

# Filière Systèmes industriels

Orientation Power & Control

## Diplôme 2010

*Guillaume Joris*

*Régulation d'une pompe à  
chaleur en charge variable*

Professeur

Fariba Bützberger

Expert

Guy Ravaz

## Régulation d'une pompe à chaleur en charge variable

Diplômant

Guillaume Joris

### Objectif du projet

Le but de ce projet est de développer une pompe à chaleur électrique pour un fonctionnement à puissance variable. Mon travail consiste à réaliser l'acquisition des différentes mesures et à développer le pilotage et la régulation de la pompe.

### Méthodes | Expériences | Résultats

Etant donné que la pompe à chaleur à charge variable est en cours de développement, il a été convenu de commencer par piloter la pompe à chaleur existante de l'école, afin d'optimiser son fonctionnement.

L'acquisition des mesures ainsi que la commande fonctionnent. Les régulateurs sont en place et jouent chacun leur rôle respectif. Ces derniers permettent de travailler à un point de fonctionnement selon la température de sortie de l'eau et la température de surchauffe désirée.

Une interface utilisateur a été réalisée. Elle permet une gestion simple de la pompe avec l'affichage de ses mesures. Les données mesurées sont exportables dans des fichiers Excel. Une gestion des utilisateurs existe également.

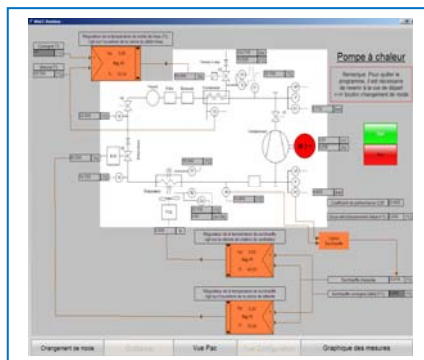
En ce qui concerne la nouvelle pompe, une première ébauche du programme et de l'interface est disponible. Les entrées/sorties supplémentaires ont leur place prévue. Les nouveaux modes (chauffage, réfrigération, dégivrage) sont commentés et les modifications sur l'interface ont aussi été expliquées. Néanmoins, les nouvelles stratégies de pilotage ne sont pas testées. L'ajustage de la régulation de la puissance de compression sera un point important de la nouvelle réalisation.

Travail de diplôme  
| édition 2010 |

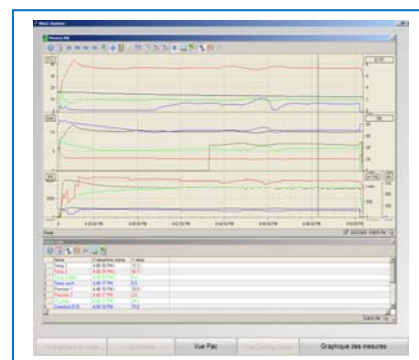
Filière  
*Systèmes industriels*

Domaine d'application  
*Power and Control*

Professeure responsable  
*Moghaddam Bützberger Fariba*  
*Fariba.Moghaddam@hevs.ch*



**Panneau de commande et de contrôle de la pompe à chaleur, avec affichage des différentes mesures**



**Visualisation graphique des mesures, avec la possibilité d'exportation dans une base de données**

# Table des matières

<b>1. Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Précisions sur le cahier des charges .....</b>	<b>4</b>
2.1. <i>Partie Commande .....</i>	<i>4</i>
2.2. <i>Partie Régulation.....</i>	<i>4</i>
2.3. <i>Partie interface .....</i>	<i>4</i>
2.4. <i>Déroulement du projet.....</i>	<i>5</i>
2.5. <i>Résumé des objectifs.....</i>	<i>5</i>
<b>3. Fonctionnement d'une pompe à chaleur .....</b>	<b>6</b>
3.1. <i>Les avantages de la charge variable .....</i>	<i>7</i>
3.2. <i>Inversion de cycle .....</i>	<i>7</i>
<b>4. Première étude .....</b>	<b>8</b>
<b>5. La pompe existante.....</b>	<b>9</b>
5.1. <i>Analyse de la pompe .....</i>	<i>10</i>
5.2. <i>Etude des modes existants (Wago) .....</i>	<i>10</i>
<b>6. Modification de la pompe à chaleur existante.....</b>	<b>11</b>
6.1. <i>L'automate SIEMENS de commande .....</i>	<i>11</i>
6.2. <i>Choix de la stratégie de commande avec SIEMENS.....</i>	<i>11</i>
6.3. <i>Détails des différents modes de fonctionnement .....</i>	<i>12</i>
6.3.1. <i>Mode manuel .....</i>	<i>12</i>
6.3.2. <i>Mode automatique 1.....</i>	<i>14</i>
6.3.3. <i>Mode automatique 2.....</i>	<i>14</i>
6.3.4. <i>Mode automatique 3.....</i>	<i>15</i>
6.3.5. <i>Mode maintenance .....</i>	<i>15</i>
6.4. <i>Programme automate .....</i>	<i>16</i>
6.4.1. <i>Structure du programme.....</i>	<i>16</i>
6.4.2. <i>Les différentes fonctions du programme .....</i>	<i>17</i>
6.5. <i>Programme d'interface utilisateur .....</i>	<i>23</i>

---

6.5.1.	Structure de l'interface .....	23
6.5.2.	Les différentes vues de l'interface utilisateur .....	24
6.5.3.	L'aide à la programmation.....	29
6.5.4.	Mode d'emploi .....	29
<b>7.</b>	<b>Mesures.....</b>	<b>30</b>
7.1.	<i>Mesure mode manuel.....</i>	<i>30</i>
7.2.	<i>Mesure modes automatiques .....</i>	<i>31</i>
7.2.1.	Mesure mode automatique 1 .....	32
7.2.2.	Mesure mode automatique 2 avec surchauffe à 6 [°C] .....	34
7.2.3.	Mesure mode automatique 2 avec surchauffe à 5 [°C] .....	36
7.2.4.	Mesure mode automatique 3 avec surchauffe à 6 [°C] .....	37
7.2.5.	Mesure mode automatique 3 avec surchauffe à 5 [°C] .....	39
7.2.6.	Mesure longue durée.....	40
7.3.	<i>Discussion des résultats.....</i>	<i>41</i>
<b>8.</b>	<b>La nouvelle pompe.....</b>	<b>43</b>
8.1.	<i>Les changements importants .....</i>	<i>43</i>
8.2.	<i>Schémas blocs.....</i>	<i>45</i>
8.2.1.	Commandé par l'automate.....	45
8.2.2.	Commandé par le module EC3-D72.....	46
8.3.	<i>Les entrées/sorties de l'automate .....</i>	<i>46</i>
8.3.1.	Entrées.....	46
8.3.2.	Sorties .....	46
8.4.	<i>Choix de la stratégie du programme .....</i>	<i>47</i>
8.4.1.	Algorithme de contrôle .....	48
8.4.2.	L'avancement dans la réalisation .....	48
8.5.	<i>Les changements dans le programme et dans l'interface .....</i>	<i>49</i>
<b>9.</b>	<b>Conclusions .....</b>	<b>52</b>
<b>10.</b>	<b>Remerciements.....</b>	<b>52</b>
<b>11.</b>	<b>Références .....</b>	<b>53</b>
<b>12.</b>	<b>Annexes.....</b>	<b>53</b>
<b>13.</b>	<b>Liste des légendes.....</b>	<b>54</b>



---

# 1. Introduction

Depuis 2004, la Haute Ecole Valaisanne de Sion (HES//SO) travaille sur les pompes à chaleur et leurs avantages sur les questions énergétiques. Les études ont été principalement axées sur un groupe énergétique composé d'une pompe à chaleur mixée à une alimentation électrique réalisée à l'aide d'une pile à combustible.

Un premier travail de diplôme, réalisé par M. Samuel Bonvin, a permis d'étudier le fonctionnement et les caractéristiques d'une pile à combustible. L'année suivante, un deuxième étudiant, M. Francesco Poretti, a travaillé sur la conception d'une pompe à chaleur de petite puissance pouvant fonctionner à l'aide d'une pile à combustible (puissance électrique consommée 0.8 [kW], puissance thermique théorique 3.5 [kW]).

Suite à ces premières études, en 2006, les deux travaux ont été repris par M. Olivier Rouiller qui a été chargé d'en faire une mise en commun. A la fin, le concept fonctionnait bien et les résultats étaient encourageants. La pompe à chaleur a été utilisée par les étudiants durant les cours de thermique et leurs travaux pratiques.

A ce jour, la pile à combustible a été retirée, cette technologie n'étant pas rentable. La pompe à chaleur est maintenant alimentée uniquement par le réseau. Sa gestion est réalisée avec un automate Wago.

Cette année, afin de continuer les études sur les systèmes énergétiques, l'école désire réaliser une pompe à chaleur à puissance variable. Pour ce faire, un compresseur travaillant à vitesse variable est nécessaire. La température extérieure devra servir de référence pour le calcul du point de fonctionnement de la pompe.

Vu les changements et améliorations à apporter, il a été décidé de refaire tout le concept. Pour cela, M. Ludovic Bonvin est chargé de s'occuper du dimensionnement et de la réalisation. Pour ma part, je suis chargé de la partie acquisition des mesures, de l'optimisation du pilotage de la pompe à chaleur ainsi que de la régulation.

Cette régulation devra permettre d'ajuster le point de travail en agissant sur les quatre principaux organes de la pompe (condenseur, détendeur, évaporateur, compresseur).

## **2. Précisions sur le cahier des charges**

La donnée du travail de diplôme fait office de cahier des charges. Des précisions sont néanmoins à apporter.

### **2.1. Partie Commande**

Etant donné que la conception et la programmation de la pompe à chaleur doivent se faire en même temps, il est pour moi impossible de travailler réellement sur le nouveau système.

Afin que je puisse avancer dans la réalisation de mon projet, il a été convenu que je commande la pompe à chaleur existante avec le nouvel automate SIEMENS. Du fait que l'automate de commande change (SIEMENS pour WAGO), la programmation est totalement à refaire. Il en va de même de l'interface utilisateur. Du coup, l'ancien automate a été temporairement mis de côté.

Lorsque la nouvelle pompe à chaleur aura été montée, il suffira de déplacer l'automate et ajuster le programme en fonction de la nouvelle conception.

### **2.2. Partie Régulation**

La régulation à charge variable ne peut être testée de façon complète sur la pompe actuelle. Elle est partiellement abordée par la régulation de la température de l'eau au condenseur et de la température de surchauffe à l'évaporateur. Le moteur du compresseur n'étant pas à vitesse variable, il ne peut subir de régulation. Seule une étude approfondie concernant la stratégie de la régulation sur le compresseur pourra être réalisée en attendant la construction de la nouvelle pompe.

### **2.3. Partie interface**

L'interface utilisateur de la nouvelle pompe à chaleur est totalement revue. Il sera réalisé avec le programme Wincc. L'interface devra comporter des améliorations par rapport à celle existant :

- facilité de compréhension et de navigation à l'intérieur de l'interface lors de l'utilisation
- base de données pour les mesures
- gestion des utilisateurs.

## 2.4. Déroulement du projet

Le travail de diplôme s'est déroulé en deux étapes. Une première partie de l'étude a été réalisée durant une journée par semaine depuis le 22 février et cela durant 8 semaines. Cette partie a essentiellement servi d'introduction et de mise en route du projet. Elle m'a permis une découverte et une familiarisation du programme automate et du programme d'interface utilisateur. A la fin de cette partie, un rapport intermédiaire a été rédigé. Il se trouve en annexe N°1. Une présentation orale a aussi été réalisée à ce moment-là.

Dès la mi-mai, le travail de diplôme s'est déroulé ensuite à plein temps et cela à nouveau durant 8 semaines. Ce rapport écrit est une synthèse de l'ensemble de l'étude et de la réalisation. Dans l'annexe N°1, on retrouve aussi le journal de travail tenu hebdomadairement.

## 2.5. Résumé des objectifs

Dans un premier temps, il est important que la commande de la pompe à chaleur existante à l'aide de l'automate SIEMENS fonctionne et que l'interface soit de bonne qualité.

Ensuite, une étude sur la nouvelle conception sera faite et documentée. Si possible, elle sera intégrée au programme et à l'interface.

Une réflexion concernant l'algorithme de control servant à fixer le point de fonctionnement est aussi importante.

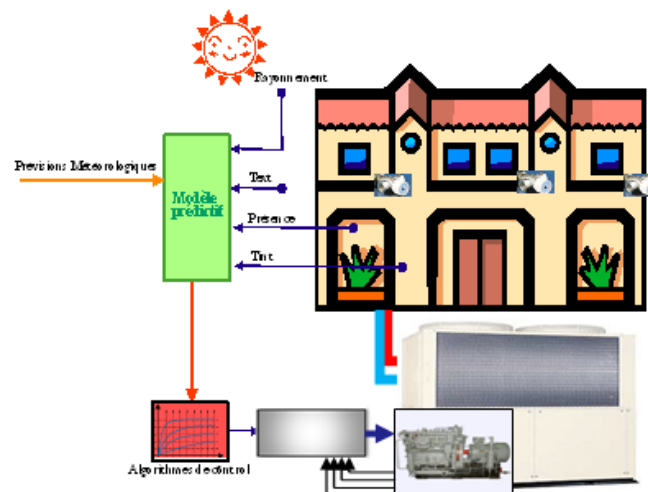


Figure 1 : Chauffage d'une maison à l'aide d'une pompe à chaleur air-eau

### 3. Fonctionnement d'une pompe à chaleur

Une pompe à chaleur est un dispositif thermodynamique permettant de transférer la chaleur du milieu le plus froid (circuit de captage) vers le milieu le plus chaud (circuit de chauffage). La première installation de Suisse fut réalisée dans les salines de Bex, il y a 100 ans. Le fonctionnement d'une pompe à chaleur est l'inverse de celui d'un réfrigérateur. La PAC extrait la chaleur de divers milieux (eau, air, sol) pour la transmettre au circuit de chauffage, par exemple chauffage d'une habitation par plancher chauffant ou chauffage de l'eau sanitaire,.... Selon le type de captage de l'énergie, on peut retrouver des pompes à chaleur air-eau ou encore eau-eau.

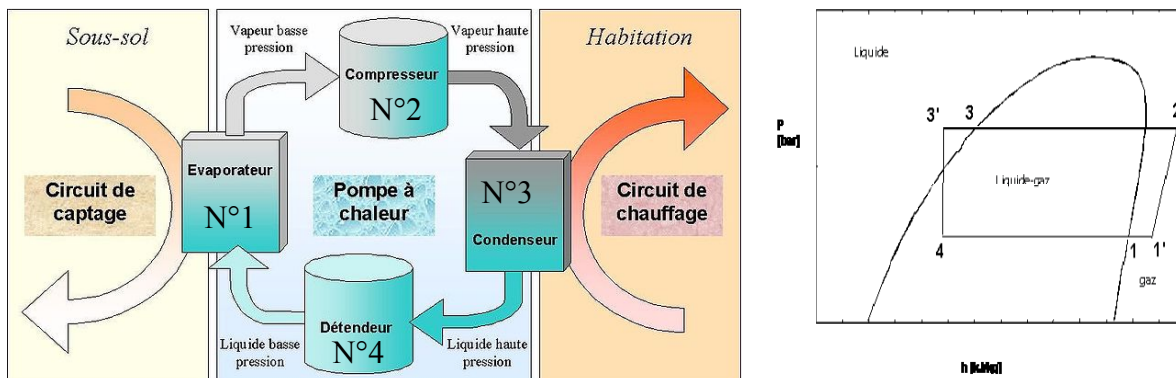


Figure 2 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur

Le système pompe à chaleur est constitué d'un fluide échangeur qui circule dans la pompe en boucle interne (partie centrale de l'image de droite). Ce liquide froid va absorber toute chaleur présente dans un environnement plus chaud que lui via un premier échangeur (N°1). Lors de cet échange, ce liquide froid va se transformer en vapeur froide. Cette vapeur sera ensuite comprimée (N°2). Le compresseur augmente la pression de la vapeur et du coup sa température. Par le biais d'un deuxième échangeur (N°3), la vapeur chaude va se condenser. Durant cette transformation, elle aura transmis sa chaleur à l'eau du circuit de chauffage. Ce liquide, poussé par la haute pression traverse un détendeur (N°4). Sa pression chute et on retrouve alors un liquide froid à basse pression : le cycle peut recommencer.

Dans le graphique entropie-pression de l'image de gauche, on retrouve ces étapes comme suit :

**De 4 à 1 :** Le fluide frigorigène s'évapore à pression constante et emmagasine de l'énergie thermique.

**De 1 à 1' :** Surchauffe de la vapeur pour éviter la présence de gouttelettes de liquide dans le compresseur.

**De 1' à 2 :** Le fluide frigorigène est comprimé isentropiquement. Au cours de cette compression, la température du fluide s'élève.

**De 2 à 3 :** Le fluide se refroidit et se condense à pression constante en cédant de la chaleur au fluide de refroidissement.

**De 3 à 3' :** Sous-refroidissement du fluide frigorigène pour assurer une alimentation liquide du détendeur.

**De 3' à 4 :** Le fluide se détend en n'échangeant avec le milieu extérieur, ni énergie mécanique, ni chaleur.



### 3.1. Les avantages de la charge variable

Jusqu'à ce jour, le type de compresseur monté sur les pompes à chaleur fonctionnait en tout-ou-rien. Pendant une longue période, le système était en fonctionnement et l'eau était chauffée. Dès la valeur de consigne dépassée, le compresseur s'arrêtait et attendait que la température diminue pour se remettre en route. Avec ce système (image de gauche), les pertes sont élevées car l'eau varie beaucoup en température. De plus, les compresseurs supportent mal les répétitions d'allumage et d'extinction.

Avec les nouveaux compresseurs à vitesse variable, il est possible d'effectuer une régulation de vitesse sur le moteur du compresseur. Ce dernier travaille à puissance variable autour du point de fonctionnement (image de droite). Cette méthode est avantageuse au niveau du rendement et de la durée de vie de la pompe. C'est avec ce système que la nouvelle pompe à chaleur développée devra fonctionner.

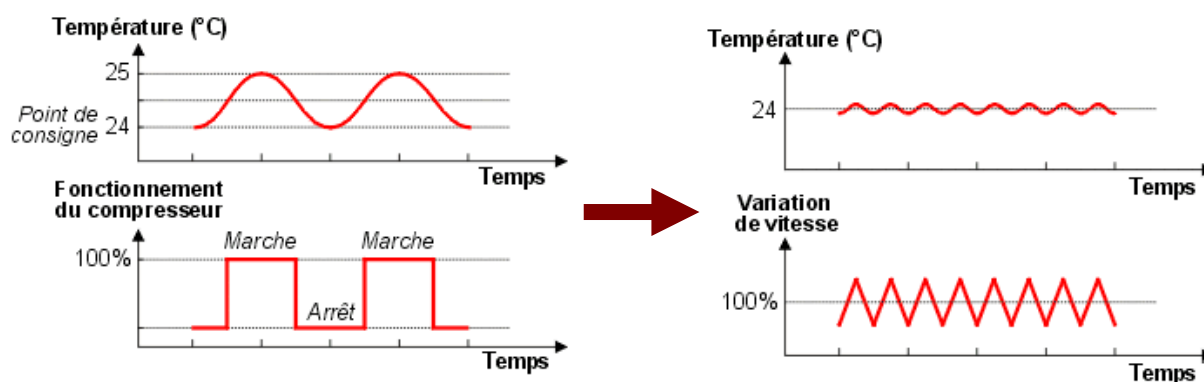


Figure 3 : Fonctionnement de la pac en tout-ou-rien et en vitesse variable

### 3.2. Inversion de cycle

Dans les nouvelles pompes à chaleur, la possibilité d'inverser le cycle de fonctionnement est aussi présente. Les fonctions des deux échangeurs sont échangées. Cette option est utile durant la saison chaude. On réalise en fait à ce moment-là une climatisation.

Cette inversion est aussi utilisée comme « dégivrage » de la pompe. Il se peut que dans la partie évaporateur, du givre apparaisse si l'on travaille longtemps à des températures de surchauffe relativement proches du zéro.

## 4. Première étude

Avant de se lancer réellement dans la réalisation, il a fallu s'assurer que des compresseurs à charge variable existaient dans les domaines de fonctionnement souhaités. Durant les premières semaines, j'ai donc travaillé en collaboration avec mon collègue. Notre principal objectif était de trouver rapidement un compresseur adapté. Voici les contraintes qui ont dicté notre choix :

- Capacité de travailler à charge variable.
- Puissance calorifique de 5 à 20 kilowatt.
- Utilisation d'un réfrigérant de type HFC (hydrofluorocarbure).

Après une première recherche, trois modèles ont été retenus :

Modèle	Fabricant	Réfrigérants	Type	Puissance frig. [kW]	Systèmes pour variation de charge
VSH088	Danfoss	R410a	Scroll	15	vitesse variable
VTZ038	Danfoss	R404a / R407c	Cylindre	7.2	vitesse variable
ZBD21	Copeland	R404a	Scroll	9.23	modulation de capacité

**Tableau 1 : Comparatif des compresseurs**

Lorsque les premières idées furent validées par les professeurs responsables, il a été décidé que Ludovic Bonvin poursuivrait les recherches sur les compresseurs. Quant à moi, je pouvais, dès ce moment-là, me consacrer pleinement à mon sujet de travail de diplôme.

Mon collègue a donc détaillé les études sur les caractéristiques précises de chacun de ces compresseurs (système de variation de charge, coefficient de performance, coûts d'utilisation). Au final le ZBD21 a été choisi. Les raisons et les différentes études chiffrées sont disponibles dans son rapport personnel.

En résumé, ce compresseur nécessite une commande ON-OFF qui allume le moteur du compresseur. Le moteur tourne alors tout le temps à 100 [%]. C'est ensuite un système de « débrayage » qui l'exploite. De ce fait il n'est pas piloté par un variateur de fréquence, mais par une PWM (Pulse Width Modulation), dont la période peut aller de 10 à 20 secondes, et le taux de modulation de 10% à 100%. Cette méthode se rapproche d'un fonctionnement tout ou rien, avec cependant l'avantage de pouvoir commuter très rapidement et donc d'obtenir un réglage plus fin. On évite toutefois de générer des pics de courant puisque le moteur tourne à vitesse constante. Néanmoins, on retrouve là un inconvénient de cette technologie, puisque l'énergie électrique consommée pour l'entraînement du moteur reste quasiment constante et cela que le compresseur travaille à 100% ou à 10% de sa charge.



**Figure 4 : Compresseur ZBD21**

## 5. La pompe existante

Ce chapitre est une étude de la pompe existante avec sa commande faite à l'aide de l'automate Wago. Pour plus de détails, le rapport concernant cette réalisation se trouve dans le classeur en salle de laboratoire de thermique (CE07).

Voici le schéma bloc de la pompe à chaleur montée dans le laboratoire de thermique :

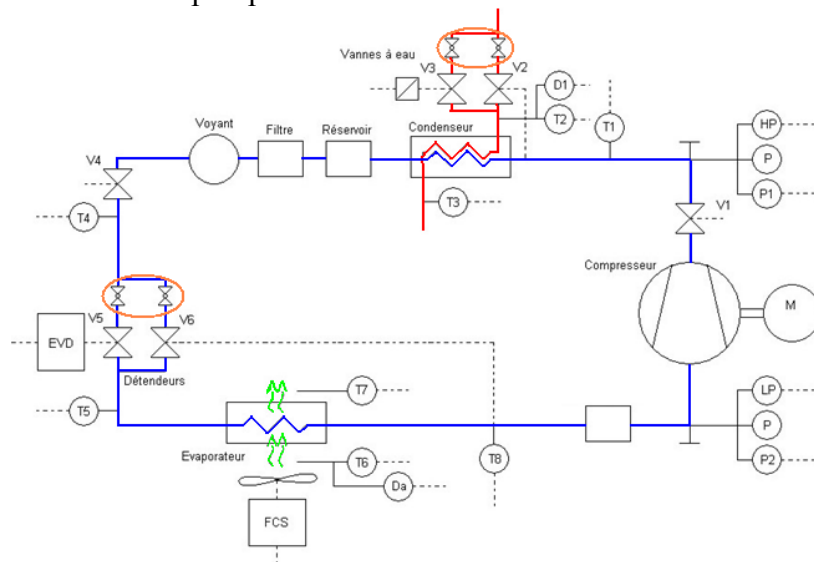


Figure 5 : Schéma bloc de la pompe à chaleur de l'école

On y retrouve les quatre secteurs principaux : compresseur, condenseur, détendeur et évaporateur. On distingue facilement en bleu la boucle interne parcourue par le fréon, l'échangeur parcouru par l'eau (rouge) et enfin l'échangeur parcouru par l'air (vert). Pour l'eau et pour le fréon, deux passages différents sont possibles selon la position des vannes à main (entourées en orange).

Différents points de mesures et contacts sont à disposition :

- Capteurs de températures (T1 à T8)
- Mesures complètes des pressions (capteurs (P1-P2), manomètres (HP-LP) et pressostats (P))
- Capteur de débit d'eau (D1)
- Capteur de débit d'air (Da)
- 1 mesure de puissance sur le moteur du compresseur
- 1 contact informant de l'état ON-OFF sur le compresseur

On distingue aussi les organes de contrôle :

- Vannes magnétiques (V1 et V4)
- Vanne pilotée : Vanne à eau nommée « Belimo » (V3)
- Vanne pilotée : Vanne de détente nommée « EVD » ou « Carel » (V5)
- Un organe de commande de la vitesse au ventilateur (module nommé FCS)
- Commande d'enclenchement du moteur du compresseur (M)

Plus de détails sur les entrées/sorties seront donnés plus loin dans le rapport. Il en va de même pour les types et caractéristiques de chaque capteur ou organe de commande.

## 5.1. Analyse de la pompe

Après avoir décortiqué le schéma bloc, j'ai pu facilement déterminer les entrées/sorties qui me seront utiles pour réaliser la commande à l'aide de l'automate SIEMENS. Par rapport à la commande existante, quelques remarques sont à faire :

- Contrairement aux modes de fonctionnement de 2006 (commande par boutons manuels présents sur l'armoire électrique ou commande par interface), il a été décidé de ne reproduire que la commande par interface graphique afin de simplifier au maximum la commande.
- Comme expliqué plus haut, toute la partie alimentation par pile à combustible n'est plus d'actualité. Du coup, plusieurs entrées/sorties n'ont plus aucune raison d'apparaître sur la nouvelle réalisation.
- Vu que cette réalisation est provisoire, l'automate ne sera pas installé dans une armoire électrique. Le câblage sera externe lui aussi. C'est donc tout naturellement que les entrées/sorties ont été limitées au maximum.
- De plus, les modes de fonctionnement ne sont pas limités à ceux existants. Je dois développer une gestion et une commande de la pompe à chaleur optimale. Certains modes peuvent être repris, alors que de nouveaux modes peuvent être amenés.

Suite à ces remarques, la liste des entrées/sorties finales a pu être établie. Elle se trouve en annexe N°2.

## 5.2. Etude des modes existants (Wago)

Lors de la conception de la pompe à chaleur présente dans la salle de laboratoire CE07, deux parties distinctes ont été réalisées. Une partie « manuel » autorégulée grâce aux vannes thermostatique et pressostatique. Et une partie automatique où des vannes pilotées par automate viennent remplacer les vannes autorégulées. Des vannes à main permettent de choisir avec quelle partie on veut travailler. Il est aussi possible de faire un « mix » des deux parties.

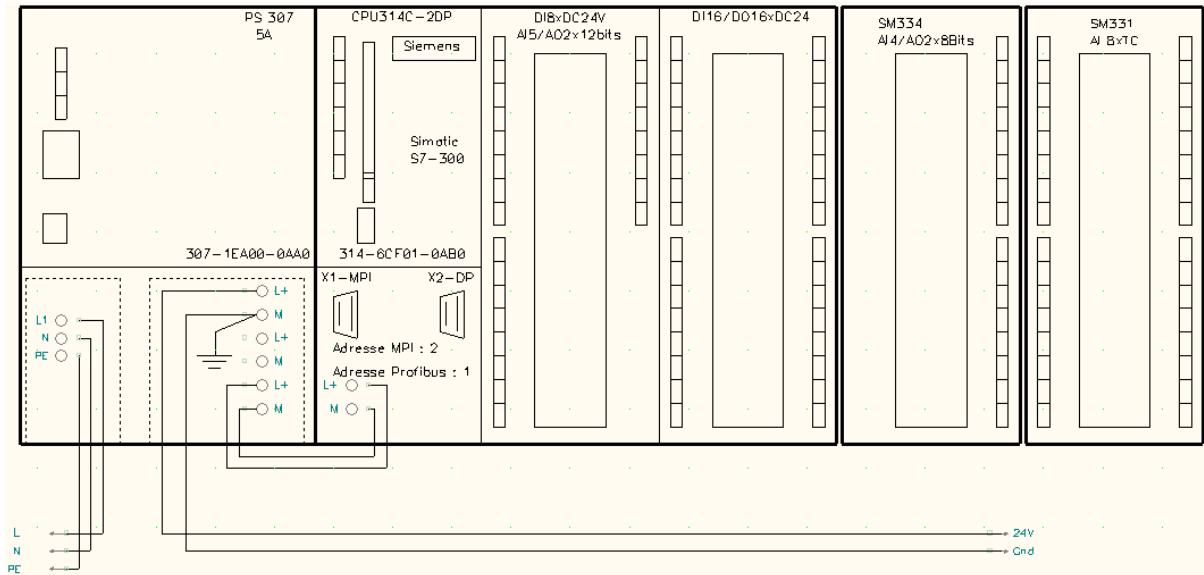
Donc, suite au mode purement « manuel », des modes semi-automatiques et automatiques existent. On peut travailler avec une régulation sur le débit d'eau au condenseur ou sur l'ouverture de la vanne au détendeur ou sur les deux en même temps.

La consigne de vitesse de l'évaporateur reste fixe et ne dispose donc pas de régulateur.

En ce qui concerne le compresseur, il ne peut être commandé qu'en tout-ou-rien = ON-OFF. Il n'y a donc pas de commande de vitesse possible. La puissance consommée de ce dernier est quasiment constante.

## 6. Modification de la pompe à chaleur existante

## 6.1. L'automate SIEMENS de commande



### Figure 6 : Présentation de l'automate SIEMENS

On retrouve sur la gauche le module d'alimentation (230VAC ➔ 24VDC). En deuxième position, il y a la CPU de l'automate ainsi que les connecteurs pour la programmation et la communication avec l'interface.

De la troisième position et jusqu'à la sixième, plusieurs cartes d'entrées/sorties différentes ont été montées (analogiques, digitales, thermocouples). Les caractéristiques et le nombre d'entrées/sorties ont été déterminés à l'aide de la liste des entrées/sorties (Annexe N°2).

Dès lors, et avec l'aide la schématique de l'armoire électrique existante, une nouvelle schématique de câblage a pu être dessinée. Elle se trouve en annexe N°3.

Comme l'installation est provisoire, l'automate SIEMENS a été posé sur un chariot en parallèle à l'armoire électrique. Pour le câblage il a fallu faire au mieux avec le matériel à disposition.

## 6.2. Choix de la stratégie de commande avec SIEMENS

Il est évident que les modes de commande développés sur le nouvel automate seront très proches de ceux qui existaient sur Wago.

Le mode manuel est à conserver obligatoirement. Les modes automatiques sont eux légèrement différents. Le grand changement se porte au niveau de l'évaporateur. Une régulation de la vitesse de rotation du ventilateur a été introduite.

Les modes doivent aussi être choisis en fonction de la pompe à chaleur qui est en construction. Ceci du fait que sur la nouvelle réalisation, nous disposerons uniquement de vannes pilotées. Tout au long du développement, j'ai donc orienté mes modes principalement sur les commandes de vanne pouvant être régulées. Le programme actuel et ses différents modes serviront de tremplin pour la nouvelle installation.



### 6.3. Détails des différents modes de fonctionnement

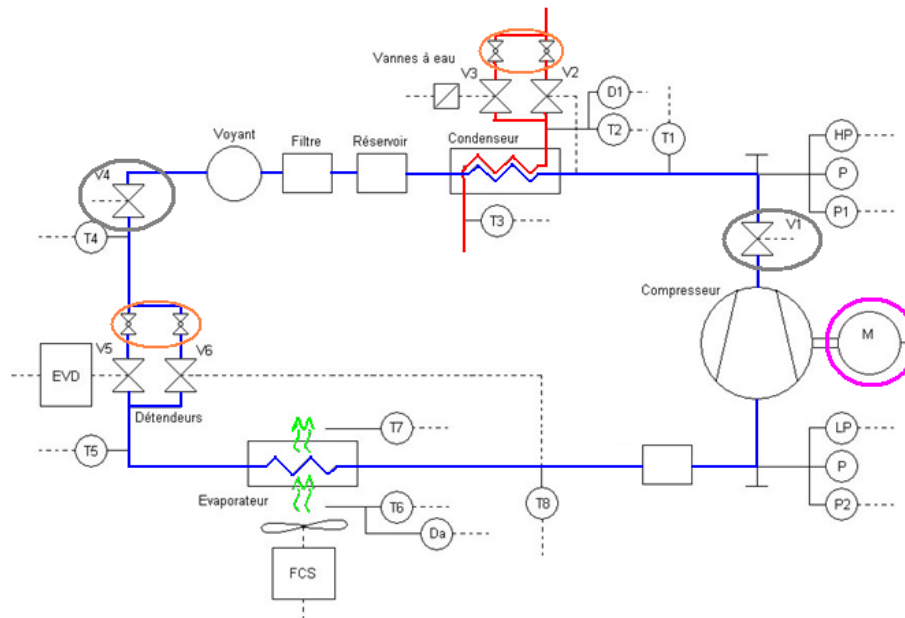


Figure 7 : Schéma bloc pompe à chaleur

Comme expliqué auparavant, la position des vannes à main présentes sur la pompe permet de définir le mode de fonctionnement (entourées orange sur l'image).

Une partie commune à tous les modes existe : lorsqu'on effectue un démarrage de l'installation, trois organes commandés en ON-OFF sont enclenchés. Cette action regroupe les deux vannes magnétiques (V1 et V4 entourées en gris) et la commande du moteur du compresseur (entourée en violet).

Pour la commande et le fonctionnement des autres secteurs, il faut se référer aux différents modes décrits ci-dessous. Etant donné que cette commande par automate SIEMENS est provisoire sur cette pompe, seuls les modes nécessaires à un bon fonctionnement ont été développés.

#### 6.3.1. Mode manuel

*Vanne pressostatique sur le condenseur (V2)*

*Vanne thermostatique sur le détendeur (V6)*

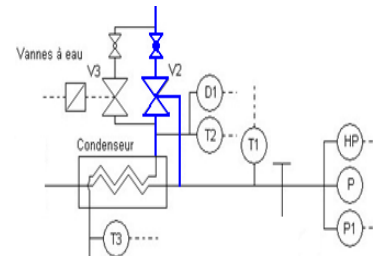
*Consigne fixe de vitesse au ventilateur → 50[%] sur FCS*

#### **Remarque :**

Le ventilateur reçoit une consigne fixe de vitesse de rotation. Elle s'élève à 50[%]. Avec cette consigne, le débit d'air est maximum. Lors d'essais durant les années précédentes, il a été prouvé qu'une augmentation de la consigne au-dessus des 50[%] ne change en rien le débit air circulant dans l'évaporateur.

Dans ce mode, la pompe s'autorégule autour d'un point de fonctionnement fixé par les vannes manuelles. L'étude des deux vannes autorégulées permet une meilleure compression du fonctionnement de la pompe à chaleur.

- Le débit d'eau de la vanne V2 est régulé en fonction de la pression P1. Si la pression augmente, la vanne va s'ouvrir de plus en plus. De ce fait, la température de sortie d'eau T3 va diminuer et, du coup, faire redescendre la température et la pression dans l'ensemble de la pompe. Le fonctionnement s'inverse si la pression diminue trop. Petit à petit la pression et l'ensemble de la pompe à chaleur se stabiliseront autour d'un point de fonctionnement.



**Figure 8 : Circuit eau en manuel**

- L'ouverture de la vanne au détendeur dépend de la température T8 (sortie fréon de l'évaporateur visible sur la figure 9). Cette température est un point important de la pompe à chaleur. Cette vanne travaille uniquement en fonction de T8.

Durant les prochains modes, lorsqu'on travaillera avec des régulateurs, on parlera plutôt de température de surchauffe. Cette dernière et T8 sont deux températures très proches. Voici comment on calcule la température de surchauffe à l'aide de T8 et de la pression P2. La formule dépend de certaines lois de thermodynamique :

$$T_{\text{evap}} = -0.0037 \cdot P_2^4 + 0.157 \cdot P_2^3 - 2.3434 \cdot P_2^2 + 20.296 \cdot P_2 - 43.262$$

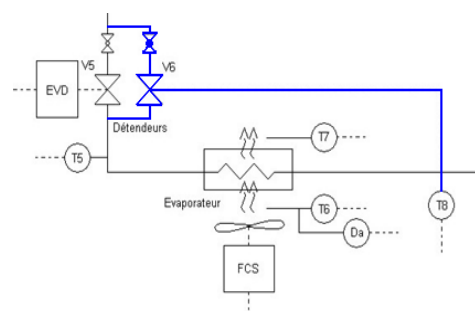
$$T_{\text{surchauffe}} = T8 - T_{\text{evap}}$$

**Équation 1 : Calcul de la surchauffe**

Dans notre application,  $P_2 = 3$  à  $3.1$  [bar] d'où  $T_{\text{evap}} = 0.5$  à  $2.5$  [°C]. Sur la mesure de T8, P2 amène donc une faible correction. Les réflexions ci-dessous concernent aussi bien T8 que Tsurchauffe.

Cette mesure ne doit pas monter trop haut. C'est elle qui garantit si l'on restera, comme désiré, purement gazeux lors de la compression. Un maintien de cette température autour de  $6$  [°C] permet d'éviter une formation de gouttelettes dans le compresseur. Par contre, elle ne doit pas non plus descendre au-dessous de zéro, sous peine de créer du givre en amont dans l'évaporateur.

Voici comment la vanne thermostatique, qui travaille en fonction de T8, effectue le réglage de son ouverture. Si la température est élevée en T8, la vanne commencera à s'ouvrir afin d'augmenter le débit de fréon. Dans ce cas, la vitesse de circulation dans le circuit commencera à s'élever. En passant plus rapidement dans l'évaporateur, le gaz aura moins de temps pour se chauffer. T8 commencera alors à diminuer comme désiré.



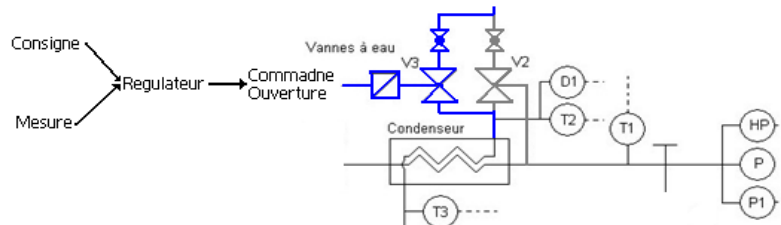
**Figure 9 : Circuit gaz au détendeur en manuel**

### 6.3.2. Mode automatique 1

*Ouverture de la vanne à eau régulée en fonction de la température de sortie d'eau T3 (V3)*

*Vanne thermostatique sur le détendeur (V6)*

*Consigne fixe de vitesse au ventilateur → 50[%] sur FCS*



**Figure 10 : Circuit d'eau avec régulation du débit**

Ce mode intègre un seul régulateur. Il agit sur la vanne du débit d'eau V3. Il permet un réglage fin de la température de sortie de l'eau (T3) en fonction de la consigne choisie. Cette régulation remplace la vanne pressostatique du mode manuel. Auparavant, c'est la pression P1 qui réglait le débit d'eau et indirectement déjà T3. Le choix du régulateur réalisé avec le logiciel s'est porté sur une régulation directe sur T3 plutôt que sur P1 car c'est un point de mesure plus parlant pour l'utilisateur. Ce dernier choisit en fait la température de sortie de l'eau qui correspond à la température employée dans son chauffage, au contraire du choix d'une pression qui n'est pas vraiment représentative.

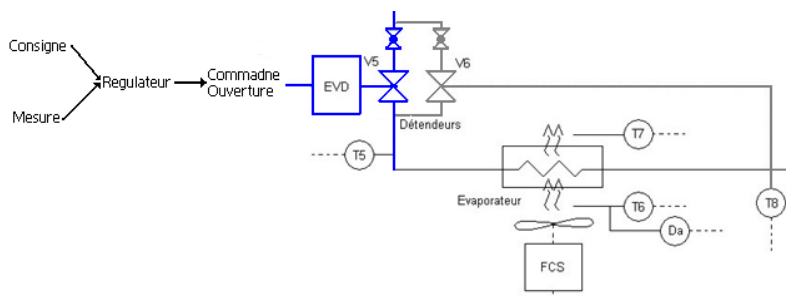
Il est à noter qu'un pré-réglage du débit d'eau est nécessaire avant un enclenchement de la pompe. Ce dernier se fait automatiquement avec une commande d'ouverture de la vanne à 50[%]. Dès que le débit d'eau circulant dépasse 140[l/h], un démarrage est permis.

### 6.3.3. Mode automatique 2

*Ouverture de la vanne à eau régulée en fonction de la température de sortie d'eau T3 (V3)*

*Ouverture de la vanne au détendeur régulée en fonction de la température de surchauffe (V5)*

*Consigne fixe de vitesse au ventilateur → 50[%] sur FCS*



**Figure 11 : Circuit gaz au détendeur avec régulation du débit**

Sur la base du mode automatique 1, un régulateur sur la vanne de détente a été ajouté. Ce dernier permet la régulation de la température de surchauffe en sortie de l'évaporateur. Cette vanne remplace la vanne thermostatique des modes précédents. Celle-ci travaillait en fonction de T8. Pour un meilleur réglage de cette température, il vaut mieux travailler avec la température de surchauffe. Celle-ci dépend de T8 mais aussi de P2 comme expliqué auparavant. La stratégie de fonctionnement est identique à celle de la vanne thermostatique.

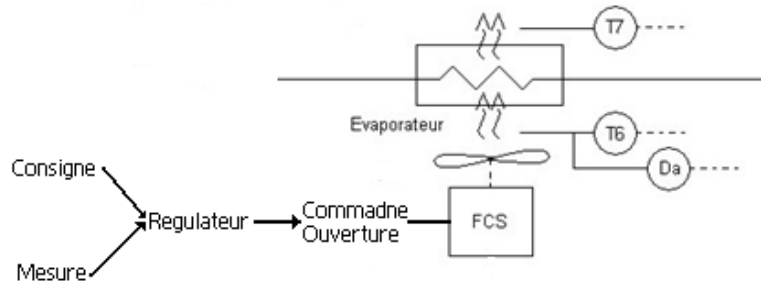
Avant le démarrage de la pompe, la vanne de détente est ouverte à 80[%]. Cette ouverture fait office de pré-réglage et garantit un enclenchement à basse température de surchauffe. Le pré-réglage du débit d'eau est lui aussi toujours nécessaire comme au mode automatique 1.

### 6.3.4. Mode automatique 3

*Ouverture de la vanne à eau régulée en fonction de la température de sortie d'eau T3 (V3)*

*Ouverture de la vanne au détendeur régulée en fonction de la température de surchauffe (V5)*

*Vitesse au ventilateur régulée en fonction de la température de surchauffe sur FCS*



**Figure 12 : Régulateur sur le ventilateur**

Sur la base du mode 2, un régulateur sur l'évaporateur a été rajouté. Ce régulateur améliore la régulation de la température de surchauffe. Il travaille en parallèle avec celui qui est présent sur la vanne de détente. Si la surchauffe est trop faible, on ferme la vanne de détente et en même temps on diminue la vitesse du ventilateur. Ces deux actions simultanées permettent de mieux réguler la température de surchauffe.

Ce mode a été implanté pour la première fois sur SIEMENS, il n'existait pas sur Wago. Des mesures devront prouver les attentes prévues sur ce nouveau régulateur. Dans tous les cas, ce régulateur présent sur l'évaporateur sera actif sur la pompe à chaleur à charge variable qui est en développement. Il est donc judicieux de faire des essais sur la réalisation existante.

### 6.3.5. Mode maintenance

Comme son nom l'indique, ce mode est utile pour les personnes qui doivent faire de la maintenance sur la pompe : contrôle, changement de pièces, changement du gaz dans la pompe,...

Chaque organe peut être commandé indépendamment → vannes magnétiques, compresseur, vitesse au ventilateur, ouverture de la vanne à eau, ouverture de la vanne de détente. La position des vannes à main est libre et on peut donc travailler avec les vannes pressostatique et thermostatique.

Seule une personne ayant les compétences nécessaire pour faire de la maintenance sur une pompe à chaleur est autorisée à accéder à ce mode.

## 6.4. Programme automate

La programmation sur automate SIEMENS est réalisée avec SIMATIC Manager. Avec ce dernier, plusieurs langages sont à disposition. J'ai entièrement travaillé en langage « CONT » qui veut dire contact. Il est le mieux adapté, pour une programmation automate relativement simple.

Exemple : une sortie (représentée par le symbole d'une bobine) est mise à 1 si l'entrée (représentée par un contact ouvert) est à 1.

### 6.4.1. Structure du programme

Le bloc principal se nomme OB1. Il est représenté par l'image ci-dessous. Il correspond au « Main ». Les couleurs des différentes fonctions aident à la compréhension et au suivi du programme. Dans les explications des prochaines pages (point 6.4.2), on retrouve les blocs principaux détaillés avec leur couleur respective. Sur la droite de l'image, on retrouve le bloc d'interruption. Il est indépendant du « Main » et s'exécute chaque 100 [ms].

Un structogramme est aussi à disposition, il est en annexe N°4. Le programme complet en format « contact » a été imprimé et se trouve en annexe N°5.

Les variables utilisées ont toutes été sauveées dans un bloc de données nommé « Donnees\_Globales ». Deux autres blocs de données ont été créés pour la sauvegarde respective des valeurs d'entrées et de sorties analogiques.

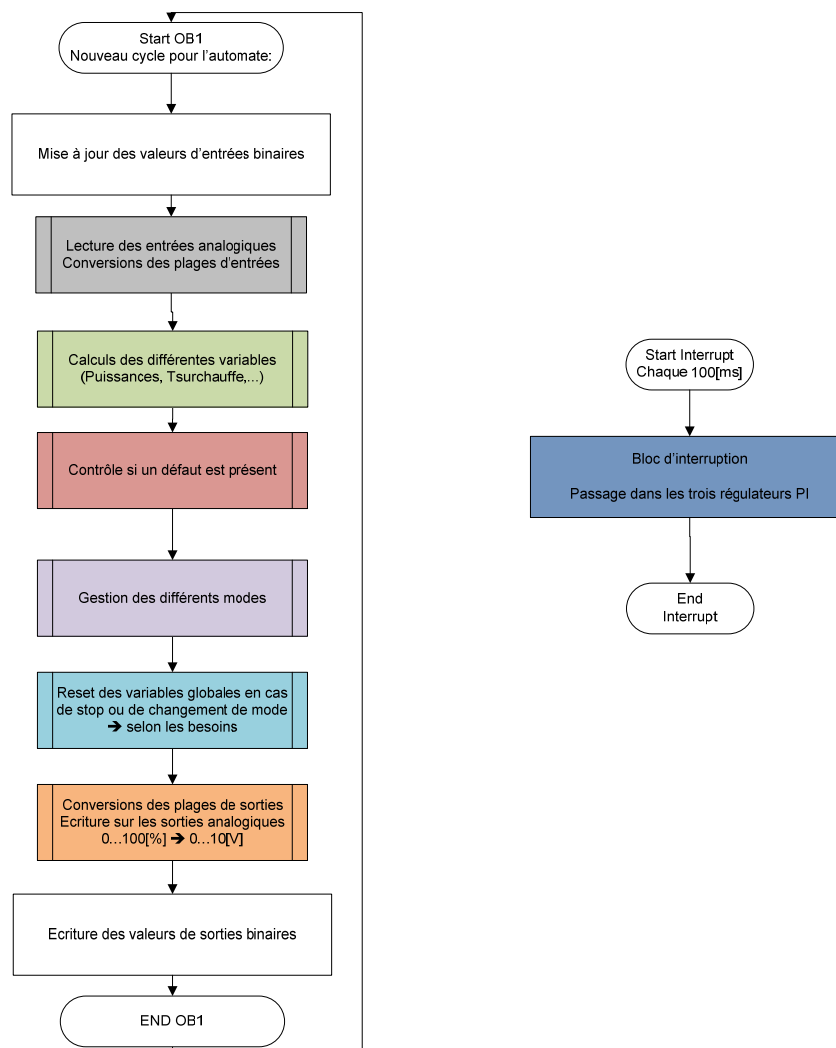


Figure 13 : Structure de base du programme



#### 6.4.2. Les différentes fonctions du programme

Durant ce chapitre, les différentes fonctions du programme seront décrites. Chaque fonction est nommée de la lettre *a.* à *g.* Les couleurs permettent de se repérer avec la figure 13.

##### *a. Conversion plage d'entrée*

La page de structogramme correspondante à ce bloc est l'annexe N°4 page N°2. La partie de structogramme correspondant à chaque entrée est présente avec la description. En langage programmation, on retrouve ces conversions à l'annexe N°5.4.

##### Remarque générale

Les différentes grandeurs d'entrées entières sont sauvegardées dans un bloc de données sous forme de grandeurs physiques réelles. Pour réaliser cette conversion (entière-réelle), un bloc existe. Il se nomme « mise à l'échelle ». Il sera utile pour plusieurs entrées décrites dans les prochaines pages. Avec le bloc de fonction ci-dessous, l'opération est simple à faire.

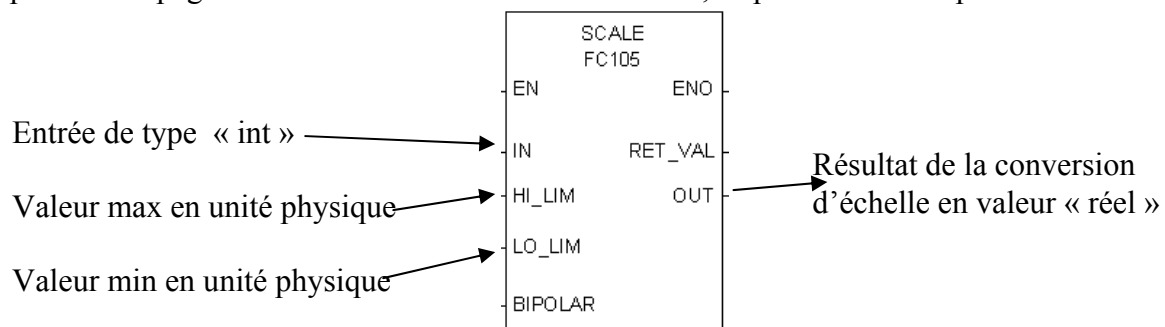


Figure 14 : Bloc de mise à l'échelle

##### Entrées thermocouple



Figure 15 : Thermocouple

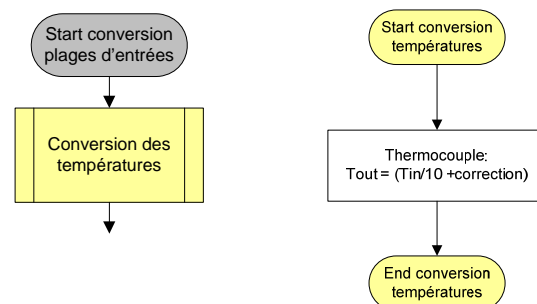


Figure 16 : Structogramme correspondant

Pour les températures, nous disposons de thermocouples de type K. Ils sont collés contre les surfaces des différentes conduites de gaz ou d'eau. Leur plage de mesure se situe entre -100 et +200 [°C]. Il est important que le câble de liaison entre le capteur et la carte de l'automate soit de la même matière que le thermocouple → Nickel-Chrome et Nickel. La fiche technique se trouve en annexe N°11 du classeur « Pompe à chaleur » se trouvant en salle CE07.

L'automate retourne les températures directement en degrés Celsius. Une valeur lue par l'automate sur son entrée thermocouple de 203 correspond à une température de 20.3 [°C]. Pour cette raison, un bloc de division par dix a été mis en place sur chaque entrée thermocouple. Cette opération doit se faire pour chaque entrée (huit fois).

### Problème rencontré :

Une erreur de mesure a été détectée sur ces entrées thermocouple. Les températures mesurées étaient toujours 2 à 3 [°C] au-dessous de la valeur réelle. Plusieurs essais ont été réalisés afin de résoudre le problème. Les différentes conditions de montage de thermocouple fournies par les datasheets n'ont néanmoins pas résolu le problème. L'erreur provient sûrement de la compensation de la température extérieure (température de la pièce dans laquelle l'automate travaille). Même la maison SIEMENS n'a pas su nous donner de solution à cette erreur. De la documentation « pdf » concernant les cartes d'entrées thermocouple se trouve sur le CD.

Dans la version finale, un offset constant a été déterminé à l'aide d'un simulateur électronique de thermocouple. Cet appareil fournit la tension voulue en fonction de la température désirée. Un offset constant de 2.6 °C présent sur toutes les entrées a été déterminé. Il a été introduit sur chaque bloc de mesure.

En plus de cela, une correction de quelques dixièmes de degrés a été nécessaire sur certaines entrées. Ces corrections étaient déjà présentes avec l'ancienne gestion par automate Wago. Elles ont donc été recopiées sur les entrées SIEMENS. Elles proviennent d'erreurs de mesure constatées. Elles sont surtout dues au collage des thermocouples et à leur emplacement respectif.

### Entrées analogiques pour la mesure de pression

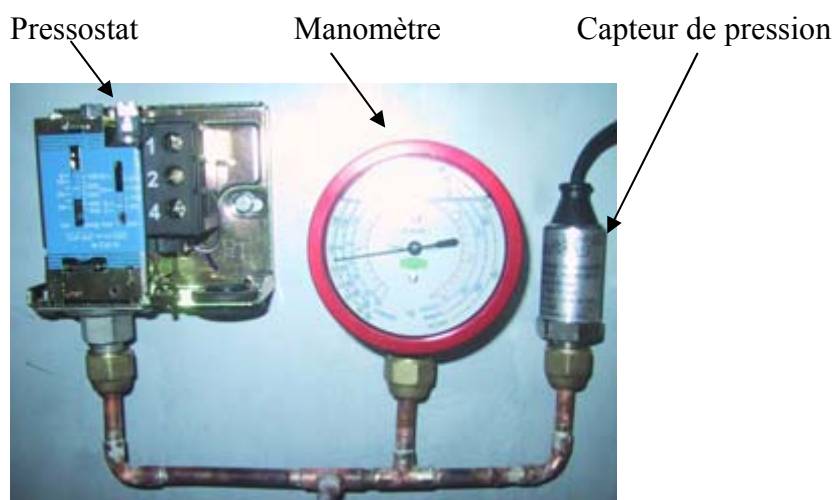


Figure 17 : Mesures de pression

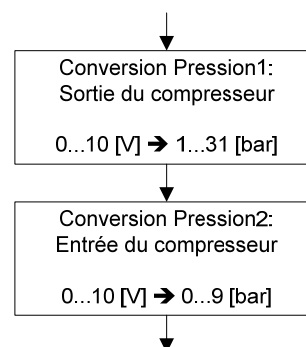


Figure 18 : Structogramme correspondant

Les deux capteurs de pression envoient un signal 0-10[V] à l'automate. Pour le capteur présent en sortie du compresseur, la plage mesurable se situe entre 1 et 31 [bar]. Pour la pression d'entrée, c'est entre 0 et 9 [bar]. Fiche technique en annexe N°6 dans le classeur salle CE07.

Un bloc de mise à l'échelle permet de convertir la mesure reçue entière 0-10[V] en une plage de valeur réelle exprimée en unité physique.

### Entrées analogiques pour la mesure de puissance

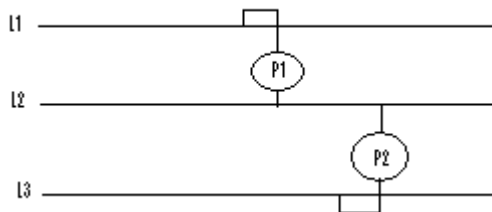


Figure 19 : Montage Aaron

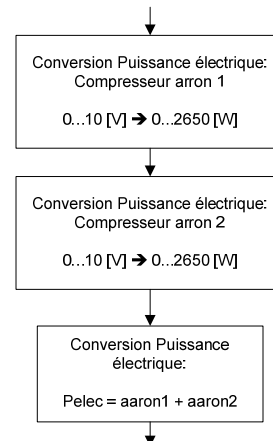


Figure 20 : Structogramme correspondant

Une carte électronique permet la mesure de la puissance triphasée consommée par le moteur du compresseur. Elle se base sur le principe du montage Aaron comportant deux wattmètres mesurant la puissance entre une première phase et une deuxième. L'addition des deux valeurs ainsi obtenues donne la puissance totale triphasée. Sur chaque phase, une puissance maximale de 2650[W] peut être mesurée. Elle est reçue en signal 0-10[V] par l'automate. Le dossier technique de la carte se trouve en annexe N°12 du classeur en CE07. Une mise à l'échelle est donc nécessaire pour les deux mesures de puissance. Dès la mise à l'échelle effectuée, il faut additionner les deux valeurs pour avoir la puissance totale consommée par le compresseur.

### Entrées analogiques pour la mesure de Débit d'air



Figure 21 : Ventilateur

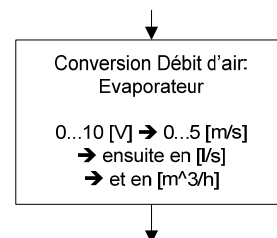


Figure 22 : Structogramme correspondant

Pour mesurer le débit d'air circulant au niveau de l'évaporateur, nous disposons d'un capteur de vitesse. Ce dernier est placé dans le conduit de sortie d'air. Sa caractéristique, ainsi que celle de son variateur, se trouve en annexe N°16 et N°17 du classeur en CE07.

Sa plage de mesure se situe entre 0 et 5 [m/s]. L'entrée étant sur une plage 0-10[V], une simple mise à l'échelle est tout d'abord réalisée.

Pour passer d'une mesure de vitesse à une mesure de débit, il est nécessaire de multiplier la vitesse par la section du conduit.

La mesure est sauvée finalement en [m³/h] et en [l/s]. Voici les étapes :

$$\text{Débit} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = v \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot S [\text{m}^2] \cdot 3600$$

$$\text{Section} = 0.070686 [\text{m}^2]$$

$$\text{Débit} \left[ \frac{\text{l}}{\text{s}} \right] = v \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot S [\text{m}^2] \cdot 10^3$$

Équation 2 : Calculs pour le débit d'air

## Entrée compteur

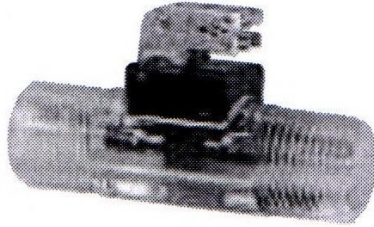


Figure 23 : Capteur de débit d'eau

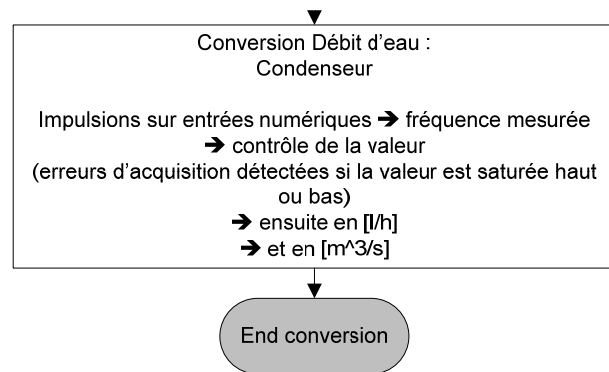


Figure 24 : Structogramme correspondant

Pour la mesure de débit d'eau entrant dans le condenseur, il est nécessaire d'avoir une entrée compteur sur notre automate. La mesure se fait sur l'installation à l'aide d'une mini-turbine qui envoie une trame d'impulsions à fréquence variable selon sa vitesse de rotation. Chez SIEMENS, il existe des entrées compteur digitales. Un paramétrage spécial de l'entrée est à faire lors de la configuration du matériel via le logiciel.

Dans l'automate, nous travaillons avec un fréquencesmètre. Il compte les impulsions présentes sur l'entrée numérique prévue. Il retourne ensuite la fréquence moyenne. Un rafraîchissement se fait toutes les 10 [s]. Cela est suffisant dans notre cas puisqu'on arrive à englober toute la plage de mesure de notre capteur (voir les calculs ci-dessous).

Grâce aux caractéristiques du capteur, nous arrivons à calculer les fréquences minimale et maximale auxquelles il peut travailler. Voir annexe est le N°22 dans le classeur en CE07.

### Donnée capteur :

Plage de mesure : 1 à 1500 [l/h]  
Compteur impulsion : 1'000 impulsions/litre

### Calculs :

$$fréquence = plage\_mesurable \cdot compteur\_impulsions \Rightarrow [Hz] = \left[ \frac{impulsions}{s} \right] = \frac{[l/h] \cdot [impulsions/l]}{3600}$$

Équation 3 : Calculs pour le débit d'eau

On arrive à des fréquences mesurables pour ce capteur entre : 0.277 à 416.67 [Hz]

La vitesse des impulsions arrive donc entre : 1/3.6 [s] et 1/2.4 [ms]

### Remarque :

La valeur retournée par le fréquencesmètre a comme unité les [mHz]. Pour retrouver une valeur de débit appropriée en [litre/heure] soit en [m³/s], il est nécessaire de faire la conversion inverse :

fréquence\_[mHz] \* 0.0036 pour avoir des [litre/heure]  
fréquence\_[mHz] \* 12960 pour avoir des [m³/s]

### *b. Les calculs des différentes grandeurs utilisées sur la pompe à chaleur*

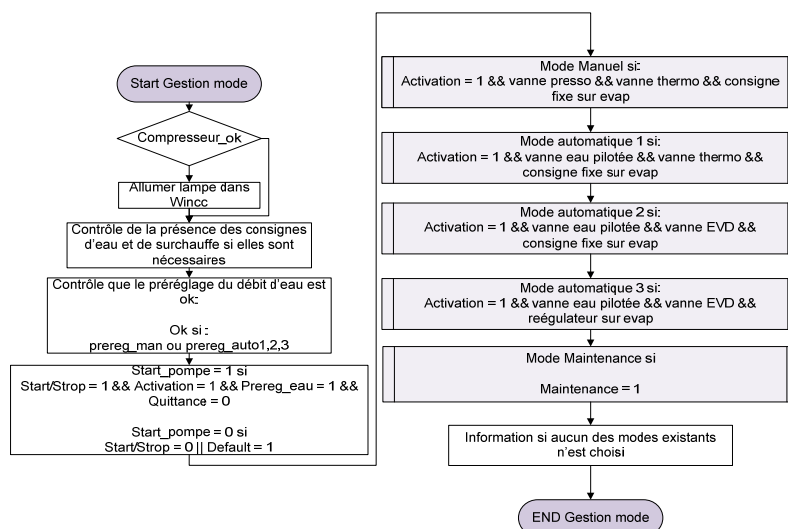
Ce bloc effectue différentes opérations sur la base des lois de thermodynamique. En fonction des entrées qui viennent d'être mises à jour par le bloc précédent, on arrive à calculer par exemple les deltas de températures au condenseur et à l'évaporateur. Ensuite nous retrouvons les calculs de la température de surchauffe et de sous-refroidissement. Les puissances au condenseur et à l'évaporateur ainsi que le coefficient de performance sont aussi définis dans cette partie. Etant donné que les calculs ne sont pas spécialement complexes, ils ne sont pas repris dans ce rapport. Toutes les étapes sont décrites dans le structogramme en annexe N°4 page N°3. Elles sont aussi visibles sur le programme annexe N°5.7.

### *c. Default*

A chaque cycle, un contrôle du bon fonctionnement de la pompe à chaleur est réalisé. Une vérification est faite, par exemple, sur l'état de fonctionnement du compresseur. Si l'alimentation de dernier est soudainement coupée via un déclenchement de pressostats, l'information est détectée par l'automate. Il en informe directement l'utilisateur par un message d'erreur sur l'interface. De plus, suite à un problème, la pompe est complètement arrêtée et remise à l'état initial. Une remise en route n'est possible qu'après une quittance de l'utilisateur. Toutes les étapes sont décrites dans le structogramme en annexe N°4 page N°4. Elles sont aussi visibles sur le programme annexe N°5.12.

### *d. Gestion des modes*

Ce bloc est le centre du programme. Il permet tout d'abord l'aiguillage de l'utilisateur dans les modes existants. Le pré-réglage du débit de l'eau au condenseur est aussi contrôlé dans cette fonction. Il gère l'enclenchement de la pompe et respectivement son arrêt. Chaque mode étant une sous-fonction à part entière, elles sont toutes appelées depuis ce bloc. Par ces appels de sous-fonctions, on commande les vannes et la gestion des régulateurs. Les descriptions de chaque mode ayant déjà été faites, elles ne seront pas reprises dans ce paragraphe. Pour approfondir le fonctionnement de chaque mode, nous retrouvons son structogramme en annexe N°4 page N°5 à N°7. Le programme est lui en annexe N°5.13.



**Figure 25 : Structogramme de la partie « Gestion mode »**



### e. Reset des variables globales

Lorsque la pompe est arrêtée et que l'utilisateur en a terminé avec son emploi, plusieurs variables doivent être remises à zéro. Exemple : les consignes des régulateurs et les consignes d'ouverture des vannes,....

La plupart des actions font office de sécurité afin de garantir une bonne mise en route lors d'une nouvelle utilisation. La partie du programme est en annexe N°5.14.

### f. Conversions des plages de sortie

Ce bloc concerne les commandes d'ouverture des vannes. Ces dernières sont branchées sur des sorties analogiques avec une plage de tension de commande 0 à 10[V]. Etant donné que l'ensemble du programme travaille avec des grandeurs physiques réelles, il est nécessaire de revenir à des grandeurs entières avant d'envoyer la commande en hardware.

Pour ce faire, un bloc d'annulation de mise à l'échelle est nécessaire. Ce dernier convertit les valeurs sauvegardées dans le bloc données « Sorties\_Analogiques ». Conversion d'une valeur 0...100[%] réelle en une grandeur 0...10[V] entière. La partie du programme est en annexe N°5.5.

### g. Blocs d'interruption

Ce bloc n'a pas besoin d'être appelé par le programme principal. Il est automatiquement exécuté chaque 100 [ms]. C'est dans ce bloc que se trouvent les différents régulateurs. On garantit de ce fait que ces derniers soient appelés à fréquence régulière. La partie du programme est en annexe N°5.2.

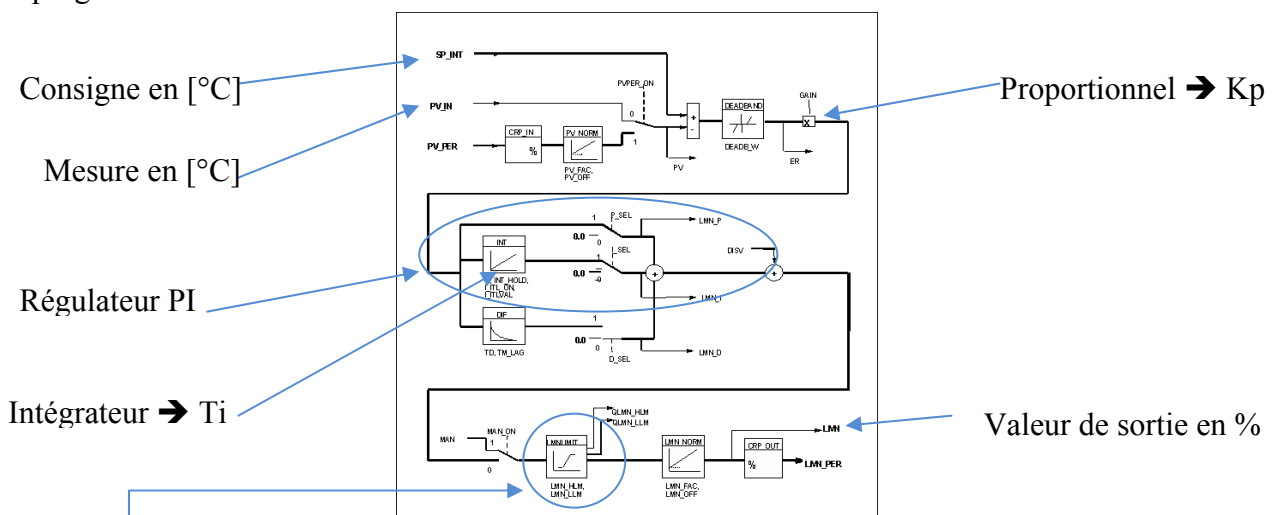


Figure 26 : Schéma fonctionnel d'un régulateur dans SIMATIC

La partie limitation de la sortie (donnée en [%]) permet de fixer les plages limites d'ouverture des vannes. Ces informations proviennent du rapport de 2006 du classeur en CE07, exemple :

- La vanne à eau est quasiment fermée si la consigne est plus petite que 40% : Consigne possible en sortie du régulateur entre 40 et 100[%]
- Vanne de détente : Consigne possible en sortie du régulateur entre 45 et 88 [%]
- Le débit d'air à l'évaporateur est à son maximum dès que la vitesse du ventilateur a atteint 50[%]. Régulateur de vitesse : consigne possible entre 35 et 50[%]

## 6.5. Programme d'interface utilisateur

En ce qui concerne l'interface homme-machine, c'est avec le programme Wincc que j'ai travaillé. Il doit me permettre de réaliser principalement la commande de la pompe à chaleur et une visualisation des mesures. En fonction de l'avancement du projet, une base de données et une gestion des utilisateurs ont été réalisées. Ce programme est un outil développé et fourni par SIEMENS. Ses possibilités sont très larges et je n'ai eu besoin finalement que d'employer une mince partie de ses atouts. Dans l'image ci-dessous, on visualise les déplacements possibles d'une vue à une autre (aussi en annexe N°6). Ces étapes sont nommées de *I* à *VIII*).

### 6.5.1. Structure de l'interface

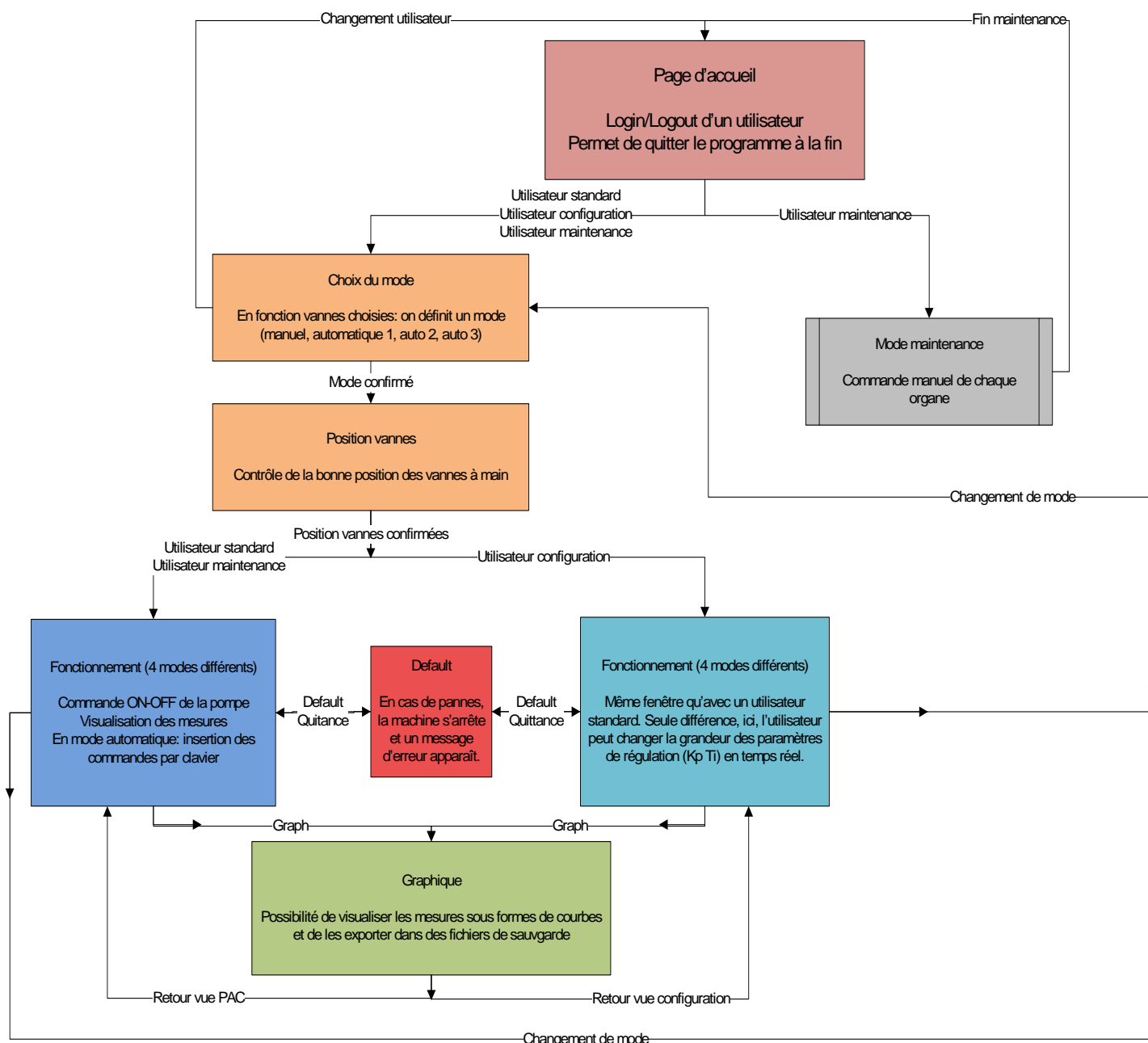
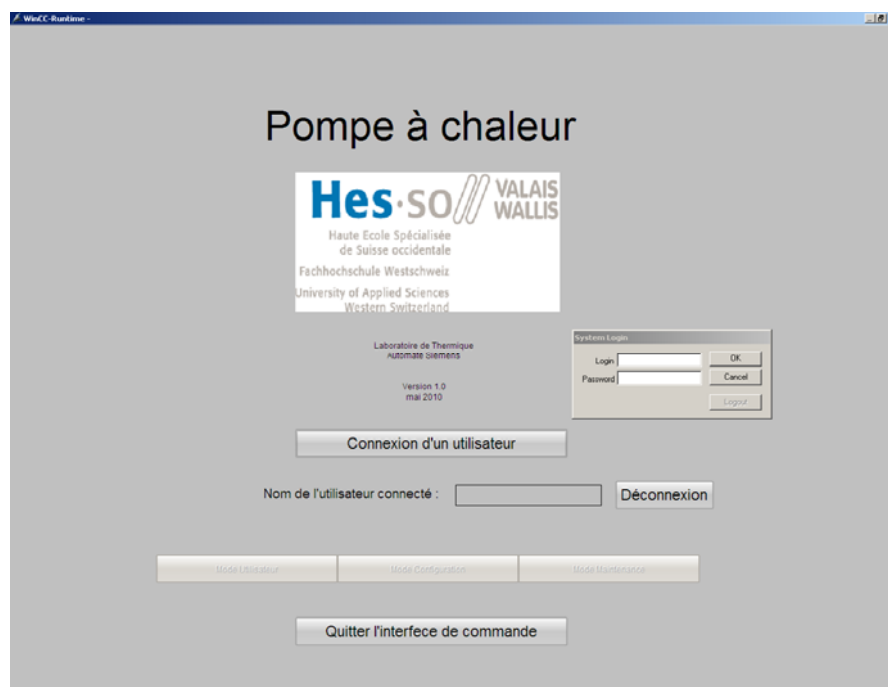


Figure 27 : Structure de l'interface

### 6.5.2. Les différentes vues de l'interface utilisateur

Chaque bloc visible dans le structogramme de la page précédente est détaillé ci-dessous. Les couleurs permettent de se repérer plus facilement dans le programme.

- *Vue : Entrée*



**Figure 28 : Vue d'entrée**

Lors du lancement du programme, l'utilisateur arrive sur cette fenêtre. A la fin de l'utilisation, il doit se retrouver sur cette même fenêtre pour pouvoir quitter le programme. Pour avancer dans le programme, l'utilisateur doit obligatoirement se connecter. Ce dernier doit être connu du programme. Cinq types d'utilisateur sont possibles, chacun avec des droits bien spécifiques et les modes auxquels il a accès peuvent être limités. Les boutons de « choix du mode » deviennent actifs selon les droits. Voici les possibilités :

Nom de l'utilisateur Connecté	Accès Mode Utilisateur	Accès Mode Configuration	Accès Mode Maintenance
Administrateur	X	X	X
Joris	X	X	X
Student	X		
Maintenance	X		X
Configuration		X	

Suite à un choix « Mode Utilisateur ou Mode Configuration » on passe à l'étape II). En cas de choix « Mode maintenance », l'utilisateur saute directement à l'étape VII).

- *Vue : Choix des modes*

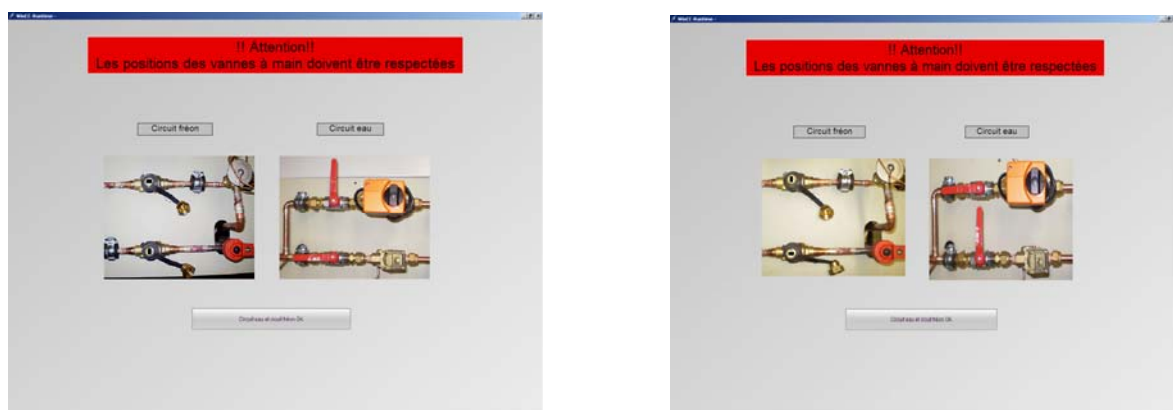


**Figure 29 : Vue choix des modes**

Cette vue permet à l'utilisateur de déterminer avec quels éléments il veut travailler. En cliquant sur le bouton "Pressostatique", il choisit de faire fonctionner l'installation par le biais de la vanne à eau pressostatique. Sa représentation s'affiche sous les boutons de sélection afin d'assurer l'utilisateur quant à son choix. Le principe est le même pour tous les boutons de sélection. Selon les vannes choisies, on sélectionne un des modes décrits dans la partie 6.3 du rapport.

Le bouton « Valider le mode choisi » permet, comme son nom l'indique, de valider le choix des éléments. Ceci active le mode correspondant dans le programme de l'automate et amène l'étape suivante *III*). Un retour à l'étape *I*) est aussi possible si l'on clique sur « Changement d'utilisateur ».

- *Vue : Contrôle position des vannes à main*



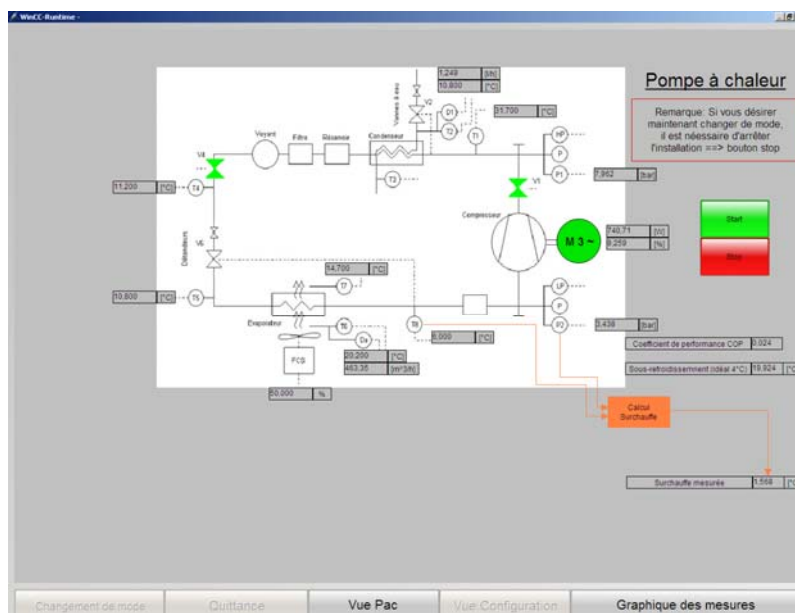
**Figure 30 : Vue contrôle position des vannes à main**

Cette page demande à l'utilisateur de vérifier la position des vannes à main sur l'installation. Il doit également valider son contrôle. Ici deux exemples différents : à gauche « mode manuel » et à droite « mode automatique N°3 »

Dès que le bouton a été actionné, la fenêtre de contrôle de l'installation apparaît : étape *IV*) ou étape *V*) selon l'utilisateur.

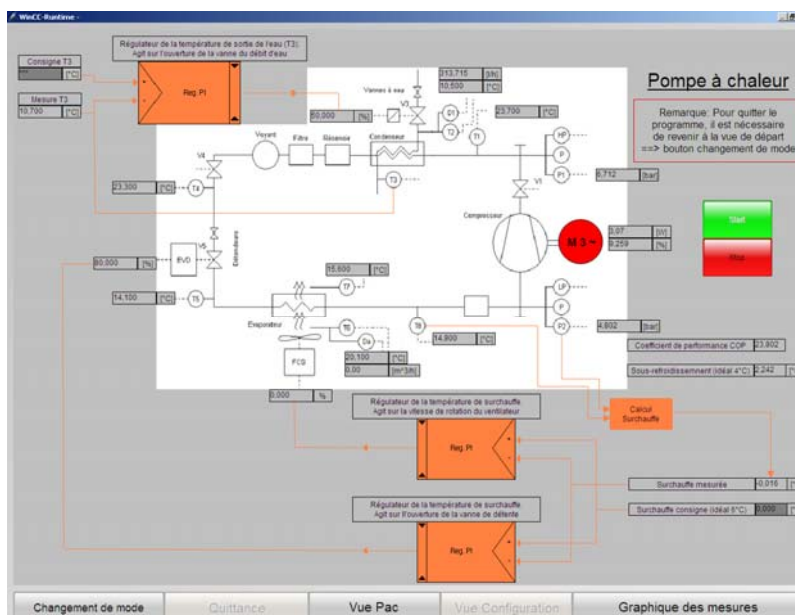
- *Vue : Générale de la PAC*

Voici deux exemples de la vue de base de la PAC dans deux modes possibles. Des explications précises sont données à la page suivante.



**Figure 31 : Vue générale de la PAC « mode manuel » OFF**

La première image a été prise quand on est en fonctionnement : les vannes (V1-V4) sont ouvertes et le compresseur en marche. Le bouton « Changement de mode » n'est plus actif car il faut obligatoirement avoir stoppé la pompe avant de pouvoir changer de mode.



**Figure 32 : Vue générale de la PAC « mode automatique N°3 » ON**

La deuxième image a été prise quand la pompe est à l'arrêt. Le compresseur ne fonctionne pas. Le bouton « Start » est inactif car les consignes des régulateurs n'ont pas encore été introduites.



- Selon le mode choisit à l'aide de l'étape II), le schéma bloc de la pompe à chaleur change. Ce dernier montre toujours le circuit suivi par l'eau et par le gaz (par exemple pour l'eau : vanne autorégulée V3 ou vanne régulée par le logiciel V2). Cette différence est visible si l'on compare les deux images.
- Il en va de même pour les boucles de régulation qui apparaissent uniquement lorsqu'elles sont activées. Si elles sont présentes, des consignes de températures servant à déterminer le point de fonctionnement sont demandées. Ces consignes sont limitées dans des plages de températures prédéfinies.
  - Exemple pour la température de l'eau : consignes permises entre 20 et 40 [°C]. Cela évite des pressions trop hautes ou trop basses et garantit le bon fonctionnement de la pompe
  - Exemple pour la température de surchauffe : consignes permises entre 0 et 10 [°C]. La température idéale étant de 6[°C], cela permet d'avoir un choix possible au-dessus ou au-dessous pour effectuer des essais.
- La gestion même de la pompe est relativement simple. Les deux boutons start/stop permettent la commande de la pompe. On retrouve sur cette vue tous les points de mesures et informations utiles lors du fonctionnement. Les boutons du fond de la page permettent de passer d'une vue à l'autre. Exemple : « Graphique des mesures » (aller à l'étape VI)) ou « Changement de mode » (retour à l'étape II)).
- *Vue : Configuration de la pac*

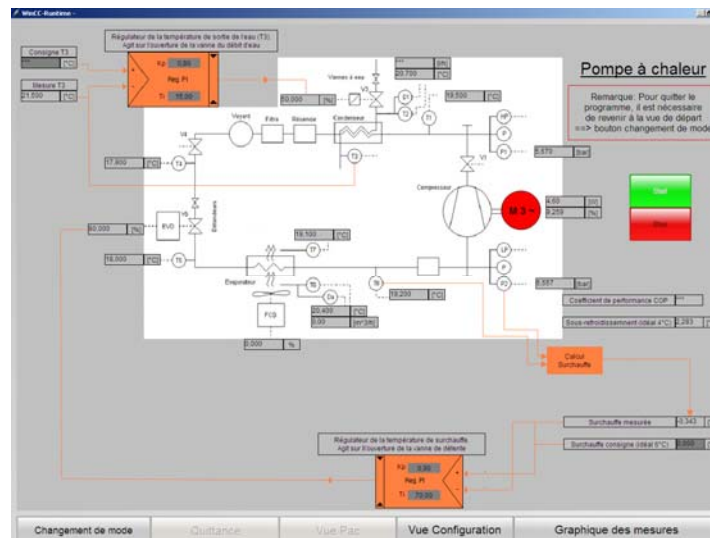


Figure 33 : Vue configuration de la PAC

Cette vue est à la base identique à la précédente. Les possibilités de ce mode ont déjà été décrites dans la partie 6.4.2. Bref rappel :

Elle n'est accessible que par les utilisateurs ayant des droits spécifiques. La grande différence avec la vue « PAC » basique apparaît lors de l'emploi des différents modes automatiques. Quand les régulateurs sont actifs, les paramètres ( $K_p$  et  $T_i$ ) de ces derniers peuvent être modifiés, ce qui n'était pas possible lors de l'utilisation standard étape IV).

- *Vue : Graphique*

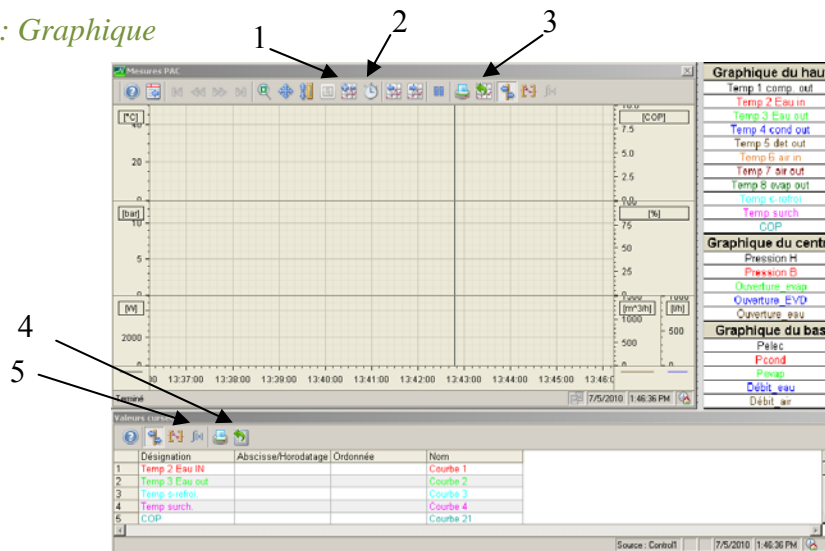


Figure 34 : Vue Graphique

Dans cette vue, on peut visualiser toutes les mesures sous forme graphique.

Par le bouton N°1, on sélectionne les courbes que l'on veut afficher. Le tableau de droite permet de savoir dans quel graphique la courbe sélectionnée est affichée.

La base de temps est fixée à 10min. Elle peut être changée avec le bouton N°2. Les mesures proviennent de la base de données. Il est donc aussi possible d'afficher des courbes d'une journée précédente en changeant toujours la base de temps avec le même bouton. De plus, les données sont exportables dans des fichiers Excel (N°3).

Sur la partie du bas, on retrouve les valeurs (en X et en Y) du curseur ou des curseurs positionnés sur le graphique. Le bouton N°5 « Statistiques » permet d'obtenir des informations comme la valeur maximale, minimale et moyenne de chaque courbe affichée. Là aussi, les données sont exportables avec le bouton N°4.

- *Vue : Maintenance de la PAC*

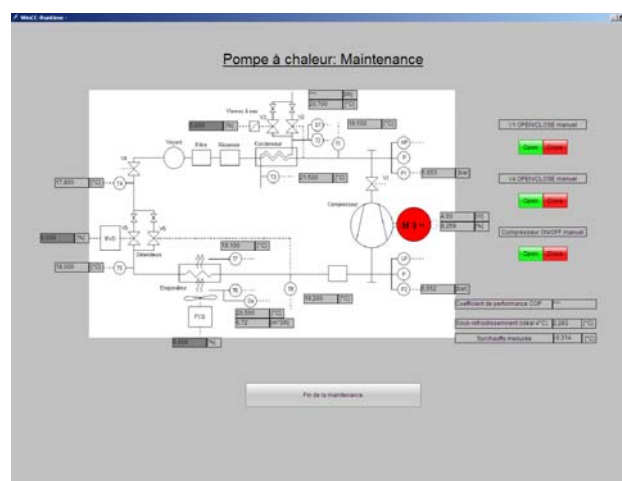


Figure 35 : Vue maintenance de la PAC

Cette vue n'est accessible que par les utilisateurs ayant des droits spécifiques. Les possibilités de ce mode ont déjà été décrites dans la partie 6.4.2. Bref rappel : ce mode permet de commander individuellement chaque organe : vanne magnétique, compresseur, ...

- *Vue : Default*



Figure 36 : Vue « Default »

Lors du fonctionnement de la pompe, si un défaut de fonctionnement est détecté, cette vue vient en premier plan. La pompe est arrêtée. Suite à cette action, l'utilisateur est obligé de quitter le problème. Il revient alors à la vue *IV*) ou *V*) selon ses droits.

#### **6.5.3. L'aide à la programmation**

Une aide à la programmation de chaque vue est disponible en N°7. Elle donne quelques astuces sur la stratégie de programmation employée. Ce sont principalement des informations inutiles à un utilisateur standard de la pompe mais nécessaires pour une personne qualifiée qui doit modifier certains paramètres de l'interface utilisateur.

En général, ces informations concernent les images superposées affichées à tour de rôle, les scripts C, les autorisations de conduite, les changements de vue, les appels de vue, le système de la base de données, ...

On retrouve aussi dans ce document les codes nécessaires aux différents « login » des utilisateurs lors du lancement du programme.

#### **6.5.4. Mode d'emploi**

La gestion de la pompe à chaleur existante a considérablement changé : plus de pile à combustible, commande uniquement par l'interface Wincc,... Pour cette raison, le mode d'emploi a été modifié et mise à jour. Il se trouve en annexe N°8.

## 7. Mesures

Ce chapitre met en valeur le fonctionnement de la pompe à chaleur. Les quatre modes (manuel et automatique 1, 2, 3) ont été testés et approuvés par des mesures.

Dans chaque mesure, une image de l'écran est fournie. Un tableau des valeurs exportées depuis le programme d'interface permet de tirer des informations chiffrées des images. Les valeurs en « gras » dans les tableaux sont les valeurs les plus importantes. Les explications sont surtout basées sur la température T3 de sortie d'eau et sur la température de surchauffe. Les études concernant les puissances ou encore le coefficient de performances (COP) sont présentes dans la partie « 8.4 Discussion des résultats sur les mesures ».

### 7.1. Mesure mode manuel

*Vanne à eau pressostatique, vanne au détendeur thermostatique et vitesse du ventilateur fixe*



Figure 37 : Mesure mode manuel

Nom	Unité	Min	Max	Moyenne
Temp 2 Eau IN	[°C]	11.5	11.8	<b>11.6</b>
Temp 3 Eau out	[°C]	23.5	24	<b>23.8</b>
Temp 8 evap out	[°C]	2.6	7.3	<b>5.1</b>
Temp s-refroi.	[°C]	11	11.9	11.4
Temp surch.	[°C]	1.3	6.8	<b>4.2</b>
COP	-	6.08	6.37	<b>6.23</b>
Pression H	[bar]	7.55	7.7	<b>7.62</b>
Pression B	[bar]	2.99	3.13	3.06
Ouverture evap	[%]	50	50	50
Pelec	[W]	708.5	719.2	<b>714</b>
Pcond	[W]	4357.8	4552.3	4447
Pevap	[W]	2923	3118.3	3013.7
Débit Eau	[l/h]	309.5	320.8	315.2
Débit air	[m <sup>3</sup> /s]	973.7	1014	993.8

Tableau 2 : Mesures mode manuel

Dans ce mode, la pompe à chaleur s'autorégule. Lors du premier enclenchement, il faut déjà 4 à 5 min pour que les conduites se mettent à la température du fluide qui les traverse. On peut le voir avec la mesure de la température d'entrée d'eau. L'eau arrive réellement dès le début à 11.6 [°C], mais c'est seulement après un certain temps que la mesure est vraiment correcte. L'étude du mode automatique peut être faite après cette période. Il en va de même pour la mesure du débit d'air qui prend un certain temps avant d'être stable malgré que la consigne du ventilateur soit fixe depuis le début.

**Les enseignements :**

- On constate que le débit d'eau se stabilise finalement à 315[l/h]. Ce débit dépend de l'ouverture de la vanne pressostatique qui varie en fonction de la valeur de la pression haute (courbe noire du graphique du milieu). Au départ, la pression est élevée, la vanne s'ouvre et le débit d'eau est important. Au fur et à mesure que la pression diminue, la vanne se ferme et le débit se stabilise. La pression est à la fin à 7.6 [bar]. On peut estimer que cette valeur est le point de fonctionnement de notre vanne pressostatique. La température de sortie de l'eau est de 24 [°C]. Ces deux valeurs varient toujours en parallèle. Comme expliqué déjà plus haut, la pression règle le débit d'eau et la température de sortie dépend directement du débit d'eau. Il est donc normal que les deux mesures varient en parallèle.
- En ce qui concerne la vanne thermostatique, elle se règle par rapport à T8. Comme expliqué précédemment, on peut voir que la température T8 équivaut à peu de chose près à la température de surchauffe qui servira de référence de régulation dans les modes suivants. On constate ensuite que cette vanne n'arrive pas à réguler la température de surchauffe, elle oscille continuellement entre 1 et 7 [°C]. Il sera intéressant de voir dans les autres modes comment la régulation se fera avec une vanne pilotée.

## **7.2. Mesure modes automatiques**

Pour les modes travaillant avec régulation, chaque mesure a été prise après stabilisation de la température à hauteur de la consigne. Les valeurs présentes dans les tableaux suivants sont donc toujours des mesures de la partie stabilisée. Elles correspondent toujours aux mesures faites entre deux curseurs. Selon les essais, il peut y avoir deux à trois paires de curseurs par image.

Au départ, les paramètres des régulateurs ont été fixés comme ceux de l'automate Wago. Etant donné que le temps de cycle d'appel des régulateurs est différent entre les deux automates, il était prévu que la régulation ne soit pas très bonne.

Lors des premiers tests, les résultats n'étaient, il est vrai, pas très concluants. Les mesures oscillaient constamment autour des points de consigne et ceci à n'importe quelle température de travail.

L'amélioration des paramètres des différents régulateurs s'est faite étape par étape. D'abord le mode 1 qui a permis d'ajuster et de valider le régulateur présent sur la vanne à eau. Ensuite naturellement le mode 2 et finalement le mode 3.

Au fur et à mesure des tests, le gain Kp ou la constante de temps Ti étaient modifiés. Les valeurs optimales ont été trouvées par tâtonnement.

Dans les prochaines pages, seules les mesures optimales sont rapportées. Voici les valeurs finales pour mes régulateurs :

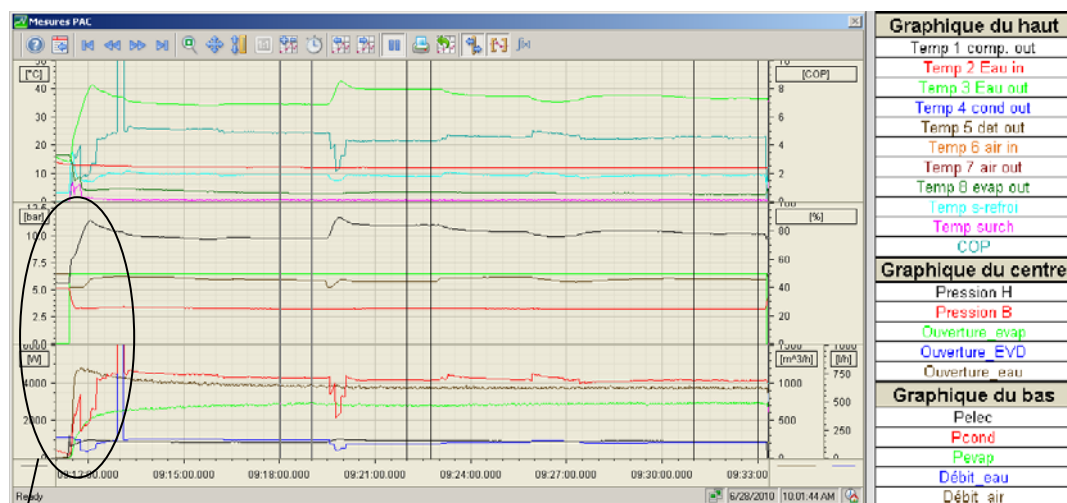
Régulateur	Kp	Ti
Vanne à eau	0.8	30 [sec]
Vannes détendeur	0.9	70 [sec]
Vitesse ventilateur	0.8	40 [sec]

**Tableau 3 : Valeurs des paramètres des régulateurs**

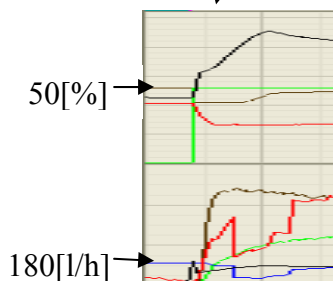
Afin de prouver le fonctionnement de ma commande, plusieurs consignes ont été testées. Pour la température de l'eau, entre 35 et 40 [°C] avec augmentation suivie de diminution pour voir si des différences apparaissaient. Pour la surchauffe, le point de fonctionnement idéal étant de 6°C, le régulateur devra être optimal pour cette valeur. D'autres consignes seront données afin de visualiser si les régulateurs fonctionnent bien.

### 7.2.1. Mesure mode automatique 1

*Vanne à eau pilotée, vanne au détendeur thermostatique et vitesse du ventilateur fixe*



**Figure 38 : Mesure mode automatique N°1**



**Figure 39 : zoom de la figure 39**

#### **Remarque :**

On constate que le pré réglage de l'eau fonctionne : la consigne se situe à 50[%]. Le débit est alors déjà établi avant l'enclenchement de la pompe, il est d'environ 180[l/h] ce qui est supérieur à la sécurité qui est de 140[l/h].



Name	Unité	Consigne T3 = 35 [°C]			Consigne T3 = 40 [°C]			Consigne T3 = 37 [°C]		
		Min	Max	Moyenne	Min	Max	Moyenne	Min	Max	Moyenne
Temp 2 Eau IN	[°C]	12.1	12.2	<b>12.2</b>	12	12.1	<b>12</b>	11.9	12	<b>12</b>
Temp 3 Eau out	[°C]	34.5	34.6	<b>34.6</b>	39.8	39.9	<b>39.8</b>	36.6	36.8	<b>36.7</b>
Temp 8 evap out	[°C]	2.6	3	2.8	3.2	3.3	3.2	2.3	2.6	2.5
Temp s-refroi.	[°C]	9.4	9.7	9.5	8.8	9	8.9	9.1	9.6	9.4
Temp surch.	[°C]	0.3	0.6	0.5	0.3	0.5	0.4	0.4	0.7	0.5
COP	-	4.87	4.92	4.9	4.3	4.35	4.32	4.49	4.62	4.57
Pression H	[bar]	9.72	9.75	<b>9.73</b>	10.93	10.95	<b>10.94</b>	10.13	10.2	<b>10.17</b>
Pression B	[bar]	3.19	3.23	3.21	3.26	3.27	3.26	3.16	3.19	3.17
Ouverture evap	[%]	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Ouverture eau	[%]	45	45.4	45.2	44.3	44.3	44.3	45.7	46.3	46
Pelec	[W]	868	872.6	870.1	956.9	961.5	959.6	898.7	904.8	902.5
Pcond	[W]	4243.9	4280.3	4263.9	4127.2	4165.9	4149.8	4058.2	4166.2	4119.9
Pevap	[W]	2812.7	2973.8	2879.3	2741.5	2862.5	2804	2855.8	3011.6	2937.1
Débit Eau	[l/h]	163.2	164	163.6	127.6	128.5	128.1	141.8	145	143.5
Débit air	[m <sup>3</sup> /s]	940.1	987.1	956.5	913.3	953.6	935	913.3	953.6	932.6

Tableau 4 : Mesures mode automatique N°1

Durant cet essai, trois consignes différentes ont été fixées. Avant chaque changement, j'attendais que le système soit stabilisé pour en tirer les points de fonctionnement respectifs. Le moment où les consignes changent sont facilement visibles sur l'image.

### Remarque :

Après deux minutes, une erreur d'acquisition s'est produite. Pendant 10sec, la mesure du débit a été faussée et donc les calculs qui s'en suivaient aussi. Néanmoins cette mesure n'influence en rien la régulation. Cette erreur venait de la conversion de la plage d'entrée sur le capteur de débit. Présente dans la partie programme SIMATIC, elle a été corrigée par la suite. Elle ne s'est plus reproduite depuis.

### Les enseignements :

La régulation se fait sur la courbe verte du premier tableau (T3 température de sortie de l'eau). On voit clairement que la régulation joue son rôle.

Comme attendu, la pression haute varie bel et bien en fonction des variations de T3.

En regardant la ligne du tableau « Ouverture\_eau » qui est la consigne sur la vanne en pour cent, on peut voir que la régulation est très fine. On se situe presque à la même valeur après stabilisation quelle que soit la consigne. Il en va de même naturellement pour la courbe bleue qui correspond au débit d'eau. Elle est quasiment stable (dernière courbe du graphique).

On constate par contre que la surchauffe ne varie pas. La vanne thermostatique n'arrive pas à influencer une montée de la température à la valeur idéale (6 [°C]). Ce sera à corriger avec la régulation de la surchauffe dans les prochains modes.

Les trois placements de curseurs sur l'image correspondent aux valeurs du tableau :

- Au démarrage : consigne de 35[°C] et système stable après 8 minutes. Il est normal que le système soit plus lent que lors des autres changements de consigne. Cela est dû au temps de mise en route.

- La régulation provoque un seul dépassement de consigne (+6 [°C] au départ) puis une stabilisation à 34.6 [°C]. A long terme, la mesure continue de s'approcher de la consigne
- Consigne 40 [°C] : Au changement de consigne, on retrouve de nouveau un dépassement. Le système se stabilise en 3min à une valeur de 39.8 [°C].
- Consigne 37 [°C] : Suite au changement de consigne, la température s'est stabilisée à 37.2 [°C] en 3 min. L'augmentation du débit a joué son rôle. Le régulateur continue néanmoins d'intégrer pour essayer de corriger l'erreur. La commande en pour cent d'ouverture de la vanne augmente donc encore malgré qu'on soit proche de la consigne.

La vanne à eau « Belimo » V3 est commandée par un système « pas à pas ». De ce fait, il faut que la commande change de plusieurs dixièmes de pour cent pour qu'une nouvelle ouverture de la vanne se produise. Une nouvelle augmentation supplémentaire du débit provoque alors une trop forte diminution de la température (environ jusqu'à 35 [°C]). Ensuite, l'erreur est inverse, la vanne se referme et la température finale se stabilise à 36.7 [°C]. Le même risque survient alors de nouveau à ce moment-là. Une nouvelle fermeture de la vanne provoquerait une forte augmentation de la température.

Pour cette raison, une bande morte a été rajoutée sur le régulateur d'eau afin d'éviter cette erreur. Lorsque l'erreur ne dépasse les  $\pm 0.2$  [°C] par rapport à la consigne, le régulateur ne travaille plus et laisse l'ouverture de la vanne constante. Cette valeur a été trouvée expérimentalement. Ce changement nous oblige par contre à accepter une erreur de  $\pm 0.2$  [°C] sur la mesure. Ce qui est tout à fait acceptable dans le domaine du fonctionnement d'une pompe à chaleur. Pour la suite des mesures, cette correction devrait amener plus de stabilité.

### 7.2.2. Mesure mode automatique 2 avec surchauffe à 6[°C]

*Vanne à eau pilotée, vanne pilotée au détendeur et vitesse du ventilateur fixe*

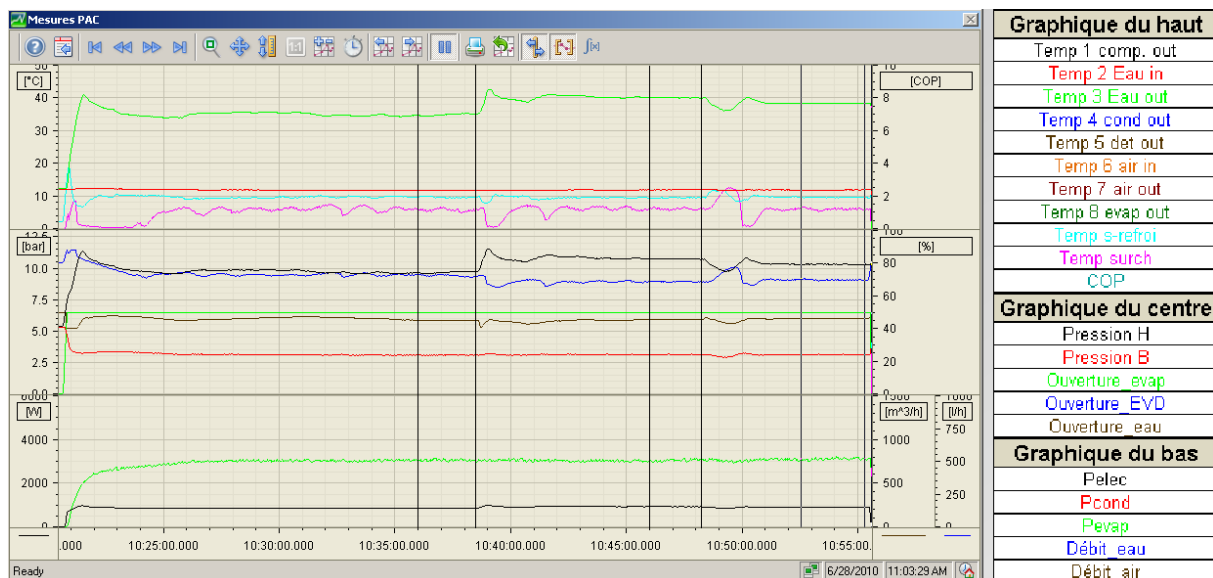


Figure 40 : Mesure mode automatique N°2

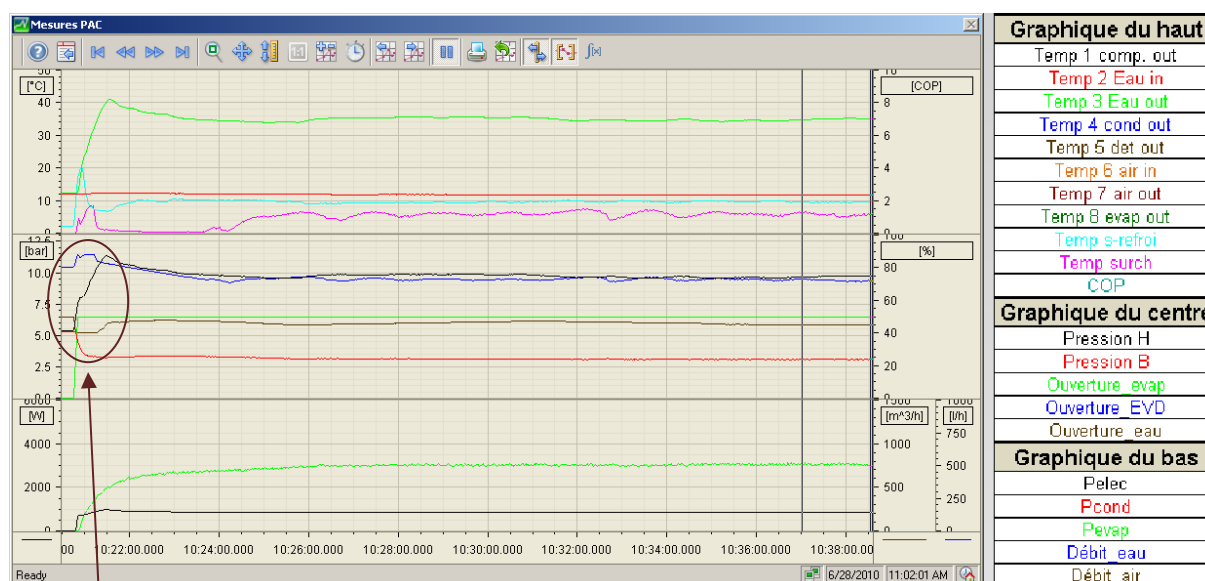


Figure 41 : Mesure mode automatique N°2 (zoom sur le départ)

**Remarque :**

Comme avec le débit d'eau de la mesure précédente, on peut voir ici le préréglage de l'ouverture de la vanne détenteur à 80[%] et de la vanne à eau à 50[%].

Nom	Unité	Consigne T3 35[°C]			Consigne T3 40[°C]			Consigne T3 38[°C]		
		Min	Max	Moyenne	Min	Max	Moyenne	Min	Max	Moyenne
Temp 1 comp. out	[°C]	11.7	11.7	<b>11.7</b>	11.8	11.9	<b>11.9</b>	11.8	12	<b>11.8</b>
Temp 2 Eau IN	[°C]	34.7	35.2	<b>35</b>	39.5	40.2	<b>40.1</b>	38.3	38.3	<b>38.3</b>
Temp 3 Eau out	[°C]	9.3	9.7	9.5	9.2	9.7	9.4	9.4	9.7	9.5
Temp 4 cond out	[°C]	4.9	6.5	<b>5.6</b>	5.5	6.5	<b>6</b>	5.1	6.4	<b>5.9</b>
COP	-	4.8	4.86	4.83	4.34	4.48	4.41	4.55	4.6	4.57
Pression H	[bar]	9.65	9.75	9.7	10.55	10.77	10.73	10.29	10.34	10.31
Pression B	[bar]	3.06	3.14	3.09	3.09	3.16	3.13	3.09	3.16	3.12
Ouverture_evap	[%]	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Ouverture_EVD	[%]	71.5	73.1	<b>72.2</b>	68.2	69.1	<b>68.7</b>	69.1	70.2	<b>69.7</b>
Ouverture_eau	[%]	44.8	44.8	44.8	45.2	46.8	45.3	46	46.3	46.2
Pelec	[W]	841.9	849.6	846.2	906.3	921.7	918.4	895.6	901.7	898.8
Pcond	[W]	4050.2	4110.2	4088.4	3985.8	4097.7	4047.3	4101.5	4120.1	4111.5
Pevap	[W]	2970	3152.9	3047.8	2948.2	3138.4	3044.1	3027.1	3205.2	3110.8
Débit_Eau	[l/h]	149.7	151.5	<b>150.6</b>	121.9	125.3	<b>123.4</b>	133.3	133.6	<b>133.5</b>
Débit_air	[m³/s]	913.3	953.6	<b>934.5</b>	906.5	953.6	<b>928.1</b>	913.3	953.6	<b>933.5</b>

Tableau 5 : Mesures mode automatique N°2

Dans ce mode, le régulateur de la température de surchauffe a été rajouté. Il agit sur l'ouverture de la vanne « Carel » V5. La figure 42 est un zoom sur le premier tiers de droite de la figure 43. Ce zoom permet de mieux visualiser comment se passe la régulation au démarrage.

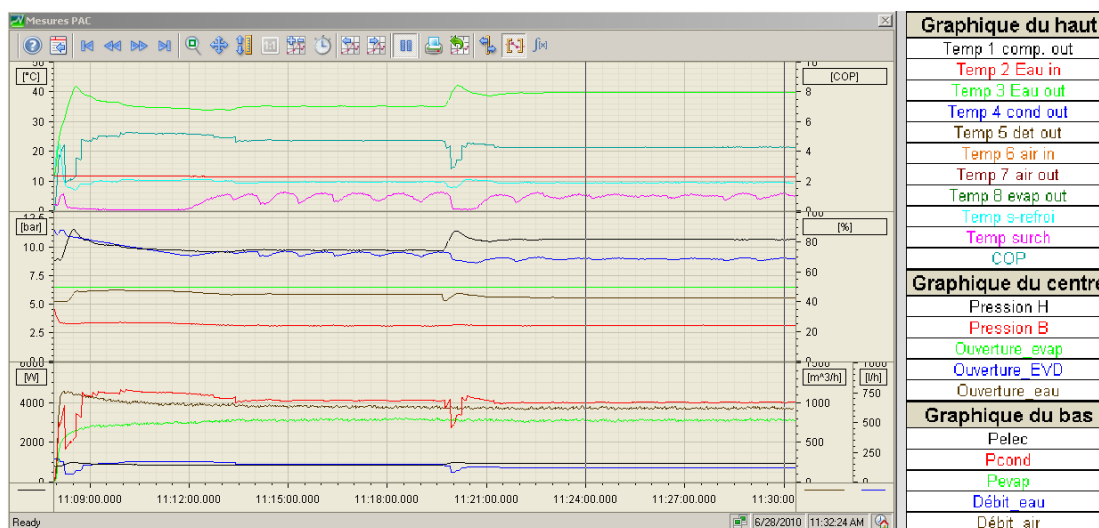
Les tests sont refaits avec les mêmes changements de consigne qu'auparavant.

### Les enseignements :

- Sur la courbe bleue de la fenêtre du centre, on peut voir l'évolution de la consigne d'ouverture de la vanne. Tant que la surchauffe n'augmente pas, elle se ferme afin de diminuer le débit de gaz dans l'évaporateur. De ce fait, le gaz traverse ce dernier plus lentement et petit à petit se réchauffe. On voit qu'il faut environ 3-4 min pour qu'une réaction se passe. Il est important que la régulation de la température de surchauffe commence après celle de l'eau. Pour un bon fonctionnement, il faut que T3 soit quasiment stable lorsque la température de surchauffe commence à se réguler. Ensuite, la régulation se passe normalement.
- Sur la température de l'eau, la régulation est toujours très bonne et la stabilité est assurée. L'erreur ne dépasse jamais  $\pm 0.5$  [°C].
- La régulation de la température de surchauffe est, elle, plus compliquée. La mesure a de la peine à rester stable. Elle oscille toujours un peu. Sa valeur moyenne après un certain temps est correcte, par contre on ne peut garantir mieux que  $\pm 1$  [°C] de précision pour des températures proches de 35[°C]. Avec une augmentation de la consigne, le delta se réduit à  $\pm 0.5$  [°C].
- La vanne de détente réagit directement à la moindre variation de la consigne. C'est pour cette raison que le point de fonctionnement stable est difficile à garantir, contrairement à la vanne à eau qui varie par succession de pas. Lorsqu'on est proche de la consigne, de faibles variations sur la sortie du régulateur n'influencent pas le débit.

### **7.2.3. Mesure mode automatique 2 avec surchauffe à 5 [°C]**

*Vanne à eau pilotée, vanne pilotée au détendeur et vitesse du ventilateur fixe*



**Figure 42 : Mesure mode automatique N°2**

Nom	Unité	Consigne T3 35[°C]			Consigne T3 40[°C]		
		Min	Max	Moyen- ne	Min	Max	Moyen- ne
Temp 1 comp. out	[°C]	11.3	11.4	11.4	11.3	11.4	11.4
Temp 2 Eau IN	[°C]	35	35.2	35.1	39.7	39.9	39.8
Ouverture_EVD	[%]	70.3	73.6	72.4	67.5	69.5	68.7
Débit_Eau	[l/h]	148.4	149.3	148.8	120.9	121.6	121.3
Débit_air	[m <sup>3</sup> /s]	920	967	942.9	906.5	953.6	928.1

Tableau 6 : Mesures mode automatique N°2

Dans cette mesure, on voit que la température de surchauffe est un point de fonctionnement très sensible de la pompe à chaleur. La température de l'eau est très stable et très proche de la consigne.

La première partie de l'image travaille avec un point de fonctionnement de 35 [°C] pour une température de surchauffe de 5 [°C]. On constate que la régulation ne fonctionne pas sur la surchauffe. Pour une faible erreur de mesure, le régulateur corrige directement l'ouverture de la vanne ( $\Delta$  3.3% sur l'ouverture). L'oscillation reste toujours présente. En comparaison avec la surchauffe à 6 [°C] de la mesure de la partie 7.2.2, le delta d'ouverture se situait à 1.6%.

Sur la partie de droite de l'image, pour un deuxième point de fonctionnement, la pompe travaille à température stabilisée. La température T3 atteint 40 [°C] précisément et rapidement. La température de surchauffe se stabilise aussi. On ne constate plus les grosses oscillations de la première partie. Le delta d'ouverture de la vanne de détente est de 2% cette fois.

#### 7.2.4. Mesure mode automatique 3 avec surchauffe à 6 [°C]

*Vanne à eau pilotée, vanne pilotée au détendeur et vitesse du ventilateur régulée*

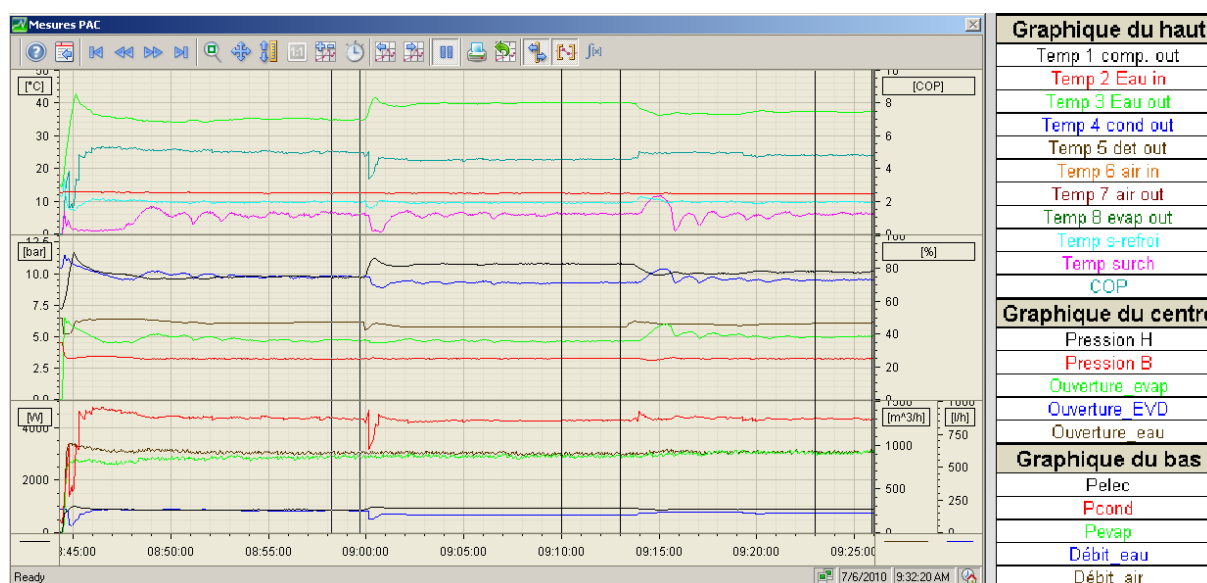


Figure 43 : Mesure mode automatique N°3

Nom	Unité	Consigne T3 35 [°C]			Consigne T3 40 [°C]			Consigne T3 37 [°C]		
		Min	Max	Moyenne	Min	Max	Moyenne	Min	Max	Moyenne
Temp 2 Eau IN	[°C]	12.4	12.6	<b>12.6</b>	12.4	12.5	<b>12.4</b>	12.2	12.3	<b>12.3</b>
Temp 3 Eau out	[°C]	34.8	34.9	<b>34.8</b>	39.9	40.2	<b>40.1</b>	37.1	37.5	<b>37.3</b>
Temp s-refroi.	[°C]	9.6	10	9.8	9.2	9.7	9.5	9.5	9.9	9.7
Temp surch.	[°C]	5.5	6.6	<b>6.1</b>	5.7	6.4	<b>6.1</b>	5.6	6.5	<b>6.1</b>
COP	-	4.95	5.07	5	4.51	4.59	4.56	4.76	4.87	4.81
Pression H	[bar]	9.68	9.72	9.7	10.74	10.81	10.77	10.06	10.2	10.13
Pression B	[bar]	3.19	3.24	3.21	3.23	3.3	3.26	3.21	3.29	3.25
Ouverture_evap	[%]	35.9	36.7	<b>36.3</b>	35.3	36	<b>35.7</b>	37.7	38.8	<b>38.3</b>
Ouverture_EVD	[%]	74.7	75.6	<b>75.2</b>	71	71.7	<b>71.3</b>	72.5	73.5	<b>73</b>
Ouverture_eau	[%]	47.1	47.1	<b>47.1</b>	44.2	44.2	<b>44.2</b>	46.5	47.1	<b>46.8</b>
Pelec	[W]	866.5	872.6	869.1	933.9	941.6	938.7	895.6	906.3	901
Pcond	[W]	4309.2	4395.9	4343	4255	4301.2	4278.3	4295.8	4366.9	4333
Pevap	[W]	2813.8	2977.1	2890.1	2827.2	2976.5	2891.8	2954.5	3123.1	3026
Débit_Eau	[l/h]	166.8	168.7	<b>167.8</b>	131.5	133.3	<b>132.8</b>	147.1	150.8	<b>148.8</b>
Débit_air	[m <sup>3</sup> /s]	893.1	933.4	<b>912.6</b>	879.7	920	<b>898.1</b>	899.8	946.8	<b>917.4</b>

Tableau 7 : Mesures mode automatique N°3

Dans ce mode, un régulateur sur la vitesse du ventilateur a été rajouté. Il est sensé aider la régulation de la température de surchauffe. Le système fonctionne comme attendu.

### Les enseignements :

- La régulation de la température de sortie de l'eau est toujours très bonne. Sur les trois points de fonctionnement, le plus grand décalage avec la consigne est de 0.5 [°C]. La valeur moyenne se situe à 0.3 [°C].
- La température de surchauffe arrive à se stabiliser elle aussi avec une oscillation de  $\pm 0.6$  [°C] au maximum.
- L'ajout d'un régulateur sur la vitesse du ventilateur n'amène par grand chose à la stabilisation du système. La diminution de sa vitesse provoque une réduction du débit d'air de 20 à 30 [m<sup>3</sup>/s]. De cette manière, on diminue aussi la puissance consommée à l'évaporateur. Cette opération est donc naturellement bénéfique.



### 7.2.5. Mesure mode automatique 3 avec surchauffe à 5 [°C]

*Vanne à eau pilotée, vanne pilotée au détendeur et vitesse du ventilateur fixe*

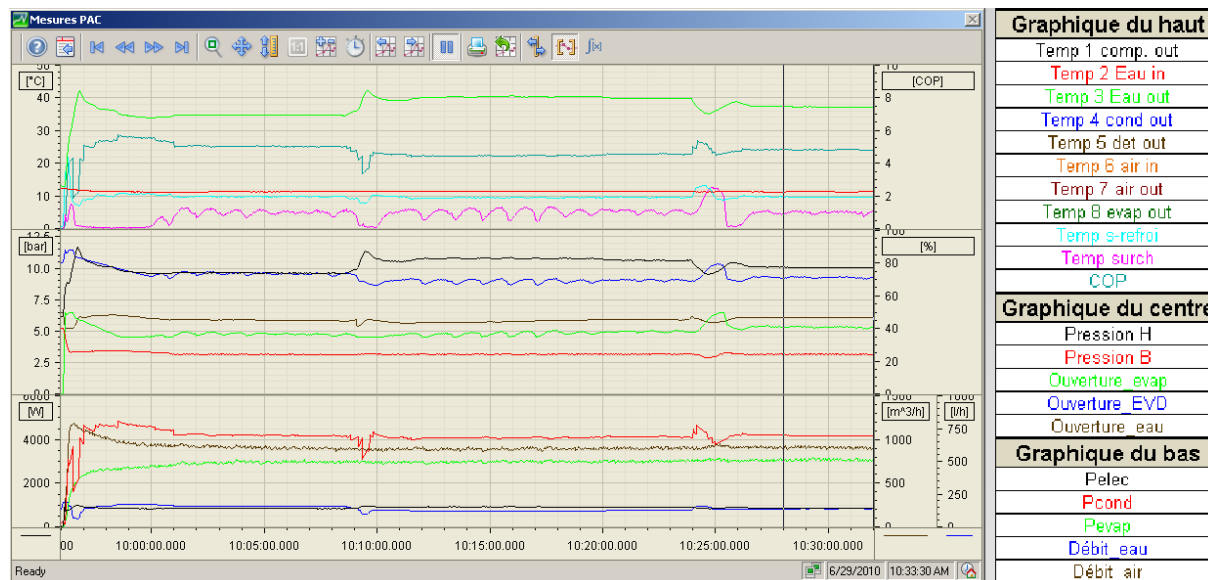


Figure 44 : Mesure mode automatique N°3

Nom	Unité	Consigne T3 35 [°C]			Consigne T3 40 [°C]			Consigne T3 37 [°C]		
		Min	Max	Moyenne	Min	Max	Moyenne	Min	Max	Moyenne
Temp 2 Eau IN	[°C]	11.2	11.4	<b>11.3</b>	11.3	11.3	<b>11.3</b>	11.2	11.3	<b>11.3</b>
Temp 3 Eau out	[°C]	34.6	34.8	<b>34.7</b>	39.7	40.4	<b>39.9</b>	37.2	37.4	<b>37.2</b>
Temp s-refroi.	[°C]	9.7	9.9	9.8	9.4	9.7	9.6	9.5	9.7	9.6
Temp surch.	[°C]	4.3	5.6	<b>4.9</b>	4	5.9	<b>5.2</b>	3.7	5.4	<b>4.9</b>
COP	-	4.98	5.07	5.02	4.52	4.6	4.56	4.79	4.85	4.82
Pression H	[bar]	9.59	9.65	9.61	10.57	10.7	10.63	10.03	10.11	10.06
Pression B	[bar]	3.09	3.17	3.13	3.13	3.2	3.16	3.1	3.18	3.15
Ouverture evap	[%]	36	36.9	<b>36.5</b>	37.2	38.7	<b>38.1</b>	39.6	41.4	<b>40.8</b>
Ouverture EVD	[%]	72.9	74	<b>73.5</b>	68.5	70.2	<b>69.6</b>	70	71.7	<b>71.2</b>
Ouverture eau	[%]	44.7	45.1	<b>44.8</b>	45.2	45.5	<b>45.3</b>	46.8	46.9	<b>46.9</b>
Pelec	[W]	825.1	835.8	833.7	901.7	910.9	906.2	861.9	869.5	865.2
Pcond	[W]	4158.4	4227.2	4181.3	4091.3	4165.3	4129.7	4141.9	4205.7	4168.9
Pevap	[W]	2904.5	3078.1	2964.8	2893.6	3078.1	2981.9	2965.8	3158.6	3056.5
Débit Eau	[l/h]	153.4	154	<b>153.8</b>	122.7	124.8	<b>124.3</b>	137.4	138.4	<b>138.1</b>
Débit air	[m³/s]	886.4	920	<b>899.3</b>	873	920	<b>896</b>	879.7	926.7	<b>904.4</b>

Tableau 8 : Mesures mode automatique N°3

### Les enseignements :

- Comme lors des essais avec un seul régulateur sur la température de surchauffe (partie 7.2.3), la régulation à une température de 5 [°C] est moins bonne qu'à 6 [°C]. Sur l'image, on constate des oscillations plus élevées en amplitude et en nombre.
- Après un certain temps, le système semble néanmoins se stabiliser. Avec un delta de  $\pm 0.5$  [°C] par rapport à la consigne.
- La régulation de la température de l'eau fonctionne, elle, toujours très bien.

#### 7.2.6. Mesure longue durée

Une mesure sur une durée plus longue a été réalisée afin de prouver que la stabilité est permanente. Une comparaison sera faite entre les modes automatiques N°2 et N°3. Un démarrage de la pompe avec une consigne de 40 [°C] et surchauffe à 6 [°C] a été testé. Après 25min, la température de consigne de l'eau a été baissée à 35 [°C]. Elle a été maintenue à nouveau durant 25min. Voici les résultats :

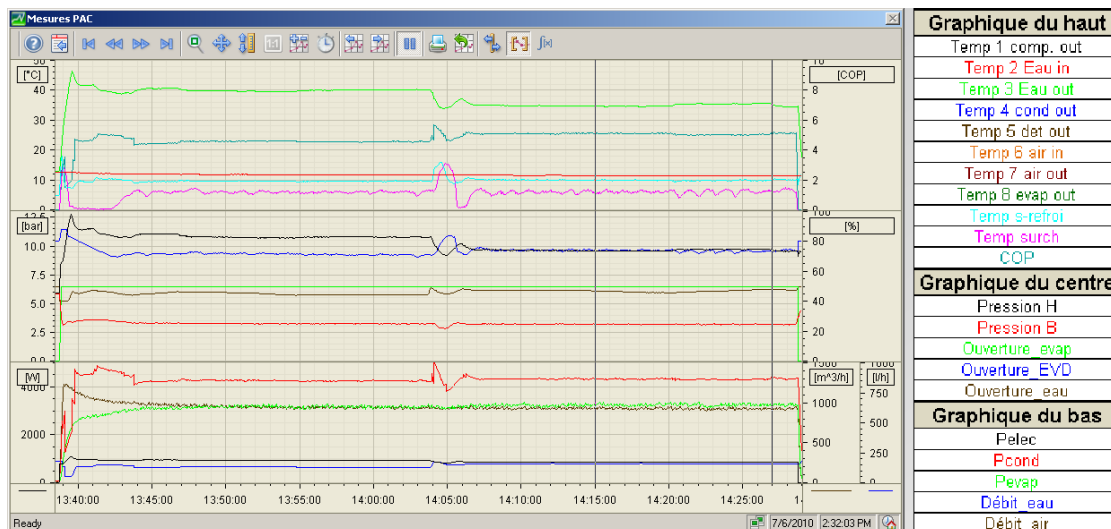


Figure 45 : Mesure longue durée auto N°2



Figure 46 : Mesure longue durée auto N°3

		Mode automatique N°2						Mode automatique N°3					
		Consigne T3 40 [°C]			Consigne T3 35 [°C]			Consigne T3 40 [°C]			Consigne T3 35 [°C]		
Nom	Unité	Min	Max	Moy.	Min	Max	Moy.	Min	Max	Moy.	Min	Max	Moy.
Temp 2 Eau IN	[°C]	11.7	11.8	<b>11.7</b>	11.3	11.4	<b>11.4</b>	12.2	12.3	<b>12.3</b>	11.5	11.7	<b>11.6</b>
Temp 3 Eau out	[°C]	39.5	40.3	<b>40</b>	34.5	35.6	<b>35.1</b>	39.5	40.3	<b>39.7</b>	34.5	35.5	<b>35.1</b>
Temp surch.	[°C]	4.5	6.6	<b>5.9</b>	4	7	<b>5.9</b>	4.8	6.6	<b>5.9</b>	4.2	6.9	<b>5.9</b>
COP	-	4.52	4.63	<b>4.56</b>	4.98	5.15	<b>5.06</b>	4.36	4.5	<b>4.45</b>	4.81	5	<b>4.9</b>
Ouverture evap	[%]	50	50	<b>50</b>	50	50	<b>50</b>	35.8	38.3	<b>37.5</b>	37.3	40.3	<b>38.9</b>
Ouverture EVD	[%]	69.6	72.2	<b>71.1</b>	71.6	74.8	<b>73.6</b>	69	71.4	<b>70.5</b>	71.6	74.3	<b>73.1</b>
Ouverture_eau	[%]	43.9	44.3	<b>44.1</b>	45.7	48.2	<b>46.6</b>	43.8	45.6	<b>44.5</b>	45.4	47.6	<b>46.3</b>
Pelec	[W]	923.2	937	<b>931.7</b>	843.5	863.4	<b>853.3</b>	940.1	958.5	<b>945.9</b>	857.3	881.8	<b>872.4</b>
Pcond	[W]	4205	4282	<b>4247</b>	4261	4397	<b>4315</b>	4148	4242	<b>4211</b>	4203	4334	<b>4273</b>
Pevap	[W]	3056	3266	<b>3152</b>	3123	3375	<b>3238</b>	3021	3246	<b>3127</b>	3132	3357	<b>3240</b>
Débit_Eau	[l/h]	127.2	131.8	<b>129</b>	153.4	160.5	<b>156.7</b>	129	132.9	<b>131.9</b>	153.7	160.7	<b>156.4</b>
Débit air	[m³/s]	913.3	973.7	<b>937.6</b>	899.8	953.6	<b>924.2</b>	879.7	933.4	<b>905.6</b>	879.7	940.1	<b>908.8</b>

Tableau 9 : Mesures mode automatique N°2 et N°3

### Les enseignements :

- Dans les deux modes, la régulation est meilleure à température plus élevée. La surchauffe est plus stable sur la partie gauche des deux images que sur la partie droite.
- Malgré cela, on peut valider le fonctionnement de la pompe à chaleur régulée autour de ces points de fonctionnement. Les courbes sont tout à fait acceptables.

## 7.3. Discussion des résultats

Ces différentes mesures ont amené une certaine quantité d'informations. Les constatations sur le fonctionnement des régulateurs et sur la stabilité du système ont déjà été longuement discutées. On peut dire que les régulateurs fonctionnent bien. Ils sont de meilleure qualité que ceux développés auparavant sur Wago. Lors de la future réalisation à charge variable, il serait utile de tenir compte de ces constatations :

- Sur la mesure de la température de sortie d'eau, les oscillations ont diminué. Tous les modes garantissent  $\pm 0.5$  [°C] par rapport à la consigne. Auparavant, la marge était de l'ordre du degré.
- Concernant la surchauffe, la régulation vaut quasiment celle qui existait déjà sur Wago. Ce point de mesure est vraiment très sensible. De très petites variations d'ouverture font rapidement varier la température de surchauffe de quelques dixièmes de degré. C'est pourquoi, une oscillation de  $\pm 0.5$  à  $\pm 1$  [°C] sur une consigne de 6 [°C] est à prendre en compte.

- La différence entre le mode avec consigne fixe sur le ventilateur et celui avec la régulation n'est pas importante. Le débit d'air ne varie que très peu selon la consigne. Néanmoins le rajout de ce régulateur sera un gain de temps lors de la nouvelle conception. A ce moment-là, il sera obligatoire (voir point 8.1).
- Il est nécessaire que la température de surchauffe commence à varier seulement quelques minutes après le lancement. Il faut obligatoirement que la pression dans la pompe à chaleur et la température de l'eau soient stable pour que la régulation de l'ensemble de la pompe à chaleur fonctionne bien. Si ce n'est pas le cas, les oscillations autour des consignes sont constantes. C'est pour cette raison que la pente sur la commande au détendeur est faible.

**Remarque :**

En faisant des essais plusieurs jours de suite, il est évident que des différences apparaissent. L'eau qui entre dans le condenseur vient du réseau d'eau de l'école. La température varie d'un jour à l'autre, ce qui change légèrement le point de fonctionnement (T2 entre 11.5 et 12.5 selon les jours). Il en va de même avec la température ambiante de la pièce qui joue un rôle sur l'évaporateur (T6 entre 19.5 et 22.5 [°C] selon les jours).

Une étude sur les différentes puissances consommées, principalement au moteur du compresseur, est importante et peut amener des informations pour la nouvelle régulation à charge variable. Le coefficient COP est aussi à analyser. Grâce aux chiffres des différents tableaux ci-dessus, on peut dire que :

- La puissance consommée par le moteur du compresseur ne varie que très peu. Il est quand même naturel que pour des températures plus élevées, on travaille avec une pression plus élevée en sortie du compresseur. Du coup, on doit consommer plus d'énergie. Selon les chiffres, une augmentation de 1°C sur l'eau de sortie amène une augmentation de la pression de 0.2 [bar] et de 14 [W] sur la consommation au compresseur. Les chiffres donnent 70 [W] pour 5[°C] →  $\text{Puiss\_comp} + 14[\text{W}] / [^{\circ}\text{C}]$ .
- Au vue de la remarque ci-dessus, il est difficile de parler des puissances à l'évaporateur et au condenseur. Ces deux valeurs dépendent fortement des deltas des températures d'eau et d'air.
- Le COP de la pompe à chaleur varie entre 4.4 et 5 pour les points de fonctionnement testés.

Ces valeurs sont satisfaisantes pour une pompe à chaleur. Les normes minimales sont au-dessous de cette valeur (aux alentours de 3.5 pour de l'eau de chauffage). Même si ces normes sont revues à la hausse, nous restons au-dessus.

La différence est visible entre le mode automatique 1 et le mode automatique 2 ou 3. Le COP est plus élevé lorsque la surchauffe est régulée (surtout dans le mode 3). Cette régulation amène donc un meilleur rendement de notre pompe.

## 8. La nouvelle pompe

### 8.1. Les changements importants

Cette partie du projet s'est faite en forte collaboration avec Ludovic Bonvin. Certaines informations ou choix cités se retrouvent aussi dans son rapport.

Les études faites par mon collègue ont amené plusieurs changements notables par rapport à la pompe existante. Le fait de réaliser une pompe à chaleur à charge variable amène beaucoup de modifications. Ces dernières se ressentent aussi dans la partie régulation. Les différentes explications qui suivent sont illustrées avec le schéma bloc. Les schémas blocs détaillés sont dans la partie 8.2. La numérotation ci-dessous se retrouve sur le schéma de la page suivante

1. Le premier choix a déjà été expliqué au point 4 du rapport, il concerne le choix du compresseur. De façon basique, il nécessite une commande ON-OFF qui allume le moteur du compresseur. Ensuite une commande PWM permet de faire de la charge variable.
2. Les doubles possibilités sur le condenseur (pressostatique et régulée) et sur le détendeur (thermostatique et pilotée) n'ont pas été conservées. Seules des vannes pilotées seront placées sur cette pompe à chaleur.
3. La vanne de détente n'est plus la même. Malgré cela, sa gestion et sa régulation ne changent pas. Une commande 0-10 [V] gère toujours son ouverture.

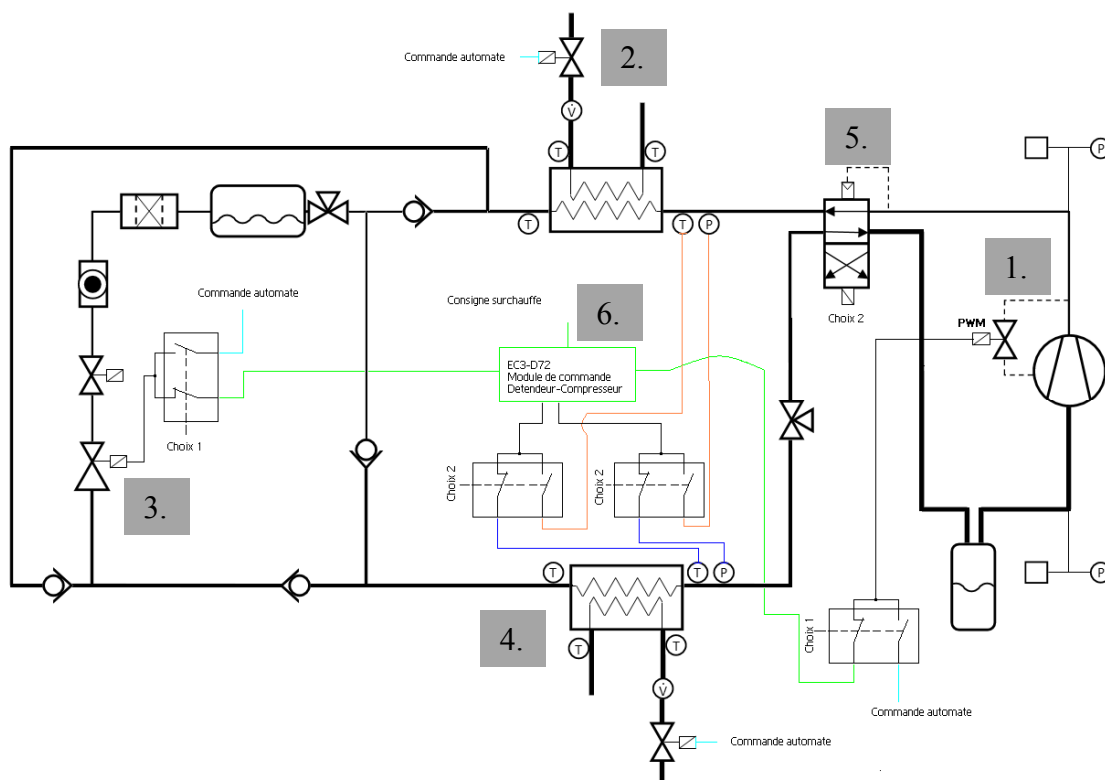
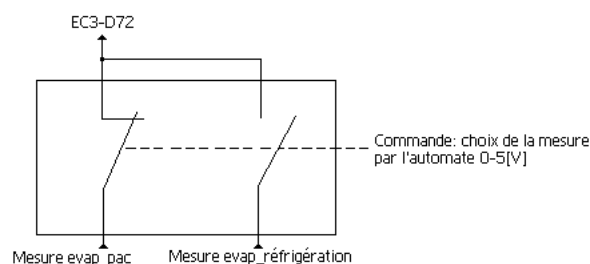


Figure 47 : Schéma bloc complet de la nouvelle installation

4. La nouvelle pompe à chaleur de type eau-eau représente un grand changement. Deux échangeurs à plaques seront montés : un premier sur le condenseur et l'autre sur l'évaporateur. Du coup, le type d'échangeur est différent au condenseur, mais cela ne change en rien sa partie commande. C'est toujours une vanne à eau « belimo » qui permet de contrôler le débit d'eau qui traverse l'échangeur. Sur l'évaporateur, par contre, le changement est important. Le ventilateur disparaît et un deuxième échangeur « eau » est mis en place à l'évaporateur. Ce dernier demande donc aussi une régulation de débit en entrée.
5. Une inversion de cycle a été prévue. Elle permettra un dégivrage de la partie évaporateur. Durant les périodes chaudes, cette inversion de mode peut aussi servir à réaliser du rafraîchissement. Une vanne quatre voies permet cette inversion. Cette vanne inverse les rôles de l'évaporateur et du condenseur. Le gaz les traverse donc en sens inverse du mode « normal ». Par contre, le détendeur et le compresseur, eux, continuent d'être traversés dans le même sens.  
Les réflexions et calculs sont aussi inversés. Exemple avec la température de surchauffe qui se calcule avec T8 et P2 dans le mode pompe à chaleur et se calcule avec T1 et P1 lors du mode dégivrage.
6. Un module de commande unique spécial pour notre réalisation existe. Il permet la gestion commune du détendeur et du compresseur. Ce module sera à tester. Son datasheet est en annexe N°9. Il se nomme EC3-D72. Il permet la commande de l'ouverture de la vanne de détente par rapport à une consigne de surchauffe donnée. Simultanément, il synchronise la PWM du compresseur. Pour ce faire, il nécessite deux points de mesure. La température et la pression sont à prendre en sortie de l'évaporateur. Une régulation se fait ensuite en interne. Ce module arrive aussi à travailler avec le mode dégivrage. Pour cette raison, les points de mesures doivent être doublés vu que la surchauffe ne se calcule pas aux mêmes endroits selon le mode de fonctionnement.  
Malgré cela, on ne connaît pas réellement sa façon de travailler et de réguler une pompe à chaleur. Pour cette raison, après réflexions, deux commandes séparées ont été prévues : l'une avec ce module et des commandes partielles par l'automate, l'autre entièrement avec l'automate et des commandes directes sur chaque organe.
7. Il sera donc nécessaire de passer par un interrupteur commandé qui permettra de sélectionner le point de mesure avec lequel nous désirons employer le module. Voir image ci-dessous et schéma bloc. Au total quatre interrupteurs sont nécessaires. Deux sur les mesures et deux sur les commandes de ce module.



**Figure 48 : Interrupteur double commandé**



## 8.2. Schémas blocs

Dans les schémas de ce chapitre, les images en vert représentent le fonctionnement normal en pompe à chaleur. Les bleus représentent le fonctionnement inverse en réfrigération ou dégivrage. Ces quatre schémas blocs dicteront les quatre modes de fonctionnement de la nouvelle réalisation.

### 8.2.1. Commandé par l'automate

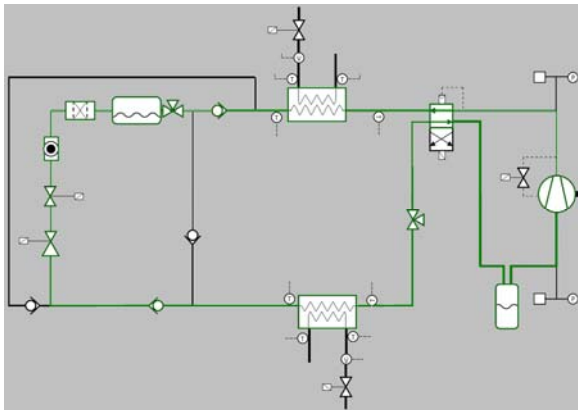


Figure 49 : PAC commandée par automate

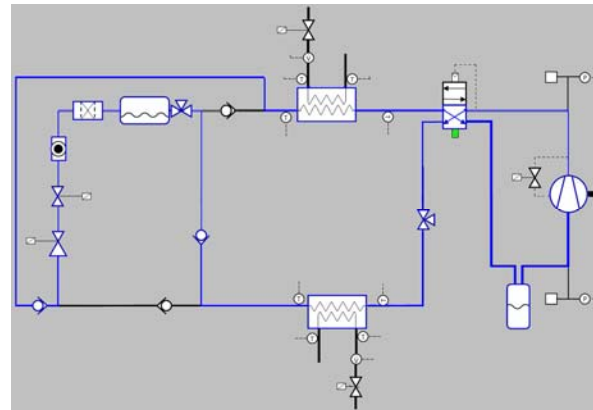


Figure 50 : Réfrigération commandée par automate

Les différents points de mesures sont les mêmes que dans l'ancienne réalisation. Ils ont été placés aux mêmes endroits. Les vannes à main trois voies (Rotalock) sont au nombre de deux. Elles sont utilisées lors du remplissage du gaz.

Cette fois par contre, il n'y a qu'une seule vanne magnétique qui se situe juste avant le compresseur. Ensuite, on distingue les différentes commandes indépendantes les unes des autres :

- Une vanne à eau sur le condenseur et une sur l'évaporateur
- Une vanne de détente commandée
- Une vanne commandée par PWM à hauteur du compresseur
- Une vanne 4 voies
- Une vanne magnétique avant le détendeur

Lorsque la vanne 4 voies est enclenchée, on change de circuit pour le gaz : l'évaporateur et le condenseur sont inversés. On refroidit alors l'eau de chauffage (système de réfrigération de l'habitation). Du même coup, on chauffe l'eau de la source côté évaporateur ce qui garantit le dégivrage du secteur.

### 8.2.2. Commandé par le module EC3-D72

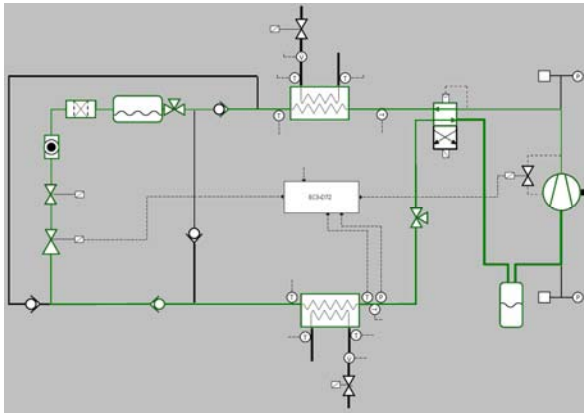


Figure 51 : PAC commandée par EC3-D72

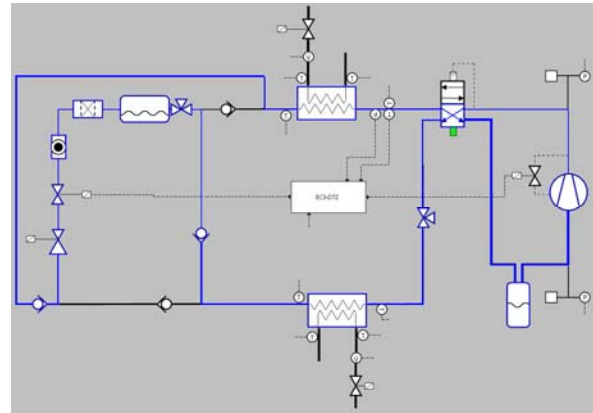


Figure 52 : Réfrigération commandée par EC3-D72

La base est la même qu'au point précédent. La différence se voit lorsqu'on analyse la commande du détendeur et du compresseur. La présence du module au centre des images permet de commander directement ces deux organes. L'automate ne gère plus que les vannes à eau. Sur ces deux schémas, on distingue les points de mesures (T et P) dont le module de commande a besoin. La mesure doit toujours se faire à la sortie de l'évaporateur.

## 8.3. Les entrées/sorties de l'automate

### 8.3.1. Entrées

- Les entrées ont très peu changé puisqu'elles servaient surtout à acquérir les valeurs des différents points mesures qui sont restés les mêmes.
- Une différence concerne la mesure à l'évaporateur. Une deuxième mesure de débit d'eau remplace la mesure de débit d'air → une entrée analogique de moins et une digitale de plus.
- Un contact indiquant l'état de fonctionnement du compresseur est toujours à prévoir (comme auparavant).

### 8.3.2. Sorties

- Comme expliqué dans le chapitre 8.2, il n'y a plus qu'une vanne magnétique à commander lors de l'enclenchement de la pompe. La deuxième ayant été supprimée, il est prévu de récupérer cette sortie afin de commander la vanne quatre voies. Cette sortie commandera aussi deux des quatre switches. Ce sont ceux qui sont placés à l'entrée du module EC3-D72. Ces switches permettent au module de mesurer la température de surchauffe au bon endroit selon le mode de fonctionnement.
- Une sortie digitale supplémentaire sera nécessaire. Cette dernière permettra de décider quel organe contrôlera le compresseur et le détendeur → automate ou module externe. Cette sortie ira donc commander les deux autres switches.
- Dans le mode avec la commande complète par automate, une sortie digitale sera employée pour générer le signal PWM.
- Si l'on emploie le module, une sortie analogique devra être utilisée pour donner la consigne de température de surchauffe au module externe.

---

## 8.4. Choix de la stratégie du programme

Pour la commande, une part de la programmation et de l'interface sont à revoir. La partie qui gère les modes à disposition change considérablement. Auparavant, le choix se faisait entre les vannes autorégulées et les vannes pilotées. Maintenant ce choix a disparu car les vannes sont uniquement pilotées. La base de ma nouvelle commande se fait donc sur le mode automatique N°3 uniquement. De cette base, quatre modes distincts sont à développer. Ces derniers correspondent aux quatre schémas blocs du point 8.2 :

1. Mode pompe à chaleur régulée (4 régulateurs sur les 4 organes principaux)
2. Mode dégivrage régulé (4 régulateurs sur les 4 organes principaux)
3. Mode pompe à chaleur pilotée (Régulateurs sur condenseur et évaporateur et module externe pour le détendeur et le compresseur)
4. Mode dégivrage piloté (Régulateurs sur condenseur et évaporateur et module externe pour le détendeur et le compresseur)

La partie acquisition ne change presque pas. Seul un capteur de débit d'eau vient remplacer un capteur de débit d'air pour l'évaporateur. Par contre, un dédoublement des calculs est nécessaire. Par exemple : pour la température de surchauffe, les deltas de température, les puissances,...

La commande logique n'est pas compliquée et ne change pas beaucoup de la première réalisation (vanne magnétique, vanne 4 voies, interrupteurs commandés, ON-OFF du compresseur).

Etant donné qu'on inverse le rôle du condenseur avec celui de l'évaporateur entre le mode 1-2 ou entre 3-4, ces deux organes seront traversés par des fluides en sens inverse. Pour cette raison, les calculs ne se font pas de la même manière d'un mode à l'autre.

La régulation, elle aussi, ne change que très peu. Lorsqu'on se situe dans les modes 1-2, quatre régulateurs doivent être actifs : 3 analogiques et 1 générant la PWM. Dans les modes 3-4, plus seuls deux régulateurs sont actifs et une commande analogique est nécessaire pour le module externe.

Qu'on se trouve en pompe à chaleur ou en dégivrage, l'utilisateur entre toujours les mêmes consignes. Le point de fonctionnement se fixe soit sur le condenseur soit sur l'évaporateur selon le mode → la consigne se fixe toujours sur l'échangeur du haut du schéma.

### 8.4.1. Algorithme de contrôle

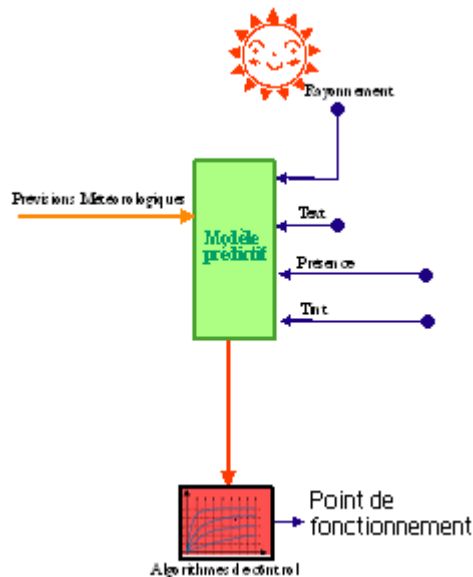


Figure 53 : Algorithme de contrôle

#### Exemple avec des valeurs fictives :

Text = 0°C et Tint = 19°C : La pompe à chaleur augmente la température de l'eau de chauffage de 40 à 45°C par exemple. La surchauffe reste constante. De ce fait, la température intérieure de la maison augmente.

Text = 32°C et Tint = 25°C : La pompe passe en réfrigération en inversant condenseur et évaporateur. L'eau qui circule dans le bâtiment est maintenant l'eau qui sort de l'évaporateur. Elle est donc plus froide que celle qui y rentre. La maison va se rafraîchir petit à petit. L'eau qui y circule peut être baissée à 20°C par exemple.

#### Remarque :

Cet algorithme est à rajouter suite à un fonctionnement adéquat et autonome de la pompe à chaleur. Au départ, les tests sont à effectuer avec des commandes fixes ou avec des régulateurs.

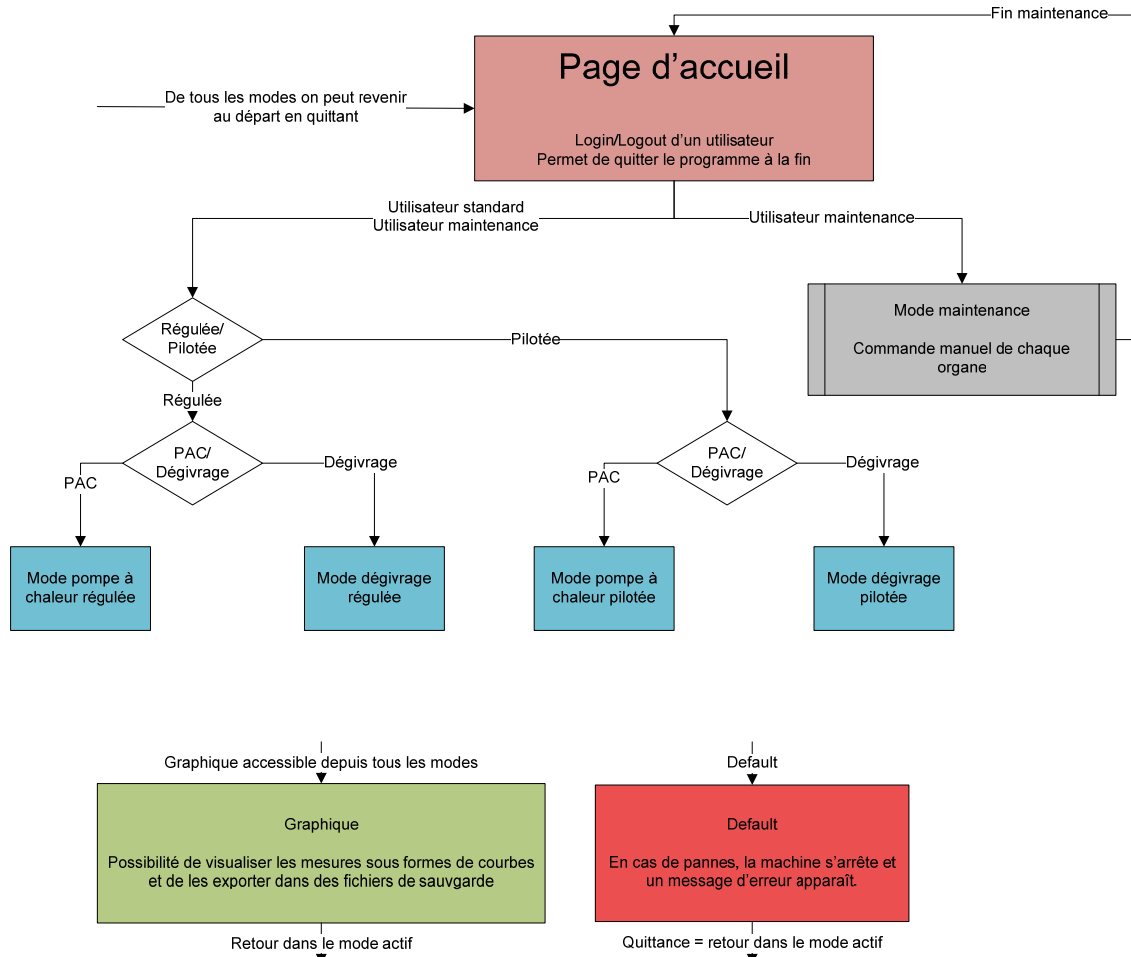
### 8.4.2. L'avancement dans la réalisation

Pour avancer dans la commande concrète de la nouvelle pompe, je n'ai eu que deux jours à disposition. Les premières modifications et améliorations sont en place. Faute de temps, seuls deux modes sur quatre ont été programmés sur l'interface. La pompe n'étant pas encore construite, ils n'ont pas pu être testés.

Malgré cela, la navigation dans l'interface d'une vue à une autre fonctionne et la communication avec l'automate aussi. La programmation de celui-ci est également à terminer. Tous les blocs et modes sont en place. Le fonctionnement et la régulation par contre sont à contrôler et demanderont sûrement des modifications.

## 8.5. Les changements dans le programme et dans l'interface

Certains bloc ont disparu, d'autres ont été créés. Voici la logique de l'interface, il se trouve aussi en annexe N°10 :



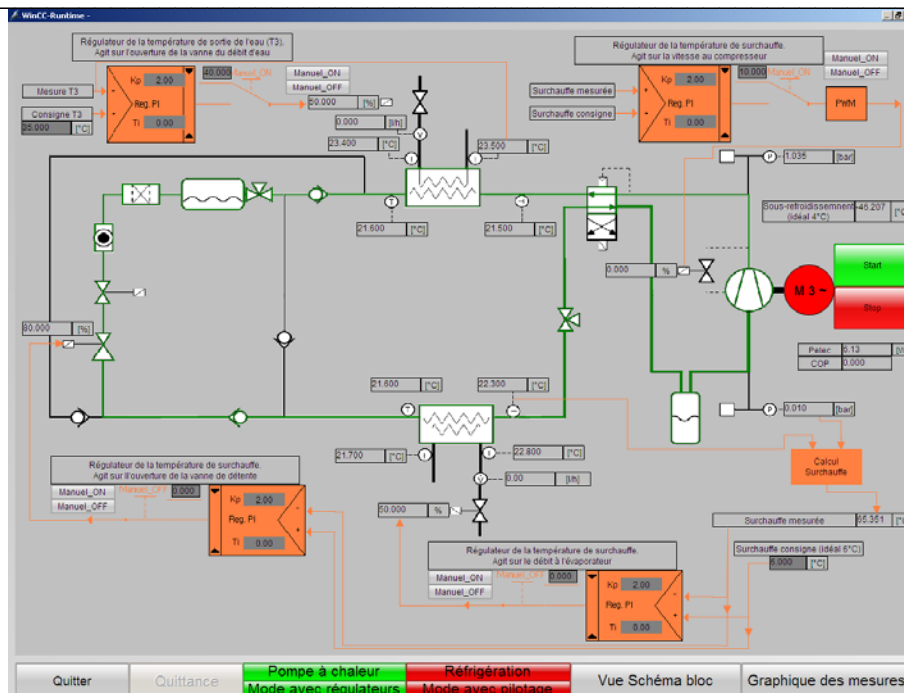
**Figure 54 : Schéma bloc de l'interface pac variable**

Suite au login de l'utilisateur (plus que deux utilisateurs possibles), on peut accéder à un des quatre modes. Le graphisme ne change pas beaucoup et les différentes commandes par bouton non plus.

Selon le mode choisi, une vue est sélectionnée. Elle affiche le schéma bloc correspondant (selon 8.2). Les différents régulateurs actifs viennent s'afficher. Option rajoutée par rapport au précédent développement, on peut forcer la sortie du régulateur par une valeur manuelle. Cette variante sera utile lors des premiers tests où des consignes fixes seront données sur les commandes des vannes. Au fur et à mesure de l'avancement, les régulateurs seront testés. Exemple de deux vues de la page suivante.

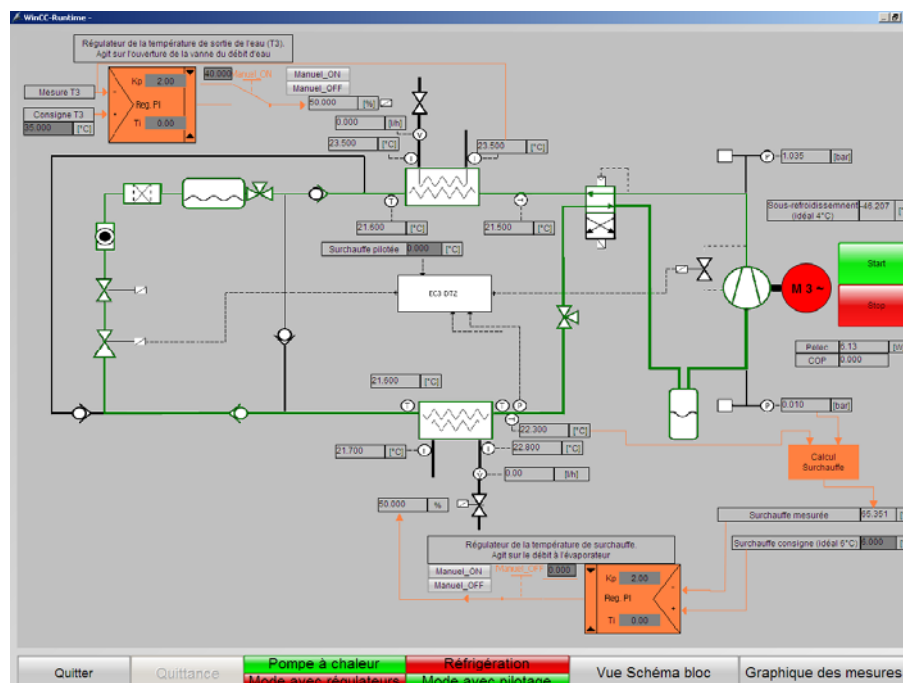
Concernant l'interface, plusieurs secteurs seront à améliorer :

- Choix des modes par les boutons du fond de la vue
- Visualisation des régulateurs
- Choix des couleurs
- Taille de la fenêtre
- Limiter les grandeurs d'entrées



**Figure 55 : Mode pac régulée**

Quatre régulateurs sont présents. Chacun dispose d'un bouton de commande qui permet de forcer la sortie. Si le bouton est pressé, on se retrouve dans la situation des deux régulateurs du haut. Sinon avec ceux du bas La pompe est en pré-régulation, les vannes sont déjà ouvertes. Dès l'enclenchement, les vannes recevront soit la commande du régulateur, soit la commande fixe de l'utilisateur. Les paramètres ( $K_p$  et  $T_i$ ) sont accessibles.



**Figure 56 : Mode pac pilotée**

Dans cette vue, on travaille avec le module. Le mode actif est visible grâce aux boutons du centre de l'image. Ici deux régulateurs sont présents. Par contre, il est nécessaire de donner une consigne au module (identique à celle du régulateur à l'évaporateur).



Pour le programme automate SIEMENS, les structogrammes permettent de visualiser l'avancement du projet. Ils se trouvent en annexe N°10.

Cette partie du programme a été expliquée de façon plus détaillée directement à M. Christophe Truffer qui le reprendra par la suite.

Beaucoup de modifications de variables ont été nécessaires. Des calculs différents entre le mode « pompe à chaleur » et le mode « dégivrage » sont obligatoires. De ce fait, plusieurs variables se retrouvent à double ➔ exemple : `delta_eau_pac` et `delta_eau_dégivrage`. Ces dernières représentent le delta de température de l'eau au même endroit mais dans des sens opposés.

Les prochaines étapes à réaliser sur ce programme :

- Gérer les régulateurs et leurs paramètres. Ils seront sûrement différents selon le mode dans lequel la pompe va fonctionner.
- Pour l'instant, l'utilisateur choisit son mode de fonctionnement. Un changement de mode qui se fait automatiquement sera ensuite à prévoir.

Un contrôle du givre par soft est possible : contrôle de la température de surchauffe et de la température ambiante. Le mode dégivrage devrait pouvoir s'enclencher automatiquement si du givre est détecté par le soft. Ce mode resterait actif un certain temps afin de dégivrer la pompe, puis reviendrait en fonctionnement normal.

## 9. Conclusions

L'automate SIEMENS peut maintenant commander la pompe à chaleur de l'école. Les régulateurs sont paramétrés et chacun d'eux joue parfaitement le rôle qu'on attend de lui. Ces derniers régulent les températures de la pompe à chaleur à la valeur de la consigne demandée par l'utilisateur, ceci avec une précision acceptable pour ce type d'installation ( $\pm 0.5$  à  $\pm 1$  [°C] selon les points de mesure).

L'interface utilisateur amène de nettes améliorations par rapport à la réalisation de 2006. Les possibilités de ce programme sont très larges. La fenêtre de visualisation des mesures par graphique est par exemple très intéressante. La possibilité d'atteindre des mesures antérieures au jour d'utilisation de la pompe et l'exportation des données dans des fichiers Excel sont réellement utiles pour l'utilisateur. En plus, une base de données et une gestion des utilisateurs sont en place.

En ce qui concerne la commande de la nouvelle pompe à chaleur à charge variable, un pas en avant important a déjà été réalisé. L'étude présentée dans ce rapport amène de nouvelles idées. Les modifications déjà effectuées sur le programme et sur l'interface permettront un gain de temps appréciable dans la réalisation de cette nouvelle pompe à chaleur.

## 10. Remerciements

Un grand merci à vous qui m'avez apporté votre expérience et vos connaissances. Elles m'ont été précieuses à la réalisation de ce travail.

La bonne collaboration avec mon collègue Ludovic Bonvin fut présente tout au long du travail de diplôme. Ses éclaircissements sur la conception de la nouvelle pompe à chaleur m'ont permis de réaliser le début du programme automate et de l'interface. Je l'en remercie.

Un merci particulier à Madame Moghaddam Bützberger Fariba pour son suivi tout au long du projet.

Ce compliment s'adresse aussi à Monsieur Christophe Truffer. Monsieur Truffer a pris de son temps pour me faire découvrir la programmation automate SIEMENS ainsi que le programme de gestion de l'interface. Je lui transmets donc mes sincères remerciements.

Merci également à Monsieur Jean-Claude Héritier pour ses conseils avisés sur les pompes à chaleur et les différentes méthodes de régulation.

Merci enfin à Monsieur Pascal Grand pour son aide lors des mises en route de la pompe à chaleur de l'école et lors de son utilisation. Sa grande expérience a permis une amélioration de l'interface utilisateur.

## 11. Références

- [1] Travail de Diplôme, Groupe de production chaleur avec pile à combustible  
Samuel Bonvin, HEVs, 2004
- [2] Travail de Diplôme, Pompe à chaleur  
Francesco Poretti, HEVs, 2005
- [3] Travail de Diplôme, Intégration pile à combustible et pompe à chaleur  
Olivier Rouiller, HEVs, 2006
- [4] Travail de Diplôme, Réalisation d'une pompe à chaleur à charge variable  
Ludovic Bonvin, HES//SO 2010
- [5] Support produit pour automate SIEMENS. On y trouve l'aide à la programmation et les faq (foire aux questions)  
<http://support.automation.siemens.com>

## 12. Annexes

- 1. Rapport intermédiaire et journal de travail
- 2. Liste des entrées/sorties
- 3. Schématique de câblage
- 4. Structogramme de programmation automate PAC école
- 5. Programme complet

5.1.	OB1	:	Main
5.2.	OB35	:	Interruption
5.3.	FB1	:	Préréglage de l'eau
5.4.	FC1	:	Conversion plage d'entrée
5.5.	FC2	:	Conversion plage de sortie
5.6.	FC3	:	Liste de conversion des températures
5.7.	FC4	:	Conversion de température
5.8.	FC5	:	Calculs de thermodynamique
5.9.	FC6	:	Calculs Tcond et Tevap
5.10.	FC7	:	Mode Manuel
5.11.	FC8	:	Mode automatique N°1
5.12.	FC9	:	Discordance
5.13.	FC10	:	Gestion des modes
5.14.	FC11	:	Reset des variables globales
5.15.	FC12	:	Mode automatique N°2
5.16.	FC13	:	Mode automatique N°3
5.17.	FC14	:	Maintenance

---

5.18.	DB1	:	Bloc de données « Entrées analogiques »
5.19.	DB2	:	Bloc de données « Données globales »
5.20.	DB3	:	Bloc de données « Sorties analogiques »
<b>6. Structogramme pour programmation interface PAC école</b>			
<b>7. Aide à la programmation</b>			
<b>8. Mode d'emploi de la pompe à chaleur</b>			
<b>9. Datasheet : Module EC3-D72</b>			
<b>10. Structogramme pour programmation interface Wincc PAC variable</b>			
<b>11. Structogramme de programmation automate PAC variable</b>			

## 13. Liste des légendes

### Tableaux :

Tableau 1 : Comparatif des compresseurs.....	8
Tableau 2 : Mesures mode manuel.....	30
Tableau 3 : Valeurs des paramètres des régulateurs .....	32
Tableau 4 : Mesures mode automatique N°1 .....	33
Tableau 5 : Mesures mode automatique N°2 .....	35
Tableau 6 : Mesures mode automatique N°2 .....	37
Tableau 7 : Mesures mode automatique N°3 .....	38
Tableau 8 : Mesures mode automatique N°3 .....	39
Tableau 9 : Mesures mode automatique N°2 et N°3 .....	41

### Equations :

Équation 1 : Calcul de la surchauffe .....	13
Équation 2 : Calculs pour le débit d'air.....	19
Équation 3 : Calculs pour le débit d'eau .....	20

### Figures :

Figure 1 : Chauffage d'une maison à l'aide d'une pompe à chaleur air-eau .....	5
Figure 2 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur .....	6
Figure 3 : Fonctionnement de la pac en tout-ou-rien et en vitesse variable.....	7
Figure 4 : Compresseur ZBD21 .....	8
Figure 5 : Schéma bloc de la pompe à chaleur de l'école .....	9
Figure 6 : Présentation de l'automate SIEMENS.....	11
Figure 7 : Schéma bloc pompe à chaleur .....	12
Figure 8 : Circuit eau en manuel .....	13
Figure 9 : Circuit gaz au détendeur en manuel.....	13
Figure 10 : Circuit d'eau avec régulation du débit.....	14
Figure 11 : Circuit gaz au détendeur avec régulation du débit.....	14
Figure 12 : Régulateur sur le ventilateur .....	15
Figure 13 : Structure de base du programme .....	16

Figure 14 : Bloc de mise à l'échelle .....	17
Figure 15 : Thermocouple .....	
Figure 16 : Structogramme correspondant .....	17
Figure 17 : Mesures de pression .....	
Figure 18 : Structogramme correspondant .....	18
Figure 19 : Montage Aaron .....	
Figure 20 : Structogramme correspondant .....	19
Figure 21 : Ventilateur .....	
Figure 22 : Structogramme correspondant .....	19
Figure 23 : Capteur de débit d'eau .....	
Figure 24 : Structogramme correspondant .....	20
Figure 25 : Structogramme de la partie « Gestion mode » .....	21
Figure 26 : Schéma fonctionnel d'un régulateur dans SIMATIC .....	22
Figure 27 : Structure de l'interface .....	23
Figure 28 : Vue d'entrée .....	24
Figure 29 : Vue choix des modes .....	25
Figure 30 : Vue contrôle position des vannes à main .....	25
Figure 31 : Vue générale de la PAC « mode manuel » OFF .....	26
Figure 32 : Vue générale de la PAC « mode automatique N°3 » ON .....	26
Figure 33 : Vue configuration de la PAC .....	27
Figure 34 : Vue Graphique .....	28
Figure 35 : Vue maintenance de la PAC .....	28
Figure 36 : Vue « Default » .....	29
Figure 37 : Mesure mode manuel .....	30
Figure 38 : Mesure mode automatique N°1 .....	32
Figure 39 : zoom de la figure 39 .....	32
Figure 40 : Mesure mode automatique N°2 .....	34
Figure 41 : Mesure mode automatique N°2 (zoom sur le départ) .....	35
Figure 42 : Mesure mode automatique N°2 .....	36
Figure 43 : Mesure mode automatique N°3 .....	37
Figure 44 : Mesure mode automatique N°3 .....	39
Figure 45 : Mesure longue durée auto N°2 .....	40
Figure 46 : Mesure longue durée auto N°3 .....	40
Figure 47 : Schéma bloc complet de la nouvelle installation .....	43
Figure 48 : Interrupteur double commandé .....	44
Figure 49 : PAC commandée par automate .....	
Figure 50 : Réfrigération commandée par automate .....	45
Figure 51 : PAC commandée par EC3-D72 .....	
Figure 52 : Réfrigération commandée par EC3-D72 .....	46
Figure 53 : Algorithme de contrôle .....	48
Figure 54 : Schéma bloc de l'interface pac variable .....	49
Figure 55 : Mode pac régulée .....	50
Figure 56 : Mode pac pilotée .....	50