

Département Aérospatiale et mécanique.

Laboratoire de Thermodynamique

Université de Liège
Campus du Sart-Tilman - Bâtiment B49
Parking P33
B-4000 LIEGE (Belgium)
tel : +32 (0)4 366 48 00
fax : +32 (0)4 366 48 12
web site : <http://www.labohtap.ulg.ac.be/cmsms/>

Cours de thermodynamique appliquée.

Laboratoires d'étudiants.

Banc d'essai de la pompe à chaleur Siemens..



Table de matières.

1	INTRODUCTION.....	4
2	PRINCIPE DE LA POMPE A CHALEUR.	5
2.1	Description du principe.	5
3	PERFORMANCES ENERGETIQUES.	8
4	DESCRIPTION PHYSIQUE DU BANC D'ESSAI DE LA PAC SIEMENS.	9
4.1	Le compresseur.....	9
4.2	Le condenseur.....	13
4.3	La vanne de détente.....	14
4.4	L'évaporateur-récupérateur.....	15
4.5	La chaudière (« boiler »).....	17
4.6	Les circulateurs.....	18
5	EVOLUTION COMPLETE DU CYCLE FRIGORIFIQUE SUR LE BANC D'ESSAI.....	19
6	INSTRUMENTATION DU BANC.....	20
7	BILANS THERMIQUES.....	20
7.1	Rappel des principes.....	20
7.2	Définition et critique du choix des volumes de contrôle.....	21
7.2.1	Volume simple.....	21
7.2.2	Volume global.....	23
8	BILANS THERMIQUES EN REGIME OSCILLATOIRE.	23
8.1	Oscillations dues à la régulation.....	23
8.2	Influence sur le résultat d'un bilan instantané.....	23
8.3	Bilans basés sur une intégration à long terme.....	24
8.4	Contre-vérifications.....	24
8.4.1	Débit d'eau.....	24
8.4.2	Indications des fiches signalétiques.....	24

Table des illustrations.

Figure 1: Principe thermodynamique de la pompe à chaleur.	5
Figure 2: Schéma de principe de la pompe à chaleur.....	6
Figure 3: Cycle thermodynamique simplifié en diagramme p-h.	7
Figure 4: Vue d'ensemble de la PAC Siemens.	9
Figure 5: Vue du compresseur hermétique à piston.....	10
Figure 6: Coupe d'un compresseur à piston hermétique.....	11
Figure 7: Phases de refoulement et d'aspiration.	11
Figure 8: Aspect du condenseur de la PAC Siemens et coupe illustrative.....	13
Figure 9: Vue de la vanne de détente et du voyant de liquide.....	14
Figure 10: Vue arrière de l'évaporateur plus échangeur de la PAC.	15
Figure 11: Coupe de l'évaporateur-récupérateur (face arrière du banc d'essai).	16
Figure 12: Vue et coupe de la chaudière.	17
Figure 13: Vue du circulateur d'évaporateur (puissance consommée : 150 W)	18
Figure 14: Schéma d'implantation du banc d'essai PAC Siemens.	19
Figure 15: Illustration du bilan du condenseur.	21
Figure 16: Volume de contrôle du condenseur seul.....	22
Figure 17: Volume de contrôle englobant le condenseur et le circulateur.....	23

1 Introduction.

Le principe de la pompe à chaleur est de récupérer de l'énergie disponible à basse température pour la transférer dans un système fonctionnant à plus haute température.

Pour pouvoir comprendre et caractériser le fonctionnement du processus thermique, il est nécessaire de mesurer différentes grandeurs physiques avec le moins d'erreur possible.

Pour vérifier le niveau de précision de ces mesures, on réalise des bilans thermiques qui permettent d'abord de vérifier que les premiers principes de la thermodynamique sont respectés, ensuite d'estimer la fiabilité globale des mesures réalisées.

En cas de bilans erronés, on peut vérifier quelles sont les mesures incorrectes, après avoir toutefois vérifié les équations utilisées pour établir les bilans.

2 Principe de la pompe à chaleur.

2.1 Description du principe.

On dispose d'une «source froide» à la température T_0 , par exemple un lac dont la température de l'eau est $10\text{ }^\circ\text{C}$. On veut chauffer une maison à l'aide de radiateurs dont la température d'alimentation en eau sera, par exemple, d'au moins $40\text{ }^\circ\text{C}$: c'est la «source chaude» à la température T_1 .

Le transfert de l'énergie () (« les calories ») disponible à basse température vers une source à haute température ne peut s'effectuer naturellement car « la chaleur s'écoule du chaud vers le froid ». On doit alors utiliser un fluide de transfert intermédiaire (l'air, l'eau glycolée, l'ammoniac, le fréon, etc... peuvent être des fluides de transfert). Dans notre cas, on utilise du réfrigérant (fréon R22) comme fluide intermédiaire pour réaliser un cycle frigorifique. Les transferts entre « sources » et fluide de transfert sont réalisés dans des échangeurs thermiques.

L'illustration de ce principe sur un diagramme est reprise à la Figure 1 . Côté source froide, le réfrigérant circule à une température inférieure à T_0 et reçoit de l'énergie (« de la chaleur ») de l'eau du lac. Côté source chaude, le réfrigérant, dont la température doit être plus élevée que T_1 , cède de l'énergie (« de la chaleur ») à l'eau circulant dans les radiateurs.

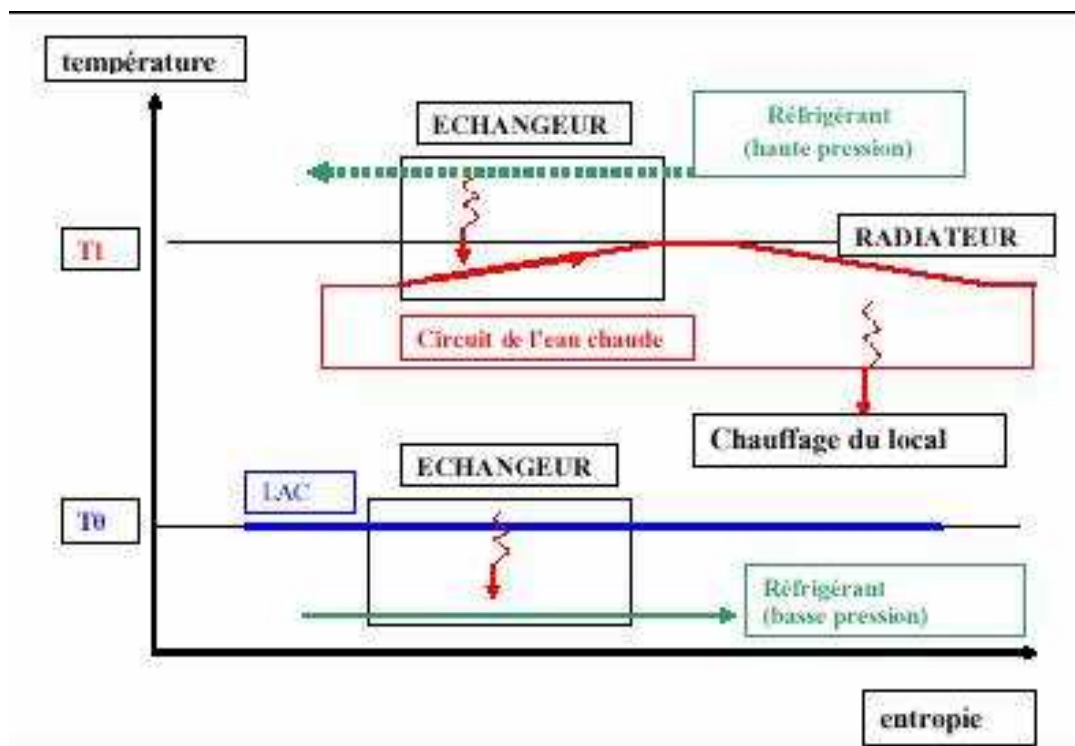


Figure 1: Principe thermodynamique de la pompe à chaleur.

La Figure 2 montre le schéma de principe d'un chauffage de bâtiment à l'aide d'une pompe à chaleur.

POMPE A CHALEUR - PRINCIPE

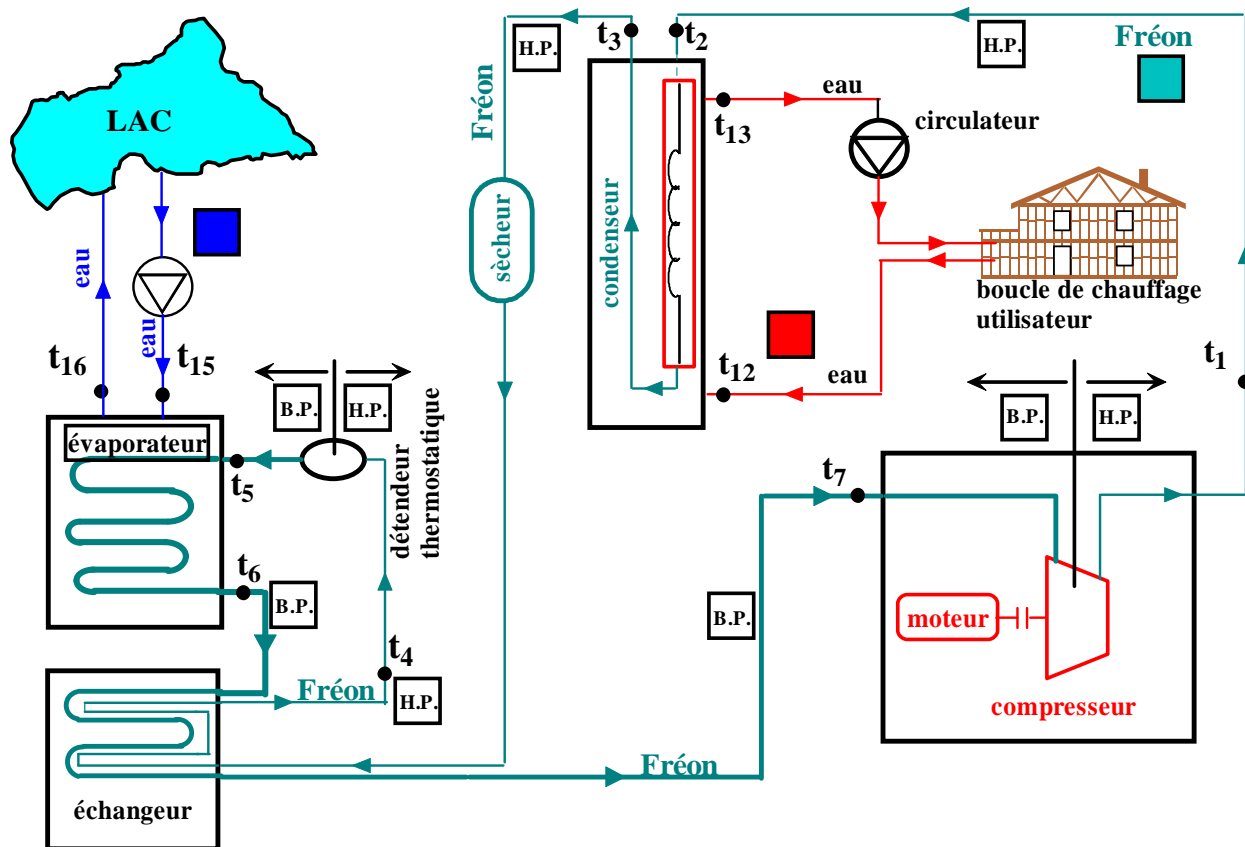


Figure 2: Schéma de principe de la pompe à chaleur.

2.2 Description du cycle frigorifique.

La pompe à chaleur est un ensemble constitué d'un compresseur, d'un condenseur, d'un évaporateur et d'une vanne de laminage.

Le cycle thermodynamique simplifié est montré à la Figure 3.

- 1 Le réfrigérant circulant dans l'échangeur (évaporateur) plongé dans le lac se vaporise progressivement en recevant de l'énergie (Q_{evap}) de l'eau, tout comme l'eau s'évapore au soleil. Son ENTHALPIE (niveau énergétique) augmente.
- 2 Pour amener le réfrigérant de sa température basse T_0 à un niveau supérieur à T_1 , on utilise un compresseur qui va élever la pression et la température de la vapeur. Ce compresseur va consommer une énergie électrique payante (W_{cmp}).
- 3 Lorsque le réfrigérant circule dans l'échangeur de la source chaude (le condenseur), il cède de l'énergie (Q_{cond}) à l'eau de retour du radiateur en se condensant

progressivement jusqu'à se liquéfier (comme la buée sur une vitre). Son ENTHALPIE (niveau énergétique) diminue car la transformation est exothermique Cette énergie provient de la source froide et du compresseur. En effet, une partie de l'énergie électrique consommée par celui-ci est convertie en énergie mécanique puis finalement en énergie thermique (échauffement du réfrigérant) $Q_{\text{cond}} = W_{\text{comp}} + Q_{\text{evap}}$

- 4 Le réfrigérant est ensuite détendu (il passe de la haute à la basse pression) à l'aide d'une vanne de laminage pour entrer dans l'évaporateur en état diphasique et recommencer le cycle.

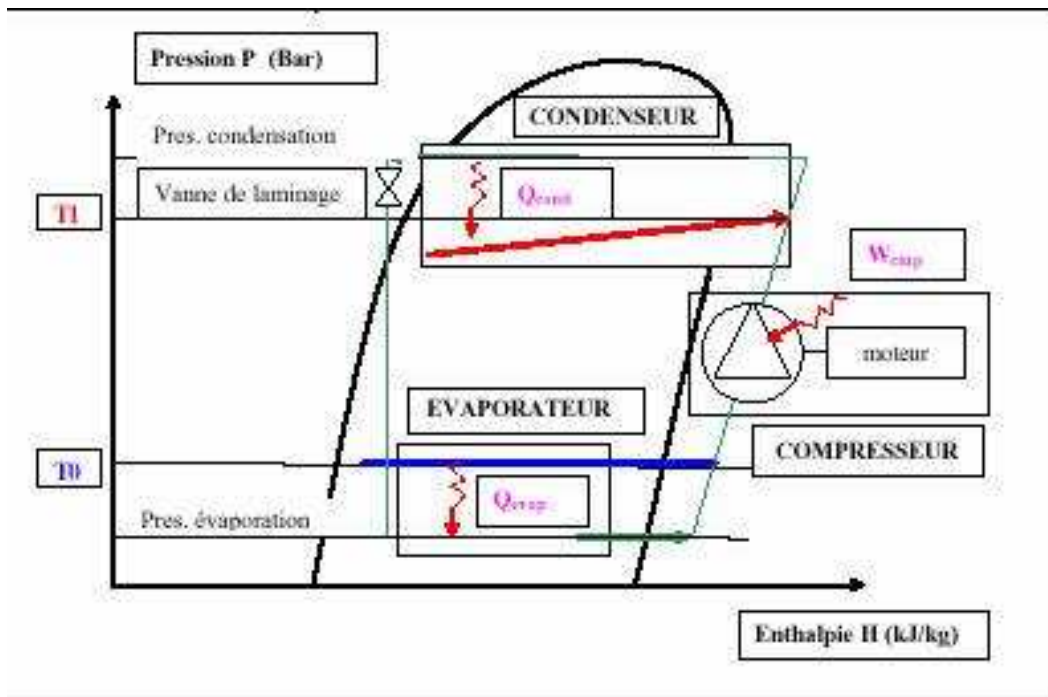


Figure 3: Cycle thermodynamique simplifié en diagramme p-h.

3 Performances énergétiques.

Le coefficient de performance de la pompe à chaleur s'exprime par le rapport entre l'énergie utile W_{cond} et l'énergie payée W_{cmp} soit $\text{COP} = W_{\text{cond}} / W_{\text{cmp}}$.

L'intérêt de cette méthode est que la puissance consommée par le compresseur est en général nettement plus faible que celle apportée au niveau de l'évaporateur. Le COP de la pompe à chaleur exposée varie entre 2.5 et 4 selon les conditions de fonctionnement.

Si en principe le système est intéressant au point de vue énergétique pur, il faut à tenir compte du coût de fonctionnement réel pour un particulier.

Par exemple, un litre de mazout (densité = 827 kg /m³) à un pouvoir calorifique (énergie maximale qu'il dégage en brûlant) d'environ 35 000 000 Joule.

Pour produire 1 kWh (3 600 000 Joule) dans une chaudière à mazout d'un rendement de 85%, il faut consommer environ 0.12 l de mazout soit 0.08 Eur (prix moyen en 2008- début 2009). Avec le kWh électrique à 0.2 Eur (tarif journée en 2009), il faudrait que l'installation

fonctionne avec un COP de 2.5 pour avoir des coûts énergétiques comparables. Ce niveau est en général largement dépassé à l'heure actuelle, on atteint 3 à 3.5 lorsqu'on alimente un chauffage sol à basse température (30-35°C). Mais c'est moins le cas lorsqu'on doit alimenter des radiateurs avec une température plus élevée (35-40°C minimum). Les coûts d'installation et d'entretien entrent aussi en compte. Et à l'heure actuelle, une chaudière coûte en général moins cher qu'une pompe à chaleur avec ses échangeurs.

Si on s'intéresse à l'écobilan global des 2 systèmes comparés, cette comparaison tourne à l'avantage de la pompe à chaleur selon le mode de production envisagé pour l'électricité.

En effet, en tenant compte d'un rendement de production et distribution d'électricité sur le réseau européen de l'ordre de 40% et un COP moyen de 3, la production de 1 Kwh de chauffage par pompe à chaleur ne produit que 80% de CO2 par rapport à une chaudière classique.

4 Description physique du banc d'essai de la PAC Siemens.

Les composants principaux du banc d'essai sont décrits brièvement ci-après. La Figure 4 montre une vue d'ensemble de la PAC.



Figure 4: Vue d'ensemble de la PAC Siemens.

4.1 Le compresseur.

La compression est réalisée par un piston. Le compresseur est hermétique, c'est à dire que le moteur électrique d'entraînement est refroidi par le réfrigérant. La puissance électrique consommée est donc intégralement apportée au mélange de réfrigérant et d'huile de

lubrification par le travail de compression et par le refroidissement du moteur, aux échanges à l'ambiance près. La Figure 5 montre un gros plan du compresseur hermétique de la PAC Siemens.



Figure 5: Vue du compresseur hermétique à piston.

La Figure 6 montre la coupe d'un compresseur hermétique à piston et la Figure 7 le détail des phases d'éjection et d'aspiration. On constate que le réfrigérant aspiré à basse température circule dans l'enveloppe en refroidissant le compresseur avant d'être comprimé. Avant de sortir du compresseur, le gaz à passe dans un serpentin et réchauffe l'huile de lubrification afin de bien la fluidifier. La circulation du réfrigérant dans l'enceinte des nouveaux modèles de compresseurs a été améliorée depuis lors pour en augmenter les performances.

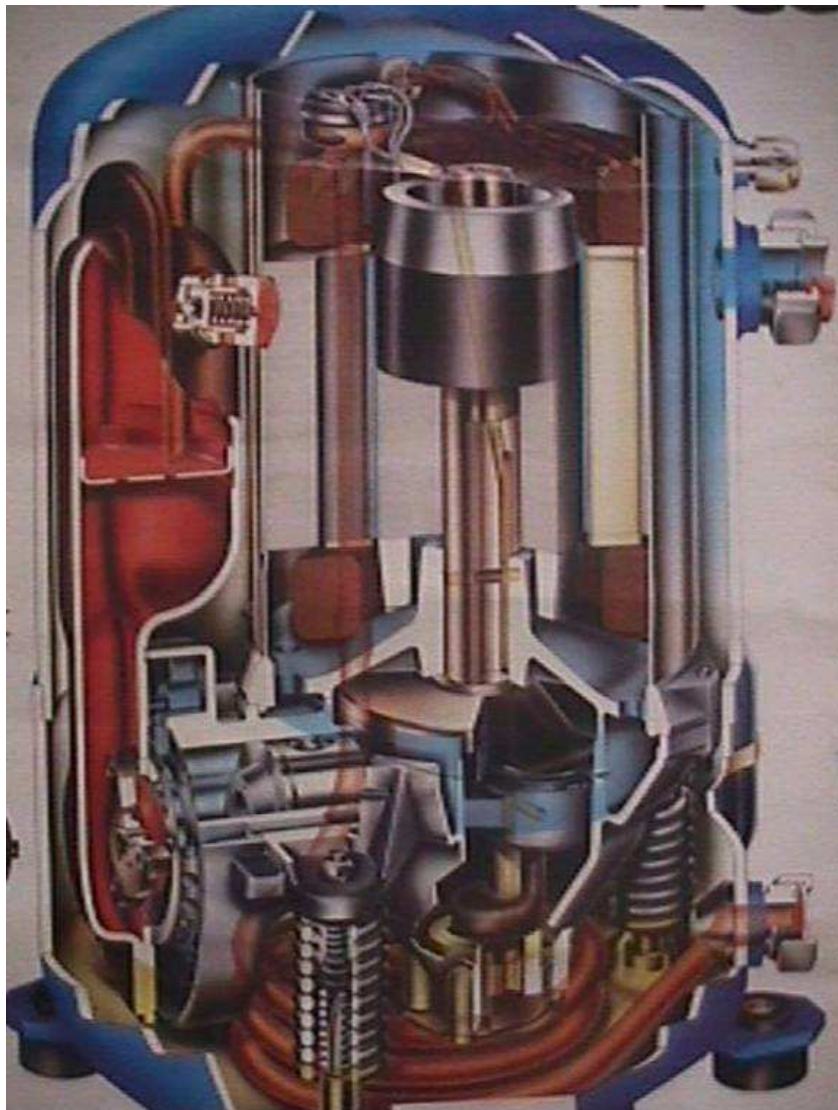


Figure 6: Coupe d'un compresseur à piston hermétique.

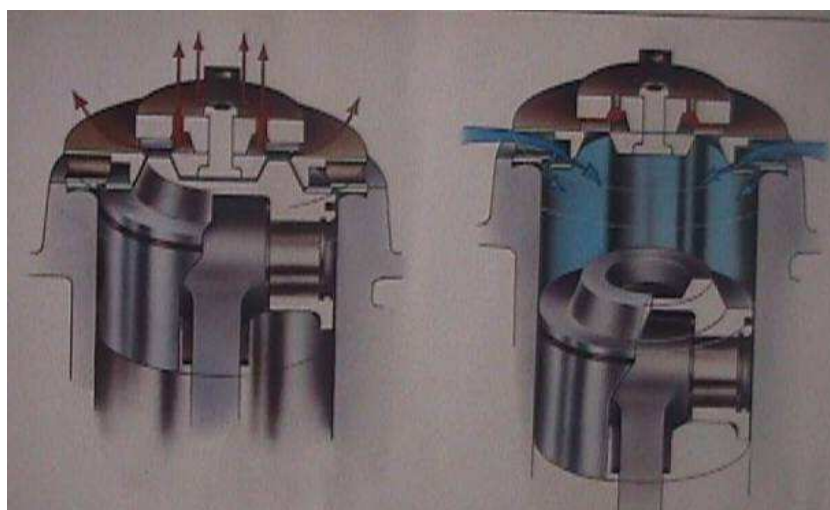


Figure 7: Phases de refoulement et d'aspiration.

4.2 Le condenseur.

C'est un échangeur métallique cylindrique recouvert d'une couche d'isolant qui apparaît comme à la Figure 8. Le gaz réfrigérant à refroidir et liquéfier passe dans un serpentin autour duquel circule l'eau de refroidissement. L'isolation permet de réaliser un bon bilan thermique.

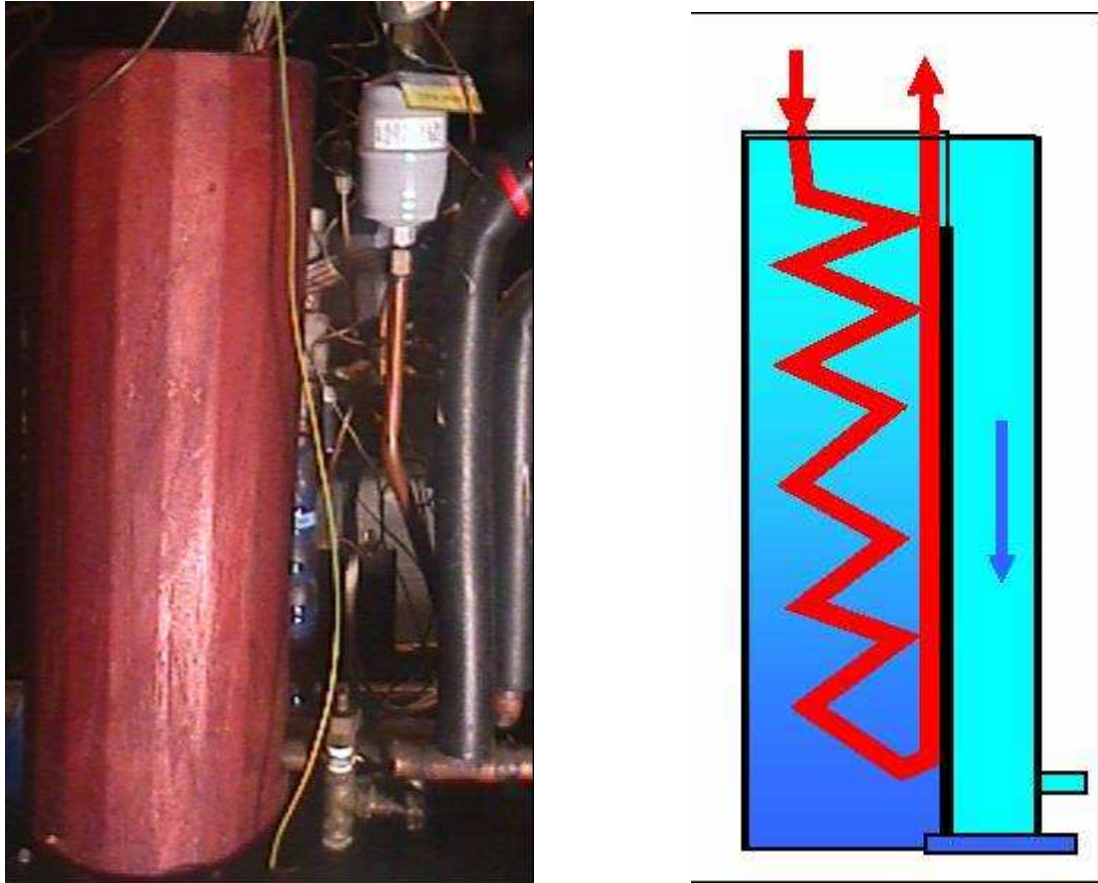


Figure 8: Aspect du condenseur de la PAC Siemens et coupe illustrative.

4.3 La vanne de détente.

Elle a pour but de laminer le réfrigérant sortant du condenseur à l'état liquide. Le voyant situé en amont de la vanne permet d'observer si des bulles de gaz sont néanmoins présentes (cf. Figure 9). Dans ce cas, elles perturbent le bon fonctionnement de la vanne.



Figure 9: Vue de la vanne de détente et du voyant de liquide.

La vanne de détente est raccordée à un bulbe thermostatique via un tube capillaire (spirale sur la photo). Le bulbe, accolé à l'entrée du compresseur, contient du réfrigérant qui se dilate en fonction de la température du réfrigérant circulant dans la conduite (cf. schéma du banc d'essai à la Figure 14) Cette dilatation modifie l'ouverture de la vanne via une membrane. Si le fluide est trop froid à l'entrée du compresseur, il y a un risque que le réfrigérant soit en forme diphasique. Dans ce cas, des gouttelettes de réfrigérant pourraient « laver » l'huile de lubrification entraînant un frottement sec et l'endommagement du compresseur. La vanne de détente doit alors admettre moins de gaz. Comme la quantité de calories apportée par l'eau de la source froide au niveau de l'échangeur est la même, le fluide se réchauffe plus et se vaporise complètement.

4.4 L'évaporateur-récupérateur.

C'est un échangeur en serpentin constitué de 2 parties (cf Figure 10). La Figure 11 montre une coupe de principe. Dans l'évaporateur (partie haute sur la figure) l'échange entre le réfrigérant et l'eau s'effectue à contre-courant. Le réfrigérant circule dans le noyau central et l'eau glycolée réchauffée dans la chaudière circule dans l'enveloppe externe.

Dans le récupérateur (partie basse), le réfrigérant qui sort de l'évaporateur en phase vapeur (ou gazeuse) passe à l'extérieur du serpentin pour rejoindre le compresseur en étant surchauffé. Le même réfrigérant sort du condenseur via le pot de séchage pour être post-refroidi à contre-courant dans le récupérateur et alimenter la vanne de détente.



Figure 10: Vue arrière de l'évaporateur plus échangeur de la PAC.

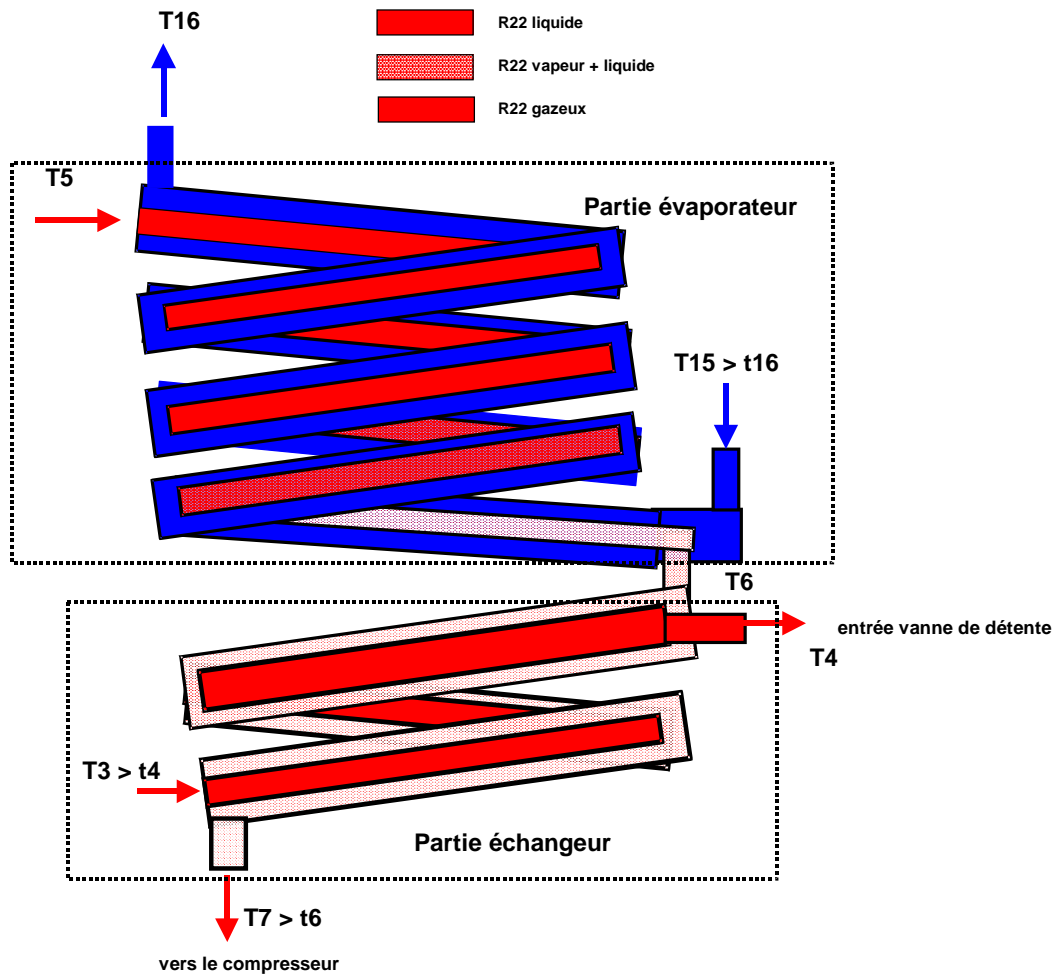


Figure 11: Coupe de l'évaporateur-récupérateur (face arrière du banc d'essai).

Remarque sur la lubrification :

Le compresseur doit être lubrifié en permanence par de l'huile mélangée au réfrigérant. Cette huile est entraînée dans tout le circuit réfrigérant. Dans l'évaporateur, elle a tendance à se déposer. Avec la configuration utilisée, elle est entraînée plus facilement par la vapeur de réfrigérant. En contre-partie des gouttelettes de réfrigérant peuvent être entraînées vers le compresseur avec le risque de « laver » le lubrifiant et d'endommager le compresseur.

4.5 La chaudière (« boiler »).

La chaudière électrique remplace le lac «source froide ». Elle constitue, avec les conduites et l'échangeur dans l'évaporateur, un volume d'eau-glycolée de faible capacité (± 20 l.). Le rôle de la chaudière électrique est de compenser l'énergie retirée du circuit d'eau lors de son passage dans l'évaporateur.



Figure 12: Vue et coupe de la chaudière.

4.6 Les circulateurs.

Les circulateurs (cf. Figure 13) fonctionnent en permanence pour assurer la circulation de l'eau en boucle fermée et obtenir de bons coefficients de transfert de chaleur dans les échangeurs. Si, par exemple, le circulateur de la chaudière s'arrête alors que les résistances sont en fonctionnement, alors l'eau risque de bouillir avec un danger de surpression dans le circuit eau de l'évaporateur et le risque de détériorer les résistances.



Figure 13: Vue du circulateur d'évaporateur (puissance consommée : 150 W)

5 Evolution complète du cycle frigorifique sur le banc d'essai.

On se réfère au schéma d'implantation actuelle du banc d'essai (cf. Figure 14) sur lequel est repérée la position des différents capteurs de mesure et des points de référence utilisés pour la description du système.

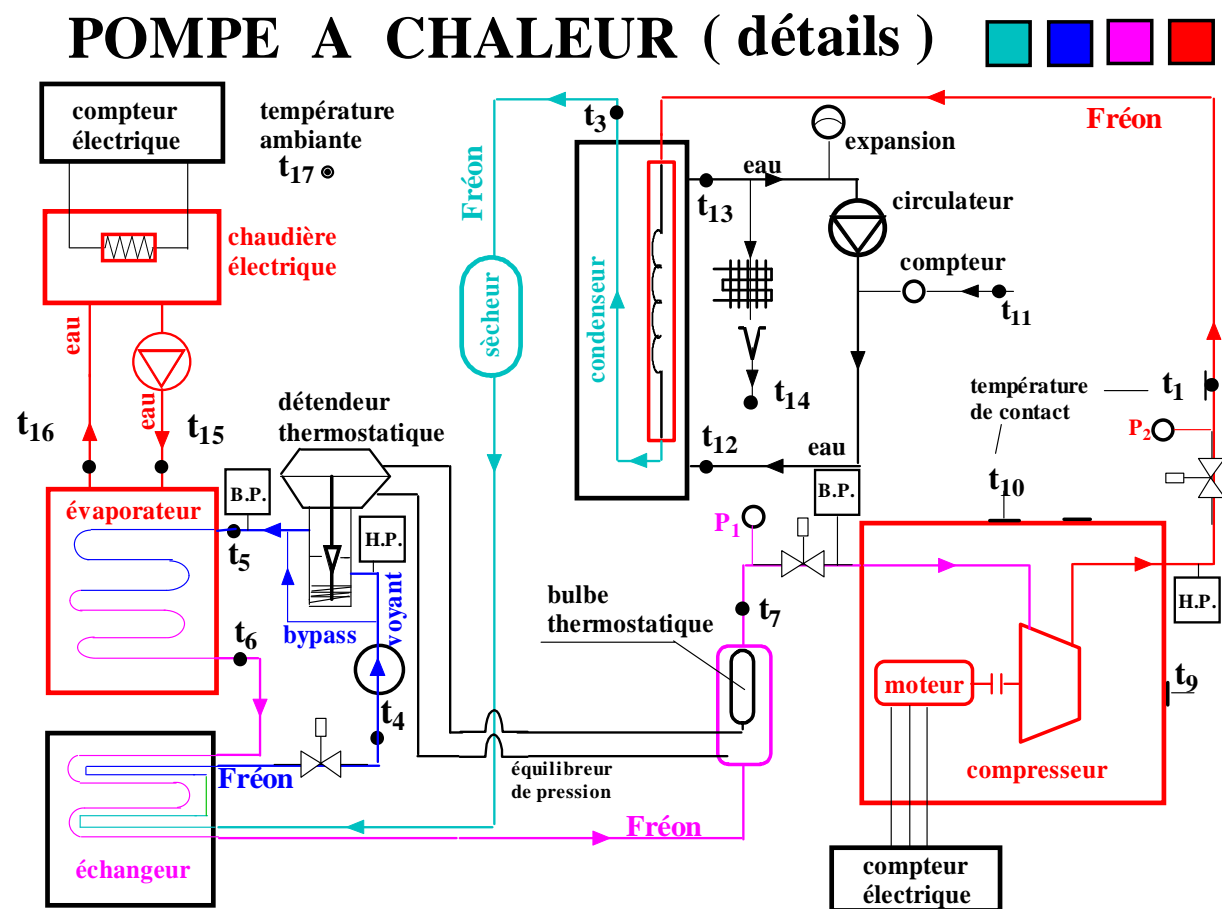


Figure 14:Schéma d'implantation du banc d'essai PAC Siemens.

Le réfrigérant est du fréon R22 qui suit un cycle fermé :

1. Il entre dans le compresseur en phase gazeuse légèrement surchauffée ($t_7 = 2 \dots 10^\circ\text{C}$), à basse pression ($P_1 = 2$ à 5 bar). Il est comprimé à haute pression ($P_2 = 18$ à 25 bar) et haute température ($t_1 = 90 \dots 110^\circ\text{C}$). Il entre ensuite dans le condenseur dans les mêmes conditions, aux pertes de charge et pertes à l'ambiance près.

2. Il cède sa chaleur à l'eau de la «source chaude » en subissant d'abord un refroidissement sensible puis un transfert latent. L'eau entre dans l'échangeur à t_{12} et sort à t_{13} et elle pourrait alimenter un radiateur, par exemple. C'est l'effet **UTILE** du cycle.
3. A la sortie du condenseur (point t_3), le réfrigérant doit normalement être en phase liquide, toujours à haute pression, pour permettre un bon fonctionnement de la vanne de détente située en aval.
4. Pour assurer cet état, le réfrigérant passe dans l'échangeur-récupérateur afin de céder un peu de chaleur (« sous-refroidissement » jusqu'au point t_4) au réfrigérant sortant de l'évaporateur à basse température (point t_6).
5. A la sortie de l'échangeur (point 4) , le réfrigérant subit un laminage afin de passer de la haute à la basse pression (point 5) . Ce laminage est supposé se dérouler à enthalpie constante.
6. Le réfrigérant passe alors dans l'évaporateur et absorbe de la chaleur fournie par le circuit d' « eau froide » provenant de la chaudière électrique. Cette dernière a pour fonction de remplacer la « source froide » de capacité infinie en maintenant l'eau à une température normale d'utilisation .
7. A la sortie de l'évaporateur (point 6), le réfrigérant est normalement en phase gazeuse, à basse pression. Son passage dans l'échangeur l'amène avec certitude en phase gazeuse (« surchauffe ») Dans le cas contraire, des gouttelettes de réfrigérant pourraient être aspirées par le compresseur et risquer de le détériorer en « lavant » l'huile de lubrification qui circule dans tout le circuit du réfrigérant.
8. Le réfrigérant pénètre alors dans le compresseur (point 7) et le cycle est fermé.

6 Instrumentation du banc

Elle est constituée de différents capteurs décrits dans le fascicule des notes de mesures.

7 Bilans thermiques.

7.1 Rappel des principes.

Les bilans thermiques et les calculs divers sont réalisés sur base des notes de cours de thermodynamique. On va illustrer la méthode pour le sous-système constitué par le condenseur en tenant compte des particularités du circuit eau. En effet, c'est le débit d'eau d'injection, à la température t_{11} , qui est mesuré (cf. **Figure 15**).

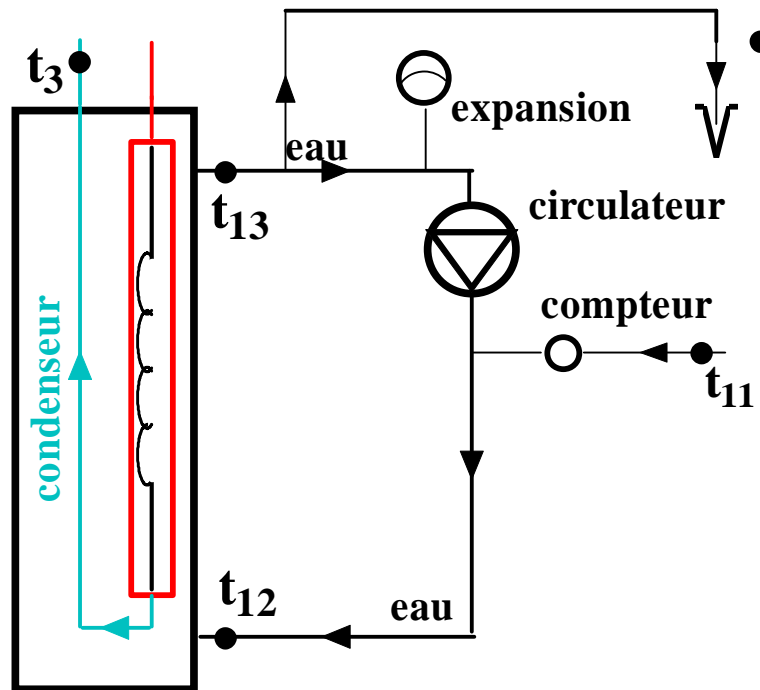


Figure 15: Illustration du bilan du condenseur.

Pour rappel, on exprime le bilan des puissances en tenant compte du terme inertiel selon l'expression du cours et utilisant les conventions égoïstes. On écrit l'expression littérale de la puissance de manière telle que le sens soit positif si le volume reçoit cette puissance. On détermine par exemple les échanges avec l'ambiance dont la température est t_{amb} . Si on se réfère au schéma du condenseur à la Figure 8, on peut considérer que c'est l'eau, à la température moyenne $t_m = (t_{12} + t_{13})/2$, qui échange avec l'ambiance, ceci à travers l'enveloppe du condenseur dont le coefficient de transfert global est $AUcd$ [W/m²,K]. Dans ce cas, l'échange à l'ambiance s'écrit : $Q_{amb} = AUcd (t_{amb} - t_m)$

7.2 Définition et critique du choix des volumes de contrôle.

Deux volumes de contrôle sont possibles.

7.2.1 Volume simple.

Le premier (V1) englobe le condenseur lui-même (cf. Figure 16). Pour calculer la puissance du côté eau, on doit connaître le débit. Hors comme on a dit précédemment, il est mesuré ailleurs. On doit alors écrire une équation d'un nœud hydraulique pour le calculer.

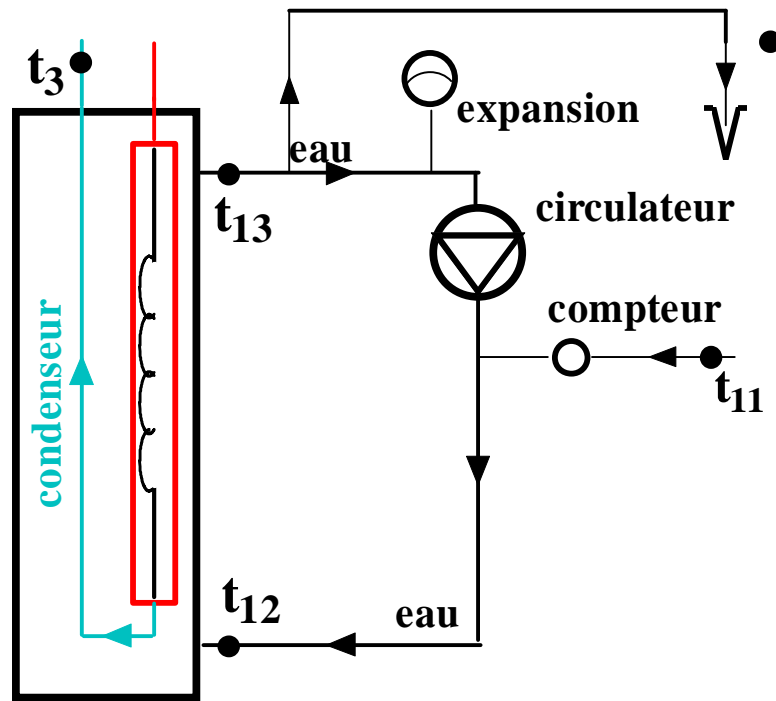


Figure 16: Volume de contrôle du condenseur seul.

Soit $\dot{m}_{cd,w}$ le débit d'eau traversant le condenseur et $\dot{m}_{cd,inj}$ le débit d'eau injecté dans la boucle et ressortant vers l'utilisation. On peut écrire, sans tenir compte du léger échauffement apporté par la compression de l'eau dans le circulateur, que :

$$(\dot{m}_{cd,w} - \dot{m}_{cd,inj}) \cdot t_{13} + \dot{m}_{cd,inj} \cdot t_{11} = \dot{m}_{cd,w} \cdot t_{12} \quad (\text{bilan du nœud A})$$

On obtient : $\dot{m}_{cd,w} = \dot{m}_{cd,inj} \cdot (t_{11} - t_{13}) / (t_{12} - t_{13})$.

Critique de la méthode du volume simple.

Un essai particulier a donné :

- 1 $t_{11} = 8^\circ\text{C}$
- 2 $t_{12} = 23^\circ\text{C}$
- 3 $t_{13} = 31^\circ\text{C}$

avec un débit d'injection égal à 0.25 kg/s. On calcule un débit de condenseur de 0.71 kg/s, ce qui donne une puissance côté eau : $Q_{cd,w} = 24000 \text{ W}$ avec $c_w = 4187 \text{ J/kg.K}$. Mais on a vu dans le fascicule sur les techniques de mesure que la mesure de chaque température est précise à $\pm 0.2 \text{ K}$ et que l'erreur probable (par calcul statistique) sur un ΔT est $(0.3 / \Delta T)$. L'erreur probable sur le quotient de ΔT se calcule en considérant la racine carrée de la somme des carrés des erreurs. On obtient une erreur probable supplémentaire de **4%** sur la puissance soit près de **1000 W !!!**

Pour tenir compte de l'échauffement de l'eau dans le circulateur, on peut considérer en première approximation que toute la puissance électrique consommée, ici 150W, se retrouve dans l'eau. L'échauffement résultant, lié au débit pompé, serait : $150/4187/0.25 = 0.15 \text{ K}$ qui est deux fois moins grand que l'erreur probable !

7.2.2 Volume global.

Si on considère un volume de contrôle englobant le circulateur, il faut tenir compte de son apport calorifique dans le volume ainsi que le montre la Figure 17.

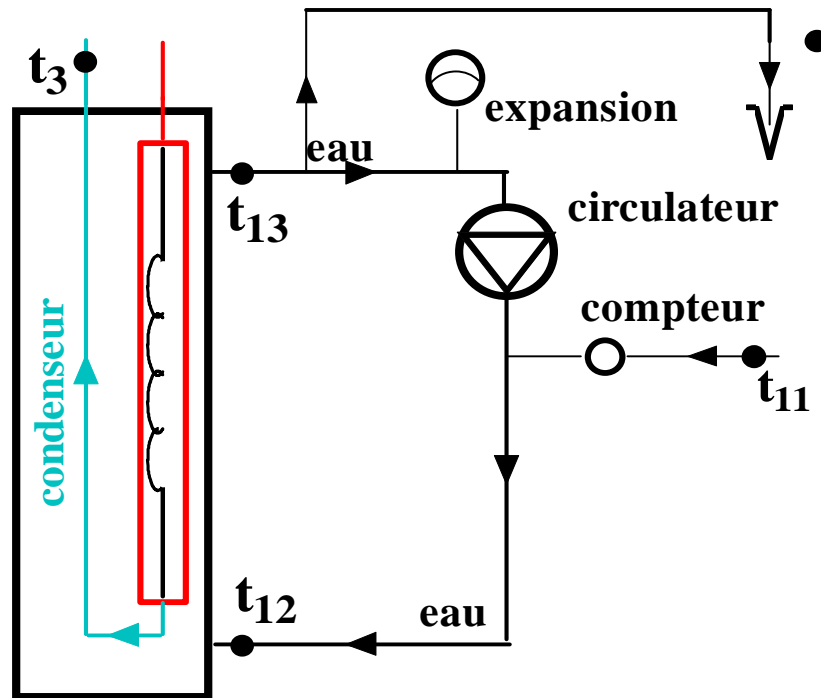


Figure 17: Volume de contrôle englobant le condenseur et le circulateur.

Critique de la méthode du volume global.

Dans ce cas la puissance apportée par l'eau se calcule à l'aide des températures t_{11} et t_{13} . L'erreur supplémentaire de **1000W disparaît** et l'erreur probable sur la puissance échangée (image du ΔT eau) passe de **0.3/8 à 0.3/23 !!!**.

8 Bilans thermiques en régime oscillatoire.

8.1 Oscillations dues à la régulation.

Le système fonctionne parfois en régime instable. En effet, le débit de réfrigérant est constamment régulé par la vanne de détente qui reçoit ses informations du bulbe de prise de température et de l'égalisateur de pression. Le système fonctionne à un niveau moyen auquel se superpose une oscillation provenant des déphasages temporels dus aux différentes constantes de temps du système.

8.2 Influence sur le résultat d'un bilan instantané.

Le terme transitoire en régime oscillant n'a pas beaucoup de sens puisque les masses thermiques absorbent puis restituent sans arrêt de l'énergie. Pour établir les bilans, on peut considérer la moyenne des valeurs extrêmes mesurées pour chaque point de mesure, en utilisant des oscillations espacées de plusieurs périodes.

Mais **avec cette hypothèse de travail**, on sait que l'on commet **des erreurs plus importantes** sur les niveaux puisqu'il y a des déphasages entre oscillations.

8.3 Bilans basés sur une intégration à long terme.

En prenant les index de départ et d'arrêt du régime oscillatoire considéré sur une période d'au moins 30 minutes, on peut trouver, par exemple, un COP moyen de l'installation que l'on pourra comparer avec le COP basé sur une mesure instantanée.

8.4 Contre-vérifications

8.4.1 Débit d'eau

Un moyen simple de vérifier le débit d'eau injecté dans le circuit du condenseur est d'effectuer une pesée du débit rejeté à l'égoût (temps d'intégration 1 minute au moins si c'est possible)

8.4.2 Indications des fiches signalétiques

Il est toujours intéressant de recouper les calculs avec les indications des fiches signalétiques telles que :

- volume balayé par le compresseur,
- puissance électrique des résistances mises en fonction dans la chaudière.