

---

## Analyse d' un réseau vapeur en industrie

**Auteur :** Fouarge, Hubert

**Promoteur(s) :** Dewallef, Pierre

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master en ingénieur civil électromécanicien, à finalité spécialisée en énergétique

**Année académique :** 2016-2017

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/2527>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



## **Analyse d'un réseau vapeur en industrie**

Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées

Hubert Fouarge

Sous la direction de Pierre Dewallef et de Philippe Paquay

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master en  
« Ingénieur Civil électromécanicien »

Année académique 2016-2017

## Contenu

I.	Introduction .....	7
a)	Contexte historique .....	7
b)	Structure du rapport.....	8
c)	Contexte .....	8
i)	La sidérurgie .....	8
ii)	ArcelorMittal.....	11
d)	Formulation du problème .....	11
e)	Principes de fonctionnement .....	13
i)	Principe d'un réseau vapeur.....	13
ii)	Règles de bonnes pratiques.....	16
f)	Usine et réseaux de Tilleur.....	18
i)	Réseau du site de Tilleur.....	18
ii)	Fonctionnement de l'usine .....	21
iii)	Fonctionnement du chauffage des halls.....	25
iv)	Evolution du réseau et des consommateurs .....	25
g)	Analyse préliminaire .....	28
i)	Ecoulement dans les conduites .....	28
ii)	Déperditions dans les conduites.....	28
iii)	Consommation et production de vapeur .....	29
iv)	Pistes obtenues.....	29
II.	Analyses.....	31
a)	Nomenclature.....	31
i)	Abréviations.....	31
ii)	Indices .....	32
b)	Vapeur pure et mélange diphasique .....	33

i)	Ecoulement dans les conduites .....	33
ii)	Ecoulement à travers une vanne .....	37
iii)	Postes de détente et vanne de régulation.....	39
iv)	Energie calorifique libérée par kg lors de la condensation .....	43
v)	Conclusion de la section .....	44
c)	Consommations des utilisateurs .....	45
i)	Traitement des eaux.....	45
ii)	DKP-2.....	45
iii)	TD-4C.....	50
iv)	TD-5C.....	50
v)	Recuit continu .....	51
vi)	Skin-pass.....	54
vii)	Etamage .....	54
viii)	Evaluation des déperditions de chaleur dans les conduites.....	59
ix)	Consommation du processus de fabrication : .....	59
x)	Conclusion de la section .....	60
d)	Chauffage des halls.....	61
i)	Ordres de grandeur et fonctionnement en été.....	61
ii)	Mesure .....	61
iii)	Conservation de l'énergie .....	62
iv)	Besoin de chauffage et consommation de vapeur .....	67
v)	Conclusions de la section .....	67
e)	Equilibre entre production et consommation.....	68
f)	Conclusion des analyses .....	70
i)	Sources de problèmes .....	70
ii)	Propositions de solutions.....	70

III.	Modélisation dans LMS Amesim .....	72
a)	Eléments du réseau .....	72
i)	Conduites.....	72
ii)	Purgeurs.....	74
iii)	Aérothermes .....	76
iv)	Utilisateurs.....	76
v)	Postes de détente .....	76
vi)	Chaudières .....	77
vii)	Remarques.....	79
b)	Hypothèses .....	79
c)	Modèle.....	80
d)	Calibration .....	81
e)	Validation.....	81
i)	Validation 1.....	81
ii)	Validation2.....	82
f)	Simulations.....	83
i)	Scenarii .....	83
ii)	Consommations process maximale et chauffage modérée .....	85
iii)	Consommations process et chauffage maximales .....	86
iv)	Consommations process maximale et chauffage trop élevée.....	87
v)	Consommation process au maximum d'été .....	87
vi)	Réactivation de la désurchauffe .....	88
vii)	Première solution.....	88
viii)	Seconde solution.....	89
ix)	Changement de vanne de régulation .....	89
g)	Simulations, analyses et réalité .....	89

IV.	Conclusion .....	91
V.	Bibliographie .....	93

## **Remerciements:**

Je souhaiterais remercier mes promoteurs, Pierre Dewallef et Philippe Paquay pour leur soutien et leurs conseils, Eric Bourse, Geoffrey Devos, Rafael Leon Blanco, Ignas Curto et Aurélien Salme pour leur soutien sans faille et leur constante collaboration ainsi que Lilo Mungiovi et Marc Perrin pour le temps qu'ils m'ont consacré.

# I. Introduction

## a) Contexte historique

La sidérurgie est présente dans le bassin Liégeois depuis le 19<sup>ème</sup> siècle, lorsque John Cockerill installa sa première usine d'acier afin de produire l'acier nécessaire à la construction de ses métiers à tisser en 1813. Dans les décennies ayant suivies l'installation de cette usine, la sidérurgie liégeoise connut un essor qui dura jusqu'aux années 80. A ce moment, la plupart des activités sidérurgiques du bassin liégeois se sont regroupées dans la même société, Cockerill-Sambre.

En 1998, l'actionnaire majoritaire de la société (la région wallonne) l'a vendue au groupe français Usinor. Usinor a lui-même ensuite fusionné avec les groupes Arbed et Aceralia pour former Arcelor. L'orientation stratégique du groupe ainsi formé fut telle que la décision fut prise de fermer un des deux haut-fourneaux de Liège (ce qui fut fait en 2005) et la ligne à chaud (ce qui a été annulé par ArcelorMittal en 2008). Cette décision a été prise dans le but de concentrer la production sur les sites les plus performants. [1]

En 2006, Arcelor a été acheté par la société Mittal Steel. Cela a mené à leur fusion et à la création du groupe sidérurgique ArcelorMittal. Celle-ci été accompagnée de la réouverture d'un haut-fourneau. Suite à une crise économique et des tensions entre la direction du groupe et les délégations syndicales, de nouvelles fermetures de lignes ont été effectuées entre 2011 et 2013. [1] Elles ont laissé à Liège la ligne à froid de Tilleur, la ligne de recuit continu de Kessales, la ligne d'électro-zingage de Marchin ainsi que les lignes de galvanisation de Flémalle et Ivoz-Ramet.

Comme on s'y attend après ce bref résumé de l'histoire de la sidérurgie liégeoise, les usines actives actuellement ont dû faire face à de majeurs changements de leurs fonctionnements suite à la fermeture de certains sites. Cela a eu des conséquences sur le fonctionnement des sites toujours actifs qui en dépendait.

Notamment, plusieurs sites étaient alimentés par de la vapeur produite à l'aide de gaz de cokerie, lui-même produit lors de la production de la coke nécessaire au fonctionnement des hauts-fourneaux. Or, ces derniers sont désormais inactifs. On ne produit donc plus de vapeur de cette façon sur les sites de Liège.

Comme la plupart des processus industriels, le traitement de l'acier nécessite d'alimenter certains éléments du processus de fabrication (bacs d'huile ou de dégraissant, sécheurs à air chaud, aérothermes, fours ...) en chaleur. Pour ce faire, il est nécessaire d'acheminer la chaleur aux éléments en question.

La chaleur nécessaire au bon fonctionnement d'un processus de fabrication peut être acheminée sous différentes formes, notamment sous forme :

- d'électricité (qu'on convertira en chaleur à l'aide de résistances électriques)
- de gaz naturel (qui fournira de la chaleur par combustion)
- de vapeur (de laquelle on tirera la chaleur en la refroidissant ou en la condensant)
- ou d'eau chaude (qui dégagera de la chaleur en se refroidissant).



Au site ArcelorMittal de Tilleur, la chaleur nécessaire au chauffage des halls et au bon fonctionnement du processus de fabrication est principalement acheminée par de la vapeur et du gaz naturel. Suite au changement de la source de vapeur du réseau ayant suivi la fermeture du haut-fourneau, le réseau de vapeur s'est montré incapable d'acheminer suffisamment de chaleur par périodes de grand froid.

Le but de ce travail est d'identifier les causes de cette incapacité ainsi que des pistes de solutions. Il est principalement constitué de quelques analyses visant à comprendre le comportement

- du réseau de vapeur du site
- des échanges de chaleur du bâtiment
- des différents utilisateurs de vapeur.

## **b) Structure du rapport**

Ce rapport est structuré comme suit :

- Pour commencer, le processus de fabrication de l'acier et l'entreprise ArcelorMittal sont brièvement présentés. Cela a pour but que le lecteur se fasse une idée du contexte dans lequel ce travail a été réalisé.
- Ensuite, le problème à résoudre est formulé de manière explicite.
- La section suivante a pour sujet les principes de fonctionnement d'un réseau vapeur et les règles de bonnes pratiques généralement appliquées.
- La situation et le fonctionnement actuels du réseau et de l'usine sont alors présentés.
- Une fois que cela est fait, une analyse préliminaire du réseau et du bâtiment est réalisée pour orienter les pistes de solutions
- Enfin, les analyses détaillées sont effectuées et de premières conclusions quant aux sources de problèmes et aux solutions possibles sont tirées.
- Une fois cela réalisé, des simulations du réseau sont réalisées sur base d'une implémentation simplifiée de ce dernier dans un programme spécialisé (LMS Amesim). Ces simulations permettent de valider ou d'infirmer les conclusions intermédiaires formulées ainsi que de vérifier l'adéquation des solutions proposées.
- Ce rapport se termine par une conclusion tirée des analyses et simulations identifiant les sources de problèmes et des propositions de solutions.

## **c) Contexte**

### ***i) La sidérurgie***

L'acier est un alliage métallique constitué essentiellement de fer et de carbone. Il est obtenu principalement de deux manières différentes. Il s'agit d'une part du recyclage de l'acier de récupération (notamment dans des fours électriques) et d'autre part de la réduction du minerai de fer dans des hauts-fourneaux.

#### ***(1) Du minerai au demi-produit***

La réduction du minerai de fer est réalisée à l'aide de monoxyde de carbone produit par la combustion de coke (combustible obtenu par la pyrolyse de charbon dans une

cokerie). En pratique, ce qui sort des haut-fourneaux est de la fonte qui sera ensuite convertie en acier. La conversion en acier est réalisée par insufflation d'oxygène pur qui brûle les éléments indésirables dans un convertisseur.

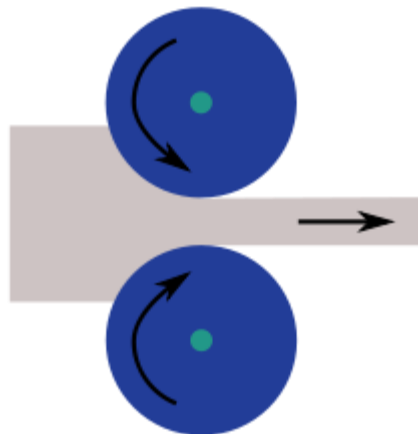
Après avoir été converti, l'acier est mis à nuance (on lui enlève les derniers éléments indésirables et on lui ajoute des éléments d'alliage) et amené à la température adéquate pour la coulée.

L'acier peut être coulé en continu, auquel cas il est coulé dans une lingotière en cuivre. Il commence à se solidifier dans cette dernière puis est tiré par un jeu de rouleaux. Il peut également être coulé en lingot, auquel cas il sera coulé dans des moules en fontes.

Le résultat de la coulée est appelé un demi-produit. Si la coulée se fait en lingot, on obtient des lingots. Ceux-ci sont alors laminés pour obtenir des brames (blocs d'acier de formes parallélépipédiques de grandes dimensions). Si la coulée se fait en continu, on obtient directement des brames.

## (2) Du demi-produit au produit fini

Les brames sont ensuite laminées à chaud afin d'obtenir soit des plaques soit des bobines de tôle épaisse. Le laminage à chaud consiste en l'écrasement de la tôle à haute température par et entre des rouleaux dans l'objectif de diminuer l'épaisseur de la tôle. L'opération en question est illustrée dans le schéma [2] suivant.



La haute température de la tôle la rend plus facile à déformer mais provoque également la formation d'une couche d'oxyde à la surface du produit.

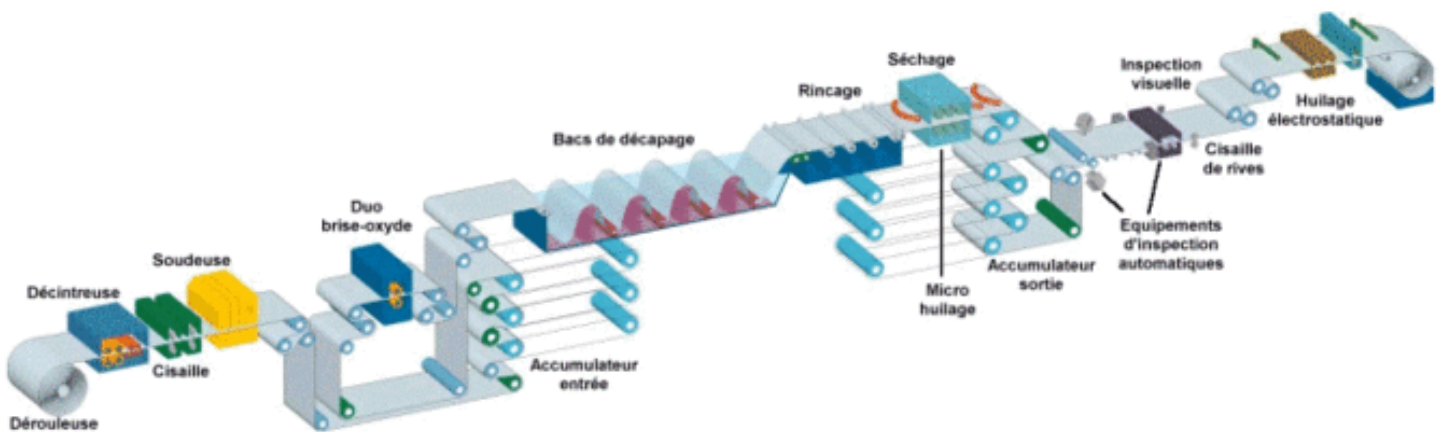
Une cage de laminoir est constituée d'un jeu de cylindres appuyant sur une paire de cylindres de travail qui écrasent la tôle. Le rôle du jeu de cylindre est de limiter la déformation que les cylindres de travail subissent.

Un laminoir est constitué d'une ou plusieurs cages. Si plusieurs cages se succèdent, on parle d'un train de laminage. Si le produit est pris dans plusieurs cages en même temps, on parle d'un tandem. Le laminage à froid est utilisé pour réduire plus loin l'épaisseur des bobines (jusqu'à 0,16 mm). Le fait de laminier à froid permet d'éviter l'oxydation

En général, on lamine à froid après le laminage à chaud suivi du décapage de la tôle. Il est important que la tôle ne surchauffe pas (ce qui changerait ses propriétés) et ne soit pas griffée lors de son laminage à froid. La tôle est donc aspergée de lubrifiant afin d'éviter les griffes et d'un mélange d'eau et d'huile (appelé eau blanche ou coolant) afin d'éviter les surchauffes.

Le laminage skin-pass, quant à lui, a pour but d'améliorer l'état de surface et les caractéristiques mécaniques de l'acier.

Après avoir été laminé à chaud, l'acier doit passer par une décaperie ayant pour but de retirer la couche d'oxyde. Une décaperie commence par un brise oxyde dans lequel on dégrade préalablement la couche d'oxyde par flexion alternée, traction ou grenailage. Ce dernier est suivi de bacs d'acide dans lesquels la bande passe afin d'attaquer chimiquement le reste de la couche d'oxyde. Pour finir, il y a des bacs de rinçage ainsi qu'un sécheur évitant de laisser rouiller l'acier. Une décaperie typique fonctionne selon le schéma [3] suivant:



On y remarque le brise-oxyde, les bacs d'acide, le rinçage ainsi que le sécheur. A la sortie de la décaperie, la bobine a été débarrassée de sa couche d'oxyde.

Après avoir produit la bobine, on peut éventuellement procéder à un recuit de l'acier dans le but d'améliorer ses propriétés. Le recuit facilite la relaxation des contraintes accumulées dans l'acier suite aux déformations plastiques qu'il a subies. Un recuit continu consiste en un passage de la bande d'acier dans différents fours à hautes températures (de l'ordre de 700°C) visant à rendre l'acier plus ductile.

On peut également déposer une fine couche d'autres métaux (comme du zinc ou de l'étain) sur la tôle dans le but de lui donner certaines propriétés (protection contre la corrosion, brillance, ...). En particulier, l'étamage est un traitement de surface de l'acier consistant en l'application d'une couche d'étain sur la bande ayant pour but de rendre l'acier moins sensible à la corrosion.

## **ii) ArcelorMittal**

ArcelorMittal est un groupe sidérurgique actif à l'échelle mondiale. Ses activités incluent la production d'acier et l'extraction de minerai de fer et de charbon. Etant le plus grand producteur d'acier du monde, ArcelorMittal est présent dans plus de 60 pays et emploie de l'ordre de 210 000 personnes. Le groupe est capable de produire jusqu'à 114 millions de tonnes d'acier par an et en a expédié 83,9 millions en 2016. Il représente l'avant-garde du développement de l'acier avec 12 centres de recherche majeurs et un budget recherche de 239 millions de dollars en 2016.

Le groupe est divisé en différentes régions avec une spécialisation de chaque région en un type de produit. Leurs produits incluent des produits plats tels que des brames et des bobines (laminées à chaud ou à froid) ainsi que des produits longs tels que des fils, des tuyaux, ...

La branche ArcelorMittal Europe produit aussi bien des produits long que des produits plats et a de l'ordre de 80 000 employés dans 16 pays différents dont la Belgique, la France, la Roumanie et l'Allemagne.

A Liège, ArcelorMittal fabrique des aciers plats au carbone destiné aux secteurs de l'automobile, de l'industrie, des équipements domestiques ainsi que de l'emballage. Les sites d'ArcelorMittal Liège sont situés à Flémalle, Kessales et Tilleur. Jusqu'en 2013, l'acier était produit au haut-fourneau d'Ougrée. Entretemps, les hauts-fourneaux Liégeois ont été arrêtés. L'acier traité à Tilleur est désormais produit à Dunkerque et à Gand et est acheminé par des camions.

## **d) Formulation du problème**

Dans ce chapitre, nous définissons le sujet de ce TFE et présentons les suggestions et informations fournies par l'entreprise au début du stage associé à ce dernier.

Comme il a été dit dans l'introduction, le but de ce TFE est l'identification des sources de problèmes d'alimentation en vapeur du processus de fabrication ainsi que de pistes de solution. Les problèmes en question sont apparus suite au changement de la source de vapeur du réseau ayant suivi la fermeture du haut-fourneau de Seraing. Les événements suivants ont précédé l'arrivée des problèmes :

- A l'origine, le réseau vapeur du site était alimenté par de la vapeur produite en récupérant les gaz de cokerie.
- Suite à la fermeture des hauts-fourneaux, des chaudières ont été installées au site de Tilleur afin de fournir la vapeur nécessaire au processus de fabrication de l'acier et au chauffage des halls.
  - On a d'abord installé 3 chaudières. On a alors constaté que le réseau était par moment incapable d'alimenter les utilisateurs en vapeur.
  - Une quatrième chaudière a donc été installée.

Alors que le haut-fourneau fournissait de la vapeur surchauffée à haute pression, les chaudières choisies produisent de la vapeur saturée à plus basse pression. Désormais, les

conduites acheminement de l'eau liquide mélangée à la vapeur. Ceci est visible aux différents points de purge où l'eau est évacuée des conduites.

Voici ce qui est connu des circonstances lors desquelles l'alimentation des utilisateurs en vapeur fut insuffisante:

- Les problèmes consistent en un manque de puissance calorifique amenée par la vapeur aux utilisateurs
- Ils se sont présentés lors de périodes de grand froid.
- Ils étaient particulièrement fréquents lorsqu'il n'y avait que 3 chaudières.
- La pression de la vapeur fournie aux utilisateurs chutait
- En particulier, la température des bacs d'acide de la décaperie descendait en dessous de leur température de consigne, ce qui les empêchait de décaper correctement la bande d'acier.

L'entreprise a demandé une analyse détaillée de la consommation des 3 plus grands consommateurs ainsi qu'une mise en évidence des différences de fonctionnement entre un réseau de vapeur saturée et un réseau de vapeur surchauffée.

La piste suggérée par l'entreprise au début du stage lié à ce TFE était que la présence d'eau et la disparition de la surchauffe de la vapeur avaient mené aux problèmes constatés, notamment par l'augmentation des pertes de charge dans les conduites. La solution proposée avec cette suggestion était de trouver les points stratégiques où installer de nouveaux points de purge permettant de garder la fraction d'eau dans les conduites en dessous d'une certaine valeur.

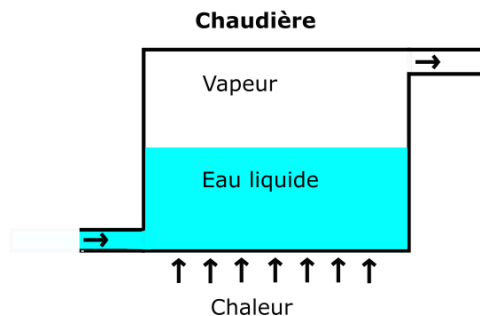
## e) Principes de fonctionnement

Maintenant, présentons les grandes lignes du fonctionnement des réseaux vapeur en général et de l'usine et son réseau vapeur en particulier. Une fois cela réalisé, nous aurons la possibilité de faire une première analyse simplifiée du réseau afin de nous faire une idée des différentes pistes à explorer pour résoudre la problématique.

### i) *Principe d'un réseau vapeur*

Un réseau vapeur fonctionne selon les principes suivants.

- La vapeur est produite dans une (ou plusieurs) chaudière.
- La chaudière est un volume contenant un mélange de vapeur et de liquide que l'on met en contact avec des gaz de combustion chauds (au travers des échangeurs de chaleurs). L'eau liquide s'évapore alors en recevant de la chaleur des gaz, faisant monter la pression dans le volume de la chaudière.



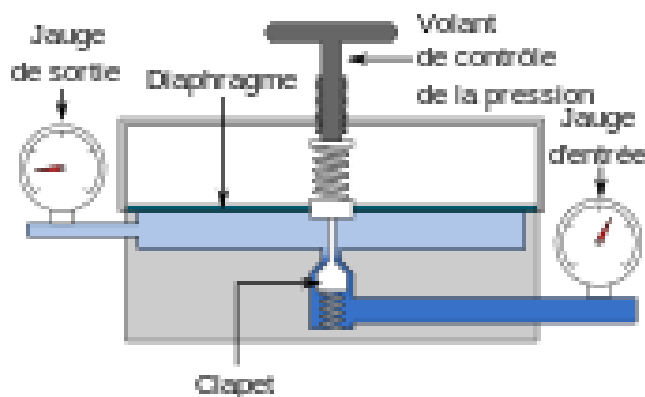
- Le volume en question a une entrée par laquelle de l'eau liquide entre et une sortie par laquelle la vapeur sort
  - La sortie de la chaudière mène au réseau qu'on souhaite alimenter. On mesure la pression à la sortie
  - Connaissant la pression que l'on souhaite obtenir, on régule la quantité de gaz que l'on brûle de manière à maintenir la pression en sortie proche de cette pression de consigne.
  - La chaudière est donc le point de pression le plus haut en régime établi (vu qu'elle est la source de pression du réseau tout entier)
  - Elle 'pousse' donc de la vapeur dans le réseau.
- Les conduites du réseau mènent à des vannes. Ces vannes séparent le réseau à haute pression de réseaux à plus basse pression (que ce soient des réseaux secondaires ou de décharge).
    - Si une vanne est ouverte, la différence de pression à ses bornes cause un écoulement à travers elle. La pression du réseau basse pression étant (en fonctionnement normal) plus faible que celle du réseau haute pression, le réseau basse pression 'poussera' moins que le réseau haute pression. La vapeur quittera donc le réseau haute pression pour s'écouler dans le réseau basse pression.
    - Cet écoulement aura tendance à faire chuter la pression à l'endroit du réseau haute pression où se situe la vanne.
    - Intuitivement, on peut se dire que la pression du réseau basse pression est plus faible que la pression du réseau principal car elle est causée par cette dernière. La basse pression résulte d'un équilibre entre un apport de pression

par le réseau haute pression et une perte de pression due à la consommation de vapeur par le processus de fabrication.

- Dans notre cas, il y a 3 types de vannes en contact avec le réseau.
  - Celles des postes de détente
    - Ces derniers ont pour but de maintenir la pression dans les réseaux basse pression proche de sa valeur de consigne.
  - Les purges de lignes
    - Celles-ci ne s'ouvrent qu'au contact de liquide et ont pour but de l'évacuer à travers le réseau à condensats ou les égouts.
  - Celles des aérothermes
    - Ceux-ci ont pour but de condenser la vapeur pour chauffer les halls et évacuer les condensats ainsi obtenus par le réseau à condensat.
- Un aérotherme est une combinaison d'un échangeur de chaleur et d'un ventilateur. L'air est ventilé contre l'échangeur puis vers la zone à réchauffer. Dans le cas d'un aérotherme à vapeur, l'échangeur de chaleur est en contact avec de la vapeur qui se condense à son contact puis est évacuée par un purgeur présent à son port de décharge.
- Les postes de détentes mènent aux réseaux des utilisateurs. Les débits les traversant sont déterminés par les vannes de régulation.
  - Ces dernières séparent les réseaux basse pression de tanks ou d'échangeur de chaleur à pression atmosphérique. La pression dans ces derniers 'pousse' moins fort que celle des réseaux basse pression, la vapeur s'écoulera donc vers le tank (ou l'échangeur). Cela aura tendance à faire chuter la pression dans le réseau basse pression.
    - Le principe de la vanne de régulation est simple, on lui impose une pression en amont et en aval et elle s'ouvre plus ou moins en fonction de si elle veut augmenter ou diminuer son débit.
    - Elle sera donc dirigée par un régulateur en fonction de certaines valeurs dans le processus de fabrication (généralement la température de bacs de liquide).
    - Elles sont généralement situées après les détendeurs, ce qui leur permet de ne pas être influencées par les variations de pression du réseau.
  - Cette chute de pression doit être compensée par la poussée du réseau haute pression. Il faut donc que la vanne le séparant du réseau basse pression soit tout juste assez ouverte pour que la basse pression soit proche de la pression de consigne.
    - L'ouverture adéquate dépend du débit que les vannes de régulation laissent passer.
      - Ce dernier est fixé par les besoins des utilisateurs.

- C'est donc le rôle des postes de détente de maintenir l'ouverture adéquate. Un poste de détente est constitué de divers capteurs et d'un détendeur.
  - Un détendeur est un organe servant à maintenir la pression à son aval constante. En pratique, cela est réalisé en connectant une vanne régulée à un diaphragme en contact avec le fluide détendu.
  - Un ressort s'oppose à la poussée du fluide. L'équilibre entre la poussée du ressort et la pression du fluide détermine la position du diaphragme, donc l'aire d'ouverture de la vanne.
  - Ainsi, si la pression en aval est plus basse que la pression de consigne, le ressort a tendance à refermer la vanne, diminuant donc la pression en aval. Inversement, si la pression en aval est plus grande que la pression de consigne, la force due à la pression est plus forte que celle due au ressort, elle a donc tendance à repousser le diaphragme et à fermer la vanne, diminuant ainsi la pression en aval.

Ceci est illustré dans le schéma [4] suivant:

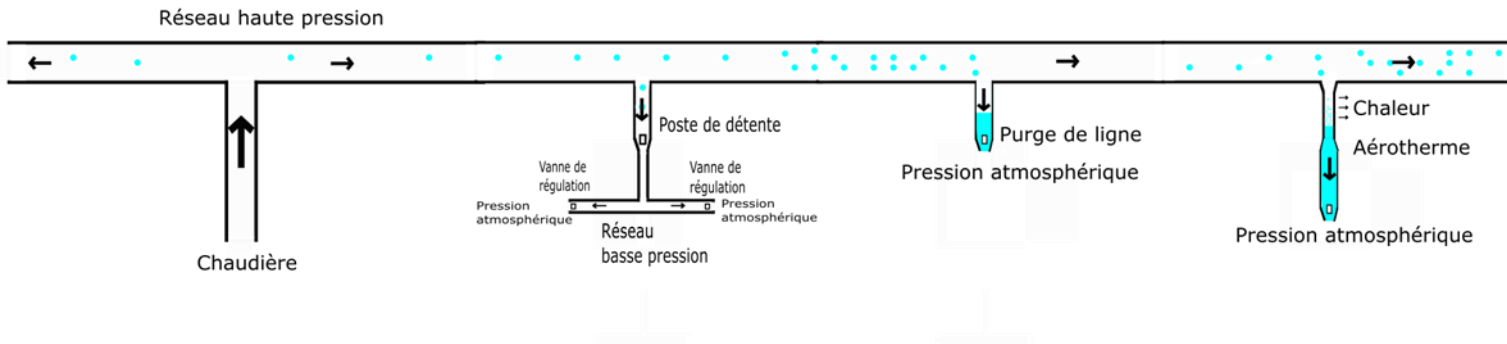


On y remarque le volant de contrôle permettant de fixer la pression de consigne ainsi que le diaphragme sur lequel le ressort et le fluide poussent en opposition.

- Pour un état (pression et enthalpie) en amont d'une vanne et une aire d'ouverture donnés, il existe une pression aval en dessous de laquelle le débit à travers cette vanne n'augmentera plus même si la pression aval continue à diminuer. Cela est dû à ce qu'on appelle un écoulement choké [5]. Ce phénomène est typique de l'écoulement d'un fluide compressible.
  - A cause de cet effet, une détente régulée vers une pression plus basse que la pression en question se fera en plusieurs étapes. On aura donc un détendeur à plusieurs étages.



Le schéma suivant illustre la structure d'un réseau vapeur contenant les éléments mentionnés ci-dessus.



On y voit:

- La chaudière 'poussant' la vapeur dans le réseau
- Un poste de détente dont le détendeur fait varier son ouverture afin de réguler la pression dans le réseau secondaire
- Les vannes de régulation régulant le départ de vapeur du secondaire et menant à des volumes à pression atmosphérique
- Une purge de ligne se remplissant d'eau puis l'évacuant dans un réseau à pression atmosphérique
- Un aérotherme condensant la vapeur puis l'évacuant dans un réseau à pression atmosphérique

### **ii) Règles de bonnes pratiques**

La plupart des réseaux de vapeur font partie de 2 catégories de réseaux[6], à savoir :

- les réseaux à ligne-tronc,
  - dans lesquels la vapeur est amenée de la chaudière aux consommateurs par une ligne de grand diamètre. Au fur et à mesure que des branches latérales sont passées, le diamètre de la conduite principale est réduit afin de tenir compte de la diminution du besoin de capacité de transport.
- les réseaux à lignes principales et d'alimentation,
  - où le réseau reçoit la vapeur d'une conduite principale haute pression venant directement de la chaudière en prenant avantage de la chute de pression disponible pour transmettre de hauts débits du réseau haute pression vers le réseau basse pression.

Actuellement, la plupart des réseaux vapeur sont des réseaux à recirculation des condensats. Dans ces derniers, une fois que la vapeur s'est condensée, elle est réacheminée jusqu'à la chaudière. Cela permet de ne pas perdre l'eau et l'énergie encore présente sous forme de chaleur sensible et de pression dans cette eau. Si les condensats sont contaminés ou ne peuvent pas être réacheminé jusqu'à la chaudière, le système est de facto un système

de distribution. Les condensats sont généralement récupérés par des purgeurs qui laissent passer l'eau liquide mais pas la vapeur.[6]

Les règles de bonnes pratiques habituellement appliquées aux réseaux vapeur sont les suivantes :

- Idéalement, le trajet de la vapeur va vers le bas et les piquages se font sur la partie haute de la conduite. On évite ainsi de tirer de l'eau liquide à travers les piquages [6].
  - S'il n'est pas possible d'avoir une pente sur toute la longueur de la conduite à condensat, une pompe à condensat peut être utilisée.
- Vu que la vapeur se condense sur les parois des conduites, des purgeurs doivent être installés avant toute montée des conduites et à des longueurs intermédiaires des longues conduites.
  - Un purgeur est un dispositif ne laissant passer l'eau que sous forme liquide.
- On met également des purgeurs aux ports de décharge de certains éléments tels que les échangeurs de chaleur et les aérothermes.
- Il est recommandé d'utiliser des cônes excentrés pour faire des réductions de diamètre de conduite afin d'éviter la rétention d'eau dans la partie la plus basse du changement de section.[6]

Certains systèmes vapeur à basse pression fonctionnent sans purgeur. Toutes les conduites doivent alors être inclinées vers la chaudière si l'on souhaite récupérer les condensats. Ils retournent alors à la chaudière par gravité. Dans ce cas, la vitesse de la vapeur ne doit pas être trop grande afin d'éviter que la vapeur n'emporte de bulles d'eau qui causeraient des chocs aux changements de direction. [6]

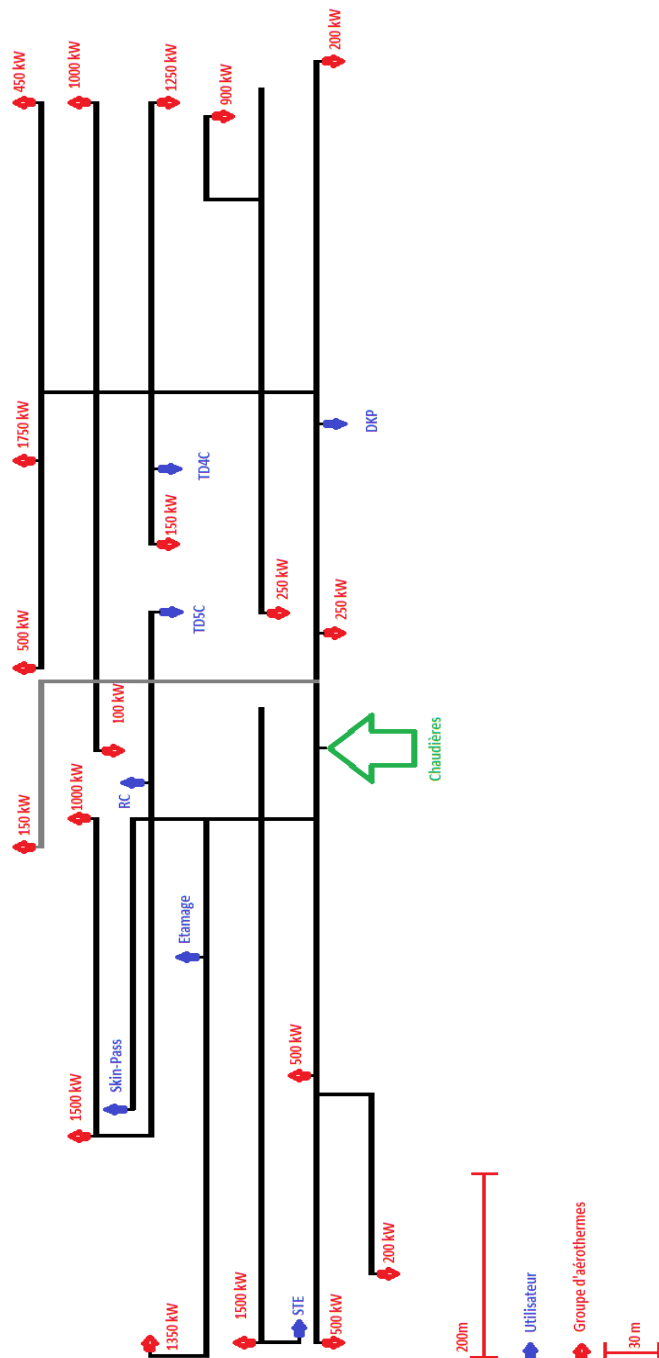
**f) Usine et réseaux de Tilleur**

Ayant maintenant une idée de comment fonctionne un réseau vapeur ainsi que des règles de bonnes pratiques de ce domaine, intéressons-nous au réseau concerné par ce travail.

**i) Réseau du site de Tilleur**

**(1) Schéma**

Voici pour commencer un plan approximatif du réseau vapeur de l'usine. Celui-ci a été fait sur base des plans disponibles au service fluide du site de Tilleur et d'observations.



On y remarque les mêmes éléments que sur le schéma de fonctionnement d'un réseau vapeur. Les réseaux secondaires et les purges de lignes n'ont toutefois pas été représentés sur ce schéma.

## (2) Points capitaux

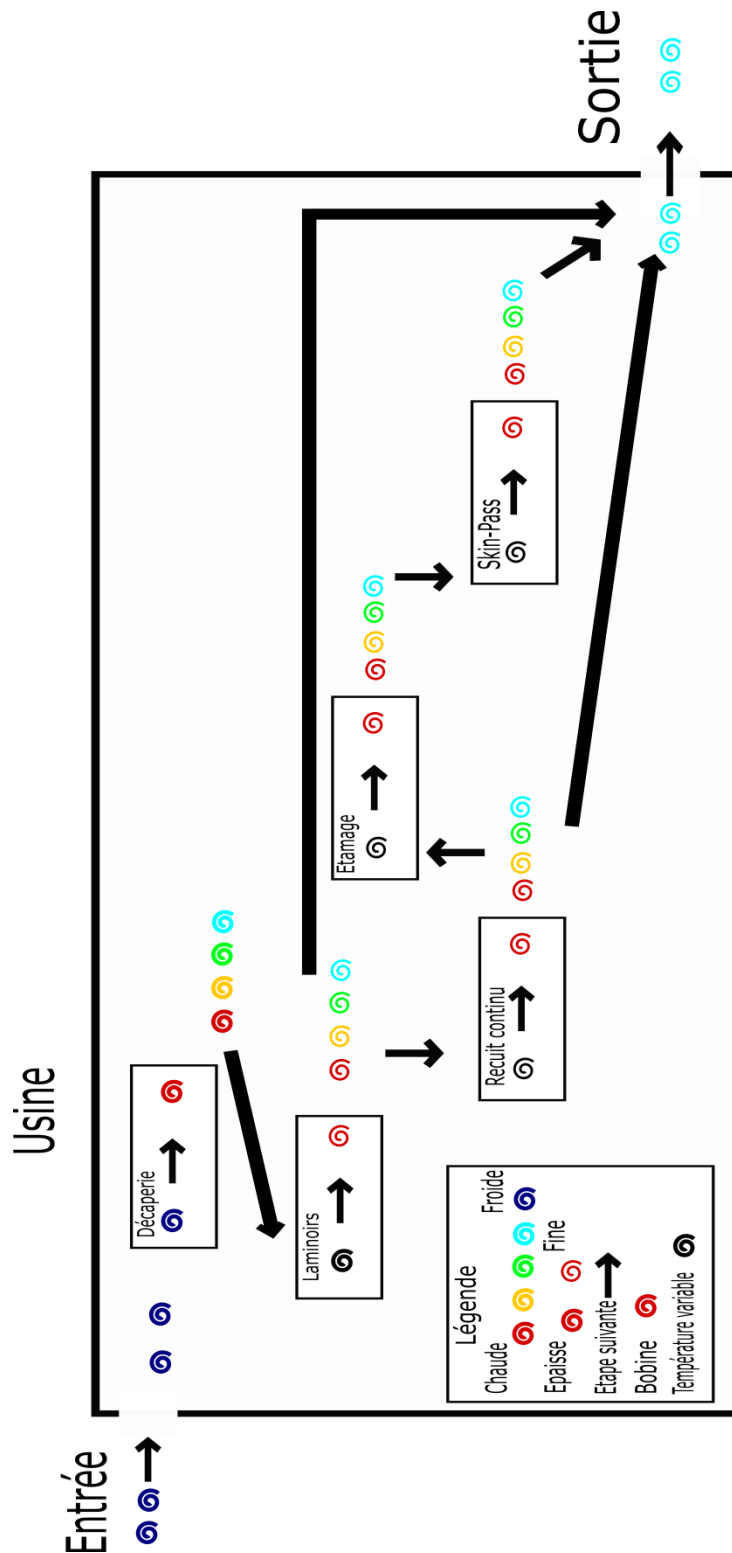
Les grands points à savoir concernant l'état et la structure du réseau sont les suivants :

- Le réseau de vapeur étudié dans ce travail se trouve entre les réseaux à ligne-tronc et les réseaux à lignes principales et d'alimentation.
  - En effet, des lignes principales quittent la chaudière et se réduisent au fur et à mesure que leurs débits diminuent suite au passage de branches secondaires. Cependant, elles mènent aux postes de détentes des utilisateurs qui mènent la vapeur au les circuits basse pression.
- Les conduites du réseau de vapeur sont parsemées de très petites branches secondaires menant à des aérothermes vapeur.
  - Un purgeur est fixé au port de décharge de chaque aérotherme afin d'évacuer la vapeur qui s'y condense. Ces aérothermes servent à chauffer les halls de l'usine.
- A l'origine, certains utilisateurs de vapeurs tels que des groupes à air pulsé et des sècheurs à air (présentés par après) étaient relié directement au réseau de vapeur, mais ils ont tous été éteints ou déconnectés.
- Le réseau ne suit qu'en partie les règles de bonnes pratiques des réseaux vapeur.
  - En particulier, les condensats ne sont pas recirculés. Ils sont simplement amenés à l'égout ou à un bac dans lequel on leurs donne le temps de se refroidir avant de les déverser à l'égout.
    - Cela est une conséquence du fait que, à l'époque où le haut-fourneau de Seraing tournait toujours, on se servait des gaz de cokerie pour produire de la vapeur. La quantité de vapeur produite était largement supérieure à celle nécessaire et était produite à un cout extrêmement bas. Minimiser la consommation d'énergie n'était donc pas une priorité.
  - Les conduites ne sont que rarement en pente dans le sens d'écoulement de la vapeur
  - Il n'y a que peu de purges au milieu des longues lignes et aux points bas.
  - Les piquages ne sont pas toujours situés sur la partie supérieure de la conduite
  - Les réductions de diamètre ne sont pas toujours faites à l'aide de cônes excentrés.
    - Cela reflète probablement le fait qu'il y avait peu de condensats dans les conduites dans le fonctionnement d'origine de l'installation, et ce grâce à la haute surchauffe de la vapeur.

- Des purgeurs sont toutefois présents en bout de ligne.
- Pratiquement toutes les conduites sont isolées afin de diminuer les déperditions thermiques.

## ii) Fonctionnement de l'usine

Considérons maintenant le parcours d'une bobine dans l'usine et détaillons le fonctionnement des différents utilisateurs de vapeur. Voici pour commencer un schéma illustrant les parcours possibles d'une bobine dans l'usine ainsi que les grandes lignes de l'évolution de l'épaisseur et la température des bobines lors de leurs parcours.

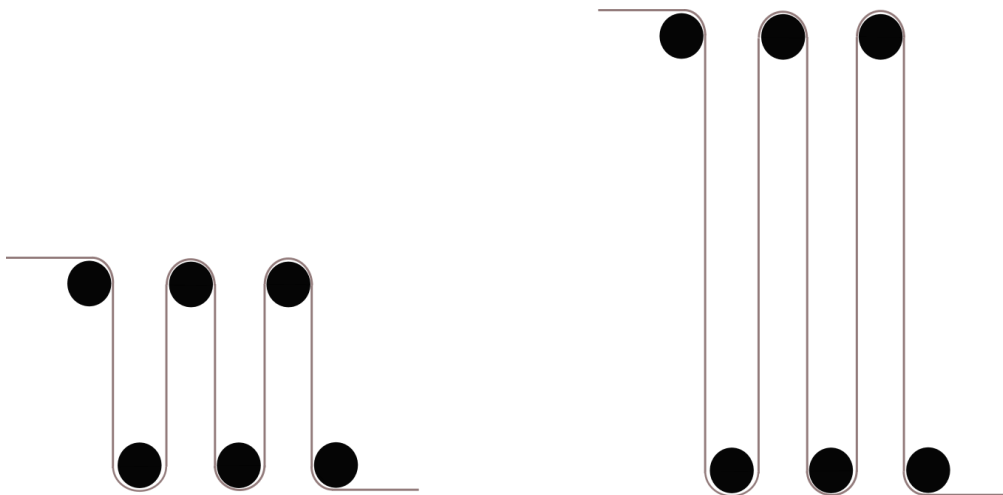


On y remarque notamment que la température des bobines est la plus froide à leur entrée dans l'usine puis augmente à chaque traitement des bobines et que l'épaisseur diminue aux laminoirs. Notons que la température des bobines entrant dans la plupart des lignes est variable.

### (1) Décaperie

En arrivant à l'usine, les bobines passent tout d'abord par la décaperie. La décaperie fonctionne en Just-in-time, elles passent donc rapidement du transport à la décaperie. Cela a pour conséquence que leur température en entrant dans les bains est fort proche de la température extérieure. Ceci a été confirmé par des mesures de température. Une fois déroulée et soudée (afin d'avoir une bande continue), elles entrent dans un accumulateur.

Un accumulateur est un enroulement de bobines permettant une avance continue malgré la non-continuité des bobines et le temps de soudage qui en résulte. Lorsqu'une bobine est disponible à son entrée, elle arrive à une vitesse supérieure à la vitesse de la bande d'acier à la sortie de l'accumulateur. L'accumulateur s'allonge donc afin de stocker plus de longueur de bande. Lorsqu'une bobine est en train d'être soudée à la précédente en amont de l'accumulateur, ce dernier se raccourcit. Cela lui permet de continuer à fournir de l'acier à sa sortie. Le fonctionnement d'un accumulateur est illustré dans le schéma suivant.



On y remarque que, lorsque les rouleaux supérieurs sont en position haute, l'accumulateur contient plus de longueur que lorsqu'ils sont en position basse. Ainsi, lorsqu'ils sont en train de descendre, l'accumulateur peut fournir de la longueur de bande à la sortie de l'accumulateur sans en recevoir à son entrée.

En sortant de l'accumulateur, la bande rentre dans un brise oxydes. Ensuite, elle passe dans 4 bacs d'acide chaud permettant d'enlever la couche de calamine. La calamine est un oxyde présent sur la bande. Ces derniers sont suivis par le rinçage, où la bande est aspergée d'eau chaude avant d'être séchée par un sécheur à air chaud. Un sécheur à air chaud est constitué d'un échangeur de chaleur au travers duquel on souffle de l'air qui chauffe puis passe contre la bande humide et cause l'évaporation de l'eau présente à la surface de la bande.

En fonctionnement, l'acide des bacs est renouvelé afin de garder les conditions chimiques adéquates.

Deux postes de détente sont présents à l'entrée de cette partie du réseau pour assurer une pression proche de la pression de consigne malgré les variations de la pression du réseau global et du débit les traversant. Les deux postes de détente étaient nécessaires à l'époque où les deux décaperies fonctionnaient. Aujourd'hui, vu qu'une seule décaperie est active, on peut se servir des deux postes de détente mais un seul est utilisé à la fois.

A la décaperie, la vapeur est utilisée pour

- chauffer les bains d'acides à l'aide d'échangeurs de chaleur
- alimenter le sécheur à air chaud en vapeur.

Les postes de détente de la décaperie alimentent également le bâtiment Coolant en vapeur. Elle y sert à maintenir des tanks de coolant et d'effluent huileux à température ainsi qu'à chauffer le bâtiment. Une particularité de ce poste de détente est qu'il est suivi d'une désurchauffe. Une désurchauffe consiste en l'injection d'eau liquide dans la vapeur afin de rendre nulle sa surchauffe. On obtient ainsi de la vapeur saturée. Elle est maintenant désactivée. Les condensats sortant des échangeurs de chaleur servent à chauffer l'eau déminéralisée du rinçage par mélange direct avec l'eau déminéralisée.

## (2) Laminaires

Après être passées à la décaperie, les bobines sont laminées à l'aide d'un (ou deux) des laminaires. Leurs épaisseurs sont donc réduites lors de cette étape. L'usine comprend 2 laminaires, à savoir un tandem 4 cages et un tandem 5 cages.

Au tandem 4 cages, la vapeur sert à maintenir des tanks de coolant, d'huile et de lubrifiant à des températures proches de leurs températures de consignes. Cela est fait en faisant passer la vapeur dans des échangeurs de chaleur en contact avec les liquides en question.

Lorsqu'il est dans un des tanks, le coolant est maintenu chaud. Quand on l'en sort, il passe par des échangeurs de chaleur en contact avec de l'eau tirée de la Meuse servant à le refroidir. Chaque cage est alimentée en coolant par sa propre pompe.

Le tandem 5 cages fonctionne de manière similaire au tandem 4 cages, à l'exception près que la chaleur ne passe pas directement de la vapeur aux liquides. En effet, la vapeur se condense dans un échangeur de chaleur vapeur-eau afin de chauffer un circuit d'eau alimentant des échangeurs de chaleur en contact avec le liquide des tanks.

## (3) Recuit continu

Après être passées aux TD-4C et/ou au TD-5C, les bobines passent au recuit continu, où elles sont chauffées afin de leur donner certaines propriétés mécaniques. Avant d'entrer dans le four, elles doivent être nettoyées. Elles passent donc dans une alternance dégraissage-brossage-dégraissage-brossage-rinçage. Les liquides de dégraissage sont stockés dans des bacs puis amenés dans de plus petits bacs dans lesquels la bande passe. Lors du



dégraissage, la tôle prend la température des bains. Elle influence donc leur consommation de chaleur.

Les bains doivent être maintenus à une température proche de celle de consigne afin d'être efficaces. Après le rinçage, la bande passe dans le four du recuit continu. Le four contient des zones à différentes températures.

Au recuit, la vapeur sert à

- alimenter
  - les 2 sécheurs à air
  - les échangeurs de chaleurs chauffant les bains de dégraissage et de rinçage
  - chauffer par mélange la préparation servant à régénérer les bains de dégraissage.

#### (4) Skin-pass

Après être passé au recuit, les bobines destinées à l'alimentaire (boîtes de conserves,...) passent au laminoir skin pass. On leur y donne la rugosité nécessaire pour avoir l'aspect recherché et les caractéristiques mécaniques souhaitées en les écrasant. La vapeur y sert à maintenir les tanks d'huile, coolant, etc à la bonne température.

La température des tanks est maintenue constante même lors d'un arrêt, sinon la viscosité des huiles les rendraient inutilisables. Les tanks sont parcourus par des serpentins que la vapeur parcourt et qui maintiennent les tanks à température.

#### (5) Etamage

Après être passée au Skin-Pass, une bobine destinée à l'alimentaire arrive à l'étamage, où on la recouvre d'une fine couche d'étain. Tout d'abord, elle passe dans des cellules (petits bains) alimentées par les bains de dégraissant.

Après être passées par les cellules de dégraissage, la bande passe dans le bain d'électrolyse où la couche d'étain lui est appliquée.

En fonctionnement, il est chauffé par effet joule, il n'est donc chauffé à la vapeur que lors d'un démarrage de ligne. Après le bain d'électrolyse, la bande est rincée par un bain de rinçage puis séchée par un sécheur flux à air. Après cela, elle passe par une tour où elle est chauffée pour afin de faire fondre l'étain, ce qui lui donne une meilleure structure.

De là, elle est refroidie par le bain de trempe puis passe dans le bain de passivation, dans lequel une couche protégeant l'étain contre la corrosion est appliquée. Après celui-ci, elle est séchée par un sécheur à air puis huilée

La vapeur y alimente

- un échangeur de chaleur chauffant un circuit d'eau qui sert à chauffer
  - les bains de dégraissant
  - le bain de passivation
  - le bain d'électrolyse

- le bain de quench
- les sécheurs à air chaud
- les canons à chaleurs qui servent à chauffer de l'eau déminéralisée.

#### *(6) Station de traitement des eaux (STE)*

Après avoir été utilisées dans le processus de fabrication, les eaux usées sont envoyées à la station de traitement des eaux où elles sont traitées avant d'être rejetées. En ce qui concerne la vapeur, elle n'y sert qu'à chauffer un tank de coolant (eau mélangée à de l'huile utilisée aux laminoirs) par mélange direct à pression atmosphérique.

#### *(7) Capteurs*

Des capteurs de débit instantané sont disponibles aux lignes recuit continu, skin-pass, tandem 4 cages, tandem 5 cages et décaperie. La pression est mesurée en entrée de chaque poste de détente.

Les capteurs des laminoirs et de la décaperie ne sont pas calibrés pour de la vapeur saturée mais pour de la vapeur surchauffée. Il y a donc une erreur due à cette calibration inadéquate. Cependant, après discussion avec les techniciens externes s'occupant des capteurs, on sait que l'erreur que cela induit est de l'ordre de 20-30%. Faute de mieux, on se servira donc de ces valeurs comme ordre de grandeur de leurs consommations.

#### ***iii) Fonctionnement du chauffage des halls***

Actuellement, le chauffage des halls se fait principalement à l'aide d'aérothermes à vapeur. Chacun de ces derniers est constitué d'un échangeur de chaleur parcouru par de la vapeur d'un côté et sur lequel un ventilateur souffle de l'air de l'autre. L'air se réchauffe au contact de l'échangeur, tandis que la vapeur se condense. Après s'être condensée, la vapeur est évacuée par le purgeur présent au port de décharge de l'aérotherme.

Les ventilateurs des aérothermes sont régulés par des thermostats s'activant si la température qu'ils mesurent est inférieure à la température de consigne. La convection naturelle cause donc une certaine consommation de vapeur par les aérothermes même si leurs ventilateurs sont arrêtés. Voici pourquoi on ferme les vannes d'isolation des lignes d'aérothermes en été.

Les utilisateurs utilisent la vapeur pour maintenir des bacs de liquide à température (par mélange ou à l'aide d'échangeurs de chaleur) et pour réchauffer des flux d'air. La chaleur amenée à un utilisateur est donc dégagée dans l'usine. On en conclut qu'elle contribue à chauffer le bâtiment même si elle n'est généralement pas orientée vers les zones qu'on désire chauffer.

#### ***iv) Evolution du réseau et des consommateurs***

Voici une liste d'événements décrivant les changements subits par le réseau vapeur:

- Au départ, le réseau de Tilleur était alimenté en vapeur à 14 barA et surchauffée (à 240°C) par une conduite venant du site du haut-fourneau et traversant la Meuse.

- La capacité de production de vapeur était largement plus grande que l'actuelle, au point qu'on avait un surplus de capacité de production de vapeur supérieur à 50 t/h.
  - les utilisateurs de vapeur d l'usine étaient :
    - les deux décaperies
    - les deux laminoirs
    - le Skin-Pass
    - l'étamage
    - le recuit continu
    - la station de traitement des eaux
    - le chauffage des halls.
  - On constatait des pics de consommation à 60 t/h.
  - Le chauffage des halls comprenait
    - les aérothermes (19 000 kW)
      - dont la température de consigne était de 15°C
    - 4 groupes à air pulsé (de 1 000 kW chacun).
  - On avait une puissance de 23 000 kW pour le chauffage.
    - Le débit de vapeur maximal pour le chauffage était donc de 40 t/h.
- Après la fermeture du haut-fourneau, on a arrêté d'amener la vapeur du haut-fourneau et on a installé 3 chaudières 12,4 barA saturée de débit maximal théorique de 10 t/h (chacune).
    - La valeur de 10 t/h induit en erreur pour deux raisons.
      - La première est qu'il s'agit de la vapeur brute produite par la chaudière, elle ne tient pas compte du fait que le dégazeur de chaque chaudière consomme 1-1,5 t/h.
        - Un dégazeur est un dispositif visant à éliminer les gaz dissouts dans l'eau.
        - Ceux utilisés pour les chaudières fonctionnent en ajoutant des produits à l'eau dans des bacs ouverts et en la chauffant par mélange avec de la vapeur afin de l'amener à une température à laquelle les produits opèrent.
      - La deuxième est due au fait que, du fait que la vapeur n'est plus surchauffée, on récupère désormais 1987 kJ/kg au lieu de 2073 kJ/kg (soit 4 % en moins) en la condensant (à pression constante).
      - On avait donc un débit maximal de 25,5-27 t/h. Après avoir constaté que 3 chaudières ne suffisaient pas suite aux plaintes des utilisateurs de vapeur, une quatrième chaudière a été ajoutée, faisant monter le débit maximal à 34-36 t/h.
  - Entretiens, on a arrêté
    - les groupes à air pulsé
    - une partie des aérothermes

- Il reste donc une puissance de chauffage de 14 000 kW.
  - Le débit de vapeur maximal pour le chauffage est donc de 25 t/h.
- On a abaissé à 10°C la température de consigne des aérothermes restant.
- Actuellement, les utilisateurs de vapeurs (autres que le chauffage des halls) actifs sur le site ArcelorMittal de Tilleur sont
  - une décaperie
  - deux lignes de laminage à froid, à savoir
    - un tandem 4 cages
    - un tandem 5 cages
  - une ligne de recuit continu
  - une ligne de laminage skin-pass (à deux cages),
  - une ligne d'étamage
  - une station de traitement des eaux usées.

### **g) Analyse préliminaire**

Dans ce chapitre, l'analyse préliminaire du réseau et du bâtiment va être réalisée. Cette dernière nous permettra de nous faire une idée des sources de problèmes potentiels afin d'orienter nos recherches et nos analyses.

Pour commencer, nous nous baserons sur des approximations des pertes de charge et des déperditions fournies par Spirax-Sarco dans l'audit vapeur qui a été réalisé sur le site de Tilleur pour évaluer les pertes de charge et déperditions dans les conduites.

Après cela, nous utiliserons des ordres de grandeurs des consommations des utilisateurs fournis par l'ancien contremaître du service fluide pour évaluer la consommation totale de vapeur dans l'usine. Une valeur du taux de renouvellement de l'air dans l'usine fournie dans la norme VDI 2082 [7] et des raisonnements physiques simples seront également utilisés.

#### ***i) Écoulement dans les conduites***

Commençons par considérer les pertes de charge induites par l'écoulement dans les conduites de l'usine. Selon le rapport d'audit vapeur fait par Spirax-Sarco sur le site de Tilleur, les conduites de 250 mm de diamètre subissent de perte de charge de 155 mbar tous les 100m. Prenons cette valeur comme ordre de grandeur des pertes de charge dans toutes les conduites.

On sait que le trajet le plus long que la vapeur peut faire dans le réseau est de l'ordre de 600m. On se rend compte que la vapeur fournie à un utilisateur ne peut pas être à une pression plus basse qu'un bar en dessous de la pression en sortie de chaudière. Cela ne paraît pas être une diminution excessive, cette analyse préliminaire conclut donc que les pertes de charge dans les conduites ne sont probablement pas une source de problème.

#### ***ii) Déperditions dans les conduites***

Intéressons-nous maintenant aux déperditions dans les conduites. Le rapport mentionné ci-dessus donne un ordre de grandeur du débit d'eau condensée dans une conduite de 250 mm de diamètre et 50 m de long isolée de 45 kg/h en fonctionnement à 13 barA.

Négligeons le fait qu'il y a moins de condensation dans les petites conduites vu qu'elles ont de plus petites surfaces d'échange avec l'air ambiant. Sachant que, dans le réseau, il y a de l'ordre de 4km de conduites, on arrive à l'approximation qu'on condense 3,6 t/h de vapeur.

Sachant qu'on a un débit maximum de vapeur entre 34 et 36 t/h, on s'attend à ce que la vapeur dans les conduites ait un titre vapeur suffisant, sauf éventuellement en bout de ligne après de long parcours.

La vapeur ne fait pas de très long parcours pour atteindre les utilisateurs autres que le chauffage des halls. On ne s'attend donc pas à ce que le titre de la vapeur fournie aux postes de détente pose problème.

### ***iii) Consommation et production de vapeur***

Sachant que la première partie de notre analyse préliminaire pousse à penser que le problème ne vient pas de l'état de la vapeur lui-même, intéressons-nous à la quantité de vapeur fournie et retirée au réseau. Les anciens techniciens responsables du réseau fluide ont fourni des ordres de grandeur des consommations des différents éléments.

Selon eux :

- le chauffage des halls peut consommer jusqu'à 24 t/h mais fonctionne à 30 % de sa consommation maximale
- l'étamage consomme entre 3 et 7 t/h
- le recuit continu consomme 4,5 t/h
- la décaperie consomme 10 t/h
- la station de traitement des eaux consomme 1t/h
- le TD-4C consomme 1 t/h
- le TD-5C consomme 1,5 t/h
- le skin-pass consomme 1,5 t/h
- le bâtiment coolant et effluents huileux consomme 2 t/h.

Pour une consommation maximale du processus de fabrication et typique du chauffage, on a donc une consommation de

- 7,2 t/h pour le chauffage des halls
- 3,6 t/h pour les déperditions dans les conduites
- 26,5 t/h pour le processus de fabrication.

Ce qui mène à une consommation maximale de 37,3 t/h.

On sait que les chaudières peuvent produire au maximum 36 t/h, mais on sait aussi que, en pratique, les éléments du processus de fabrication ne consommeront pas leur maximum en même temps, on en conclut que les chaudières sont a priori capable de fournir la vapeur nécessaire au fonctionnement normal de l'usine.

On remarque cependant que, si la consommation du chauffage des halls était supérieure à sa valeur typique, les chaudières seraient incapables de fournir la consommation du processus de fabrication en plus de celle du chauffage des halls.

### ***iv) Pistes obtenues***

Suite à cette analyse préliminaire, il semble qu'il soit nécessaire de vérifier l'équilibre entre la consommation et la production de vapeur dans l'usine. Une analyse détaillée de la consommation de vapeur par les éléments du processus de fabrication doit donc être réalisée.

Un élément majeur de la consommation de vapeur semble être le chauffage des halls, une analyse détaillée des déperditions du bâtiment et du fonctionnement du chauffage des halls doit donc être réalisée.

Enfin, bien que nos premières approximations poussent à croire que l'état de la vapeur ne peut que faiblement influencer l'alimentation en vapeur, il est important de vérifier cette affirmation par des analyses plus poussées.

*(1) Questions exprimant la problématique*

En résumé, voici les questions auxquelles nous souhaitons trouver des réponses pour identifier la source des problèmes:

- Question1 : Est-ce que le changement de l'état de la vapeur en entrée du réseau est de nature à limiter la puissance apportée aux utilisateurs ?
- Question2 : Qu'est-ce qui détermine la consommation de chacun des trois consommateurs de vapeur du procédé de fabrication principaux et du processus de fabrication dans son ensemble et comment ?
- Question3 : Qu'est-ce qui détermine la consommation des aérothermes et comment ?
- Question4 : Est-ce que le débit fourni par les chaudières est suffisant pour alimenter tous les consommateurs de vapeur ?

## II. Analyses

Dans ce chapitre, nous procédons aux analyses détaillées mentionnées plus tôt afin de répondre aux questions exprimant la problématique.

La première section sert à comparer l'écoulement d'un mélange diphasique avec celui de vapeur surchauffée.

Tout d'abord, nous étudions ces écoulements

- dans des conduites isolées
- à travers des vannes simples
- à travers des postes de détente.

Nous nous intéressons ensuite brièvement à l'effet du changement d'état de la vapeur sur la chaleur libérée par la condensation d'un kg de vapeur.

Cela nous permet de nous forger une compréhension des phénomènes physiques qui influencent l'alimentation des éléments du processus de fabrication en vapeur. Nous pouvons alors nous servir de cette compréhension pour répondre à la question 1.

Ensuite, nous explorons l'autre piste principale de source de problème, à savoir un déséquilibre entre la production et la consommation de vapeur dans l'usine.

Pour cela, nous évaluons :

- la consommation de chaque élément du processus de fabrication séparé (Question 2)
- la consommation du processus de fabrication dans son ensemble (Question 2)
- la consommation des aérothermes (Question 3).
  - Ce qui nécessitera d'évaluer les besoins de chauffage du bâtiment.

Ayant alors une idée de la consommation de vapeur de l'usine, nous pouvons alors répondre à la question 4 en vérifiant que la production et la consommation de vapeur sont équilibrées.

Ayant alors répondu aux questions formulant la problématique, nous aurons alors les éléments nécessaires à l'identification des sources de problèmes d'alimentation.

### a) Nomenclature

#### *i) Abréviations*

- P : pression, généralement en barA (bars absolus)
- T : température, généralement en K
- x : titre vapeur, généralement en %
- $\rho$  : masse volumique, en kg/m<sup>3</sup>
- $v$  : volume massique, en m<sup>3</sup>/kg
- $\Delta T_s$  : surchauffe, généralement en Kelvin
- $\dot{m}$  : débit massique, généralement en kg/s



- $h$  : enthalpie massique, généralement en J/kg
- $c_p$  : chaleur massique, généralement en J/kg/K
- $V$  : volume, généralement en  $m^3$
- $\dot{Q}$  : chaleur échangée, généralement en kW
- $\frac{d}{dt}$  : dérivée en fonction du temps, le temps est en secondes
- $t$  : temps, généralement en secondes
- $A$  : surface
- $U$  : coefficient d'échange thermique global surfacique
- $vit$  : vitesse
- $ép$  : épaisseur
- larg : largeur
- $Nm^3$  : normo  $m^3$

## ii) Indices

- a : de l'air
- w : de l'eau liquide
- vap : du mélange diphasique ou de la vapeur pure, en fonction de si du liquide est présent
- cond : des condensats
- g : de la phase gazeuse
- l : de la phase liquide
- in : entrant
- out : sortant
- steel : de l'acier
- isol : de l'isolant
- bac : des bacs ou bains
- inter : dans les halls
- ext : hors du bâtiment
- 0 : à l'instant de départ
- bande : de la bande
- rincage : de l'eau de rinçage
- demin : de l'eau déminéralisée
- electrol : du bain électrolytique
- passiv : du bain de passivation
- quench : du bain de quench
- degr : du bain de dégraissage
- app : du liquide d'appoint

## **b) Vapeur pure et mélange diphasique**

Le but de cette section est de répondre à la question « Est-ce que le changement de l'état de la vapeur en entrée du réseau est de nature à limiter la puissance apportée aux utilisateurs ? ».

### ***i) Ecoulement dans les conduites***

Cette première analyse consiste en une comparaison des deux types d'écoulements dans des conduites isolées. Elle a pour objectif de se faire une idée du comportement de l'écoulement quand l'état de la vapeur en entrée d'une longueur de conduite varie.

#### ***(1) Hypothèses, méthodes et domaine d'analyse***

Les débits dans les conduites d'un réseau sont généralement imposés par des vannes de régulation réglées par les consommateurs de manière à obtenir une certaine puissance calorifique. Cette puissance est pratiquement proportionnelle au débit de phase gazeuse vu que c'est la condensation de cette dernière qui libère de l'énergie. Il paraît donc judicieux de procéder à l'analyse de l'écoulement dans les conduites en imposant le débit de phase gazeuse.

Les conduites de l'usine (des tubes en acier étiré) sont loin d'être neuves, nous supposons donc qu'elles sont moyennement usées. Pour des conduites en acier étiré, le VDI heat Atlas [8] recommande de considérer qu'elles ont une rugosité

- inférieure à 0,4 mm si elles sont légèrement usées
- inférieure à 3 mm si elles sont fort usées.

Nous considérons donc qu'elles ont une rugosité absolue de 1 mm.

Les conduites ont des diamètres intérieurs compris entre 0,25 et 0,06 m et voient passer des débits totaux en régime entre 30 et 5 t/h pour les grandes et entre 1 et 0,2 t/h pour les petites. Voici les différents états de la vapeur en entrée que nous souhaitons considérer :

- Cas 1 :  $P=14 \text{ barA}$ ,  $\Delta T_s = 20\text{K}$
- Cas 2 :  $P=14 \text{ barA}$ ,  $\Delta T_s = 10\text{K}$
- Cas 3 :  $P=14 \text{ barA}$ ,  $x=95\%$
- Cas 4 :  $P=12 \text{ barA}$ ,  $x=95\%$
- Cas 5 :  $P=12 \text{ barA}$ ,  $x= 75\%$

Ces derniers nous permettent d'évaluer l'effet de chaque changement subit par la vapeur dans notre cas particulier, à savoir :

- une diminution de la surchauffe
- l'apparition de liquide
- une diminution de pression
- une augmentation de la fraction de liquide.

### *(a) Pertes de charges*

Commençons par décider quelles théories appliquer pour calculer les pertes de charge.

Après avoir calculé les nombres de Reynolds adéquats pour les différents couples débit-diamètre et chaque état d'entrée considéré, on constate que l'écoulement est systématiquement turbulent dans les conduites de l'usine. La loi de Colebrook et White [8] paraît donc adéquate pour les calculs concernant de la vapeur pure.

Dans le cas de l'écoulement d'un mélange diphasique, la corrélation de pertes de charge par frottement du papier « Power law and composite power law friction factor correlations for laminar and turbulent gas-liquid flow in horizontal pipes » [9] est valable pour tous les nombres de Reynolds. Ce dernier n'a donc pas besoin d'être calculé pour savoir quelle corrélation utiliser. Nous choisissons de prendre la version simplifiée de cette corrélation et simplifierons les calculs à l'aide de l'hypothèse qu'il n'y a pas de glissement entre les phases.

### *(b) Déperditions*

Sachant maintenant quelles corrélations utiliser pour les pertes de charge, déterminons quelles corrélations sont adéquates pour calculer les coefficients d'échange convectif interne.

Pour l'écoulement de vapeur pure, l'écoulement sera turbulent, nous appliquerons donc la corrélation de « Gnielinski (1976) » [10]. En effet, sachant que le nombre de Prandtl de la vapeur pure reste compris entre 1,01 et 1,03 tant que la pression est comprise entre la pression atmosphérique et 14 barA et la surchauffe entre 20 et 1 K, nous restons dans son domaine de validité.

Pour l'écoulement d'un mélange diphasique, nous appliquerons la corrélation de « Shah (1979) » [11] après avoir vérifié qu'on est dans le domaine de validité de la corrélation en question.

Outre les coefficients d'échanges convectifs à l'intérieur des conduites, nous avons besoin de calculer la résistance en conduction à travers la conduite et l'isolant ainsi que la résistance en convection entre la surface extérieure de la conduite et l'air des halls.

Pour la résistance en conduction, nous appliquons la formule de la résistance en conduction d'un élément cylindrique disponible dans le livre « Foundations of heat transfer » [12] au chapitre sur la conduction unidimensionnelle en régime établi. On suppose que l'acier et l'isolant ont des conductivités thermiques de respectivement  $50 \frac{W}{m \cdot K}$  et  $0,04 \frac{W}{m \cdot K}$  (valeur typique pour de la laine de verre).

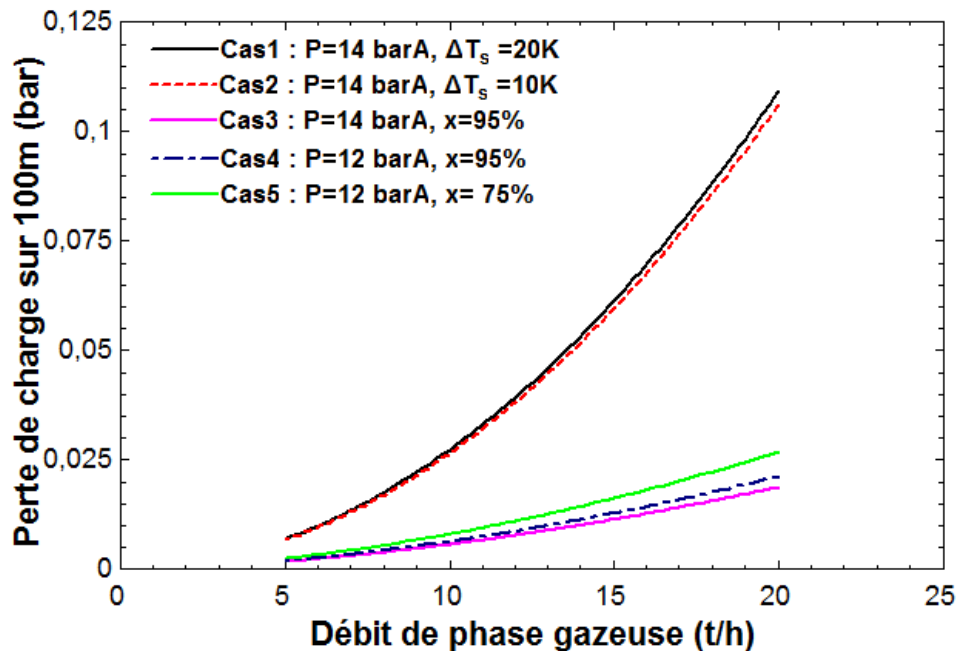
Pour la résistance en convection à l'extérieur de la conduite, nous appliquons la corrélation de Hilpert [12] en supposant que l'air dans les halls avance perpendiculairement à l'axe de la conduite à une vitesse de 1 m/s.

## (2) Résultats de l'analyse

En combinant les différentes corrélations et théories mentionnées ci-dessus, on simule les différents cas pour 100m de conduite de 0,25m de diamètre.

### (a) *Pertes de charge*

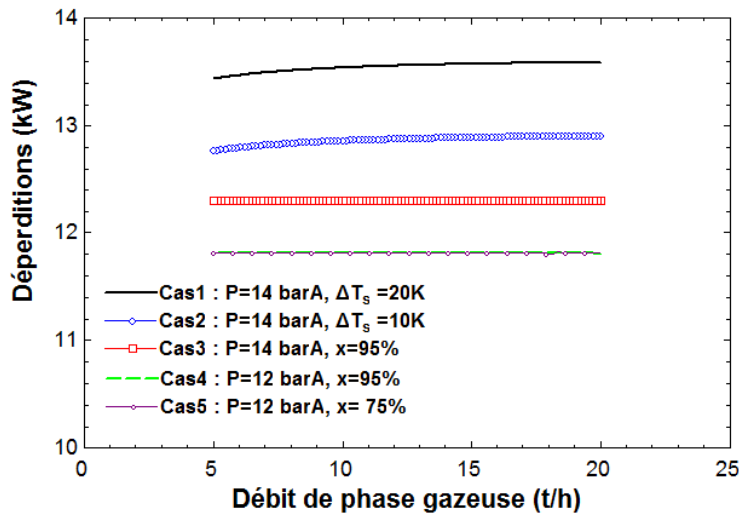
Pour les pertes de charge par 100m, on obtient les graphes suivants:



On constate les faits suivants :

- Les pertes de charges diminuent quand le débit de vapeur diminue
- Si la surchauffe diminue, elles font de même
  - Ce qui est dû au fait que le volume massique de la vapeur diminue, elle 'passe' donc plus facilement
- Si de l'eau apparaît, les pertes de charge chutent
  - Ce qui est dû au fait que l'eau 'lubrifie' le passage de la vapeur
- Pour le même titre vapeur, si la pression en entrée de la conduite chute, les pertes de charge augmentent.
  - Cela vient du fait que le volume massique de la vapeur augmente si la pression diminue.
- Si le titre vapeur chute et la pression reste constante, les pertes de charges augmentent.
  - Cela est une conséquence du fait que, si le titre vapeur chute et la pression reste constante, il faut faire passer plus de débit total pour le même débit de phase gazeuse.

### (b) Déperditions



On remarque que les déperditions varient peu lorsque l'état de la vapeur et le débit varient (variation de 13 % de 13,6 kW par 100m, donc moins de 2 kW par 100 m entre le régime où elles sont maximale et celui où elles sont minimales).

Cela est dû au fait que la couche d'isolant représente la majorité de la résistance thermique entre l'air des halls et les conduites. Les variations des coefficients d'échange convectifs auront donc peu d'impact sur le flux de chaleur. Les variations sont principalement expliquées par l'évolution de la différence de température entre la vapeur et l'air des halls.

### (c) Conclusions

Les conclusions principales de cette section sont que

- le fait que diminuer le débit massique ou la surchauffe en entrée d'une conduite fait beaucoup diminuer les pertes de charge.
- Passer de l'état d'origine de la vapeur à l'état actuel diminue les pertes de charge.
- les variations des déperditions thermiques dans les conduites avec le débit ou l'état de la vapeur en entrée (dans les états possibles pour nos applications) sont négligeables.

L'effet du changement d'état de la vapeur sur l'écoulement dans les conduites ne pose donc pas de problèmes pour l'alimentation en vapeur des utilisateurs.

Remarque : le fichier EES 'analyses\_conduites\_isolées' ayant servi aux analyses est disponible en annexe.

## **ii) Écoulement à travers une vanne**

Avant de nous intéressons à l'ensemble poste de détente-vanne de régulation et les éventuelles diminutions de débit qui y sont potentiellement liées, il est important de se forger une compréhension du comportement d'une simple vanne.

### **(1) Méthode**

Pour l'écoulement à travers une vanne, il est nécessaire d'employer une méthode valable aussi bien pour de la vapeur pure que pour un mélange diphasique. La méthode décrite dans le papier « Einführung eines Expansionsfaktors zur Erweiterung der IEC 60534-2-1 für die Auslegung von Stellventilen bei Mehrphasenströmung » [13] est adéquate et aisément applicable, nous nous en servons donc.

Contrairement au cas de l'écoulement de vapeur dans des conduites, dans le cas d'un écoulement à travers une vanne, le débit risque d'être fort influencé par le comportement de la vanne. Les analyses d'écoulements à travers des vannes se feront donc en imposant l'état en amont et en faisant varier la pression en aval (et non le débit).

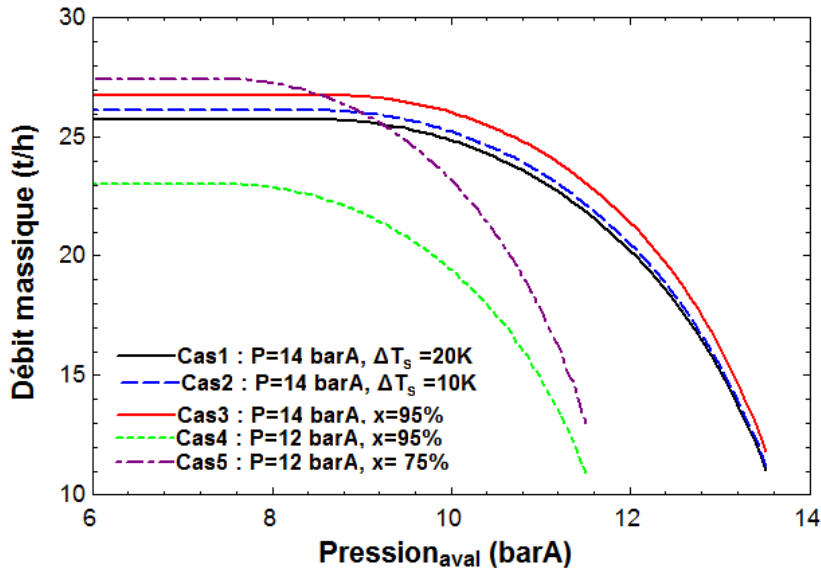
### **(2) Résultats**

Étudions maintenant une vanne ayant un diamètre de 7cm fixé arbitrairement. Commençons par considérer différents états de la vapeur en entrée et faisons varier la pression à son aval en appliquant la méthode mentionnée ci-dessus.

Les différents cas à considérer seront les mêmes que pour l'étude des conduites, à savoir :

- Cas 1 :  $P=14 \text{ barA}$ ,  $\Delta T_s = 20\text{K}$
- Cas 2 :  $P=14 \text{ barA}$ ,  $\Delta T_s = 10\text{K}$
- Cas 3 :  $P=14 \text{ barA}$ ,  $x=95\%$
- Cas 4 :  $P=12 \text{ barA}$ ,  $x=95\%$
- Cas 5 :  $P=12 \text{ barA}$ ,  $x= 75\%$

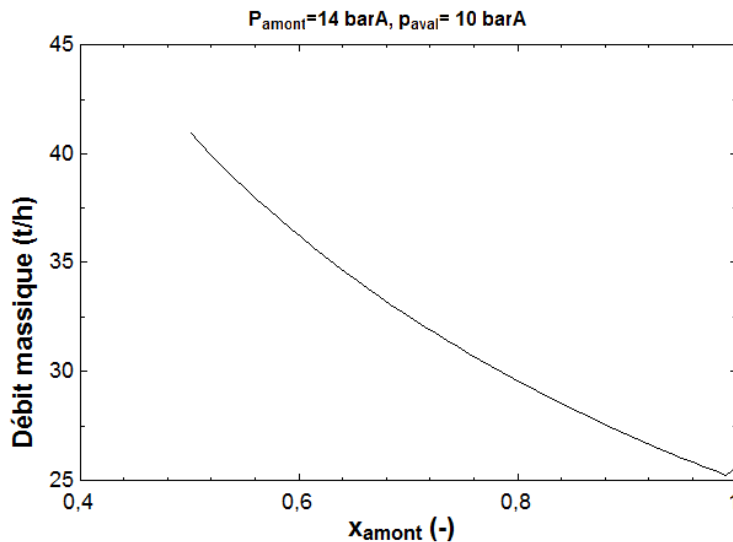
Commençons par nous intéresser à l'évolution du débit traversant la vanne.



On constate les faits suivants :

- Pour tous les états amonts, lorsque la pression aval diminue, le débit augmente de moins en moins vite puis devient constant en dessous d'une certaine pression aval. L'écoulement est alors choké.
- En diminuant la surchauffe, on augmente le débit pour toutes les pressions avals
  - Cela est dû au fait que le volume massique amont diminue, ce qui facilite son passage à travers la vanne
- En éliminant la surchauffe, le débit à pression aval fixe augmente encore
- Si la pression amont chute et le titre vapeur reste constant, le débit chute
  - Cela est dû à la diminution de la chute de pression disponible aux bornes de la vanne et l'augmentation du volume massique en amont de la vanne
- A pressions constantes, si le titre vapeur diminue, le débit augmente
  - Cela est expliqué par la diminution du volume massique du mélange en amont

Si l'on fixe une pression en amont de 14 barA et une pression en aval de 10 barA et fait varier le titre vapeur en amont de la vanne, on obtient le graphe suivant.



On constate que, lorsque du liquide apparaît, le débit chute brutalement. Dans les paramètres de la méthode appliquée, on remarque que cela est dû à une brusque augmentation du facteur  $N$  et du facteur  $\omega$ . Le facteur  $N$  représente l'effet de l'ébullition retardée et le facteur  $\omega$  sert à tenir compte des caractéristiques du fluide, la chute brusque de débit est donc due à l'apparition d'ébullition retardée et de liquide qui modifie le type d'écoulement.

On remarque que, une fois que du liquide est présent en amont de la vanne, une augmentation de la fraction de liquide fait augmenter le débit massique. Cette augmentation est due à une diminution du facteur  $N$  (donc de l'ébullition retardée) et à une augmentation du facteur  $\phi$  (donc du glissement entre les phases). Intuitivement, on peut se dire que plus il y a du liquide, plus le mélange a un volume massique faible et plus facilement le mélange passera à travers la vanne.

En faisant les mêmes variations pour d'autres pressions aval, on constate le même comportement pour les mêmes raisons. Le code 'analyse\_vanne\_simple' ayant servi à effectuer les simulations est disponible en annexe.

### *(a) Conclusions*

Cette section permet de conclure que, en augmentant la surchauffe en entrée d'une vanne (à pressions en amont et aval constantes), on diminue le débit à travers cette vanne, que la première goutte de liquide présente en amont d'une vanne cause une chute du débit massique et qu'on peut augmenter le débit jusqu'à un certain stade en diminuant la pression en aval (à état d'entrée fixé).

### **iii) Postes de détente et vanne de régulation**

Maintenant que nous avons une idée du comportement d'une vanne, intéressons-nous aux postes de détente dans l'objectif d'évaluer l'effet du changement de vapeur sur leur fonctionnement. Pour cela, prenons l'exemple du poste de détente de la décaperie.



Pour rappel, lorsque la vapeur était encore surchauffée, le détendeur était suivi d'une désurchauffe. On y injectait la vapeur condensée dans les échangeurs afin d'obtenir de la vapeur saturée, ce qui permettait de condenser la vapeur dans les échangeurs sans avoir à l'y refroidir. Entretemps, la désurchauffe a été désactivée.

Dans le cas de la décaperie, la pression après détente est sensée être de 3,2 bars relatifs. Le poste de détente a été conçu pour pouvoir laisser passer un débit maximal de 15 tonnes/h avec une pression de 13 bars relatifs et de la vapeur surchauffée de 20K en entrée du détendeur.

Nous ne connaissons pas les caractéristiques du détendeur, on refera donc son dimensionnement. Un détendeur est dimensionné de manière à ce que son débit maximal souhaité (15t/h dans le cas de celui de la décaperie) vale 85% du débit maximal à ouverture maximale (donc choké), qui vaudra donc 17,65 t/h. Vu la grande chute de pression nécessaire dans le cas de la décaperie, le détendeur a une détente en 3 étapes. Chaque étape sera donc constituée d'une vanne qui s'ouvre plus ou moins dans le but de maintenir la pression à son aval à une valeur constante.

### *(1) Dimensionnement*

En appliquant la méthode du papier « Einführung eines Expansionsfaktors zur Erweiterung der IEC 60534-2-1 für die Auslegung von Stellventilen bei Mehrphasenströmung » [13], on se rend compte que la pression aval critique pour la première détente est de l'ordre de 8,4 barA, on supposera donc que la première détente se fait vers 9 barA.

Pour ce qui est de la deuxième, en supposant que la vapeur entre la première détente est à 9 bars et à la même enthalpie que de la vapeur à 14 barA et avec une surchauffe de 20K. On obtient une pression aval critique pour la deuxième détente de l'ordre de 5,3 barA. On considérera donc que la deuxième détente se fait vers 6 barA. Enfin, la troisième détente se fera vers 4,2 barA, mais il faut vérifier que cette pression n'est pas inférieure à la pression aval critique de la troisième détente. En se basant sur la même enthalpie que les autres détentes et en supposant une pression entre les 2 dernières détentes de 6 barA, on conclut que la pression aval critique de la troisième détente est de 3,6 barA. Notre détente est donc possible.

Après le détendeur, la vapeur arrive aux vannes de régulations qui régulent le débit soutiré par l'utilisateur au réseau. Nous ferons l'approximation qu'il n'y en a qu'une et supposerons qu'elle a été dimensionnée pour fournir un débit de 15t/h avec une pression de 4,2 bar A et de la vapeur saturée en amont (vu qu'il y avait une désurchauffe). Après être passée par la vanne, la vapeur passe dans des échangeurs de chaleur où elle se condense puis les condensats arrivent dans un bac d'eau déminéralisée à pression atmosphérique. On supposera la pression dans l'échange de chaleur égale à la pression atmosphérique.

Sur base de ces hypothèses, on obtient les aires de passage des différentes vannes (les 3 détentes du détendeur ainsi que la vanne de régulation). On remarque que la pression aval critique de la vanne de régulation est de 2,5 barA, l'écoulement à travers celle-ci est donc choké (ce qui ne l'empêche pas de réguler le débit vu qu'il reste proportionnel à l'aire de passage même en étant choké).

Le code EES 'poste\_de\_detente\_dimensionnement' ayant servi à dimensionner les vannes est disponible en annexe.

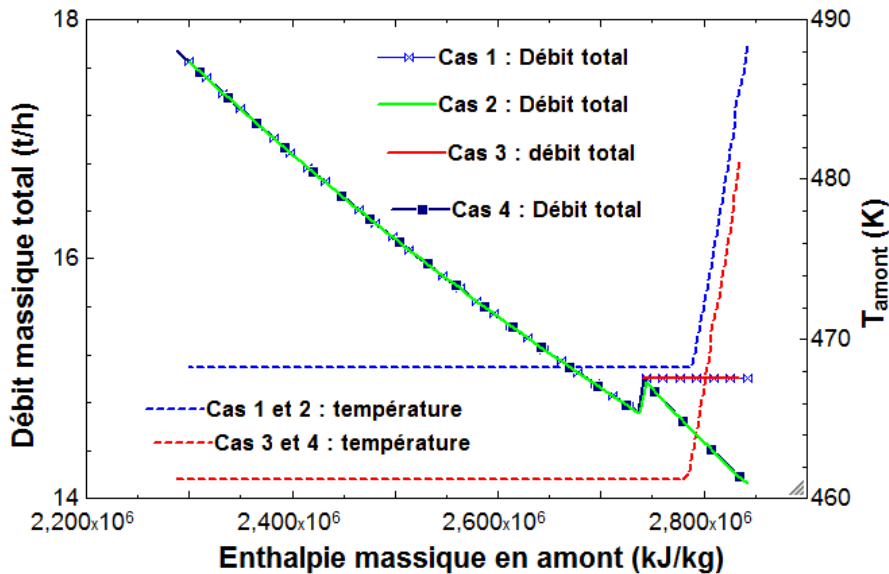
## (2) Conditions de l'analyse

Avant de procéder aux analyses, réfléchissons à quels cas nous souhaitons analyser. L'objectif premier de cette section est d'évaluer l'impact du changement d'état de la vapeur sur le débit maximal soutirable par l'ensemble poste de détente-vanne de régulation au réseau. On devra cependant évaluer l'effet de l'activation ou non de la désurchauffe. Pour cela, nous ferons varier l'état de la vapeur en entrée en considérant que la vanne de régulation est ouverte au maximum et étudierons l'évolution du débit résultant. Nous considérerons 4 cas :

- Cas 1 : P=14 barA, désurchauffe activée
  - la vapeur passe d'un état  $\Delta T_s = 20K$  à un état  $x=75\%$
- Cas 2 : P=14 barA, désurchauffe désactivée
  - la vapeur passe d'un état  $\Delta T_s = 20K$  à un état  $x=75\%$
- Cas 3 : P=12 barA, désurchauffe activée
  - la vapeur passe d'un état  $\Delta T_s = 20K$  à un état  $x=75\%$
- Cas 4 : P=12 barA, désurchauffe désactivée
  - la vapeur passe d'un état  $\Delta T_s = 20K$  à un état  $x=75\%$

## (3) Résultats de l'analyse

On obtient l'évolution du débit reçu par l'utilisateur suivante. L'évolution de la température en amont est représentée afin de permettre de visualiser à quel moment de l'eau apparaît en amont du poste de détente. Outre le graphique, nos simulations montrent que le poste de détente arrive à maintenir la pression à son aval à sa valeur de consigne dans tous les cas considérés. Il ne cause donc pas de limitation du débit.



On remarque que

- Le changement de pression en amont ne fait pratiquement pas varier le débit
- Si la désurchauffe est activée
  - Le débit reste d'abord pratiquement constant, y compris après l'apparition d'eau en amont du poste de détente
    - Cela est dû au fait que la désurchauffe assure un état en entrée de la vanne de régulation constant.
  - A un moment, le débit chute brusquement puis se met à augmenter
    - On voit dans le fichier EES que cela se produit systématiquement lors de l'apparition d'eau en amont de la vanne de régulation, ce qui se comprend aisément à l'aide de notre analyse d'une vanne simple et du fait que la désurchauffe ne peut pas assécher la vapeur. L'état de la vapeur arrivant à la vanne de régulation a donc changé
  - Après cela, le débit ne fait qu'augmenter
    - Ce qui est dû à la diminution du volume massique en entrée de la vanne de régulation
- En revanche, si elle est désactivée,
  - Le débit commence par augmenter
    - Ce qui est dû à la diminution du volume massique en entrée de la vanne de régulation
  - Puis il chute à l'apparition d'eau à la vanne de régulation
  - Après quoi il augmente suite à la diminution du volume massique en entrée de la vanne de régulation

Ces observations montrent que deux facteurs déterminent le débit maximal soutirable par un utilisateur, à savoir :

- La présence ou absence d'eau liquide en amont de la vanne de régulation
  - Sachant que l'apparition d'eau fait chuter le débit maximal soutirable
- Le volume massique en amont de la vanne de régulation,

- sachant qu'il fait chuter le débit maximal en augmentant.

En conclusion, dans le cas de la décaperie, le débit maximal soutirable au réseau peut avoir diminué. Ceci a été causé soit par la présence de liquide dans la vapeur, soit par celle d'une surchauffe en entrée des vannes de régulation. Nous considérerons pour les analyses suivantes que le débit maximal actuel de la décaperie est de 14,6 t/h.

Pour ce qui est des autres utilisateurs, ils n'avaient pas de désurchauffes. Leurs débits maximaux n'ont donc pas diminué. En effet, même l'apparition de liquide en amont de la vanne de régulation ne fait pas chuter le débit plus bas que la présence d'une surchauffe importante en amont du poste de détente.

L'effet du changement d'état de la vapeur sur l'écoulement à travers les postes de détente et vannes de régulation ne pose donc pas problème pour l'alimentation des utilisateurs.

En revanche, éteindre la désurchauffe du poste de détente de la décaperie peut avoir réduit le débit maximal traversant les vannes de régulation de cette dernière. Dans la pratique, cela dépend de quel pourcentage d'eau les purgeurs précédant le poste de détente laissent passer dans ce dernier et devrait être mesuré.

Le code EES 'analyse\_poste\_de\_detente' associé à cette section est disponible en annexe.

#### ***iv) Energie calorifique libérée par kg lors de la condensation***

A pressions égales, la vapeur surchauffée a une enthalpie plus élevée que la vapeur saturée. Sa condensation libérera donc une quantité de chaleur plus élevée.

Considérons un kilogramme de vapeur à 13 bars effectifs. La plupart des utilisateurs amènent les condensats à pression atmosphérique. La chaleur récupérée par kg de vapeur sera donc donnée par la différence d'enthalpie entre l'état d'entrée et l'état de sortie (pression atmosphérique et liquide saturé). En s'intéressant à la variation de la chaleur libérée en passant de vapeur à 14 barA surchauffée de 20 K à de la vapeur saturée à 12 barA, on constate qu'elle ne diminue que de 100 kJ/kg (4,6 %) en passant de 20°C de surchauffe à 1°C (pratiquement saturée).

En diminuant la pression de 13 à 11 bars effectifs, on constate que, aussi bien pour une surchauffe de 1°C que pour une surchauffe de 20°C, la chaleur libérée diminue de moins de 10 kJ/kg/K, soit 0,2%, ce qui nous paraît négligeable.

Sachant que la chaleur récupérée ne varie pas brusquement lorsqu'on passe de vapeur saturée à vapeur humide, on en conclut que la différence de chaleur récupérée par kg de vapeur entre la vapeur saturée à 11 bars effectifs et la vapeur à 13 bars effectifs et 20°C de surchauffe est principalement due à la surchauffe et est pratiquement négligeable (à conditions que le titre vapeur reste proche de 100 %).

Pour la plupart des utilisateurs, des purgeurs sont là pour assurer que la fraction d'eau qui entre dans le poste de détente n'est pas trop élevée. Nous supposons donc que le titre vapeur reste proche de 100 % pour tous les utilisateurs (ce que nous pourrions vérifier à l'aide de notre modélisation du réseau dans LMS Amesim).

Vu que la chaleur récupérée par kg de vapeur a varié de manière négligeable, nous ferons les analyses du réseau sur base des débits massiques, ce qui est plus cohérents avec les pratiques utilisées dans l'usine où est situé le réseau.

#### **v) Conclusion de la section**

Cette première analyse étant finie, il paraît temps de vérifier si elle répond à la question qui a été posée à son commencement.

La question était 'Est-ce que le changement de l'état de la vapeur en entrée du réseau est de nature à limiter la puissance apportée aux utilisateurs ?'. La réponse est 'oui potentiellement'.

On sait que la variation de puissance libérée par kg de vapeur acheminé est assez petite pour être négligeable, cet effet n'a donc pas causé les problèmes du réseau. On sait également que la présence d'eau dans les conduites n'a pas augmenté leurs pertes de charge et que les déperditions ont très peu varié. L'écoulement dans les conduites n'est donc pas de nature à poser problèmes. En revanche, nous avons découvert que, en fonction du titre vapeur en entrée de certains postes de détente, le débit maximal de certains utilisateurs a pu être influencé.

Dans le cas de la décaperie, en fonction de la fraction de liquide laissée par les purgeurs précédant les postes de détente, il est possible que la vapeur arrive surchauffée ou tout juste partiellement liquide à la vanne de régulation. Cela causerait une réduction du débit maximal de l'ordre de 3%. Les autres utilisateurs, par contre, ont des postes de détente sans désurchauffe, ils ont donc été dimensionnés en tenant compte de la surchauffe de la vapeur. Leur débit n'aura donc pas été réduit par le changement de vapeur (la présence de liquide ne causant pas de diminution de débit supérieure à celle causée par la surchauffe).

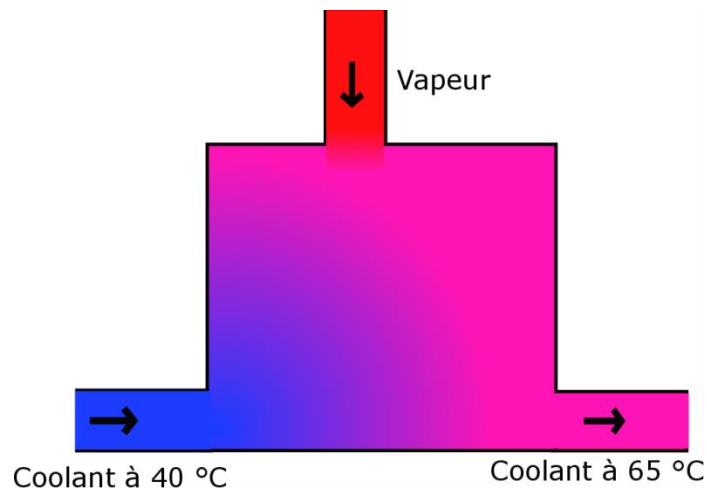
### c) Consommations des utilisateurs

Dans cette section, nous allons évaluer la consommation de chaque utilisateur à l'aide des moyens dont nous disposons. Les résultats ainsi obtenus nous permettront par après d'évaluer la consommation de l'ensemble du processus de fabrication. Certains utilisateurs disposent de capteurs de débit instantané. Ces utilisateurs sont les laminoirs (TD-4C et TD-5C), le recuit continu, la décaperie et le skin-pass.

Au terme de cette section, nous pourrons répondre à la première partie de la question 2 'Qu'est-ce qui détermine la consommation de chacun des trois consommateurs de vapeur du procédé de fabrication principaux et du processus de fabrication dans son ensemble et comment ?'.

#### i) *Traitement des eaux*

Comme cela a été expliqué plus tôt, à la station de traitement des eaux, la vapeur sert à réchauffer  $15 \frac{m^3}{h}$  de coolant de 40 à 65 °C, comme illustré dans le schéma suivant.



La vapeur est réglée en fonction de la température du tank dans lequel le coolant est mélangé à la vapeur. En négligeant les pertes par conduction, la quantité de vapeur typiquement consommée à la station de traitement des eaux sera donc donnée par :

$$\dot{m}_w * h_{w,in} + m_{vap,in} * h_{vap} = (\dot{m}_w + m_{vap,in}) * h_{w,out}$$

On obtient un débit massique de 0,5 tonnes/h.

En supposant que la régulation est faite de telle manière que le débit à ouverture maximale de vannes vaille 1,5 fois le débit typique, on obtient un débit maximal de 0,75t/h.

#### ii) *DKP-2*

Pour rappel, le poste de détente de la décaperie alimente en vapeur

- les échangeurs de chaleur des bains d'acide
- le sécheur à air chaud
- le bâtiment traitement coolant et effluents huileux.

Pour nos calculs, les 3 composantes de la consommation de vapeur liée au poste de détente de la décaperie sont

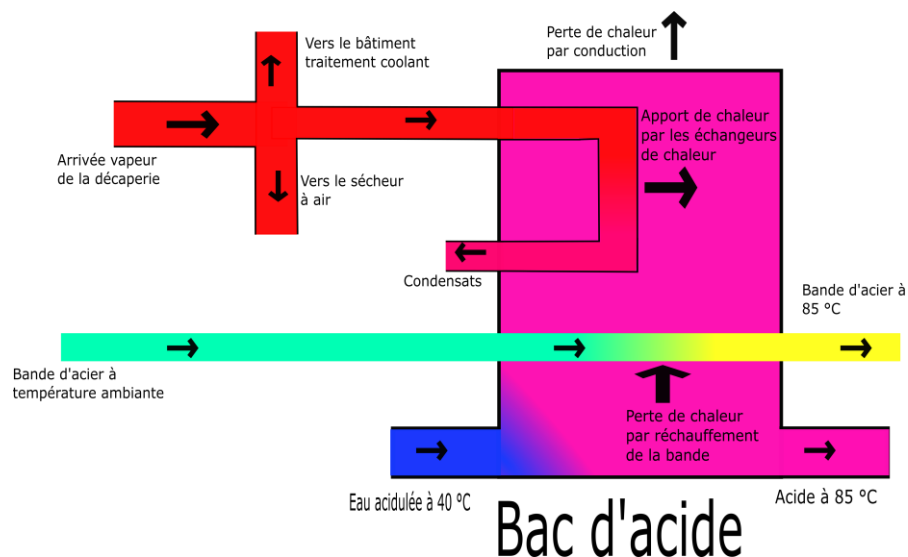
- le sécheur à air chaud
- les échangeurs vapeur-acide
- la somme des pertes de chaleurs dans les conduites et de la consommation du traitement coolant et effluents huileux.

Considérons maintenant les différentes pertes de chaleur des bacs d'acide.

Ils perdront de la chaleur

- par conduction à travers leurs parois
- par échange de chaleur avec la bande qui y entre à basse température
- par renouvellement de l'acide. En effet, vu que l'eau acidulée qui est utilisée pour le renouvellement arrive à une température plus basse que les bacs, elle les refroidit.

Les différents échanges de chaleur de la décaperie sont illustrés schématiquement sur la figure suivante.



### (1) Déperditions par conduction

Afin de pouvoir estimer la consommation de vapeur des bacs d'acide, il est nécessaire d'estimer leurs déperditions thermiques par conduction. Cela a été fait à l'aide de mesures. Le 16/02/2017, la décaperie a été arrêtée pour maintenance de 07h à 19h. En fonctionnement, les bacs sont à environ 85°C (moyenne sur les bacs). À 14h, les bacs étaient à 65°C en moyenne.

Sachant qu'il y a un bac de 20 m<sup>3</sup> et 4 de 60 m<sup>3</sup>, on a un volume d'acide de 260 m<sup>3</sup>. En supposant le coefficient global d'échange de chaleur entre les bacs et la décaperie constant, que l'acide a les mêmes propriétés thermiques que l'eau et en approximant la température dans les bacs comme uniforme, on peut estimer le coefficient en question. En effet, la variation de température des bacs sera gouvernée par l'équation :

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\dot{Q}_{out}}{c_{p,w} * V_{bacs} * \rho_w} = -\frac{A_{bacs} U_{bacs}}{c_{p,w} * V_{bacs} * \rho_w} * (T_{w,bacs} - T_{a,int})$$

En intégrant cette équation, on obtient

$$(T_{w,bacs,14h} - T_{a,int}) = \exp\left(-\frac{A_{bacs} U_{bacs}}{c_{p,w} * V_{bacs} * \rho_w} * (t - t_0)\right) * (T_{w,bacs,0} - T_{a,int})$$

Connaissant la température de fonctionnement (85°C), celle à 14h (65°C) et la température de l'air dans la décaperie ce jour-là (supposée constante et de 14°C), on en tire la valeur du coefficient d'échange thermique global AU. Il vaut 13,94 [kW/K].

### (2) Appoint d'acide

En fonctionnement, l'acide des bacs est renouvelé afin de garder les conditions chimiques adéquates. Pour cela, en moyenne  $3 \frac{m^3}{h}$  d'acide sont remplacés par de l'eau acidulée à environs 40°C. Pour amener ces  $3 \frac{m^3}{h}$  à 85°C, il faudra une puissance de 155 kW, comme on peut le calculer par la formule suivante.

$$\dot{m}_w * h_{w,in} + \dot{m}_{vap,in} * h_{vap} = (\dot{m}_w + \dot{m}_{vap,in}) * h_{w,out}$$

### (3) Echange avec la bande

En passant par les bacs, la bande se réchauffe et refroidit les bacs. Il s'agit cependant d'évaluer la puissance calorifique qui est transmise. Le plus simple serait évidemment de supposer que la bande prend la température des bacs, mais il convient de vérifier si cette hypothèse serait justifiée.

Pour cela, appliquons la formule pour l'échange de chaleur transitoire d'une plaque à température au départ uniforme dans un écoulement parallèle proposée par le livre « Foundations of Heat Transfer » [12].

Chaque bac fait de l'ordre de 5m de long et il y en a 5. La bande avance à une vitesse typique de 200m/minute. Un élément de longueur de la bande reste donc environs 7,5 secondes dans les bacs. Cela nous permet de calculer le nombre de Fourier et de vérifier qu'il est bien dans le domaine de validité de la théorie en question.

Pour les calculs de cette méthode, il sera nécessaire de calculer le coefficient d'échange convectif entre la surface de la bande et l'acide des bacs. Pour cela, nous utiliserons les formules pour le coefficient d'échange convectif proposées par le livre en question.

Ces analyses révèlent que, si la bande entre à une température de 0 °C, la température au centre de la bande en sortant vaudra 84,8 °C.

L'hypothèse que la bande prend la température des bacs paraît donc raisonnable.



En posant l'hypothèse en question et celle que la bande a la température extérieure en entrant dedans, on peut en déduire la puissance calorifique qu'elle retire aux bacs.

Elle sera donnée par

$$vit_{bande} * ép_{bande} * larg_{bande} * c_{p,steel} * \rho_{steel} * (T_{w,bacs} - T_{a,ext})$$

On supposera que  $\rho_{steel}=7800 \frac{kg}{m^3}$  et  $c_{p,steel}=470 \frac{J}{kg*K}$ .

Par exemple, une bande de 4,9 mm d'épaisseur et 1274 mm de largeur avançant à une vitesse moyenne de 190 m/minute entrant à une température de 10 °C induira une perte de chaleur de 5435 kW. Dans ce cas, si la température de l'air dans la décaperie est de 14°C, la puissance à fournir aux bacs pour les maintenir à température sera de

$$5435+155+990=6580kW.$$

On remarque que la majeure partie des déperditions des bacs d'acide vient de l'échange de chaleur avec la bande.

Outre les échangeurs de vapeur, les consommations de vapeur du poste de détente de la décaperie sont dues à la consommation du sécheur à air, aux fuites, aux déperditions dans les conduites et à l'alimentation en vapeur du traitement Coolant et effluents huileux.

#### (4) Sécheur à air

Le sécheur à air de la Galva 7 à Flémalle sèche une bande de 1,6 m de largeur avançant à 380m/min et consomme 326 kW de chaleur (info donnée par André Ferri SA). Vu la similarité des bandes à sécher, on considérera que le sécheur de la décaperie consomme la même puissance.

Lorsqu'elle est soutirée aux utilisateurs, la vapeur est d'abord détendue au poste de détente, puis elle subit une nouvelle détente dans les vannes de régulation et est condensée. En général, les condensats sont ensuite amenés à des bacs d'eau déminéralisée à pression atmosphérique. Les utilisateurs retirent donc la chaleur à la vapeur en la condensant à pression atmosphérique. La quantité de chaleur récupérée par kg de vapeur par les utilisateurs (autres que le chauffage) est donc de  $2371 \frac{kJ}{kg}$ .

On en conclut que le sécheur à air consomme 0,5 t/h de vapeur.

#### (5) Reste

Pour ce qui est des fuites, des déperditions dans les conduites et de l'alimentation en vapeur du bâtiment coolant et effluents huileux, on supposera que la consommation qu'ils induisent est constante et on la déduira de mesures en fonctionnement.

Le 24/02, la température extérieure était de 5°C et celle dans la décaperie de 8 °C. A 10h30, une suite de bobines de format 1, 037m X 0,0035m passait, avec une consommation moyenne sur 30 min de 10 t/h. et une vitesse moyenne de 200m/min. Les bacs étaient à température.

On avait donc

- une consommation par réchauffement de la bande de 3550kW
- une consommation par déperditions par conduction des bains de 1070kW
- et une consommation par renouvellement de l'acide de 155 kW.

On a donc une consommation par les échangeurs de chaleur de 7,2t/h

Vu que le sécheur à air consommait 0,5 t/h, cela donne une consommation pour tout sauf les déperditions des conduites, le bâtiment Coolant et les fuites de 7,7 t/h.

Ces derniers ont donc une consommation de 2,3t/h, soit 1500kW.

#### (6) Total

Les bandes passant par la décaperie ont

- des épaisseurs de 3 à 5mm
- des largeurs de tôles entre 1 et 1,5m

Typiquement, des épaisseurs de 3,5mm, des largeurs de 1m et des vitesses de 200m/min sont mesurées.

En comptant une température extérieure de 6°C et 10°C à l'intérieur de la décaperie, ceci donne une consommation totale typique en hiver de 9,8 t/h. En comptant une température de 10°C à l'extérieur et 15°C à l'intérieur (le chauffage étant éteint pendant l'été), on arrive à une consommation typique en été de 9,1 t/h.

Le débit de vapeur nécessaire maximal sera donné pour une vitesse de 200m/min, une largeur de 1,3m, une épaisseur de 5 mm (on ne s'attend pas à avoir une largeur et épaisseur maximale sur la même bobine régulièrement), une température extérieure de -2°C (la température moyenne sur 12 h est inférieure à -2°C de l'ordre de 8 jours par an) et une température de l'air de la décaperie de 5°C et vaudra  $15 \frac{t}{h}$ . En revanche, le même format de bobines induirait une consommation de seulement  $13,6 \frac{t}{h}$  en conditions typiques d'été (10°C extérieur et 15°C à l'intérieur) Dans les conditions actuelles, comme le montrera l'analyse des détentes faites dans la section théorique, on n'est pas capable de fournir ce besoin de chaleur.

#### (7) Démarrage

Des mesures montrent que, lors du démarrage de la décaperie (chauffage des bains), le débit de vapeur oscille entre 5 et 7T/h. Cette valeur est bien loin du maximum mais cela est expliqué par le fait que, lors d'un redémarrage de la décaperie, on limite le débit de vapeur afin que la température dans les bacs d'acide ne monte que de 10°C /h dans le but d'éviter un choc thermique dans les réfractaires des bacs d'acides.

(8) Tableau récapitulatif

Le profil de consommation de la décaperie est résumé dans le tableau suivant :

Eléments de consommation	Besoin de vapeur
Sécheur à air	0,5t/h (typique)
Bacs d'acide	12,2 t/h (maximum en hiver) 7 t/h (typique en hiver) 10,8 t/h (maximum en été) 6,3 t/h (typique en été)
Bâtiment coolant, fuites et déperditions	2,3 t/h (typique)
Total	15 t/h (maximum en hiver) 9,8 t/h (typique en hiver) 13,6 t/h (maximum en été) 9,1 t/h (typique en été) 6 t/h (en chauffant les bacs)

**iii) TD-4C**

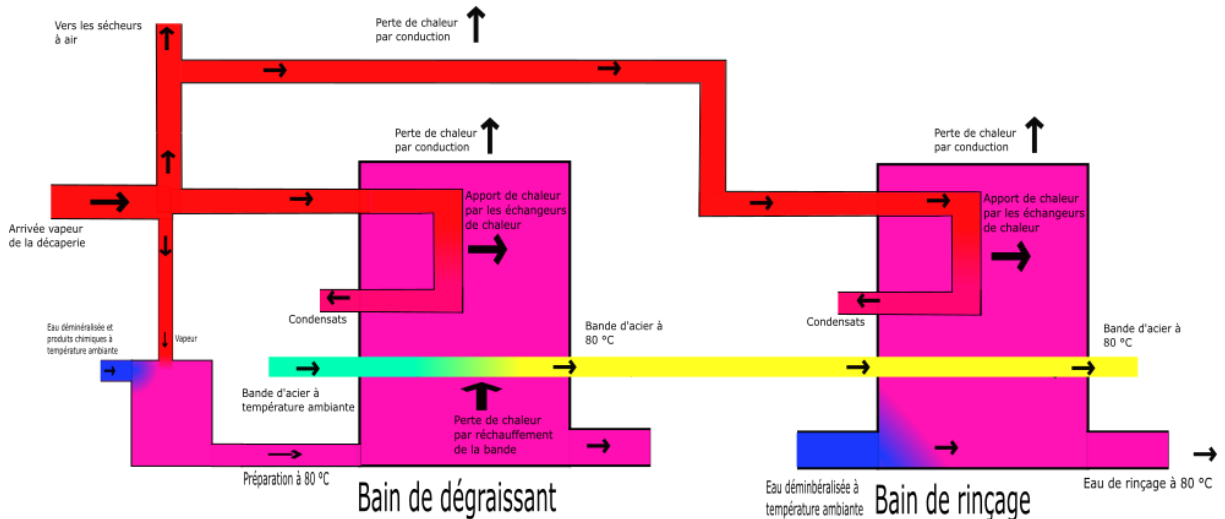
Au tandem 4 cages, un capteur de débit instantané est disponible, mais celui-ci est calibré pour de la vapeur à 13 bars. Il indique typiquement un débit de 0,3 t/h à l'arrêt (lorsqu'on se contente de maintenir les bacs à température) et 0,27 à 0,33 t/h en régime.

**iv) TD-5C**

Un capteur de débit instantané est disponible au TD-5C, mais celui-ci est calibré pour de la vapeur à 13 bars. Il indique un débit entre 1,9 et 2,3 t/h en régime et de 1 t/h lorsqu'on maintient juste les tanks à température.

## v) Recuit continu

Au recuit continu, la vapeur sert à alimenter 2 sécheurs à air ainsi que des échangeurs de chaleurs chauffant des bains de dégraissage et de rinçage, ainsi qu'à chauffer la préparation servant à régénérer les bains de dégraissant. Les différents échanges de chaleur sont illustrés sur la figure suivante.



### (1) Sécheurs à air

La consommation des sécheurs à air sera supposée constante. En supposant que chacun d'entre eux a la même puissance que celui de la décaperie, on en conclut qu'ils consomment 1 t/h à eux deux.

### (2) Bains

Dans nos calculs, nous séparerons la consommation des bains de dégraissants en une composante due à l'appoint de dégraissant, une composante due aux déperditions et une composante due à l'échange de chaleur avec la bande. Pour le bain de rinçage, on considérera juste la composante due aux déperditions et la composante due à l'appoint d'eau de rinçage vu que la bande est déjà à température en entrant dans le rinçage.

#### (a) Appoint de rinçage

Commençons par évaluer la consommation due à l'appoint de rinçage. L'appoint se fait avec de l'eau déminéralisée à température ambiante. Il faudra donc amener cet appoint à la température du bain de rinçage (80°C). La puissance à fournir sera donc donnée par

$$\dot{m}_w * c_{p,w}(T_{w,bains} - T_{w,in})$$

On a donc une puissance calorifique de 160 kW à fournir. Elle entrainera la consommation de 0,25 tonne par heure.

#### (b) Echange de chaleur entre le dégraissant et la bande

Commençons par évaluer la composante due à l'échange de chaleur avec la bande.

La bande

- passe à une vitesse de 200 à 500 m/min
  - typiquement 400 m/min
- a des largeurs entre 750 et 1050 mm
  - typiquement 1000mm
- a des épaisseurs entre 16/100 à 45/100/mm
  - typiquement 33/100 mm

La température d'entrée des bobines dépend beaucoup du temps qu'elles ont passé en stockage après être sortie du tandem. Elle varie entre 50°C et la température ambiante (typiquement 50°C en entrant).

Comme à la décaperie, commençons par vérifier si on peut faire l'hypothèse que la bande prend la température des bains en appliquant la même méthode. Les deux bains de dégraissage font 3 m de long chacun et la bande va à une vitesse typique de 400m/min, elle les traverse donc en 0,9 s. L'analyse montre que, si la bande entre à 15 °C dans les bains, son centre sera à 79,5 °C en sortant des bains. On en conclut que l'hypothèse que la bande prend la température des bains est justifiée.

Connaissant l'épaisseur, la largeur, la vitesse et la température d'entrée typiques de la tôle, on peut trouver la consommation due au réchauffement de la bande.

La consommation typique par réchauffement de la bande sera donc donnée par

$$vit_{bande} * ép_{bande} * larg_{bande} * c_{p,steel} * \rho_{steel} * (T_{w,bacs} - T_{bande,in})$$

Soit 240kW, avec les valeurs typiques. Cela représente la consommation de 0.4 tonnes de vapeur par heure.

### *(c) Appoint de dégraissant*

Passons maintenant à la composante due à l'appoint ( $6 \frac{m^3}{h}$ ) des bains de dégraissage. L'appoint de dégraissant est préparé à partir d'eau déminéralisée à température ambiante. La consommation de vapeur due à l'appoint de dégraissant est donc la vapeur nécessaire pour amener l'appoint de la température ambiante à 80°C par mélange.

La quantité de vapeur à fournir pour la préparation sera donc donnée par

$$\dot{m}_{w,in} * h_{w,in} + \dot{m}_{vap,in} * h_{vap} = (\dot{m}_{w,in} + \dot{m}_{vap,in}) * h_{w,appoint}$$

En approximant les propriétés du dégraissant par celle de l'eau, on arrive à la conclusion qu'il faut 0,8 t/h de vapeur pour réchauffer l'appoint de dégraissant.

### *(3) Déperditions*

En sommant les composantes de la consommation ainsi calculées, on obtient une consommation hors déperditions de 2,45 t/h. Un capteur de débit instantané calibré

récemment est disponible au recuit. Il indique une consommation typique de 3,4 t/h. On en conclut que les déperditions entraînent une consommation de 1 tonne de vapeur par heure.

En considérant qu'un pic de consommation se produit à une vitesse de 400m/min, pour la largeur maximale, une épaisseur de 40/100mm et pour la température d'entrée minimale, on a un débit de vapeur pour le réchauffement de la bande en pointe de 1 tonnes par heure (pour 670kW).

On en conclut qu'on aura une consommation de pointe de l'ordre de 4 tonnes par heure.

#### (4) Mesures

Les mesures du capteur installé au poste de détente du recuit continu donnent un débit typique de 3,4 t/h. Parfois on a un débit en régime de 3,8t/h.

#### (5) Démarrage

Des mesures ont montré que, lors de son démarrage, le recuit tire un débit plutôt aléatoire avec des pics à 3,8 tonnes par heure.

(6) Tableau récapitulatif

Éléments de consommation	Besoin de vapeur	Commentaire
Sécheurs à air	1t/h (typique)	Calculé
Mélange avec la préparation	0,8t/h (typique)	Calculé
Échangeurs de chaleur	1,65 t/h (typique)	Calculé
	2,25 t/h (maximum en régime)	Calculé
Total	3,4 t/h (typique)	Calculé et mesuré
	4 t/h (maximum en régime)	Calculé et mesuré
	Aléatoire avec pics à 3,8 t/h (en chauffant les bains)	Mesuré

**vi) Skin-pass**

Un capteur de débit instantané est disponible au Skin-Pass, il indique une consommation typique de 0,15 t/h et des pics réguliers à 0,5 t/h et un maximum de 0,75 t/h.

**vii) Etamage**

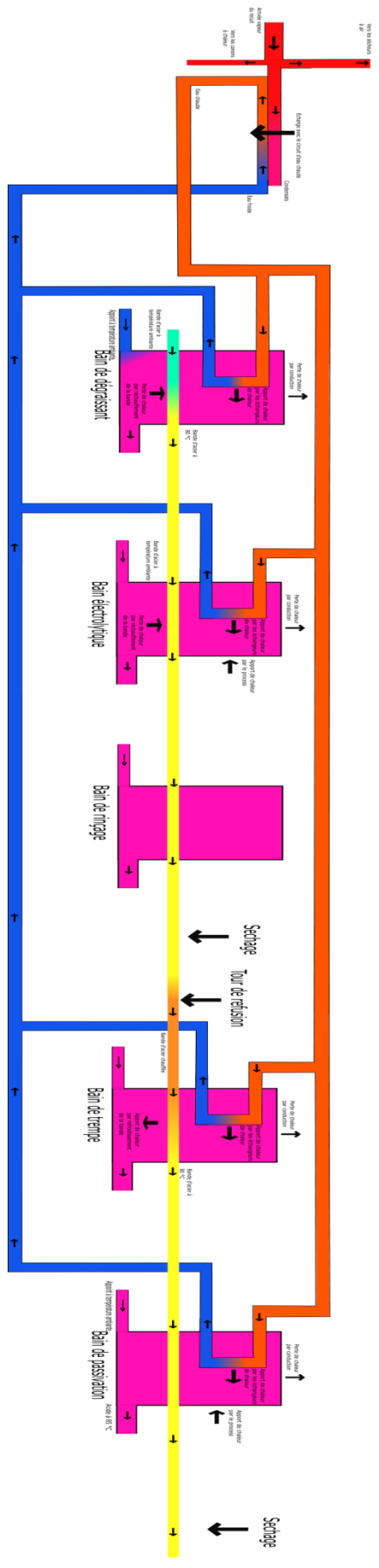
A l'étamage, la vapeur sert à chauffer un circuit d'eau qui chauffe les bains et à alimenter deux sécheurs à air chaud et des canons à chaleur servant à chauffer de l'eau déminéralisée. Parfois, la vapeur est condensée sans utiliser la chaleur de condensation afin de fournir de l'eau déminéralisée.

Avant d'arriver à l'étamage, les bobines passent au Skin-Pass (qui a un fonctionnement essentiellement similaire aux TD-4C). Vu la haute température de la bande lorsqu'elle sort du Skin-Pass, on supposera que sa température varie entre 50 °C et la température ambiante en entrant dans l'étamage. Elle vaut typiquement 50 °C.

Les bobines entrent froides (typiquement 50°C) dans les cellules de dégraissant (85 °C) puis sont systématiquement à une température proche du bain suivant, les seuls bains qui subiront des pertes de chaleur par échange avec la bande sont donc les bains de dégraissant. Les autres bains subiront des pertes de chaleur à travers leurs parois et devront réchauffer leurs appoints en leurs liquides respectifs.

En fonctionnement, le bain de quench et le bain électrolytique sont chauffés par le processus de fabrication, ils ne consomment donc pas de chaleur sauf en démarrage.

Les échanges de chaleur concernés par nos calculs sont illustrés à la figure suivante.





### (1) Sécheurs à air

Il y a deux sécheurs à air. On supposera qu'ils ont la même puissance calorifique que celui de la décaperie (650 kW à eux deux). On en conclut qu'ils ont une consommation de 1 t/h à eux deux.

### (2) Canons à chaleur

Les canons à chaleur servent à chauffer  $8 \frac{m^3}{h}$  d'eau déminéralisée de la température ambiante à 80°C. La vapeur entre dans un échangeur eau-vapeur où elle se condense sans se mélanger à l'eau. Cette eau servira à alimenter le rinçage final passivation. Leur consommation vaut

$$\dot{m}_w * c_{p,w} * (T_{w,out} - T_{w,in})$$

Soit 700 kW, ce qui induit la consommation de 1 tonne de vapeur par heure.

### (3) Echangeurs de chaleur

Pour évaluer la consommation des échangeurs de chaleurs des bains, on la séparera en consommation servant à compenser l'échange de chaleur avec la bande, consommation servant à chauffer les appoints des différents bains et en consommation servant à compenser les déperditions (par conduction et évaporation). Les bandes qui passent par l'étamage ont

- des épaisseurs de 14/100 à 33/100mm
  - 22/100 typiquement
- des largeurs de 900 à 950 mm
- une vitesse de 180 à 480 m/min
  - 350 typiquement.

#### (a) *Echange avec la bande*

Si on suppose à nouveau que la bande prend la température des bains, la composante d'échange de chaleur avec la bande sera donnée par la même formule qu'à la décaperie. Commençons donc par vérifier la validité de cette hypothèse dans le cas des cellules de dégraissant de l'étamage.

Appliquons à nouveau la méthode utilisée pour la décaperie. Elle montre que, même si la bande entre dans les bains à 15 °C, le centre de la bande sera à une température de 84,99 en sortant des cellules. L'hypothèse que la bande prend la température des bains paraît donc justifiée. L'apport de chaleur due au réchauffage de la bande sera donc donné par

$$vit_{bande} * ép_{bande} * larg_{bande} * c_{p,steel} * \rho_{steel} * (T_{w,bacs} - T_{a,ext})$$

En supposant que la bande arrive à une température de 50°C et sachant que les bains de dégraissage sont à 85°C, on arrive à un refroidissement par échange avec la bande typique de 156 kW. Si on arrête la ligne pendant plusieurs jours, les bobines auront le temps de refroidir. Elles descendront donc à la température de l'air des halls. Dans ce cas-là et pour

une épaisseur de 33/100mm, une vitesse de 350 m/min, et une largeur de 0,9 m, on a une perte de chaleur de 445 kW.

### *(b) Déperditions dans les bains*

Intéressons-nous maintenant à la consommation servant à compenser les déperditions dans les bains.

Lorsqu'on arrête l'étamage :

- les bains de dégraissant ( $44 \text{ m}^3$ ) perdent de l'ordre de 15-20°C (descente de 85 à 65 °C) en 24h
- le bain électrolytique ( $90\text{m}^3$ ) descend de 40 à 20 °C en 30h
- le bain de passivation ( $22\text{m}^3$ ) descend de 55 à 45°C en 26h
- le bain de quench ( $10\text{m}^3$ ) descend de 60 à 25°C en 3h.

Par la même méthode que pour les bains de la décaperie, on en conclut que le coefficient de transfert de chaleur entre le bain électrolytique et l'air des halls est de 6,82 kW/K, que celui du bain de passivation est de 0,2932 kW/K et que celui du bain de quench est de 6,361 kW/K.

La puissance à fournir pour compenser les pertes sera donc (en kW)

$$6,82 * (T_{electr} - T_{a,int}) + 0,2932 * (T_{passiv} - T_{a,int}) + 6,361 * (T_{quench} - T_{a,int}) + 0,7245 * (T_{degr} - T_{a,int})$$

En supposant qu'il fait 17°C dans les halls près de l'étamage (valeur effectivement mesurée), les déperditions maximales en démarrage seront donc de 300kW juste avant de commencer le traitement des bandes. En fonctionnement, les déperditions qu'il faudra compenser (donc sans inclure le quench et le bain électrolytique) seront données par

$$0,2932 \frac{\text{kW}}{\text{K}} * (T_{w,passiv} - T_{a,int}) + 0,7245 \frac{\text{kW}}{\text{K}} * (T_{w,degr} - T_{a,int})$$

Et vaudront 60 kW pour le bain de passivation et les bains de dégraissants.

### *(c) Appoints des bains*

Enfin, calculons la puissance calorifique à fournir pour réchauffer les appoints. Les bains de dégraissage sont régénérés par un débit d'environ  $0,3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  à température ambiante, tandis que le bain de passivation est régénéré par un débit de  $0,25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ . La puissance calorifique à fournir sera donc donnée par

$$\dot{m}_{w,app,degr} * c_{p,w}(T_{w,bain,degr} - T_{w,in}) + \dot{m}_{w,app,passiv} * c_{p,w}(T_{w,bain,passiv} - T_{w,in})$$

Et vaut 40kW.

### (4) Déperditions dans les conduites et cellules

On a donc une consommation hors déperditions dans les conduites et les cellules de

$$1 \frac{t}{h} + 1 \frac{t}{h} + \frac{156+60+40kW}{2371 \frac{kJ}{kg}} * \frac{60*60 \frac{s}{h}}{1000 \frac{kg}{tonne}} = 2,4 t/h.$$

En supposant que les déperditions dans les conduites et les cellules induisent la consommation de 1 t/h en fonctionnement (comme au recuit), on arrive à une consommation typique de 3,4 t/h. On supposera que les conduites de vapeur représentent la moitié des pertes en question, soit 0,5 t/h.

Ceci donne une consommation maximale en régime de 4,1 tonnes/h (tôle large, épaisse et froide).

(5) Démarrage

Il convient de s'interroger sur la quantité de vapeur à fournir lors du démarrage de la ligne d'étamage, pendant qu'on chauffe les bains. En effet, vu qu'on chauffe tous les bains et non juste ceux qui ne sont pas chauffé par le processus de fabrication, il se pourrait que la consommation soit maximale lors du chauffage des bains.

Lors d'un démarrage de l'étamage, les bains de dégraissant (44m<sup>3</sup>) montent de 65°C à 80 °C en une heure et 40 minutes, le bain électrolytique (90 m<sup>3</sup>) passe de 20°C à 40°C en 3 heures, le bain de passivation (22 m<sup>3</sup>) monte de 45°C à 55°C en 2h et le bain de quench (10m<sup>3</sup>) monte de 25 à 30°C en 5 minutes. Cela donne une consommation en démarrage de l'étamage de 2300 kW pour la chauffe et les pertes à travers les parois des bains, soit 3,5 tonnes par heure. Si on y ajoute la consommation des canons à chaleur (1t/h) et les déperditions dans les conduites, on arrive à une consommation au démarrage de 5 t/h.

(6) Tableau récapitulatif

Le tableau suivant résume les différents régimes de consommation de l'étamage :

Eléments de consommation	Besoin de vapeur
Sécheurs à air	1t/h (typique)
Canons à chaleur	1t/h (typique)
Échangeurs de chaleur avec les bains	Entre 1,4 et 2,1 t/h (en régime) 3,5 t/h (en chauffant les bains)
Pertes dans les conduites vapeur	0,5 t/h
Pertes dans les cellules	0,5 t/h
Total	3,4 t/h (typique) 4,1 t/h (maximum en régime) 5 t/h (en chauffant les bains)

### **viii) Evaluation des déperditions de chaleur dans les conduites**

Bien qu'elles ne fassent pas partie du processus de fabrication à proprement parler, il faudra toujours compenser les déperditions dans les conduites pour que le process fonctionne. Pour les évaluer, on se sert de la même méthode que pour l'analyse de l'écoulement dans les conduites. On suppose les déperditions constantes et fixée par les déperditions dans un tronçon de 100m avec une pression de 12 barA en entrée, un titre vapeur de 0,95 en entrée et un débit proportionnel à l'aire passage (en partant de 10 t/h pour un diamètre intérieur de 20 cm).

On a donc des déperditions de:

- Pour un diamètre de 50mm : 4kW
- Pour un diamètre de 100mm : 6kW
- Pour un diamètre de 150mm : 8kW
- Pour un diamètre de 200mm : 10kW
- Pour un diamètre de 250mm : 12 kW

En des débits de vapeur condensée par 100m, sachant que, à 12 barA, l'enthalpie de vaporisation est 1986 kJ/kg :

- Pour un diamètre de 50mm : 7,2 kg/h
- Pour un diamètre de 100mm : 10,9 kg/h
- Pour un diamètre de 150mm : 14,5 kg/h
- Pour un diamètre de 200mm : 18,1 kg/h
- Pour un diamètre de 250mm : 21,7 kg/h

On sait sur base des plans du réseau vapeur qu'on a à l'intérieur de l'ordre de :

- 400m de conduite de 50mm de diamètre
- 970m de conduite de 100mm de diamètre
- 150m de conduite de 150mm de diamètre
- 1040m de conduite de 200mm de diamètre
- 810m de conduite de 250mm de diamètre

Et à l'extérieur, il y a de l'ordre de :

- 500m de conduite de 250mm de diamètre
- 200m de conduite de 100mm de diamètre

On a donc des déperditions vers l'intérieur (donc utiles mais non orientées vers les zones qui ont besoin de chaleur) de 276 kW (0,5 t/h) et à l'extérieur (donc inutiles) de 55 kW (0,1 t/h).

### **ix) Consommation du processus de fabrication :**

Maintenant que nous avons évalué la consommation de chaque élément du processus de fabrication, évaluons la consommation de l'ensemble du processus de fabrication pour différents régimes de fonctionnement.

### *(1) Typique*

Pour le régime où chaque utilisateur est en fonctionnement typique, il nous suffit de sommer les consommations typiques des utilisateurs.

Sachant que le TD-4C et le TD-5C ne tournent pas en même temps, on supposera que le TD-5C est en régime. On arrive à 19,6 t/h en hiver et 18,9 t/h en été. Il est important de remarquer que la valeur qu'on mesurera réellement dépendra des arrêts de lignes, du format des bobines en train d'être traitées (surtout à la décaperie), des pannes, etc.

### *(2) Maximal*

En théorie, on aurait une consommation de vapeur maximale en régime par les utilisateurs de 26,8 t/h en hiver et 25,8 t/h en été. Cependant, ce maximum ne sera atteint que si tous les utilisateurs se mettent en régime maximal en même temps.

La décaperie n'a pas sa consommation maximale lors de son démarrage (vu que les bacs sont chauffés lentement afin d'éviter les chocs thermiques), contrairement à la plupart des autres utilisateurs de vapeur.

En effet, soit les bobines ont eu le temps de se refroidir et elles refroidiront plus les différents éléments à maintenir chauds, soit, dans le cas de l'étamage, les bains doivent être chauffés et cela nécessite une plus grande consommation de vapeur qu'en régime. On en conclut que la consommation maximale théorique du processus de fabrication ne sera que rarement voir jamais atteinte. Les pics de consommation du processus de fabrication qu'on percevra seront plutôt :

- lors de démarrages de l'usine (tous les consommateurs sauf la décaperie (6t/h), le traitement des eaux (qui n'a pas encore de coolant usé à traiter) et le recuit (3,8t/h) sont à leur consommation maximale) soit à 18 t/h
- lorsque 3 grands consommateurs sont en haute consommations. On considérera que la décaperie, l'étamage et le recuit sont en consommation haute et les autres sont en régime. On arrive à 25,6 t/h en hiver et à 24,7 t/h en été.
  - Si le problème d'alimentation de la décaperie était résolu, on arriverait à une valeur maximale en hiver de 26 t/h.

### ***x) Conclusion de la section***

Cette section a permis de répondre à la question 2. En effet, nous avons montré que les variations de consommations des grands consommateurs en régime sont principalement fixées par le format des bobines étant en train d'être traitées et leurs températures au début du traitement. Ainsi, ils consommeront plus s'ils traitent de plus grand format et que les bobines sont froides au début du traitement. Au démarrage d'une ligne, par contre, la consommation d'un utilisateur est soit maximale soit limitée par les chocs thermiques qu'il convient d'éviter.

On a également montré que la consommation du processus de fabrication dépend des mêmes paramètres et est maximale en régime en hiver.

#### **d) Chauffage des halls**

Connaissant les réponses aux deux premières questions, il paraît temps de chercher la réponse à la troisième, donc de déterminer la consommation du chauffage des halls par les aérothermes.

Dans cette section, nous allons donc évaluer la puissance de chauffe nécessaire pour garder la température dans le bâtiment constante en fonction de la température extérieure et du régime de l'usine. La connaître nous permettra de savoir quelle est la fraction des aérothermes qui fonctionnent en même temps, répondant par la même occasion à la question 3.

##### ***i) Ordres de grandeur et fonctionnement en été***

La puissance totale des aérothermes actifs est de 14 000 kW (valeur obtenue sur base des plans des capacités thermiques des aérothermes et de la liste de l'état des aérothermes). S'ils étaient tous actifs en même temps, cela représenterait une consommation de 25,5 t/h.

En été, les conduites menant aux aérothermes sont isolées du réseau. Le chauffage des halls ne consomme donc rien.

##### ***ii) Mesure***

Pour commencer, on a pris des mesures un jour de froid typique afin d'avoir une première valeur de la consommation du chauffage des halls.

Le 07/03/2017 à 08h45 :

- il faisait
  - 6 °C à l'extérieur
  - en moyenne 13 degrés dans le bâtiment
- la décaperie consommait 4 t/h
- le skin-pass consommait 0,1t/h
- le recuit consommait 3,5 t/h
- les chaudières produisaient en tout 24,5 t/h de vapeur.

En évaluant les consommations des consommateurs restant, à savoir

- l'étamage à 3,4 t/h
- le TD-4C à 0,3t/h (à l'arrêt)
- le TD-5C à 2 t/h
- la station de traitement des eaux à 0,5 t/h,

on obtient la consommation du chauffage du bâtiment (par déperditions des conduites intérieure et par les aérothermes) par la différence entre la production de vapeur et les consommations autres que le chauffage. Elle vaut 10,6 t/h.

Ceci donne une puissance calorifique dégagée par le chauffage de 5840 kW (la chaleur libérée par la condensation d'un kg de vapeur à 12,4 barA et 1°C de surchauffe en se

condensant étant de 1983 kJ). Il est important de garder en tête le fait qu'il y a d'autres apports de chaleur que ceux des conduites et ceux des aérothermes (mentionnés plus bas).

### ***iii) Conservation de l'énergie***

#### ***(1) Méthode***

Pour évaluer l'apport de chaleur par chauffage nécessaire pour maintenir la température dans le bâtiment constante, nous allons appliquer le principe de la conservation de l'énergie à un volume de contrôle. Pour rappel, ce principe se résume à

'La variation d'énergie contenue dans un volume est égal à la différence entre l'énergie y entrant et l'énergie en sortant'.

Considérons

- un volume de contrôle englobant
  - le bâtiment de l'usine
  - le bâtiment coolant et effluent huileux
- et les différents apports et pertes de chaleur subits par ce volume de contrôle à l'exception de l'apport du chauffage.

Une fois tous ces apports et pertes évalués, nous nous baserons sur le point de mesure pour évaluer la consommation du chauffage en supposant que la température de l'usine était stable au moment où ces mesures ont été prises. En effet, au vu de l'hypothèse sur l'évolution de la température, la variation de l'énergie contenue dans le volume de contrôle est alors nulle. L'énergie entrant dans le bâtiment est donc égale à l'énergie en sortant. Cela revient à dire que les déperditions du bâtiment sont égales à la somme des autres apports et pertes.

Connaissant la valeur des déperditions thermiques du bâtiment et ayant mesuré les températures dans le bâtiment et en dehors, on en tire le coefficient de transfert entre l'air à l'intérieur du bâtiment et l'air extérieur.

Une fois cette première valeur obtenue, nous nous servirons de la méthode du Recknagel [14] et de la norme VDI 2082 [7] pour calculer par une autre méthode la valeur des déperditions du bâtiment afin de valider la valeur du coefficient de pertes obtenue.

#### ***(2) Bilan des apports de chaleurs hors vapeur***

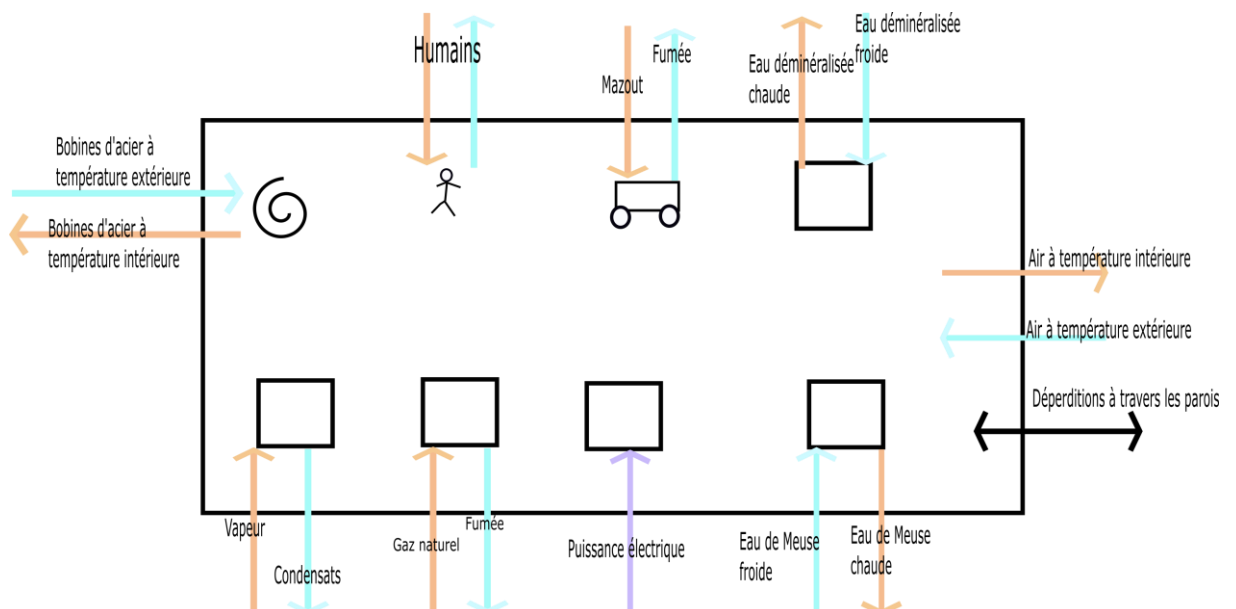
Le bâtiment subit les apports et pertes de chaleur suivants :

- Du gaz naturel est brûlé dans le recuit et les différentes chaudières à gaz pour maintenir le four et certaines zones à température puis repart sous forme de fumée (dégagement de chaleur du four du recuit, ...).
- De l'eau déminéralisée entre à 10 °C et repart à 25 °C en moyenne, elle emporte donc de la chaleur en partant.
- Des bobines d'acier entrent à la température ambiante extérieure et sortent à la température ambiante intérieure (de l'ordre de 100 000 tonnes par mois), elles refroidissent donc les halls en hiver.

- De la vapeur entre à 11,6 bars relatifs saturés et repart sous forme d'eau saturée à pression atmosphérique, elle apporte donc de la chaleur.
- Des gens entrent dans l'usine (en moyenne 100 personnes sont présentes dans le bâtiment) et y dégagent de la chaleur (200 W par personne).
- De l'électricité entre dans l'usine puis se dissipe sous forme de chaleur
- L'air de l'usine est renouvelé, l'air chaud dans l'usine est donc remplacé par de l'air froid venu de dehors, on a donc une perte de chaleur
  - Les parois subissent un transfert de chaleur par conduction
  - Du mazout est brûlé pour alimenter les engins dans l'usine
- De l'eau de Meuse sert à refroidir certains éléments du processus de fabrication

### (3) Calculs des apports et pertes de chaleur

Commençons par évaluer les différents apports et pertes de chaleur. Ces derniers sont illustrés dans le schéma suivant.



- L'eau de Meuse sert à refroidir certains éléments de processus de fabrication. Elle repart donc plus chaude qu'elle n'était en arrivant.
  - On suppose qu'elle arrive à 10°C (valeur typique à cet endroit de la Meuse en Mars) et repart à 17°C (température mesurée à certaines conduites de sortie en mars).
  - Les pompes à eau de Meuse ont un débit maximal de  $5600 \frac{m^3}{h}$  mais, en pratique, 2 pompes  $1200 \frac{m^3}{h}$  et une pompe  $2000 \frac{m^3}{h}$  sont allumées.
  - On utilise  $150 \frac{m^3}{h}$  pour produire de l'eau décarbonatée dont une partie sert à produire de l'eau déminéralisée.
  - On suppose donc que  $\frac{2}{3}$  du débit restant, soit  $2800 \frac{m^3}{h}$  d'eau de Meuse servent à refroidir le processus de fabrication. On obtient une perte de chaleur de 22 700 kW.



- La combustion du mazout alimentant les véhicules dans le bâtiment dégage de la chaleur.
  - En 2015, on a consommé de l'ordre de 28 500 litres de Mazout sur toute l'usine.
  - Le mazout ayant un PCI de l'ordre de 10 kWh/litre, ceci représente une puissance moyenne de 32,5 kW.
- Divers appareils sont alimentés par de l'électricité.
  - Les gains internes électriques sont évalués en supposant que tout kWh consommé à l'usine finit sous forme de chaleur et que le dégagement qui en résulte est constant.
  - Sachant que, en février 2017, l'usine a consommé 13 900 MWh, on arrive à des gains internes électriques de 20 700 kW.
- Les 100 personnes qui sont présentes dans le bâtiment dégagent 20kW.
- L'acier entre froid dans l'usine et en sort à la température des halls
  - 100 000 tonnes d'acier entrent dans l'usine chaque mois
  - Les bobines arrivent à 8 °C et repartent à 15°C en moyenne en hiver
  - Cela représente 127 kW de déperditions.
- L'eau déminéralisée est produite à partir d'eau de Meuse froide, utilisée dans l'usine puis renvoyée à la STE. Bien qu'on essaie de minimiser la température à laquelle on rejette l'eau traitée, elle est à une température supérieure à celle de l'eau arrivant.
  - Les consommations d'eau déminéralisée dans l'usine (hormis la chaudière) sont les suivantes :
    - $200 \frac{m^3}{jour}$  pour la décaperie
    - $180 \frac{m^3}{jour}$  pour produire du coolant
    - $2400 \frac{m^3}{jour}$  pour le secteur API de l'usine
  - On a donc 116 t/h en moyenne qui rentrent dans l'usine à 10°C et en sortent à 25°C (après traitement).
  - Ceci donne une perte de chaleur de 2000 kW.
- Le gaz naturel est brûlé dans le recuit et les différentes chaudières à gaz pour maintenir le four et certaines zones à température puis repart sous forme de fumée. Il dégage donc de la chaleur dans l'usine.
  - Le gaz naturel utilisé a un PCI de  $31\,678 \frac{kJ}{Nm^3}$  ( $8,72 \frac{kWh}{Nm^3}$ ).
  - Typiquement, l'usine de Tilleur consomme de l'ordre de  $400\,000 \frac{Nm^3}{mois} = 0,154 \frac{Nm^3}{s}$  hors chaudières.
  - On a donc un débit massique moyen de gaz naturel de  $0,1078 \frac{kg}{s}$ .
  - En supposant
    - que les gaz de combustion quittent l'usine à 710 °C (température de consigne maximale dans les zones les plus chaudes du recuit continu)
    - que les fumées ont une capacité thermique de l'ordre de 1,043

$$\frac{kJ}{kg \cdot K} \text{ et l'air de } 1,004 \frac{kJ}{kg \cdot K}.$$

- On en conclu que les gaz libèrent 3 462 kW dans l'usine.
- Le plus gros de la vapeur utilisée par les consommateurs sert à compenser des échanges de chaleur
  - Soit entre le processus de fabrication et l'air de l'usine
  - Soit entre le processus de fabrication et la tôle, tôle qui finira par refroidir au contact de l'air de l'usine
    - la chaleur apportée par la vapeur aux éléments du processus de fabrication finira donc en dégagement de chaleur du processus de fabrication dans l'air de l'usine.
  - Cette puissance sera évaluée par le produit du débit de vapeur total fournit aux utilisateurs et de la différence d'enthalpie entre la vapeur à l'arrivée aux utilisateurs (11,4 bars relatifs, 1°C de surchauffe) et en les quittant (pression atmosphérique, liquide saturé).
    - Cette différence vaut 2370kJ/kg.
  - On a donc en fonctionnement typique d'hiver un dégagement de 12 900 kW.

(4) Tableau récapitulatif des gains et départ internes

Apport/départ	Puissance (négative si perte, positive si apport)
Gaz naturel	3 462 kW
Eau de Meuse refroidissement	-20 700 kW
Eau démin	-2020 kW
Bobines d'acier	-127kW (négligé)
Gens	20 kW (négligé)
Electricité	20 700 kW
Mazout	32,5 kW (négligé)
Vapeur Utilisateurs	12 900 kW (pour une consommation de 19,6t/h par les utilisateurs)
Chauffage des halls	14 000 kW (puissance maximale)
Total sans chauffage	12 350kW (typique hiver)

(5) Calculs

Pour rappel, le 07/03/2017 à 08h45, il faisait 6 °C à l'extérieur et en moyenne 13 °C dans le bâtiment. Le processus de fabrication consommait 13,8 t/h en tout et le chauffage 10,6 t/h.

On avait donc un dégagement de chaleur par les utilisateurs de 9 500 kW. L'apport de chaleur total était de 14 400 kW.

En supposant que cet apport suffisait tout juste à compenser les pertes de chaleur par renouvellement d'air et par conduction, on obtient un coefficient d'échange thermique global entre l'air intérieur et extérieur de  $2\,057 \frac{kW}{^\circ C}$ .

### (6) Validation

Afin de valider cet ordre de grandeur du coefficient de pertes, nous allons utiliser la méthode présentée dans le Recknagel [14].

#### (a) *Echanges de chaleur entre le bâtiment et l'extérieur*

Le bâtiment est grand et a beaucoup de fuites d'air, notamment par les volets par lesquels les camions entrent qui restent souvent ouverts plus longtemps que nécessaire. Le bâtiment perd de la chaleur par conduction à travers les murs, le plafond et le sol ainsi que par renouvellement (volontaire ou non) de l'air des halls.

#### (b) *Hypothèses*

On sait qu'une usine sans souillure particulière de l'air est généralement aérée de manière à renouveler son air entre 4 et 6 fois par heure selon la norme VDI 2082 [7]. Nous supposons donc que l'air est renouvelé 5 fois par heure.

Le bâtiment sera approximé par un volume de  $1\,105\,000 \text{ m}^3$  (10 m de haut, 130 m de large et 850 m de long).

Pour ce qui est de la charge due au renouvellement de l'air, on la calculera sachant que le volume de l'usine est de  $1,326 * 10^6 \text{ m}^3$ .

L'usine ayant été construite en 1962, il est conseillé dans le Recknagel [14] de supposer que

- ses murs ( $23520 \text{ m}^2$ ) ont des coefficients de transfert de chaleur de  $1,5 \frac{W}{\text{m}^2 * K}$
- son plafond ( $110500 \text{ m}^2$ ) a un coefficient de transfert de chaleur de  $1 \frac{W}{\text{m}^2 * K}$
- son sol ( $110500 \text{ m}^2$ ) perd  $54 \frac{W}{\text{m}^2}$ .

#### (c) *Calculs*

Calculons maintenant les déperditions du bâtiment dans le même cas que notre étude basée sur le premier principe.

- On a des déperditions par conduction à travers les murs, le plafond et le sol de  $7\,000 \text{ kW}$  pour  $13^\circ C$  à l'intérieur et  $6^\circ C$  à l'extérieur.
- Sachant que la capacité thermique de l'air à  $25^\circ C$  et pression atmosphérique vaut  $1,005 \frac{kJ}{kg * K}$  et que sa masse volumique vaut  $1,184 \frac{kg}{\text{m}^3}$ , on arrive à une perte de chaleur par renouvellement de l'air de  $12\,900 \text{ kW}$ .

Les déperditions totales valent donc  $19\,900 \text{ kW}$ .

Sachant qu'on obtenait des déperditions totales de 14 800 kW par notre première approche, notre ordre de grandeur paraît réaliste.

#### ***iv) Besoin de chauffage et consommation de vapeur***

Faisons maintenant le lien entre la consommation du processus de fabrication, celle des aérothermes et la température extérieure. On sait que, si la température dans l'usine chute en dessous de la température de consigne (10°C actuellement), les thermostats le percevront et activeront les aérothermes. La consommation des aérothermes est donc soit maximale soit égale en moyenne au besoin de chauffe tant que la chaudière arrive à suivre.

En effet, si le besoin de chauffe est inférieur à la puissance maximale des aérothermes, ils fonctionneront de manière intermittente, dépassant la température de consigne localement puis redescendant en dessous. Si le besoin est supérieur à la puissance maximale des aérothermes, la température chutera en dessous de celle de consigne, ils s'activeront donc tous et ne s'éteindront pas tant qu'elle ne sera pas remontée.

Intéressons-nous maintenant à un scénario de grand froid et de consommation typique par le processus de fabrication. Le cas où les déperditions sont maximales mais qui reste plausible est celui où la température extérieure est de -2°C.

- S'il fait -2 degrés Celsius dehors et 12°C à l'intérieur (température minimale des zones de stockage de bobines pour éviter des problèmes de qualité)
  - Il y a des déperditions de 28 800 kW.
- Supposons que le processus de fabrication consomme la consommation typique d'hiver que nous avons calculé
  - On a de l'ordre de 12 350 kW d'apports thermiques internes.
- Il faudrait donc un apport de 16 450 kW (29,8 tonnes de vapeur par heure) par chauffage.
- La puissance totale des aérothermes est de l'ordre de 14 000 kW (25,5 tonnes par heure).
- Le débit maximal des chaudières est de 36 tonnes/h
  - auquel il faut enlever les 19,6 t/h de consommation du processus de fabrication et les 0,1 t/h des déperditions dans les conduites extérieures pour obtenir le débit qu'on peut fournir au chauffage des halls.
  - On ne peut donc fournir au chauffage que 16,3 t/h.
- On en conclut que ni les aérothermes ni la chaudière n'ont la puissance pour maintenir l'usine à 12°C si l'air extérieur est à -2°C.

#### ***v) Conclusions de la section***

Que nous a montré cette section ? On sait désormais que :

- S'il fait assez froid dehors, la chaleur apportée au bâtiment ne suffit pas à maintenir l'air à l'intérieur au-dessus de la température de consigne des aérothermes. La température du bâtiment chute donc, causant l'allumage de tous les aérothermes.

- Si les déperditions sont inférieures aux gains thermiques dans le bâtiment, les aérothermes ne restent pas allumés. Ils fournissent tout de même de la chaleur à l'air du bâtiment par convection naturelle.
- Si la puissance des déperditions est comprise entre celle des gains internes et la puissance maximale (aérothermes et gains internes) que le réseau peut fournir, les aérothermes s'allument de manière intermittente, ce qui maintient la température dans le bâtiment proche de la température souhaitée.

On a donc répondu à la question 3. En effet, nous savons désormais que le débit tiré par les aérothermes dépend surtout de la température extérieure et du débit de vapeur consommé par le processus de fabrication.

Si le processus de fabrication consomme beaucoup de vapeur, cela veut dire qu'il a beaucoup de dégagement de chaleur dans les halls. Cela réduit donc la chaleur que les aérothermes doivent fournir. S'il fait froid dehors, logiquement, le bâtiment perd plus de chaleur et les aérothermes doivent compenser ces pertes.

#### e) Equilibre entre production et consommation

Nous avons maintenant les informations nécessaires pour répondre à la question 4. Considérons les circonstances dans lesquelles les problèmes sont apparus, à savoir une période de grand froid et une haute consommation. Nous considérons donc une température extérieure de  $-2^{\circ}\text{C}$  et la consommation maximale plausible du processus de fabrication en hiver.

Comme on l'a vu dans la section sur le chauffage des halls, la consommation de vapeur sera trop élevée par rapport à la production. En fonctionnant au maximum de la chaudière, on a 2 donc possibilités :

- laisser les aérothermes allumés :
  - La température dans l'usine chute alors
  - les thermostats s'activent
  - les aérothermes retirent de la chaleur au réseau.
    - Le débit retiré au réseau est de :

$$\frac{14\,000}{1970} * \frac{60 * 60}{1000} \frac{t}{h} (\text{aérothermes}) + 0,6 \frac{t}{h} (\text{déperditions conduites}) + 25,6 \frac{t}{h} (\text{consommateurs}) = 51,8 \frac{t}{h}$$

- Ce débit est plus grand que le débit maximal des chaudières, donc **les chaudières ne savent pas suivre et la pression chute.**
- éteindre une partie des aérothermes de manière à ne pas dépasser la puissance maximale de la chaudière.
  - On a donc une puissance dégagée dans l'usine de l'ordre de

$$16\,300\text{ kW} (\text{gains internes}) + 4\,300\text{ kW} (\text{vapeur chauffage}) = 20\,600\text{ kW}$$

- La température moyenne dans l'usine chute jusqu'à ce que l'apport de chaleur soit égal au départ de chaleur, c'est-à-dire à une température dans les halls de 8 °C.

On en conclut que les chaudières ne sont pas capables d'alimenter le processus de fabrication et les aérothermes en même temps par grand froid.

La réponse à la question 4 est donc que le débit fourni par les chaudières est insuffisant pour alimenter tous les consommateurs de vapeur.

## **f) Conclusion des analyses**

### ***i) Sources de problèmes***

Maintenant que nous avons répondu à toutes les questions auxquelles nous souhaitons trouver une réponse, servons nous de ces réponses pour identifier les sources de problèmes.

Nous avons conclu que le changement de l'état de la vapeur en entrée du réseau (pression et enthalpie) ne pose problème qu'à l'alimentation de la décaperie (problèmes qui seraient résolus soit en installant des purgeurs après le poste de détente soit en réactivant la désurchauffe). Le débit maximal n'a toutefois diminué que de l'ordre de 3%.

En ce qui concerne l'équilibre entre la production et la consommation de vapeur, nous avons conclu que le débit maximal des chaudières est trop faible pour alimenter le processus de fabrication et les aérothermes. Ceci ne se constate que lorsque les aérothermes fonctionnent à haut régime (donc par grand froid). La plupart du temps, ils tirent un débit beaucoup plus faible que leur débit maximal. La production des chaudières suffit donc pour alimenter le processus de fabrication en même temps que cette fraction des aérothermes.

Sachant que le changement d'état n'explique pas une chute de la pression du réseau, on en conclut les chutes de pression constatées pendant les problèmes sont des conséquences du déséquilibre entre la consommation et la production de vapeur.

Le refroidissement des bacs d'acide de la décaperie, quant à lui, est explicable par les deux phénomènes. En effet, d'une part, le débit maximal de la décaperie a été réduit par le changement de l'état de la vapeur et, d'autre part, si la pression du réseau s'écroule, les postes de détente seront incapables de maintenir la pression à leur aval à sa valeur de consigne, ce qui aura pour conséquence que les vannes de régulation seront incapables de maintenir le débit.

### ***ii) Propositions de solutions***

#### ***(1) Etat de la vapeur***

Connaissant les sources de problèmes, nous sommes désormais à même de suggérer des solutions. Pour les problèmes dus à l'état de la vapeur, il faudrait réactiver la désurchauffe de la décaperie ou remplacer la vanne de régulation par une vanne adaptée à l'état actuel de la vapeur à l'entrée de la vanne de régulation. La solution adéquate dépendra du titre vapeur qui passe réellement dans le poste de détente de la décaperie.

#### ***(2) Déséquilibre production-consommation***

##### ***(i) Solution 1***

En ce qui concerne les problèmes dus au déséquilibre entre la production et la consommation de vapeur, une première solution serait d'éteindre assez d'aérothermes pour que, même s'ils tirent leur débit maximal, les chaudières soient capables de fournir la vapeur au processus de fabrication et aux aérothermes. Il faudrait toutefois installer de nouveaux

moyens de chauffer les halls. On diminuerait ainsi les déperditions dans les conduites en isolant celles ne menant plus à des points de consommations.

La consommation maximale des utilisateurs est de 25,6 t/h et les conduites perdent 0,6 t/h. Si on veut la garantie d'être capable à tout moment de fournir le pic de consommation, on peut se permettre de laisser  $34 - 25,6 - 0,6 = 7,8$  t/h donc 4300 kW pour les aérothermes (soit 21 grands aérothermes).

### *(ii) Solution 2*

Une autre solution, plus économe, serait de complètement arrêter de chauffer les halls à la vapeur, d'installer un autre système de chauffage des halls et d'arrêter une chaudière. On ferait des économies sur la location des chaudières et sur la consommation d'eau et de gaz naturel. On pourrait par exemple chauffer les halls à l'aide d'aérothermes à gaz naturel à condensation, ce qui permettrait d'avoir un meilleur rendement de chauffage et de diminuer les déperditions dans les conduites de la même manière que la première solution.

Vérifions que le fait d'arrêter les aérothermes permettrait d'arrêter une chaudière.

On pourrait fermer toutes les conduites ne menant pas aux utilisateurs. Il resterait donc des déperditions de 0,25 t/h et une consommation de vapeur en pics par les utilisateurs de 25,6 t/h

La consommation maximale serait donc de 25,85 t/h. Sachant que les chaudières sont capables de fournir au réseau 8,5-9 t/h chacune, on pourrait envisager de retirer une chaudière en arrêtant tous les aérothermes ( $9 * 3 = 27 > 25,85$ ). Notre seconde solution paraît donc fonctionnelle.



### III. Modélisation dans LMS Amesim

Maintenant que les analyses théoriques ont été réalisées, il est temps de trouver un moyen de confirmer les conclusions intermédiaires tirées de ces analyses. Pour cela, un modèle du réseau a été implémenté dans LMS Amesim.

LMS Amesim est un programme qui permet d'assembler différents éléments prédéfinis en fixant leurs paramètres de manière à représenter un réseau. Bien que le programme soit applicable à beaucoup de domaines différents (électrique, mécanique, thermique, signal, hydraulique,...), nous ne nous servons que des bibliothèques de traitement de signal, de thermique et d'écoulement diphasique.

Nous représenterons les différents éléments constitutifs du réseau (conduites, purgeurs, ...) en combinant des composants prédéfinis dans LMS Amesim. Les éléments de réseau ainsi obtenus fonctionneront comme des fonctions prenant des variables d'entrée et s'en servant pour déterminer les valeurs de variables de sortie en fonction de paramètres fixés au préalable[15]. Ainsi, vu que notre modèle sera composé de telles fonctions, il se comportera de manière similaire. Il prendra donc des variables en entrée (des inputs) et déterminera les valeurs des variables de sortie (donc des outputs) en fonction des valeurs de paramètres fixés au préalable.

Une fois le modèle du réseau assemblé, nous pourrons le calibrer. Cela se fait en faisant varier les valeurs des paramètres pour une combinaison d'inputs fixée pour laquelle on connaît les valeurs des outputs jusqu'à ce que le modèle donne les bonnes valeurs des outputs.

#### a) Éléments du réseau

Commençons par définir les combinaisons de composants de LMS Amesim utilisées pour modéliser les différents éléments du réseau. Une fois ces éléments définis, il nous suffit de les assembler de manière cohérente pour obtenir un modèle du réseau. Cette section n'a pas pour but d'apporter une compréhension profonde du fonctionnement de LMS Amesim mais plutôt de donner un aperçu du fonctionnement des composants utilisés. Pour de plus amples informations, le manuel de LMS Amesim [15], [16] contient des explications détaillées.

##### *i) Conduites*

Ainsi, chaque conduite est représentée par

- un composant 'tuyau horizontal avec friction et échange de chaleur'
  - dont les pertes de charge sont calculées sur base de coefficients de friction calculés par des corrélations dépendant du régime de l'écoulement.
    - Si l'écoulement est gazeux pur, la corrélation de Churchill [16] est utilisée pour calculer le coefficient de friction.
  - S'il est diphasique, la corrélation de McAdams [16] est utilisée.

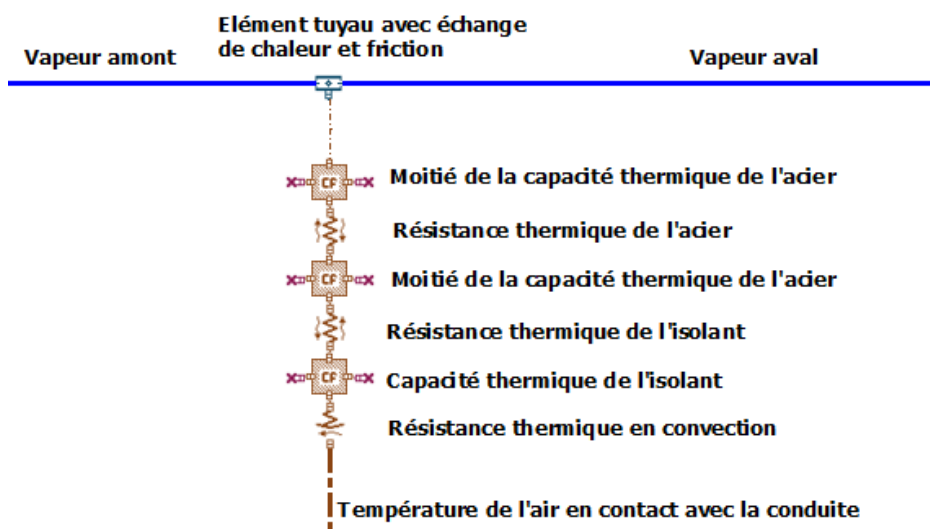
En ce qui concerne les échanges de chaleur, ils sont calculés sur base de

- la surface interne du composant 'tuyau', fixée par les

- paramètres géométriques qu'on lui fournit, à savoir
- la longueur
  - le diamètre hydraulique
  - l'aire de passage de la conduite,
  - du coefficient d'échange convectif interne calculé en fonction du régime d'écoulement
  - de la différence entre
    - la température du fluide dans le tuyau
    - et celle fournie au port thermique du tuyau (représentant la température de la surface interne de la conduite).
  - le coefficient d'échange convectif interne est déterminé par :
    - Dans le cas où l'écoulement est gazeux:
      - le nombre de Nusselt laminaire fixé comme paramètre si l'écoulement est laminaire
      - la corrélation de Gnielenski[16] s'il est turbulent.
    - Dans le cas où l'écoulement est diphasique,
      - la corrélation de Shah [16] si de la condensation a lieu
      - la corrélation du VDI heat atlas [16] pour des tuyaux horizontaux si de l'ébullition a lieu (ce qui n'est pas censé arriver dans notre cas).
  - Le port thermique de l'élément tuyau est connecté à une alternance de composants capacité thermique-résistance thermique-capacité thermique représentant la paroi en acier de la conduite.
    - Chacun des composants 'capacité' est tel que sa capacité thermique vaut la moitié de la capacité thermique réelle de la paroi représentée.
    - La résistance thermique représente la résistance thermique radiale d'un tube cylindrique en acier dont l'épaisseur est fixée par celle de la conduite réelle considérée.
  - La capacité thermique suivant la résistance est mise en contact avec une suite de composants 'résistance thermique-capacité thermique' représentant la couche d'isolant thermique de 6 cm d'épaisseur présente autour de la conduite.
    - Le composant 'résistance' a la résistance thermique radiale d'un tube cylindrique en laine de verre dont la longueur vaut celle de la conduite et l'épaisseur est la même que la vraie couche d'isolant.
    - Le composant capacitif a la même capacité que la couche d'isolant réelle en négligeant l'évolution de ses propriétés physiques avec le temps (vieillessement).
    - La capacité considérée n'est pas séparée en deux car elle est négligeable comparée à celle de l'acier.
  - Enfin, la capacité thermique de l'isolant est en contact avec un composant 'résistance thermique en convection' entre
    - de l'air dont
      - la température est fournie au deuxième port du composant

- 'résistance thermique'
  - la vitesse et l'humidité sont fixées en paramètres
- et la surface extérieure.
  - Les propriétés de l'air nécessaires aux calculs d'échanges de chaleur sont calculées sur base de la température de film (moyenne entre les températures fournies aux ports de l'élément 'résistance en convection').
- La résistance en question est calculée sur base des équations du livre «Fundamentals of Heat and Mass Transfer"» [17].

Ainsi, chaque élément 'conduite' a l'allure suivante :



Les paramètres des conduites sont fixés par les valeurs réelles (longueurs, diamètres, vitesse de l'air) mesurées ou évaluées.

Pour résumer, nos composants 'conduites' sont des fonctions prenant en variables d'entrée l'état de la vapeur et la température de l'air à leurs bornes. Ils donneront les débits de masse et d'enthalpie en amont et en aval ainsi que les pertes de chaleurs comme variables de sortie en fonction des paramètres et méthodes cités plus haut.

## ii) Purgeurs

Il est également nécessaire de modéliser des postes de purge. Chaque purgeur est représenté par

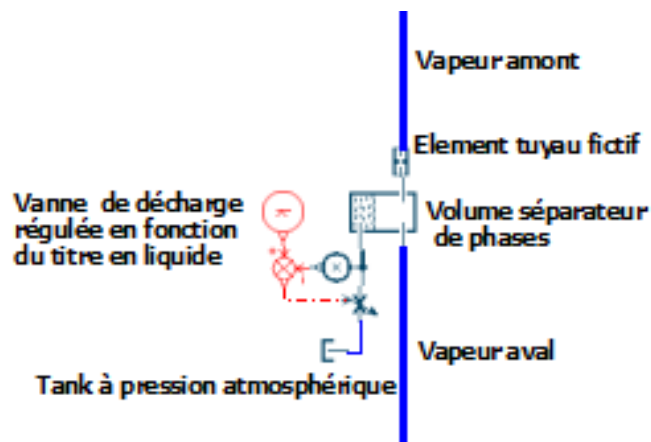
- un composant 'volume séparateur de phases'
  - Les évolutions de la densité et la pression dans le volume séparateur de phases sont calculées en supposant le volume constant et sur base des débits de masse et d'enthalpie entrants et sortants.
  - Les propriétés des 2 phases sont calculées sur base de la pression et la densité moyenne dans le volume.

- dont le port par lequel part la phase liquide est connecté à un composant 'vanne régulée'.
  - L'ouverture de la vanne en question est proportionnelle au titre en eau du fluide entrant dans cette vanne.
  - Le débit à travers la vanne est déterminé à l'aide de la formulation de Bernoulli [16].
- L'autre borne de la vanne régulée est connectée à un composant 'tank'
  - imposant une pression constante valant la pression atmosphérique et représentant la conduite de décharge du purgeur.

L'aire de passage maximale de la vanne est fournie en paramètre et l'aire utilisée pour calculer le débit est proportionnelle au signal de contrôle fourni au port de contrôle de la vanne régulée. Ce dernier est égal au titre en liquide du fluide sortant par la vanne.

Les éléments de LMS Amesim ne peuvent pas être connectés dans n'importe quel ordre, voilà pourquoi il a été nécessaire de connecter un composant 'tuyau adiabatique' à l'entrée de chaque purgeur. Les paramètres géométriques de ces tuyaux fictifs ont été fixés de manière à minimiser leur impact tout en aidant la convergence du programme. La plupart ont donc une longueur de 5 m et un diamètre de 250 mm.

Pour faciliter la convergence du programme et minimiser le nombre d'éléments, on a groupé les purgeurs proches. Les groupes de purgeurs ont donc l'allure suivante.



Ainsi, nos éléments 'purgeurs' prennent comme variables d'entrée

- l'état de la vapeur en amont
- le débit de masse et d'enthalpie en aval

et rendent comme variables de sortie

- le débit de masse et d'enthalpie en amont
- l'état de la vapeur en aval.

### iii) Aérothermes

Les groupes d'aérothermes sont modélisés par des vannes régulées en contact avec un tank à pression atmosphérique comme celles de purgeurs. Elles sont régulées par un contrôleur PI régulant le débit total des aérothermes. Ainsi, on impose le débit total des aérothermes mais les vannes sont dimensionnées de manière à ce que le débit tiré par chaque groupe soit proportionnel à sa puissance.

Ils prennent donc l'état de la vapeur en amont et la fraction d'ouverture de la vanne (à travers le signal de contrôle) comme variables d'entrée et rendent le débit de masse et d'enthalpie à leurs bornes en sortie.

### iv) Utilisateurs

Les utilisateurs ont été modélisés comme les aérothermes mais leurs vannes sont telles qu'ils puissent manquer de débit (aires de passage à ouverture maximale non surdimensionnées). Chaque utilisateur a son contrôleur PI assigné. Pour la validation du modèle et les simulations, les contrôleurs PI servent à fixer le débit massique de chaque utilisateur.

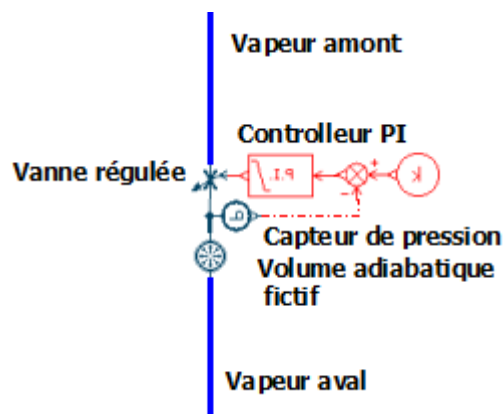
Dans la réalité, la régulation des débits de vapeur des utilisateurs dépend aussi de l'enthalpie de la vapeur soutirée au réseau. En effet, si de la vapeur à trop basse enthalpie était fournie à l'utilisateur, ses bains se refroidiraient et il ouvrirait plus ses vannes.

Cependant, pour des raisons de convergence numériques, nous nous contenterons de réguler le débit en vérifiant que la pression et le titre vapeur fournis aux utilisateurs sont acceptables.

### v) Postes de détente

Les postes de détente sont modélisés par des vannes régulées par des contrôleurs PI régulant la pression après la détente. Le dimensionnement des postes de détente est habituellement fait de manière à dimensionner le poste sur base d'un débit égal au débit nominal divisé par 0,85, ce que nous avons également fait pour ce modèle.

Pour les mêmes raisons que la conduite fictive en entrée des purgeurs, un volume adiabatique fictif est présent en aval de chaque poste de détente. Il est dimensionné en comme les conduites fictives des purgeurs. Les postes de détente ont donc l'allure suivante :



Dans le cas de la décaperie, le poste de détente comprend également une désurchauffe (injection d'eau liquide) précédant le volume adiabatique fictif. Le débit de cet élément est régulé par un contrôleur PI de manière à obtenir de la vapeur saturée après mélange.

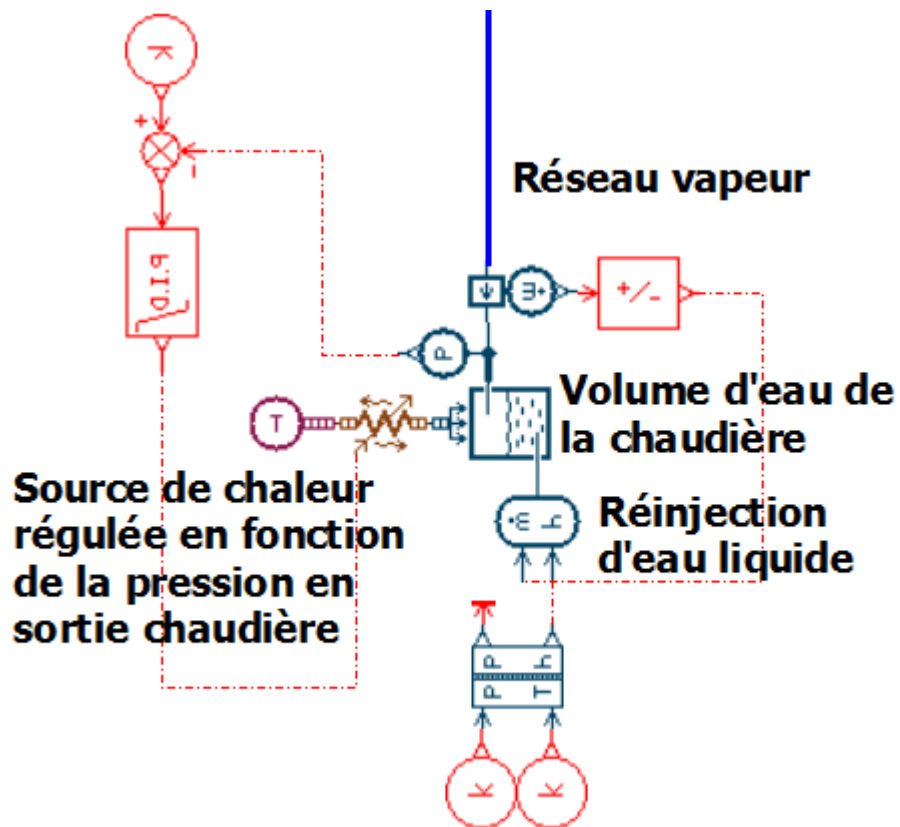
Ils prennent donc l'état de la vapeur en amont et le débit de masse et d'enthalpie en aval en entrée et fournissent le débit de masse et d'enthalpie en amont et l'état de la vapeur en aval en sortie.

#### **vi) Chaudières**

Les chaudières sont modélisées par

- un seul séparateur de liquide
  - alimenté par un débit d'eau à 15 °C égal au débit (en masse) qui la quitte
- en contact avec une source de chaleur en fonction de la pression en sortie des chaudières
  - Cette source de chaleur est constituée
    - d'une source de température à 1000°C
    - connectée au séparateur de liquide par un chemin de conduction régulé,
    - ayant une puissance maximale telle qu'elle ne peut amener que le nombre de chaudières fois 9 t/h à la pression et la température souhaitées.

Cela revient à supposer que la température des gaz de combustion est constante et vaut 1000 °C et qu'on fait varier le contact entre l'eau et l'échangeur. La régulation est faite de manière à viser une pression de 12.6 barA.



Elles prennent donc le débit de masse et d'enthalpie dans la conduite les liant au réseau en entrée et fournissent l'état de la vapeur dans cette conduite en sortie.

### **vii) Remarques**

Les méthodes et formules utilisées dans LMS Amesim diffèrent de celles choisies pour nos analyses. Il est donc important de comprendre les différences majeures entre les deux.

- Premièrement, il est important de remarquer que LMS Amesim ne tient pas compte de la possibilité d'avoir un écoulement choké dans une vanne régulée.
- Ensuite, le modèle de LMS tient compte de l'évolution du titre dans les conduites et des positions des purgeurs ainsi que de l'effet de la régulation et des différents diamètres de conduites.
  - On s'attend donc à des résultats dans les simulations plus proches de la réalité pour ce qui est du titre vapeur et des pertes de charge, mais moins en ce qui concerne les vannes (de régulation et dans les postes de détente).

Ainsi, étant donné que les simulations et nos analyses n'utilisent qu'en partie les mêmes corrélations (notamment pour les pertes de charge dans les conduites lors de l'écoulement d'un gaz pur), des résultats cohérents entre les deux confirmeraient nos résultats.

Notre modèle ne prédit pas le comportement des aérothermes vu que nous leur imposons un débit total et il ne tient pas compte des changements d'altitude et de direction des conduites.

Les fichiers des simulations mentionnées dans cette section sont disponibles en annexes.

### **b) Hypothèses**

Formulons maintenant les hypothèses selon lesquels on a fixé les valeurs des paramètres non fixés lors du calibrage.

- Les détendeurs ont été dimensionnés à l'aide de la formulation de Bernoulli. Ne connaissant pas les caractéristiques des postes de détente, on a supposé qu'ils ont été dimensionnés
  - sur base d'un débit égal au débit nominal divisé par 0,85
  - en utilisant  $c_{q,max}$  comme valeur de  $c_q$  dans la formulation de Bernoulli
  - avec de la vapeur à 14 barA et surchauffée de 20 K en entrée du poste de détente
- Pour diminuer la complexité des simulations et permettre la convergence du programme, certains courts tronçons de conduite et purgeurs ont dû être négligés.
- Les conduites du réseau sont représentées
  - selon des diamètres et longueurs basés sur des observations dans l'usine et les plans du réseau vapeur internes à l'usine
  - avec toutefois quelques approximations quant à la position des différents aérothermes et purgeurs de manière à les rassembler en groupes.
  - Toutes les conduites sont supposées



- avoir une épaisseur de 6 cm de laine de verre (conductivité thermique de  $0,035 \frac{W}{m \cdot K}$  et capacité thermique de  $1030 \frac{J}{kg \cdot K}$ )
- être en contact avec de l'air avançant à une vitesse de 4,44 m/s pour les conduites extérieures et 1 m/s pour les conduites intérieures.
- Pour ce qui est des aérothermes,
  - leurs vannes de décharge
    - sont largement surdimensionnées afin de laisser les mains libres au contrôleur PI qui régule leur débit total.
    - Cependant, leurs aires de passage maximales sont proportionnelles à la puissance du groupe d'aérothermes représenté.
- Pour les purgeurs,
  - L'aire de passage maximale de leurs vannes de décharge est telle que le débit à ouverture maximale sous une pression différentielle de 10 bars de chaque composant 'purgeur' vaille 2,5t/h (valeur tirée des fiches techniques des purgeurs) multiplié par le nombre de purgeurs représentés.

### c) Modèle

En assemblant les différents éléments présentés ci-dessus, on arrive à implémenter un modèle du réseau dans LMS Amesim. Ce modèle prend des variables en entrée et s'en sert pour déterminer les variables de sortie souhaitées sur bases des paramètres du modèle (c'est-à-dire les paramètres de ses composants).

Les entrées que nous fournissons au modèle sont

- les débits massiques cibles des différents utilisateurs
- le débit total tiré par les aérothermes
- les températures intérieure et extérieure
- l'élément alimentant le réseau en vapeur.

Le modèle fournit en sortie

- les pressions à différents endroits du réseau, notamment
  - aux bouts des lignes d'aérothermes
  - aux bornes postes de détentes des utilisateurs
- les débits réellement tirés par les utilisateurs
- le débit passant par les purgeurs
- les déperditions dans les conduites
- les titres vapeur aux différents points du réseau
- le débit injecté dans le réseau par l'alimentation en vapeur
- le degré d'ouverture des vannes de contrôle de chaque utilisateur
- la consommation totale du processus de fabrication.

Nous avons fixé les valeurs de divers paramètres sur base de mesures et de valeurs données dans la documentation du matériel. Cependant, pour calibrer le modèle, on doit

pouvoir jouer sur certains paramètres. Les paramètres que nous avons choisis de faire varier pour le calibrage du modèle sont les aires de passage maximales des vannes de régulation des utilisateurs.

Les valeurs des éléments de volumes et des capacités thermiques ne jouant que pour les phénomènes transitoires, nous nous en sommes servis pour faciliter la convergence du modèle. Nous pouvons nous permettre de leur donner des valeurs non réalistes vu que nous ne nous servons de ce modèle que pour modéliser le comportement du réseau en régime établi.

#### **d) Calibration**

Avant de simuler les différents scénarios que nous voudrions étudier, il est nécessaire de fixer les valeurs des paramètres restants de notre modèle. Pour cela, nous utilisons notre modèle pour représenter l'ancienne configuration du réseau en hiver par grand froid (donc 15 °C à l'intérieur et -2°C à l'extérieur), avec les vannes des utilisateurs ouvertes au maximum et avec une consommation par les aérothermes de 25 t/h. La conduite alimentant le réseau en vapeur à l'époque est simulée par une source de vapeur illimitée fournissant une pression de 14 barA et une température de 240 °C.

On sait que, dans ce cas, nos utilisateurs sont sensés consommer les débits suivants :

- Etamage : 5 t/h
- Recuit continu : 4 t/h
- Skin-Pass : 0,75 t/h
- TD5C : 2,3 t/h
- TD4C : 0,3 t/h
- Décaperie : 15 t/h
- STE : 0,75 t/h

C'est-à-dire les débits maximaux obtenus lors de nos analyses.

On fait donc varier les valeurs des paramètres que nous devons encore fixer jusqu'à obtenir les bonnes valeurs des outputs.

##### *(1) Remarque*

Pour le reste des simulations effectuées, le réseau est alimenté en vapeur par un élément 'chaudière' représentant 4 chaudières pour toutes les simulations sauf mention contraire.

#### **e) Validation**

##### ***i) Validation 1***

Maintenant, que notre modèle a été calibré, il convient de vérifier qu'il donne des résultats cohérents avec la réalité pour des points de mesures que nous connaissons. Nous le validons donc sur un mode de fonctionnement pour lequel nous connaissons le comportement du réseau. Or, on a pris toutes les mesures nécessaires lorsqu'on a pris un point de mesure pour déterminer les déperditions du réseau. Avant de lancer la simulation,

on remplace la source de pression illimitée par notre composant 'chaudières' et on retire le composant 'désurchauffe' de la décaperie.

Pour rappel, notre point de mesure a été pris le 07/03/2017 à 08h45.

- Il faisait
  - 6 °C à l'extérieur
  - en moyenne 13 degrés dans le bâtiment
- la décaperie consommait 4 t/h
- le skin-pass 0,1t/h
- le recuit 3,5 t/h
- les chaudières produisaient en tout 24,5 t/h de vapeur.

Les consommations des consommateurs restant ont été évaluées. On est arrivé à

- l'étamage à 3,4 t/h
- le TD-4C à 0,3t/h (à l'arrêt)
- le TD-5C à 2 t/h
- la station de traitement des eaux à 0,5 t/h
- les aérothermes à 10,1t/h.

Pour simuler ce scénario, on impose ces valeurs de débits massiques comme consignes aux contrôleurs PI des utilisateurs et des aérothermes. Le modèle sera validé si le réseau arrive à fournir les débits en question tout en gardant sa pression de consigne.

On constate qu'il y arrive. Cette validation a été faite sans mesures de pression, elle paraît donc un peu légère. Voici pourquoi une seconde validation a été effectuée sur base d'un point de mesure pris le 09/05/17 à 9h30.

## **ii) Validation2**

Lors de la prise de mesure de 09/05/17,

- Il faisait
  - 10 °C à l'extérieur
  - 18 °C en moyenne dans les halls
- les lignes d'aérothermes étaient isolées du réseau
- le TD4C
  - consommait 0,27 t/h
  - recevait une pression de 12 barA
- le TD5C
  - consommait 1,2 t/h
  - recevait une pression de 12,3 barA
- le skin-pass
  - consommait 0,075 t/h
  - recevait une pression de 12,3 barA
- le recuit
  - consommait 3,2 t/h

- recevait une pression de 12,4 barA
- la STE
  - consommait 0,07 t/h
  - recevait une pression de 11,9 barA
- la décaperie
  - consommait 5 t/h
  - recevait une pression de 12,2 barA
- la pression chaudière était de 12,4 barA.
- l'étamage consommait 3,4 t/h (hypothèse).

Les purgeurs en sortie de la chaudière débitaient du liquide en continu. Vu qu'un purgeur peut débiter de l'ordre de 2 t/h, le débit de sortie des chaudières n'a pas été pris en compte vu que la présence d'autant de liquide en sortie des chaudières laissant penser qu'un débit de liquide non négligeable quittait les chaudières et était évacué par les purgeurs en question (ce qui n'était pas le cas lors de la prise de mesure de la validation 1).

En implémentant ces valeurs comme consignes de débit des utilisateurs et de pression de la chaudière, on obtient des pressions aux utilisateurs éloignées de moins de 0,2 bar de celle mesurées. On remarque également que les chaudières arrivent à alimenter le réseau. Les écarts entre les pressions dans notre modèle et celles mesurées peuvent être expliquées d'une part par le fait que notre modèle ne tient pas compte des coudes et des variations d'altitude et d'autre part par le fait que certains capteurs (décaperie, TD4C et TD5C) ne sont pas calibrés pour de la vapeur saturée.

Nous considérons donc notre modèle comme valide.

## f) Simulations

### i) *Scenarii*

Ayant maintenant fabriqué notre outil de simulation, il paraît temps de décider ce que nous voulons en faire. Réfléchissons aux différentes situations où nous voudrions pouvoir prédire le comportement du réseau. Nous simulerons chaque scénario en fixant les valeurs des variables d'entrée du modèle de manière à représenter la situation du réseau que nous souhaitons étudier et observerons le comportement du réseau dans la situation concernée à l'aide des variables de sortie. On considérera la même température intérieure et extérieure pour les scénarii d'été (15 °C). Pour les scénarii d'hiver, on considérera des températures extérieures de -2°C et intérieures de 8 °C.

#### (1) Scénario 1

Nos analyses prédisent que

- le réseau peut fonctionner correctement si
  - il fait -2°C à l'extérieur
  - il alimenté par les 4 chaudières
  - les aérothermes consomment 7,8 t/h

- le processus de fabrication est à sa consigne de consommation maximum plausible
- la température intérieure est de 8 °C.
- le débit de la décaperie sera alors légèrement inférieur à celui de consigne.

Vérifier le comportement du réseau dans ce cas de figure confirmerait donc cette affirmation. Nous simulerons donc ce premier scénario, qui arrive d'ailleurs occasionnellement dans la réalité lorsqu'on se rend compte que la pression dans le réseau s'écroule et qu'on éteint les ventilateurs de certains aérothermes de manière à ce que la pression remonte.

### *(2) Scénario 2*

Elles prédisent également que les chaudières sont incapables de fournir la puissance nécessaire pour que les aérothermes fonctionnent tous à puissance maximale (donc 25 t/h en tout) et le maximum plausible du processus de fabrication (situation qui arrive par grands froids si on ne réduit pas la consommation des aérothermes en en arrêtant certains).

On devrait donc constater une pression trop basse dans le réseau. Comme nous l'ont montré les analyses, il arrive que la température extérieure soit assez basse pour que les aérothermes doivent fonctionner à leur puissance maximale. Nous simulerons ce scénario en supposant une température intérieure de 8 °C et extérieure de -2°C. Il correspondra donc à une période de grand froid prolongée et permettra de confirmer que, en ne faisant varier que le débit de vapeur des aérothermes, on passe d'un mode de fonctionnement acceptable à un mode de fonctionnement où les utilisateurs ne reçoivent pas le débit souhaité.

### *(3) Scénario 3*

Sachant alors que les chaudières ne savent pas fournir la consommation maximale des aérothermes en plus d'alimenter le processus de fabrication, nous vérifierons que nous avons situés les limites du réseau correctement en simulant une consommation de 10 t/h par les aérothermes en plus de la consommation maximale plausible du processus de fabrication par -2°C extérieurs et 10,6 °C intérieurs.

### *(4) Scénario 4*

Nous simulerons ensuite la situation en été, c'est-à-dire lorsqu'il fait chaud (15°C) dehors et dans le bâtiment, qu'une chaudière est arrêtée et que on a isolé les lignes d'aérothermes. On supposera le processus de fabrication à sa consommation maximale d'été.

### *(5) Scénario 5*

Ces premiers scénarii confirmeront le problème. Après ces derniers, nous simulerons donc les solutions que nous avons proposées. On commencera par vérifier que réactiver la désurchauffe permettrait de fournir le débit nécessaire à la décaperie tant que la pression reste adéquate dans le réseau.

### *(6) Scénario 6 et 7*

Ensuite, nous passerons aux solutions au déséquilibre entre production et consommation de vapeur. La première consistera à laisser 4600 kW d'aérothermes et retirer les lignes ne menant plus à des aérothermes en laissant les 4 chaudières. La seconde consistera à retirer les aérothermes, les lignes qui y mènent et une chaudière.

### *(7) Scénario 8*

Ce scénario servira à confirmer que changer la (les dans la réalité) vanne de régulation de la décaperie résoudrait le problème dû au changement d'état de la vapeur.

### *(8) Maximum plausible*

Pour rappel, au maximum plausible de consommation par le processus de fabrication en hiver,

- la décaperie consomme 14,6 t/h (mais vise 15 t/h)
- le recuit consomme 4 t/h
- l'étamage consomme 4,1 t/h
- le skin-pass consomme 0,2 t/h
- le TD-5C consomme 2 t/h
- le TD4C consomme 0,3 t/h
- la STE consomme 0,5 t/h
- soit 25,7 t/h en tout.

En été, la seule différence dans les consignes de débit est que la décaperie consomme 13,6 t/h, le processus de fabrication a donc besoin de 24,7 t/h.

Les simulations des scénarii se font en ayant supprimé la désurchauffe de la décaperie sauf mention contraire. Pour tous les scénarii, les vannes des utilisateurs sont régulées par des contrôleurs PI en fonction de leurs débits et des consignes de débit fixées en début de simulation.

### ***ii) Consommations process maximale et chauffage modérée***

Utilisons maintenant notre modèle pour vérifier ce qu'il se passe dans les scénarios mentionnés dans la section précédente. Commençons par le scénario 1, montrant qu'on est capable d'alimenter le processus de fabrication à son maximum et les aérothermes à une consommation réduite.

On constate que, une fois le régime établi,

- la pression en sortie des chaudières est bien de 12.6 barA.
- Le débit fourni par les chaudières est alors de 34,4 t/h
- les aérothermes tirent 7,8 t/h
- le processus de fabrication consomme 25,8 t/h.
- Les conduites intérieures ont alors des déperditions de 300 W
- Les conduites extérieures ont alors des déperditions de 60 W.

- La pression fournie aux utilisateurs du processus de fabrication reste supérieure à 12.4 barA
  - on a donc une perte de charge maximale entre les chaudières et le processus de fabrication de 0.2 bar.
- La pression au bout des lignes d'aérothermes reste supérieure à 11,5 barA.
- Le titre vapeur
  - descend jusqu'à 60% dans la conduite menant au skin-pass
  - descend à de l'ordre de 70% dans les conduites menant à certains aérothermes
  - reste supérieur à 95% pour les autres utilisateurs.

Il est intéressant de remarquer que le débit fourni au processus de fabrication est trop faible. Cela est dû au fait que la décaperie ne reçoit pas son débit souhaité (elle ne reçoit que 14,66 t/h au lieu de 15) malgré le fait que sa vanne de régulation soit ouverte au maximum. En s'intéressant à l'état de la vapeur juste avant la vanne de régulation, on se rend compte que, suite à la détente, elle est passée d'un état de vapeur saturée à un état de vapeur surchauffée de 19K, il y aurait donc lieu de réactiver la désurchauffe selon cette simulation.

La pression et le titre vapeur fourni aux utilisateurs restent dans des plages raisonnables pour la plupart des utilisateurs. On en conclut que seuls le titre vapeur fourni au skin-pass et le débit fourni à la décaperie sont potentiellement problématiques. On sait cependant que le skin-pass est satisfait de son fonctionnement actuel, un titre vapeur de 0,6 ne pose donc pas problème.

Les purgeurs, quant à eux, tirent un débit de 0,72 t/h.

### ***iii) Consommations process et chauffage maximales***

Passons maintenant au second scénario. En alimentant les aérothermes à leur débit maximal (25,5 t/h) et le processus de fabrication à son maximum plausible, on confirme que les chaudières ne sont pas capables d'alimenter les aérothermes en même temps que le processus de fabrication.

En effet, on constate que

- la pression
  - est descendue jusqu'à 7,7 barA en amont de certains utilisateurs
  - est descendue jusqu'à 4,2 barA au bout des lignes d'aérothermes
  - vaut 7,8 barA en sortie de chaudière
- le processus de fabrication ne reçoit pas le débit nécessaire (17,8 au lieu de 25,6 t/h).
- Les déperditions sont de
  - 270 kW à l'intérieur
  - 50 kW à l'extérieur.
- Les purgeurs soutirent un débit de 0,54 t/h.
- le titre de la vapeur dans les conduites
  - reste supérieur à 95 % sauf

- dans la conduite menant au skin-pass (0,6 t/h)
- et certaines lignes d'aérothermes (minimum 0,57).

Le réseau n'est donc effectivement pas capable d'alimenter les aérothermes et le processus de fabrication au maximum en même temps.

#### ***iv) Consommations process maximale et chauffage trop élevée***

Maintenant que nous savons que les chaudières sont insuffisantes pour alimenter tous les aérothermes, vérifions si elles suffisent pour alimenter le processus de fabrication en fournissant 10 t/h aux aérothermes. Cela confirmerait que la limite du débit que l'on peut fournir aux aérothermes est bien située entre 8,5 t/h et 10 t/h.

On constate que

- la pression
  - en sortie de chaudière est descendue à 11,7 barA
  - fournie aux utilisateurs reste supérieur à 11,6 barA
  - est supérieure à 10 barA au bout des lignes d'aérothermes.
- Les chaudières débitent alors 36,26 t/h.
- Le débit fourni au processus de fabrication, lui, vaut 25,5 t/h,
  - on ne fournit donc pas le débit nécessaire au processus de fabrication.
- Le recuit et la décaperie manquent de vapeur.
- Le titre vapeur est alors de 0,60 dans la conduite menant au skin-pass et reste supérieur à 0,7 dans les conduites menant aux aérothermes.
- Les purgeurs, quant à eux, laissent passer un débit de 0,67 t/h.

Cela et la chute de pression en sortie des chaudières confirme donc que le débit maximum qu'on peut fournir aux aérothermes est compris entre 8,5 et 10 t/h.

#### ***v) Consommation process au maximum d'été***

Nous avons modélisé les différents régimes possibles du réseau en hiver, modélisons maintenant la situation en été. Les conduites menant aux aérothermes sont alors coupées. Nous considérerons la consommation du processus de fabrication comme à son maximum plausible d'été.

On constate que

- le processus de fabrication consomme 24,7t/h
- chaque élément de consommation a son débit souhaité
- La pression fournie aux utilisateurs reste supérieure à 12,5 barA
- le titre vapeur qu'on fournit reste supérieur à 0,9 sauf pour le skin-pass, pour qui il vaut 0,6.
- Les purgeurs évacuent 0,06 t/h
- les chaudières produisent 24,9 t/h.

On confirme donc que le réseau est capable de fournir le maximum nécessaire en été



### ***vi) Réactivation de la désurchauffe***

Maintenant, vérifions que la réactivation de la désurchauffe résoudrait les problèmes d'alimentation de la décaperie. Nous simulons donc le même état que le scénario 1 à l'exception de la désurchauffe qui sera réactivée. On constate pratiquement les mêmes choses que pour le scénario 1, à l'exception du débit de la décaperie qui, lui, vaut maintenant 15 t/h, à savoir le débit souhaité. Notre simulation suggère donc qu'il est nécessaire de réactiver la désurchauffe.

### ***vii) Première solution***

Maintenant que nous avons confirmé quel sont les problèmes, il est temps de vérifier si nos solutions sont fonctionnelles. La première solution testée consistera à laisser 4150 kW d'aérothermes et réactiver la désurchauffe de la décaperie. En effet, vu que la décaperie tirera son débit souhaité, il faudra diminuer le débit de vapeur qu'on fournit aux aérothermes. Nous les choisirons de manière à ce qu'ils chauffent la même zone de l'usine, à savoir celle où est situé le plus grand stock de bobine de l'usine (colonnes 60 à 80, lignes F à C). Nous simulerons le comportement du réseau alimenté par les 4 chaudières lorsque le processus de fabrication réclame son maximum plausible et que les aérothermes tirent leur débit maximum (7,5 t/h).

On constate que

- la pression
  - en sortie de chaudière est de 12,6 barA
  - fournie aux éléments du processus de fabrication reste supérieure à 12,4 barA
  - fournie aux aérothermes descend jusqu'à 8,8 barA par endroit
- chaque élément du processus de fabrication reçoit le débit adéquat.
- le titre vapeur
  - est supérieur à 90 % dans les conduites menant aux utilisateurs
    - à l'exception de la conduite menant au skin-pass où il vaut 60 %.
- Les purgeurs ont un débit pratiquement nul.

Cette solution est donc adéquate selon notre simulation.

On constate que

- la pression
  - en sortie de chaudière est de 12,6 barA
  - fournie aux éléments du processus de fabrication reste supérieure à 12,4 barA
  - fournie aux aérothermes descend jusqu'à 8,7 barA par endroit
- chaque élément du processus de fabrication reçoit le débit adéquat.
- le titre vapeur
  - est supérieur à 90 % dans les conduites menant aux utilisateurs
    - à l'exception de la conduite menant au skin-pass où il vaut 60 %.

- Les purgeurs ont un débit pratiquement nul.

Cette solution est donc adéquate selon notre simulation.

#### **viii) Seconde solution**

Une solution plus économe serait d'arrêter intégralement le chauffage des halls par vapeur et de le remplacer par un mode de chauffage à plus haut rendement. On pourrait alors couper les lignes menant aux aérothermes (toujours avec la désurchauffe activée).

On constate que

- le processus de fabrication reçoit 26,2 t/h
- chaque utilisateur reçoit le débit nécessaire à son bon fonctionnement
- La pression
  - en sortie de chaudière est de 12,6 barA
  - fournie aux éléments du processus de fabrication reste supérieure à 12,5 barA.
- Les purgeurs ont un débit pratiquement nul.
- Le titre vapeur fourni
  - au skin-pass est de 60%
  - aux autres utilisateurs reste supérieur à 85%.

Remarque : Pour les 7 scénarios, les déperditions intérieures restent inférieures à 350 kW et les déperditions à l'extérieur restent inférieures à 100 kW.

#### **ix) Changement de vanne de régulation**

Ce scénario a pour but de vérifier que changer la vanne de régulation de la décaperie résoudrait également le problème dû à l'état de la vapeur. La configuration y est la même qu'au scénario 1 à l'exception de la vanne de régulation de la décaperie qui a été remplacée par une vanne d'aire de passage plus grande.

On constate la même chose qu'au scénario 5.

#### **g) Simulations, analyses et réalité**

Les résultats des simulations confirment comme espéré les conclusions des analyses les ayant précédés. En effet, les déperditions thermiques dans les conduites intérieures comme extérieures sont fort proches dans les deux cas et les mêmes aspects posent problème.

Il s'agit de la surchauffe en entrée de certaines vannes de régulation et du débit maximal des chaudières qui est inférieur au besoin de débit maximal de l'usine. Les simulations confirment également que les solutions proposées sont fonctionnelles.

Cependant, il est important de garder en tête que les résultats théoriques et numériques ne tiennent pas compte de tous les phénomènes réels.

Ainsi, même si nos simulations et calculs annoncent que l'état de la vapeur dans les conduites a une faible influence sur l'alimentation en vapeur, il va de soi que certains points critiques (notamment les points bas dans les conduites) n'ont pas été identifiés lors de ce travail. L'état de la vapeur à certains endroits du réseau non identifiés dans ce travail jouera donc un rôle important sur son bon fonctionnement.

Le fait que de vrais purgeurs n'évacuent pas l'entièreté du liquide présent dans la vapeur aura pour effet de diminuer la surchauffe constatée après le poste de détente de la décaperie, augmentant ainsi le débit maximal.

## IV. Conclusion

Ce travail a mis en évidence divers phénomènes :

- Des modèles simples ont montré que la consommation de la plupart des utilisateurs dépend principalement de la température d'entrée et du format des bobines traitée.
- Des mesures de la consommation du chauffage, interprétées à l'aide du mode de régulation des aérothermes, ont mis en évidence que la consommation de ceux-ci dépend principalement de la température extérieure et du dégagement de chaleur par le processus de fabrication dans l'usine.
- Des analyses basées sur diverses théories sur l'écoulement de vapeur nous ont permis de comprendre les variables qui déterminent le débit de vapeur qu'un utilisateur peut extraire du réseau.

La compréhension de ces phénomènes nous a permis d'en tirer diverses conclusions, à savoir

- que la consommation de l'usine dépend principalement des produits traités et des conditions météorologiques
- que ce qui est critique pour l'approvisionnement de l'usine en vapeur n'est pas l'état de celle-ci dans les conduites, mais bien l'état de la vapeur à certains points critiques.
  - Il a donc été montré que l'état de la vapeur aux vannes de régulations influence bien plus le débit reçu par les utilisateurs que celui en sortie de chaudières.
    - On a ainsi montré que le débit de la décaperie a diminué suite au changement de l'état de la vapeur qui lui est fournie.

Les analyses des besoins de vapeur dans l'usine ont permis de comprendre la source des problèmes d'approvisionnement de l'usine. Le fait que la production maximale des chaudières soit inférieure à la consommation maximale a donc causé les chutes de pression dans le réseau. Ces chutes de pression se sont répercutées aux vannes de régulation, vannes qui constituent les points critiques d'un approvisionnement correct de l'usine en vapeur. Celui-ci n'était donc plus réalisable.

Malgré ce déséquilibre en pointe de consommation, l'usine s'est montrée capable de fonctionner la plupart du temps. Cela s'explique par le fait que les chaudières suffisent à assurer la consommation du processus de fabrication, le déséquilibre entre production et consommation n'arrivant que lorsque le chauffage des halls consomme trop de vapeur. Or, cela n'arrive que par périodes de grand froid, périodes qui ne sont pas fréquentes.

Pour résoudre ce déséquilibre entre production et consommation de vapeur, il est nécessaire d'arriver à une capacité de production adaptée au maximum de consommation. Bien que les solutions proposées dans ce TFE n'incluent que des diminutions de la consommation, il serait évidemment envisageable d'augmenter la capacité de production à la place, voire de combiner les deux.

Pour choisir la solution adéquate à la réduction du débit maximal de la décaperie, il sera nécessaire de réaliser des mesures afin de déterminer l'état effectivement présent en entrée de ses vannes de régulation. En effet, l'état de la vapeur à cet endroit dépend de phénomènes difficilement modélisables, notamment le fonctionnement non idéal des purgeurs.

Une suite intéressante de ce travail consisterait à déterminer quel moyen de chauffage des halls serait le plus efficace dans le cas particulier de cette usine. Il faudrait ensuite choisir parmi les solutions proposées. Actuellement, des projets sont en cours à l'usine pour évaluer l'efficacité du chauffage par radiants à gaz et évaluer le coût de l'achat de chaudières. Ce travail serait donc une bonne base pour le dimensionnement des chaudières et un début de compréhension des besoins de chauffe de l'usine.

## V. Bibliographie

- [1] "<http://www.dhnet.be/actu/economie/arcelormittal-la-siderurgie-liegeoise-chronique-d-une-mort-annoncee-51b7432ee4b0de6db9775bc9>."
- [2] "<https://fr.wikipedia.org/wiki/Laminage>."
- [3] "<http://www.construiracier.fr/tout-sur-lacier/la-fabrication-de-lacier/le-laminage-a-froid/le-decapage/>."
- [4] "<https://fr.wikipedia.org/wiki/Détendeur>."
- [5] F. White, "Fluid Mechanics," *McGraw-Hill, New York*, p. 862, 2009.
- [6] M. Nayyar, R. King, and S. Crocker, *Piping handbook*. 2000.
- [7] "VDI 2082 Raumluftechnik - Verkaufsstätten."
- [8] P. Stephan, S. Kabelac, M. Kind, H. Martin, D. Mewes, and K. Schaber, *VDI Heat Atlas*. 2010.
- [9] F. Garcia, R. García, J. . Padrinob, C. Matab, J. . Trallerob, and D. . Joseph, "Power law and composite power law friction factor correlations for laminar and turbulent gas – liquid flow in horizontal pipelines," 2003.
- [10] Gnielinski, V., "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow," *Int. J. Chem. Eng.*, 1976.
- [11] M. M. Shah, "A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 22, no. 4, pp. 547–556, Apr. 1979.
- [12] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and a S. Lavine, *Foundations of heat transfer*. 2013.
- [13] R. Diener, J. Schmidt, and J. Kiesbauer, "Einführung eines Expansionsfaktors zur Erweiterung der IEC 60534-2-1 für die Auslegung von Stellventilen bei Mehrphasenströmung," *Autom. Prax.*, 2004.
- [14] H. Recknagel, S. Eberhard, and E.-R. Schramek, *Taschenbuch für Heizung und Klima*. 2007.
- [15] "LMS Imagine.Lab Amesim, LMS Amesim 14, Tutorial guide."
- [16] "LMS Imagine.Lab Amesim, Two Phase FLOW Library, User's guide."
- [17] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 2006.