



Opération Unitaire :

Evaporation

Gaëtane COLLARD
Nicolas MADET
Thomas TEISSIER

Licence IUP SIAL
Année universitaire 2003/2004

Lors de ce tp, il s'agit de concentrer un sirop (mélasse) en évaporant l'eau contenue dans le produit. Pour cela, de l'énergie est apportée par de la vapeur surchauffée afin d'être transmise à l'eau du produit pour son passage à l'état gazeux, lors d'un échange à co-courant sans contact entre vapeur de travail et produit dans un évaporateur simple effet.

L'évaporateur à simple effet a pour principe un passage unique et unidirectionnel du produit dans l'appareil. De plus l'échange ne se fait que dans un seul appareil.

Le schéma de principe de l'évaporateur est représenté sur la figure 1 ainsi que les circuits de circulation de produit, vapeur, produit concentré, etc.

Les différents traitements subits par le produit sont indiqués par des numéros afin de faciliter la présentation et l'explication de l'évaporation.

En 1, le produit stocké dans un tank est véhiculé/transporté par une pompe. Il traverse un échangeur thermique afin d'être préchauffé. Dans les conditions normales d'utilisations le produit est seulement chauffé par la vapeur de travail mais dans notre cas, la vapeur de chauffage fournie par la chaudière n'était pas surchauffée et ne pouvait donc pas à la fois chauffer le produit et évaporer l'eau. Le produit est donc préchauffé par de l'eau chaude à contre-courant.

En 2, le tuyau initial transportant le produit se sépare au sommet de l'évaporateur en trois tuyaux de diamètre inférieur afin d'augmenter la surface d'échange entre le produit et la vapeur de travail circulant (à 3 bars) autour des tuyaux. La vapeur circule à co-courant avec le produit.

En bas de l'évaporateur (3), les gouttelettes de produit concentré se séparent de la vapeur d'eau du produit et sont récupérées par une pompe.

Les vapeurs d'eau évaporée du produit sont entraînées, avec des gouttelettes de produit, dans le cyclone (4) où la rotation des vapeurs permet une séparation des gouttelettes restantes qui sont récupérées dans le même circuit que le concentré alors que la vapeur d'eau est récupérée en tête de cyclone.

Au sommet du cyclone, la vapeur d'eau et les gaz incondensables qui s'accumulent dans l'évaporateur et gênent les échanges d'énergie sont récupérés pour être acheminés vers le condenseur.

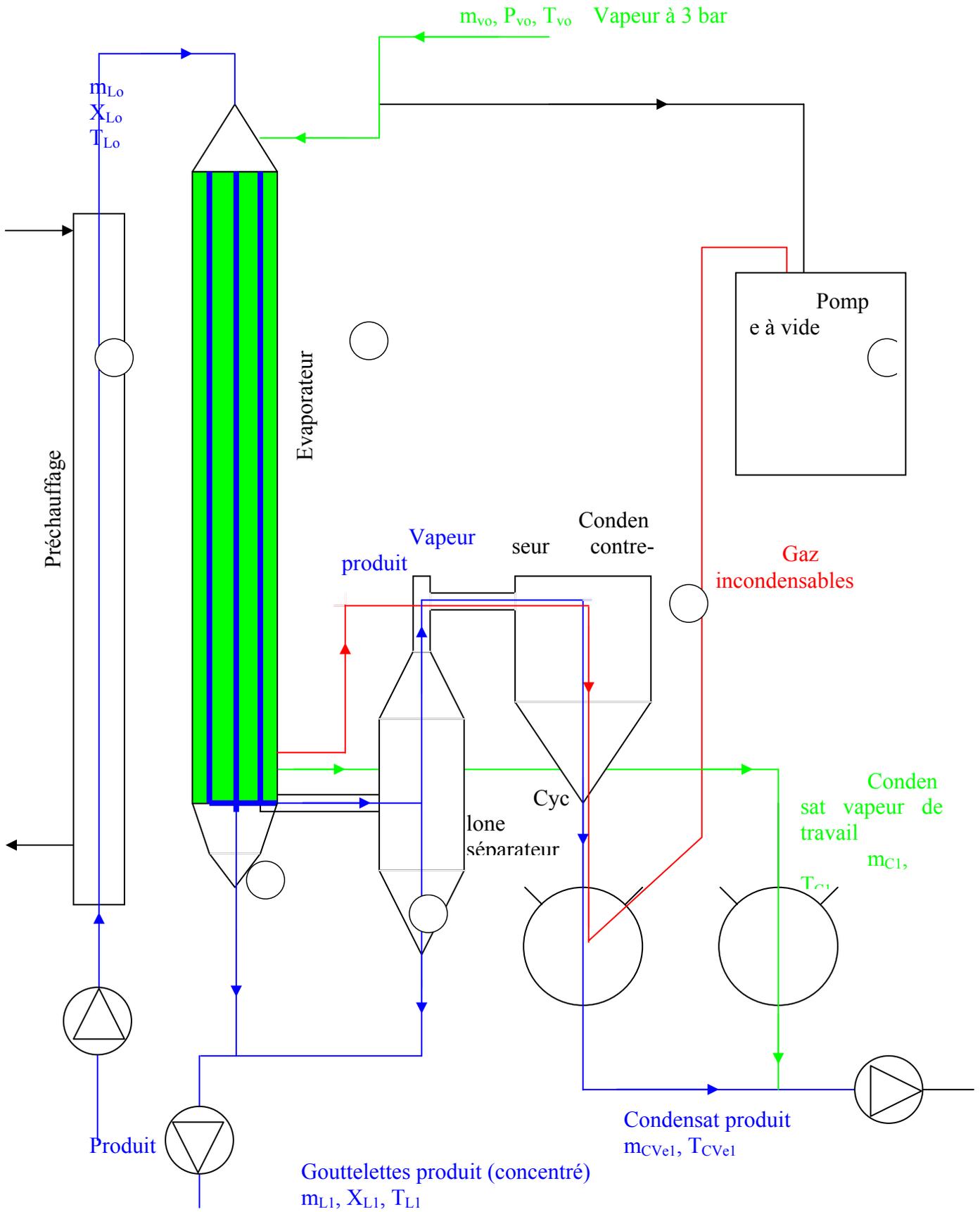
Au niveau du condenseur (5), la vapeur d'eau évaporée du produit est condensée pour être envoyée dans un ballon avec les gaz incondensables. Le condenseur est alimenté par de l'eau froide qui circule à contre-courant.

Dans le ballon de condensat de vapeur d'eau les gaz incondensables sont aspirés par une pompe à vide (6).

La vapeur de travail est récupérée sous forme liquide en bas de l'évaporateur, juste au-dessus de la vapeur d'eau évaporée du produit. Elle est envoyée dans un ballon à la suite duquel, avec le condensat d'eau évaporée

La pompe à vide (6) a aussi pour effet d'amorcer le cheminement de la vapeur de travail vers l'évaporateur au début de la concentration du produit.

Figure 1 : schéma d'un évaporateur simple effet.



Résultats :

Les données recueillies lors de l'évaporation d'eau puis de sirop sont regroupées dans l'annexe I. Les données qu'y ont été relevées sont celles indiquées sur la figure 1 :

- Débit massique de produit, de vapeur de travail, ... en kg/h
- Concentration du produit en fraction massique
- Température en °C
- Pression en mbar

Avec ces différentes données il est possible de calculés des valeurs permettant de qualifier la qualité de l'évaporation effectuée.

✚ Bilan matière :

$$\text{Vapeur : } m_{V_o} = m_{C1}$$

$$\text{Produit : } m_{L_o} = m_{L1} + m_{V_e1}$$

$$\text{Erreur de mesure : Erreur} = (m_{V_o} + m_{L_o}) - (m_{C1} + m_{L1} + m_{V_e1})$$

$$\text{Pour l'eau : Erreur} = 11,54$$

$$\text{Pour le produit : Erreur} = -11,25$$

Ces erreurs peuvent s'expliquer par : - L'instabilité du système tout le long du procédé, ainsi il faut un certain temps pour que le produit qui entre se retrouve à la sortie et ce temps n'est pas connu, donc lorsque les paramètres sont modifiés, les mesures ne sont pas obligatoirement prise sur un système stable, ce qui peut faussé quelque peut les résultats et entraîné des erreurs de mesures.

- Les mesures des débits en particulier qui sont effectuées avec un chronomètre à main et une éprouvette.

- La perte de charge subit par le produit qui a une viscosité plus grande que l'eau, et entraîne donc une diminution des débits entre l'entrée et la sortie plus importante que pour l'eau.

- Les mesures de débits de sortie qui sont effectuées une fois que les vannes placées sous les ballons de condensas sont ouvertes ou fermées.

✚ Bilan matière sèche :

$$X_{L_o}.m_{L_o} = X_{L1}.m_{L1} \quad \text{Soit : } 2666,4 \approx 2700 \text{ kg/h}$$

✚ Bilan enthalpique (évaporateur) :

- Pertes aux parois : $\text{Pertes} = H_{L_o}.m_{L_o} + H_{V_o}.m_{V_o} - (H_{L1}.m_{L1} + H_{V_e1}.m_{V_e1} + H_{C1}.m_{C1})$

H_{V_e1} , H_{V_o} sont donnés par le diagramme de Mollier $H=f(S)$, avec les pressions et les températures relevées.

$$\text{Pour les liquides : } H = C_p.T \quad H \text{ en kJ.kg}^{-1}, C_p \text{ en kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}, T \text{ en } \text{°C}$$

$$C_{p_{\text{eau}}} = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$C_{p_{\text{sirop}}} = (1 - 0,006.X_L).4,18$$

H_{C1} est donné dans la table de correspondance entre les températures / pressions et les enthalpie de la vapeur d'eau saturée.

H en kJ.kg ⁻¹	H _{Lo}	H _{Vo}		H _{L1}	H _{Ve1}		H _{C1}	
		Eau	Produit		Eau	Produit	Eau	Produit
Par le calcul	323,70			266,46				
Par le diagramme de Mollier		2654,3	2654,3		2633,4	2633,4		
Avec le tableau de vapeur saturée							225,98	234,35

H_{Vo} et H_{Ve1} sont placés sur le diagramme de Mollier juste en dessous de la ligne de saturation, c'est-à-dire que la vapeur de travail utilisées ne devait pas être de la vapeur d'eau saturée mais sous-saturée qui ne permet pas d'avoir des échanges optimisés dus à la présence de gouttelettes d'eau dans la vapeur. Mais comme la mesure de température au niveau de l'évaporateur n'était pas très fiable on peut prendre comme hypothèse que celle-ci était décalée de quelques degrés, on peut donc placer nos points sur le diagramme de Mollier au niveau de la ligne de saturation en gardant la même pression de vapeur de travail.

Pour l'eau : pertes = 15411,43 kJ/h

Pour le produit : pertes= 20612,09 kJ/h

Les pertes pour le produit sont plus importantes que pour l'eau. Cette différence peut être due à la différence de densité et de viscosité entre l'eau et le produit qui influe sur les transferts de chaleur. La différence entre les débits de vapeur entrante entre les différents essais (eau et produit) peut aussi être à l'origine de cette différence sur les pertes car pour le produit, le débit de vapeur était plus important donc plus de vapeur passaient dans l'évaporateur mais trop vite pour être utilisée pour l'évaporation, donc plus de pertes.

L'existence de ces pertes peut être expliqués en partie par les imprécisions de mesures mais aussi par la perte de chaleur par effet joule au travers des parois de l'évaporateur.

Pour le calcul des pertes et des énergies, il existe aussi une imprécision sur la les lectures des enthalpies sur le diagramme de Mollier et aussi sur la lecture dans le tableau de vapeur saturée car les échelles de températures vont de 1°C en 1°C et que les températures relevées sont définies au dixième de °C.

- Energie fournie : $E_f = m_{Vo} \cdot H_{Vo}$
Pour l'eau : $E_f = 83849,43$ kJ/h

Pour le produit : $E_f = 99536,25$ kJ/h

La différence entre les énergies fournies pour l'évaporation de l'eau et celle pour le produit est due aux imprécisions de mesures, de lecture et aux différences de débits et des problèmes rencontrés lors de l'évaporation de l'eau (la vapeur produite par la petite chaudière était utilisées par le pilote d'appertisation et diminuait du coup l'énergie fournie par l'évaporateur.).

- % pertes : $\%P = \frac{Pertes}{E_f} \cdot 100$

Pour l'eau : $\%P = 18,38$ %

Pour le produit : $\%P = 20,71$ %

Pour les mêmes raisons que précédemment, le pourcentage de pertes pour le produit est plus important que pour l'eau. De même, l'existence de ce pourcentage de pertes est due au fait que les échanges dans l'évaporateur sont optimisés mais pas optimum, c'est-à-dire que

l'échange entre la vapeur de travail et le produit se fait par l'intermédiaire de trois tuyaux de diamètres définis. Ceci donne une surface d'échange définie qui pourrait être augmenté pour optimiser encore les échanges de chaleurs.

- Energie utilisée pour la concentration : $E_r = m_{V_o}(H_{V_o} - H_{C1}) - \text{pertes}$
 Pour l'eau : $E_r = 61034,79 \text{ kJ/h}$ Pour le produit : $E_r = 70136,03 \text{ kJ/h}$

Les différences s'expliquent avec les imprécisions de mesures, de lecture, et les différences de débits.

- Rendement de l'appareil : $n = \frac{E_r}{E_f} \cdot 100$
 Pour l'eau : $n = 70,46 \%$ Pour le produit : $n = 72,79 \%$

Le peu de différence entre les rendements d'évaporation montre que les erreurs de mesures sont en jeux et que les différences visibles pour les énergies ne sont pas dues aux différences entre l'eau et le produit car le rendement est le même.

- Remarque : Pour le produit : $m_{V_{e1}} = m_{V_o} : \Longrightarrow 33,25 \approx 37,5$

La différence entre le débit d'entrée de vapeur de travail et les vapeurs retirées de produit est expliquée par les pertes. L'énergie apportée par la vapeur de travail à un débit devrait servir à évaporer un même débit de vapeur ayant la même enthalpie. Mais comme il y a des pertes, le débit est différent. Les pertes sont celles dues à l'évaporateur et les pertes d'énergie due au chauffage du produit.

Mais il y a aussi une autre explication, l'enthalpie de la vapeur de travail n'est pas la même que celle de la vapeur récupérée donc la quantité d'énergie fournie pour un même débit n'est pas la même.

🚦 Bilan enthalpique condenseur :

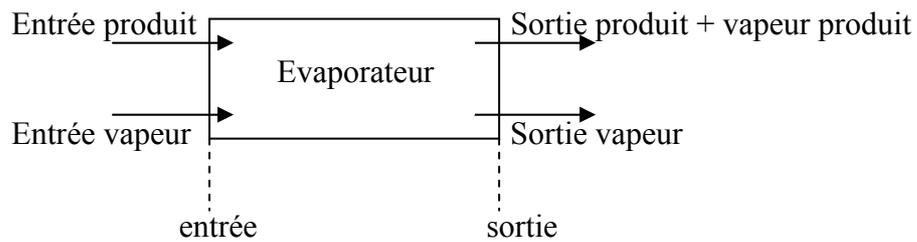
- Pertes : $\text{Pertes} = m_{C_{o0}} \cdot C_{C_{o0}} \cdot T_{C_{o0}} + m_{V_{e1}} \cdot H_{V_{e1}} - (m_{C_{o0}} \cdot C_{C_{o0}} \cdot T_{C_{o1}} + m_{V_{e1}} \cdot C_{V_{e1}} \cdot T_{C2})$
 Pour l'eau : $\text{Pertes} = 16866,90 \text{ kJ/h}$ Pour le produit : $\text{Pertes} = 7102,24 \text{ kJ/h}$

$E_f = m_{C_{o0}} \cdot C_{C_{o0}} \cdot (T_{C_{o1}} - T_{C_{o0}})$
 Pour l'eau : $E_f = 59339,28 \text{ kJ/h}$ Pour le produit : $E_f = 72230,4 \text{ kJ/h}$

$E_r = m_{V_{e1}} \cdot (H_{V_{e1}} - C_{V_{e1}} \cdot T_{C_{V_{e1}}})$
 Pour l'eau : $E_r = 76206,18 \text{ kJ/h}$ Pour le produit : $E_r = 79332,64 \text{ kJ/h}$

- Rendement = $\frac{E_f}{E_r} \cdot 100$
 Pour l'eau : $n = 77,87 \%$ Pour le produit : $n = 91,05 \%$

✚ **Calcul du coefficient de transfert pour l'évaporateur :**



$$Q = K \cdot A \cdot (dT)$$

Q : quantité de chaleur échangée en W

A : surface d'échange $A = 1,35 \text{ m}^2$

K : Coefficient de transfert de chaleur en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$

$Q = E_r$ en W soit : Pour l'eau : $Q = 16954,11 \text{ W}$

Pour le produit : $Q = 19482,23 \text{ W}$

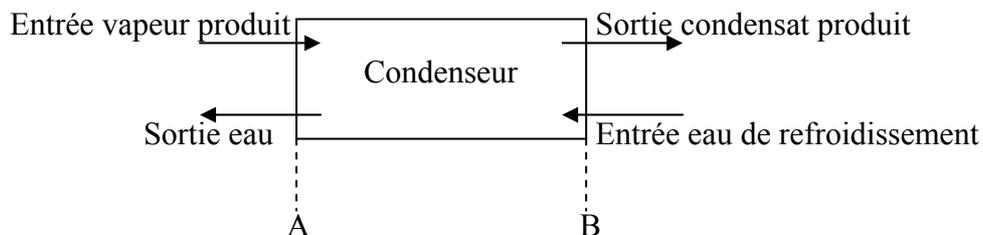
$$K = \frac{Q}{A \cdot (dT)}$$

Pour l'eau : $K = 384,41 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$

Pour le produit : $K = 462,54 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$

La différence entre les deux coefficients de transfert de chaleur réside dans la différence d'énergie qu'il faut apportée pour évaporée de l'eau dans de l'eau par rapport à l'évaporation de l'eau dans le produit.

✚ **Calcul du coefficient de transfert pour le condenseur**



Pour l'eau : $Q = 21168,38 \text{ W}$

Pour le produit : $Q = 22036,84 \text{ W}$

$$Q = K \cdot A \cdot (dT)$$

Q : quantité de chaleur échangée en W

A : surface d'échange $A = 1,35 \text{ m}^2$

K : Coefficient de transfert de chaleur en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$

dT : Moyenne logarithmique de température :

$$dT = \frac{\Delta O_A - \Delta O_B}{\ln \left(\frac{\Delta O_A}{\Delta O_B} \right)}$$

Pour l'eau : $dT = 46,06 \text{ °C}$

Pour le produit : $dT = 47,58 \text{ °C}$

$$K = \frac{Q}{A \cdot (dT)}$$

Pour l'eau : $K = 340,41 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$

Pour le produit : $K = 343,06 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$

On obtient des coefficients de transfert de chaleur sensiblement identiques car les échanges de chaleur se font toujours entre de l'eau froide et de la vapeur d'eau à condenser.

Conclusion

Le pilote d'évaporation a permis de concentrer notre produit par l'apport d'énergie de la condensation de vapeur saturée.

Les rendements pour l'évaporateur sont corrects mais les pertes sont quelques peu élevées mais essentiellement dues aux erreurs de mesures et au fait que la vapeur de travail produite par la chaudière n'était pas suffisamment chaude et peu saturée.

Ce TP a permis de nous familiariser avec le fonctionnement et les principes de l'évaporation simple effet qui pourrait ensuite être étendue aux évaporateurs à multiples effets.

Annexe 1 : Tableau de récapitulation des données relevées au cours du TP.

			Moyenne eau	Moyenne produit
Solution à concentrer (produit entrant)	mLo en kg/h	Débit massique	222,2	202
	XLo fraction massique	Concentration	0	13,2
	TLo en °C	Température	80,2	84,1
Concentré (produit sortant)	mL1 en kg/h	Débit massique	178,73	180
	XL1 fraction massique	Concentration	0	15
	TL1 en °C	Température	70,3	70,05
Vapeur retirée du produit entrant	mVe1 en kg/h	Débit massique	31,62	33,25
	PVe1 mbar	Pression	423,1	417,9
	TVe1 en °C	Température	70,36	70,4
Condensat de vapeur du produit entrant	mCVe1 en kg/h	Débit massique	31,62	33,25
	TCVe1 en °C	Température	53,43	59,2
Vapeur entrante (travail)	mVo en kg/h	Débit massique	31,59	37,5
	PVo mbar	Pression	685	691,1
	TVo en °C	Température	86,4	87,3
Condensat de vapeur de travail	mC1 en kg/h	Débit massique	31,59	37,5
	TC1 en °C	Température	53,73	56,1
Condenseur	TCoo en kg/h	T entrée	9,87	10
Eau	mCoo fraction massique	Débit massique	1200	1200
	TCof en °C	T sortie	21,7	24,4
Vapeur de produit	TVe1 en °C	T entrée	70,36	70,4
	P mbar	Pression	423,1	
	mVe1 en kg/h	Débit massique	31,62	33,25
	TC2 en °C	T sortie	53,43	59,2