



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

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.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Anthony DIZEK

Master Mécanique Energétique Procédés Produits : Option Mécanique des Fluides et Energie

Faculté des Sciences de Nancy-Université de Lorraine

**Calcul des échangeurs thermiques,
process pour passage de la vapeur
d'eau à l'eau chaude, et études sur
les économies d'énergie**



Usine de Golbey

Tuteur de l'entreprise : Serge BOUQUET

Stage du 18/02/13 au 16/08/13

Date de soutenance : 05/09/2013

SOMMAIRE

I.	Présentation de l'entreprise.....	4
1.	Le groupe Michelin.....	4
a)	Un groupe à dimension internationale.....	4
b)	Organisation mondiale du groupe Michelin.....	6
c)	Historique.....	7
2.	L'usine Michelin de Golbey.....	10
a)	Généralités.....	10
b)	Le processus de fabrication D'UGO (Usine de Golbey).....	11
II.	Présentation du projet.....	15
1.	Description de la mission.....	15
2.	Intérêt du projet pour UGO.....	15
a)	Situation avant le projet.....	16
b)	Cahier des charges.....	16
III.	Etude préliminaire du sujet.....	17
IV.	Dimensionnement des échangeurs : remplacement de la vapeur par l'eau chaude.....	23
1.	Objectif de la 1 ^{ière} mission.....	23
2.	Mise en place du programme de calcul.....	24
a)	Détermination du débit d'eau.....	25
b)	Bilan du programme de calcul et ses conclusions.....	28
V.	Economie d'énergie : calcul des pertes thermiques sur UGO.....	32
1.	Présentation de la problématique.....	32
2.	Mise en place du programme de calcul des pertes thermiques.....	33
a)	1 ^{ier} programme de calcul.....	36
b)	2 ^{ième} programme de calcul.....	41
c)	Bilan et conclusions du programme.....	43

Annexes.....	45
Annexe n°1.....	45
Annexe n°2.....	46
Annexe n°3.....	47
Annexe n°4.....	48
Annexe n°5.....	49
Annexe n°6.....	50
Annexe n°7.....	51
Annexe n°8.....	52
Annexe n°9.....	53
Annexe n°10.....	54
Annexe n°11.....	55
Annexe n°12.....	56
Annexe n°13.....	57
Annexe n°14.....	58

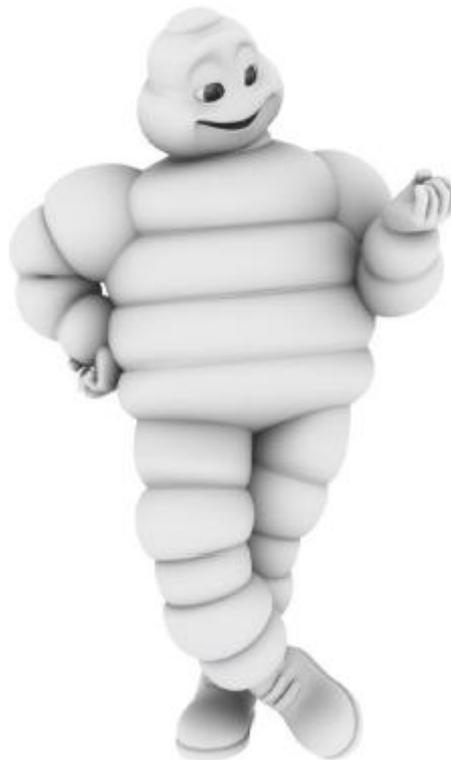
REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement mon maître de stage, M^f Serge BOUQUET, pour sa disponibilité, son accueil chaleureux et de m'avoir accepté, en tant que stagiaire au sein de l'usine **MICHELIN** de Golbey.

Je souhaite remercier M^f Christophe LEPLAT, de m'avoir encadré et aider dans la réalisation de mon projet. Il a toujours été présent pour m'aider, me guider dans mon travail et me donner de nombreux conseils. Il m'a permis de rencontrer les différentes personnes utiles pour ma recherche d'informations.

Je souhaite également remercier l'ensemble du bureau TEC, pour leurs réponses à mes questions, ainsi que leur soutien technique et de m'avoir accepté au sein de leur bureau d'étude.

Enfin je remercie l'ensemble du personnel MICHELIN pour leur accueil sympathique et leur coopération professionnelle tout au long de ces 6 mois.



Nomenclature

$\dot{Q}_{\text{Cédé}}$: Flux de chaleur cédé par la vapeur d'eau (W)

m_{vapeur} : Débit massique de la vapeur d'eau ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)

$L_{V_{\text{saturation}}}$: Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 105°C ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)

$Q_{V_{\text{EC}}}$: Débit volumique d'eau chaude du procédé ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)

ρ_{EC} : Masse volumique de l'eau ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

$C_{p_{\text{EC}}}$: Chaleur massique spécifique de l'eau ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

ΔT_{EC} : Différence de température de l'eau entre l'entrée et la sortie de l'échangeur (K)

$Q_{V_{\text{EC}}}'$: Débit volumique d'eau qui remplace la vapeur ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)

ρ_{air} : Masse volumique de l'air ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

g : Constante gravitationnelle ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)

β_{air} : (K^{-1})

D_{ext} : Diamètre extérieur de la canalisation (m)

ΔT : Différence de température entre la paroi et l'air = $T_{\text{paroi}} - T_{\text{air}}$ (K)

μ_{air} : Viscosité dynamique de l'air (Pa.s)

h_{air} : Coefficient global d'échange de l'air ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

U_m : Vitesse instantanée de l'eau ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

m_{eau} : Débit massique de l'eau ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)

d_{int} : Diamètre intérieur de la canalisation (m)

h_{eau} : Coefficient global d'échange de l'eau ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

L : Longueur de la canalisation (m)

λ_{acier} : Conductivité thermique de l'acier ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

$N_{\text{fonctionnement}}$: Nombre de jour de fonctionnement du procédé (jour)

T_{film} : Température moyenne entre l'entrée et la sortie de l'échangeur (K)

Introduction

Etudiant en Master en Mécanique Energétique Procédés Produits (MEPP), option Mécanique des fluides et Energie (MFE), j'ai eu la chance de pouvoir effectuer mon stage de fin d'année au sein de l'entreprise Michelin à Golbey.

L'enjeu de ce stage est donc de découvrir un nouvel univers professionnel dans le but de mettre en application mes compétences acquises ainsi que de pouvoir élargir celles-ci en créant un outil utile à l'entreprise. Au cours de cette expérience, chez le leader du marché mondial du pneumatique, j'ai eu en charge deux missions.

- 1^{ière} mission :

L'usine utilise de la vapeur d'eau, produite par des chaudières datant de la création de l'usine, c'est-à-dire depuis 1969, pour chauffer l'eau chaude. Ce transfert de chaleur se réalise grâce à des échangeurs. L'usine souhaite remplacer cette vapeur d'eau par l'eau chaude importé d'une autre usine. L'objectif de cette 1^{ière} mission est de savoir les quantités d'eau à apporter pour remplacer la vapeur d'eau et le coût financier de ce remplacement.

- 2^{ième} mission :

L'usine Michelin souhaite faire des économies d'énergie au sein d'UGO (Usine de Golbey) que ce soit d'un point de vue électrique que d'un point de vue thermique. Donc cette 2^{ième} mission consiste à observer dans l'usine, tous les endroits où il subsiste des pertes thermiques. Ma mission va être centralisée sur l'atelier RT.

Dans la première partie de ce rapport, je présenterais l'entreprise qui m'a accueilli : *Michelin*, puis dans un second temps, la méthode de travail et les objectifs atteints pour chaque sujet et enfin, pour terminer, je conclurais sur l'évolution future possible de ces projets.

I. Présentation de l'entreprise

1. Le groupe Michelin

a) Un groupe à dimension internationale

C'est en **1889** que les frères André et Edouard Michelin créèrent la société « Michelin & Cie ». L'entreprise est construite dans un premier temps sur un site de 12 hectares (place des Carnes à Clermont-Ferrand) et ne comptait à l'époque que 52 personnes. Elle est aujourd'hui devenue une multinationale, mondialement connue dans le domaine des pneumatiques.

En inventant les premiers pneus démontables et en pariant sur la vulgarisation du caoutchouc dans le pneumatique, les deux frères ont révolutionné ce secteur d'activité à force de persévérance et d'innovations régulières de leurs produits jusqu'à devenir aujourd'hui le numéro un mondial du pneumatique avec **20%** des parts du marché.

MICHELIN est à l'heure actuelle, un groupe international implanté dans le monde entier avec **73 sites de production** répartis dans 18 pays sur les 5 continents (*Figure 1*). Ses usines emploient **130 000 personnes (en équivalent temps plein) en 2011**.

Afin de rester dans une optique et politique de compétitivité et d'innovation, la société Michelin s'appuie sur ses **3 centres de Technologie** présents sur 3 continents (Europe, Amérique du Nord et Asie). En plus de la recherche, ceux-ci fournissent :

- des éléments de base (matériaux, architecture, sculpture, procédés)
- des modèles d'association de ces éléments pour développer des nouveaux pneumatiques

Parmi ses points forts, le groupe possède également ou est actionnaire de **plusieurs plantations d'hévéas** (laquelle est une espèce originaire de la forêt tropicale le long de l'atlantique produisant le latex qui deviendra le caoutchouc naturel) au Brésil et en Afrique pour une superficie totale de **59000 hectares**, ce qui lui assure **12% de ses besoins en caoutchouc naturel**.

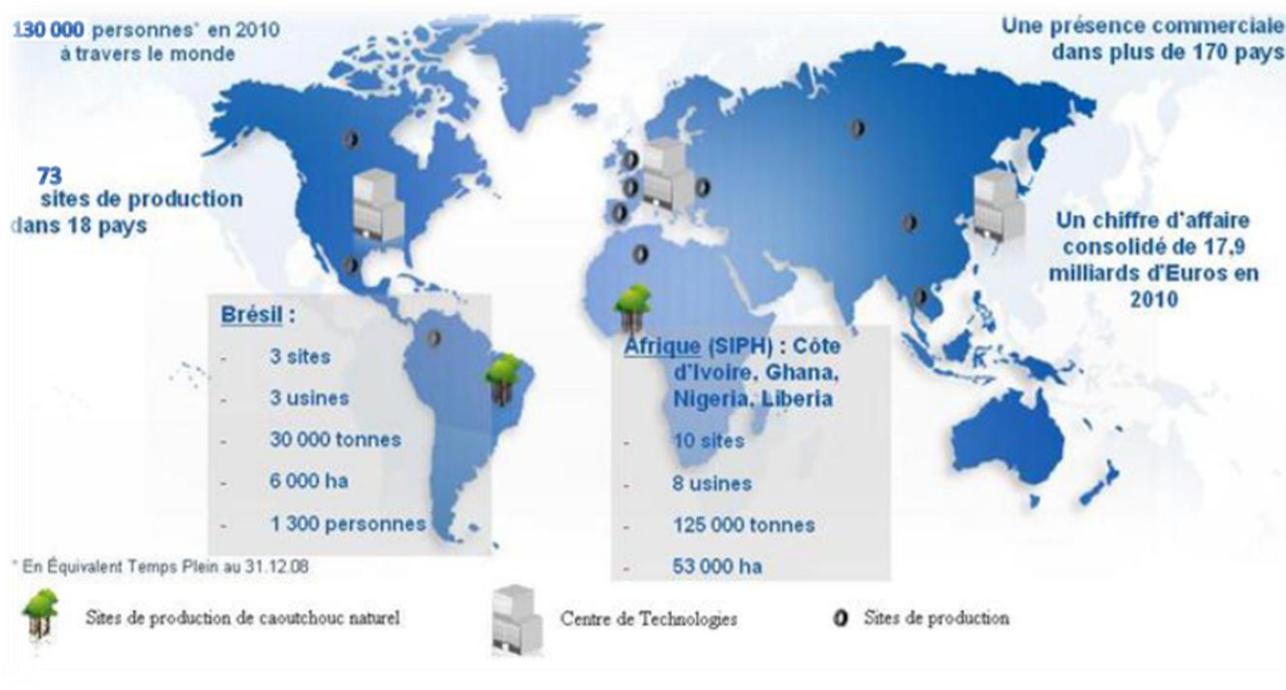


Figure n°1 : Implantation mondiale du groupe Michelin

En 2011, le groupe a produit près de **176 millions de pneumatiques**, commercialisés dans plus de 170 pays pour un **chiffre d'affaire de 17.9 milliards** d'euros. Michelin a par ailleurs vendu 10 millions de guides et cartes routières et 875 millions d'itinéraires ont été calculés grâce au site Via Michelin. La production journalière du groupe s'élève à :

- 844 000 pneumatiques
- 61 000 chambres à air
- 96 000 roues
- plus de 4 millions de kilomètres de câbles
- 30 000 cartes routières et guides Michelin

Le marché du remplacement du pneu représente **70% des ventes** en volume (poids lourd, tourisme). Les 30% restants correspondent à la première monte, chez les constructeurs de véhicules.

Le groupe Michelin, grâce notamment à sa stratégie multimarques, parvient à être présent sur tous les segments du marché et à y être classé **numéro 1 en 2011**. (Figure 2)



Figure n°2 : Les marques du groupe Michelin

b) Organisation mondiale du groupe Michelin

Afin d’appréhender ses marchés avec précision et élaborer la meilleure stratégie pour satisfaire et anticiper les besoins, Michelin s’est doté d’une organisation en « **Ligne Produit** ». La mission des Lignes Produits (LP) est de développer et de valoriser l’activité mondiale des sociétés du groupe Michelin pour leur famille de produits. Chacune d’entre elle définit la stratégie et coordonne toutes les activités du marketing, développement, fabrication, vente concernant ses produits.

Les 9 « **Lignes Produits** » sont réparties de la manière suivante :



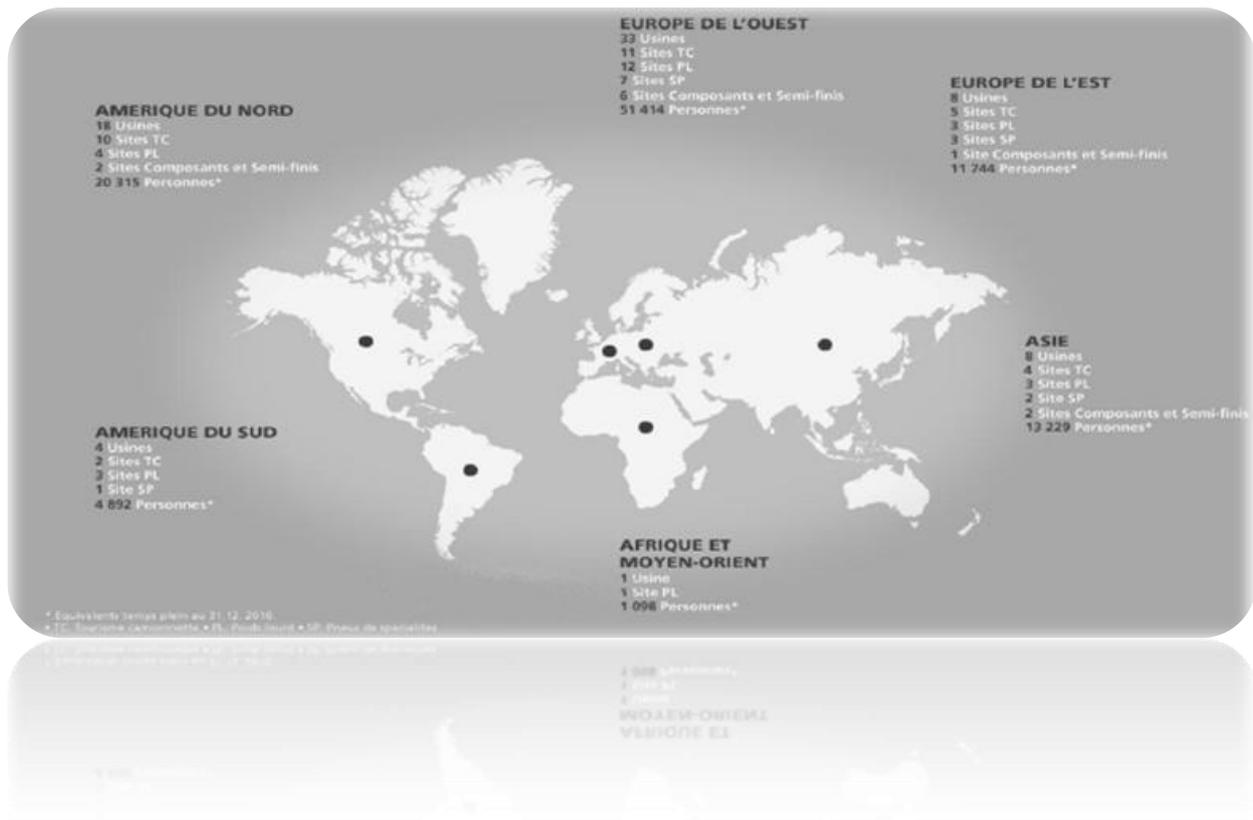


Figure n°3 : Implantation mondiale des différentes lignes de produits

c) Historique

- ❖ 1889 : Création de « Michelin et Cie » à Clermont-Ferrand
- ❖ 1891 : Michelin invente le pneu de vélo démontable
- ❖ 1895 : Michelin fait rouler la première automobile sur pneumatiques
- ❖ 1898 : Naissance de Bibendum qui représentera la firme et ses produits



Michelin, une entreprise tournée vers la mobilité, pour aider les voyageurs à se déplacer :

- ❖ **1900** : Le guide Michelin est lancé
- ❖ **1908** : Offrant un service gratuit, le " **Bureau de Renseignements pour Voyages automobiles** ", futur " **Bureau d'Itinéraire Michelin** ", fournit gratuitement les meilleurs itinéraires à suivre pour un parcours demandé
- ❖ **1910** : Edition de la première carte routière Michelin au 1/200 000ème, conçue comme un véritable outil d'aide au déplacement
- ❖ **1931** : Des panneaux et des bornes d'angles en lave émaillée, mis au point par Michelin, jalonnent les routes de France
- ❖ **1937** : Le caoutchouc se mêle à l'acier. Michelin dépose un brevet pour le **Métalic**, premier pneu à carcasse d'acier : destiné aux poids lourds, il résiste mieux à l'échauffement et aux fortes charges

Michelin dans les airs :

- ❖ **1908** : Le groupe encourage l'aviation par des récompenses
- ❖ **1914** : Michelin soutient l'effort de guerre en construisant des avions : 1884 Breguet Michelin sortent des usines clermontoises en 3 ans



Michelin sur les rails :

- ❖ **1931** : Un autorail sur pneus : **la Micheline**. Des panneaux et des bornes mis au point par MICHELIN jalonnent les routes de France
- ❖ **1951** : Le métro parisien, premier au monde, roule en pneu Michelin



La recherche, moteur de l'expansion :

- ❖ **1946** : la révolution du radial, Michelin change le standard des pneumatiques en proposant une solution d'avant garde : le pneumatique à **carcasse radiale** (« la cage à mouche »)



Résultats : une amélioration considérable de la tenue de route et du confort, et une durée de vie beaucoup plus longue.

La recherche permet d'adapter cette technologie aux différents types de pneumatiques: le poids lourds (en **1952**), le génie civil (en **1959**), le métro (en **1973**), la Formule 1 (en **1977**), l'avion (en **1981**) et la moto (en **1984**).

Pour répondre à la demande croissante en pneus radiaux, Michelin développe ses réseaux commerciaux à travers le monde et réalise des investissements industriels considérables : plus de **40 usines** seront construites entre les années 50 et les années 80 en Europe, mais aussi en Asie, en Amérique du Nord, en Afrique et en Asie.

- ❖ **1965** : Premier pneu asymétrique destiné aux voitures rapides : le **Michelin XAS**
- ❖ **1981** : Lancement du pneu radial pour avion
- ❖ **1992** : Invention du premier pneu « vert » le **Green X**, dans l'optique d'économiser du carburant
- ❖ **2009** : Pneu **Energy Saver** : ce dernier allie une fabrication moins gourmande et une moindre résistance au roulement pour économiser du carburant



Recherche et innovation : confronter les théories aux faits:

- ❖ **1965** : Un premier **Centre de Recherche et d'Essai** ouvre ses portes au Nord de Clermont-Ferrand à Ladoux. Quelques années plus tard, en 1977, les Centres de Laurens en Caroline du Sud et d'Almeria en Espagne sont créés
- ❖ **1987** : Michelin s'équipe d'un supercalculateur **Cray**, permettant un gain de 5 à 6 mois dans la mise au point des pneus

2. L'usine Michelin de Golbey

a) Généralités

Créé en **1969**, le site Michelin de Golbey s'étend sur près de **153 000 m² dont 47 500 m² couverts**. Il est situé dans le département des Vosges (88), au nord de la ville d'Épinal sur la zone industrielle n°2 à Golbey, ce qui lui permet grâce à cette implantation au cœur de l'Europe d'en faire un fournisseur privilégié des autres usines du groupe.



C'est l'un des 13 sites dans le monde faisant partie de la **Ligne Métier Renfort Métalliques (MAT-RM)**. Il fabrique du fil (**30 000 tonnes par an**), des tringles (**3500 tonnes par an**) et des assemblages métalliques (**40 000 tonnes par an**) pour les pneus de tourisme, de camionnettes, de poids lourds et de génie civil. L'usine est certifiée ISO 14001 depuis 2004.

L'usine emploie **500 personnes** par équipes de 8 heures pour une production totale de plus de **67 000 tonnes** de produits semi-finis ou finis en 2012. On y dénombre près de **1800 machines** réparties sur 13 ilots de fabrications séparés en 2 ateliers : **RTOX** (Atelier de décalaminage mécanique, tréfilage à sec, traitement thermique et fabrication de tringles) et **RCD** (Atelier de tréfilage humide et d'assemblage).

b) Le processus de fabrication d'UGO (Usine de Golbey)

Depuis l'origine du pneumatique, l'acier fait partie des produits entrant dans sa confection, mais son emploi est alors limité aux tringles (élément de maintien du pneu sur la roue). Et il a fallu attendre jusqu'en 1936 avant de voir l'acier s'étendre dans l'armature du pneu. Désormais ce matériau substituera les câbles textiles. Et c'est fort de cette évolution que l'usine de Golbey a vu le jour en 1969. A cet effet, l'usine de Golbey est une tréfilerie. Elle fabrique des constituants d'acier (câbles assemblés et tringles tressés) entrant dans la structure interne du pneumatique. Aussi, une partie de la production sort en produit semi-fini (acier laitonné) et est envoyée vers d'autres sites pour une autre utilisation.

PHASE 1 : Décalaminage mécanique :



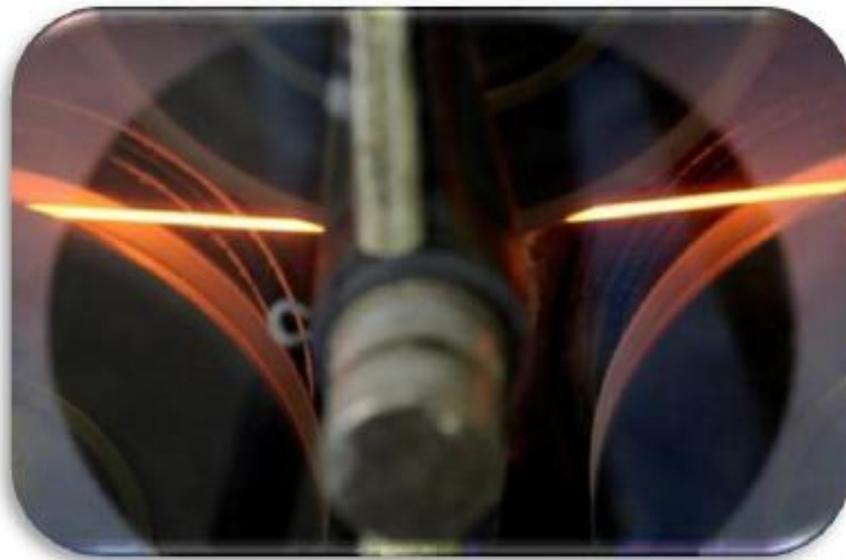
Dans un premier temps le fil machine de **5,5 mm** subit un **décalaminage mécanique** qui va enlever l'oxyde de fer du fil. Cela va permettre de pouvoir travailler le fil par la suite.

PHASE 2 : Tréfilage à sec (diminution du diamètre) :



A partir de cette opération de tréfilage à sec, le fil va servir, soit pour la création de tringles soit pour la fabrication de câbles.

PHASE 3 : Le traitement thermique :



Pour la fabrication de tringles, le fil ne subira qu'un traitement zingage. Pour la fabrication des câbles, le processus est plus long. Après le tréfilage à sec, on fait subir au fil un traitement thermique afin qu'il ne casse pas lors des prochaines manipulations.

PHASE 4 : Laitonnage :



Ensuite, par hydrolyse de cuivre et de zinc, un alliage de laiton va se former autour du fil le protégeant de la corrosion.

PHASE 5 : Tréfilage humide :



Un deuxième tréfilage, cette fois-ci humide, va encore réduire son diamètre. Le fil va alors être assemblé de différentes façons (**phase 6**) selon le type de pneu dans lequel il va être utilisé. On aura alors un câble avec les propriétés voulues assurant la résistance mécanique du pneu.

PHASE 6 : Assemblage :



Les différentes étapes de transformations du fil vont être résumées sur le graphique suivant :

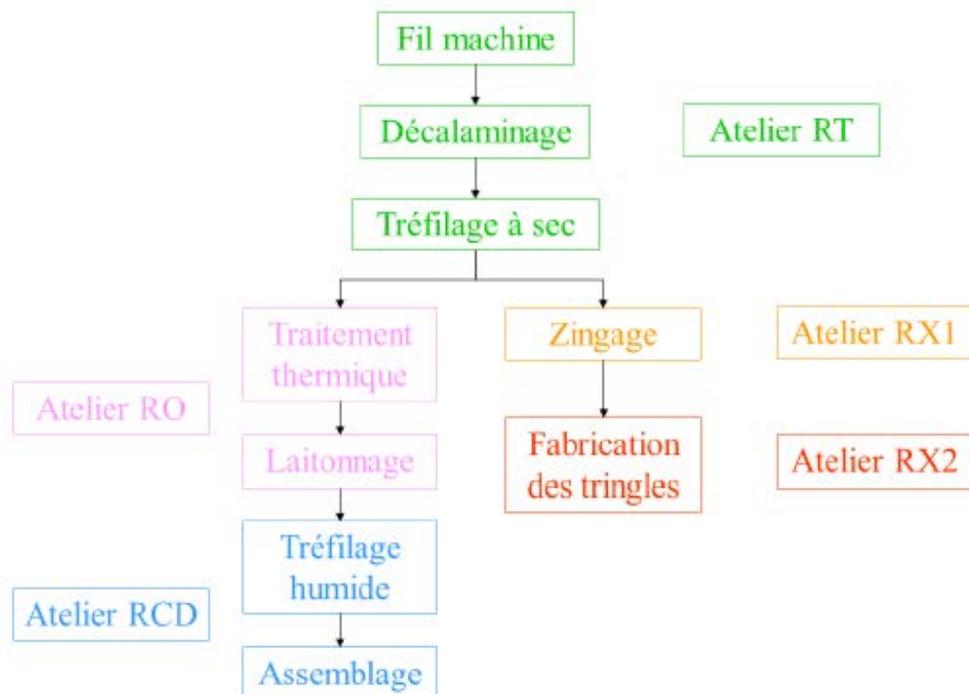


Figure n°4 : Résumé des différentes étapes de fabrication

II. Présentation du projet

1. Description de la mission

Ma mission au sein de l'usine Michelin de Golbey, porte sur les économies d'énergie. Plus précisément, il s'agit de remplacer la vapeur d'eau qui permet de chauffer l'eau chaude par l'eau chaude et de quantifier le coût des pertes thermiques au sein d'UGO. En effet, l'entreprise souhaite faire des économies que ce soit d'un point de vue énergétique mais aussi d'un point de vue financier, pour palier l'inflation du coût de l'énergie.

Ces questions d'économies d'énergies sont l'objet d'une attention particulière nouvelle. Dans cette optique, le groupe Michelin a déployé sur chaque site une ou plusieurs personnes en charge de ces questions. Dans cette démarche, sur le site de Golbey, **M^r Christophe Leplat**, est *Animateur Performance Energie Site*. Son action porte sur l'ensemble des énergies de l'usine de Golbey. Le but étant de viser à faire des économies sur la facture énergétique du site, à identifier les sources de gaspillages, tout en conservant ou en améliorant si cela est possible les conditions de travail.

2. Intérêt du projet pour UGO

L'usine UGO consomme 7 600 000 €.an⁻¹ d'énergie, ce qui représente environ 100 878 000 kWh.an⁻¹ soit la consommation d'une ville de 40 000 habitants. Cette énergie est présente sous 3 formes différentes :

- Electricité
- Gaz (sous forme de vapeur d'eau)
- Autres

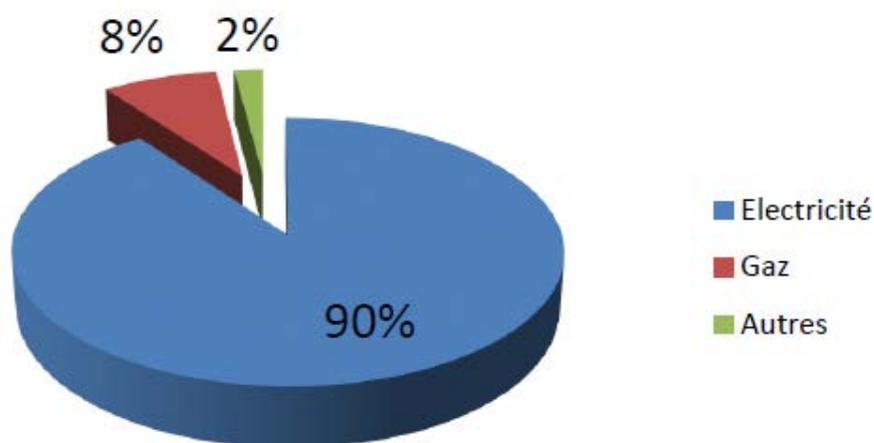


Figure n°5 : Répartition des consommations d'énergie sur UGO

L'industrie en tant que secteur d'activité fait partie des grands consommateurs d'énergies au sens large et qui plus est en termes d'électricité. L'usine Michelin de Golbey ne déroge pas à la règle. En outre, la situation n'est pas figée et le groupe Michelin impulse une action globale groupe en vue de maîtriser ces consommations. Dans ce cadre, et comme cité plus haut, sur chaque site est mis en place un *Animateur Performance Energie Site*. Ce dernier, en lien avec l'ensemble des acteurs d'UGO va œuvrer à la réduction et la maîtrise des coûts de consommations énergies.

a) Situation avant le projet

La mission proposée s'inscrit dans une démarche groupe de Michelin, et a pour but de participer à la stratégie de performance de l'usine. Cette démarche est la **Michelin Manufacturing Way (MMW)**, dont l'objectif principal est de renforcer rapidement la performance opérationnelle de ses usines, notamment en partageant ses bonnes pratiques industrielles et en responsabilisant au maximum ses équipes.

Lancée en février 2004 par Edouard Michelin, cette démarche s'appuie sur une idée simple, à savoir se focaliser sur les bonnes pratiques réellement appliquées. Il y a toujours en interne des exemples concrets de réussite dans un domaine industriel. La démarche MMW permet de les identifier et met ensuite en relation les usines du groupe pour qu'elles partagent entre elles et imitent ces bonnes pratiques.

MMW intègre ainsi plusieurs démarches de développement au sein des usines avec notamment le **Management au Quotidien de la Performance (MQP)** et les **Organisations Responsabilisantes (OR)** qui sont aujourd'hui une priorité pour les sites industriels. Au fur et à mesure de nouveaux outils MMW ont fait leur apparition : Bib Standard, Bib Boost, Bib Flex, Bib Innovation, Bib Ramp-up, Bib Solv, Bib Sigma,...

La mission elle fait partie du Bib Energie, et fait suite à une démarche sur les économies d'énergies

b) Cahier des charges

La mission donnée par mon maître de stage comporte deux volets. Tous deux vont dans le sens de la performance de l'usine. Elles visent à améliorer et à maîtriser la consommation énergétique sur le site UGO.

Sur les pertes thermiques, le travail consiste à trouver puis à quantifier les déperditions de chaleur. Quand on parle de déperditions de chaleur, je fais référence aux tuyaux non calorifugés, aux endroits où on peut réduire la consommation d'énergie de l'usine. De plus, je dois apporter des améliorations pour diminuer les déperditions de chaleur là où elle se situe.

Enfin, pour le remplacement de la vapeur d'eau par l'eau chaude, l'étude consiste à déterminer le débit d'eau en remplacement de la vapeur, puis le gain économique.

III. Etude préliminaire du sujet

En tout premier lieux, il est très important de se familiariser avec l'environnement dans lequel je vais conduire ma mission. Pour cela, je vais vous présenter les échangeurs sur lesquels j'ai accompli ma mission.

- Echangeur Eau chaude DMB :

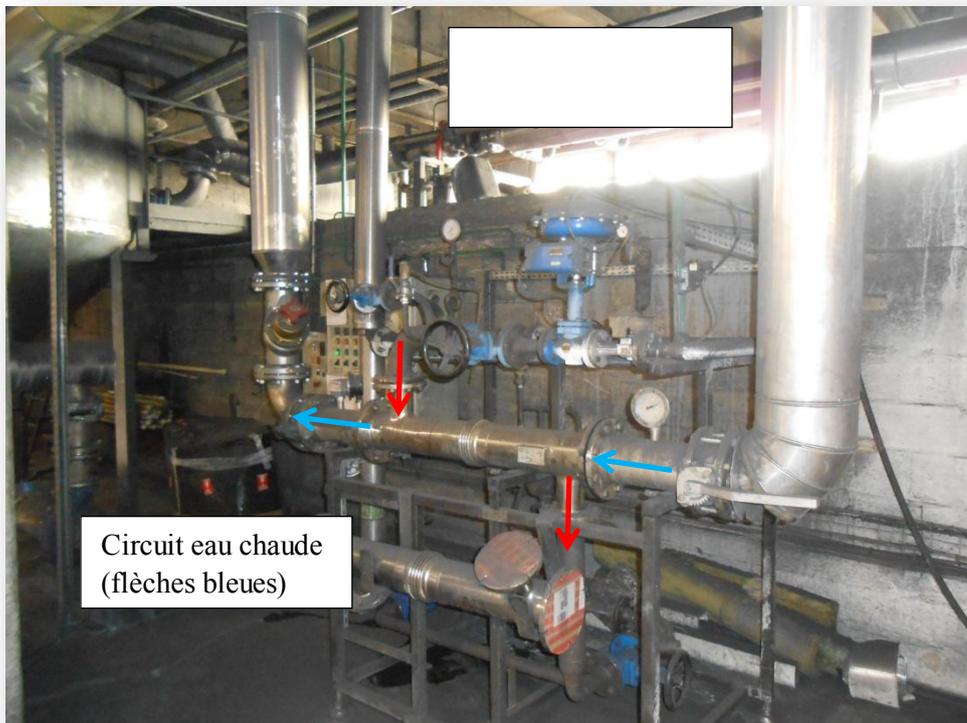


Figure n°6 : Echangeur DMB

Le rôle de l'échangeur DMB est de fournir de l'eau à 94°C, pour chauffer et laver le fil, pour éliminer la calamine résiduel, avant son entrée dans le bain de Borax. La vapeur d'eau doit fournir de l'énergie pour chauffer l'eau chaude pour respecter la température de consigne de 94°C.

L'échangeur DMB est le poste qui utilise le plus de vapeur. Par conséquent, certaines missions vont être menées pour réduire les pertes d'énergie pour faire des économies à l'usine.

➤ Eau chaude Bain Borax :

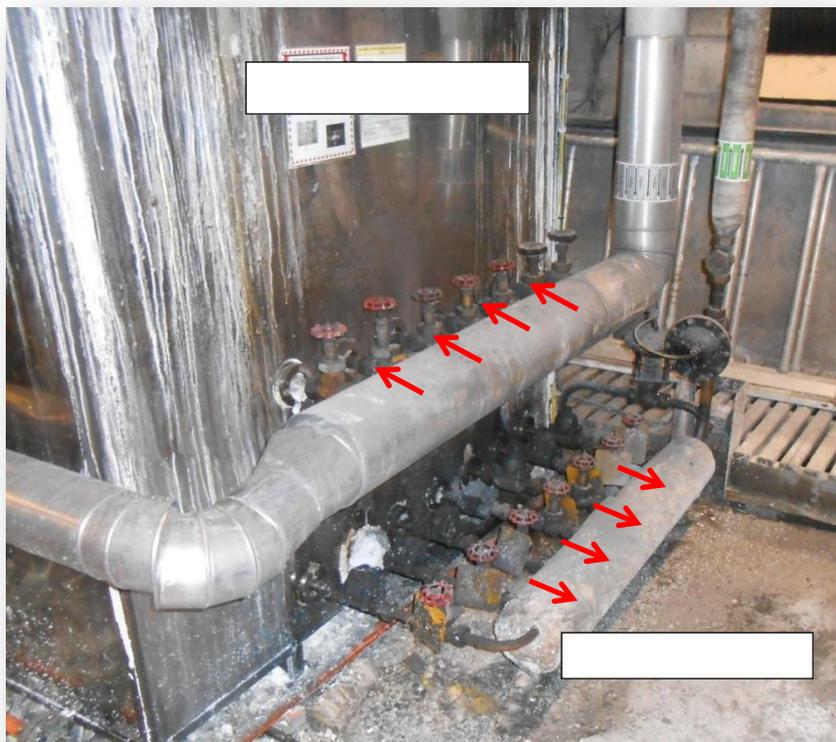


Figure n°7: Epingle Bain Borax



Figure n°8 : Bain Borax

Après avoir chauffé le fil en sortie de DMB, il passe dans le bain Borax. Un coulant de Borax va se déposer sur le fil et il va simplifier le tréfilage sec, après avoir été cristallisé.

Il y a une température de consigne à respecter ($T_{\text{entrée Bain Borax}} = 90^{\circ}\text{C}$) sinon le Borax va se cristalliser et par conséquent, il ne va pas s'accrocher sur le fil et donc il ne joue pas son rôle de coulant.

- Eau chaude machine à laver $7\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ et $25\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$:

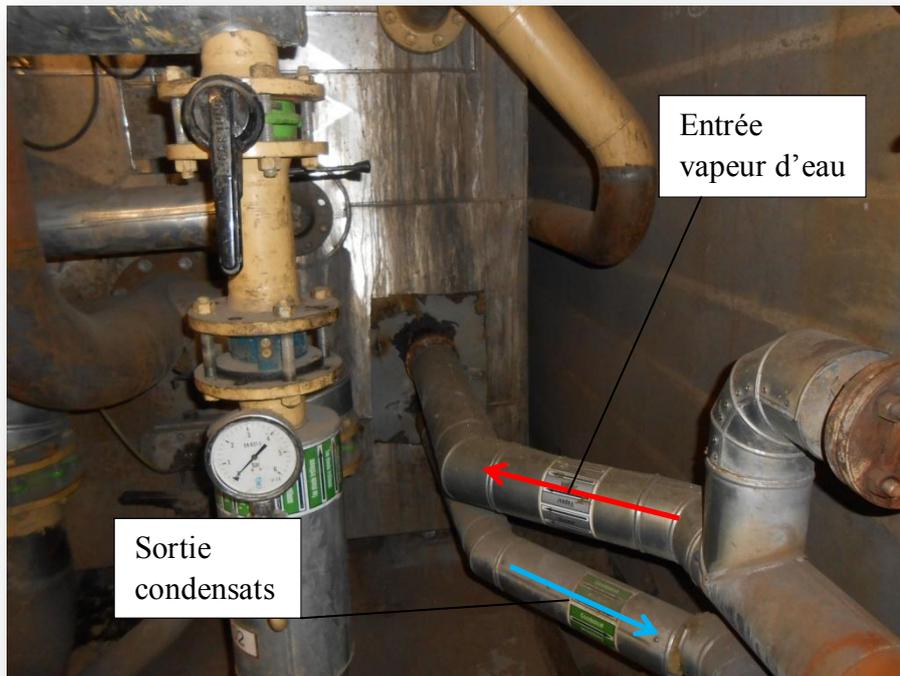


Figure n°9 : Epingle Machine à Laver $25\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$

Le diamètre du fil est réduit par passage dans les machines RT. Le rôle des machines à laver est de nettoyer le fil en sortie de machine. L'eau chaude retire le savon qui a permis de faciliter la réduction du diamètre.

➤ Echangeur Eau chaude Sce R :

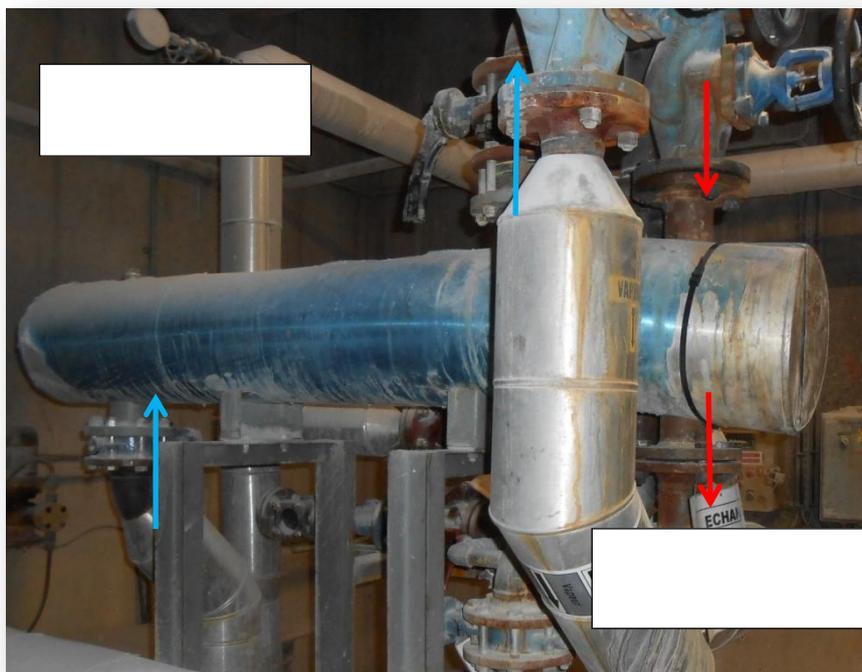


Figure n°10 : Echangeur EC Sce R

Cet échangeur fournit de l'eau chaude à une température de 75°C. Elle a pour but de nettoyer le fil et enlever les différents acides qui permettent de réduire le diamètre du fil.

➤ Echangeur Eau chaude M48 TZ

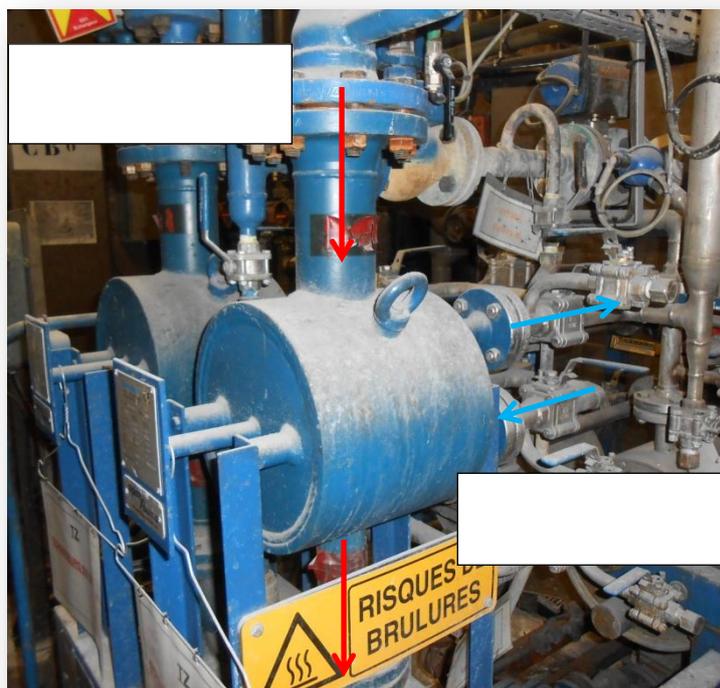


Figure n°11 : Echangeur EC M48 TZ

Le rôle de l'échangeur TZ est de fournir de l'eau chaude à une température de 76°C qui alimente 3 bacs. L'eau permet le lavage et la montée en température du fil en sortie de procédé RT.

➤ Echangeur chauffage atelier et bâtiment 11



Echangeur
chauffage atelier



IV. Dimensionnement des échangeurs : remplacement de la vapeur d'eau par l'eau chaude

1. Objectif de la 1^{ière} mission

L'objectif est de remplacer la vapeur d'eau qui permet de chauffer l'eau chaude par de l'eau chaude. En effet, l'entreprise souhaite faire des économies d'un point de vue financier. De plus, l'utilisation de chaudières à vapeur est révolue, de nos jours, on utilise de l'eau chaude industrielle.

Tout d'abord, la vapeur d'eau est produite à partir de deux grosses chaudières, datant de la création de l'usine UGO, c'est-à-dire depuis 1969. Les deux chaudières alimentent le chauffage collectif de toute l'usine mais aussi des différents échangeurs de chaleur qui permettent le chauffage de l'eau chaude. L'entreprise veut remplacer cette vapeur d'eau par l'eau chaude de deux moyens différents :

- Soit remplacer les chaudières à vapeur d'eau par des chaudières à eau chaude
- Soit acheter l'eau chaude à un groupe industriel qui leur revendrait

Bien entendu, l'option la moins coûteuse et la plus économe en énergie sera privilégiée.

De plus, l'entreprise souhaite garder les mêmes machines de travail, c'est-à-dire, conserver les dimensions actuelles des échangeurs. Donc, mon objectif sera de mener une étude d'optimisation sur les différents échangeurs tout en conservant leurs dimensions actuelles. Il y a aussi un aspect économique à rechercher car l'opération ne doit pas être trop onéreuse.

Pour m'appuyer dans ma démarche, une étude d'opportunité a été réalisée. Cette étude estime les coûts pour soit une rénovation des chaudières existantes, soit les remplacer par des chaudières neuves (toujours à vapeur), ou soit par des chaudières eau chaude. Le coût moyen de chaque procédé est estimé à plus de **450 000 €**.

La première étude est de mener une recherche sur les différents débits et température mis en jeu dans les différents échangeurs de chaleur. En effet, j'ai pu calculer les différents flux thermiques échangés entre la vapeur d'eau et l'eau chaude.

Dans une démarche d'économie d'énergie, il est important de connaître les coûts. Pour ce faire, j'ai créé un programme de calcul, lequel permet de connaître le coût annuel en vapeur d'eau de l'usine. Le but de ce programme est de savoir dans un premier temps, le débit d'eau chaude nécessaire pour remplacer le débit de vapeur et dans un second temps, le coût estimé à l'année de cet apport en eau et voir si l'usine va faire des économies.

2. Mise en place du programme de calcul

Explication d'une page de calcul du programme pour l'eau chaude Bain Borax

Vapeur	
Te (°C)	105
Lv (kJ/kg)	2243,4
Qm (kg/h)	23,00
eau process	
Te (°C)	86,85
Ts (°C)	90
Cp moyen (J/kg.K)	4180
Qv (m3/h)	4
ρ (kg/m ³)	980
eau de chauffage qui remplace la vapeur	
Te (°C)	105
Ts (°C)	75
Cp moyen (J/kg.K)	4180
Qv (m3/h)	0,45
ρ (kg/m ³)	965
valeur variable	

Φ cédé (W)	14333	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ cédé sup (W)	15049
Φ reçu (W)	14333	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ reçu sup (W)	15049

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \Phi \text{ cédé} = \Phi \text{ reçu} \\ &\Rightarrow \Phi \text{ cédé} = Q_v \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) \\ &\Rightarrow T_e = T_s - \Phi \text{ cédé} / (Q_v \cdot \rho \cdot C_p) \quad \mathbf{86,85} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \Phi \text{ cédé} = \Phi \text{ reçu} \\ &\Rightarrow \Phi \text{ cédé} = Q_v \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) \\ &\Rightarrow Q_v = \Phi \text{ cédé} / (C_p \cdot \rho \cdot (T_e - T_s)) \quad \mathbf{0,45} \end{aligned}$$

Cette page de mon programme montre un moyen de calculer le débit nécessaire pour remplacer la vapeur et ainsi apporter les calories nécessaire pour chauffer l'eau du procédé. La suite de ma démarche va vous présenter les différentes étapes de calcul pour arriver à ce débit d'eau ($Q_{v\text{eau}} = 0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

a) Détermination du débit d'eau

L'objectif de cette première partie est de déterminer le débit d'eau chaude qui va remplacer la vapeur d'eau. Pour commencer, j'ai calculé le flux apporté par la vapeur d'eau saturante :

$$\Phi_{\text{cédé}} = \dot{m}_{\text{vapeur}} * Lv_{\text{saturation}}$$

Avec : $\Phi_{\text{cédé}}$ en W

\dot{m}_{vapeur} en kg.h⁻¹

$Lv_{\text{saturation}}$ en kJ.kg⁻¹

$$\Rightarrow AN : \Phi_{\text{cédé}} = \frac{23 * 2243.4 * 1000}{3600}$$

$$\Phi_{\text{cédé}} = 14332 \text{ W}$$

Température d'entrée de la vapeur saturante

Vapeur	
Te (°C)	105
Lv (kJ/kg)	2243,4
Qm (kg/h)	23,00

Débit de vapeur varie au cour du temps

$\Phi_{\text{cédé}}$ (W)	14333
$\Phi_{\text{reçu}}$ (W)	14333

La valeur de la chaleur latente de vaporisation de l'eau (2243.4 kJ.kg⁻¹) a été récupérée dans une table de donnée.

La vapeur d'eau apporte 14,33 kW pour chauffer l'eau chaude. A partir de cette valeur, on peut déterminer la température d'entrée de l'eau et ainsi confirmer la valeur théorique de cette température qui est de 87°C.

eau process	
Te (°C)	86,85
Ts (°C)	90
Cp moyen (J/kg.K)	4180
Qv (m3/h)	4
ρ (kg/m³)	980

Masse volumique
d'eau à T_{film}

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{cédé}} &= \Phi_{\text{reçu}} \\ \Phi_{\text{cédé}} &= Qv * \rho * Cp * (Ts - Te) \\ Te &= Ts - \Phi_{\text{cédé}} / (Qv * \rho * Cp) \end{aligned}$$

$$\Phi_{\text{cédé}} = \Phi_{\text{reçu}}$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{vapeur}} * Lv_{\text{saturation}} = Qv_{EC} * \rho_{EC} * Cp_{EC} * \Delta T_{EC}$$

Avec : Qv_{EC} en $m^3 \cdot h^{-1}$

ρ_{EC} en $kg \cdot m^{-3}$

Cp_{EC} en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

$\Delta T_{EC} = T_{\text{sortie}} - T_{\text{entrée}}$ en °C

$$\Rightarrow \Delta T_{EC} = T_{\text{sortie}} - T_{\text{entrée}} = \frac{\dot{m}_{\text{vapeur}} * Lv_{\text{saturation}}}{Qv_{EC} * \rho_{EC} * Cp_{EC}}$$

$$\Rightarrow T_{\text{entrée}} = T_{\text{sortie}} - \frac{\dot{m}_{\text{vapeur}} * Lv_{\text{saturation}}}{Qv_{EC} * \rho_{EC} * Cp_{EC}}$$

$$AN : T_{\text{entrée}} = 90 - \frac{23 * 2243.3 * 1000}{4 * 980 * 4180}$$

$$\Leftrightarrow T_{\text{entrée}} = 86.85^{\circ}C$$

On trouve donc une valeur de 86.85°C pour la température d'entrée du Bain Borax. Or, la température théorique est de 87°C. On peut donc valider la valeur du flux cédé par la vapeur pour chauffer l'eau.

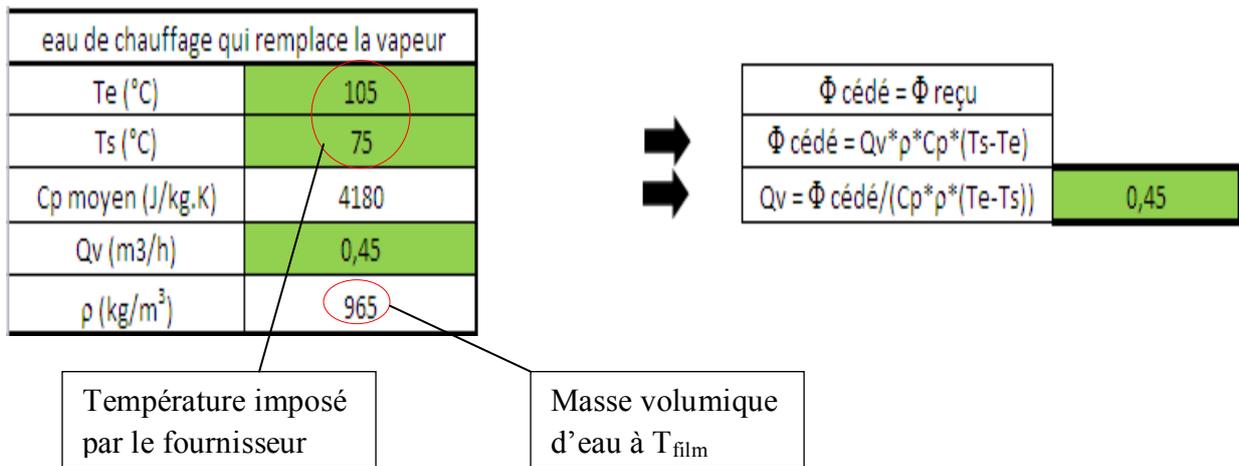
A partir de la valeur du flux cédé par la vapeur, j'ai calculé une nouvelle valeur du flux avec un indice de confiance de 5%, c'est-à-dire :

$$\Phi_{cédésup} = \Phi_{cédé} * 1.05$$

$$AN : \Phi_{cédécup} = 14332 * 1.05$$

$$\Leftrightarrow \Phi_{cédésup} = 15050 \text{ W}$$

Cette valeur va me servir pour calculer le débit d'eau qui remplacera la vapeur pour chauffer l'eau chaude Bain Borax.



$$\Phi_{cédésup} = \Phi_{reçu}$$

$$\Leftrightarrow \Phi_{cédévap} = Qv'_{EC} * Cp_{EC} * \rho_{EC} * \Delta T_{EC}$$

Avec : Qv'_{EC} en $m^3 \cdot h^{-1}$

ρ_{EC} en $kg \cdot m^{-3}$

Cp_{EC} en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

$\Delta T_{EC} = T_{sortie} - T_{entrée}$ en °C et est imposé par l'usine qui fournit l'eau

$$\Rightarrow Qv'_{EC} = \frac{\Phi_{cédésup}}{\rho_{EC} * Cp_{EC} * \Delta T_{EC}}$$

$$AN : Qv'_{EC} = \frac{15049 * 3600}{965 * 4180 * (105 - 75)}$$

$$\Leftrightarrow Qv'_{EC} = 0.45 m^3 . h^{-1}$$

Ce programme de calcul a été réalisé pour tous les procédés qui utilisent de la vapeur (**CF annexe n°1 à 8**).

Pour déterminer cette valeur de débit, on a du faire l'hypothèse sur les températures d'entrée et de sortie de l'eau chaude. De plus, la valeur de la masse volumique de l'eau est fonction de ces deux températures.

b) Bilan du programme de calcul et ses conclusions

Après avoir calculé tous les débits d'eau, j'ai réalisé un bilan sur tous ces procédés qui comparent les énergies apportées par la vapeur et par l'eau, et le coût annuel de chacun d'entre eux.

Les valeurs du tableau bilan ne peuvent être changées qu'à partir des feuilles de programme.

	Hypothèse					cout énergie vapeur	cout énergie eau	
	Eau chaude process qui remplace la vapeur d'eau			Energie vap (kWh)	Energie eau (kWh)	50	30	
	température entrée EC (°C)	température sortie EC (°C)	Débit eau chaude process(m³.h⁻¹)			50€/MWh therm	30€/MWh therm	
Bain BORAX	105	75	0,45	344	361	6 020	3 792	
Eau chaude DMB	105	75	11,82	9 033	9 534	158 085	100 112	
Eau chaude 25 litres /minutes	105	75	2,99	2 294	2 409	40 145	25 291	
Eau chaude 7 litres/minutes	105	75	10,54	8 101	8 506	141 770	89 315	
Eau chaude sce R	105	75	6,89	5 294	5 559	92 652	58 371	
Eau chaude TZ	105	75	2,15	1 755	1 734	30 720	18 210	
Chauffage bâtiment 9	105	75	9,50	7 299	7 663	127 724	80 466	
Chauffage bâtiment 11	105	75	0,64	494	518	8 637	5 441	
Dégazeur	105	75	10,54	8 101	8 506	141 770	89 315	
			55,52	42 716	44 792	TOTAL	747 524	470 315

valeur calculée à partir de l'indice de confiance de 5%

Ce tableau regroupe les résultats finaux obtenus. Comme je l'ai dit précédemment, si on fait varier une valeur dans les feuilles de calcul de chaque procédé, ça change automatiquement la valeur dans le tableau final.

Cette synthèse donne une vision globale du système. Elle permet de voir les débits d'eau nécessaire pour faire marcher le procédé, l'énergie qu'elle apporte mais aussi l'impact financier sur toute une année.

Les débits varient en général au cours du temps, c'est une valeur fluctuante. Si le débit varie, l'énergie aussi va varier et par conséquent, le coût annuel de chaque installation va varier.

	Hypothèse		
	Eau chaude process qui remplace la vapeur d'eau		
	température entrée EC (°C)	température sortie EC (°C)	Débit eau chaude process(m ³ .h ⁻¹)
Bain BORAX	105	75	0,45
Eau chaude DMB	105	75	11,82
Eau chaude 25 litres /minutes	105	75	2,99
Eau chaude 7 litres/minutes	105	75	10,54
Eau chaude sce R	105	75	6,89
Eau chaude TZ	105	75	2,15
Chauffage bâtiment 9	105	75	9,50
Chauffage bâtiment 11	105	75	0,64
Dégazeur	105	75	10,54
			55,52

Débit d'eau de chaque procédé

Somme de tous les débits d'eau

On peut remarquer que le débit d'eau total qu'il faut apporter pour remplacer la vapeur d'eau est de 55.52m³.h⁻¹ (54.4 T.h⁻¹). A titre de comparaison, le débit de vapeur apportant les calories nécessaire au chauffage de l'eau est de 2.86 T.h⁻¹. Il ne faut pas oublier que ces valeurs de débit fluctuent au cours du temps, j'ai pris une valeur moyenne.

On remarque qu'il faut **20 fois plus** d'eau chaude que de vapeur. En effet, le pouvoir calorifique de la vapeur, quand elle se condense, est beaucoup plus important que l'apport seul de calories par l'eau.

Le tableau ci-dessous vous présente l'apport en énergie de la vapeur et celle de l'eau qui la remplace avec l'ajout de 5% de l'indice de confiance. On calcule l'énergie apportée car le coût est estimé à partir du kWh.

Le calcul effectué pour obtenir les valeurs dans ce tableau est :

$$E_{eau} = \frac{Qv'_{EC} * \rho_{EC} * Cp_{EC} * \Delta T_{EC} * 24 * 0.001}{3600}$$

Energie vap (kWh)	Energie eau (kWh)
344	361
9 033	9 534
2 294	2 409
8 101	8 506
5 294	5 559
1 745	1 734
7 299	7 663
494	518
8 101	8 506
42 705	44 792

$$E_{eau} = \frac{0.45 * 965 * 4180 * (105 - 75) * 24 * 0.001}{3600}$$

Energie apportée par l'eau pour le Bain Borax

A partir de ces valeurs calculées, on peut, par la suite, calculer le coût annuel de chaque procédé. On peut comparer le coût de la vapeur et le coût de l'eau. A partir de cela, l'usine UGO peut se faire une idée sur le gain ou la perte d'un point de vue financier.

Le tableau ci-dessous regroupe les différents coûts annuels de chaque installation et permet aussi de les comparer.

Le calcul effectué pour obtenir les valeurs dans ce tableau est :

$$\text{Coût annuel (€)} = \frac{\text{énergie}(kWh) * \text{Prix}_{MWh} * N_{fonctionnement}}{1000}$$

		cout énergie vapeur	cout énergie eau
		50	30
		50€/MWh therm	30€/MWh therm
	6 020		3 792
	158 085		100 112
	40 145		25 291
	141 770		89 315
	92 652		58 371
	30 720		18 210
	127 724		80 466
	8 637		5 441
	141 770		89 315
	747 524		470 315

$$\text{coût} = \frac{361 \cdot 30 \cdot 350}{1000}$$

Coût annuel estimé de la consommation en eau du Bain Borax

Coût annuel de l'eau chaude en €

Ce programme de calcul a pour but de faciliter le travail à Christophe Leplat. En effet, l'opérateur a juste à remplacer les valeurs dans les feuilles de calcul et la moulinette donne le résultat final avec le coup engendré.

L'usine UGO a un ordre de grandeur du coût de l'opération (ici du gain effectué). On peut remarquer que l'usine va faire une économie d'environ **275 000 € par an**.

Par contre, l'usine va devoir investir dans la canalisation pour amener l'eau, et dans tout ce qui va permettre le remplacement de la vapeur par l'eau chaude.

L'objectif de l'usine est de rentabiliser le coût sur une durée de 2 ans maximum. Sur ces 2 années, l'usine fera une économie de **550 000 €**, cela implique un investissement à hauteur de ce bénéfice engendré.

En conclusion de ce 1^{er} objectif, nous pouvons remarquer que l'on a un ordre de grandeur des débits d'eau chaude mis en jeu pour chaque installation. La suite de ce 1^{er} objectif est de voir si les dimensions de chaque échangeur (D_{tube} , L_{tube} , ...) peuvent accepter un changement de pression car $P_{\text{vapeur}} \neq P_{\text{eau chaude}}$.

V. Economie d'énergie : Calcul des pertes thermiques sur UGO

1. Présentation de la problématique

Le problème principal dans l'usine est la déperdition de chaleur. En effet, certaines canalisations n'ont pas de calorifuge, donc il y a des pertes thermiques. Dans certains ateliers, en hiver, il fait très froid ($5 < T < 10^{\circ}\text{C}$). L'échange de chaleur entre de l'air à $5-10^{\circ}\text{C}$ et de l'eau chaude dont la température moyenne est de 80°C provoque une perte de chaleur et par conséquent, une perte financière. En effet, il ne faut pas oublier que l'eau est chauffée par de la vapeur d'eau qui est elle-même chauffée par une chaudière fonctionnant au gaz.

Pour quantifier ces déperditions de chaleur, j'ai mis en place un programme Excel (**Cf : fichier n°9 à 14**). En effet, pour chaque atelier, j'ai dû relever les différents paramètres physiques et dimensionnels. Ensuite, en fonction de toutes ces valeurs, j'ai pu déterminer les pertes de chaleur occasionnées et le coût estimée.

L'objectif est d'estimer à combien s'élève les pertes thermiques et savoir s'il y a un intérêt de remettre un calorifuge. En effet, l'usine UGO cherche à rentabiliser l'investissement en moins de deux ans.

Dans un premier temps, j'ai dû mener des petites enquêtes pour identifier où se situent les pertes thermiques dans l'usine UGO. Ensuite, j'ai dû mesurer le diamètre des différentes canalisations (D_{int} et D_{ext}), l'épaisseur du calorifuge. De plus, grâce à l'aide de M^r Leplat, j'ai pu obtenir des renseignements sur les caractéristiques physiques des canalisations et du calorifuge.

2. Mise en place du programme de calcul des pertes thermiques

- Exemple de mesure réalisée sur le circuit eau chaude DMB



Photo d'une canalisation non calorifugé du circuit EC DMB

Pour le circuit eau chaude DMB comme pour les autres circuits, la longueur des canalisations non calorifugé varie et par conséquent, la valeur de la longueur L est une valeur arbitraire.

Dimensions	
dint (m)	0,1631
dext (m)	0,1683
Dint (m)	0,2683
Dext (m)	0,27
Ecalo (m)	0,05
$\lambda_{\text{tube acier}} (\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$	26
$\lambda_{\text{calorifuge}} (\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$	0,045
L (m)	3

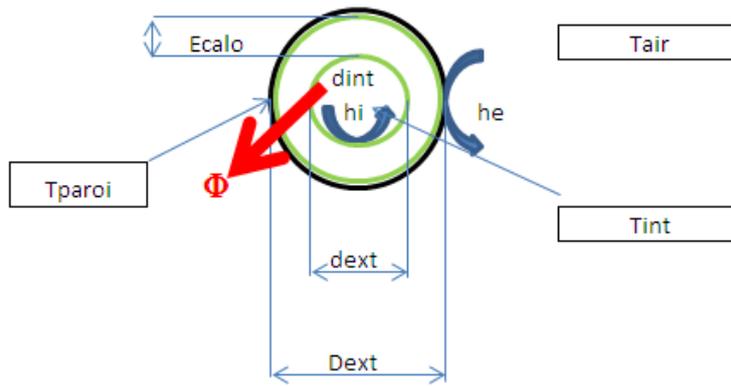


Schéma du flux dissipé dans une canalisation

Il faut toujours penser à un aspect d'économie énergie. Sur le dessin ci-dessus, on peut voir la disposition du calorifuge qui entoure le tube de diamètre d_{ext} . Le rôle du calorifuge est d'empêcher le transfert de chaleur vers l'extérieur. En effet, le tube intérieur contient de l'eau chaude à une température avoisinant les 75-80°C voir plus, tandis qu'à l'extérieur de la canalisation, il y circule de l'air à une température comprise entre 15-20°C voir plus basse en hiver.

Après avoir récupéré toutes les données physiques des canalisations et du calorifuge, l'étape suivante consiste à mesurer toutes les températures nécessaires pour réaliser les calculs.

Paramètres physiques	
Tint (°C)	94
Tparoi sans calo (°C)	64
Tparoi avec calo (°C)	33
Tair (°C)	23
Tfilm ext sans (°C)	43,50
Tfilm ext avec (°C)	28

Température du film extérieur avec ou sans calorifuge

$$T_{filmext} = \frac{T_{paroisanscalo} + T_{air}}{2}$$

J'ai calculé la température de film pour, par la suite, calculer les paramètres physiques de l'eau et de l'air avec ou sans calorifuge.

Paramètres physiques avec calorifuge			
air		eau chaude	
ρ (kg.m ⁻³)	1,18	ρ (kg.m ⁻³)	961,37
β (°C ⁻¹)	0,00332	β (°C ⁻¹)	0,00272
μ (Pa.s)	1,86684E-05	μ (Pa.s)	0,00030
ν (m ² .s ⁻¹)	1,59785E-05	ν (m ² .s ⁻¹)	3,1051E-07
C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1003,2	C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4180
λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0260	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,6745
Pr	0,72	Pr	1,85
		qm (kg.s ⁻¹)	30,00

Paramètres physiques sans calorifuge			
air		eau chaude	
ρ (kg.m ⁻³)	1,11	ρ (kg.m ⁻³)	961,37
β (°C ⁻¹)	0,00316	β (°C ⁻¹)	0,00272
μ (Pa.s)	1,94149E-05	μ (Pa.s)	0,00030
ν (m ² .s ⁻¹)	1,74061E-05	ν (m ² .s ⁻¹)	3,1051E-07
C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1003,2	C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4180
λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0271	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,6745
Pr	0,72	Pr	1,85
		qm (kg.s ⁻¹)	30,00

Pour calculer tous les paramètres physiques de l'eau et de l'air, j'ai fait des interpolations linéaires.

Par exemple : $\rho_{EC} = \frac{T_{int} - 1620.656}{-1.588} = 961.37 \text{kg.m}^{-3}$

Ce sont ces 2 valeurs qui ont été déterminées par interpolation linéaire

Après avoir calculé les paramètres physiques des deux fluides, j'ai mis en place deux programmes qui vont permettre d'estimer le coût des déperditions de chaleur.

a) 1^{ier} programme de calcul

Ce programme permet de calculer les déperditions de chaleur d'une canalisation de longueur L avec calorifuge.

Le tableau ci-dessous regroupe les calculs intermédiaires et les résultats finaux qui m'ont permis de calculer le flux de chaleur perdu.

Calcul du flux perdu avec calorifuge									
détermination de hair		détermination de heau							
Gr	25113444	Um (m.s ⁻¹)	1,49	<table border="1"> <tr> <td>Φ (W)</td> <td>106,29</td> </tr> </table>				Φ (W)	106,29
Φ (W)	106,29								
Ra	18081680	Re	793603,14						
Nu	34,56	Nu	1770,57						
hair (W.m ⁻² .K ⁻¹)	3,33	heau (W.m ⁻² .K ⁻¹)	7321,92						
Rair (K.W ⁻¹)	0,1180	Reau (K.W ⁻¹)	8,88485E-05						
		Rtube (K.W ⁻¹)	6,40386E-05	Rcalo (K.W ⁻¹)	0,5498				

Explication des résultats trouvés dans le tableau ci-dessus :

Dans un premier temps, j'ai calculé le coefficient global d'échange de l'eau et de l'air, à la température moyenne du film. Par la suite, j'ai calculé les résistances thermiques mis en jeu dans ce problème et enfin, le flux thermique dissipé avec calorifuge (resp. sans calorifuge, cf **b**)). Pour finir, j'ai pu estimer le coût des déperditions de chaleur.

- Détermination du coefficient global d'échange de l'air ambiant (h_{air})

Pour déterminer cette valeur, j'ai dû supposer que l'air est en convection naturelle ($U_{m,air} \approx 0 \text{ m.s}^{-1}$), c'est-à-dire que le mouvement de l'air se fait par gradient de masse volumique. En effet, ce gradient permet un déplacement de l'air. Il faut comprendre que l'air chaud à une densité plus petite que celle de l'air froide. Par conséquent, l'air est en mouvement mais à une vitesse faible ce qui me permet d'émettre l'hypothèse de convection naturelle.

Donc, je vais utiliser différentes corrélations pour déterminer h_{air}.

- Calcul du nombre de Graschoff :
$$Gr = \frac{\rho_{air}^2 * g * \beta_{air} * D_{ext}^3 * \Delta T}{\mu_{air}^2}$$

Avec : ρ_{air} en kg.m^{-3}

g en m.s^{-2}

β en K^{-1}

D_{ext} en m

$\Delta T = T_{paroi} - T_{air}$ en K

μ_{air} en Pa.s

$$AN : Gr = \frac{1.18^2 * 9.81 * 0.27^3 * 0.00332 * (33 - 23)}{(1.18 * 10^{-5})^2}$$

Toutes ces valeurs sont répertoriées dans les tableaux plus hauts

$$Gr = 2.5 * 10^7$$

- Calcul du nombre de Rayleigh : $Ra = Gr * Pr$

$$AN : Ra = 2.5 * 10^7 * 0.72$$

$$Ra = 1.81 * 10^7$$

- Calcul du nombre de Nusselt et du coefficient global d'échange h_{air} :

$$Nu = 0.53 * Ra^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu = 0.53 * (1.81 * 10^7)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu = 34.56$$

Détermination du coefficient global d'échange : $h_{air} = \frac{Nu * \lambda_{air}}{D_{ext}}$

$$AN : h_{air} = \frac{34.56 * 0.026}{0.27}$$

$$h_{air} = 3.33 W.m^{-2}K^{-1}$$

➤ Détermination du coefficient global d'échange de l'eau

L'eau est en convection forcée. En effet, un gradient de pression permet de mettre l'eau en mouvement dans la canalisation, et par conséquent, $U_{m_{eau}} \neq 0 m.s^{-1}$.

- Calcul de la vitesse de l'eau dans la canalisation pour ensuite déterminer le nombre de Reynolds :

Calcul de la vitesse : $Um = \frac{4Qm_{eau}}{\rho_{eau} * \pi * d_{int}^2}$

$$AN : Um = \frac{4 * 30}{961.37 * \pi * 0.1631^2}$$

$$Um = 1.49 m.s^{-1}$$

Calcul du nombre de Reynolds : $Re = \frac{\rho_{eau} * Um_{eau} * d_{int}}{\mu_{eau}}$

$$AN : Re = \frac{961.37 * 1.49 * 0.1631}{0.00030}$$

$$Re = 793603$$

- Calcul du nombre de Nusselt et du coefficient d'échange global de l'eau :

Calcul du nombre Nu : $Nu = 0.026 * Re^{0.8} * Pr^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu_{film}}{\mu_{eau}}\right)^{0.14}$

$$AN : Nu = 0.026 * 793603^{0.8} * 1.85^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{0.00044}{0.00030}\right)^{0.14}$$

$$Nu = 1771$$

Calcul de h_{eau} :
$$h_{eau} = \frac{Nu * \lambda_{eau}}{d_{int}}$$

$$h_{eau} = \frac{1771 * 0.6745}{0.1631}$$

$$h_{eau} = 7322 \text{ W.m}^{-2} . \text{K}^{-1}$$

Après avoir calculé le coefficient global d'échange de l'air et de l'eau, je vais devoir calculer les résistances thermiques mis en jeu dans ce problème. J'ai relevé quatre résistances thermiques :

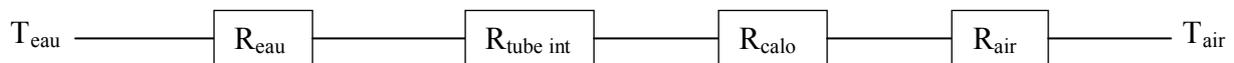


Schéma des résistances thermiques

J'ai négligé l'épaisseur du grand tube qui recouvre le calorifuge et qui est en contact directe avec l'air car $D_{ext} \approx D_{int}$.

- Détermination des résistances thermiques :

❖ Résistance thermique de l'eau :
$$R_{eau} = \frac{1}{h_{eau} * S_{échange}}$$

Avec : $S_{échange} = \odot * d_{int} * L$ en m^2

$$AN : R_{eau} = \frac{1}{7322 * \pi * 0.1631 * 3}$$

$$R_{eau} = 8.84 * 10^{-5} \text{ K.W}^{-1}$$

❖ Résistance thermique du tube intérieur :

$$R_{tube\ int} = \frac{\ln \frac{d_{ext}}{d_{int}}}{2 * \pi * L * \lambda_{acier}}$$

Avec : λ_{acier} en $W.m^{-1}.K^{-1}$

$$AN : R_{tube\ int} = \frac{\ln \frac{0.1683}{0.1631}}{2 * \pi * 3 * 26}$$

$$R_{tube\ int} = 6.40 * 10^{-5} K.W^{-1}$$

Ces deux formules correspondent à la résistance thermique d'un cylindre

❖ Résistance thermique du calorifuge :

$$R_{calo} = \frac{\ln \frac{d_{ext} + 2e_{calo}}{d_{ext}}}{2 * \pi * L * \lambda_{acier}}$$

Avec : e_{calo} en m

$$AN : R_{calo} = \frac{\ln \frac{0.1683 + 2 * 0.05}{0.1683}}{2 * \pi * 3 * 26}$$

$$R_{calo} = 0.55 K.W^{-1}$$

❖ Résistance thermique de l'air :

$$R_{air} = \frac{1}{h_{air} * S_{echange}}$$

Avec : $S_{echange} = \pi * D_{ext} * L$ en m^2

$$AN : R_{air} = \frac{1}{3.33 * \pi * 0.27 * 3}$$

$$R_{air} = 0.12 K.W^{-1}$$

Par la suite, je vais pouvoir enfin déterminer le flux dissipé avec le calorifuge :

$$\Phi_{avec}^{dissipé} = \frac{\Delta T}{\sum R_{thermique}}$$

Avec : ΔT en °C

$$\sum R_{thermique} = R_{eau} + R_{tube\ int} + R_{calo} + R_{air} \text{ en } K \cdot W^{-1}$$

Pour le calcul du flux, j'ai négligé **les pertes thermiques par rayonnement** car il manque des informations :

$$\Phi_{rayonnement} = \frac{(M^0 - J_i) \cdot \epsilon_i \cdot S_i}{1 - \epsilon_i}$$

Avec : M^0 l'émittance énergétique en $W \cdot m^{-2}$

J_i la radiosité en $W \cdot m^{-2}$

ϵ_i le facteur d'émission

S_i la surface d'échange en m^2

$$AN : \Phi_{dissipé} = \frac{94 - 23}{8.84 * 10^{-5} + 6.40 * 10^{-5} + 0.55 + 0.12}$$

$$\Phi_{avec}^{dissipé} = 106.3W$$

b) 2^{ème} programme de calcul

Ce programme de calcul consiste à calculer les déperditions de chaleur d'une canalisation de longueur L sans calorifuge.

Le tableau ci-dessous regroupe les calculs intermédiaires et les résultats finaux qui m'ont permis de calculer le flux de chaleur perdu.

Calcul du flux perdu sans calorifuge									
détermination de hair		détermination de heau							
Gr	82520272	Um (m.s ⁻¹)	1,49					Φ (W)	841,53
Ra	59414595,84	Re	793603,14						
Nu	46,53	Nu	1725,31						
hair (W.m ⁻² .K ⁻¹)	4,67	heau (W.m ⁻² .K ⁻¹)	7134,75						
Rair (K.W ⁻¹)	0,0842	Reau (K.W ⁻¹)	9,1179E-05	Rtubes (K.W ⁻¹)	6,40386E-05	Rcalo (K.W ⁻¹)	0		

La méthode calcul est la même pour déterminer le flux dissipé. Cependant, les caractéristiques physique de l'air vont changer car T_{film} est différent du T_{film} avec calorifuge, mais aussi pour le calcul du $\Phi_{dissipé}$, on ne prend plus en compte la résistante du calorifuge : R_{calo} = 0K.W⁻¹.

$$\Phi_{sans}^{dissipé} = 841.5W$$

Après avoir déterminé les différents flux, je vais calculer le coût annuel de ces pertes de chaleur :

Pour commencer, je fais la différence entre le flux dissipé sans calorifuge et le flux avec calorifuge :

$$\Phi_{pertes} = \Phi_{sans}^{dissipé} - \Phi_{avec}^{dissipé}$$

$$AN : \Phi_{pertes} = 841.5 - 106.3$$

$$\Phi_{pertes} = 735.2W$$

Cette valeur nous montre la déperdition de chaleur causé par la non présence de calorifuge autour de la canalisation.

c) Bilan et conclusions du programme

Afin de voir combien cette déperdition coûte à l'usine, il faut que je convertisse la puissance perdu en énergie perdu. En effet, en connaissant le coût du MWh thermique, je peux quantifier ces pertes thermiques.

Φ pertes (W)	735,232779
Φ pertes (kWh/jour)	17,6455867
prix du gaz (euros)	50
coût annuel (euros)	308,798

- Conversion W en kWh.jour⁻¹ :

$$E_{perdu} = \Phi_{pertes} * 24 * 0.001$$

$$AN : E_{perdu} = 735.2 * 24 * 0.001$$

$$E_{perdu} = 17.65kWh.jour^{-1}$$

De plus, on sait que le prix du MWh thermique est de 50€. Dans le calcul qui va suivre, j'ai fait l'hypothèse d'un rendement de chaudière $\eta_{chaudiere} = 1$.

- Calcul du coût annuel de cette perte de chaleur :

$$Coût = \frac{E_{pertes} * N_{fonctionnement} * Prix_{MWh}}{1000}$$

$$Coût = \frac{17.65 * 350 * 50}{1000}$$

$$Coût = 309€$$

Nous pouvons remarquer que pour une longueur de canalisation non calorifugée de 3m, le coût estimé sur le circuit eau chaude DMB est de **310€** à l'année.

J'ai réalisé ce programme pour différent circuit de l'usine (Cf Annexe n°9 à 14.)

A partir de cela, l'usine va pouvoir quantifier la perte financière causée par ces déperditions de chaleur.

Conclusion

Pour conclure, ce stage m'a permis de découvrir le travail au sein d'une usine française à dimension mondiale, sur un site important en termes de production et de personnel. Sur cette mission particulière, mon maître de stage m'a confié une mission dans le cadre d'une démarche Groupe. Il est très intéressant de se voir confier une telle responsabilité, sur une mission qui a une véritable utilité, et qui vise à améliorer la performance de l'usine.

Au cours de ce stage, j'ai pu mettre en application les connaissances obtenues tout au long de mon cursus scolaire et j'ai pu ainsi aider M^f LEPLAT, animateur énergie de l'usine, à résoudre les différents problèmes de pertes d'énergies au sein de l'usine, mais aussi concernant le remplacement de la vapeur d'eau par l'eau chaude.

En effet, le projet X₀ est accepté, c'est-à-dire, Michelin Clermont accepte de remplacer la vapeur :

- Soit par des chaudières à eau chaude
- Soit importer de l'eau via une usine extérieure

De plus, un autre projet X₁, prévu pour décembre 2013, va permettre d'affiner mon projet et ainsi estimer le coût total du remplacement, mais aussi les autres paramètres à prendre en compte.

Enfin, le remplacement de la vapeur d'eau par l'eau chaude dans l'usine UGO est prévu pour fin2014-début2015.

Annexes

Annexe n°1 : Fichier programme Eau Chaude DMB

Vapeur						
Te (°C)	105					
Lv (kJ/kg)	2243,4	Φ cédé (W)	376392,67	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ cédé sup (W)	395212,30
Qm (kg/h)	604,00	Φ reçu (W)	376392,6667	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ reçu sup (W)	395212,3
eau process						
Te (°C)	90,88		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	94	➔	Φ cédé = $Q_v * \rho * C_p * (T_s - T_e)$			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➔	$T_e = T_s - \Phi \text{ cédé} / (Q_v * \rho * C_p)$	90,88		
Qv (m3/h)	108					
ρ (kg/m ³)	962					
eau de chauffage qui remplace la vapeur						
Te (°C)	105		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	75	➔	Φ cédé = $Q_v * \rho * C_p * (T_s - T_e)$			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➔	$Q_v = \Phi \text{ cédé} / (C_p * \rho * (T_e - T_s))$	11,82		
Qv (m3/h)	11,82					
ρ (kg/m ³)	960					
	valeur variable					

Annexe n°2 : Fichier programme Eau Chaude Machine à Laver 25 L .min⁻¹

Vapeur						
Te (°C)	105					
Lv (kJ/kg)	2243,4	Φ cédé (W)	95593,77	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ cédé sup (W)	100373,46
Qm (kg/h)	153,40	Φ reçu (W)	95582,66667	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ reçu sup (W)	100361,8
eau process						
Te (°C)	76,00		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	78	➔	Φ cédé = $Q_v \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)$			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➔	$T_e = T_s - \Phi \text{ cédé} / (Q_v \cdot \rho \cdot C_p)$	76,00		
Qv (m3/h)	42,00					
ρ (kg/m ³)	980					
eau de chauffage qui remplace la vapeur						
Te (°C)	105		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	75	➔	Φ cédé = $Q_v \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)$			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➔	$Q_v = \Phi \text{ cédé} / (C_p \cdot \rho \cdot (T_e - T_s))$	2,99		
Qv (m3/h)	2,99					
ρ (kg/m ³)	965					
	valeur variable					

Annexe n°3 : Fichier programme Eau Chaude Machine à Laver 7 L .min⁻¹

Vapeur						
Te (°C)	105					
Lv (kJ/kg)	2243,4	Φ cédé (W)	337548,61	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ cédé sup (W)	354426,04
Qm (kg/h)	541,67	Φ reçu (W)	337548,6111	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ reçu sup (W)	354426,042
eau process						
Te (°C)	61,78		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	87	➡	Φ cédé = Qv*ρ*Cp*(Ts-Te)			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➡	Te = Ts - Φ cédé / (Qv*ρ*Cp)	61,78		
Qv (m3/h)	11,76					
ρ (kg/m ³)	980					
eau de chauffage qui remplace la vapeur						
Te (°C)	105		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	75	➡	Φ cédé = Qv*ρ*Cp*(Ts-Te)			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➡	Qv = Φ cédé / (Cp*ρ*(Te-Ts))	10,54		
Qv (m3/h)	10,54					
ρ (kg/m ³)	965					
	valeur variable					

Annexe n°4 : Fichier programme Eau Chaude Sce R

Vapeur						
Te (°C)	105					
Lv (kJ/kg)	2243,4	Φ cédé (W)	220601,00	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ cédé sup (W)	231631,05
Qm (kg/h)	354,00	Φ reçu (W)	220601	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ reçu sup (W)	231631,05
eau process						
Te (°C)	41,41		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	75	➡	Φ cédé = $Q_v \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)$			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➡	$T_e = T_s - \Phi \text{ cédé} / (Q_v \cdot \rho \cdot C_p)$	41,41		
Qv (m3/h)	5,76					
ρ (kg/m ³)	982					
eau de chauffage qui remplace la vapeur						
Te (°C)	105		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	75	➡	Φ cédé = $Q_v \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)$			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➡	$Q_v = \Phi \text{ cédé} / (C_p \cdot \rho \cdot (T_e - T_s))$	6,89		
Qv (m3/h)	6,89					
ρ (kg/m ³)	965					
	valeur variable					

Annexe n°5 : Fichier programme Eau Chaude M48 TZ

Vapeur						
Te (°C)	105					
Lv (kJ/kg)	2257	Φ cédé (W)	73143,52	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ cédé sup (W)	76800,69
Qm (kg/h)	116,67	Φ reçu (W)	68819,52	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ reçu sup (W)	72260,496
eau process						
Te (°C)	52,00		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	76	➔	Φ cédé = $Q_v * \rho * C_p * (T_s - T_e)$			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➔	$T_e = T_s - \Phi \text{ cédé} / (Q_v * \rho * C_p)$	52,00		
Qv (m3/h)	2,52					
ρ (kg/m ³)	980					
eau de chauffage qui remplace la vapeur						
Te (°C)	105		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	75	➔	Φ cédé = $Q_v * \rho * C_p * (T_s - T_e)$			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➔	$Q_v = \Phi \text{ cédé} / (C_p * \rho * (T_e - T_s))$	2,15		
Qv (m3/h)	2,15					
ρ (kg/m ³)	965					
	valeur variable					

Annexe n°6 : Fichier programme chauffage bâtiment 9

Vapeur							
Te (°C)	105						
Lv (kJ/kg)	2243,4	Φ cédé (W)	304105,33	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ cédé sup (W)	319310,60	
Qm (kg/h)	488,00	Φ reçu (W)	304105,3333	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ reçu sup (W)	319310,6	
eau process							
Te (°C)	49,05		Φ cédé = Φ reçu				
Ts (°C)	50	➔	Φ cédé = $Qv * \rho * Cp * (Ts - Te)$				
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➔	$Te = Ts - \Phi$ cédé / ($Qv * \rho * Cp$)	49,05			
Qv (m3/h)	280						
ρ (kg/m ³)	980						
eau de chauffage qui remplace la vapeur							
Te (°C)	105		Φ cédé = Φ reçu				
Ts (°C)	75	➔	Φ cédé = $Qv * \rho * Cp * (Ts - Te)$				
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➔	$Qv = \Phi$ cédé / ($Cp * \rho * (Te - Ts)$)	9,50			
Qv (m3/h)	9,50						
ρ (kg/m ³)	965						
	valeur variable						

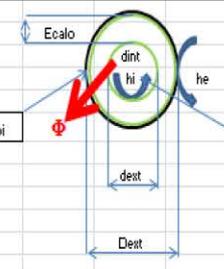
Annexe n°7 : Fichier programme chauffage bâtiment 11

Vapeur						
Te (°C)	105					
Lv (kJ/kg)	2243,4	Φ cédé (W)	20564,50	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ cédé sup (W)	21592,73
Qm (kg/h)	33,00	Φ reçu (W)	20564,5	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ reçu sup (W)	21592,725
eau process						
Te (°C)	49,28		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	50	➔	Φ cédé = $Q_v * \rho * C_p * (T_s - T_e)$			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➔	$T_e = T_s - \Phi \text{ cédé} / (Q_v * \rho * C_p)$	49,28		
Qv (m3/h)	25,00					
ρ (kg/m ³)	980					
eau de chauffage qui remplace la vapeur						
Te (°C)	105		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	75	➔	Φ cédé = $Q_v * \rho * C_p * (T_s - T_e)$			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➔	$Q_v = \Phi \text{ cédé} / (C_p * \rho * (T_e - T_s))$	0,64		
Qv (m3/h)	0,64					
ρ (kg/m ³)	965					
	valeur variable					

Annexe n°8 : Fichier programme Dégazeur

Vapeur						
Te (°C)	105					
Lv (kJ/kg)	2243,4	Φ cédé (W)	337548,61	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ cédé sup (W)	354426,04
Qm (kg/h)	541,67	Φ reçu (W)	337548,6111	ajout d'un intervalle de confiance de 5%	Φ reçu sup (W)	354426,042
eau process						
Te (°C)	69,40		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	105	➔	Φ cédé = $Q_v \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)$			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➔	$T_e = T_s - \Phi \text{ cédé} / (Q_v \cdot \rho \cdot C_p)$	69,40		
Qv (m3/h)	8,333333333					
ρ (kg/m ³)	980					
U de chauffage qui remplace la vapo						
Te (°C)	105		Φ cédé = Φ reçu			
Ts (°C)	75	➔	Φ cédé = $Q_v \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)$			
Cp moyen (J/kg.K)	4180	➔	$Q_v = \Phi \text{ cédé} / (C_p \cdot \rho \cdot (T_e - T_s))$	10,54		
Qv (m3/h)	10,54					
ρ (kg/m ³)	965					
	valeur variable					

Annexe n°9 : Fichier programme Perte thermique Eau Chaude Sce R

Perte thermique EC Sce R									
Paramètres physiques									
Tint (°C)	75	Tair							
Tparoi sans calo (°C)	49	Tint							
Tparoi avec calo (°C)	31								
Tair (°C)	22								
Tfilm ext sans calorifuge (°C)	35,50								
Tfilm ext avec calorifuge (°C)	26,5								
Paramètres physiques avec calorifuge				Calcul du flux perdu avec calorifuge					
air		eau chaude		détermination de hair		détermination de heau			
ρ (kg.m ⁻³)	1,18	ρ (kg.m ⁻³)	973,34	Gr	7556276,72	Um (m.s ⁻¹)	0,02		
β (°C ⁻¹)	0,00334	β (°C ⁻¹)	0,00287	Ra	5440519,24	Re	4012,93		
μ (Pa.s)	1,85962E-05	μ (Pa.s)	0,00039	Nu	25,60	Nu	27,69		
ν (m ² .s ⁻¹)	1,58403E-05	ν (m ² .s ⁻¹)	3,9354E-07	hair (W.m ⁻² .K ⁻¹)	3,57	heau (W.m ⁻² .K ⁻¹)	242,49	Φ (W)	16,20
Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1003,2	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4180	Rair (K.W ⁻¹)	0,4799	Reau (K.W ⁻¹)	0,017271937	Rtube (K.W ⁻¹)	0,0004
λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0259	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,6855	Rcalo (K.W ⁻¹)		Rcalo (K.W ⁻¹)	2,773253517		
Pr	0,72	Pr	2,45						
		qm (kg.s ⁻¹)	0,0926						
Paramètres physiques sans calorifuge				Calcul du flux perdu sans calorifuge					
air		eau chaude		détermination de hair		détermination de heau			
ρ (kg.m ⁻³)	1,15	ρ (kg.m ⁻³)	973,34	Gr	19873384,31	Um (m.s ⁻¹)	0,02		
β (°C ⁻¹)	0,00324	β (°C ⁻¹)	0,00287	Ra	14308836,70	Re	4012,93		
μ (Pa.s)	1,90236E-05	μ (Pa.s)	0,00039	Nu	32,60	Nu	27,34		
ν (m ² .s ⁻¹)	1,66693E-05	ν (m ² .s ⁻¹)	3,9354E-07	hair (W.m ⁻² .K ⁻¹)	4,65	heau (W.m ⁻² .K ⁻¹)	239,38	Φ (W)	137,33
Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1003,2	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4180	Rair (K.W ⁻¹)	0,3681	Reau (K.W ⁻¹)	0,017496081	Rtube (K.W ⁻¹)	0,0004
λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0265	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,6855	Rcalo (K.W ⁻¹)		Rcalo (K.W ⁻¹)	0		
Pr	0,72	Pr	2,45						
		qm (kg.s ⁻¹)	0,0926						
Dimensions				Φ pertes (W)		121,12			
d'int (m)	0,076			Φ pertes (kWh/jour)		2,91			
d'ext (m)	0,084			prix du gaz (euros)		50			
D'int (m)	0,184			coût annuel (euros)		50,87			
D'ext (m)	0,186								
Ecalo (m)	0,05								
$\lambda_{isolant}$ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	45								
$\lambda_{calorifuge}$ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,045								
L (m)	1								

Annexe n°10 : Fichier programme Perte thermique Eau Chaude 25 L.min⁻¹

Perte thermique MÅL 25L/min											
Paramètres physiques				Tint (°C)		79		Tair			
Tparoi sans calo (°C)				52		Tparoi avec calo (°C)		35,5			
Tair (°C)				29		Tfilm ext sans (°C)		40,50			
Tfilm ext avec (°C)				32,25		Tparoi					
Paramètres physiques avec calorifuge				Calcul du flux perdu avec calorifuge							
air		eau chaude		détermination de hair		détermination de heau					
ρ (kg.m ⁻³)	1,18	ρ (kg.m ⁻³)	970,82	Gr	3827950	Um (m.s ⁻¹)	2,34				
β (°C ⁻¹)	0,00327	β (°C ⁻¹)	0,00284	Ra	2756124	Re	495238,42				
μ (Pa.s)	1,88731E-05	μ (Pa.s)	0,00037	Nu	2159	Nu	1283,13				
ν (m ² .s ⁻¹)	1,63699E-05	ν (m ² .s ⁻¹)	3,7606E-07	hair (W.m ⁻² .K ⁻¹)	3,34	heau (W.m ⁻² .K ⁻¹)	10703,91	\dot{q} (W) 13,61			
Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1003,2	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4180	Rair (K.W ⁻¹)	0,56032	Reau (K.W ⁻¹)	0,00037	Rtube (K.W ⁻¹)	0,00021		
λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0263	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,6674					Rcalo (K.W ⁻¹)	3,11363205		
Pr	0,72	Pr	2,33								
		qm (kg.s ⁻¹)	11,43								
Paramètres physiques sans calorifuge				Calcul du flux perdu sans calorifuge							
air		eau chaude		détermination de hair		détermination de heau					
ρ (kg.m ⁻³)	1,13	ρ (kg.m ⁻³)	970,82	Gr	12044631	Um (m.s ⁻¹)	2,34				
β (°C ⁻¹)	0,00319	β (°C ⁻¹)	0,00284	Ra	8672134,43	Re	495238,42				
μ (Pa.s)	1,92704E-05	μ (Pa.s)	0,00037	Nu	28,76	Nu	1267,44				
ν (m ² .s ⁻¹)	1,71298E-05	ν (m ² .s ⁻¹)	3,7606E-07	hair (W.m ⁻² .K ⁻¹)	4,55	heau (W.m ⁻² .K ⁻¹)	10572,99	\dot{q} (W) 121,22			
Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1003,2	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4180	Rair (K.W ⁻¹)	0,41187	Reau (K.W ⁻¹)	0,00038	Rtube (K.W ⁻¹)	0,00021		
λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0269	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,6674					Rcalo (K.W ⁻¹)	0		
Pr	0,72	Pr	2,33								
		qm (kg.s ⁻¹)	11,43								
Dimensions				\dot{q} pertes (W)		107,62					
dint (m)	0,08			\dot{q} pertes (kWh/jour)		2,58					
dext (m)	0,085			prix du gaz (euros)		50					
Dint (m)	0,205			coût annuel (euros)		45,20					
Dext (m)	0,17										
Ecalo (m)	0,06										
$\lambda_{calorifuge}$ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	45										
$\lambda_{calorifuge}$ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,045										
L (m)	1										

Annexe n°11 : Fichier programme Perte thermique Eau Chaude 7 L.min⁻¹

Perte thermique MÅL 7L/min									
Paramètres physiques		Ecalo		dint		hi		Tair	
Tint (°C)	87	he		Tint					
Tparoi sans calo (°C)	51	dext		Dext					
Tparoi avec calo (°C)	32	Tparoi							
Tair (°C)	27,8								
Tfilm ext sans (°C)	39,40								
Tfilm ext avec (°C)	29,9								
Paramètres physiques avec calorifuge		Calcul du flux perdu avec calorifuge							
air		eau chaude		détermination de hair		détermination de heau			
ρ (kg.m ⁻³)	1,18	ρ (kg.m ⁻³)	965,78	Gr	2559872	Um (m.s ⁻¹)	0,66		
β (°C ⁻¹)	0,00330	β (°C ⁻¹)	0,00278	Ra	1843108	Re	154891,86		
μ (Pa.s)	1,87599E-05	μ (Pa.s)	0,00033	Nu	19,53	Nu	493,13		
ν (m ² .s ⁻¹)	1,61835E-05	ν (m ² .s ⁻¹)	3,411E-07	hair (W.m ⁻² .K ⁻¹)	3,00	heau (W.m ⁻² .K ⁻¹)	4137,12	Φ (W) 15,83635	
Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1003,2	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4180	Rair (K.W ⁻¹)	0,62343	Reau (K.W ⁻¹)	0,00096	Rtube (K.W ⁻¹)	0,00021
λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0261	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,6712					Rcalo (K.W ⁻¹)	3,11363
Pr	0,72	Pr	2,07						
		qm (kg.s ⁻¹)	3,2000						
Paramètres physiques sans calorifuge		Calcul du flux perdu sans calorifuge							
air		eau chaude		détermination de hair		détermination de heau			
ρ (kg.m ⁻³)	1,13	ρ (kg.m ⁻³)	965,78	Gr	12337639	Um (m.s ⁻¹)	0,66		
β (°C ⁻¹)	0,00320	β (°C ⁻¹)	0,00278	Ra	8883100,19	Re	154891,86		
μ (Pa.s)	1,92174E-05	μ (Pa.s)	0,00033	Nu	28,93	Nu	485,98		
ν (m ² .s ⁻¹)	1,70285E-05	ν (m ² .s ⁻¹)	3,411E-07	hair (W.m ⁻² .K ⁻¹)	4,56	heau (W.m ⁻² .K ⁻¹)	4077,06	Φ (W) 143,7795	
Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1003,2	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4180	Rair (K.W ⁻¹)	0,41055	Reau (K.W ⁻¹)	0,00098	Rtube (K.W ⁻¹)	0,00021
λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0268	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,6712					Rcalo (K.W ⁻¹)	0
Pr	0,72	Pr	2,07						
		qm (kg.s ⁻¹)	3,2000						
Dimensions									
dint (m)	0,08								
dext (m)	0,085								
Dint (m)	0,205								
Dext (m)	0,17								
Ecalo (m)	0,06								
λ_{air} (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,045								
$\lambda_{calorifuge}$ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,045								
L (m)	1								
				Φ pertes (W)		127,94			
				Φ pertes (kWh/jour)		3,07			
				prix du gaz (euros)		50			
				coût annuel (euros)		53,74			

Annexe n°13 : Fichier programme Perte thermique vapeur d'eau DMB

Perte thermique Vapeur DMB											
Paramètres physiques				Tair		Tint					
Tint (°C)	170										
Tparoi sans calo (°C)	140										
Tparoi avec calo (°C)	32										
Tair (°C)	10										
Tfilm ext sans (°C)	75,00										
Tfilm ext avec (°C)	21										
Paramètres physiques avec calorifuge				Calcul du flux perdu avec calorifuge							
air		vapeur d'eau		détermination de hair		détermination de heau					
ρ (kg.m ⁻³)	1,18	ρ (kg.m ⁻³)	4,67	Gr	15062133	Um (m.s ⁻¹)	12,78			Φ (W)	43,01
β (°C ⁻¹)	0,00340	β (°C ⁻¹)	0,00226	Pla	10844736	Re	243809,94				
μ (Pa.s)	1,83313E-05	μ (Pa.s)	0,0000147	Nu	30,41	Nu	635,55				
ν (m ² .s ⁻¹)	1,53337E-05	ν (m ² .s ⁻¹)	3,1343E-06	hair (W.m ⁻² .K ⁻¹)	4,60	hvap (W.m ⁻² .K ⁻¹)	350,29				
Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1003,2	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4180	Rair (K.W ⁻¹)	0,40983	Reau (K.W ⁻¹)	0,01520	Rtube (K.W ⁻¹)	0,00029	Rcalo (K.W ⁻¹)	3,29471
λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0255	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0330								
Pr	0,72	Pr	1,86								
		qm (kg.s ⁻¹)	0,168								
μ avec (Pa.s)				0,0000122							
Paramètres physiques sans calorifuge				Calcul du flux perdu sans calorifuge							
air		vapeur d'eau		détermination de hair		détermination de heau					
ρ (kg.m ⁻³)	1,02	ρ (kg.m ⁻³)	4,67	Gr	42684301	Um (m.s ⁻¹)	12,78			Φ (W)	544,03
β (°C ⁻¹)	0,00287	β (°C ⁻¹)	0,00226	Pla	30732697	Re	243809,94				
μ (Pa.s)	2,07108E-05	μ (Pa.s)	0,0000147	Nu	39,46	Nu	648,71				
ν (m ² .s ⁻¹)	2,03526E-05	ν (m ² .s ⁻¹)	3,1343E-06	hair (W.m ⁻² .K ⁻¹)	6,75	hvap (W.m ⁻² .K ⁻¹)	357,55				
Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1006,010638	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4180	Rair (K.W ⁻¹)	0,27892	Reau (K.W ⁻¹)	0,01489	Rtube (K.W ⁻¹)	0,00029	Rcalo (K.W ⁻¹)	0
λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0289	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0330								
Pr	0,72	Pr	1,86								
		qm (kg.s ⁻¹)	0,168								
μ sans (Pa.s)				0,0000141							
Dimensions											
dint (m)	0,0598										
dext (m)	0,065										
Dint (m)	0,165										
Dext (m)	0,169										
Ecalo (m)	0,05										
λ.coolant (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	45										
λ.calorifuge (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,045										
L (m)	1										
				Φ pertes (W)		501,02					
				Φ pertes (kWh/jour)		12,02					
				prix du gaz (euros)		50					
				coût annuel (euros)		210,43					

Annexe n°14 : Fichier programme Perte thermique chauffage

Perte thermique EC Chauffage									
Paramètres physiques									
Tint (°C)	50								
Tparoi sans calo (°C)	48								
Tparoi avec calo (°C)	30,5								
Tair (°C)	25								
Tfilm ext sans (°C)	36,50								
Tfilm ext avec (°C)	27,75								
Paramètres physiques avec calorifuge		Calcul du flux perdu avec calorifuge							
air		eau chaude		détermination de hair		détermination de heau		$\dot{\Phi}$ (W) 20196,2	
ρ (kg.m ⁻³)	1,18	ρ (kg.m ⁻³)	989,08	Gr	9024820	Um (m.s ⁻¹)	6,30		
β (°C ⁻¹)	0,00332	β (°C ⁻¹)	0,00309	Ra	6497870	Re	1533885,49		
μ (Pa.s)	1,8656E-05	μ (Pa.s)	0,00051	Nu	26,76	Nu	3464,24		
ν (m ² .s ⁻¹)	1,5955E-05	ν (m ² .s ⁻¹)	5,0281E-07	hair (W.m ⁻² .K ⁻¹)	2,97	heau (W.m ⁻² .K ⁻¹)	18143,24		
Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1003,2	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4180	Rair (K.W ⁻¹)	0,00023	Reau (K.W ⁻¹)	7,02896E-08		
λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0260	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,6536			Rtube (K.W ⁻¹)	7,062E-08	Rcalo (K.W ⁻¹)	0,00101
Pr	0,72	Pr	3,25						
		qm (kg.s ⁻¹)	76,22						
Paramètres physiques sans calorifuge		Calcul du flux perdu sans calorifuge							
air		eau chaude		détermination de hair		détermination de heau		$\dot{\Phi}$ (W) 154729,9	
ρ (kg.m ⁻³)	1,14	ρ (kg.m ⁻³)	989,08	Gr	33231786	Um (m.s ⁻¹)	6,30		
β (°C ⁻¹)	0,00323	β (°C ⁻¹)	0,00309	Ra	23926886	Re	1533885,49		
μ (Pa.s)	1,9078E-05	μ (Pa.s)	0,00051	Nu	37,07	Nu	3426,09		
ν (m ² .s ⁻¹)	1,6761E-05	ν (m ² .s ⁻¹)	5,0281E-07	hair (W.m ⁻² .K ⁻¹)	4,21	heau (W.m ⁻² .K ⁻¹)	17943,40		
Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1003,2	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4180	Rair (K.W ⁻¹)	0,00016	Reau (K.W ⁻¹)	7,10724E-08		
λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0266	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,6536			Rtube (K.W ⁻¹)	7,062E-08	Rcalo (K.W ⁻¹)	0
Pr	0,72	Pr	3,25						
		qm (kg.s ⁻¹)	76,22						
Dimensions									
dint (m)	0,1248								
dext (m)	0,13								
Dint (m)	0,23								
Dext (m)	0,234								
Ecalo (m)	0,05								
λ_{air} (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	46								
$\lambda_{\text{calorifuge}}$ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,045								
L (m)	2000								
				$\dot{\Phi}$ pertes (W)		134533,69			
				$\dot{\Phi}$ pertes (kWh/jour)		3228,81			
				prix du gaz (euros)		50			
				coût annuel (euros)		56504,15			

Résumé

J'ai réalisé mon stage au sein de l'entreprise Michelin à GOLBEY. Le 1^{ier} objectif de mon stage est de calculer les débits d'eau chaude nécessaire au remplacement de la vapeur d'eau car cette vapeur est produite par des chaudières datant de 1969. En effet, l'eau chaude qui remplace la vapeur doit apporter les mêmes calories que cette dernière pour permettre le chauffage de l'eau chaude qui sert soit au lavage du fil, soit à la montée en température du fil. Un programme a été réalisé pour permettre à l'opérateur de faire varier les paramètres physiques et ainsi obtenir le débit souhaité. La suite de ce 1^{ier} objectif sera de savoir quel procédé va apporter l'eau (soit par des chaudières eau chaude, soit par un groupe extérieur qui fournit l'eau).

Le 2^{ième} objectif de mon stage est d'identifier et d'analyser les pertes thermiques au sein de l'usine. Mon étude s'est axée sur les canalisations qui n'avaient pas de calorifuge. J'ai réalisé différents programme permettant de quantifier ces déperditions de chaleur.

Calculation of heat exchangers, method for passing the steam water to hot water, and studies on the energy savings

I did my internship in the company MICHELIN GOLBEY. The 1st aim of the internship is to calculate the flow of hot water needed to replace the steam water because the steam is produced by boilers of 1969. indeed, the hot water which replaces the steam must provides the same calories as the latter to allow heatig of the hot water is used to wash the wire, or the température rise of the wire. A programm was created to allow the operator to vary the physical and people obtain the desired rate parameters. Following the 1st aim will be to know what process will bring water (either by hot water boiler, or by an outside group that provides water).

The 2nd aim of my internship is to identify and analyze the heat losses in the factory. My study focused on the pipes which had no heat insulator. I realized different program to quantify the heat loss.