETScreen se sont rendu compte que l'on disposait de nombreux outils sophistiqués d'aide à la conception et à l'estimation détaillée des coûts d'un projet, mais rien pour aider à estimer l'intérêt d'un projet au tout début de son processus d'analyse. En effet, le besoin ne réside pas dans le fait de chercher à avoir plus de précision dans les calculs mais dans l'optique d'évaluer facilement et rapidement un grand nombre d'options afin d'identifier les solutions les plus prometteuses sur les plans énergétique et financier. C'est pour répondre à ce besoin que RETScreen a été développé.

Si à l'origine, RETScreen a été développé pour analyser les technologies d'énergie renouvelable, ses capacités ont été étendues ces dernières années à une gamme complète de technologies propres de chauffage, de climatisation et de mesures d'efficacité énergétique. Ainsi l'outil permet désormais d'assister la conception de nouveaux bâtiments ou les audits énergétiques de bâtiments existants qu'il s'agisse d'une simple maison individuelle ou d'un vaste complexe industriel. Les mesures analysées concernent aussi les procédés industriels.

RETScreen est un outil fonctionnant sous tableur Excel qui est fourni gratuitement par le gouvernement du Canada dans une démarche de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). L'outil s'adapte à tout type de projet d'efficacité énergétique ou d'énergie renouvelable. Il permet de mesurer l'impact d'un projet sur la performance énergétique d'un procédé ou d'un bâtiment, de calculer les coûts de cycle de vie, les émissions évitées et les indicateurs financiers nécessaires à la prise de décision. En effet, RETScreen est un logiciel d'aide à la décision qui permet de déterminer rapidement et simplement, dès les premières étapes d'un projet énergétique, si celui-ci mérite d'être approfondi ou non, avant d'amorcer des études d'ingénierie et de développement.

### **b2. Principe de fonctionnement et description de l'outil :**

Peu importe le modèle étudié, le logiciel structure son processus de simulation et d'analyse en cinq étapes :

- Etape 1 : Modèle énergétique
  - Evaluation des performances énergétiques du projet par rapport à un projet conventionnel de référence pour le même besoin.
  - Détermination de la quantité d'énergie propre qui peut-être livrée ou économisée par le projet.
- Etape 2 : Analyse des coûts
  - Evaluation des coûts additionnels du projet proposé par rapport au projet de référence
- Etape 3 : Analyse des émissions (étape optionnelle)
  - Calcul des réductions d'émissions de GES
- Etape 4 : Analyse financière
  - Bilan financier du projet (Valeur Actualisée Nette (VAN), Temps de retour sur investissement (TRI)...) C'est dans cette étape que l'on découvre si le projet est financièrement intéressant compte tenu des flux monétaires, des taxes, des impôts et des subventions.
- Etape 5 : Analyse de risque – Etude de sensibilité
  - Cette analyse montre comment les variations de certains paramètres influent sur la rentabilité du projet.

De plus, la caractéristique majeure de RETScreen tient dans la diversité des modèles énergétiques modélisables. Ces modèles couvrent quasiment toutes les technologies énergétiques. RETScreen propose ainsi cinq modèles génériques :

- L'efficacité énergétique,
- La production de chaleur,
- La production de froid,
- La production d'électricité,
- La cogénération.

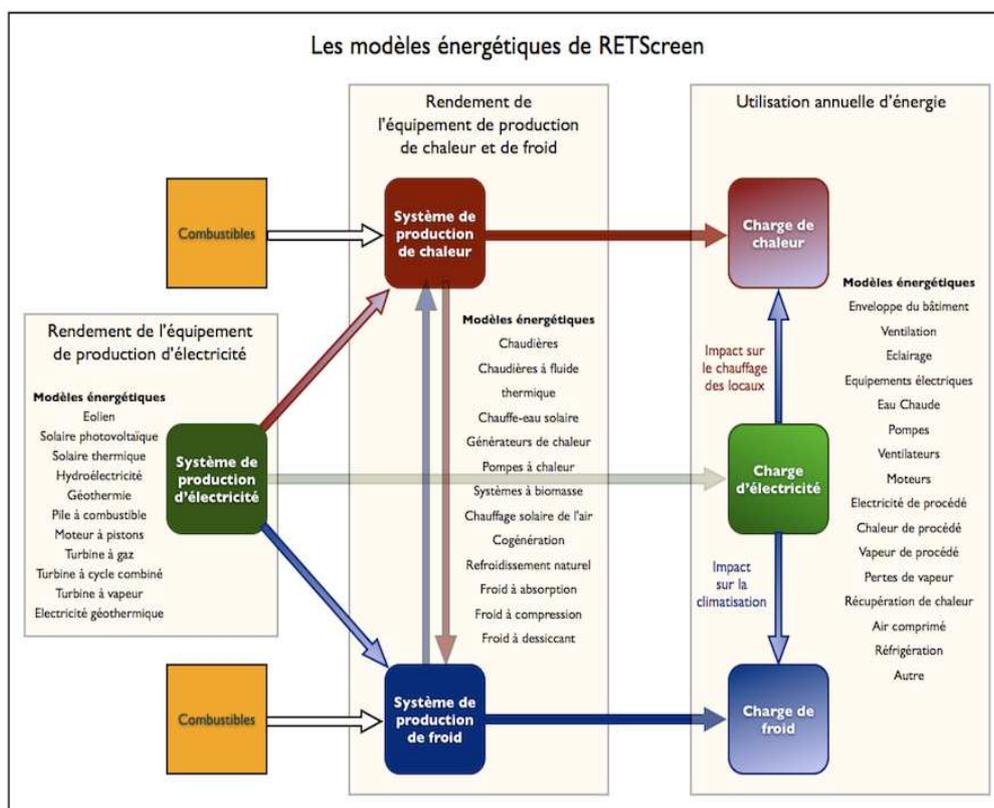


Figure : Les modèles énergétiques de RETScreen

### b3. Points forts et limites de l'outil :

+	-
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facile d'utilisation, outil sous tableur Excel,</li> <li>- Gratuit, accessibilité,</li> <li>- Traitant la majorité des cas de l'énergétique,</li> <li>- Outil évoluant constamment,</li> <li>- Base de données de produits universels et de projets déjà simulés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessite des calculs complémentaires,</li> <li>- Nécessite l'utilisation d'outils complémentaires.</li> </ul>

## **c. Einstein (Expert System for an Intelligent Supply of Thermal Energy in Industry) :**

### **c1. Origines, contexte et intérêts de la création de l'outil d'audit Einstein :**

Einstein est une méthodologie pour la mise en œuvre d'une approche de l'audit d'énergie thermique dans l'industrie et pour les grands utilisateurs d'énergie thermique non industriels tels que les hôpitaux, immeubles de bureaux ou salles de sport.

En d'autres termes, Einstein permet le développement de stratégies pour la réduction de la demande d'énergie et des coûts d'exploitation par récupération de chaleur et de l'intégration des processus et par une combinaison intelligente des technologies existantes abordables d'approvisionnement en chaud et en froid, pour une contrainte économique donnée.

La demande industrielle d'énergie thermique constitue environ 28% de la demande totale d'énergie finale en Europe. Le chauffage et le refroidissement des bâtiments contribuent quant à eux à 27% de la demande finale d'énergie. Malgré l'amélioration de l'efficacité énergétique à travers l'Europe au cours des dernières décennies, il reste un vaste potentiel inexploité pour réduire la consommation d'énergie thermique dans les entreprises, ainsi que pour les utilisateurs non-industriels tels que les hôpitaux ou les grands immeubles de bureaux, par une combinaison intelligente des technologies existantes. C'est dans ce contexte et afin d'offrir aux industriels une méthodologie leur permettant de réduire leur demande énergétique, et in fine, leurs coûts d'exploitation, que l'Union européenne a, dans le cadre du programme IEE (Intelligent Energy Europe), décidé de financer la création et le développement de ce logiciel professionnel.

Porté et financé par l'UE, le projet Einstein lancé en 2007 a d'abord concerné un petit nombre de pays pilotes : l'Autriche, la République tchèque, l'Italie, la Pologne, la Slovaquie et l'Espagne. Une phase initiale instructive qui, via notamment une campagne énergétique menée dans 90 entreprises industrielles, a permis l'expérimentation pratique de l'outil.

IEE a ensuite décidé de franchir une nouvelle étape en formalisant un second projet : Einstein-II. Démarré en juillet 2010 pour une durée de deux ans (jusqu'en octobre 2012), il élargit son champ d'application et inclut d'autres partenaires européens réunis au sein d'un consortium international dont la France, l'Allemagne, le Luxembourg, l'Irlande, la Belgique, la Bulgarie et la Slovaquie. Outre des chambres de commerce, il rassemble des experts de l'innovation dans le domaine de la performance énergétique : laboratoires, centres techniques, agences de l'énergie.

Les objectifs visés par Einstein-II sont :

- Une diffusion plus large de l'outil en Europe,
- La poursuite du développement du logiciel et de sa méthodologie,
- La création d'un outil plus global qui puisse s'appliquer tant au niveau des procédés industriels qu'au niveau des bâtiments tertiaires à forte demande et consommation chaud et froid.

### **c2. Méthodologie d'audit énergétique de l'outil Einstein :**

La méthodologie d'audit énergétique Einstein se caractérise en dix étapes :

- Etape 1 : Contacts préliminaires. Informer et motiver.
- Etape 2 : Acquisition des données de pré-audit
- Etape 3 : Préparation de l'audit
- Etape 4 : Rapport de pré-évaluation rapide et sommaire
- Etape 5 : Visite sur site
- Etape 6 : Vérification et ajustement des données
- Etape 7 : Définition des objectifs énergétiques

- Etape 8 : Calcul des performances énergétiques et analyse environnementale
- Etape 9 : Analyse économique et financière
- Etape 10 : Création du rapport et présentation à l'entreprise

### **c3. Points forts et limites de l'outil :**

+	-
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Traitement des données permettant l'élaboration rapide de propositions</li> <li>- Démarche semi-automatisée pour des domaines moins bien maîtrisés par l'utilisateur, Einstein peut compléter certaines données manquantes par des bilans thermiques et connaissances d'ingénierie</li> <li>- Traitement des données avec procédure de contre-vérification pour détecter les incohérences</li> <li>- Facilité d'utilisation, l'interface entre les différents modules énergétiques et économiques est facile à manipuler.</li> <li>- Gratuit et open source. Tout le monde peut utiliser et télécharger gratuitement l'outil et contribuer à son développement et partager son expérience avec la communauté Einstein.</li> <li>- Utilisation de manière simplifiée de la méthode des pincements (méthode PINCH)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Outil pas encore au point au niveau ergonomie</li> <li>- Quelques bugs au niveau de la modélisation</li> <li>- Certains procédés ne sont pas pris en compte</li> <li>- Pas au point dans le domaine du froid</li> <li>- Incohérence des bilans massiques ce qui n'influe pas sur les objectifs de l'outil mais cela peut être perturbant pour les puristes</li> </ul>

## **2. Présentation des outils élaborés au cours de la mission :**

### **a. Outil spécifique aux machines frigorifiques :**

#### **a1. Périmètre d'utilisation de l'outil :**

Les principaux objectifs de l'outil sont de caractériser :

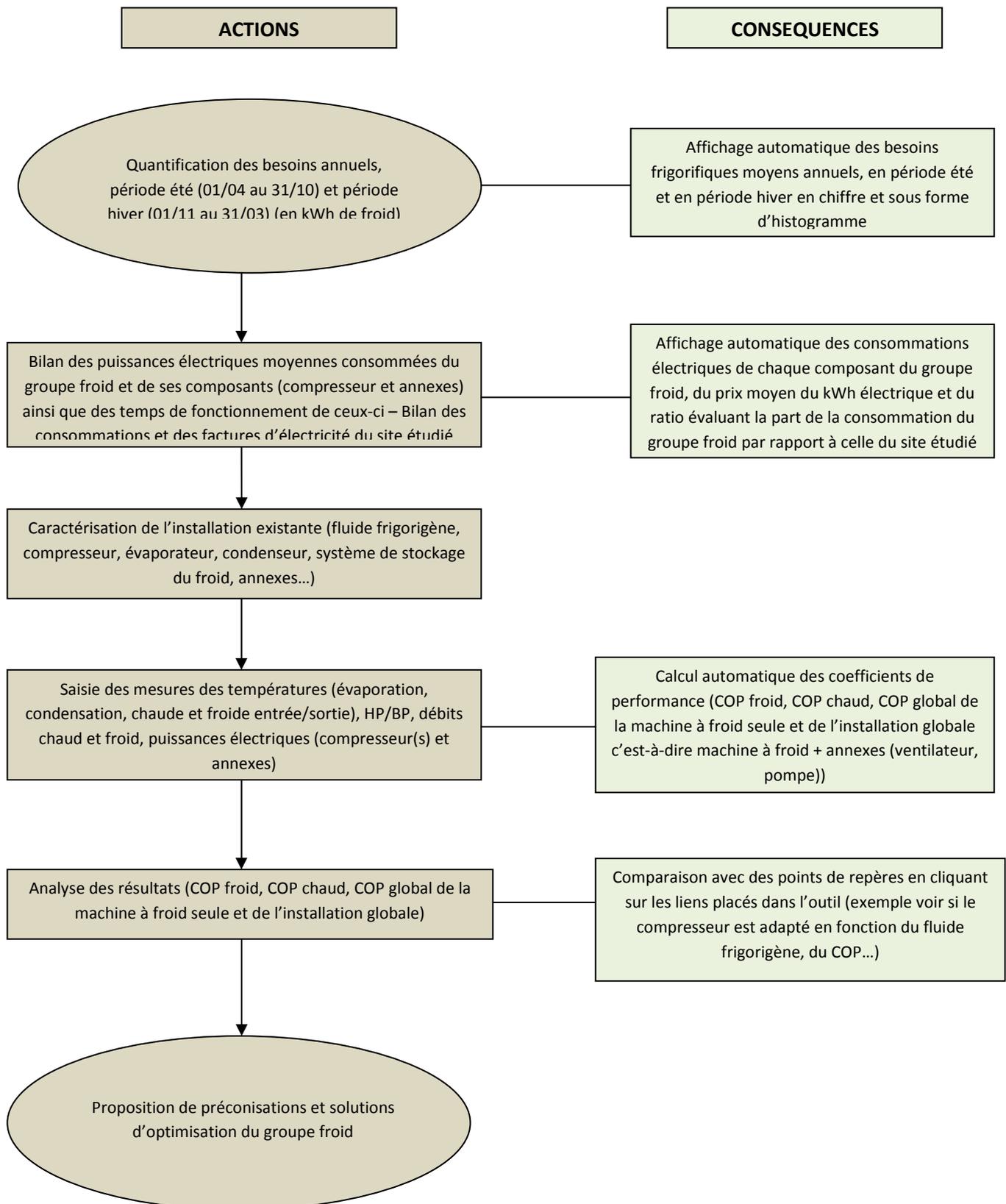
- les besoins en froid,
- les consommations énergétiques du groupe froid,
- les technologies composant le groupe froid (compresseurs, condenseurs, évaporateurs, détendeurs et organes annexes),
- les performances de la machine frigorifique et de l'installation globale (machine frigorifique + annexes),
- les solutions d'amélioration des performances de l'installation.

En effet, il convient de vérifier si les consommations et les technologies sont bien en concordance avec les besoins réels du site.

L'intérêt de bien définir ces trois critères est avant tout de pouvoir apporter des solutions en corrélations avec les besoins, les consommations et les technologies existantes telles que la basse et la haute pression flottante (qui seront développées dans la suite du rapport, le stockage du froid, la variation de vitesse sur un moteur de compresseur, etc... On pourra notamment voir un petit outil réalisé sur la haute et la basse pression flottante permettant de connaître rapidement les économies que l'on peut faire sur la consommation du compresseur.

Une photographie d'une partie de la structure de l'outil est présentée dans l'annexe 6 (partie mesures et calcul des COP).

**a2. Logigramme représentatif du fonctionnement de l'outil :**



### a3. Note de calcul – Formules et paramètres utilisés :

#### a3a. Corrélations utilisées :

Cet outil doit donc permettre à partir de mesures de puissances électriques (compresseur, annexes côté chaud et froid (pompe, ventilateur)) et de mesures de températures, de débits ainsi qu'à partir des propriétés des fluides de pouvoir caractériser rapidement les coefficients de performances d'une installation frigorifique. En effet, les propriétés du fluide frigorigène ne sont pas nécessaires dans cet outil et n'interviennent donc pas dans les calculs.

- Puissance frigorifique de la machine frigorifique :

$$P_{\text{frigorifique}} = Q_{\text{fluide}} \cdot \rho_{\text{fluide}} \cdot c_{p\text{fluide}} \cdot (T_{\text{fluide}}^{\text{entrée}} - T_{\text{fluide}}^{\text{sortie}})$$

- Puissance récupérée au condenseur :

$$P_{\text{récupérée au condenseur}} = Q_{\text{fluide}} \cdot \rho_{\text{fluide}} \cdot c_{p\text{fluide}} \cdot (T_{\text{fluide}}^{\text{sortie}} - T_{\text{fluide}}^{\text{entrée}})$$

- COP froid de la machine :

$$\text{COP}_{\text{froid MAF}} = \frac{P_{\text{frigorifique}}}{P_{\text{compresseur}}}$$

- COP froid global de l'installation (machine à froid + annexe côté froid) :

$$\text{COP}_{\text{froid global}} = \frac{P_{\text{frigorifique}}}{P_{\text{compresseur}} + P_{\text{pompe ou ventilateur côté froid}}}$$

- COP chaud de la machine :

$$\text{COP}_{\text{chaud MAF}} = \frac{P_{\text{récupérée au condenseur}}}{P_{\text{compresseur}}}$$

- COP chaud global de l'installation (machine à froid + annexe côté chaud) :

$$\text{COP}_{\text{chaud global}} = \frac{P_{\text{frigorifique}}}{P_{\text{compresseur}} + P_{\text{pompe ou ventilateur côté froid}}}$$

- COP de la machine à froid :

$$\text{COP}_{\text{MAF}} = \frac{P_{\text{frigorifique}} + P_{\text{récupérée au condenseur}}}{P_{\text{compresseur}}}$$

- COP global de l'installation frigorifique (machine à froid + annexes chaud et froid) :

$$\text{COP}_{\text{global}} = \frac{P_{\text{frigorifique}} + P_{\text{récupérée au condenseur}}}{P_{\text{compresseur}} + P_{\text{annexe côté froid}} + P_{\text{annexe côté chaud}}}$$

### a3b. Hypothèses de préconisations et points de comparaisons avec l'existant :

En effet, dans l'outil, des liens nous envoient vers des tableaux permettant :

- de comparer les résultats obtenus avec des points de repères fondamentaux,
- de voir les facteurs limitant les performances de l'installation,
- d'émettre des préconisations potentielles basées sur des faits avérés.

- **Paramètres attachés au type de compresseur :**

Type de compresseur	Puissance frigorifique	Utilisation
Compresseur rotatif	10 kW maximum	Climatiseur individuel, froid positif
Compresseur Scroll	3 à 50 kW par compresseur	froid positif
Compresseur à piston ouvert	quelques dizaines à plus de 1000 kW	froid commercial, Industrie
Compresseur à piston semi-hermétique	100 kW (mono-étagé) à 400 kW (bi-étagé)	froid commercial
		Industrie
Compresseur à piston hermétique	Faible et moyenne puissance : quelques kW à quelques dizaines de kW	Réfrigération, Climatisation, refroidissement liquide...
Compresseurs centrifuges, Turbocompresseurs	1000 à 4000 kW	Industrie
Compresseur à vis	100 à 1200 kW	Pression élevée (allant jusque 20 bars en mono-étagé), Industrie

Type de compresseur	Type	Mode de régulation préconisé
Compresseur rotatif	mono-étagé ou poly-étagé	* variation de la vitesse de rotation, régulation admission gaz à l'aspiration
Compresseur Scroll	unique ou plusieurs en parallèle	* variateur de vitesse de rotation, modulation de puissance, mise en centrale
Compresseur à piston ouvert	-	* mise hors service de cylindre * variation vitesse de rotation du moteur d'entraînement
Compresseur à piston semi-hermétique	mono-étagé	
	bi-étagé	
Compresseur à piston hermétique	-	
Compresseurs centrifuges, Turbocompresseurs	-	* modulation de puissance par prérotation du fluide frigorigène à l'entrée de la roue
Compresseur à vis	à vis non lubrifiée	* par by-pass (débit volumique excédentaire reconduit à l'aspiration) * régulation pleine charge/marche à vide (manostat actionnant ou refermant une soupape à membrane sur conduite refoulement/aspiration) * variation de la vitesse de rotation (moteur électrique à vitesse variable, « tiroir », coupleur...)
	à vis lubrifiée (injection d'huile)	* laminage à l'aspiration (air)

Type de compresseur	Fluides frigorigènes adaptés	Plage de débit (m <sup>3</sup> /h)	Taux de compression	COP frigo constructeur
Compresseur rotatif	ammoniac, R-134a, R-407c, R-410a, R-404a	300 à 5600 m <sup>3</sup> /h	5 à 6	2 à 3
Compresseur Scroll	ammoniac, R-134a, R-407c, R-410a, R-404a	10 à 200 m <sup>3</sup> /h	5	4
Compresseur à piston ouvert	ammoniac, R-134a, R-407c, R-410a, R-404a	1 à 1700 m <sup>3</sup> /h	5 à 10	2,5
Compresseur à piston semi-hermétique		3 à 180 m <sup>3</sup> /h	Mono-étagé < 8	2,5
			Bi-étagé > 8	2,5
Compresseur à piston hermétique		0,6 à 95 m <sup>3</sup> /h	2 à 5	2,5
Compresseurs centrifuges, Turbocompresseurs	R-134a	800 à 50000 m <sup>3</sup> /h	4	5 à 6
Compresseur à vis	R-22 et ses fluides de substitution	100 à 10 000 m <sup>3</sup> /h	20 à 30	5 – 5,5

- **Facteurs de limitation du COP :**

Facteurs de limitation du COP
Température d'évaporation trop basse (- 1°C équivaut à + 3 % de puissance absorbée)
Température de condensation trop élevée (+1°C équivaut à + 3 % de puissance absorbée)
Auxiliaires trop consommateurs d'énergie
Compresseurs fonctionnant 80 % du temps en réduction de puissance chaque palier de diminution de 25 % de la puissance frigorifique du groupe ne réduit que de 10 % en moyenne la puissance absorbée
Confinement des machines
Conditions climatiques extérieures chaudes et/ou humides
Encrassement des échangeurs
Dégivrages trop longs ou insuffisants
Huile en excès qui s'accumule dans l'évaporateur et diminue la puissance frigorifique
Charge en frigorigène trop faible qui entraîne une pression d'évaporation plus basse que la normale
Charge en frigorigène trop élevée qui entraîne une pression de condensation plus haute que la normale ou des coups de liquides au compresseur
Portes de chambres froides ouvertes trop longtemps (entrée d'air chaud et humide)

- **Préconisations potentielles :**

**Salle des machines :**

- Installation d'une gestion centralisée (GTC) pour mieux analyser le comportement dans le temps : cette technique apporte une économie d'environ 15 %.
- Installation d'un système permanent de détection des fuites avec déclenchement d'alarme.

**Evaporateurs :**

- Pincement entre température de source froide et température d'évaporation allant de 2 à 5°C,
- Dégivrage si remontée anormale de la température de l'enceinte réfrigérée ou si le temps de fonctionnement des compresseurs dépasse plus de 25 % les durées habituelles,
- Plage de réglage de la surchauffe : 2 à 8 °C,
- Surchauffe modérée (3°C) si l'écart de température entre le fluide frigorigène et le fluide refroidi est faible,
- Choisir une valeur plus importante de la surchauffe (6 à 7 °C) si l'évaporateur, mal dimensionné, provoque un pompage de l'installation,

- Une réduction de la surchauffe permet une augmentation de la puissance frigorifique, mais une réduction trop importante peut provoquer des coups de liquide au compresseur,
- Une surchauffe trop importante réduit l'efficacité des évaporateurs et peut entraîner une usure prématurée des compresseurs par élévation de leur température de refoulement.

### **Condenseurs :**

- Pincement entre température de source chaude et température de condensation allant de 5 à 10°C,
- Emplacement approprié pour les condenseurs à air ou à évaporation afin qu'ils soient convenablement alimentés en air extérieur,
- Si la température de condensation dépasse de plus de 15°C la température maximale de l'air, envisager une augmentation de la surface du condenseur,
- Equiper le condenseur d'un récupérateur de chaleur pour les besoins à faible température, ce qui permet de récupérer environ 25% de l'énergie consommée,
- L'encrassement des condenseurs accroît la consommation d'énergie par unité frigorifique produite : la consommation électrique du compresseur augmente d'environ 30% quand la température de condensation s'élève de 10°C,
- Imposer une température de condensation fixe et élevée pénalise l'efficacité énergétique. Il est préférable de laisser « flotter » la pression de condensation. Pour cela, il faut prévoir l'adaptation des détendeurs, qui ne doivent pas être de type thermostatique.

### **Compresseurs :**

- Le rendement d'un compresseur qui travaille à moins de 50% de sa charge nominale est toujours mauvais,
- Faire travailler simultanément plusieurs compresseurs à puissance réduite constitue un gaspillage énergétique,
- Si une machine fonctionne pendant la majorité du temps très au-dessous de sa charge nominale, mieux vaut la remplacer et revoir l'exploitation de l'installation pour faire face aux rares périodes de fonctionnement à pleine charge,
- La durée de marche ne doit jamais tomber au-dessous d'une demi-heure environ, sous peine de créer de mauvaises conditions de refroidissement des enroulements, dommageables pour les compresseurs hermétiques,
- Doter les moteurs de condensateurs pour éliminer l'énergie réactive pénalisée par le distributeur d'électricité,
- Choisir des moteurs électriques à haut rendement,
- Dans le cas où il existerait plusieurs compresseurs sur le même circuit, préconiser la régulation de charge par mise en cascade des machines,
- Dans la mesure où l'on veut éviter le fonctionnement en tout ou rien, prévoir un dispositif pour faire varier la puissance des compresseurs, tels que le variateur de fréquence avec un compresseur à vis (économie d'électricité du groupe froid allant de 10 à 30%),
- Une consommation d'huile dépassant la valeur annoncée par le constructeur doit inciter à réviser les conditions de fonctionnement,
- Le circuit d'huile doit être régulièrement purgé et les compléments éventuels doivent être judicieusement dosés : l'huile en excès s'accumule dans l'évaporateur dont elle peut diminuer la puissance frigorifique jusqu'à 20%,
- Ajouter un échangeur sur les gaz en sortie du compresseur, pour récupérer une partie de la chaleur de désurchauffe, afin de produire de l'eau à 90°C – 95°C.

### **Fluides frigorigènes :**

- Une charge trop faible entraîne une pression d'évaporation plus basse que la normale,
- Une charge trop élevée peut entraîner une pression de condensation plus élevée que la normale ou des coups de liquide au compresseur,
- Remplacement fréquent des filtres et des déshydrateurs : un refroidissement du circuit à leur niveau entraîne leur colmatage,
- S'assurer du respect de la législation sur les frigorigènes en particulier sur l'ammoniac,
- S'assurer du suivi de la réglementation européenne sur les fluides halogénés,
- Evoquer les problèmes de substitution et de conversion de l'installation à un fluide frigorigène approprié et définitif surtout si l'installation utilise encore un fluide prohibé à court terme,
- Pour des grands circuits à basse température prévoir un petit compresseur de maintien pour éviter de faire tourner les machines principales,
- En cas d'évaporation directe, envisager de rapprocher la centrale de production de froid et l'utilisation : de longues distances engendrent des pertes de pression coûteuses en énergie, à éviter dans le cas de rénovations.

### **Circuits secondaires :**

- Asservir les pompes et les ventilateurs au fonctionnement des groupes,
- Doter les pompes d'une variation électronique de vitesse,
- Mettre en place un système qui permet d'utiliser gratuitement l'air ou de l'eau en hiver pour assurer tout ou une partie du refroidissement d'un produit,
- Stocker le froid pour « lisser » le profil de consommation et privilégier le fonctionnement en période d'énergie peu chère,
- Analyser les pertes de charge inutiles sur les circuits secondaires,
- Préconiser l'emploi de vannes de régulation à 2 voies avec un débit variable au lieu de vanne à 3 voies et débit fixe.

**a3c. Solutions d'optimisation : Haute et basse pression flottante :**

- **Haute Pression Flottante :**

Système de régulation qui fait varier la pression de condensation du fluide frigorigène (et donc sa température de condensation), afin d'optimiser le cycle thermodynamique du fluide, quand les conditions extérieures de température le permettent (définition ADEME)

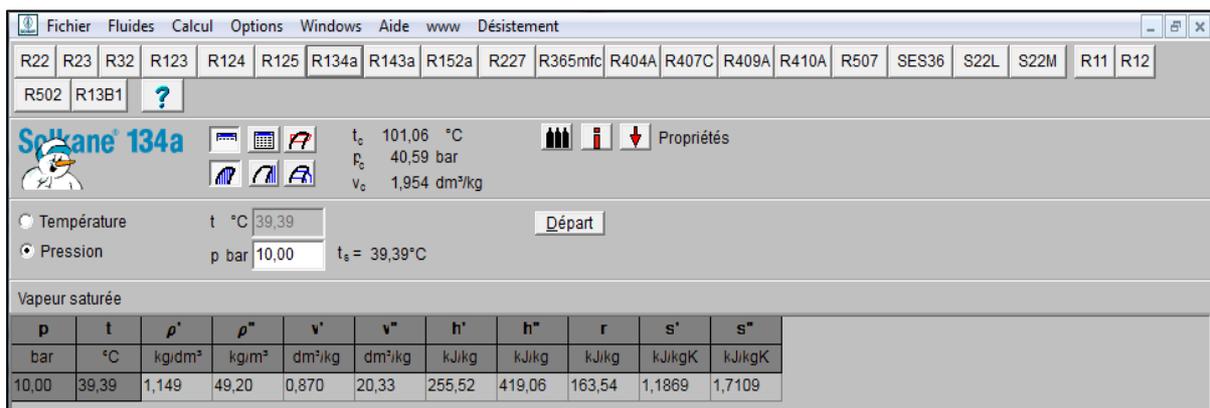
Gains potentiels (chiffres)
* 1°C gagné sur la condensation permet d'économiser environ 2,5 % de l'énergie (kWh) consommée initialement
* un gain de 30 % sur le compresseur se traduit par 20 % d'économie sur l'installation (la réduction du taux de compression engendre une diminution de la puissance absorbée)
* plus la température de l'air ventilé est faible, plus les gains sont importants <b>Ordre de grandeur :</b> T air = 25°C → ≈ 4 % de gain ; T air = 12°C → ≈ 14 % ; T air = 11°C → ≈ 20 %
* A une température de condensation comprise entre +45°C et +20°C, le COP double
* Retour sur investissement généralement compris entre 2 et 4 ans

**Fonctionnement de l'outil :**

L'outil a été réalisé avec les caractéristiques (enthalpies vapeur et liquide, température de condensation) des trois fluides frigorigènes les plus rencontrés sur le terrain, que sont :

- R134a,
- R407c,
- R410a.

Ces caractéristiques ont été relevées à l'aide du logiciel Solkane Software 7.0 qui permet d'obtenir tous les paramètres de nombreux fluides frigorigènes pour des valeurs de pression ou de température de saturation définies.



**Méthode d'utilisation de l'outil haute pression flottante :**

- **Etape 1 : Choix du fluide frigorigène**

- **Etape 2 : Saisie de la haute pression initiale** entraînant le calcul automatique de la température extérieure que l'on doit avoir pour cette pression de condensation, ainsi que la température de condensation et la puissance du compresseur (kJ/kg). A savoir que le pincement de température entre température extérieure et la température de condensation a été pris égal à 10°C dans le fonctionnement de l'outil.

$$T_{\text{condensation}} - T_{\text{extérieure}} \approx 10^{\circ}\text{C}$$

- **Etape 3 : Saisie de la valeur de la haute pression que l'on souhaite obtenir**
- **Etape 4 :** Calcul automatique des économies sur le compresseur et des parts de la puissance économisée par unité de température et de pression.

On peut voir ci-dessous un exemple du fonctionnement actuel de l'outil dédié à la haute pression flottante :

Exemple : Cet exemple, montre pour le fluide frigorigène R134a, et une basse pression de 3 bars, les économies moyennes que l'on peut faire si on diminue la pression de 8 à 10 bars.

<b>Haute pression (bar)</b>	<b>10</b>
<b>Température extérieure (°C)</b>	<b>30</b>
<b>Température de condensation (°C)</b>	<b>39,39</b>
<b>Puissance compresseur (kJ/kg)</b>	<b>20,18</b>
<b>Haute pression (bar)</b>	<b>8</b>
<b>Température extérieure</b>	<b>21</b>
<b>Température de condensation (°C)</b>	<b>31,33</b>
<b>Puissance compresseur (kJ/kg)</b>	<b>16,46</b>
<b>Economie sur le compresseur (%)</b>	<b>-18%</b>
<b>Economie (%/°C)</b>	<b>-2%</b>
<b>Economie (%/bar)</b>	<b>-9%</b>

En effet, dans cet exemple, pour que ces économies soient effectives, il faut bien évidemment que la température extérieure passe de 30 à 21°C.

- **Basse Pression Flottante :**

La BP flottante consiste à réguler la pression d'évaporation à une valeur permettant d'obtenir la plus faible consommation du couple compresseurs / pompe ou ventilateur côté froid. La démarche est quasiment la même que pour la haute pression flottante. On fait varier la consigne de température d'évaporation (=pression d'évaporation) en fonction des besoins en froid avec un pincement de température entre température froide et température d'évaporation pris entre 2 et 5°C.

Gain potentiel
* 1°C gagné en évaporation permet un gain de consommation d'environ 2,5 % (en froid positif) à 4 % (froid négatif)

## b. Outil échange et récupération de chaleur :

### b1. Périmètre d'utilisation de l'outil :

L'outil permet de caractériser une grande partie des types d'échangeurs rencontrés :

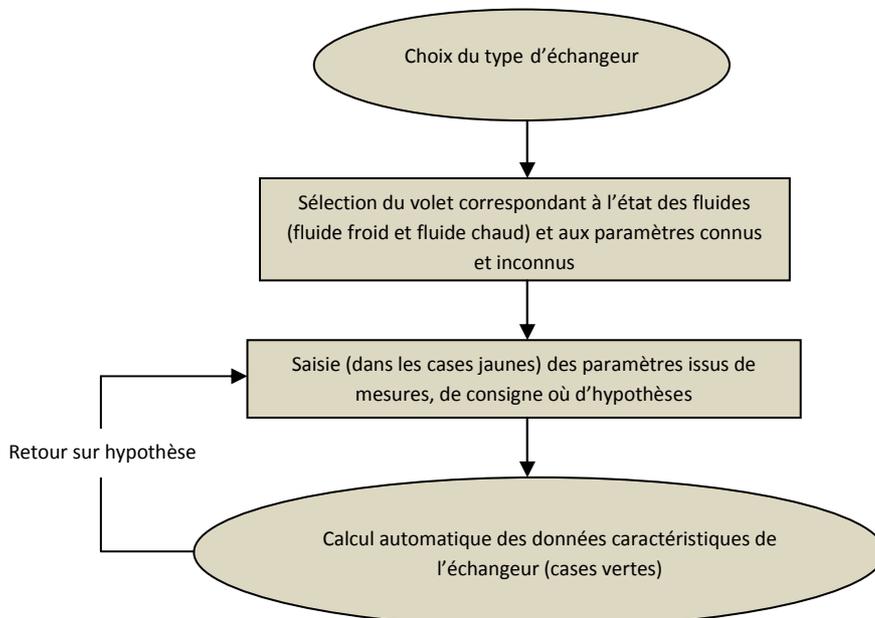
- Echangeurs air/air,
- Echangeurs eau/eau (1 bar,  $T < 100^{\circ}\text{C}$ ),
- Echangeurs air/eau,
- Production de vapeur à partir d'une récupération de chaleur sur des fumées de combustion,
- Echangeurs air/acier (spécifique à la métallurgie),
- Condenseur de fumées.

A savoir que les échangeurs air/air, eau/eau et air/eau représentent environ 80% des configurations rencontrées.

De plus, il faut savoir que l'outil ne sert pas à dimensionner en détail un échangeur de chaleur, il a pour but de calculer les grandeurs caractéristiques de celui-ci telles que la puissance échangée, les températures de fonctionnement, l'efficacité, le (S.Kg)..., qui sont des données fondamentales d'aide à la décision et qui permettent d'orienter les industriels vers des modèles et des constructeurs d'échangeurs. En effet, un bureau d'étude n'a pas le droit de préconiser une marque d'échangeur plutôt qu'une autre, c'est au client de faire son choix parmi les constructeurs.

Une photographie de la structure de l'outil est présentée dans l'annexe 4.

### b2. Logigramme représentatif du fonctionnement de l'outil :



### b3. Note de calcul – Formules et paramètres utilisés :

#### b3a. Corrélations utilisées :

L'outil est basé sur le couplage des deux méthodes de calcul permettant de caractériser les échangeurs de chaleur :

- La méthode DTLM (écart de température logarithmique moyen),
- La méthode du N.U.T. (Nombre d'Unités de Transfert).

- **Calcul de la puissance totale échangée Q (W) :**

#### **Première méthode :**

$$Q = F * K_g * S * \Delta T_{LM}$$

Avec :

- S (m<sup>2</sup>) = surface d'échange,
- F (-) = facteur de correction (compris entre 0 et 1, il est égal à 1 pour les échangeurs co-courant et contre-courant, il est déterminé à partir d'abaques),
- K<sub>g</sub> (W/(m<sup>2</sup>.°C)) = coefficient global d'échange,
- ΔT<sub>LM</sub> (°C) = écart de température logarithmique moyen

Echangeurs à co-courant : 
$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{cs} - T_{fs}) - (T_{ce} - T_{fe})}{\ln\left(\frac{T_{cs} - T_{fs}}{T_{ce} - T_{fe}}\right)}$$

Echangeurs à contre-courant et courants croisés : 
$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln\left(\frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{cs} - T_{fe}}\right)}$$

Avec :

- T<sub>ce</sub> et T<sub>cs</sub> les températures respectives d'entrée et sortie du fluide chaud,
- T<sub>fe</sub> et T<sub>fs</sub> les températures respectives d'entrée et sortie du fluide froid.

#### **Seconde méthode :**

$$Q = Qm_f * cp_f * (T_{fs} - T_{fe}) = Qm_c * cp_c * (T_{ce} - T_{cs}) = E * C_{min} * (T_{ce} - T_{fe})$$

Avec :

- Qm<sub>f</sub> (kg/s) et cp<sub>f</sub> (J/(kg.K)), les débits et chaleurs massiques respectifs du fluide froid,
- Qm<sub>c</sub> et cp<sub>c</sub>, les débits et chaleurs massiques respectifs du fluide chaud,
- C<sub>min</sub> = (Qm \* cp)<sub>min</sub> et C<sub>max</sub> = (Qm \* cp)<sub>max</sub>, les capacités thermiques minimum et maximum
- E, l'efficacité de l'échangeur de chaleur.

Dans le cas de la récupération de chaleur sur les fumées pour produire de la vapeur d'eau saturée :

$$Q = Qm_f * ((cp_f * (T_{saturation} - T_{fe})) + Lv) = Qm_f * ((h_{saturation} - h_{fe}) + Lv)$$

Avec :

- T<sub>saturation</sub> = température de saturation de l'eau (K),

- $h_{\text{saturation}}$  = enthalpie spécifique de l'eau à la température de saturation ( $\frac{J}{kg}$ )
- $L_v$  = chaleur latente de vaporisation à la température de saturation considérée ( $\frac{J}{kg}$ )
- $h_{fe}$  = enthalpie spécifique de l'eau liquide en entrée ( $\frac{J}{kg}$ )

- **Calcul de l'efficacité E d'un échangeur de chaleur :**

**Première méthode :**

$$E = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{\text{Puissance réellement échangée}}{\text{Puissance théorique maximum échangeable}}$$

Avec :  $Q = E * C_{\min} * (T_{ce} - T_{fe})$  et  $Q_{\max} = C_{\min} * (T_{ce} - T_{fe})$

On a donc deux cas de figure :

Si  $C_{\min} = Q_{m_c} * c_{p_c}$  alors :  $E = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}}$

Si  $C_{\min} = Q_{m_f} * c_{p_f}$  alors :  $E = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}}$

**Seconde méthode :**

Echangeurs à co-courant :  $E = \frac{1 - \exp(-NUT * (1+Z))}{1+Z}$

Echangeurs à contre-courant :  $E = \frac{1 - \exp(-NUT * (1-Z))}{1 - (Z * \exp(-NUT * (1-Z)))}$

Cas particulier :

Si  $Z=0$  (cas d'un refroidissement d'air par de l'eau) :  $E \approx (1 - \exp(-NUT))$

Si  $Z=1$  (cas d'échangeurs air-air pour la VMC) :  $E \approx \frac{NUT}{1+NUT}$

Avec :

- $NUT = \frac{S.K_g}{C_{\min}}$  (-),
- $Z = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$  (-).

### b3b. Propriétés physiques utilisées :

- **Propriétés physiques de l'air :**

Masse volumique de l'air sec en fonction de la température :

$$\rho_{\text{air sec}} = 1.293 * \frac{273.15}{T(\text{K})} \quad (\text{en } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})$$

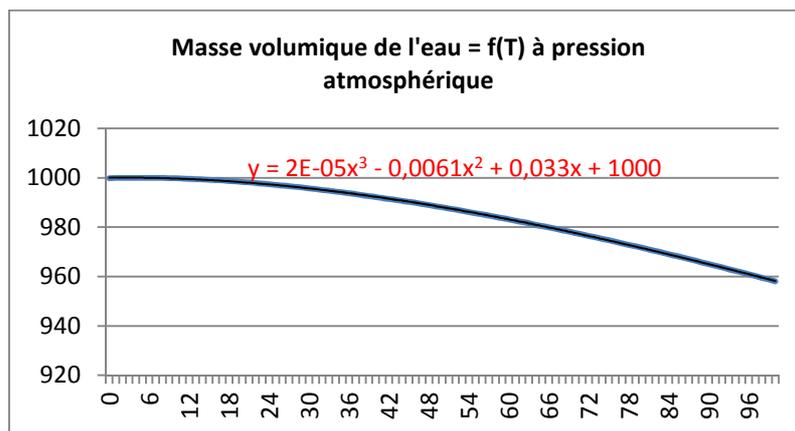
Chaleur massique de l'air sec en fonction de la température :

$$c_{p_{\text{air sec}}} = (1.9327 * 10^{-10} * T(\text{K})^4) - (7.9999 * 10^{-7} * T(\text{K})^3) + (1.1407 * 10^{-3} * T(\text{K})^2) - (4.4890 * 10^{-1} * T(\text{K})) + 1057.5 \quad (\text{en } \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}})$$

- **Propriétés physiques de l'eau liquide (1 bar, 0 < T < 100 °C) :**

Masse volumique de l'eau en fonction de la température à pression atmosphérique :

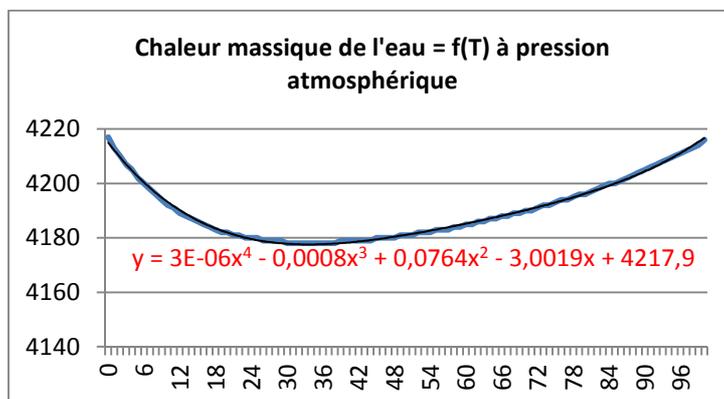
Le but est d'obtenir, à l'aide des tables de l'eau, une équation caractérisant l'évolution de la masse volumique en fonction de la température de l'eau.



$$\rho_{\text{eau à pression atmosphérique}} = (2 * 10^{-5} * T(^{\circ}\text{C})^3) - (0.0061 * T(^{\circ}\text{C})^2) + (0.033 * T(^{\circ}\text{C})) + 1000 \quad (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3})$$

La marge d'erreur de l'équation est de l'ordre de  $\pm 0,4 \%$ .

Chaleur massique de l'eau en fonction de la température à pression atmosphérique :



$$c_{p \text{ eau à pression atmosphérique}} = (3 * 10^{-6} * T(^{\circ}C)^4) - (8 * 10^{-4} * T(^{\circ}C)^3) + (0.0764 * T(^{\circ}C)^2) - (3.0019 * T(^{\circ}C)) + 4217.9 \text{ (en } \frac{J}{(kg \cdot K)})$$

La marge d'erreur de l'équation est de l'ordre de  $\pm 0,8 \%$ .

- **Propriétés physiques de la vapeur d'eau :**

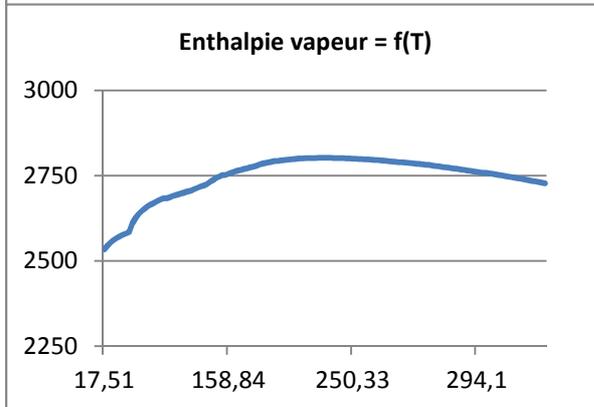
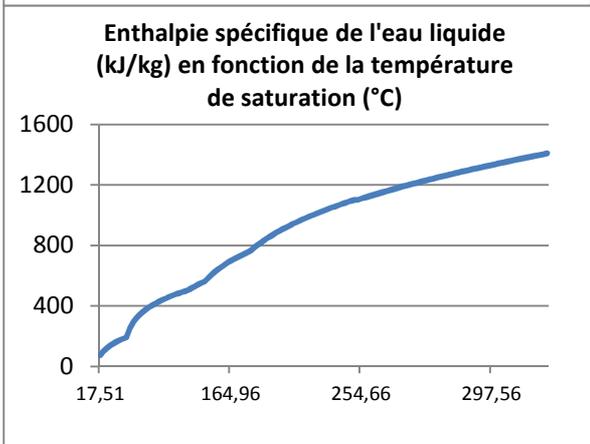
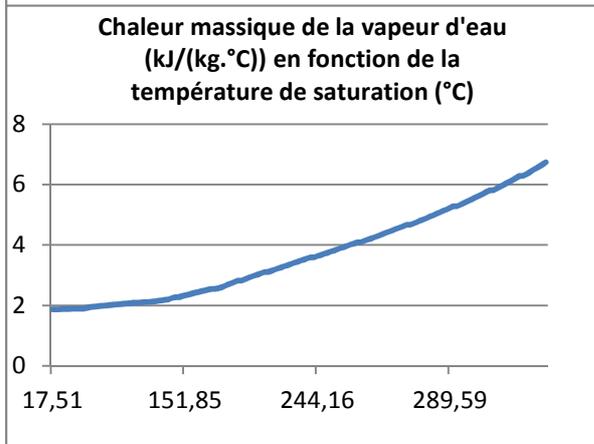
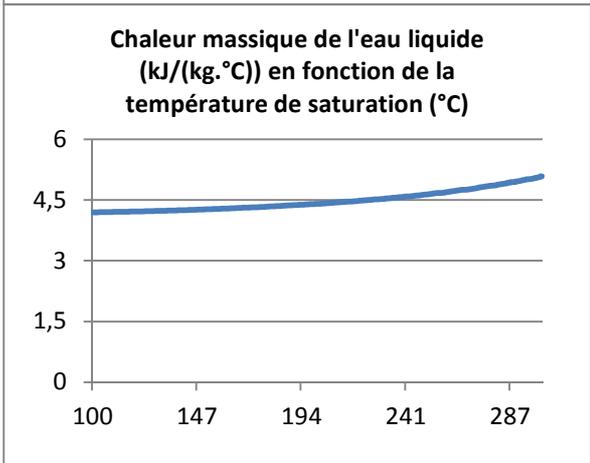
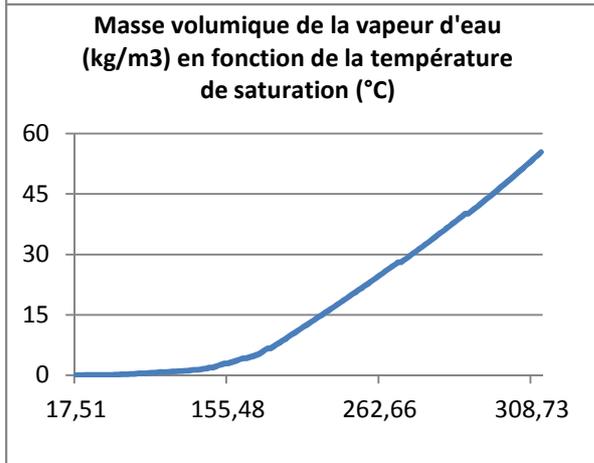
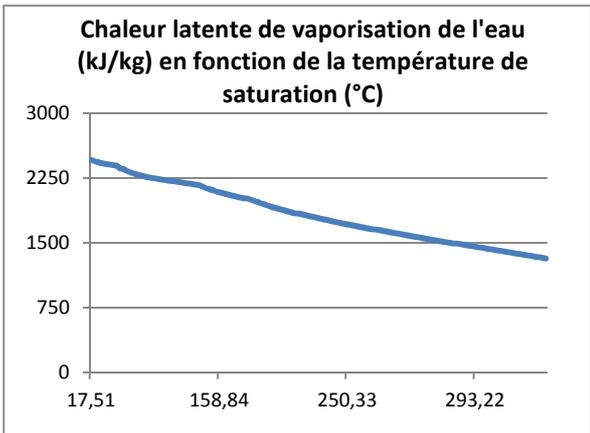
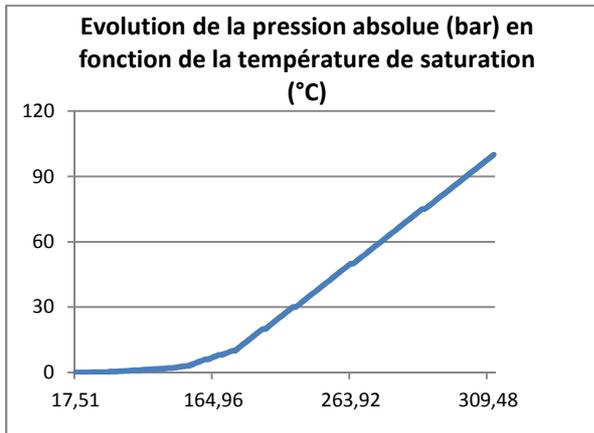
Les équations des propriétés physiques de la vapeur d'eau en fonction de la température de saturation ont été déterminées à partir des tables de la vapeur d'eau. On peut voir ci-dessous l'évolution de ces paramètres. Ces équations ont été déterminées par l'association d'interpolations linéaires sur des petits intervalles de température ce qui permet d'obtenir une très bonne précision. La marge d'erreur pour chacun des paramètres ci-dessous est de  $\pm 0.5 \%$ . En effet, il existe des formules empiriques pour caractériser certains paramètres tels que la pression de saturation ou encore la masse volumique de la vapeur d'eau en fonction de la température de saturation, cependant pour des raisons de précision celles-ci n'ont pas été retenues pour l'élaboration de l'outil :

Formule de Duperray :  $P_{\text{saturation}} = \left(\frac{T_{\text{saturation}}}{100}\right)^4$

Cette formule comporte une marge d'erreur de  $\pm 6\%$  en comparaison avec les tables de la vapeur d'eau sur l'intervalle :  $1 < P_{\text{saturation}} < 100$ .

Formule de Bertin :  $\rho_{\text{saturation}} \approx \frac{P_{\text{saturation}}}{2}$

Cette formule comporte une marge d'erreur de  $\pm 15,3\%$  sur l'intervalle :  $1 < P_{\text{saturation}} < 100$ .



- **Propriétés physiques de l'acier :**

Masse volumique de l'acier :

La masse volumique de l'acier varie très peu en fonction de la température, elle a donc été considérée comme constante :

$$\rho_{\text{acier}} = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Chaleur massique de l'acier :

$$c_{p_{\text{acier}}} = (0.001 * T(^{\circ}\text{C})^2) - (0.0427 * T(^{\circ}\text{C})) + 476.95$$

### c. Outil de combustion :

#### c1. Périmètre d'utilisation de l'outil :

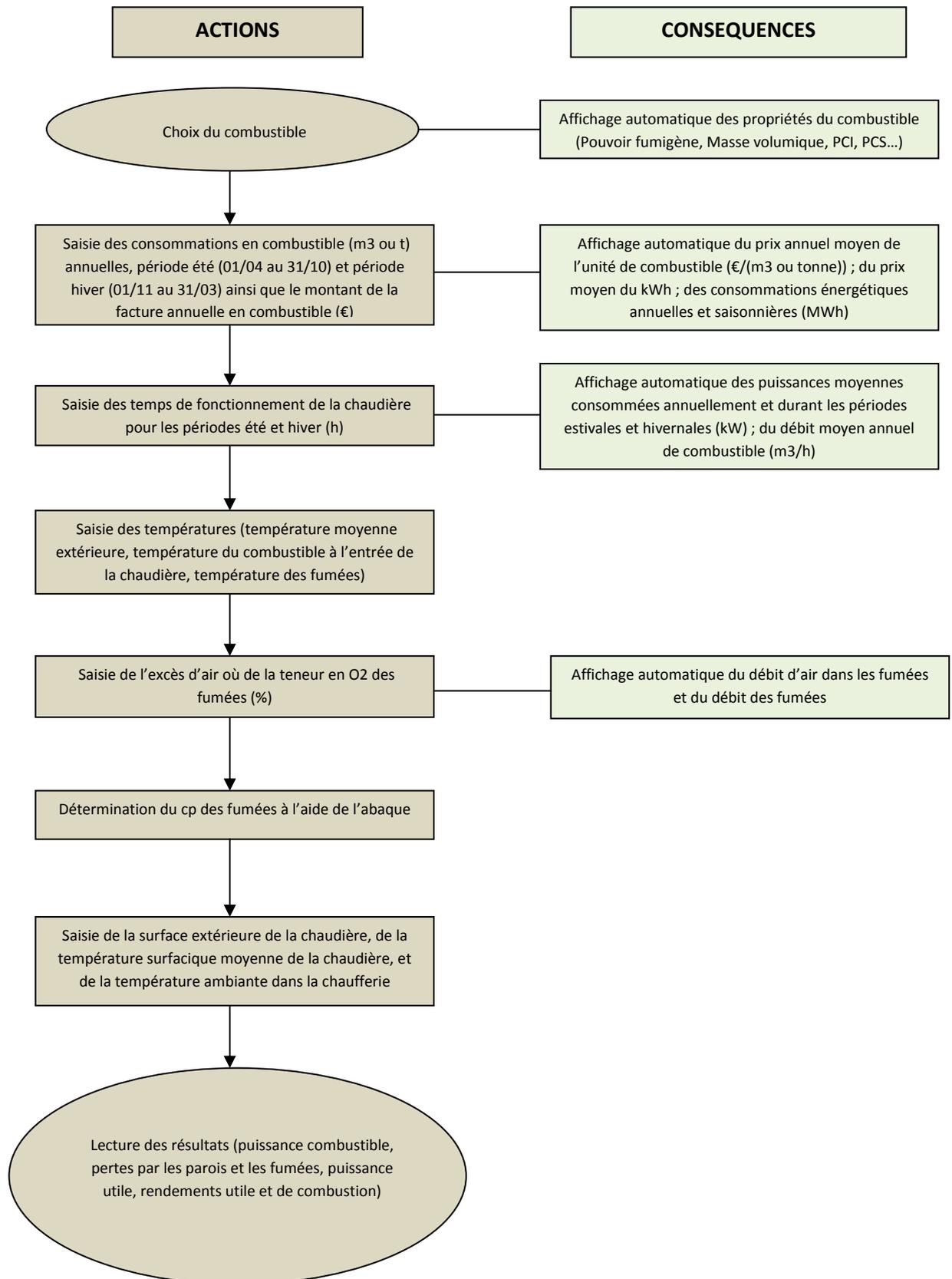
L'intérêt premier de cet outil est de pouvoir caractériser les performances d'une chaudière fonctionnant avec un combustible quelconque (gaz naturel, GPL, fioul domestique, fioul lourd, bois sec, bois à 30% d'humidité...).

En effet, il permet sans avoir besoin d'effectuer des mesures sur l'installation de caractériser les performances de la chaudière (puissance utile, pertes par les fumées et les parois, rendement de combustion et rendement utile). Cependant le client doit fournir les données suivantes :

- Relevés des consommations annuelles et du temps de fonctionnement annuel de la chaudière permettant d'obtenir un débit moyen de combustible consommé annuellement,
- Fiches de suivi des brûleurs permettant d'obtenir l'excès d'air ou la quantité d'oxygène dans les fumées (exemples : mesures réalisées par l'APAVE),
- Les dimensions de la chaudière, la température ambiante de la chaufferie ainsi que la température de surface moyenne de la chaudière permettant ainsi de caractériser les pertes par les parois.

Une photographie de la structure de l'outil est présentée dans l'annexe 5.

## c2. Logigramme représentatif du fonctionnement de l'outil :



### c3. Note de calcul – Formules et paramètres utilisés :

#### c3a. Corrélations utilisées :

- Calcul de la puissance contenue dans le combustible :

$$P_{\text{combustible}} (\text{kW}) = Q_{\text{m}_{\text{combustible}}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) * PCI_{\text{combustible}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q_{\text{m}_{\text{combustible}}} = \frac{\text{Consommation annuelle de combustible}}{\text{Temps de fonctionnement annuel de la chaudière}}$$

- Calcul des pertes par les fumées :

$$\text{Pertes par les fumées} = Q_{\text{m}_{\text{fumées}}} * c_{\text{p}_{\text{fumées}}} * (T_{\text{fumées}} - T_{\text{extérieure}})$$

- Détermination du débit massique des fumées :

$$Q_{\text{m}_{\text{fumées}}} = Q_{\text{v}_{\text{combustible}}} * P_{\text{v}_{\text{fumigène du}}} * (1 + \alpha) * \rho_{\text{fumées}}$$

Avec :

- $P_{\text{v}_{\text{fumigène du}}}$  = pouvoir fumigène du combustible (m3 de fumées/m3 de combustible),
- $e$  = excès d'air (-)

$$\alpha = \frac{\%O_2}{20.95\% - \%O_2}$$

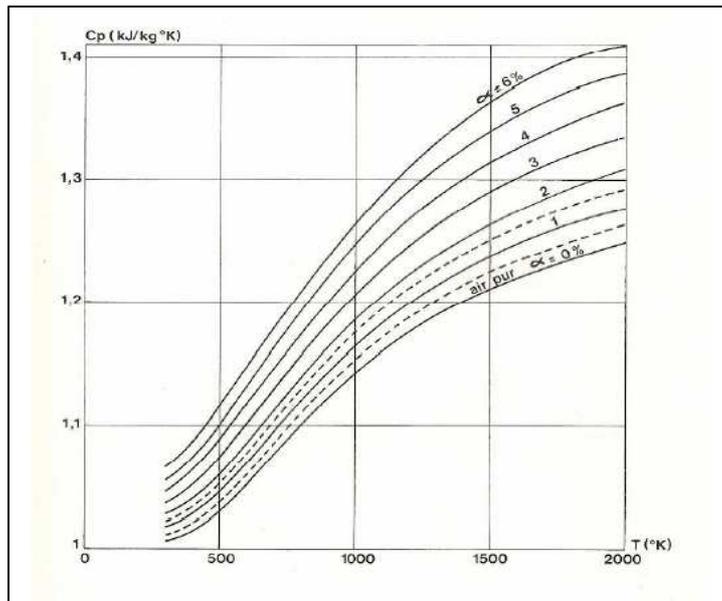
- Hypothèse :  $\rho_{\text{fumées}} \approx \rho_{\text{air}}$

$$\rho_{\text{fumées}} \approx 1.293 * \left( \frac{273.15}{273.15 + T_{\text{fumées}} (\text{°C})} \right)$$

- Détermination de la chaleur massique des fumées :

La chaleur massique se détermine à l'aide de l'abaque ci-dessous en calculant préalablement la valeur de  $\alpha$  qui est :

$$\alpha = \frac{\text{Débit massique d'air}}{\text{Débit massique de combustible}}$$



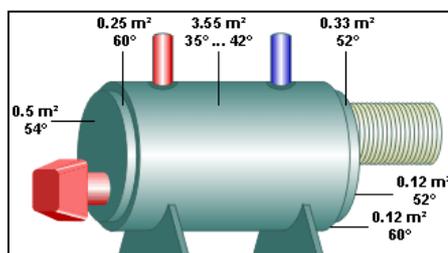
- **Calcul des pertes par les parois :**

- Formule empirique (source [www.energieplus-lesite.be](http://www.energieplus-lesite.be)) :

$$\text{Pertes vers l'ambiance} = 12 * S_{\text{parois}} * (T_{\text{parois}} - T_{\text{chaufferie}})$$

Avec :

- $S_{\text{parois}}$  la surface de la chaudière (°C),
- $T_{\text{parois}}$  la température moyenne de la surface de la chaudière (°C),
- $T_{\text{chaufferie}}$  la température moyenne du local chaudière (°C),
- $12 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \right)$ , le coefficient d'échange moyen par convection et rayonnement rencontré lors d'audit de chaufferie.



- **Calcul de la puissance utile :**

$$P_{\text{utile}} = P_{\text{combustible}} - \text{Pertes par les fumées} - \text{Pertes vers l'ambiance}$$

- **Calcul du rendement de combustion :**

$$\eta_{\text{combustion}} = \frac{P_{\text{combustible}} - \text{Pertes par les fumées}}{P_{\text{combustible}}}$$

- Calcul du rendement utile :

$$\eta_{\text{utile}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{combustible}}}$$

**c3b. Propriétés physiques des combustibles :**

Combustible	Pouvoir fumigène (m3 fumées/m3 combustible)	PCI (MJ/kg)	PCS (MJ/kg)	ρ (kg/m3)
Butane	31,8	45,6	49,4	2,7
Propane	24,8	46	49,8	2,4
GPL	29,4	46	49,7	0,8
Gaz naturel	11,4	49,6	50	2,5
Fioul domestique	9912	42,6	45,2	840
Fioul lourd	10640	41,4	44	950
Charbon	5040	29,3	30,8	560
Bois anhydre	3120	18,4	20	600
Bois (Humidité 30%)	4005	14	15,1	750

#### IV. Compte rendu du diagnostic énergétique d'un site métallurgique en Lorraine :

Cette partie est en quelque sorte l'aboutissement des deux parties précédentes du rapport c'est-à-dire l'association de la méthodologie de l'ADEME ainsi que de l'utilisation des outils.

Cette dernière partie sera composée de trois points :

- Le contexte de l'étude,
- Une brève présentation des zones de la ligne de galvanisation,
- Un compte rendu non détaillé (pour des raisons de confidentialité) dans lequel seront présentées les conclusions du diagnostic ainsi que quelques préconisations qui ont nécessité l'utilisation de certains outils.

##### 1. Contexte de l'étude :

Cette étude, rentre dans le cadre d'une opération collective menée par la CCI de la Meuse et répond aux cahiers des charges ADEME d'études énergétiques.

Elle répond aux objectifs suivants :

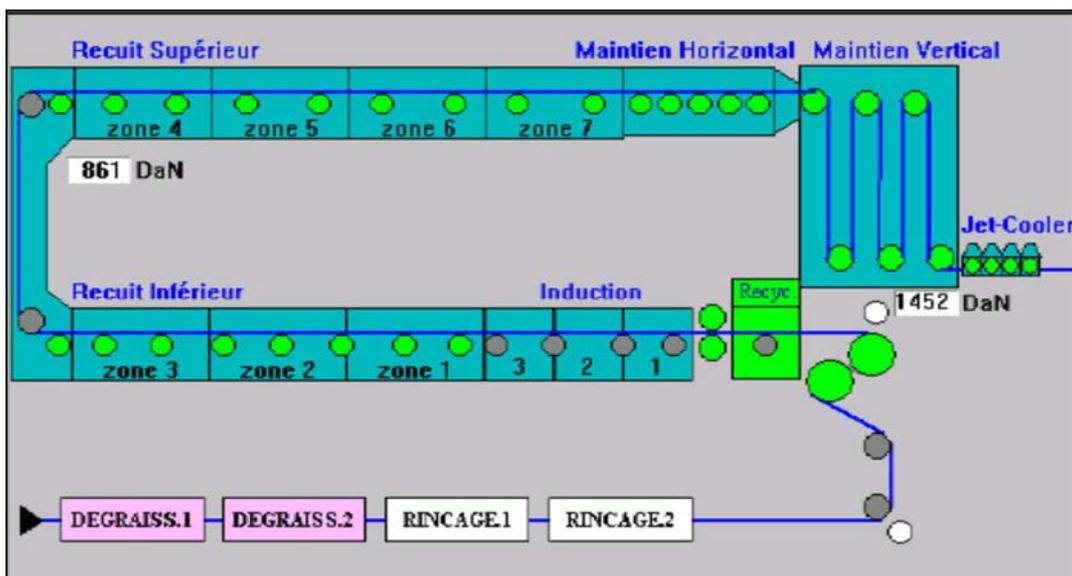
- Déterminer les performances énergétiques de chaque phase de process des lignes de galvanisation.
- Elaborer un plan d'amélioration à l'échelle du site de manière à prendre en compte la mutualisation de solutions d'optimisation tel que la récupération de chaleur, le préchauffage des bandes, l'amélioration de la performance des brûleurs.
- Améliorer la performance énergétique des utilités telles que l'air comprimé.

##### 2. Présentation de la ligne de production étudiée :

La ligne de galvanisation 2 se divise en deux parties :

- La zone de recuit, c'est dans cette zone que s'effectue le traitement thermique de l'acier,
- La zone de peinture, zone dans laquelle la tôle est teinte en monocouche ou bicouche.

##### a. Description de la zone de recuit :



L'intérêt de cette zone est de conférer les propriétés escomptées à l'acier par traitement thermique. En effet on distingue quatre principales étapes pour cette phase de traitement :

- Phase de préchauffe de la bande d'acier : La bande d'acier passe tout d'abord dans un Booster où celle-ci est préchauffée à hauteur de 170°C puis traverse ensuite la zone de préchauffe à induction pour atteindre une température d'environ 350°C.
- Chauffe de la bande d'acier dans le four : Dans un second temps la tôle d'acier traverse le four Heurbel (chauffage par brûleurs à tubes radiants), pour atteindre une température en sortie d'environ 700°C.
- Maintien en température de la bande dans les zones de maintien verticale et horizontale,
- Trempe chimique : L'acier est refroidit rapidement à hauteur de 470°C par soufflage émis par des Jets Cooler. Cette phase est primordiale pour la qualité du traitement thermique car elle permet en quelque sorte de fixer les propriétés souhaitées de l'acier.

#### **b. Description de la zone peinture :**

Suite au traitement thermique, la tôle d'acier traverse un bain de zinc. Le zinc a pour objectif de protéger l'acier contre la corrosion.

Ensuite, peinte soit en monocouche soit en bicouche, la bande d'acier est séchée par soufflage d'air. Les molécules de solvant et l'air soufflé sur la bande sont ensuite traités par deux incinérateurs qui vont brûler et éliminer ces molécules à une température avoisinant les 750°C.

### 3. Compte rendu partiel du rapport de diagnostic énergétique :

#### a. Synthèse de l'audit :

Cette synthèse de l'audit se caractérise par un classement des préconisations en trois scénarios :

- **Scénario 1 : « Suivi et maintenance »** : actions rapides entraînant des économies directes (nécessitant aucun investissement),
- **Scénario 2 : « Maîtrise »** : actions à court terme qui visent à maîtriser les dépenses face à l'augmentation des tarifs de l'énergie,
- **Scénario 3 : « Vertueux »** : scénario appliqué à une politique environnementale forte, visant la réduction des consommations d'énergie et des gaz à effet de serre (actions nécessitant des temps de retour sur investissement et des investissements plus conséquent que pour les deux premiers scénarios).

Pour des raisons de confidentialité, les montants des investissements et des économies seront communiqués en pourcentage et non avec leur valeurs réelles en €. Cependant, cela ne fausse pas l'analyse car on peut voir les parts que représentent les préconisations sur leur scénario, et les parts des scénarios sur le total de l'investissement et des économies totales réalisées sur les plans financiers et écologique (rejets CO2).

**a1. Présentation des scénarios :**

**- SCENARIO 1 « SUIVI & MAINTENANCE »**

Domaine	Préconisations	Investissement		Economie identifiée				RSI	RSI	C2E
		Total €HT	Surcoût €HT	Electricité kWhEF/an	Combustible kWhPCI/an	€HT/an	kgCO2/an	total années	surcoût années	
1	Substitution Gaz / Elec Limitation à 90% de la puissance gaz maximale	0	-	+78.6%	-201.4%	+37.4%	- 75.6%	immédiat	-	0
2	Optimisation temps de fonctionnement de l'incinérateur 1	0	-	-	+95.1%	+14.9%	+51.6%	immédiat	-	0
3	Optimisation temps de fonctionnement de l'incinérateur 2	0	-	-	+121.9%	+19.1%	+66.1%	immédiat	-	0
4	Vérification de l'état des deux premiers échangeurs de l'incinérateur 2	0	-	-	+84.4%	+13.2%	+45.7%	immédiat	-	
5	Réduction du taux de fuites de 50%	0	-	+12.3%	-	+8.8%	+7%	immédiat	-	0
6	Arrêt des malaxeurs en période d'inoccupation	0	-	+1%	-	+0.7%	+5.9%	immédiat	-	0
7	Réduction de la pression de 0.2 bar	0	-	+1.2%	-	+0.9%	+0.7%	immédiat	-	0
8	Elimination talon de puissance hors période de production de la ligne 2	0	-	+6.8%	-	+5.1%	+3.8%	immédiat	-	0
<b>Ensemble des actions du scénario 1</b>		<b>0</b>	<b>-</b>	<b>+71.2%</b>	<b>+30.2%</b>	<b>+60.2%</b>	<b>+44.6%</b>	<b>immédiat</b>	<b>-</b>	<b>0</b>

- **SCENARIO 2 «MAITRISE»**

Domaine	Préconisations	Investissement		Economie identifiée				RSI total années	RSI surcoût années	C2E kWh cumac	C2E % investissements
		Total €HT	Surcoût €HT	Electricité kWhEF/an	Combustible kWhPCI/an	€HT/an	kgCO2/an				
9	Optimisation de la combustion Diminution d'1% de la teneur en O2 dans les fumées (réglage des 84 brûleurs)	4.7%	-	-	+21.6%	+8.6%	+22.1%	0,9	-	0	
10	Isolation du four (15 cm de fibres céramiques 1300°C sur les parois latérales et haut du four)	19.2%	-	-	+38.2%	+15.1%	+39.1%	2,0	-	+16.2%	29%
11	Chauffage bain de dégraissant par récupération de chaleur sur le four 1	18.8%	-	-3.4%	+40.2%	+13.8%	1.2%	2,1	-	+17%	31%
12	Total Variateurs de vitesse ligne de recuit	37.7%		+83.4%	-	+50.4%	+30.4%	1,2	-	+45.6%	41%
13	Total Variateurs de vitesse ligne de peinture	19.5%		+20%	-	12.1%	7.3%	2,5	-	+21.2%	37%
<b>Ensemble des actions du scénario 2*</b>		<b>49.1%</b>		<b>+28.8%</b>	<b>+37.8%</b>	<b>+29.8%</b>	<b>+29.7%</b>	<b>1,6</b>		<b>+73.6%</b>	<b>34%</b>
<b>+ Ensemble des actions du scénario 1*</b>		<b>49.1%</b>		<b>+100%</b>	<b>+68%</b>	<b>+90%</b>	<b>+74.3%</b>	<b>0,5</b>		<b>+73.6%</b>	<b>34%</b>

- **SCENARIO 3 « VERTUEUX »**

Domaine	Préconisations	Investissement		Economie identifiée				RSI	RSI	C2E	C2E
		Total €HT	Surcoût €HT	Electricité kWhEF/an	Combustible kWhPCI/an	€HT/an	kgCO2/an	total années	surcoût années	kWh cumac	% investissements
14	Préchauffage du débit de soutirage sur l'incinérateur 1	+90.9%	-	-	+90%	+90%	+90%	4,9	-	+90%	12%
15	Préchauffage du débit d'air avant l'étuve de l'inducteur 2	+9.1%	-	-	+10%	+10%	+10%	4,4	-	+10%	13%

<b>+ Ensemble des actions du scénario 3</b>		<b>+50.9%</b>	<b>-</b>	<b>0%</b>	<b>+32%</b>	<b>+10%</b>	<b>+25.7%</b>	<b>4,8</b>		<b>+26.4%</b>	<b>12%</b>
<b>+ Ensemble des actions du scénario 1, 2 et 3*</b>		<b>+100%</b>		<b>+100%</b>	<b>+100%</b>	<b>+100%</b>	<b>+100%</b>	<b>1,0</b>		<b>+100%</b>	<b>23%</b>

## a2. Conclusion et critique des résultats :

### **SCENARIO 1 : « SUIVI & MAINTENANCE »**

La mise en place de l'ensemble des actions immédiates, à court RSI, représente :

- Une réduction de **5%** de la consommation d'électricité totale du site, soit **27%** des consommations de la ligne étudiée.
- Une réduction de **1%** de la consommation de gaz, totale du site, soit **7%** des consommations de ligne.

### **SCENARIO 1 : « SUIVI & MAINTENANCE » + SCENARIO 2 «MAITRISE»**

La mise en place de l'ensemble des actions immédiates et prioritaires représente :

Une réduction de **7%** de la consommation d'électricité totale du site soit **38%** des consommations de ligne 2

Une réduction de **3%** de la consommation de gaz, totale du site soit **17 %** des consommations de ligne 2

Le potentiel de Certificats d'Economies d'Energie de **X kWhcumac** représente un important levier économique valorisable et estimé à **34%** de l'investissement.

### **SCENARIO 1 : « SUIVI & MAINTENANCE » + SCENARIO 2 «MAITRISE» + SCENARIO 3 « VERTUEUX »**

La mise en place de l'ensemble de la totalité des actions préconisées représente:

Une réduction de **7%** de la consommation d'électricité totale du site soit **38 %** des consommations de ligne 2

Une réduction de **4%** de la consommation de gaz, totale du site soit **25%** des consommations de ligne 2

Le potentiel de Certificats d'Economies d'Energie de **Y kWhcumac** représente un important levier économique valorisable et estimé à **23%** de l'investissement.

**Pour les trois scénarios, l'évolution du coût des énergies, prévisible à la hausse, n'est pas prise en compte.**

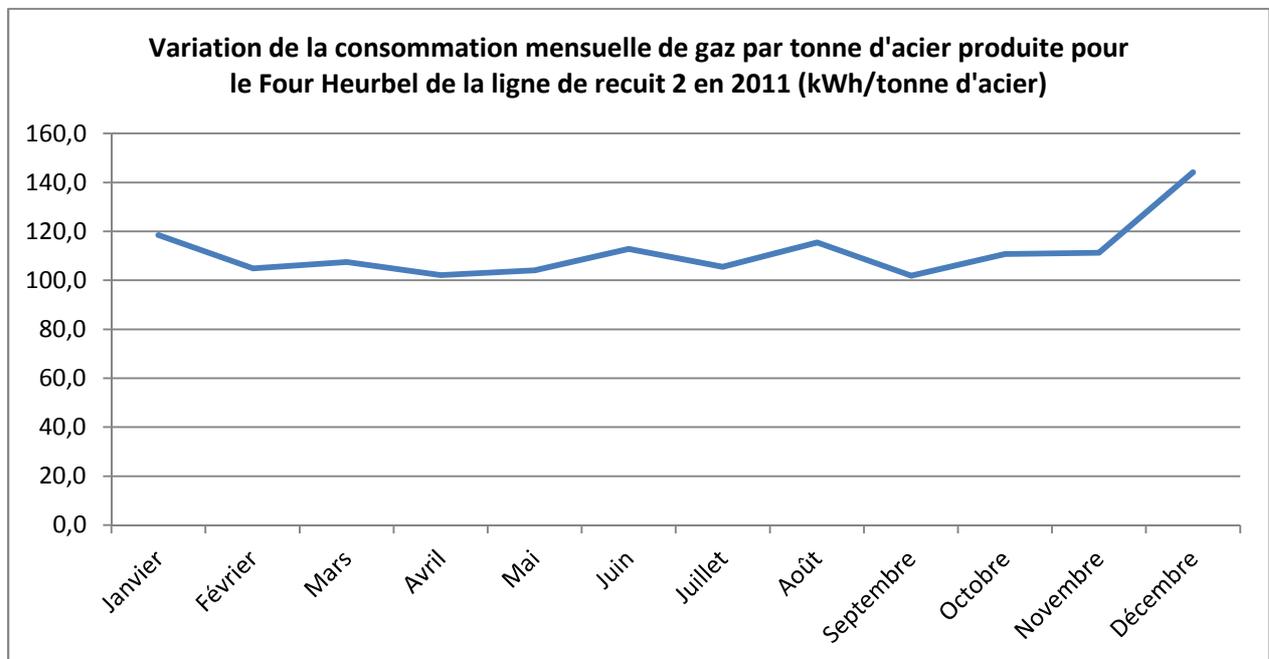
**b. Elaboration de préconisations avec l'utilisation, pour certaines, des outils réalisés au cours de ce stage :**

Quatre préconisations seront présentées dans cette partie :

- La première sur l'isolation du four,
- La seconde sur l'optimisation de la combustion des brûleurs du dit four,
- Une troisième sur la récupération de chaleur sur l'air traité en sortie de l'incinérateur 1 qui traite le mélange air + solvant lorsque la bande d'acier est peinte en monocouche.
- Une dernière sur l'amélioration de l'efficacité d'échange d'un groupe d'échangeurs constituant l'incinérateur 2 qui traite le mélange air + solvant lorsque la bande d'acier est peinte en bicouche.

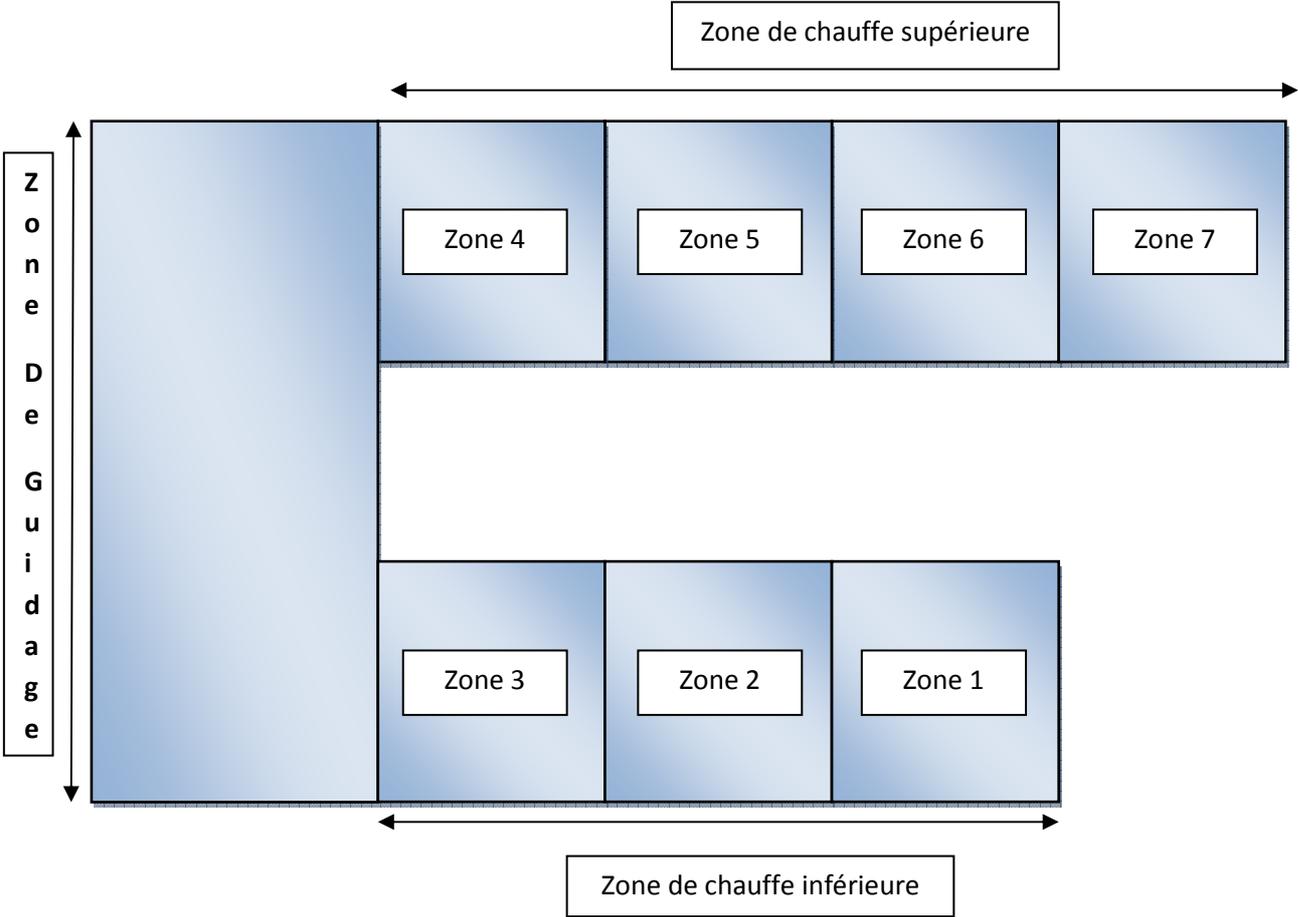
**b1. Préconisations sur le four de la zone de recuit :**

Le four représente actuellement 92% des consommations totales en gaz de la zone de recuit. On peut notamment voir ci-dessous l'évolution du ratio consommation énergétique/production.

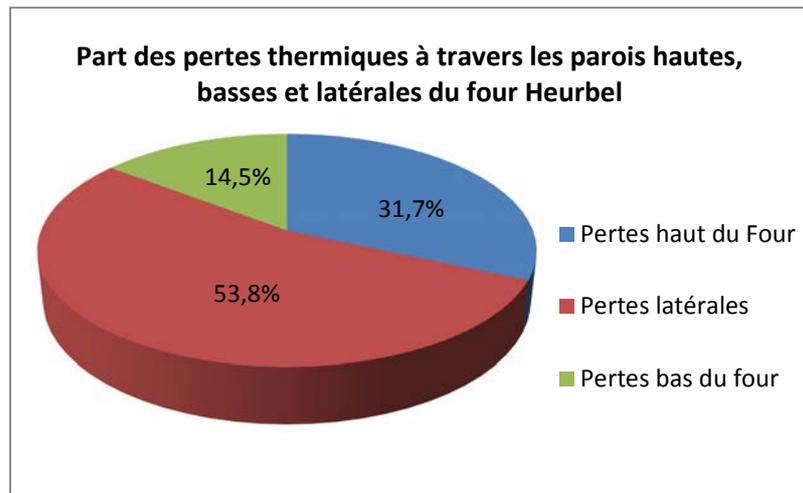


Le rapport entre la consommation de gaz du four Heurbel et la masse de production est globalement stable entre 110 et 120 kWh/t avec une moyenne à **111.6 kWh/tonne d'acier produite**. Le ratio le plus élevé est mesuré au mois de décembre avec une production très faible.

Le four est divisé en trois principales zones que sont : la zone de chauffe inférieure, la zone de renvoi et de guidage et enfin la zone de chauffe supérieure.







Les pertes thermiques à travers les parois des deux zones de chauffe inférieure et supérieure représentent **86.75%** des pertes totales.

Les pertes thermiques à travers les parois hautes et latérales du four représentent **85.5%** des pertes totales.

On peut voir sur les graphiques ci-dessus que les parois latérales ainsi que le haut du four des deux zones de chauffe supérieure et inférieure doivent être isolées en priorité car ces parois sont à l'origine d'environ **75%** des pertes du four.

Les résistances thermiques ont été calculé à l'aide des dimensions et des propriétés physiques et thermiques des isolants (fibres céramiques, brique JM23 et Calsil) ainsi que les températures internes du four dans les différentes zones (zones de chauffe supérieure et inférieure et zone de guidage) et enfin la température ambiante.

L'ajout d'une couche d'isolant supplémentaire permettrait :

- la réduction des pertes thermiques du four,
- de garder une température de l'ambiance plus élevée au sein du four et donc de diminuer la quantité de gaz dépensée pour atteindre la température de consigne lors du redémarrage du four.

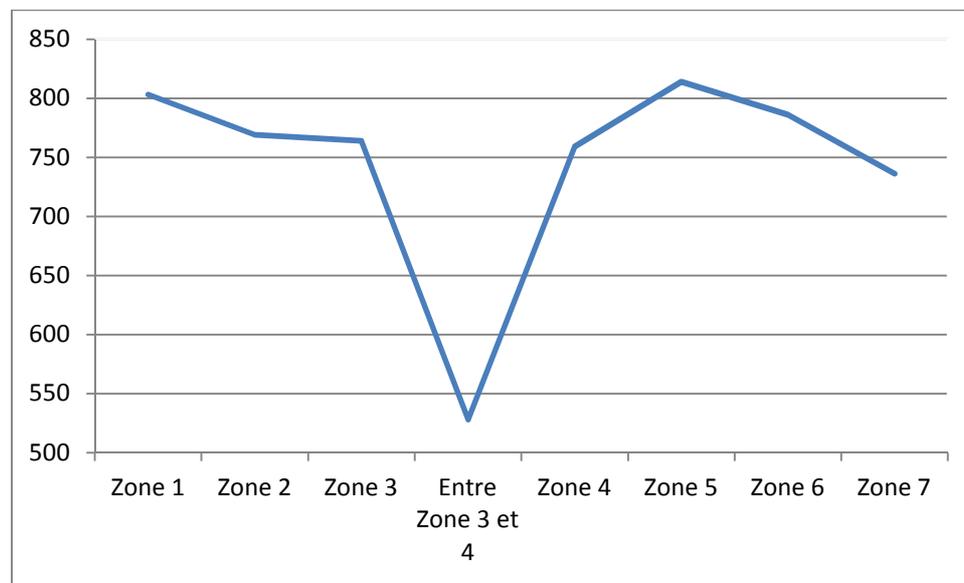
- Critères de choix de l'isolant :

A partir des données IBA, nous avons évalué les températures moyennes de chaque zone du four ainsi que les pointes de températures extrêmes.

En effet, il faut s'assurer que le type d'isolant choisi est compatible avec cette température maximale. Dans le panel des solutions qui seront proposées, on s'assurera que l'isolant préconisé respecte une marge de sécurité de 100°C au-dessus de la température maximale afin d'éviter la dégradation de l'isolant.

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Entre Zone 3 et 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7
Température maximale (°C)	1103	1114	929	910	638	956	934	840
Température minimale (°C)	167	162	167	219	155	219	205	248
Température moyenne (°C)	803	769	764	759	528	814	786	736

**Profil des températures moyennes ambiantes de chaque zones le long du four Heurbel**



Il est donc nécessaire de prendre des isolants pouvant supporter :

- une température de 1200°C pour la zone de chauffe inférieure,
- une température de 750 °C pour la zone de guidage,
- une température de 1050°C pour la zone de chauffe supérieure.

### **Différents types d'isolants pour haute température :**

Matériaux d'isolation	Prix	Température maximale d'utilisation	Conductivité Thermique (W/(m.K))		
			à 500°C	à 1000°C	à 1200°C
	€/m <sup>3</sup>	°C			
Vermiculite	2600	900	0.21	x	x
Silicate de calcium	2000	1000	0.10	0.17	x
Brique légère (type 26)	2800	1450	0.26	0.38	0.45
Brique légère (type 23)	2300	1250	0.20	0.26	0.30
Isolant microporeux	15000	1000	0.03	0.05	x
Board 1000°C (fibre rigide bio)	3800	1000	0.12	0.20	x
Board 1300°C (fibre rigide bio)	5400	1300	0.12	0.23	0.3
Board 1450°C (fibre rigide Toxique)	6200	1450	0.10	0.20	0.25
Fibre céramique 1100°C	1200	1100	0.16	0.35	x
Fibre céramique 1300°C	1300	1300	0.15	0.36	0.5
Fibre céramique 1400°C (Toxique)	2000	1280	0.13	0.28	0.41

<b>Isolation four</b>	Investissement		Economie identifiée				RSI total années	RSI surcoût années	C2E kWh cumac
	Total €HT	Surcoût €HT	Electricité kWhEF/an	Combustible kWhPCI/an	€HT/an	kgCO2/an			
15 cm de fibres céramiques 1300°C (parois latérales et haut du four) des deux zones de chauffe	<b>19.2%</b>	-	-	<b>+38.2%</b>	<b>+15.1%</b>	<b>+39.1%</b>	<b>2,0</b>	-	<b>+16.2%</b>

De multiples solutions sont envisageables, le choix doit se baser selon plusieurs critères :

- La somme dédiée à l'investissement,
- Les parois que l'on souhaite isoler car il n'est peut-être pas très avantageux d'isoler certaines parois,
- Les économies annuelles réalisées ainsi que le temps de retour sur investissement,
- Le coût de la main d'œuvre qui peut varier considérablement selon le type d'isolant.

- **OPTIMISATION DE LA COMBUSTION :**

L'optimisation de la combustion se fait au niveau des brûleurs et plus particulièrement au niveau de la quantité d'air introduite pour la combustion du gaz. En effet, il faut savoir que plus l'excès d'air est important plus le rendement de combustion est faible et par conséquent plus la température des fumées et les pertes par les fumées sont élevées. Pour que la combustion soit complète et optimisée, il faut choisir le plus petit excès d'air pour lequel la combustion est complète c'est-à-dire avec une teneur en monoxyde de carbone (CO) nulle.

Les analyses de combustion en notre possession font apparaître un dérèglement fréquent des réglages de combustion que nous pouvons notamment attribuer :

- Au manque de suivi régulier de la combustion
- Au mode de fonction du four dont les ventilateurs d'air de combustion et de fumées ne sont pas modulés en fonction de la puissance du four.

***Puissance moyenne des brûleurs au sein de chaque zone :***

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Total
Nombre de brûleurs	12	12	12	12	12	12	12	84
Puissance moyenne (kW)	70	68	62	55	48	42	32	<b>53,9</b>

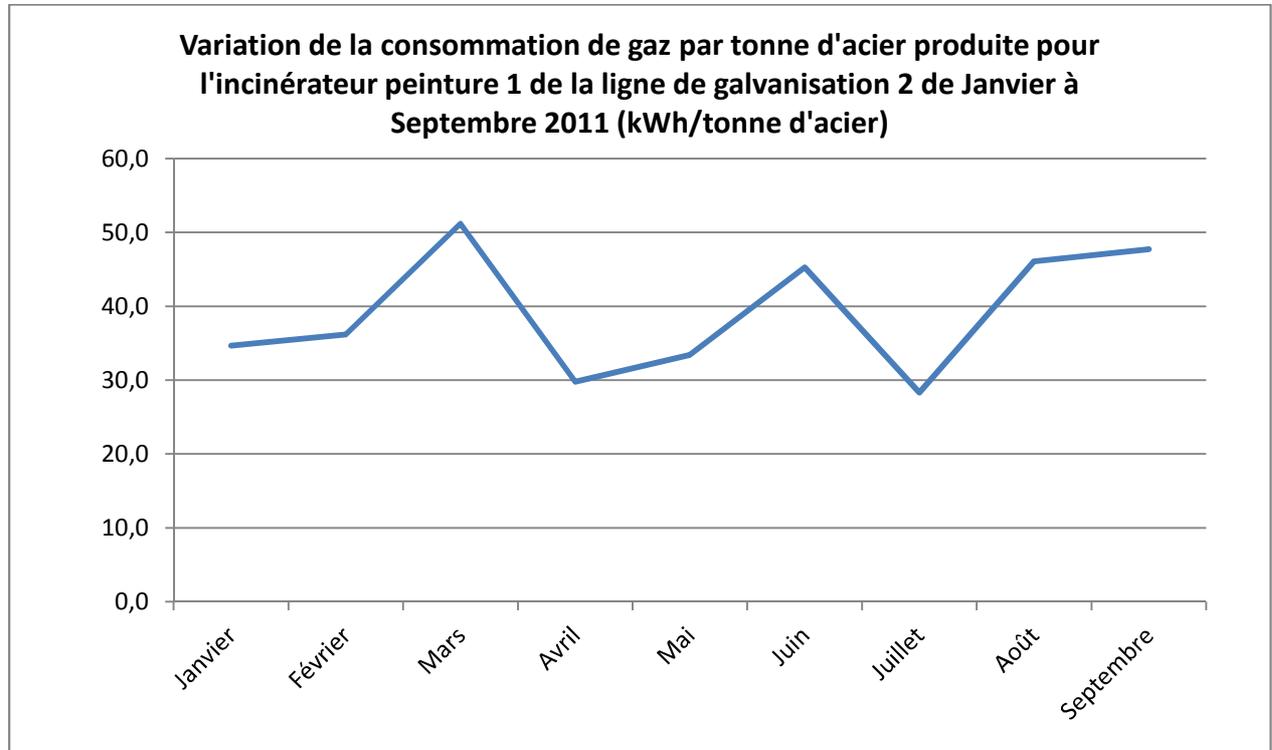
Pour une diminution de l'excès d'air et donc de la teneur en oxygène (O2) dans les fumées, en vérifiant bien que la teneur en CO reste nulle, l'économie réalisable est d'environ **1 kW par % O2 et par brûleurs** pour une puissance moyenne des brûleurs considérée de **53.9 kW**.

Cette mesure ne serait efficace qu'avec la modulation des débits des ventilateurs de combustion et d'extraction des fumées.

<b><i>Optimisation de la combustion</i></b>	Investissement		Economie identifiée				RSI	RSI	C2E
	Total	Surcoût	Electricité	Combustible	€/HT/an	kgCO2/an	total	surcoût	
	€HT	€HT	kWhEF/an	kWhPCI/an			années	années	
Diminution d'1% de la teneur en O2 dans les fumées (réglage des 84 brûleurs)	<b>4.7%</b>	-	-	<b>+21.6%</b>	<b>+8.6%</b>	<b>+22.1%</b>	<b>0.9</b>	-	-

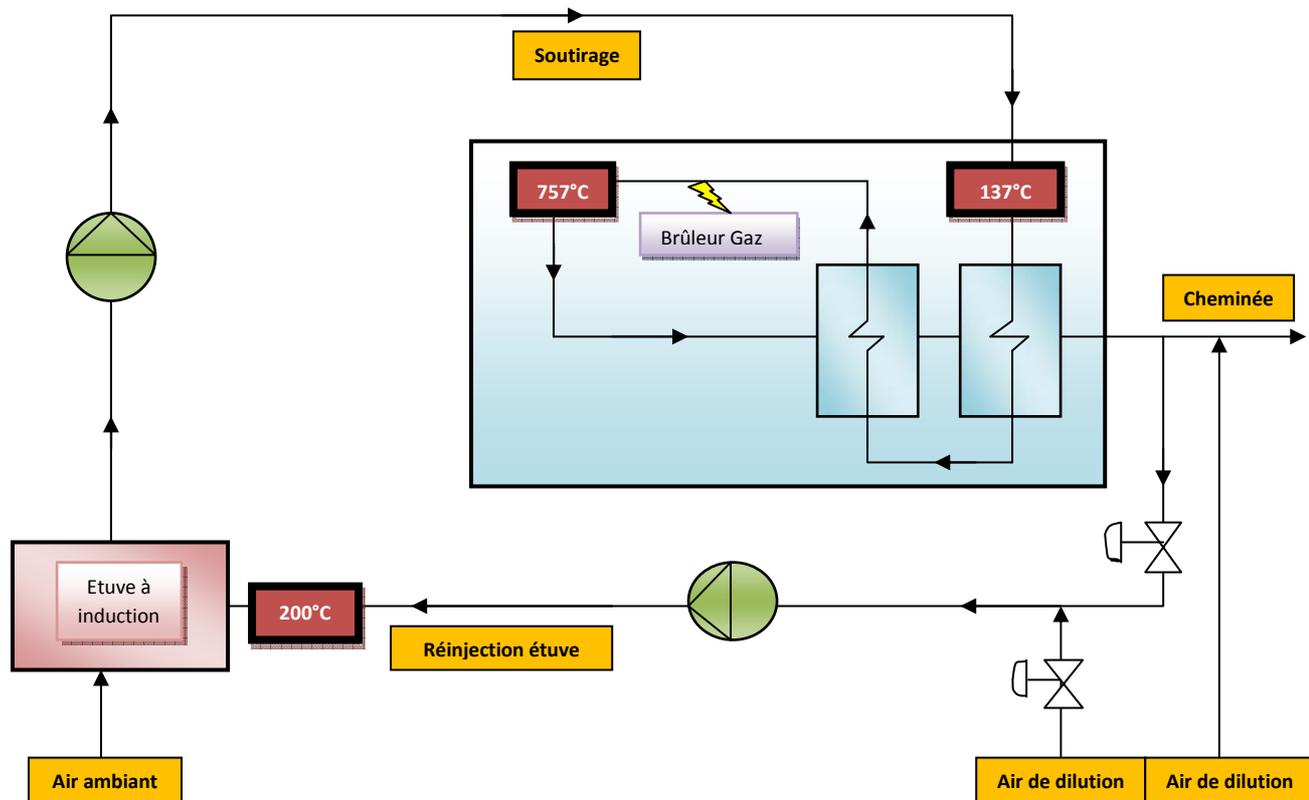
## b2. Préconisations sur les incinérateurs de la zone de peinture :

- Incinérateur 1 :



La variation de la consommation de gaz par tonne d'acier produite pour l'incinérateur peinture 1 de la ligne de galvanisation 2 est en moyenne de **39.2 kWh/tonne d'acier** ce qui représente une quantité de gaz consommée de **3.4 Nm<sup>3</sup>/tonne d'acier produite**.

## PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :



Un débit d'air ambiant et un débit d'air traité provenant de l'incinérateur sont injectés dans l'étuve à induction, ce mélange va se charger en molécules de solvant. Le mélange air + solvant est ensuite soutiré de l'étuve pour être ensuite injecté et traité dans l'incinérateur.

Dans l'incinérateur, le débit air + solvant est préchauffé dans deux échangeurs successifs (par l'air traité après le brûleur) puis atteint une température de consigne d'environ 750°C sous l'action d'un brûleur fonctionnant au gaz naturel. Ce débit d'air traité est ensuite refroidi dans les deux échangeurs par le débit d'air de soutirage avant de sortir de l'incinérateur.

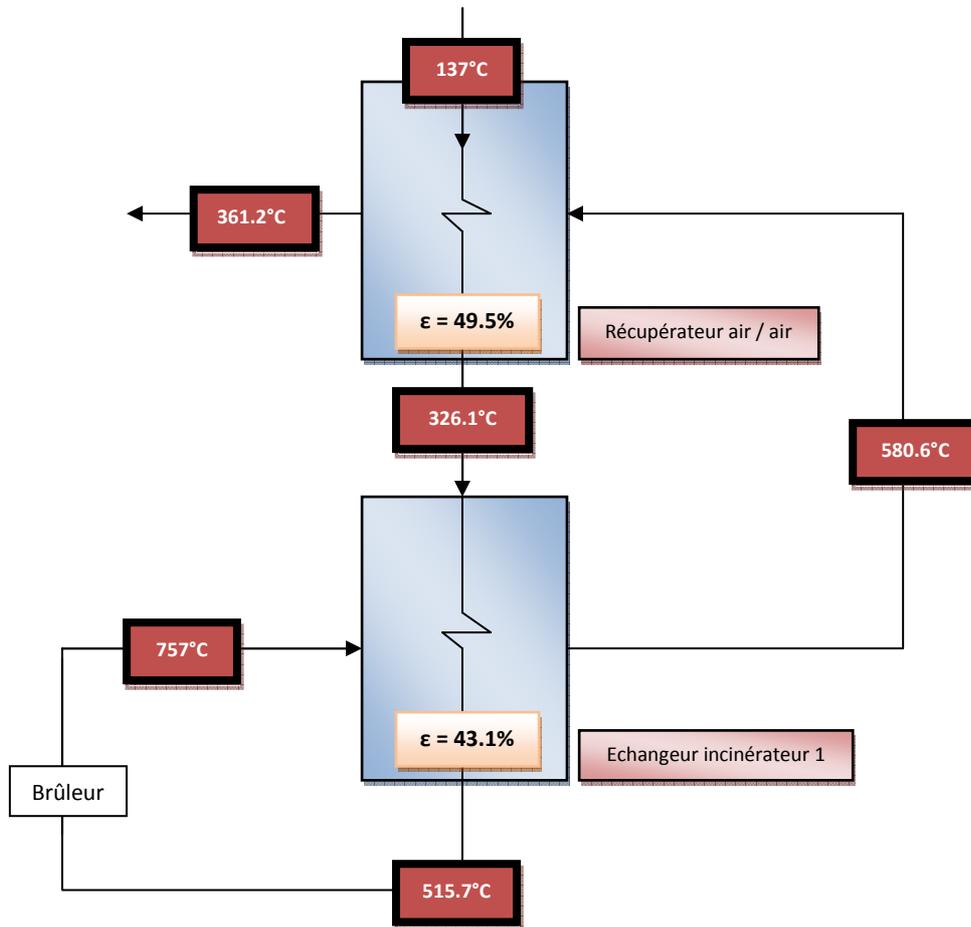
Une partie de l'air traité ajoutée à un débit d'air de dilution est réinjectée dans l'étuve à induction tandis que l'autre partie part directement à la cheminée.

En fonctionnement, la température moyenne de réinjection est d'environ 200°C avec des débits moyens de soutirage et de réinjection respectivement égaux à 11000 Nm<sup>3</sup>/h et 7500 Nm<sup>3</sup>/h. La température de soutirage déterminée à l'aide de bilans thermiques est en moyenne de 137°C lorsque l'incinérateur 1 est en régime permanent. De plus, lorsque l'incinérateur 1 fonctionne en régime permanent, un débit d'air traité d'environ 21000 m<sup>3</sup>/h est rejeté à la cheminée à une température de l'ordre de 460°C. **Une récupération de chaleur sur cet air chaud est donc envisageable.**

Et enfin, on a une efficacité de traitement de **84.9 Nm<sup>3</sup> d'air traité/Nm<sup>3</sup> de gaz.**

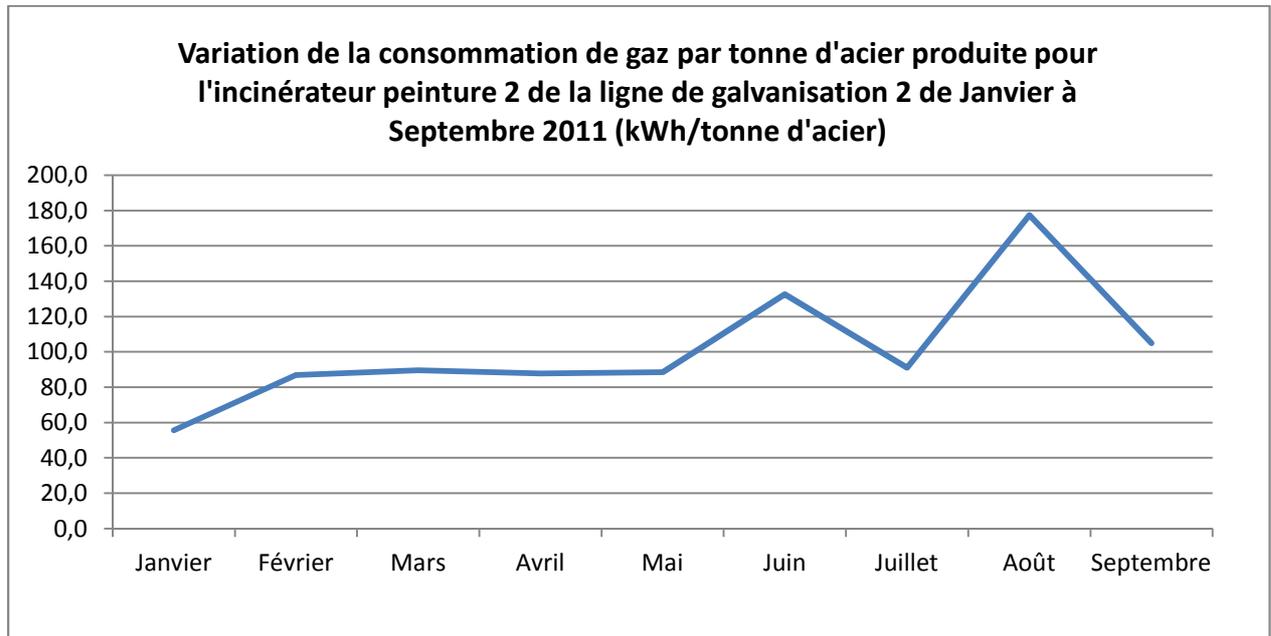
• **RECUPERATION DE CHALEUR SUR LES FUMÉES :**

En supposant que le récupérateur de chaleur possède les mêmes caractéristiques physiques que le groupe d'échangeurs existants dans l'incinérateur 1, on a en régime permanent le système suivant :

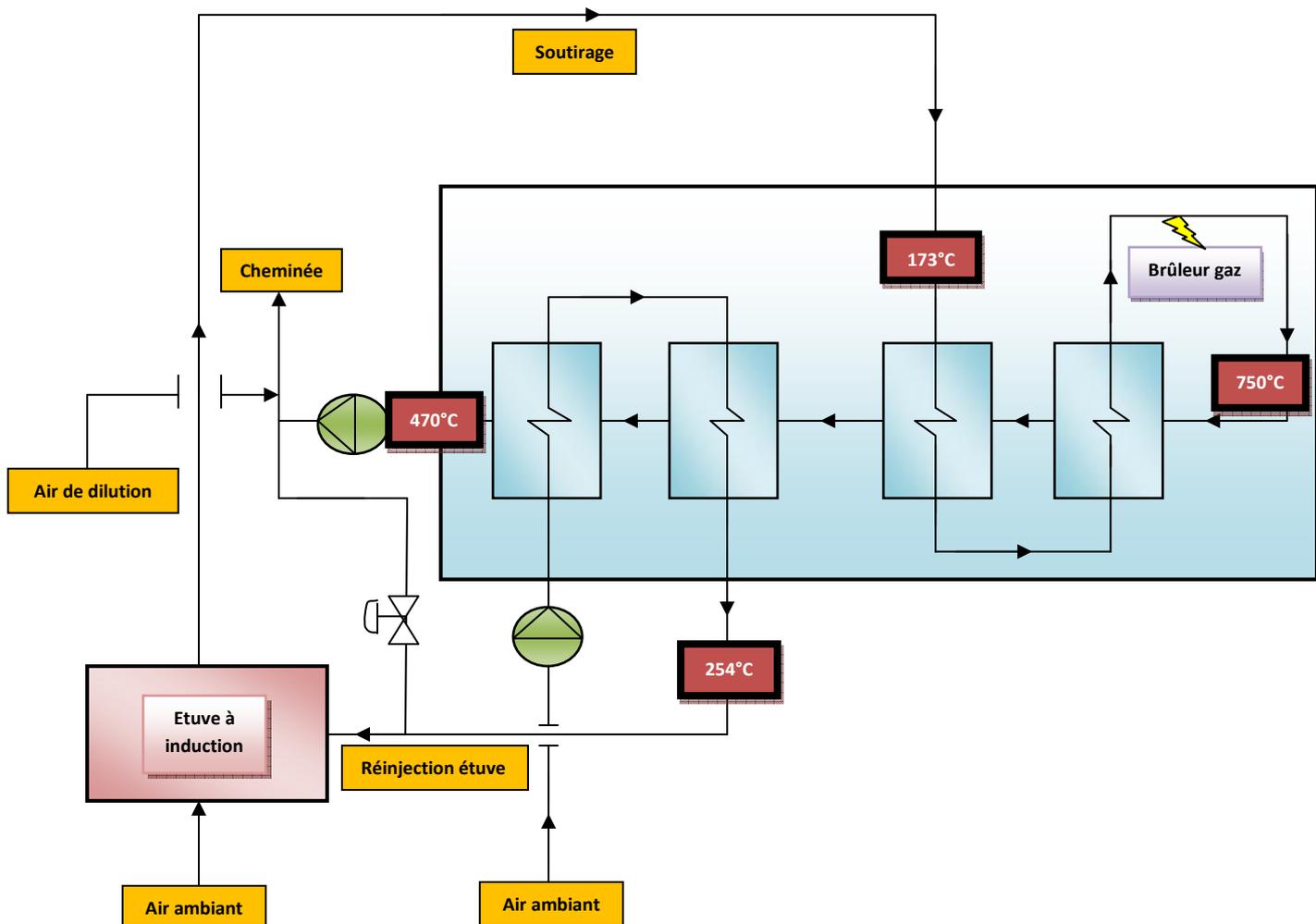


<b><i>Incinérateur 1</i></b>	Investissement		Economie identifiée				RSI	RSI	C2E
	Total €HT	Surcoût €HT	Electricité kWhEF/an	Combustible kWhPCI/an	€/an	kgCO2/an	total années	surcoût années	
Préchauffe débit de soutirage incinérateur 1	+90.9%	-	-	+90%	+90%	+90%	4,9	-	+90%

- **Incinérateur 2 :**



## PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :



Un débit d'air ambiant et un débit d'air traité provenant de l'incinérateur sont injectés dans l'étuve à induction, ce mélange va se charger en molécules de solvant. Le mélange air + solvant est ensuite soustrait de l'étuve pour être ensuite injecté et traité dans l'incinérateur.

Dans l'incinérateur, le débit air + solvant est préchauffé dans deux échangeurs successifs (par l'air traité après le brûleur) puis atteint une température de consigne d'environ 750°C sous l'action d'un brûleur fonctionnant au gaz naturel, ce débit d'air traité est ensuite refroidi dans les deux échangeurs par le débit d'air de soutirage. Puis ce débit d'air est encore refroidi par de l'air ambiant dans deux échangeurs successifs puis est rejeté à la cheminée. Cet air ambiant est donc réchauffé et une partie est réinjectée dans l'étuve tandis que l'autre partie va directement à la cheminée.

En fonctionnement, la température moyenne de réinjection est d'environ 250°C avec des débits moyens de soutirage et de réinjection respectivement égaux à 12000 Nm<sup>3</sup>/h et 10000 Nm<sup>3</sup>/h. La température de soutirage déterminée à l'aide de bilans thermiques est environ de 160°C lorsque l'incinérateur 2 est en régime permanent.



<b><i>Incinérateur 2</i></b>	Investissement		Economie identifiée				RSI total <i>années</i>	RSI surcoût <i>années</i>	C2E <i>kWh cumac</i>
	Total <i>€HT</i>	Surcoût <i>€HT</i>	Electricité <i>kWhEF/an</i>	Combustible <i>kWhPCI/an</i>	<i>€HT/an</i>	<i>kgCO2/an</i>			
Vérification état des deux premiers échangeurs de l'incinérateur 2	<b>0</b>	-	-	<b>+84.4%</b>	<b>+13.2%</b>	<b>+45.7%</b>	<b>immédiat</b>	-	

Cette amélioration de l'efficacité d'échange augmente dans un même temps le volume d'air traité par volume de gaz. En effet, cette efficacité passe de 47.6 à **68.2 Nm3 d'air traité/Nm3 de gaz**.

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

Les missions menées au cours du stage, c'est-à-dire environ 50% pour la réalisation d'outils informatiques de diagnostic énergétique et 50% pour la réalisation de diagnostic énergétique en milieu industriel, m'ont permis de diversifier mes compétences.

En effet, sur le plan technique, ce stage m'a permis de mettre en application et d'approfondir mes connaissances sur de nombreux sujets tels que la combustion, le transfert thermique, la récupération de chaleur, la production de vapeur, la condensation, la production de froid, la cogénération (biogaz, biomasse), les pertes de charge... que ce soit pour la réalisation des outils ainsi que pour les cas concrets rencontrés lors des diagnostics énergétiques en industrie.

Dans un second temps, ce stage a été l'occasion de comprendre dans quel contexte évolue Inddigo (concurrence, fonctionnement des marchés publics, des appels d'offres...), ce qui m'était complètement abstrait avant ce stage et m'a fait prendre conscience de la complexité du milieu.

Sur le plan personnel, cette expérience professionnelle m'a permis de confirmer mon intérêt et ma détermination à poursuivre dans le domaine de l'efficacité énergétique.

Et enfin, disposant d'un cadre socioprofessionnel agréable, j'ai pu m'intégrer facilement au sein de l'agence. Ces six mois de stage ont été vraiment très enrichissantes sur le plan professionnel ainsi que sur le plan humain.

## Références bibliographiques

- Club Certificats d'Economies d'Energie (Club C2E). Certificats d'économies d'énergies. Mémento du Club C2E, 8<sup>ème</sup> Edition, Mars 2012, 488 p. Association Technique Energie Environnement (ATEE). ISBN : 2-908131-38-2.
- MARCHAND, Jean-François. RETScreen : la solution d'aide à la décision en matière d'énergie. Energymag. 1<sup>er</sup> trimestre 2011, Energymag n°17.
- BORLEIN, Christophe. Economie d'énergie dans les centrales frigorifiques : La basse pression flottante. Août 2011, 11p, Disponible sur <http://www.schneider-electric.com>.
- BORLEIN, Christophe. Economie d'énergie dans les centrales frigorifiques : La haute pression flottante. Octobre 2010, 9p, Disponible sur <http://www.schneider-electric.com>.
- GICQUEL, Renaud. Systèmes énergétiques. Tome 1 : Méthodologie d'analyse, Bases de thermodynamique, Composants, Thermoptim. Presses des Mines de Paris, 2009. Chapitre 3, Présentation de Thermoptim, p. 103-128. Collection Les Cours de l'Ecole. ISBN : 978-2-35671-013-0.
- GICQUEL, Renaud. Systèmes énergétiques. Tome 2 : Systèmes énergétiques, Applications « classiques ». Presses des Mines de Paris, 2009. Chapitre 12, Optimisation par intégration systémique, p. 307-349. Collection Les Cours de l'Ecole. ISBN : 978-2-35671-014-7.
- GICQUEL, Renaud. Le progiciel THERMOPTIM : une Aide Logicielle Pédagogique pour l'Enseignement Supérieur (ALPES). In : Actes du Colloque International NTICF.98, INSA Rouen, 1998, p.255-260.
- GICQUEL, Renaud. Progiciel Thermoptim : Une boîte à outil pour l'énergétique. In : Techniques de l'Ingénieur, réf : BE8047v2, 28p. Disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- DUMINIL, Maxime. Théorie des machines frigorifiques - Machine à compression mécanique. In : Techniques de l'Ingénieur, réf : B9730, 60p. Disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- FEIDT, Michel. Production de froid et revalorisation de la chaleur : principes généraux. In : Techniques de l'Ingénieur, réf : BE8095, 19p. Disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- DELBES, Jacques et VADROT, Adrien. Réseaux de froid urbain - Production et stockage du froid. In : Techniques de l'Ingénieur, réf : BE9321, 16p. Disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- VRINAT, Georges. Machines frigorifiques industrielles - Introduction. In : Techniques de l'Ingénieur, réf : BE9740, 6p. Disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- VRINAT, Georges. Machines frigorifiques industrielles - Compresseurs. In : Techniques de l'Ingénieur, réf : BE9741, 28p. Disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- VRINAT, Georges. Machines frigorifiques industrielles - Echangeurs et capacités sous pression. In : Techniques de l'Ingénieur, réf : BE9742, 30p. Disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- VRINAT, Georges. Machines frigorifiques industrielles - Circuits de distribution et implantation. In : Techniques de l'Ingénieur, réf : BE9743, 22p. Disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- MARVILLET, Christophe. Applications industrielles du froid - Industries utilisatrices. . In : Techniques de l'Ingénieur, réf : BE9756, 31p. Disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- DUMAS, Jean-Pierre. Stockage du froid par chaleur latente. In : Techniques de l'Ingénieur, réf : BE9775, 22p. Disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- BONTEMPS André, GARRIGUE Alain, GOUBIER Charles, HUETZ Jacques, MARVILLET Christophe, MERCIER Pierre, VIDIL Roland. Echangeurs de chaleur. Définitions et architecture générale. In : Techniques de l'Ingénieur, réf : B2340, 20p. Disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- Energie +. Améliorer la machine frigorifique. Consulté du 20/02/2012 au 17/08/2012. Disponible sur <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11643>.
- Energie +. Rendement d'une chaudière. Consulté du 20/02/2012 au 17/08/2012. Disponible sur <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10987>.

- Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Fiches d'opérations standardisées d'économies d'énergie dans le secteur de l'industrie. Mise à jour le 02/07/2012. Disponible sur <http://www.developpement-durable.gouv.fr/3-Le-secteur-de-l-industrie>.
- ADEME. Diagnostic énergétique dans l'industrie – Cahier des charges. Mis en ligne le 15/09/2010. <http://www.ademe.fr/bretagne/upload/projet/fichier /87fichier.doc>.



# **ANNEXES**



## **Annexe 1 :**

### **Démarche de réalisation d'un diagnostic énergétique en milieu industriel inspiré de la méthodologie de l'ADEME et des pratiques d'Inddigo**

#### **1. Visites du site et investigations préliminaires :**

##### **a. Etat des lieux :**

Point de départ de chaque mission, l'état des lieux est une étape primordiale car il permettra de connaître l'état actuel des installations. Ce travail d'investigation débutera par une réunion de lancement puis par une visite du site. Cette première rencontre entre maîtrise d'ouvrage et prestataire a pour objet, à travers une visite détaillée du site, de bien comprendre le fonctionnement du process industriel et de ses annexes. Il est intéressant de prévoir cette visite durant les périodes d'activité afin de voir les équipements en opération et ainsi détecter d'éventuels défauts de fonctionnement.

Pour le bon déroulement du diagnostic, le maître d'ouvrage désignera une personne chargée de suivre le déroulement de la prestation et de servir d'interlocuteur au prestataire. Idéalement, il est souhaitable de rassembler un responsable de la maintenance des équipements et un électricien habilité. En effet, l'amélioration de la performance énergétique ne dépend pas seulement de ses qualités techniques mais dépend également des pratiques organisationnelles mises en place pour sa gestion. Ainsi, cette étape d'inventaire des compétences et moyens internes et externes est importante car des solutions d'amélioration pourront également être apportées sur ces aspects.

De plus, le prestataire devra avoir accès aux données dont dispose le maître d'ouvrage exploitant le site en matière de consommations d'énergie (schémas, listes d'inventaires, données techniques et de suivi disponibles, outils de gestions, carnet de suivi, ...).

La collecte des informations pourra se faire en amont de l'intervention sous forme d'échanges préalables qui permettront :

- De gagner du temps pendant la période d'expertise et par conséquent diminuer le coût d'intervention,
- A l'intervenant de préparer son plan d'action et de rassembler des éléments de comparaison extérieurs,
- De présenter un devis pour son intervention en explicitant la méthode qu'il se propose de suivre.

De plus, les informations et documents concernant les matériels et les consommations énergétiques devront être fournis par le maître d'ouvrage au prestataire au plus tard à son arrivée sur le site concerné.

Au cas où le diagnostic objet du présent cahier des charges fait suite à un pré-diagnostic, le rapport sera fourni au prestataire, lequel basera sa prestation sur les résultats et préconisations de celui-ci.

Concrètement, les visites portent principalement sur trois points :

- La compréhension des procédés de production,
- L'examen des équipements de production,
- L'examen des équipements annexes à la production.

## b. Compréhension des procédés de production :

Afin d'appréhender au mieux le contexte énergétique des équipements audités, il est important d'attacher une attention particulière à la connaissance des procédés de production :

- Schéma des flux énergétiques associés aux différentes phases de production,
- La dispersion géographique des principaux équipements consommateurs d'énergie à travers le site,
- Points de fonctionnement (débit, température, pression...) des divers process,
- Le bilan des travaux déjà réalisés, en cours ou en programmation pouvant avoir un impact sur le comportement énergétique du site,
- Analyse de la production pouvant avoir un impact sur la production : carnet de commandes, phases de transition...

## c. Examen des équipements de production :

Les visites sur site permettent de recenser les équipements de production de façon globale et de comprendre le procédé de fabrication. L'attention se porte donc sur les données techniques des constructeurs, les données de consommations enregistrées, les mesures de combustion réalisées... Ces éléments seront complétés par la suite par une série de mesure (puissance électrique, débits, températures...).

## d. Examen des équipements annexes à la production :

Les équipements annexes à la production peuvent représenter une part non négligeable de la consommation d'énergie. Il est donc important de recenser les utilités indirectement liées au process telles que l'air comprimé, la ventilation, la production de vapeur.

### • **L'air comprimé**

Elément important dans la consommation globale d'électricité, l'installation de production d'air comprimé sera détaillée soigneusement (compresseurs, sécheurs, modes de fonctionnement, entretien, régulation...).

La distribution et l'utilisation finale de l'air comprimé feront également l'objet d'une analyse détaillée (état du réseau, pression de fonctionnement, équipements sur postes de travail et sur machines...).

### • **Ventilation /Aspiration**

Les caractéristiques des équipements de ventilation et d'extraction d'air (puissances installées, débits, modes de fonctionnement) seront répertoriées et comparées entre elles (bilan d'équilibre de pression). Leurs modes de fonctionnement seront analysés.

Les machines ou postes de travail équipés d'aspiration centralisée feront l'objet d'une analyse particulière, fréquemment source d'économies d'énergie.

### • **Production de vapeur**

Pour la production de vapeur, un relevé des informations suivantes est conseillé :

- Marque, type et puissance des générateurs,
- Date de mise en service, réparation et modification récente, entretien,
- Brûleurs (âge, type, date du dernier réglage ou changement),
- Régulation de puissance, description du fonctionnement (cascades de chaudières...),
- Réseau de distribution : état du calorifuge, entretien des purgeurs,

- Equipements en chaufferie (retour condensats, bache alimentaire, économiseur de chaleur...).

- **Production de froid**

Pour la production de froid, un relevé des informations suivantes est conseillé :

- Marque, type et puissance des compresseurs et des condenseurs,
- Date de mise en service, réparation et modification récente, entretien,
- Réseau de distribution : état du calorifuge,
- Type de liquide frigorigène,
- Fonctionnement et utilisation des équipements utilisant le réseau froid.

## **2. Campagne de mesure :**

Cette campagne concernera les paramètres caractéristiques du site industriel et des équipements à diagnostiquer tels que les températures, les pressions, les débits, les puissances électriques (moteurs, compresseurs, pompes ...).

Le prestataire définira dans sa proposition les mesures et calculs à effectuer, ainsi que leur niveau de précision nécessaire. Il lui appartiendra de fournir les équipements de mesure et d'acquisition de données nécessaires, en complément de l'équipement de l'usine, et permettant un suivi continu, pendant la période la période déterminée, des paramètres retenus et des grandeurs à mesurer. Il en restituera une trace sous forme de tableaux, de calculs et de courbes.

Les mesures sont de type instantané pour des paramètres stables. Dans le cas contraire, une mesure sera réalisée sur une période représentative à l'aide d'un ensemble enregistreur autonome. Afin d'optimiser la qualité de la campagne de mesures, le prestataire devra préciser également les périodes de scrutation et d'enregistrement des données d'acquisition.

Au cas où certains matériels de mesure peuvent être installés afin de faciliter le suivi ultérieur des consommations de l'entreprise, le prestataire en fera la proposition écrite et chiffrée ou fournira lui-même le matériel au maître d'ouvrage, lequel se chargera de faire effectuer, à ses frais, la mise en place du matériel préalablement à l'intervention du prestataire. Les campagnes de mesures à effectuer et les conditions particulières d'essais devront faire l'objet d'un document écrit avant toute intervention, pour validation préalable par le maître d'ouvrage.

Pour les fluides, les équipements de mesures devront être adaptés à la nature de la grandeur mesurée et aux conditions d'utilisation qui ont été identifiées lors de l'investigation préliminaire ou du pré-diagnostic.

La démarche s'effectuera dans le respect des procédures d'intervention correspondant à la législation et aux usages du site.

## **3. Traitement des données et détermination des économies :**

La phase de traitement de données commencera par l'analyse globale des consommations. Des analyses qualitatives et quantitatives plus ciblées permettront d'évaluer le potentiel d'amélioration énergétique de chaque équipement. Et enfin, le prestataire chiffrera le coût et la rentabilité attendus de ses préconisations.

### **a. Analyse des consommations :**

Pour des raisons évidentes, l'analyse des consommations doit être faite très tôt dans l'étude afin de pouvoir s'aider des résultats lors des visites sur site. En effet, la bonne connaissance des points forts et faibles

permet d'orienter les visites sur le terrain sur les problèmes clés et évite ainsi une trop grande dispersion de l'effort.

### **b. Evaluation des potentiels d'amélioration :**

La variété des informations récoltées dans la documentation existante et sur le terrain amène à différents types d'analyse. Si l'impact de certaines solutions d'amélioration peut être chiffré, d'autres ne pourront faire l'objet que d'une évaluation qualitative.

Une analyse quantitative dans le but d'évaluer :

- La répartition des consommations par secteur,
- Les gains économiques et environnementaux des différentes solutions d'amélioration énergétique proposées (combustion, récupération de chaleur...)
- Le bilan thermiques des lignes de production et l'évaluation de leur efficacité
- ...

Une analyse qualitative dans le but d'évaluer :

- Le mode de fonctionnement des équipements, directement lié à leur durée de vie,
- La gestion des phases de transition.

### **c. Chiffrage des solutions préconisées :**

Pour l'ensemble des domaines étudiés, toutes énergies confondues, les solutions préconisées seront chiffrées avec précision :

- Les investissements nécessaires sont basés sur les prix moyens du marché actuel ; nous détaillons la partie « surcoût » entre un investissement nécessaire de remplacement d'équipement à l'identique et notre préconisation pour un équipement plus performant en terme de consommation d'énergie.
- Pour l'électricité, les économies identifiées sont calculées en kWh *Energie Finale*, basées sur les coûts calculés dans le bilan consommations, hors abonnement.
- Pour les énergies fossiles, les économies identifiées sont calculées en kWh *Pouvoir Calorifique Supérieur*
- L'économie finale est estimée d'une part en €/HT/an, d'autre part en kg équivalents CO<sub>2</sub>, unité transversale choisie pour le bilan environnemental. Ces résultats peuvent être basés sur des économies multi énergies.
- Le Temps de Retour sur Investissement total et surcoût uniquement.
- Le calcul des Certificats d'Economies d'Energie (CEE) envisageables est donné en kWh cumac, et n'entre pas dans le calcul du retour sur investissement, les valeurs financières des CEE étant fluctuantes.

Exemple de solutions préconisées :

<b>AIR COMPRIME</b>	Investissement		Economie identifiée				RSI	RSI	C2E
	Total	Surcoût	Electricité	Combustible	€/an	kgCO <sub>2</sub> /an	total	surcoût	
	€HT	€HT	kWhEF/an	kWhPCI/an			années	années	
Réduction du taux de fuites de 50%	Maintenance interne	-	500 000	-	24 000	40 000	immédiat	-	-

#### 4. Synthèse et recommandations :

##### a. Elaboration des plans d'actions :

Au terme de ces études, on a donc une meilleure connaissance des actions qu'il est possible de mettre en œuvre. Ces actions seront déclinées par équipement et de manières globales. La cohérence entre les préconisations de divers équipements seront alors pris en compte. L'objectif sera de réduire les besoins, récupérer la chaleur fatale et optimiser ou rénover les systèmes en place.

- **Actions immédiates** (nécessitant peu d'investissement)
  - Mise en place d'indicateurs de performances,
  - Réglages (programmation, régulation, rendements,...),
  - Amélioration de la politique interne de gestion énergétique : sensibilisation, formation, organisation interne...
  - Mise en place d'un outil de suivi des consommations et des dépenses énergétiques.
  
- **Actions prioritaires** (à inclure dans des travaux déjà programmés)
  - Maintenance / renouvellement: remplacement par des équipements plus performants (changement de moteurs, de bruleur, tubes radiants, utilisation de variateurs de fréquence...),
  - Etudes complémentaires spécifiques (diagnostic spécialisé : air comprimé, éclairage..., études de faisabilité en Energies Renouvelables...).
  
- **Actions utiles** (à planifier sur les années à venir)
  - Rénovation (remplacements de bruleurs, mise en place d'échangeurs de récupération d'énergie, renforcement e l'isolation, ...)

La hiérarchisation de ces actions par niveau de rentabilité permettra de définir des plans d'actions en cohérence avec l'enveloppe budgétaire du maître d'ouvrage et ainsi de rationaliser ses investissements.

##### b. Rédaction du rapport de synthèse :

A l'issue d'une ou plusieurs visites d'investigation, le prestataire procédera à une analyse des données recueillies sur le site et rédigera un rapport faisant état des résultats de son analyse.

Ce rapport contiendra :

### **1- La présentation de la situation :**

Le rapport final du diagnostic fera apparaître les résultats de l'investigation préliminaire (ou du pré-diagnostic) et rappellera les axes d'approfondissement qui en auront résulté.

Il y sera précisé les secteurs et les équipements concernés, les campagnes de mesures et calculs associés ainsi que leurs conditions d'exécution, le matériel de mesures et d'acquisition des données mis en œuvre, les données et les informations recueillies lors du diagnostic.

De plus, il sera également fourni :

- Un descriptif des installations concernées par le diagnostic ainsi que de la liste des documents remis par le maître d'ouvrage (données de base),
- La liste des équipements audités, leurs caractéristiques, leur dimensionnement, leur mode d'exploitation et leur environnement.
- Le descriptif des mesures effectuées avec : la liste des instruments de mesure utilisés ; les périodes de mesures, de scrutation et d'enregistrement ; les conditions d'essais ; les calculs effectués et le traitement des données (logiciel utilisés) ; les commentaires nécessaires à la compréhension des résultats.

### **2- Le résultat du diagnostic :**

- le coût global de fonctionnement des installations auditées, y compris les coûts de maintenance et d'exploitation servant de référence pour le calcul des économies éventuelles,
- la liste des modifications à apporter aux installations et équipements pour la réalisation des économies, ainsi que leur description sommaire et leur dimensionnement estimé,
- la liste des modifications à apporter aux modes opératoires,
- les investissements correspondants et une première estimation du planning de réalisation,
- les propositions d'organisation du travail et de formation du personnel,
- les économies d'énergie attendues des modifications proposées, ainsi que les gains éventuels induits de productivité, de maintenance, de qualité de production,
- les temps de retour estimés des différentes solutions d'amélioration préconisées,
- une analyse de l'impact de ces modifications sur l'environnement (émissions de GES, effluents, résidus de production, cogénération, énergies renouvelables...)...

### **3- Proposition d'équipements de mesures et de gestion (plan de comptage, indicateurs préconisés...)**

Cette proposition préconisera les matériels nécessaires au suivi des économies qui seront réalisées par la mise en œuvre des actions retenues par l'industriel.

### **4- Fiche de synthèse :**

Placée en tête du rapport, elle rassemblera les principaux résultats issus du diagnostic ainsi que les préconisations faites par le prestataire au responsable du site industriel.

### **5. Réunion de rendu et présentation des résultats :**

Le prestataire présentera au maître d'ouvrage le rapport de diagnostic.

Lors de la présentation, il apportera des précisions sur les points suivants :

- Les économies réalisables et les modifications à mettre en œuvre (modification opératoire, modification ou remplacement d'un ou plusieurs équipements...),
- Les investissements à réaliser (descriptif sommaire, évaluation budgétaire, rentabilité, estimation sur le planning de réalisation et des contraintes...),

- La proposition d'un plan de suivi des résultats obtenus.

La présentation devra permettre :

- De commenter à l'ensemble des responsables représentant le maître d'ouvrage, les résultats du diagnostic,
- De faire réagir le maître d'ouvrage sur les résultats obtenus,
- De les mettre en cohérence avec les objectifs stratégiques de l'entreprise,
- De convaincre de la pertinence des actions préconisées,
- De définir les priorités, les délais, les responsables de la mise en œuvre des actions au sein de l'entreprise.

## **Annexe 2 :**

### **Méthodologie de rédaction détaillée d'un rapport Inddigo**

#### **1- Présentation du contexte général :**

- Contexte et objectifs du diagnostic énergétique,
- Informations sur le prestataire (coordonnées et noms des acteurs de l'audit),
- Informations sur le site audité (coordonnées, activité principale, modifications récentes, gestion actuelle de l'énergie)
- Information sur les outils de suivi énergétique existant et manquant sur le site...

#### **2- Synthèse de l'audit :**

- Présentation des dépenses énergétiques par énergie (électricité, fioul, eau...) sur la dernière année (Consommations annuelles (kWh ou m3), Coûts unitaires (€HT/(kWh ou m3)) et dépenses annuelles par énergie et totale (€HT)),
- Evaluation et répartition des consommations de chaque poste par type d'énergie sur la dernière année,
- Synthèse des scénarios d'actions  
Scénario 1 : « Suivi et maintenance » : actions rapides entraînant des économies directes  
Scénario 2 : « Maîtrise » : actions à court terme qui visent à maîtriser les dépenses face à l'augmentation des tarifs de l'énergie  
Scénario 3 : « Vertueux » : scénario appliqué à une politique environnementale forte, visant la réduction des consommations d'énergie et des gaz à effet de serre...

#### **3- Bilan sur la consommation électrique du site étudié :**

- Evaluation des consommations électriques :
  - Bilan des consommations électriques sur la base des factures des trois dernières années (consommations en énergie active et en énergie réactive),
  - Etablir des ratios reliant la consommation d'électricité à la production (exemple : kWh/tonne produite)
  - Comparaison entre la puissance atteinte et la puissance souscrite sur les trois dernières années,
  - Répartition des consommations suivant les périodes tarifaires (Heures de pointe, heures pleines hiver et été, heures creuses hiver et été) pour les trois dernières années,
  - Répartition des consommations suivant les périodes saisonnières (hiver et été)...
- Optimisation du contrat d'électricité
  - Réajustement de la puissance souscrite si nécessaire
- Répartition des consommations électriques du site étudié
  - Diagramme de répartition des consommations électriques du site étudié,
  - Mesures des puissances électriques de différents postes ou utilités (pompes, compresseurs...)
  - Commentaires sur le fonctionnement de ces différents postes ou utilités et mise en évidence des défauts de fonctionnement (exemple : mise en évidence des talons de puissance hors période de production, comparaison entre puissance installée et puissance réellement consommée...)...

#### **4- Bilans sur les consommations de toutes les énergies primaires (fioul, gaz naturel...) du site :**

- Evaluation des consommations pour chaque type d'énergie primaire :

- Bilan des consommations sur la base des factures des trois dernières années pour tous les types de carburants utilisés,
  - Répartition des consommations par zones et/ou par process et utilités pour chaque type de carburant,
  - Etablir des ratios de consommations énergétiques par zone et/ou process en fonction par exemple de la surface chauffée (kWh consommé/m<sup>2</sup> chauffé) ou bien de la quantité produite (kWh consommé/tonne produite)... Ces ratios sont très importants et permettent de déceler facilement les zones ou process à améliorer.
  - Pour du chauffage de bâtiments, effectuer si possible la comparaison entre la consommation en carburant et les Degrés Jours Unifiés (DJU) (exemple : ratio kWh consommé/DJU) sur les trois dernières années minimum...
- Etude d'un éventuel changement d'énergie (exemple : passage du fioul au gaz de ville dont le kWh gaz est environ 35% moins cher que le kWh fioul)...

#### **5- Bilan sur la consommation d'eau du site étudié :**

- Evaluation des consommations d'eau :
  - Bilan des consommations d'eau sur la base des factures des trois dernières années,
  - Etablir des ratios reliant la consommation d'eau à la production (exemple : Litres/tonne produite)...
- Répartition par zone et/ou process des consommations d'eau du site étudié...

#### **6- Bilan sur les consommations liées à l'éclairage sur le site :**

- Etat des lieux (inventaire du nombre de tubes et ampoules, des horaires de fonctionnement, des puissances et consommations...),
- Répartition de la consommation électrique liée à l'éclairage par zone,
- Evaluer la part (en %) que représente la consommation électrique liée à l'éclairage par rapport à la consommation totale du site,
- Préconisations pour l'éclairage (remplacement de l'éclairage actuel par un éclairage plus performant, installation de détecteurs de présence, installation d'interrupteurs crépusculaires, entretien de l'installation d'éclairage...)...

#### **7- Bilan sur les consommations liées aux moteurs électriques présents sur le site :**

- Inventaire des principaux moteurs et les classer selon leur utilité (exemple : pompes de circulation d'eau, ventilation, moteurs process...),
- Préciser pour chaque type de moteur : le nombre, le temps de fonctionnement, les puissances installées et mesurées, les consommations...
- Préconisations (Installation de moteur haut rendement, Dimensionnement de moteurs car dans l'industrie ils sont fréquemment surdimensionnés, Utilisation de variateurs de vitesse...)...

#### **8- Bilan sur les consommations liées à la production d'air comprimé du site :**

- Inventaire des différents compresseurs de production d'air comprimé (Type-série, année de mise en service, technologie (exemple : à vis lubrifiée), puissance nominale, débit nominal, pression maximale, horaires de marche, condition d'aspiration...), du système de régulation (exemple : cascade de seuils de pression), des installations de traitement d'air, des réseaux de distribution (capacité et positionnement) et des usages (automatismes pneumatiques, jets libres et soufflage...)...
- Mesures et courbes représentatives des puissances électriques (pendant et hors production) et relevés si disponible des sous compteurs électriques,
- Courbes représentative des débits moyens d'air comprimé (pendant et hors production),

- Etablir des ratios énergétiques représentatifs des consommations en fonction de la production (exemple : kWh/Nm<sup>3</sup>),
- Evaluation des consommations en charge et en période d'inactivité,
- Evaluation du taux de fuites du réseau...
- Préconisations sur l'air comprimé telles que la réduction du taux de fuites (taux de fuites acceptable aux alentours de 10%), l'optimisation des pressions de fonctionnement (réduction d'un bar = 7% d'économie de consommation du compresseur), la réduction du débit des jets libres (utilisation de buses adaptables), la régulation de la production d'air comprimé, la récupération de chaleur sur les compresseurs (80% de l'énergie consommée est dissipée sous forme de chaleur)...

#### **9- Bilan sur les consommations liées à la production de froid :**

- Description des installations de froid (nombre, type, année de mise en service, fluide frigorigène utilisé, puissances électrique et frigorifique maximales, régulation de puissance, BP/HP, puissances annexes (pompes de circulation, ventilateurs...), temps de fonctionnement, COP...),
- Mesures et courbes représentatives des puissances électriques consommées par le compresseur et les organes annexes, durant la semaine et le weekend ainsi que pendant les périodes estivales et hivernales,
- Relevés et courbes comparatives de l'évolution des températures (extérieurs, locaux, chambres froides...)
- Préconisations : optimisation du fonctionnement, récupération d'énergie au condenseur, basse ou haute pression flottante, ajustement des consignes de température...

#### **10- Bilan sur les consommations liées à la production de chaleur :**

- Même démarche que pour le froid,
- Préconisations : optimisation de la gestion du chauffage, calorifugeage des conduites de chauffage, réglage des brûleurs de chaudières ayant des mauvais rendements, récupération d'énergie, mise en place d'une GTC...

#### **11- Optimisation de procédés (ex : fours, incinérateurs, Jet Cooler...) ou d'une ligne de production (ex : ligne de galvanisation)**

- Bilans des consommations du ou des procédés sur les trois dernières années,
- Etablir des ratios énergétiques en fonction de la production,
- Relevé des points de fonctionnements ou de valeurs moyennes sur une durée déterminée (températures, pressions, débits, ...) permettant d'établir les bilans matières et énergétiques du ou des process,
- Préconisations : récupération d'énergie sur les fumées, optimisation fonctionnement du process...

#### **12- Etude de l'enveloppe des bâtiments :**

- Descriptif des caractéristiques des bâtiments (exposition, composition, épaisseurs...),
- Préconisation sur un éventuel renforcement de l'isolation du bâti

#### **13- Etude sur l'utilisation potentielle d'énergies renouvelables (ECS solaire, solaire photovoltaïque, chaudière bois...)**

#### **14- Références bibliographique et réglementaires**

#### **15- Fiches d'informations techniques (éclairage, moteurs haut-rendement, variateur de vitesse...)**

### Annexe 3 :

#### Exemple de fiche d'opération standardisée d'économies d'énergie



Certificats d'économies d'énergie

Opération n° IND-UT-04

### **Economiseur sur les effluents gazeux de chaudière de production de vapeur**

#### **1. Secteur d'application**

Industrie.

#### **2. Dénomination**

Installation d'un économiseur sur les effluents gazeux de chaudières de production de vapeur de puissance comprise entre 1 et 10 MW alimentées au gaz naturel ou au GPL (hors chaudière de secours).

#### **3. Conditions pour la délivrance de certificats**

Mise en place réalisée par un professionnel.

#### **4. Durée de vie conventionnelle**

7 ans.

#### **5. Montant de certificats en kWh cumac**

Combustible utilisé pour le fonctionnement de la chaudière	Mode de fonctionnement de « l'atelier » utilisateur de la vapeur produite par la chaudière				Puissance nominale de la chaudière en kW
	1x8	2x8, 6j/7	3x8 arrêt le week-end	3x8 sans arrêt le week-end	
Gaz naturel	240	540	660	960	P
GPL	250	570	690	1000	

## Annexe 4 :

### Photographie représentant la structure de l'outil échange et récupération de chaleur

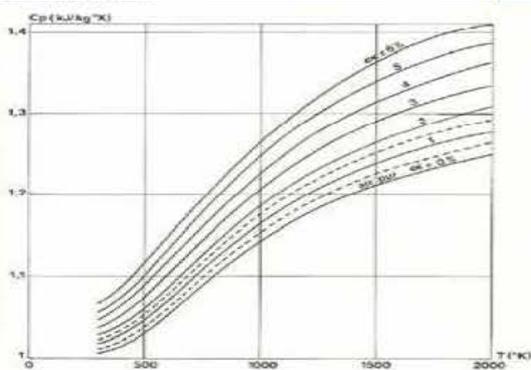
Production de vapeur			
Fluide chaud	Air		
Fluide froid	Eau		
Retour au sommaire			
Paramètres connus	Débit eau entrée	Inconnus	Tos
	Débit air		
	Tce		
	Tfe		
	P <sub>sat</sub> (consigne)		
Air chaud		Vapeur d'eau saturée	
Débit volumique entrée (m <sup>3</sup> /h)	50000	Température de l'eau en entrée T <sub>fe</sub> (°C)	80
Température entrée T <sub>ce</sub> (°C)	500	Température de l'eau en entrée (K)	353,15
Température entrée T <sub>ce</sub> (K)	773,15	Pression en entrée (Pa)	101325
ρ air à T <sub>ce</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	0,457	Débit volumique entrée (m <sup>3</sup> /h)	1
cp air à T <sub>ce</sub> (J/(kg.K))	1091,6	Masse volumique de l'eau en entrée (kg/m <sup>3</sup> )	970,75
Température sortie T <sub>cs</sub> (°C)	405,8	Chaleur massique de l'eau en entrée (kJ/(kg.°C))	4,196
Température sortie T <sub>cs</sub> (K)	678,96	Enthalpie spécifique de l'eau en entrée (kJ/kg)	335,26
ρ air à T <sub>cs</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	0,520	Pression de saturation P <sub>sat</sub> (bar)	6,00
cp air à T <sub>cs</sub> (J/(kg.K))	1069,2	Température de saturation T <sub>sat</sub> (°C)	158,84
Débit massique chaud (kg/h)	22840,5	Température de saturation T <sub>sat</sub> (K)	431,99
Débit massique chaud (kg/s)	6,345	ρ vapeur d'eau saturée à T <sub>sat</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	3,200
Température intermédiaire de l'air avant vaporisation (°C)	486,8	Chaleur massique de l'eau vapeur à T <sub>sat</sub> (kJ/(kg.°C))	2,400
Température intermédiaire de l'air avant vaporisation (K)	759,9	Chaleur massique de l'eau liquide à T <sub>sat</sub> (kJ/(kg.°C))	4,286
cp air à T <sub>ci</sub> (J/(kg.K))	1089,5	Chaleur latente de vaporisation L <sub>v</sub> à T <sub>sat</sub> (kJ/kg)	2080,6
		Enthalpie spécifique de la vapeur - Chaleur totale à T <sub>sat</sub> (h <sub>v</sub> =h <sub>l</sub> +L <sub>v</sub> ) (kJ/kg)	2754,6
		Enthalpie spécifique de l'eau - Chaleur sensible à T <sub>sat</sub> (h <sub>l</sub> ) (kJ/kg)	674,00
		Débit massique (kg/h)	970,7
		Débit massique (kg/s)	0,270
		Débit volumique de vapeur (m <sup>3</sup> /h)	303,4
C chaud (kW/K)	6,855	Puissance sensible (kW)	91,3
C froid (kW/K)	0,889	Puissance de vaporisation (kW)	561,0
C max (kW/K)	6,855	Puissance totale à fournir (kW)	652,4
C min (kW/K)	0,889		
Z	0,130		
	Co-courant	Contre-courant	
ΔT <sub>lm</sub> (°C)	325,9	333,4	
S.Kg (kW/°C)	2,002	1,957	
NUT (-)	2,251	2,200	
ε (-) (Vérification)	81,6%	86,9%	

## Annexe 5 :

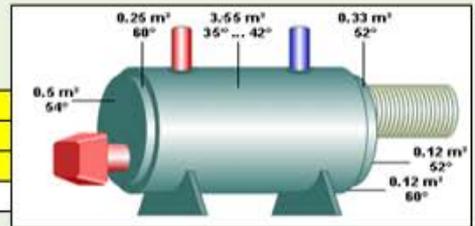
### Photographie représentant la structure de l'outil combustion

Outil de combustion			
<b>Propriétés du combustible</b>			
Nature du combustible	Fioul domestique		
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	840		
PCI (MJ/kg)	42,6		
PCS (MJ/kg)	45,2		
Pouvoir fumigène (m <sup>3</sup> fumées/m <sup>3</sup> combustible)	9912		
<b>Bilan des consommations</b>			
Combustible	Fioul domestique		
Consommation annuelle combustible (m <sup>3</sup> ou t)	3		
Consommation période été (01/04 au 31/10) (m <sup>3</sup> ou t)	0,5		
Consommation période hiver (01/11 au 31/03) (m <sup>3</sup> ou t)	2,5		
Facture annuelle de combustible (€)	2400		
Prix annuel moyen du combustible (€/m <sup>3</sup> ou t)	800,0		
PCI (KWh/(m <sup>3</sup> ou t))	9940,0		
PCS (KWh/(m <sup>3</sup> ou t))	10546,7		
Prix moyen du kWh (€/MWh)	80,5		
Consommation Energétique Annuelle (MWh)	29,8		
Consommation Energétique période été (MWh)	5,0		
Consommation Energétique période hiver (MWh)	24,9		
	Période été (01/04 au 31/10)	Période hiver (01/11 au 31/03)	Année
Temps de fonctionnement (h)	1000	3600	4600
Puissance moyenne consommée (kW)	5,0	6,9	6,5
Débit moyen de combustible (m <sup>3</sup> /h)	0,0005	0,0007	0,00065

Fumées de combustion		
	Si teneur en O <sub>2</sub> connue	Si excès d'air connu
Température annuelle moyenne extérieure (°C)	18	18
Température combustible entrée chaudière (°C)	25	25
Débit moyen de combustible (m <sup>3</sup> /h)	0,00065	0,0007
Pouvoir fumigène (m <sup>3</sup> fumées/m <sup>3</sup> combustible)	9912	9912
Température des fumées (°C)	200	200
Teneur en O <sub>2</sub> (%)	12,0	11,0
λ (-)	2,34	2,1
Excès d'air (-)	134%	110%
cp air (J/(kg.K))	1000	1000
Débit des fumées (m <sup>3</sup> /h)	15,1	13,6
Masse volumique des fumées (kg/m <sup>3</sup> )	0,7	0,7
Débit des fumées (kg/h)	11,3	10,1
Débit d'air (m <sup>3</sup> /h)	8,7	7,1
<b>Détermination du cp des fumées</b>		
Débit massique de combustible (kg/h)	0,55	0,55
Débit massique air (kg/h)	11	9
α	5%	6%
cp fumées (J/(kg.K))	1100	1120



Puissance contenue dans le combustible		
Puissance contenue dans le combustible (kW)	6,5	6,5
Pertes par les fumées		
Puissance perdue par les fumées (kW)	0,6	0,6
Pertes vers l'ambiance		
Surface extérieure chaudière (m <sup>2</sup> )	6	
Température moyenne de paroi de la chaudière (°C)	32	
Température ambiante de la chaufferie (°C)	25	
Pertes vers l'ambiance (kW)	0,504	
Puissance et rendement utile		
Puissance utile (kW)	5,35	5,40
Rendement utile (global) (-)	0,83	0,83
Rendement de combustion		
Rendement de combustion (-)	0,90	0,91



## Annexe 6 :

### Photographie représentant la structure de l'outil froid

Mesures	
Températures mesurées	
Température d'évaporation (°C)	3
Température de condensation (°C)	25
Température froide départ (°C)	12
Température froide retour (°C)	6
Température chaude départ (°C)	16
Température chaude retour (°C)	20
Pressions mesurées	
Pression aspiration compresseur (bar)	2
Pression refoulement compresseur (bar)	8
Taux de compression calculé (-)	4
Débits volumiques	
Débit volumique fluide froid (m <sup>3</sup> /h)	30000
Débit volumique fluide chaud (m <sup>3</sup> /h)	30000
Puissances électriques mesurées	
Compresseur (kW)	25
Ventilateur ou pompe "côté froid" (kW)	5
Ventilateur ou pompe "côté chaud" (kW)	5
Capacités calorifiques (J/(kg.°C))	
air (côté froid)	1004
air (côté chaud)	1004
Masses volumiques (kg/m <sup>3</sup> )	
air (côté froid)	1,29
air (côté chaud)	1,29
Puissance frigorifique calculée (kW)	64,8
Puissance récupérée au condenseur (kW)	43,2
COP froid de la machine (-)	2,6
COP froid global (-)	2,2
COP chaud de la machine (-)	1,7
COP chaud global (-)	1,4
COP machine à froid (-)	4,3
COP global (-)	3,1
<b>Facteurs de limitation du COP</b>	

L'outil ayant une taille importante seul la partie mesure est présentée ci-dessus avec en jaune les mesures à saisir, en blanc les paramètres s'affichant automatiquement à la suite de la saisie des mesures et en rouge un lien menant à un tableau répertoriant les différents facteurs limitant les performances d'une installation frigorifique.