



HEVs

haute école valaisanne
hochschule wallis
sciences de l'ingénieur

Filière Systèmes industriels

Orientation Power & Control

Diplôme 2006

Olivier Rouiller

*Intégration
pile à combustible et
pompe à chaleur*



HEVs

Route du Rawyl 47
1950 Sion 2

haute école valaisanne
hochschule wallis

Professeur

Jean-Claude Héritier

Expert

Joël Fournier

HES-HEVS-T (Sion)



EM000005224523

Sion, le 24 novembre 2006

51/2006/19



Hes-so

Haute École Spécialisée
de Suisse occidentale
Fachhochschule Westschweiz
University of Applied Sciences
Western Switzerland



Table des matières

1	Introduction.....	3
2	Pile à combustible	4
2.1	Principe de fonctionnement.....	4
2.2	Rendement	5
2.3	Interface DC/AC	6
3	Pompe à chaleur.....	8
3.1	Principe de fonctionnement.....	8
3.2	Installation existante	9
3.3	Contrôle de dimensionnement	15
3.4	Modifications envisagées	17
4	Design de la nouvelle installation	20
4.1	Placement des éléments principaux	20
4.2	Elaboration du châssis	22
4.3	Placement des éléments secondaires.....	22
4.4	Design de la tuyauterie.....	25
5	Modes de fonctionnement.....	27
5.1	Conventionnel.....	27
5.2	Régulé électroniquement	27
5.3	Mixte.....	28
5.4	Alimentation électrique	28
5.5	Récapitulatif	28
6	Armoire électrique.....	29
7	Programmation API.....	32
7.1	Conversions d'échelles	32
7.2	Gestion des modes	34
7.3	Mode 0	36
7.4	Mode 1	37
7.5	Mode 2	37
7.6	Mode 3	37
7.7	Mode 5	37
7.8	Mode 7	38
7.9	Gestion de l'affichage.....	39
8	Interface graphique.....	40



8.1	Choix du mode de fonctionnement	40
8.2	Message de mise en garde.....	41
8.3	Messages d'erreurs.....	41
8.4	Visualisation	42
8.5	Graphes.....	45
9	<i>Mise en Service et tests.....</i>	46
10	<i>Coûts</i>	46
11	<i>Améliorations à apporter</i>	46
11.1	Vannes à main	46
11.2	Vanne à eau pilotée	46
11.3	Interface graphique sur InTouch	46
11.4	Graphes + Visu ensemble	47
11.5	Meilleure différentiation entre affichage d'état et entrée de consigne	47
11.6	Dégivrage de l'évaporateur	47
12	<i>Conclusions</i>	47
13	<i>Remerciements</i>	47
14	<i>Références</i>	48
15	<i>Annexes</i>	48



1 Introduction

Depuis de nombreuses années, la Haute Ecole Valaisanne de Sion oriente ses recherches vers des énergies non polluantes. En 2004, un travail de diplôme réalisé par M. Samuel Bonvin permis d'étudier l'optimisation d'un groupe énergétique composé d'une pompe à chaleur et d'une pile à combustible.

Le but de ce travail fut d'étudier le fonctionnement d'une pile à combustible de type PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) et de l'intégrer dans le fonctionnement d'une pompe à chaleur en tant que source d'énergie électrique. Les essais effectués en cabine climatisée lors de ce premier travail de diplôme ont permis de déterminer les conditions atmosphériques idéales pour le fonctionnement de la pile à combustible. Au chapitre suivant, les résultats obtenus lors de ces essais seront commentés.

En 2005, un deuxième travail de diplôme, cette fois réalisé par M. Francesco Poretti, permis de réaliser une petite pompe à chaleur.

Le but de ce travail fut d'étudier, dimensionner et mettre en œuvre une pompe à chaleur répondant aux limitations imposées par la pile à combustible. La présentation de cette installation est faite au chapitre 3.

Les résultats obtenus lors de ces deux travaux de diplôme étant prometteurs, c'est tout naturellement que leur mise en commun fut proposée. L'objet de ce troisième travail porte donc sur la réalisation et la régulation de la pompe à chaleur alimentée par la pile à combustible. L'optimisation énergétique du rendement de la pile à combustible passera par son refroidissement direct via la pompe à chaleur. L'intégration de ce concept nécessitera de traiter la problématique de l'adaptation du point de fonctionnement de la pompe à chaleur pour pouvoir gérer la pile à combustible.

2 Pile à combustible

Les piles à combustible sont présentées comme l'énergie de demain, en parallèle avec l'hydrogène. Et pourtant, elles ne sont pas une technologie nouvelle puisque leur principe de fonctionnement a été découvert en 1839. Jusqu'au milieu de ce siècle, elles sont restées oubliées, jusqu'à ce que l'on s'y intéresse de nouveau avec les programmes spatiaux des années 1960.

La pile à combustible peut se définir comme un générateur électrochimique permettant de convertir directement l'énergie chimique interne d'un combustible en énergie électrique sans passer par l'énergie thermique.

2.1 Principe de fonctionnement

La pile à combustible testée par M. Samuel Bonvin lors de son travail de diplôme provient de chez Ballard. C'est une pile de type PEMFC. Elle est composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) chargées en catalyseur, séparées par un électrolyte, dont le rôle est de permettre la migration des ions d'une électrode à l'autre, sous l'effet du champ électrique créé.

L'anode (coté oxydation) est alimentée en combustible (H_2). La cathode (lieu de la réduction) est alimentée en comburant (O_2 , air). On voit donc que le combustible et le comburant n'entrent pas en contact direct dans la pile. Manuel d'utilisation en annexe 1.



Fig. 2.1.1 Pile à combustible NEXA

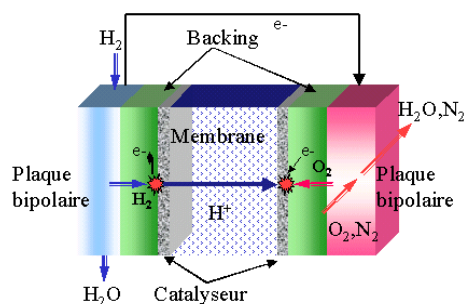


Fig. 2.1.2 Réactions dans la pile PEMFC

2.2 Rendement

La puissance de la pile à combustible est théoriquement de 1200W. Les tests réalisés ont démontré que le rendement est bien meilleur à une puissance inférieure.

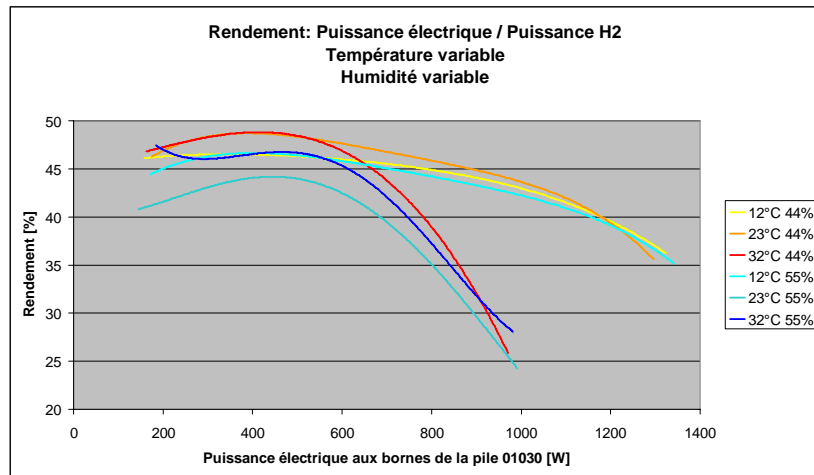


Fig. 2.2.1 Rendement de la pile pour différentes caractéristiques atmosphériques

Il est constatable que sur les 6 essais réalisés à des températures et des degrés d'humidité différents, l'optimum se situe à une température moyenne ainsi qu'à l'humidité environnante la plus faible. Ceci s'explique par les cycles internes que doit réaliser la pile à combustible pour préserver ses membranes. Voici le détail des conclusions mises en évidence par M. Samuel Bonvin :

- La pile a des conditions de fonctionnement optimal ; à 23 [°C] et 44 [%] d'humidité son rendement est maximal.
- Si la température augmente, la pile va utiliser sa puissance produite afin d'alimenter son ventilateur pour se refroidir. Lorsque la température des membranes augmente, ces dernières ne retiennent plus l'eau correctement et la migration des protons n'est plus assurée de manière convenable et le rendement de la pile chute.
- A basse température, la pile n'augmente pas son rendement car elle a toujours besoin de refroidir les membranes. Celles-ci ont une température de fonctionnement de 65 [°C].
- Les températures basses peuvent augmenter le rendement de la pile uniquement lorsque l'humidité est trop importante.
- L'humidité joue un rôle important sur le rendement de la pile. Plus l'humidité de l'air introduit dans la pile augmente, plus le rendement diminue. Si les membranes ne sont pas suffisamment humidifiées, elles peuvent se casser et la tension chute. Une membrane sèche ne laisse plus passer les ions H⁺.
- Des cycles de purges permettent d'évacuer l'eau des membranes.

2.3 Interface DC/AC

2.3.1 Principe

Le but du convertisseur DC/AC est de convertir la tension électrique continue fournie par la pile à combustible en une tension triphasée sinusoïdale.

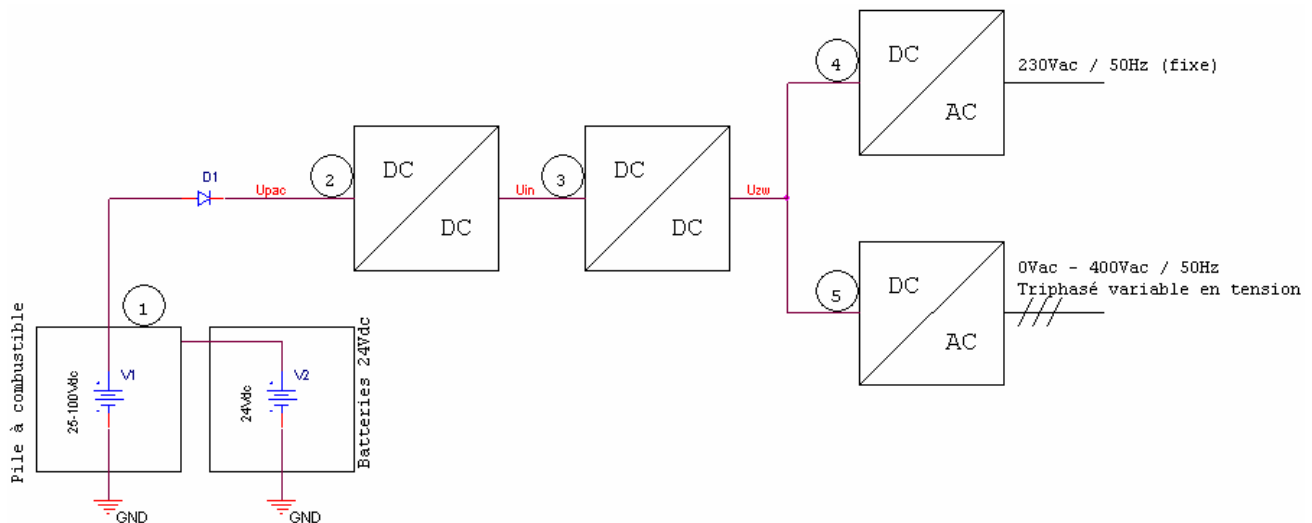


Fig. 4.4.1.1 : Schéma de principe du convertisseur DC/AC

- 1 : Pile à combustible 25-100V et batteries 24V
- 2 : Convertisseur DC/DC (Buck-Boost) -> $U_{in} = 50V_{dc}$
- 3 : Convertisseur DC/DC (Boost) -> $U_{zw} = 700V_{dc}$
- 4 : Convertisseur monophasé DC/AC -> 230Vac
- 5 : Convertisseur triphasé DC/AC -> 0-400Vac

2.3.2 Spécifications

Puissance maximale : 3 kW

Consommation interne en stand-by : 2W

Consommation interne en fonction : 10-20W

2.3.2.1 Entrée

Tension d'entrée : 20 Vdc à 100 Vdc (pile à combustible : 22 ... 100 Vdc)

Courant nominal d'entrée : 50 A (pour pile à combustible)

Surveillance interne de la tension et du courant d'entrée



2.3.2.2 Sortie

Tension monophasée : 230 Vac / 50 Hz

Tension triphasée : 3 x 400 Vac / 50 Hz

Attention:

- La puissance de sortie est limitée par la puissance qui entre (puissance fournie par la pile à combustible).
- Le courant maximal de sortie est limité -> si la puissance demandée est trop importante, le courant sature et la tension chute
- La tension de sortie varie sous forme de rampes

2.3.2.3 Contrôle

Chaque port doit être spécifié soit comme entrée, soit comme sortie et n'est ensuite plus modifiable.

4 x In/Out digitales : 0 - 10 V

Prévu pour la commande ou le contrôle de paramètres.

1 x In/Out analogique : 0... 10 V ou 4 ... 20 mA

Prévu pour la commande de puissance.

2.3.2.4 Batterie

Une batterie 24 Vdc (nécessaire pour le démarrage et l'arrêt de la pile à combustible) est prévue avec un chargeur-convertisseur DC/DC.

3 Pompe à chaleur

La pompe à chaleur, comme son nom l'indique, sert à pomper des calories, soit de l'énergie. 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 inverse à celui d'un frigo.

La pompe à chaleur extrait les calories de divers milieux (eau, air, sol) et les utilise dans le système de chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. Elle mérite, à l'heure du choix, un examen approfondi quant à l'opportunité technique et financière de son installation.

3.1 Principe de fonctionnement

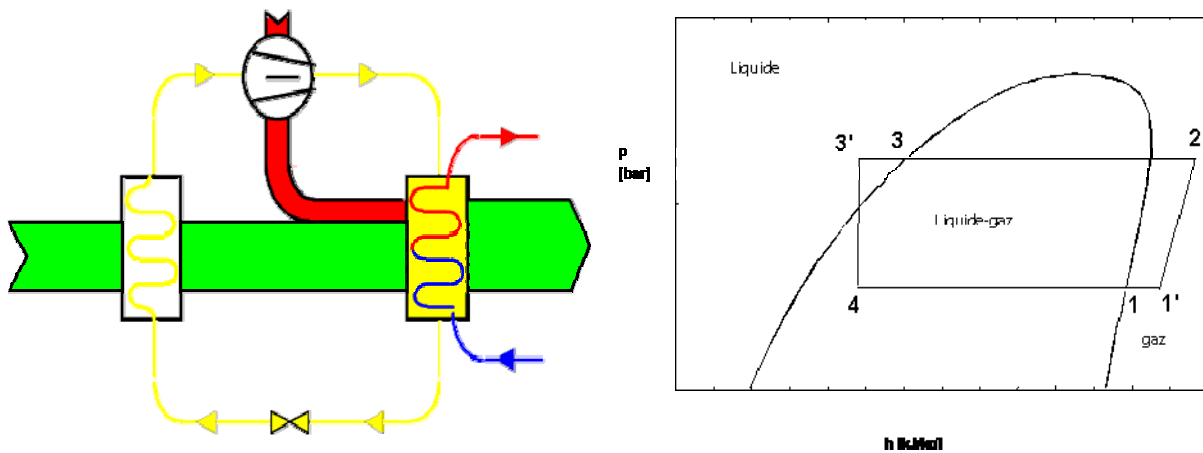


Fig. 3.1.1 Schéma de principe d'une pompe à chaleur

Le système pompe à chaleur est constitué d'un fluide échangeur qui circule dans la pompe. Ce liquide froid va absorber toute chaleur d'un environnement plus chaud que lui dans un échangeur et va se transformer en vapeur froide. Cette vapeur sera ensuite comprimée. Le compresseur concentre cette chaleur en augmentant la pression de la vapeur. Cette vapeur chaude se condense en liquide et transmet sa chaleur grâce à un deuxième échangeur. Ce liquide, poussé par la haute pression traverse un détendeur. Sa pression chute et on retrouve alors un liquide froid à basse pression : le cycle peut recommencer.

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 frigorigère 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.

3.2 Installation existante

La pompe à chaleur développée par M. Francesco Poretti fournit une puissance thermique théorique de 3.5 kW pour une puissance électrique consommée de 0.8 kW.

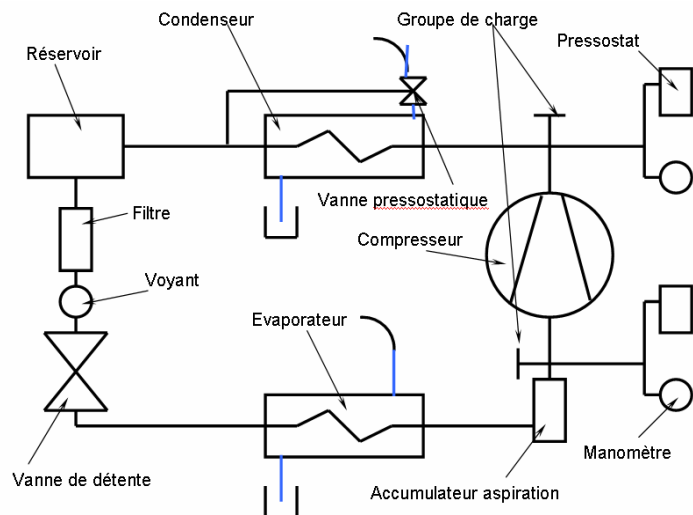


Fig.3.2.1 Installation et schéma technologique de la pompe à chaleur

Ci-dessous se trouve la liste des éléments principaux de la pompe à chaleur mise en place par M. Francesco Poretti.

3.2.1 Condenseur et évaporateur

Le condenseur permet au fluide frigorigène de transmettre son énergie thermique au liquide à chauffer.

L'évaporateur ferme la boucle du cycle thermique. Le mélange de liquide et gaz à la sortie de la vanne de détente se transforme en gaz. L'eau qui passe dans l'échangeur donne sa chaleur pour la transformation. La fiche technique se trouve en annexe 2.



Fig. 3.2.1.1 Echangeur de chaleur coaxial

3.2.2 Compresseur

Le compresseur est de type Scroll. Cette technologie permet une compression plus régulière qu'un compresseur à piston. Pour une température d'évaporation de 5°C et une température de condensation de 40°C, la puissance absorbée par le compresseur mis en place vaut 870W (valeur obtenue pour du R134a). La fiche technique se trouve en annexe 3.



Fig.3.2.2.1 Compresseur scroll

3.2.3 Détendeur thermostatique

Une vanne de détente est constituée d'un élément thermostatique (1) séparé du corps de vanne par une membrane. Un tube capillaire relie l'élément thermostatique à un bulbe (2). Afin de compenser les pertes de charges dans l'évaporateur, une contre pression est prise à la sortie de l'évaporateur et non directement au détendeur. La fiche technique se trouve en annexe 4.

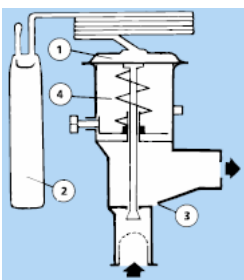


Fig. 3.2.3.1 Détendeur thermostatique

Son fonctionnement dépend de 3 pressions fondamentales:

P1: pression du bulbe exercée sur la face supérieure de la membrane (ouverture du détendeur)

P2: pression d'évaporation exercée sur la face inférieure de la membrane (fermeture du détendeur)

P3: pression du ressort exercée, elle aussi, sur la face inférieure de la membrane (fermeture du détendeur).

La régulation, assurée par le détendeur, est en fait le maintien de l'équilibre entre la pression du bulbe d'un côté de la membrane, et la pression d'évaporation additionnée de la pression du ressort du côté opposé. La précontrainte à vis du ressort permet le réglage de la surchauffe.

3.2.4 Mesure des pressions

Pour gérer le fonctionnement de l'installation il faut :

1. Deux manomètres (BP et HP) qui permettent de visualiser la pression instantanée ainsi que la température correspondante pour le fluide frigorigène. La fiche technique se trouve en annexe 5.
2. Deux capteurs de pression qui permettent d'envoyer un signal 0 - 10V pour l'acquisition de mesures. La fiche technique se trouve en annexe 6.
3. Deux pressostats qui permettent de couper l'alimentation électrique du compresseur si la pression est trop haute ou trop basse. La fiche technique se trouve en annexe 7.



Fig. 3.2.4.1 Groupe de contrôle de pression

3.2.5 Mesure des débits

L'eau, nécessaire à refroidir le condenseur et à réchauffer l'évaporateur, est branchée sur l'arrière de la machine avec des raccords rapides. Le signal donné par les débitmètres permet d'afficher le débit sur l'interface graphique du PC. Le débitmètre donne une impulsion chaque 0.25l, ce qui, on le verra plus tard, n'est pas suffisant pour une bonne acquisition de la mesure.



Fig. 3.2.5.1 Débitmètre

3.2.6 Vanne pressostatique

Le débit d'eau qui passe dans le condenseur, est réglé par une vanne pressostatique. Plus la pression augmente, plus la vanne pressostatique s'ouvre pour essayer de garder la température de préréglage.



Fig. 3.2.6.1 Vanne pressostatique

La vanne pressostatique a une plage de fonctionnement de 5 à 23 bars, c'est à dire une température de condensation entre 15 et 75°C pour du R134a. La fiche technique se trouve en annexe 8.

3.2.7 Contrôle Fréon

Afin d'assurer une bonne tenue du fluide frigorigène et des différents organes, il est nécessaire de contrôler l'humidité du gaz ou l'apparition de bulles à certains endroits de l'installation.

Le voyant indique si le fluide frigorigène contient de l'humidité. L'indicateur doit toujours être bleu foncé. La fiche technique se trouve en annexe 9.

Attention : Si on voit des bulles dans le voyant (liquide en ébullition), le fluide frigorigène dans l'installation est insuffisant.

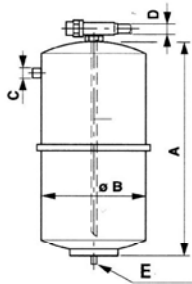
Si on a de l'humidité dans le circuit, on peut avoir des problèmes de givrage à la sortie de la vanne de détente, c'est pourquoi un filtre déshydrateur est nécessaire. La fiche technique se trouve en annexe 10.



Fig. 3.2.7.1 Filtre déshydrateur et voyant

3.2.8 Bouteille réservoir de réfrigérant liquide

Le réservoir mis en place provient du fabricant WAEKA. Il permet de contenir 1.6 dm³ de réfrigérant et supporte des pressions allant jusqu'à 28 bar. Son raccord supérieur permet un remplissage aisé du réfrigérant. Afin d'assurer une alimentation du détendeur en liquide, la sortie du réservoir capte le réfrigérant au point le plus bas.



réservoir
en tôle d'acier, noir
pression de service 28 bar
entrée raccord fixe à braser
sortie mâle 1"-14 UNF
avec vanne Rotalock à braser

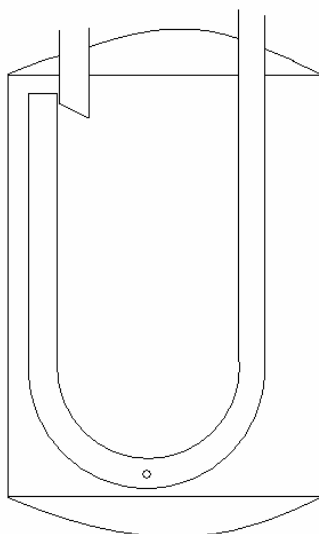
réservoirs sans voyant, avec vanne Rotalock

article	volume 100 % dm ³	entrée pouce C	sortie vanne pouce D	dimensions mm			tube plongeur Ø int. mm
				A	B	E	
113.0184A	1,6	3/8	3/8	253	100	M 8	11.3

Fig. 3.2.8.1 : Réservoir de réfrigérant.

3.2.9 Accumulateur d'aspiration

L'accumulateur d'aspiration a pour mission de protéger le compresseur d'une arrivée de liquide. Il est constitué d'une entrée supérieure sous forme de diffuseur et d'une sortie captant le gaz à son sommet. La tuyauterie interne en U est percée au point le plus bas. Ceci permet de récupérer l'huile par aspiration.



Remarque : Au démontage de l'installation, une quantité d'huile non négligeable se retrouve prisonnière de l'accumulateur. Ceci est certainement dû au manque d'aspiration lors de l'opération de vidange de l'installation.

Fig. 3.2.9.1 : Accumulateur d'aspiration

3.2.10 Mesure des températures

Toutes les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples autocollants de type K directement placés sur les conduites. Leur plage de mesure se situe entre -100 et 200 °C. L'utilisation d'un câble de compensation pour les relier à l'automate est nécessaire afin de ne pas fausser les mesures. Il doit être de la même matière que le thermocouple, soit Nickel-Chrome et Nickel. La fiche technique se trouve en annexe 11.



Fig. 3.2.10.1 Sonde thermocouple autocollante

3.2.11 Mesure de la puissance électrique consommée

Une carte électronique a été développée afin de mesurer la puissance triphasée consommée par le moteur du compresseur. Elle se base sur le principe du montage Aaron comportant deux wattmètres mesurant chacun d'eux la puissance entre une phase et une autre de référence. L'addition des deux valeurs ainsi obtenues donne la puissance totale triphasée. La fiche technique se trouve en annexe 12.

3.2.12 Acquisition des mesures

Les mesures sont enregistrées sur un PC comportant une interface LabView ainsi qu'une carte d'acquisition externe IOTech.

3.2.13 Fluide frigorigène

Le fluide frigorigène utilisé était du R134a ($\text{CH}_2\text{F}/\text{CF}_3$). C'est un gaz ne présentant pas de risque pour l'environnement. Il fait partie de la famille des hydrofluorocarbones (HFC) et ne contient donc pas de chlore, d'où son inaction sur la couche d'ozone. Ce fluide frigo sera réutilisé pour la nouvelle installation. Le R407C présente de meilleures caractéristiques thermiques, mais, de ce fait, augmente la consommation d'énergie électrique au compresseur, ce qui n'est pas notre objectif.

Point d'ébullition à pression atmosphérique : -26.4 °C

Chaleur latente de vaporisation : 216.3 kJ/Kg

Pression de saturation à 25 °C : 6.621 bar

L'utilisation du R134a exige une huile polyolester. La molécule du R134a est très petite et nécessite donc un maximum de raccords brasés.

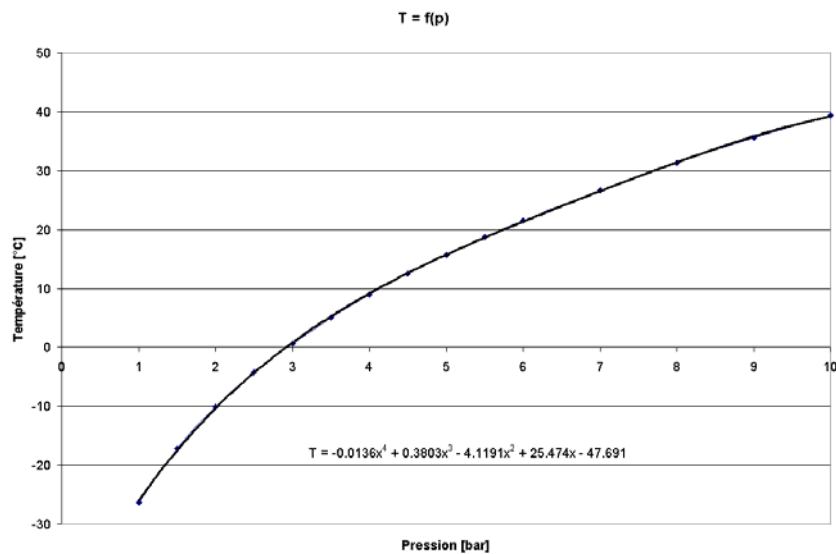


Fig. 3.2.11.1 : Courbe de température en fonction de la pression du R134a

Fluide	ODP	GWP	GWP 100	Duree de vie (ans)	AEL (ppm)	Inflammable
CO2		1	1			N
R11	1	1	3400	60	1000	N
R12	0.9	208	7300	120	1000	N
R22	0.04	0.032	1500	15	1000	O
NH3	0	0	0		25	N
R123	0.013	0.017	240	2	10	N
R134a	0	0.24	1300	15	1000	N
R404A	0	0.9	3700		1000	N
R407C	0		1500			N
R410A	0		1730			N
R502	0.15	4	5500		1000	N
R507	0		3300			N

ODP Potentiel de destruction de l'ozone (0 : sans action sur l'ozone)
GWP Potentiel de réchauffement planétaire (0 : action nulle)
GWP 100 Potentiel de réchauffement planétaire sur 100 ans
AEL Limite admissible d'exposition (plus l'AEL est faible, plus le fluide est toxique)

Fig. 3.2.11.2 : Comparaisons de plusieurs fluides frigorigènes sur l'impact environnemental

Attention : Mélangé dans de bonnes proportions à de l'air et sous une pression de 6 bar, le R134a peut devenir explosif.

3.3 Contrôle de dimensionnement

L'installation réalisée par M. Francesco Poretti fonctionne correctement. Cependant, il a été constaté, suite au contrôle de dimensionnement des conduites, que ces dernières étaient de trop faibles sections à certains endroits de l'installation. Le sous-chapitre suivant explique comment dimensionner convenablement les conduites de gaz et de liquide de fréon.

Le débitmètre d'eau du condenseur devra également être remplacé car son faible nombre d'impulsions délivrées par litre n'est pas satisfaisant.



3.3.1 Dimensionnement des conduites

3.3.1.1 Section des conduites

Afin de fournir des paramètres de fonctionnement optimaux, il faut faire spécialement attention à deux contraintes :

- La vitesse du fluide frigorigène à l'aspiration ainsi qu'au refoulement doit être suffisamment élevée pour transporter correctement l'huile, quelles que soient les conditions d'utilisation.
- La perte de charge dans les conduites doit être minimale afin de limiter au mieux les pertes thermiques.

Pour supprimer la première contrainte, il faut diminuer les sections de tuyauterie. Pour supprimer la deuxième contrainte, il faut augmenter les sections de tuyauterie. Le constat qui s'impose est qu'il faut faire un compromis entre les pertes de charge et la lubrification.

Afin de dimensionner au mieux les conduites, il existe des diagrammes ou des abaques donnant les diamètres des tuyauteries en fonction de la puissance frigorifique de l'installation.

	ASPIRATION		REFOULEMENT		LIQUIDE	
Connections	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Lyres		25 m/s		25 m/s		
Tuyauteries	4 m/s	15 m/s	4 m/s	15 m/s	0,3 m/s	1 m/s
Evaporateur	3 m/s	8 m/s				
Condenseur			3 m/s	10 m/s		

Fig. 3.2.1.1.1 : Vitesse des fluides dans les conduites (selon Tecumseh)

Il existe également des logiciels de dimensionnement. Le logiciel Solkane du fournisseur de réfrigérants Solvay-Fluor permet de dimensionner une installation complète en fonction des paramètres thermiques. C'est avec ce logiciel que la pompe à chaleur a été dimensionnée. Les résultats de calculs du logiciel pour le dimensionnement des conduites se trouvent en annexe 13.

Toutefois, on peut constater que ce logiciel préconise de diminuer la vitesse du fluide frigorigène dans les colonnes ascendantes. Ceci est totalement contradictoire avec les recommandations d'un autre fournisseur de matériel frigorifique, Tecumseh, préconisant l'augmentation de la vitesse du fluide dans les conduites ascendantes.

Etant donné le faible changement de niveau entre les différents organes – donc la faible longueur des conduites ascendantes – il fut décidé de maintenir une section constante autant à plat qu'à la verticale.



Conduite	Diamètre normalisé [pouces]	->	Diamètre extérieur [mm]	x	Epaisseur [mm]	->	Diamètre intérieur [mm]
Mesures de pression	1/4	->	6.32	x	0.62	->	5.08
Conduite de liquide	3/8	->	9.52	x	0.76	->	8.00
Conduite de refoulement	1/2	->	12.70	x	0.89	->	10.92
Conduite d'aspiration	5/8	->	15.87	x	1.01	->	13.85

Fig. 3.2.1.1.2 : Récapitulatif des sections des conduites

3.3.1.2 Longueur des conduites

L'installation a été entièrement dessinée sur Inventor10 et permet donc de déterminer de manière exacte la longueur de chaque conduite. Cette opération permet de commander la quantité voulue de conduites, sans se retrouver ni en manque, ni en surplus exagéré. Une marge est tout de même observée afin de pouvoir opérer des modifications en cours de fabrication ou de palier à un accident de brasage. En annexe 14 se trouve le récapitulatif des longueurs de conduite.

3.3.1.3 Coudes, Tés et réductions

Afin d'éviter de couder des tubes et de les écraser, il est possible de mettre des raccords à 45° ou à 90°. De plus, à chaque embranchement il est nécessaire de placer un raccord en T. Lors du passage d'une section à l'autre – par exemple adaptation de la section d'une conduite 1/2" à un organe de section 3/8" – il faut mettre un réducteur. La liste des coudes, tés, et réducteur s'est opérée de la même manière que pour les conduites. En annexe 15 se trouve le récapitulatif des raccords.

3.4 Modifications envisagées

Les conduites doivent donc être remplacées. Mais de nombreuses autres modifications doivent être apportées. En effet, l'optimisation de la pile à combustible passe par son maintien à une faible température et donc à sa ventilation. Il devient alors intéressant de remplacer l'évaporateur à eau par un évaporateur ventilé qui permettra de récupérer l'air refroidi pour maintenir la pile à une température optimale. D'autre part, pour adapter la consommation d'énergie thermique à l'apport fluctuant d'énergie électrique fourni par la pile à combustible, il faut pouvoir adapter le point de fonctionnement de la pompe à chaleur. Le débit d'eau au condenseur, le débit d'air à l'évaporateur ainsi que la détente de gaz doivent être variables. Pour se faire, le remplacement des organes pressostatique et thermostatique – point de fonctionnement unique – doit être effectué au profit de composants électroniques pilotables à distance. De plus, afin de pouvoir calculer et donner des consignes à ces différents organes, un automate programmable (API) muni d'une interface homme-machine (IHM) devient nécessaire.

Le choix de ces organes s'est effectué lors d'une étude préliminaire. En voici les résultats :

3.4.1 Evaporateur ventilé

Le remplacement de l'évaporateur à eau s'est dirigé vers un évaporateur ventilé à débit d'air variable. Il faut donc un ventilateur qui puisse être réglé en vitesse. Le choix s'est directement focalisé sur le catalogue de l'entreprise Charles Hasler AG qui avait fourni la plus grande partie du matériel en place sur la pompe à chaleur.

Pour la puissance thermique désirée, le choix s'est porté sur le modèle de LU-VE Contardo S2HC 36-50. Sa puissance thermique est de 3550 W pour un ΔT de 10 °C. Il comporte un ventilateur monophasé consommant environ 1 A. Afin de le piloter, un régulateur de vitesse est nécessaire. Le choix s'est porté sur le variateur de Carel (également fourni par Charles Hasler AG) FCS1022300 permettant un courant max de 2 A. La commande de vitesse se fait en 0-10V.



Fig. 3.4.1.1 : Evaporateur ventilé

Les données techniques de l'évaporateur ainsi que du variateur se trouvent en annexe 16 et 17.

3.4.2 Détendeur électronique

Dans la gamme EEV, Carel propose un logiciel tournant à l'aide d'un Run Time Labview permettant de déterminer quelle est la vanne de détente la plus propice. Il en ressort que la vanne de type E2V-09 correspond tout à fait à l'application.

De plus, Carel propose différents régulateurs et drivers de vanne. Le driver de type EVD4 permet une entrée en 0-10V, commandant directement l'ouverture de la vanne de détente.



Fig. 3.4.2.1 Détendeur E²V + pilote EVD4

Les données techniques du détendeur ainsi que de son driver se trouvent en annexe 18 et 19.

3.4.3 Vannes magnétiques

La vanne magnétique sur la ligne de réfrigérant liquide reste en place. Il faut cependant ajouter une deuxième vanne à la sortie du compresseur afin d'éviter le retour de liquide.

Leur fiche technique se trouve en annexe 20.

3.4.4 Vanne à eau pilotée

D'après les essais réalisés lors des laboratoires sur la pompe à chaleur, il s'est avéré que le débit à l'entrée du condenseur oscillait entre 100 et 400 l/h. Afin de remplacer la vanne pressostatique, la vanne de Belimo R207K ainsi que son pilote TRD24-SR ont été choisis.



Fig. 3.4.4.1 : Vanne Belimo

Les données techniques de la vanne et de son pilote se trouvent en annexe 21.

3.4.5 Débitmètres

Le débitmètre choisi est une mini turbine permettant un débit allant de $8.33 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ à $2.66 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ – 3 l/h à 960 l/h. Il fournit 150 impulsions/litre. C'est un capteur de type PNP ou NPN (à choix) qui transmet le train d'impulsion. Il est à noter qu'une carte de comptage devient nécessaire sur l'automate programmable afin de traiter convenablement les informations recueillies par ce capteur.



Fig. 3.4.5.1 : Débitmètre B.I.O-Tech

Les données techniques de la vanne et de son pilote se trouvent en annexe 22.

4 Design de la nouvelle installation

Le nombre relativement élevé de changements à opérer sur l'installation a rendu obligatoire l'élaboration d'une nouvelle mise en place des composants. En effet, l'évaporateur ventilé nécessite un grand espace ainsi qu'un accès libre à l'aspiration et au reflux d'air. Une nouvelle construction fut donc développée autour de cet élément. Les principaux composants étant virtuellement disposés en l'air sur Autodesk Inventor, un châssis fut développé autour afin de les supporter. Il est à noter également que l'installation se doit déplaçable le plus aisément possible.

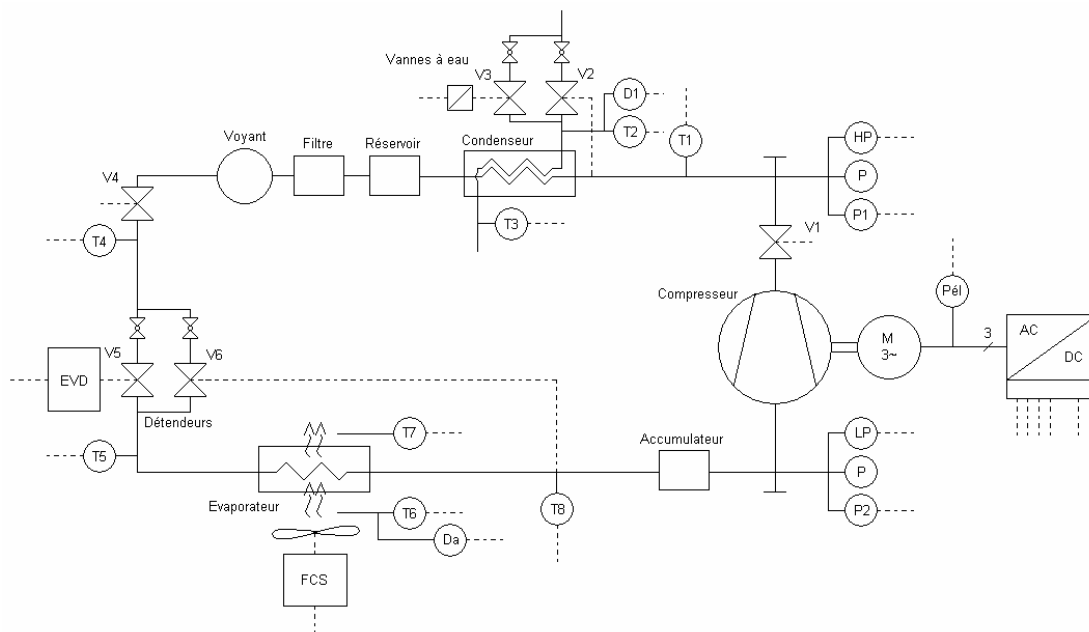


Fig. 4.1 : Schéma de processus

4.1 Placement des éléments principaux

Le premier élément à être placé est l'évaporateur. Son débit d'air relativement élevé nécessite, pour des raisons de confort d'utilisation, de le placer soit en hauteur, soit assez bas, de façon à ce que l'utilisateur ne se retrouve pas avec le visage dans un flux d'air constant. La sortie d'air de l'évaporateur fut donc orientée vers l'arrière de l'installation. L'évaporateur devant être suspendu, il fut décidé de le placer en position basse. Il est à noter également, que l'espace se situant face à son entrée est réservé pour la pile à combustible.

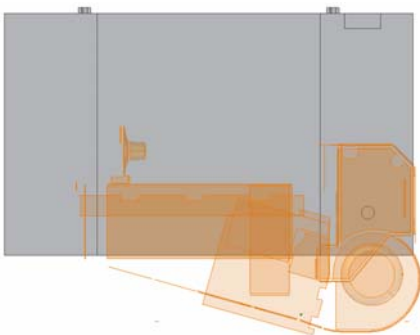


Fig. 4.1.1 : Evaporateur et pile à combustible

Le compresseur pouvant être placé soit plus haut, soit plus bas que l'évaporateur, il fut décidé de le mettre à la même hauteur que les pieds de la pile à combustible – soit la partie compresseur à la même hauteur que l'évaporateur. Leur placement côte à côte donne un encombrement total de moins d'un mètre, ce qui est tout à fait tolérable.

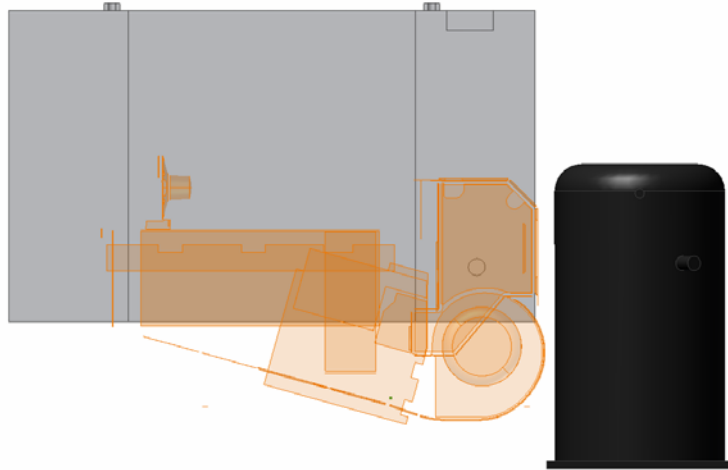


Fig. 4.1.2 : Emplacement du compresseur

Une place fut réservée devant le compresseur pour l'accumulateur d'aspiration. Cet élément doit en effet se trouver le plus proche possible du compresseur afin d'éviter les coups de liquide.

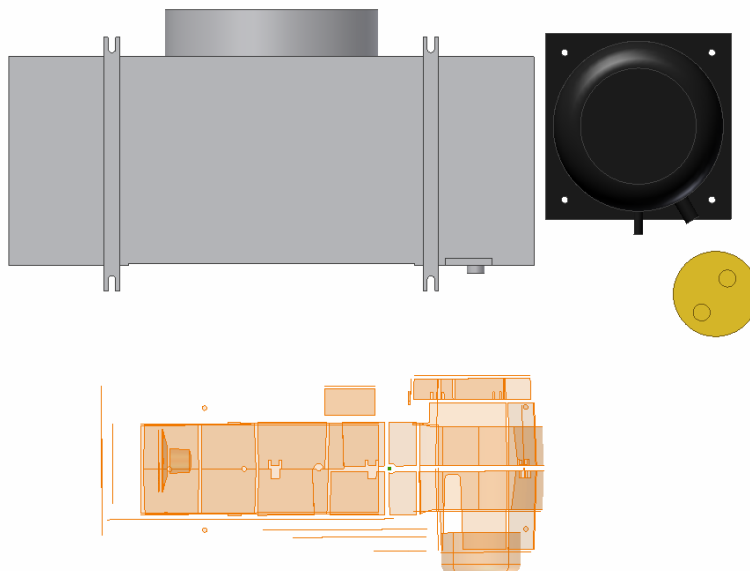


Fig. 4.1.3 : Emplacement de l'accumulateur d'aspiration

A ce stade, l'encombrement total est de 1x0.7x 0.6 mètres. Il fut alors décidé de se limiter à la taille d'une table afin de passer les portes lors d'un éventuel déplacement de l'installation. Les éléments restants doivent donc être placés à un niveau supérieur. Le châssis permettant la pose de ces premiers éléments doit maintenant être développé.

4.2 Elaboration du châssis

Le châssis fut donc développé sur le model d'une table conventionnelle de 1 x 0.7 x Y mètres. La hauteur reste à définir en fonction des éléments de l'étage supérieur. Une base en tube carré de 30x2x30mm fut dessinée afin de supporter l'évaporateur suspendu. Quatre pieds ainsi qu'un étage inférieur permettant la fixation du compresseur et de la pile à combustible furent ajoutés.

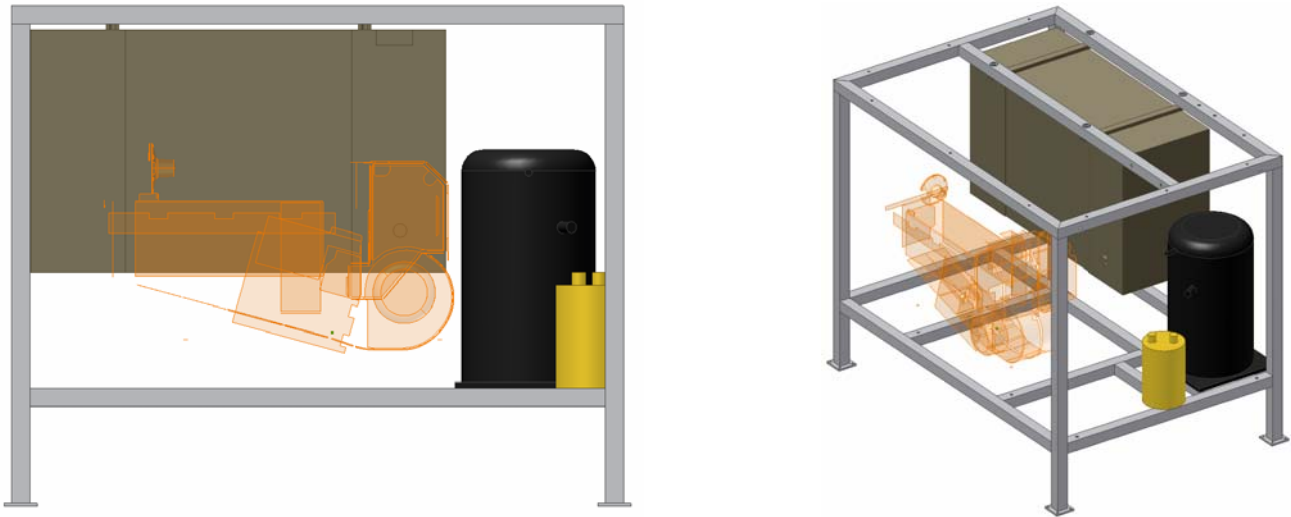


Fig. 4.2.1 : Châssis et éléments de l'étage inférieur

Les dessins des pièces du châssis ainsi que les plans de montage se trouvent en annexe 23.

4.3 Placement des éléments secondaires

A ce stade, l'installation se présente comme une table ayant une surface supérieure totalement libre. L'emplacement des éléments restant – condenseur, réservoir de fréon liquide, déshydrateur, voyant d'humidité et de gaz, vannes magnétiques, détendeur, vanne à eau – doit être fait bloc par bloc. La ligne de réfrigérant liquide fut dessinée en premier en respectant les règles d'emplacement des éléments – montage vertical du déshydrateur ainsi que du voyant de gaz dans une colonne descendante à la suite de la bouteille réservoir de réfrigérant liquide.

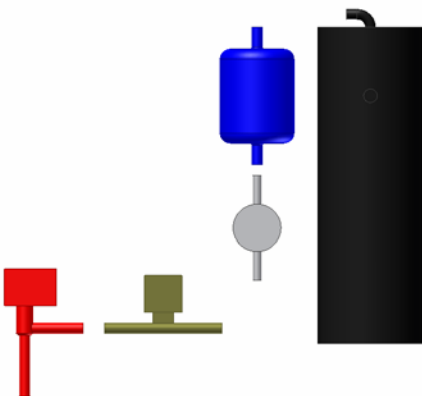


Fig. 4.3.1 : Eléments de la ligne liquide

Le condenseur ainsi que le détendeur furent ensuite placés de chaque côté. L'espace à disposition restant amena la réflexion suivante : Afin de rendre l'installation multi-usages, pourquoi ne pas laisser les éléments pressostatique et thermostatique en place ? Après plusieurs réflexions de base sur les différents modes de fonctionnement que cela apporte et sur la régulation d'une telle installation, il fut décidé de mettre en parallèle sur le détendeur électronique l'organe thermostatique et en parallèle sur la vanne à eau pilotée, l'organe pressostatique. L'ajout de vannes de sélection est alors nécessaire. Les vannes à main se trouvant sur l'installation développée par M. Poretti sont récupérées pour la sélection de la vanne à eau. Des vannes spécialement conçues pour la sélection de circuits de fréon furent choisies dans le catalogue de Charles Hasler. Il s'agit de la vanne BVA dont les caractéristiques se trouvent en annexe 24.



Fig. 4.3.2 : Vanne à main pour l'eau



Fig. 4.3.3 : Vanne BVA pour fréon

Des raccords étanches furent mis en place pour l'arrivée et l'évacuation de l'eau afin de limiter les risques dus à l'électricité. Le débitmètre fut placé le plus proche possible du condenseur afin de limiter les turbulences engendrées par les vannes à eau.

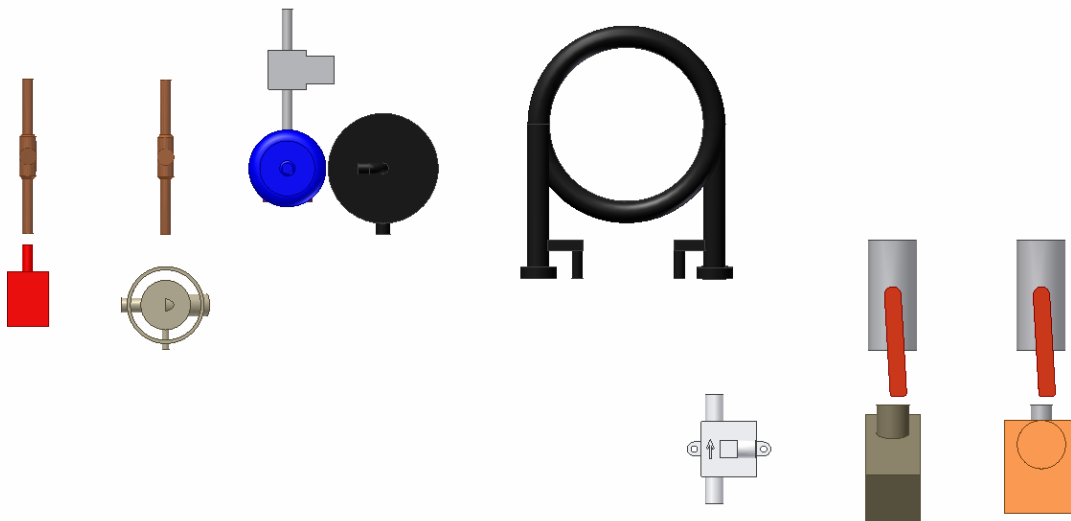


Fig. 4.3.4 : Position des éléments de l'étage supérieur



Fig. 4.3.5 : Vue d'ensemble des éléments de l'étage supérieur

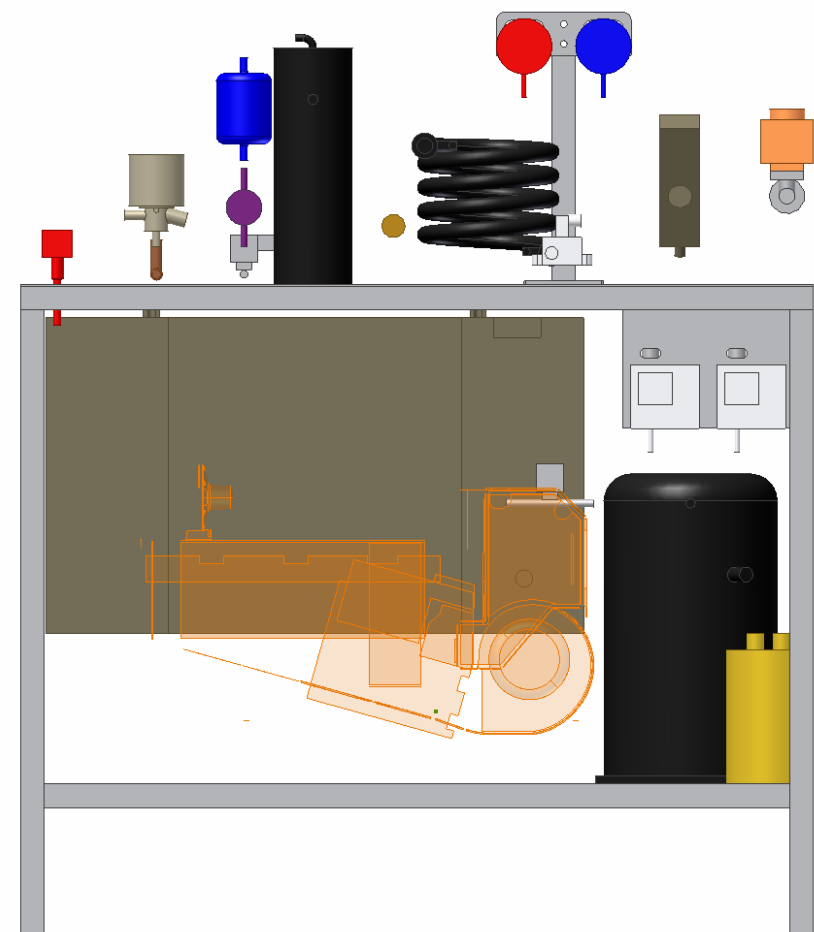


Fig. 4.3.6 : Vue d'ensemble de l'installation

4.4 Design de la tuyauterie

Les éléments furent placés de manière optimale sur le châssis et la tuyauterie fut développée de façon à limiter les pertes de charges – limiter le nombre de coudes – et à assurer le mieux possible le retour de l'huile au compresseur.

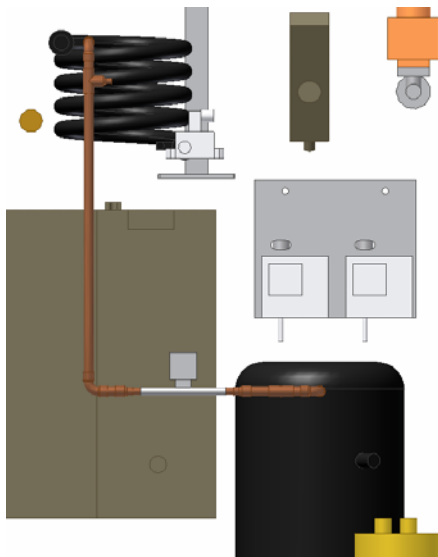


Fig. 4.4.1 : Tuyauterie de refoulement

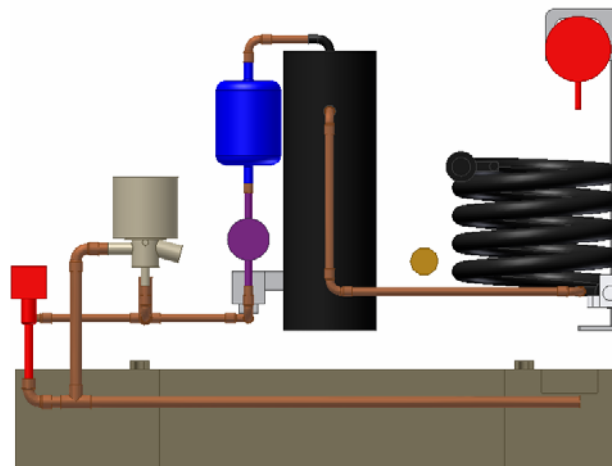


Fig. 4.4.2 : Tuyauterie de fréon liquide

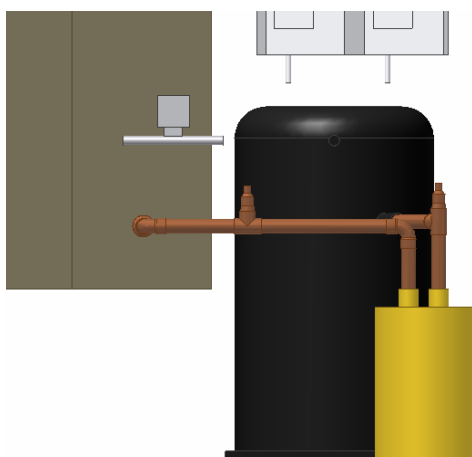


Fig. 4.4.3 : Tuyauterie d'aspiration

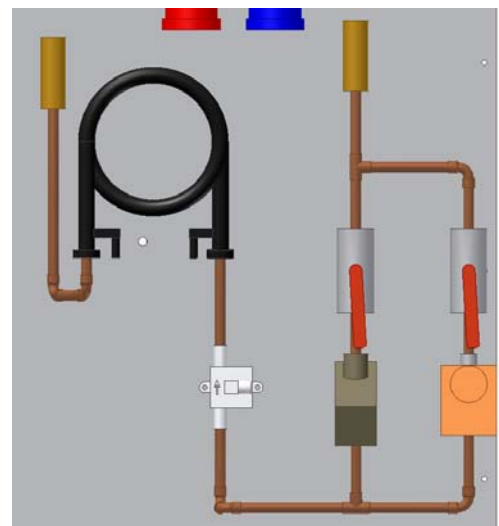


Fig. 4.4.4 : Tuyauterie d'eau

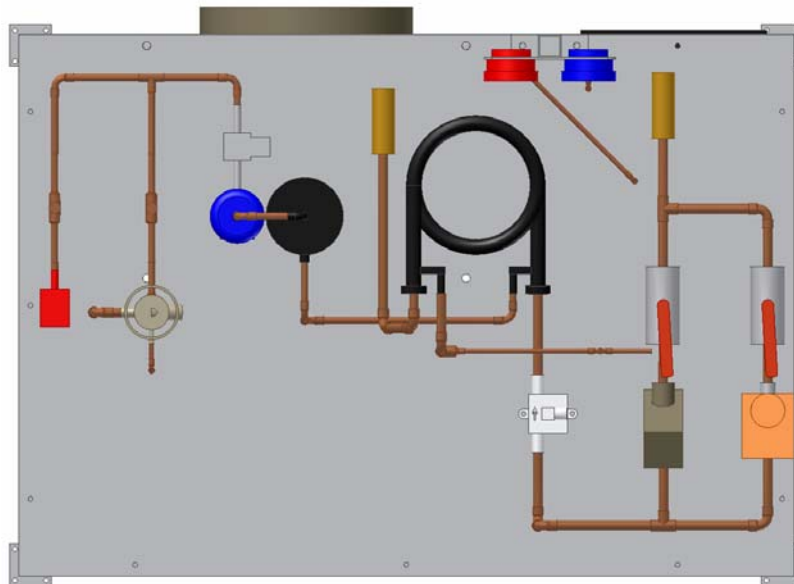


Fig. 4.4.5 : Tuyauterie vue de dessus

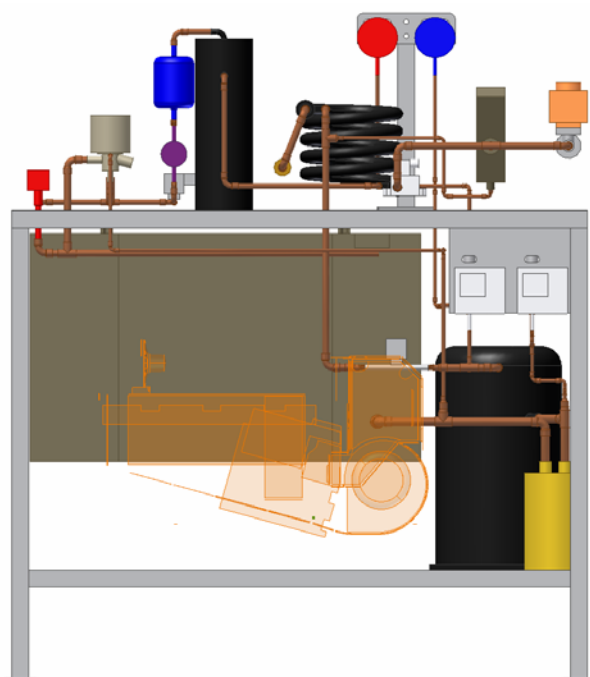


Fig. 4.4.6 : Tuyauterie vue de face

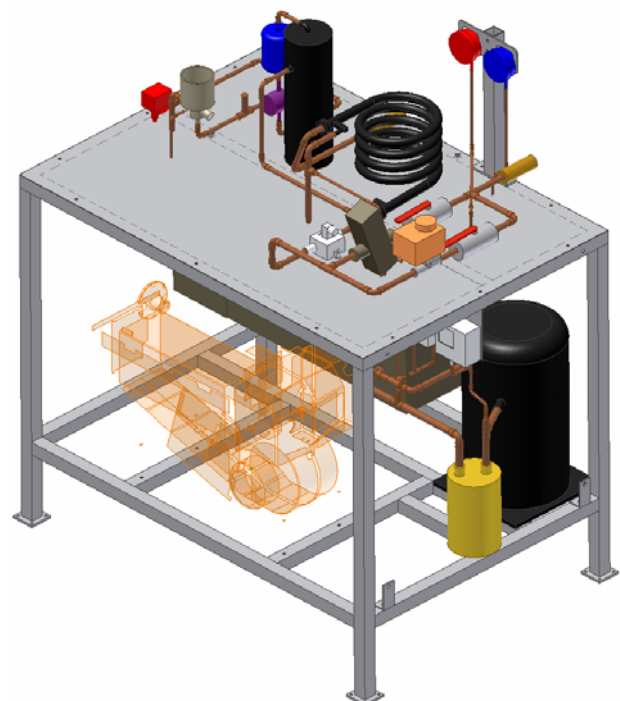


Fig. 4.4.7 : Tuyauterie

Le dessin de la vue d'ensemble de l'installation avec sa liste de composants se trouve en annexe 25.



5 Modes de fonctionnement

De part la mise en place des éléments conventionnels à point de fonctionnement fixe (pressostatique et thermostatique) ainsi que de leur mise en parallèle d'éléments électroniquement pilotable, il est envisageable d'utiliser l'installation dans des buts différents. Par exemple, pour un laboratoire où seule la pompe à chaleur est étudiée, la partie réglage peut-être simplifiée en utilisant les organes conventionnels et une alimentation en énergie électrique également conventionnelle. Cependant, si l'étude se porte plus précisément sur l'optimisation énergétique de la pompe à chaleur associée à la pile à combustible, alors l'utilisation des éléments pilotables devient obligatoire.

5.1 Conventionnel

Un point de fonctionnement fixe est donné sous forme de consigne de débit d'air (vitesse de rotation du ventilateur) à l'évaporateur. Le détendeur thermostatique règle la détente du réfrigérant afin de maintenir une surchauffe constante à la sortie de l'évaporateur (réglage de la surchauffe par le biais d'une vis directement sur l'organe). La vanne à eau pressostatique maintient une pression constante dans le circuit haute pression en agissant sur le débit d'eau – et donc la puissance absorbée – du condenseur afin d'équilibrer les puissances entre évaporateur et condenseur.

5.1.1 Avantages

Ce mode de fonctionnement à l'avantage d'être extrêmement simple à mettre en place. En effet, dans ce cas de figure, l'automate devient quasi inutile et ne sert plus qu'à faire de l'acquisition de mesures.

5.1.2 Inconvénients

Le point de fonctionnement est fixe. Afin de le modifier, l'intervention d'une personne compétente sur le logiciel de programmation de l'automate est nécessaire pour modifier la consigne de vitesse du ventilateur de l'évaporateur. On peut toutefois varier dans de faibles proportions la puissance fournie au condenseur via la précontrainte du ressort de la vanne pressostatique.

5.2 Régulé électroniquement

L'interface homme-machine prend dans ce cas de figure une place importante. Elle permet de rentrer les valeurs de point de fonctionnement. En fonction des paramètres entrés par l'utilisateur dans l'interface homme-machine (HMI), l'automate assigne des consignes de vitesse au ventilateur de l'évaporateur, d'ouverture à la vanne à eau du condenseur, de surchauffe au détendeur thermostatique et aussi de limitation de puissance au convertisseur DCAC de la pile à combustible.

5.2.1 Avantages

Ce mode de fonctionnement permet toutes les fantaisies de réglage de puissances. Il permet aussi bien d'étudier le fonctionnement de la pompe à chaleur que de travailler sur l'optimisation énergétique du groupe pile à combustible - pompe à chaleur.

5.2.2 Inconvénients

L'utilisation d'une interface HMI devient obligatoire pour entrer les diverses consignes et contrôler le fonctionnement de l'installation.



5.3 Mixte

Il est tout à fait envisageable de travailler de façon mixte sur cette installation. On peut en effet utiliser le détendeur thermostatique (surchauffe du réfrigérant à l'évaporateur fixe) et travailler quand-même sur une adaptation de puissance en pilotant le débit d'air à l'évaporateur et le débit d'eau au condenseur.

5.4 Alimentation électrique

L'alimentation en énergie électrique doit se faire par le biais de la pile à combustible. Cependant, pour des raisons inhérentes au développement de cette installation, une deuxième source d'énergie est disponible. En effet, il est possible de commuter l'alimentation électrique de la pile au réseau. Ceci permet d'effectuer des tests sans risquer d'endommager la pile et de pratiquer des laboratoires sans user inutilement la pile – durée de vie limitée à 1500 heures pour le modèle à disposition dans l'école.

5.5 Récapitulatif

Il y a donc trois paramètres qui doivent être pris en considération pour la gestion des différents modes de fonctionnement : le type de détendeur, de vanne à eau et d'alimentation électrique. Avec les deux possibilités liées à chacun de ces organes, l'installation possède 8 modes de fonctionnement.

Mode 0 : - Vanne à eau pressostatique
- Détendeur thermostatique
- Alimentation réseau

Mode 4 : - Vanne à eau pressostatique
- Détendeur thermostatique
- Alimentation pile

Mode 1 : - Vanne à eau pilotée
- Détendeur thermostatique
- Alimentation réseau

Mode 5 : - Vanne à eau pilotée
- Détendeur thermostatique
- Alimentation pile

Mode 2 : - Vanne à eau pressostatique
- Détendeur piloté
- Alimentation réseau

Mode 6 : - Vanne à eau pressostatique
- Détendeur piloté
- Alimentation pile

Mode 3 : - Vanne à eau pilotée
- Détendeur piloté
- Alimentation réseau

Mode 7 : - Vanne à eau pilotée
- Détendeur piloté
- Alimentation pile

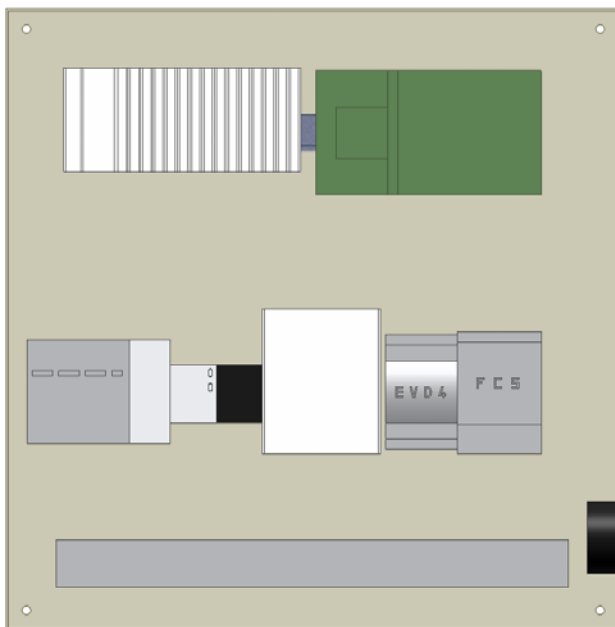
Les modes principalement visés sont bien entendus les modes 0 et 7 correspondants aux fonctionnements conventionnel et régulé électroniquement présentés dans les chapitres 5.1 et 5.2. Le mode 0 apparaît comme le mode par défaut qui permet une utilisation exempt d'interface homme-machine. Les modes permettant une adaptation du point de fonctionnement sont ceux qui font intervenir la vanne à eau pilotée. Ce sont donc les modes 1, 3, 5 et 7.

Attention: Les modes 4 et 6 ne sont pas accessibles, car la régulation de puissance thermique n'est pas possible, et donc la consommation d'énergie électrique n'est pas contrôlable – ce qui est une nécessité avec la pile à combustible.

6 Armoire électrique

Afin de rendre l'installation encore plus paramétrable, il fut décidé de non seulement se donner le moyen de passer d'une source d'alimentation de puissance électrique à une autre, mais également de pouvoir commuter les sources d'énergies électriques de commande. L'alimentation globale de l'installation se fait donc par le biais de trois commutateurs de type 1-0-2. Il devient alors possible de choisir les sources du 400V triphasé nécessaire au compresseur, du 230V monophasé nécessaire au ventilateur de l'évaporateur et du 24Vdc nécessaire à l'automate programmable et aux organes de contrôle.

L'alimentation électrique provenant du réseau est contrôlée par un disjoncteur triphasé avec sectionneur de neutre. Les deux sources d'alimentation 230V monophasées passent par un disjoncteur différentiel de protection FI afin de protéger les utilisateurs des prises de courants des dangers dus à l'eau et ainsi prévenir l'électrocution.



De gauche à droite et de haut en bas,
l'armoire comporte :

- Automate Wago
- Carte de mesure de puissance triphasée
- Disjoncteur triphasé
- Disjoncteur FI
- Disjoncteur moteur
- Contacteur moteur
- Pilote de détendeur EVD4
- Pilote de ventilateur FCS
- Bornier
- Prise triple 230V

Fig. 6.1 : Armoire électrique

Le 400 V triphasé et le 230V monophasé peuvent provenir soit du réseau, soit de la pile à combustible via le convertisseur DCAC – commutateur S10 et S20.

Le 24Vdc peut provenir soit des batteries de la pile à combustible (dans le cas d'un stockage d'énergie dans des batteries de grandes capacités), soit d'une alimentation ACDC 230-24V alimentée par le réseau – commutateur S30.

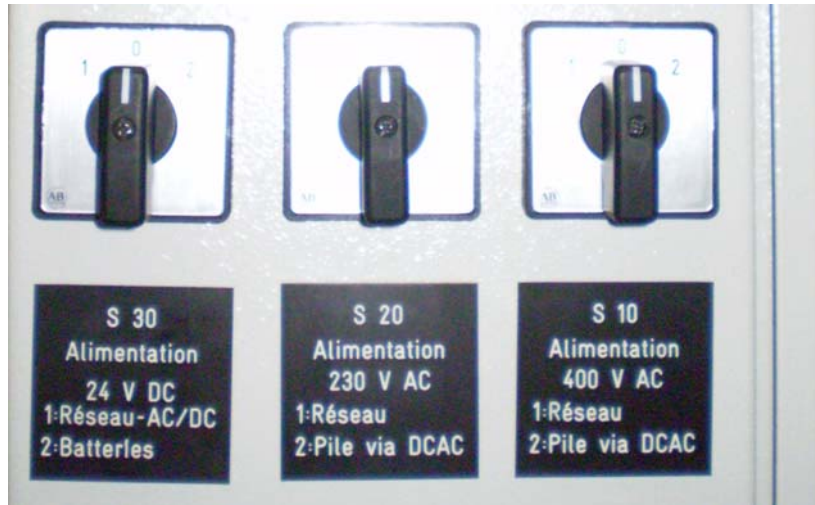


Fig. 6.2 : Commutateurs d'alimentation électrique

La mise en et hors service de l'installation peut se faire soit par l'interface HMI soit par deux boutons poussoir – S1 et S2 – sur l'armoire électrique. La limitation de puissance peut également se commander de manière locale via un potentiomètre monté sur l'armoire électrique. Le montage donnant une commande 0-10V par potentiomètre alimenté en 24Vdc se trouve en annexe 26.

L'interrupteur S100 permet d'enclencher le dégivrage de l'évaporateur. Il est à noter que l'alimentation de ce dernier se fait uniquement par le réseau et non par la pile à combustible à cause de la grande puissance consommée par le corps de chauffe.



Fig. 6.3 : Organes de commande montés sur l'armoire électrique.



Le code de couleurs suivant a été respecté pour le câblage de l'armoire :

1. Force

- Phase 1 - L1 : Noir
- Phase 2 - L2 : Rouge
- Phase 3 - L3 : Blanc
- Neutre - N : Bleu clair
- Terre - PE : Jaune-vert

2. Commande

- + 24 V : Rouge
- 0 V : Bleu foncé
- + 24 V coupé : Rouge-blanc
- 0...10 V : Violet
- Référence du 0...10V : Violet-blanc

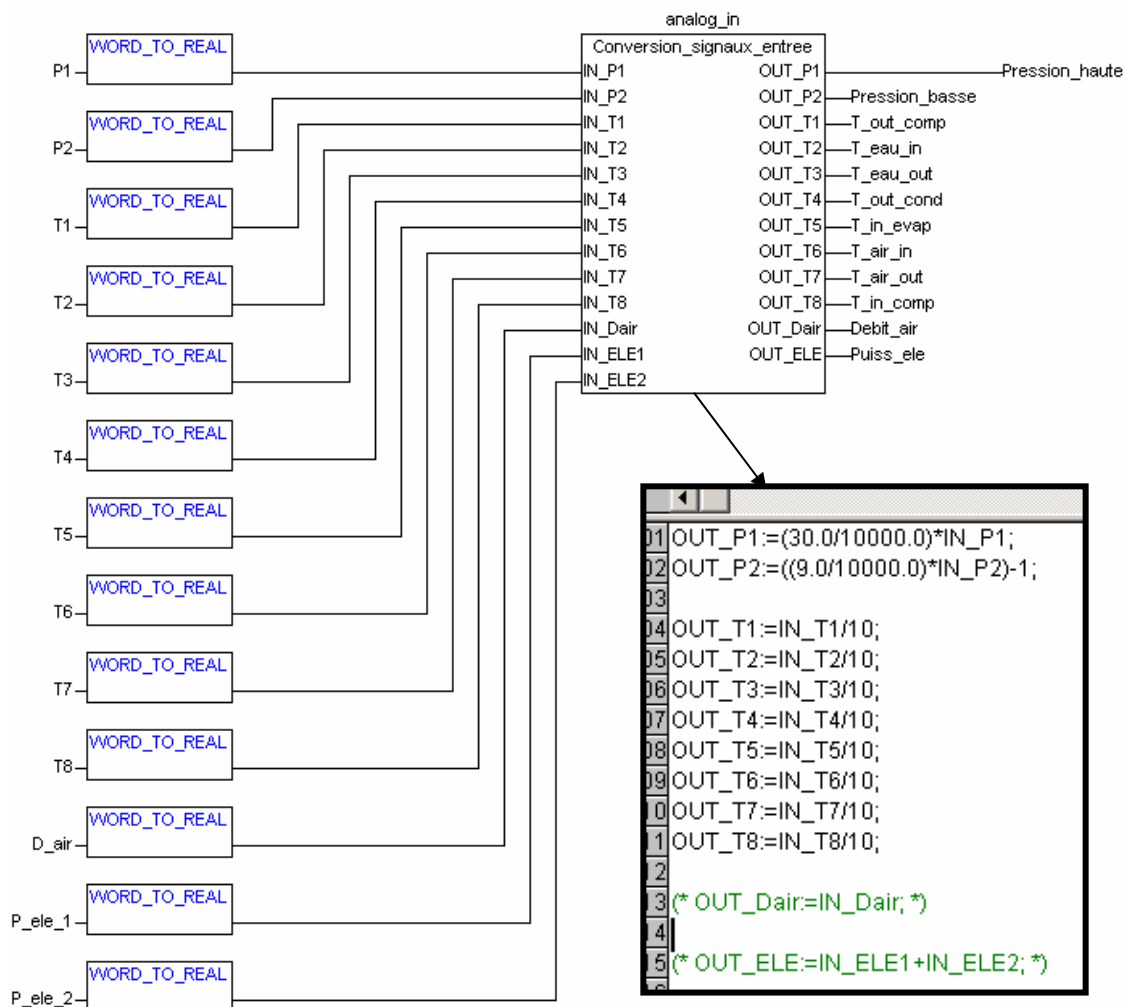
Tous les schémas électriques se trouvent en annexe 27.

7 Programmation API

La programmation de l'automate permet non-seulement de commander l'installation, mais aussi d'acquérir des valeurs analogiques ou numériques représentant l'état de l'installation et les grandeurs physiques mesurées. Le programme a été développé en plusieurs parties.

7.1 Conversions d'échelles

La première consiste à acquérir les mesures et de convertir les mots de données sous un format compréhensible pour l'utilisateur. Il a donc fallu créer un bloc transformant les signaux 0...10V en grandeurs physiques.



Remarque : Les cartes d'entrées transmettent leurs informations sous forme de mots. Une conversion en un type Réel à virgule flottante devient nécessaire pour un affichage cohérent des valeurs. Cette conversion est faite par le biais du bloc WORD_TO_REAL.

Fig. 7.1.1 : Interface de conversion d'échelle pour les entrées analogiques



A l'inverse, il a également fallu transformer les grandeurs physiques entrées par l'utilisateur de l'interface graphique en grandeurs compréhensibles pour l'automate et ses cartes de sorties. Les valeurs de sorties proviennent de plusieurs endroit et rend obligatoire l'ajout de portes OU. Celles-ci nécessitent une entrée de type WORD ou BOOL ce qui a rendu nécessaire l'ajout de bloc de conversion juste devant et derrière elles.

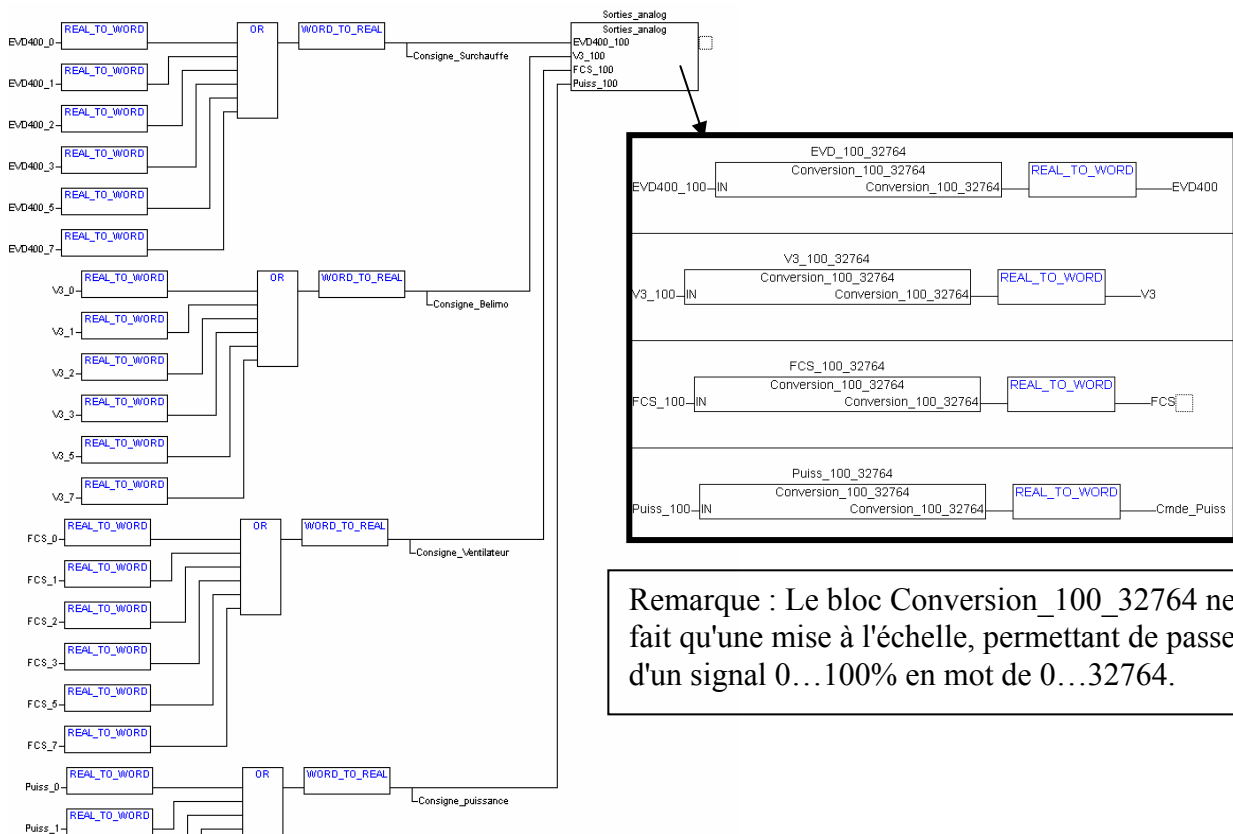


Fig. 7.1.2 : Interface de conversion d'échelle pour les sorties analogiques

Les sorties digitales ne demandent, elles, pas d'attention particulière. Seul leur verrouillage est important afin de mettre l'installation en sécurité et ne pas créer de démarrages intempestifs.

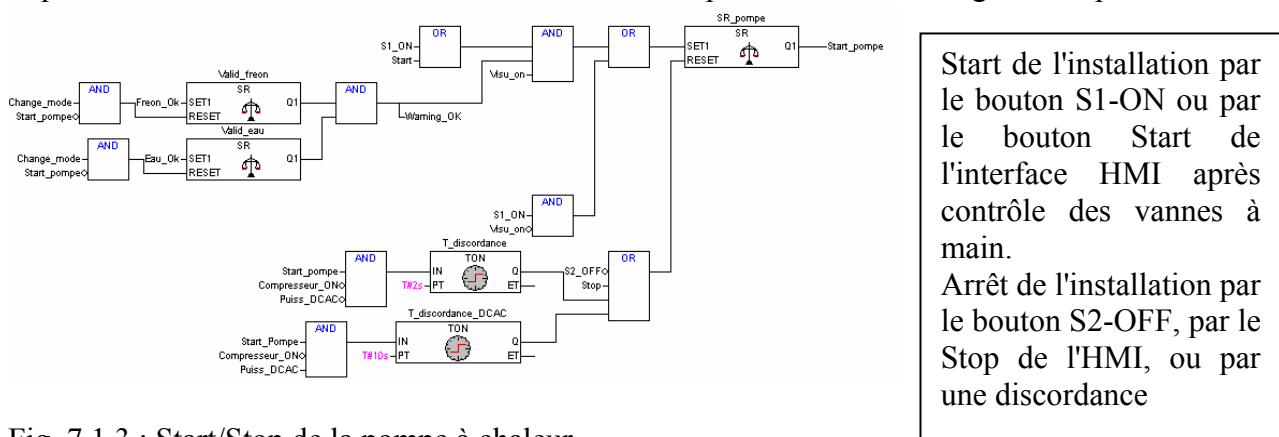


Fig. 7.1.3 : Start/Stop de la pompe à chaleur



7.2 Gestion des modes

La gestion des modes passe par la détection des différents paramètres qui les différencient, soit le type de vanne à eau, le type de détendeur et le type d'alimentation électrique. Ce dernier paramètre est automatiquement détecté via un contact sur le commutateur de puissance S10. Les autres paramètres doivent être entrés manuellement via l'interface homme-machine.

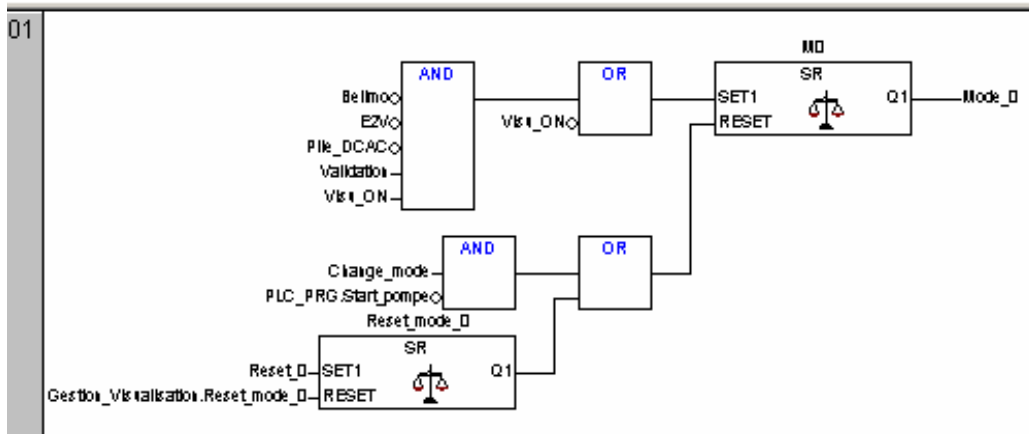


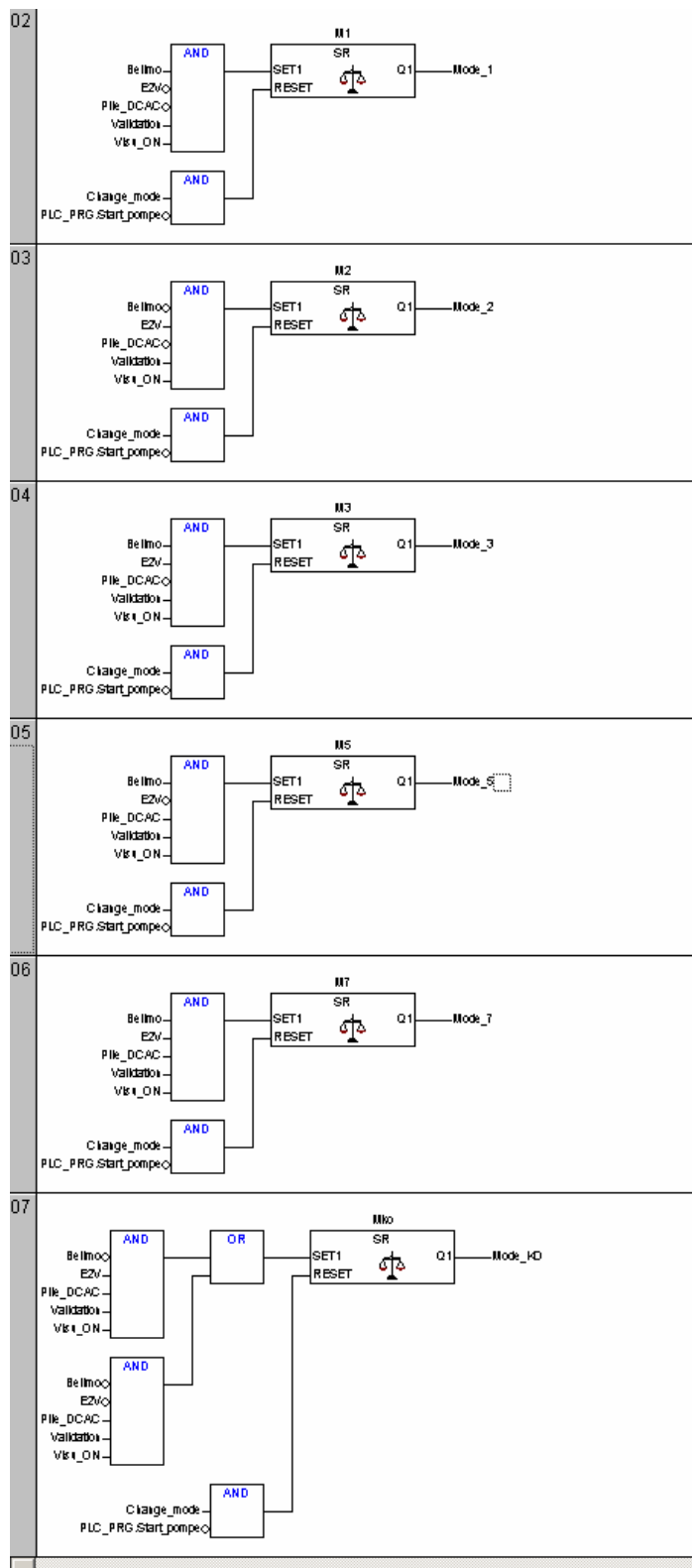
Fig. 7.2.1 : Sélection du Mode 0

Le mode 0 a la particularité de fonctionner avec ou sans l'interface homme machine. Il faut donc détecter si l'interface est enclenché ou non. Ceci se fait lorsque l'utilisateur clique sur le bouton "Entrer" de la première fenêtre. La variable "Visu_ON" est alors mise à 1. Le reset du mode 0 se fait par la détection de la fenêtre du choix de mode.



Fig. 7.2.2 : Fenêtre d'accueil

Tous les autres mode ne peuvent être sélectionnés que si la variable Visu_ON (preuve de l'utilisation de l'interface HMI) est à 1.



Remarque :

Un changement de mode en cours de fonctionnement n'est pas possible.

La sélection de paramètres entrainant un mode incorrect (modes 4 et 6) génère une alarme à l'utilisateur lui demandant de changer de paramètres.

Fig. 7.2.3 : Bloc de sélection des modes



Chaque mode est ensuite implémenté de façon à fonctionner selon le cahier des charges suivant :

7.3 Mode 0

Alimentation électrique via le réseau
Vanne à eau pressostatique
Détendeur thermostatique

Le mode 0 fonctionne sur un point fixe. Il n'y a aucun réglage de puissance possible. Le ventilateur a une consigne de vitesse non modifiable par l'utilisateur. Afin d'éviter tout problème, le détendeur électronique ainsi que la vanne à eau pilotée ont leur consigne à 0 – organe fermé.

```
001 FUNCTION_BLOCK Mode0
002 VAR_INPUT
003   Activation : BOOL;
004 END_VAR
005 VAR_OUTPUT
006   surchauffe : REAL;
007   ouverture_vanne : REAL;
008   ventilateur : REAL;
009   Puiss : REAL;
010
011   validation : BOOL;
012   DCAC : BOOL;
013 END_VAR
014 VAR
015 END_VAR
016
001 IF Activation = TRUE THEN
002
003   surchauffe:=0;
004   ouverture_vanne:=0;
005   ventilateur:=80;
006   validation:=TRUE;
007
008 ELSE
009   surchauffe:=0;
010   ouverture_vanne:=0;
011   ventilateur:=0;
012   validation:=FALSE;
013 END_IF
014
015 Puiss:=0;
016 DCAC:=FALSE;
017
```

Fig. 7.3.1 : implémentation du Mode 0

Remarque : La valeur de la consigne fixe de vitesse du ventilateur – Ventilateur – doit être déterminée par des essais.



7.4 Mode 1

Alimentation électrique via le réseau
Vanne à eau pilotée
Détendeur thermostatique

Ce mode permet le réglage de la puissance consommée. L'utilisateur introduit une consigne de puissance électrique max qu'il veut atteindre. Un pré-réglage de débit se fait par le biais de la vanne à eau pilotée et d'une commande à priori. Une fois le débit atteint, le compresseur et le ventilateur s'enclenchent. La mesure de puissance électrique consommée permet ensuite un réglage fin du point de fonctionnement par le biais du débit d'eau et de la vitesse du ventilateur grâce à une régulation de type PID.

7.5 Mode 2

Alimentation électrique via le réseau
Vanne à eau pressostatique
Détendeur électronique

Ce mode de fonctionnement est identique au mode 0, à la nuance près que l'utilisateur peut faire varier la surchauffe du gaz à la sortie de l'évaporateur. Il nécessite donc, en plus du mode 0, une consigne permettant à l'utilisateur de donner une valeur de surchauffe au détendeur électronique.

7.6 Mode 3

Alimentation électrique via le réseau
Vanne à eau pilotée
Détendeur électronique

Ce mode est un mélange des modes 1 et 2. En effet, les réglages de la puissance électrique et de la surchauffe se font de la même manière que pour les modes 1 et 2.

7.7 Mode 5

Alimentation électrique via la pile à combustible
Vanne à eau pilotée
Détendeur thermostatique

Ce mode permet le réglage de la puissance consommée. L'utilisateur introduit une consigne de puissance électrique max qu'il veut atteindre. Un pré-réglage de débit se fait par le biais de la vanne à eau pilotée et d'une commande à priori. Une fois le débit atteint, le compresseur et le ventilateur s'enclenchent. La mesure de puissance électrique consommée permet ensuite un réglage fin du point de fonctionnement par le biais du débit d'eau et de la vitesse du ventilateur grâce à une régulation de type PID.



Dans ce mode, la demande en énergie peut apparaître comme étant plus importante que la capacité de la pile à combustible. L'automate doit donc adapter lui-même le point de fonctionnement de la pompe à chaleur en fonction de la mesure de puissance consommée. En effet, si cette valeur chute en dessous de la valeur de consigne malgré les réglages de l'installation, cela signifie que la tension d'entrée chute et que la pile à combustible sature. Il faut donc diminuer le point de fonctionnement de la pompe à chaleur et en avertir l'utilisateur.

7.8 Mode 7

Alimentation électrique via la pile à combustible

Vanne à eau pilotée

Détendeur électronique

Ce mode est identique au mode 5, mais permet en plus de faire varier la valeur de la surchauffe du gaz à la sortie de l'évaporateur.

De par le manque de temps dû à l'apprentissage de l'outil de programmation CoDeSys et de son interface graphique et de par la longue durée des travaux de design et de montage de l'installation, il n'a pas été possible d'implémenter les modes 1 à 7. Seul le mode 0 est opérationnel selon les simulations effectuées.



7.9 Gestion de l'affichage

L'affichage est géré par des variables internes permettant d'appeler une page de visualisation en fonction du mode ou de l'étape dans laquelle l'utilisateur se trouve. La variable CurrentVisu peut être accessible en lecture et en écriture. Ceci permet de forcer sa valeur afin d'atteindre une page sur demande.

```
0001 PROGRAM Gestion_Visualisation
0002 VAR_INPUT
0003     VISU_ON: BOOL;
0004 END_VAR
0005 VAR
0006     SRInst: SR;
0007     VarBOOL1: BOOL;
0008     Reset_mode_0: BOOL;
0009 END_VAR
0010
0011 IF VISU_ON THEN
0012
0013     IF Mode0 AND PLC_PRG.Warning_OK AND NOT VarBOOL1 THEN
0014         CurrentVisu:=VISU_0;
0015         ResetMode:=FALSE;
0016     ELSIF Mode1 AND PLC_PRG.Warning_OK AND NOT VarBOOL1 THEN
0017         CurrentVisu:=VISU_1;
0018         ResetMode:=FALSE;
0019     ELSIF Mode2 AND PLC_PRG.Warning_OK AND NOT VarBOOL1 THEN
0020         CurrentVisu:=VISU_2;
0021         ResetMode:=FALSE;
0022     ELSIF Mode3 AND PLC_PRG.Warning_OK AND NOT VarBOOL1 THEN
0023         CurrentVisu:=VISU_3;
0024         ResetMode:=FALSE;
0025     ELSIF Mode5 AND PLC_PRG.Warning_OK AND NOT VarBOOL1 THEN
0026         CurrentVisu:=VISU_5;
0027         ResetMode:=FALSE;
0028     ELSIF Mode7 AND PLC_PRG.Warning_OK AND NOT VarBOOL1 THEN
0029         CurrentVisu:=VISU_7;
0030         ResetMode:=FALSE;
0031
0032     ELSIF Mode0 AND NOT PLC_PRG.Warning_OK THEN
0033         CurrentVisu:=WARNING_0;
0034         ResetMode:=FALSE;
0035     ELSIF Mode1 AND NOT PLC_PRG.Warning_OK THEN
0036         CurrentVisu:=WARNING_1;
0037         ResetMode:=FALSE;
0038     ELSIF Mode2 AND NOT PLC_PRG.Warning_OK THEN
0039         CurrentVisu:=WARNING_2;
0040         ResetMode:=FALSE;
0041     ELSIF Mode3 AND NOT PLC_PRG.Warning_OK THEN
0042         CurrentVisu:=WARNING_3;
0043         ResetMode:=FALSE;
0044     ELSIF Mode5 AND NOT PLC_PRG.Warning_OK THEN
0045         CurrentVisu:=WARNING_5;
0046         ResetMode:=FALSE;
0047     ELSIF Mode7 AND NOT PLC_PRG.Warning_OK THEN
0048         CurrentVisu:=WARNING_7;
0049         ResetMode:=FALSE;
0050     ELSIF Mode_KO AND NOT PLC_PRG.Warning_OK THEN
0051         CurrentVisu:=MODE_INVALIDE;
0052         ResetMode:=FALSE;
0053
0054     ELSIF NOT VarBOOL1 THEN
0055         CurrentVisu:=MODE;
0056         ResetMode:=TRUE;
0057         Reset_mode_0:=TRUE;
0058     END_IF
0059
0060 ELSE
0061     IF PLC_PRG.Start_pompe AND (Change_mode OR VarBOOL1) THEN
0062         CurrentVisu:=DEMANDE_ARRET;
0063
0064         SRInst(SET1:= Change_mode , RESET:= Demande_arret);
0065         VarBOOL1 := SRInst.Q1 ;
0066         ResetMode:=FALSE;
0067     END_IF
0068
0069 IF Graph THEN
0070     CurrentVisu:=GRAPH;
0071 END_IF
0072
0073 ELSE
0074     CurrentVisu:=ENTREE;
0075 END_IF
0076
```

Fig. 7.9.1 : Gestion de l'affichage

8 Interface graphique

L'interface graphique choisie est celle fournie par le même développeur que l'outil de programmation de l'automate. Elle a l'avantage d'être directement intégrée au logiciel CoDeSys. Cependant, ses possibilités de programmation et ses qualités visuelles sont quelque peu limitées. Cette interface n'est en effet pas de type SCADA. Elle ne permet donc pas de faire d'acquisition de données mais uniquement de les représenter en instantané.

8.1 Choix du mode de fonctionnement

Une fenêtre s'ouvre dès l'ouverture de l'interface permettant 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 le bouton de sélection afin de l'assurer dans son choix. Le principe est le même pour les 4 boutons de sélection. Tout à droite, une indication lui permet de vérifier avec quelle alimentation il va travailler – réseau ou pile à combustible. Ci-dessous se trouvent deux exemples de modes de fonctionnement.

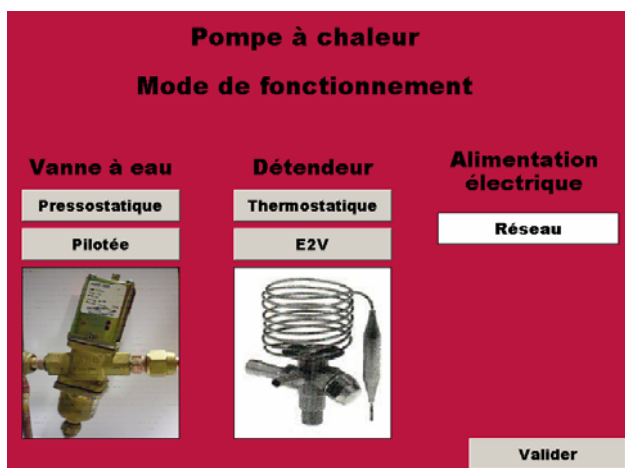


Fig.8.1.1 : Mode de fonctionnement 0

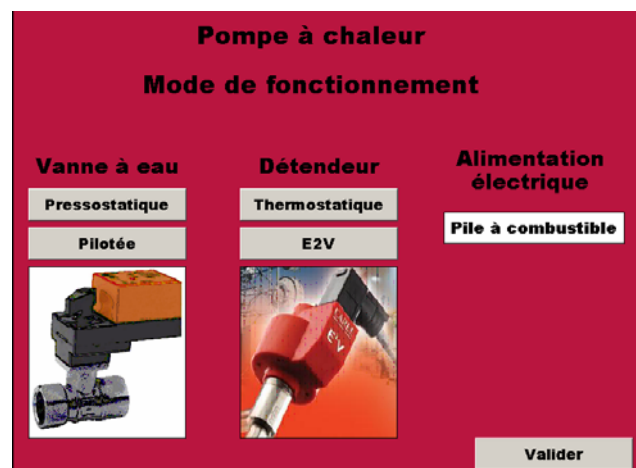


Fig. 8.1.2 : Mode de fonctionnement 7

Le bouton "Valider" 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 la page de mise en garde sur le positionnement des vannes à main à respecter.

8.2 Message de mise en garde

Cette page demande à l'utilisateur de vérifier la position des vannes à main sur l'installation. Il doit également valider son contrôle en cliquant sur le bouton "Circuit fréon OK" et sur le bouton "Circuit eau OK".

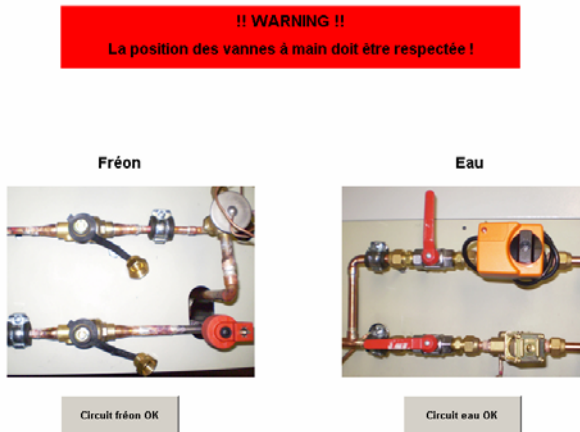


Fig. 8.2.1 : Message de mise en garde

Dès que les deux boutons ont été actionnés, la fenêtre de visualisation et de contrôle de l'installation correspondant au mode choisi apparaît.

8.3 Messages d'erreurs

Dans le cas où le choix des organes de contrôle dans la fenêtre de sélection de mode ne permet aucun mode de fonctionnement valide (par exemple, utilisation de la vanne pressostatique avec l'alimentation électrique via la pile), un message d'erreur demandant à l'utilisateur de changer ses paramètres apparaît à l'écran.



Fig. 8.3.1 : Message de mode invalide

Dans le cas où l'utilisateur est en mode visualisation et que l'installation fonctionne, il ne peut pas changer de mode de fonctionnement sans passer par un stop. S'il appuie sur le bouton "Mode", un message d'erreur lui demande de d'abord arrêter l'installation.

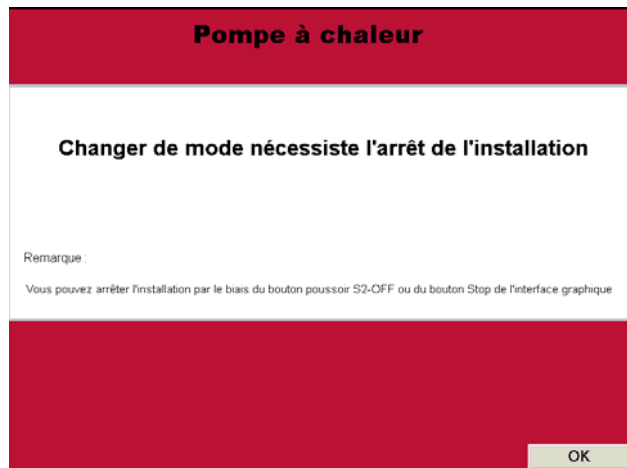
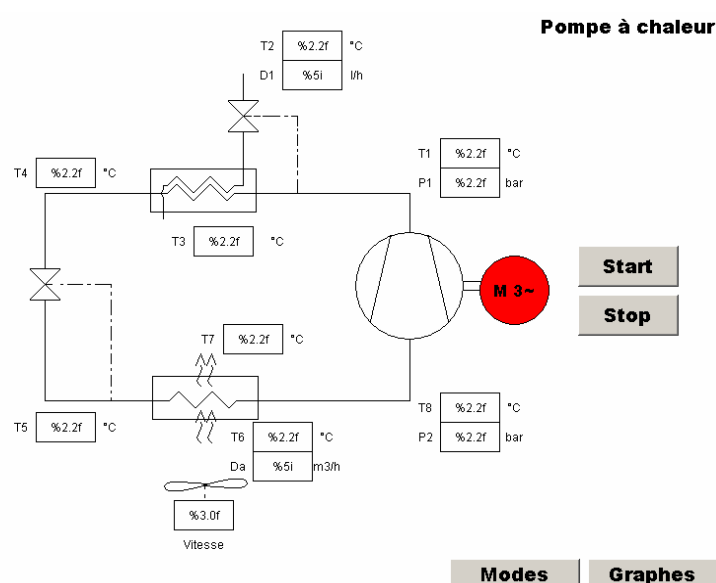


Fig. 8.3.2 : Message de demande d'arrêt

8.4 Visualisation

Chaque mode de fonctionnement possède sa propre interface visuelle. Elle permet de démarrer et arrêter l'installation, mais aussi de visualiser les valeurs instantanées de températures, pressions et aussi des consignes des différents organes.

8.4.1 Mode 0

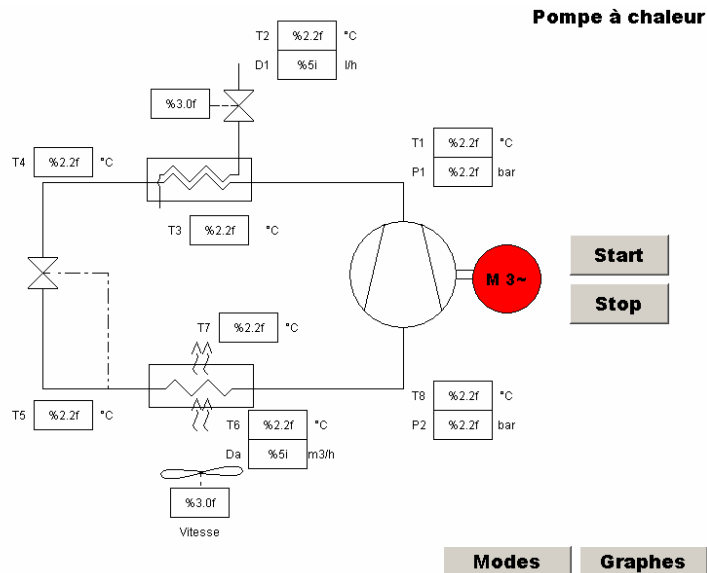


Le mode 0 fonctionne avec la vanne pressostatique et le détendeur thermostatique. C'est pour cette raison qu'il n'y a pas d'affichage de consigne au niveau de ces deux éléments. Les valeurs de puissances se trouvent sur la visualisation "Graphe".

Fig. 8.4.1.1 Visualisation en mode 0



8.4.2 Mode 1

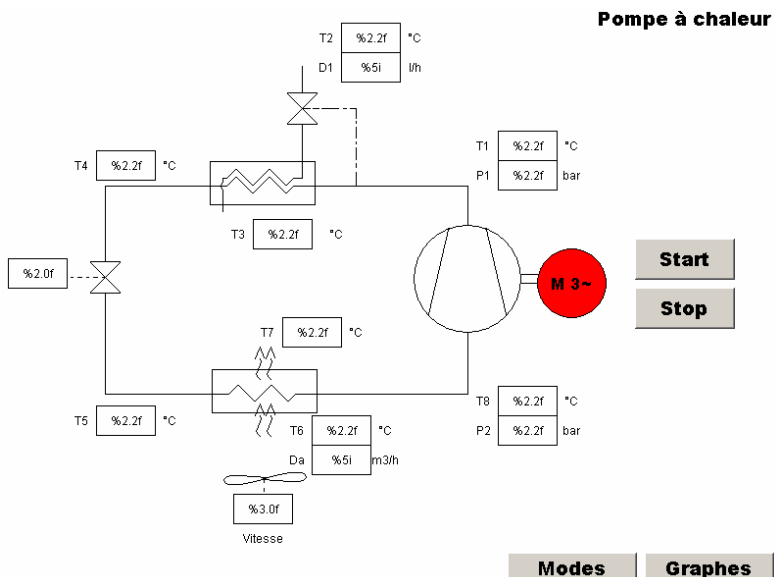


Ce mode fait intervenir la vanne à eau pilotée. On remarque donc, à côté de son symbole, la présence d'une case permettant d'afficher l'état de sa consigne.

Il est obligatoire d'ajouter à cette visualisation une case permettant à l'utilisateur d'entrer la valeur de limitation de puissance.

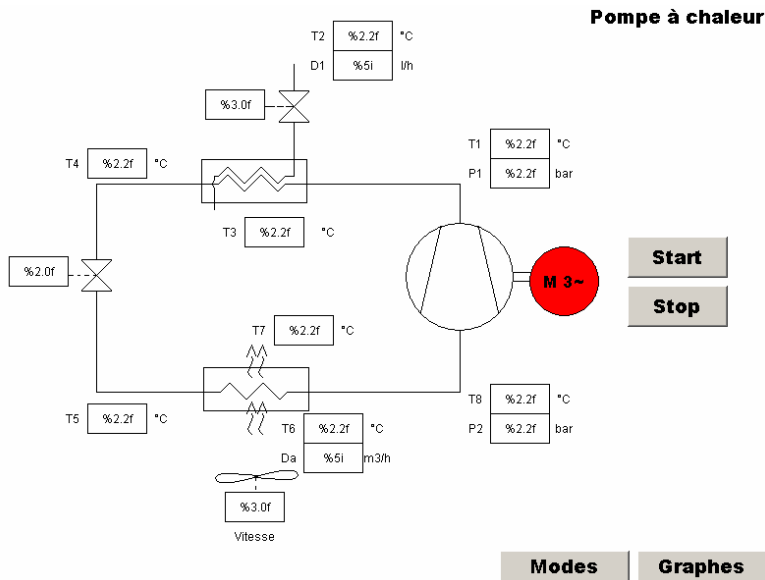
Fig. 8.4.2.1 Visualisation en mode 1

8.4.3 Mode 2



Ce mode fait intervenir le détendeur électronique. On remarque donc, à côté de son symbole, la présence d'une case permettant à l'utilisateur d'entrer la consigne de surchauffe

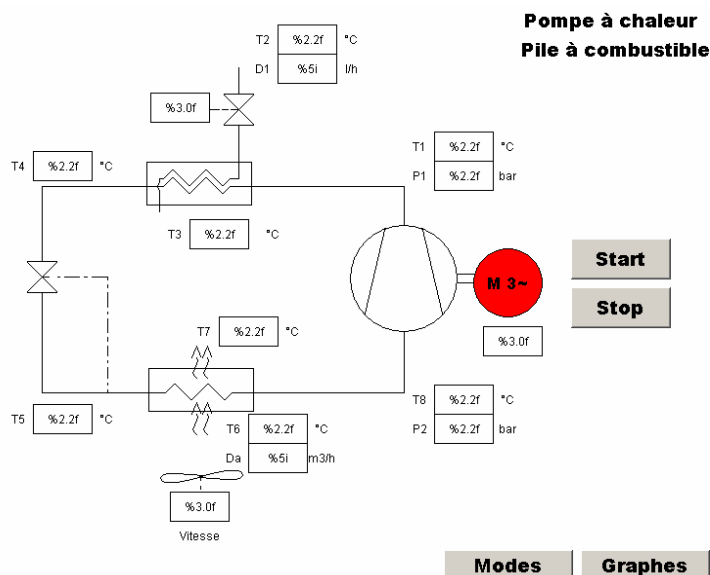
Fig. 8.4.3.1 Visualisation en mode 2

**8.4.4 Mode 3**

Le mode 3 étant un mélange des modes 1 et 2, il fait intervenir une case permettant d'afficher l'état de la consigne de la vanne à eau et une case permettant à l'utilisateur d'entrer la consigne de surchauffe.

Il est obligatoire d'ajouter à cette visualisation une case permettant à l'utilisateur d'entrer la valeur de limitation de puissance.

Fig. 8.4.4.1 Visualisation en mode 3

8.4.5 Mode 5

Ce mode fait intervenir la vanne à eau pilotée. On remarque donc, à côté de son symbole, la présence d'une case permettant d'afficher l'état de sa consigne.

Comparé au mode 1, on remarque l'ajout d'une case permettant de contrôler directement la valeur de la puissance électrique consommée.

Il est obligatoire d'ajouter à cette visualisation une case permettant à l'utilisateur d'entrer la valeur de limitation de puissance.

Fig. 8.4.5.1 Visualisation en mode 5



8.4.6 Mode 7

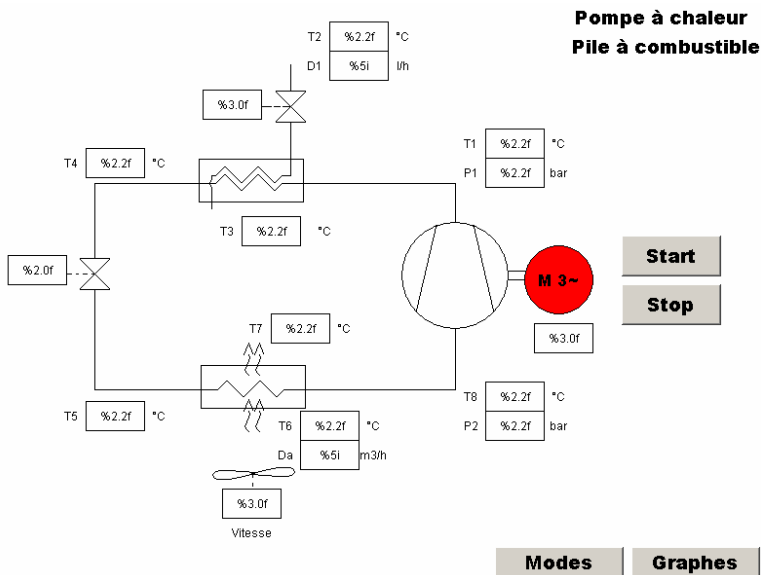


Fig. 8.4.6.1 Visualisation en mode 7

Ce mode fait intervenir la vanne à eau pilotée. On remarque donc, à coté de son symbole, la présence d'une case permettant d'afficher l'état de sa consigne.

De plus, la surchauffe étant réglable, une case permet à l'utilisateur d'entrer la consigne de surchauffe.

Une case permet de contrôler directement la valeur de la puissance électrique consommée.

Il est obligatoire d'ajouter à cette visualisation une case permettant à l'utilisateur d'entrer la valeur de limitation de puissance.

8.5 Graphe

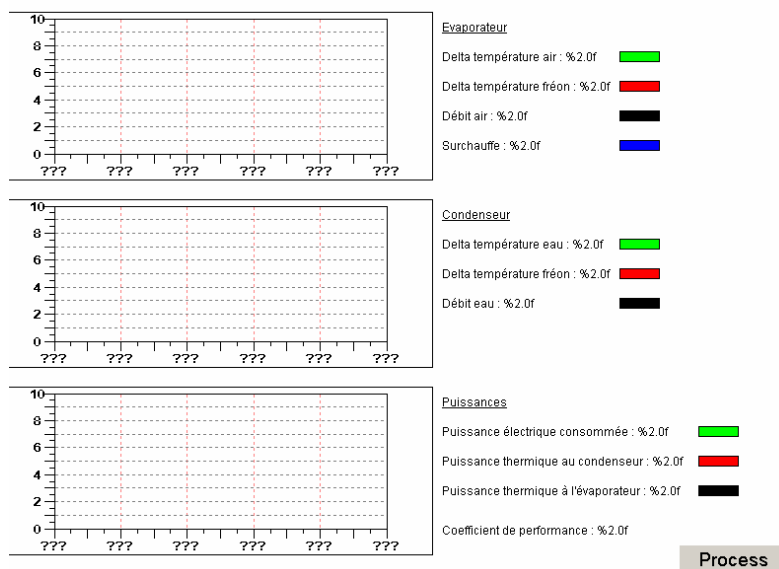


Fig. 8.5.1 : Graphe

La fig. 9.5.1 montre la fenêtre qui apparaît quand l'utilisateur presse le bouton "Graphes" d'une fenêtre de visualisation.

Le premier graphe représente les caractéristiques de l'évaporateur.

Le deuxième graphe représente celles du condenseur.

Le troisième graphe représente le bilan des puissances.

Chaque courbe a sa valeur affichée à côté de la légende.



9 Mise en Service et tests

La mise en service suivie des tests usuels de fonctionnement et de rendement seront réalisés après ce travail de diplôme. Une notice d'utilisation a toutefois déjà été réalisée.

En annexe 28 se trouve la notice d'utilisation de l'installation. Elle pourra être amenée à évoluer en fonction des résultats des tests et de ses premières utilisations.

10 Coûts

Toute étude de concept peut donner des résultats très satisfaisants où prometteurs. Cependant, sans un aspect de coût, il est difficile de jauger son réel intérêt. Une estimation du coût de développement de cette installation se trouve en annexe 29. Sur cette annexe se trouve aussi la comparaison du coût d'utilisation obtenu avec une pompe à chaleur alimentée par le réseau et avec la pompe à chaleur alimentée par la pile à combustible.

11 Améliorations à apporter

11.1 Vannes à main

Les vannes à mains (eau + réfrigérant) représentent un réel danger pour l'installation. En effet, dans le cas d'une mauvaise manipulation, l'installation pourrait surchauffer ou alors givrer l'évaporateur. Une protection est déjà existante par le biais des pressostats haute et basse pression qui coupe de manière hard le compresseur en cas de dépassement de valeurs limites.

Cependant, un contrôle du positionnement des vannes à mains serait une protection supplémentaire. Ceci est réalisable par le biais de capteurs de proximités. Une autre solution consisterait à remplacer ces vannes à mains et de les remplacer par des vannes magnétiques pilotées par l'automate.

11.2 Vanne à eau pilotée

La vanne à eau pilotée Belimo R207K ainsi que son pilote TRD24-SR sont très lents. En effet, l'ouverture totale de la vanne nécessite 90s. Ceci rend le réglage peu évident et demande un pré-réglage du débit avant la mise en service du compresseur. Les essais permettront de déterminer si cet artifice de contrôle est fonctionnel ou s'il faudra changer la vanne et passer par un positionneur à air comprimé plus rapide.

11.3 Interface graphique sur InTouch

Une interface de type InTouch serait plus appropriée dans l'optique d'utiliser cette installation pour des laboratoires. Ce logiciel permettrait en effet de non-seulement acquérir des valeurs, mais aussi de les enregistrer. Elle nécessite cependant un relativement long apprentissage d'utilisation pour la programmer.



11.4 Graphes + Visu ensemble

La mise en commun des différents graphes ainsi que de la visualisation du processus rendrait l'interface plus conviviale pour l'utilisateur. Ceci lui éviterait de jongler entre deux fenêtres.

11.5 Meilleure différenciation entre affichage d'état et entrée de consigne

Certaines cases – dans les visualisations de processus – servent à afficher des valeurs et d'autres cases servent à entrer des consignes. Une meilleure différenciation des fonctions serait plus agréable pour l'utilisateur.

11.6 Dégivrage de l'évaporateur

Aucune surveillance de la température n'est faite lors du dégivrage de l'évaporateur. L'utilisateur doit contrôler lui-même de ne pas le laisser surchauffer. Il serait très utile d'insérer à l'évaporateur un thermostat permettant de couper de manière hard l'alimentation électrique du corps de chauffe dès que sa température maximale est atteinte.

12 Conclusions

La nouvelle pompe à chaleur répond aux exigences de la pile à combustible. Elle permet son refroidissement direct grâce à l'évaporateur ventilé. La gestion et l'adaptation du point de fonctionnement thermique est devenue possible grâce au remplacement de la vanne à eau du condenseur. De plus, l'optimisation de la surchauffe par le biais du détendeur électronique permettra d'augmenter le rendement de l'installation. L'installation se veut désormais être polyvalente et permettra aux étudiants de l'utiliser dans le cadre de laboratoires. Un dossier technique permettra d'y apporter aisément des modifications ou simplement de se renseigner sur le matériel en place.

13 Remerciements

Un grand merci à toutes les personnes qui m'ont apporté leurs expériences et leurs connaissances lors de ce travail. Un merci particulier à Monsieur Jean-Claude Héritier et Monsieur Pascal Grand pour leur suivi tout au long de ce projet. Merci également à Monsieur Guy Ravaz, ingénieur de l'entreprise Gillioz-Dayer, pour ses précieux conseils.

Sans l'atelier mécanique de l'école et notamment Monsieur Pierre-André Knupfer, l'installation n'aurait pas pu prendre forme. Mes remerciements les plus chaleureux lui sont adressés. Merci également à l'électricien de l'école Monsieur Alain Roduit, pour m'avoir aidé lors du montage de l'armoire électrique.

Merci à Monsieur Hans-Peter Biner et Monsieur Didier Blatter pour la réalisation de l'interface électrique DCAC.

Egalement un grand merci à l'entreprise Belimo qui a fourni gratuitement le matériel demandé, et passé du temps pour répondre aux questions et présenter leurs solutions.



14 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] Formulaire du froid, 13^e édition
Pierre Rapin et Patrick Jacquard, Dunod, ISBN 2 10 049993 9
- [4] Les bases du froid, 3^e édition
Francis Cabeza, Didafrio, ISBN 2 9511345 0 9
- [5] Les pompes à chaleur et la maison individuelle
Serge Alquier et Yves Lecoffre, Editions du Moniteur, ISBN 2 281 11063 X
- [6] Rapport PilePac
Jean-Claude Héritier, août 2006

15 Annexes

- Annexe 1 : Nexa Power Module User's Manual *
- Annexe 2 : Condenseur Coaxial COAX 2101H *
- Annexe 3 : Compresseur Scroll ZR22K3E-TFD *
- Annexe 4 : Détendeur thermostatique TIS-MW *
- Annexe 5 : Manomètres REFCO R3-220BC/4 et R3-320BC/4 *
- Annexe 6 : Transmetteurs de pression PENN *
- Annexe 7 : Pressostats Alco Controls PS1 *
- Annexe 8 : Vanne à eau pressostatique Johnson Controls Serie V46 *
- Annexe 9 : Voyant Alco Controls AMI 1MM2 *
- Annexe 10 : Filtre déshydrateur Alco Controls ADK-0.53S *



- Annexe 11 : Thermocouples Thermocoax type K *
- Annexe 12 : Carte de mesure de puissance triphasée
- Annexe 13 : Dimensionnement des conduites par Solkane
- Annexe 14 : Tableau des conduites
- Annexe 15 : Tableau des coudes, tés et réductions
- Annexe 16 : Evaporateur LU-VE Contardo S2HC 36-50E
- Annexe 17 : Régulateur de vitesse de ventilateur Carel FCS 1022300
- Annexe 18 : Détendeur Carel E2V-09
- Annexe 19 : Pilote de détendeur Carel EVD420
- Annexe 20 : Vanne magnétique Alco Controls 110RB2T3 et 200RB3T3
- Annexe 21 : Vanne à eau Belimo R207K et pilote TRD24-SR
- Annexe 22 : Débitmètre B.I.O-Tech
- Annexe 23 : Dessins du châssis
- Annexe 24 : Vanne à main Alco Controls BVA
- Annexe 25 : Dessin d'ensemble et liste de composants
- Annexe 26 : Potentiomètre 0-10V
- Annexe 27 : Schémas électriques
- Annexe 28 : Notice d'utilisation
- Annexe 29 : Estimation du coût de l'installation

Remarque : Les annexes notées d'un astérisque sont regroupées dans le classeur d'installation qui se trouve avec la machine au laboratoire de thermique – CE07. Il s'y trouve également les commandes de matériel accompagnées des bulletins de livraison.