

**Résumé :** Partie succincte ! (Max. 10 -12 lignes)  
Contient les informations clées du rapport : ce que vous avez fait, les principaux résultats et les conclusions principales

## TP9 : Evaporation

Le rapport ne doit idéalement pas dépasser 3-4 pages (sans compter les Annexes) !!

### 1. Résumé (15% de la note finale)

Le but de cette expérience est de déterminer les paramètres optimaux d'un système d'évaporation pour concentrer une boisson énergisante du groupe Migors. Pour cela, nous avons étudié la machine d'évaporation de type vertical avec circulation naturelle mis à disposition. Les expériences ont été effectuées en modifiant le flux de la solution de sucre en entrée et en mesurant la concentration de la solution en sortie en utilisant son indice de réfraction. Ces expériences nous ont permis de déterminer un coefficient de transfert de chaleur moyen pour notre système de  $231 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  et d'observer qu'un faible flux en entrée entraînait une plus grande évaporation et donc une plus grande concentration en sortie. Finalement, afin d'obtenir un produit réduit de 30 % en volume à un flux de 300 litres par minutes nous recommandons d'utiliser une machine présentant  $940 \text{ m}^2$  d'aire de contact et une alimentation énergétique en vapeur de 3.3 MW.

**Introduction :** Partie courte également ! (3/4 ou 1 page max).  
Doit rappeler le but du TP, décrire brièvement le processus physico chimique étudié avec et montage expérimental avec vos propres mots. IL EST INUTILE DE RECOPIER LE PROTOCOLE.

### 2. Introduction (10%)

L'étude commandée par la compagnie MIGORS concerne la faisabilité et la détermination des paramètres techniques nécessaire à la mise en place d'un évaporateur continu dans le but de concentrer le produit «M Budget ENERGY DRINK», afin de pouvoir le transporter plus facilement. Les caractéristiques demandées par le client sont une réduction de 30 % en volume du produit et un flux continu de 300 litres par minutes.

L'évaporation est un procédé de séparation largement utilisé dans l'industrie, notamment pour la purification de produits ou la concentration de soluté. Cette méthode est basée sur la différence de température d'ébullition entre le solvant et le soluté, le solvant s'évaporant à plus basse température que le soluté généralement. En éliminant une partie du solvant par évaporation contrôlée, nous pouvons concentrer le soluté dans le solvant non évaporée. La solubilité maximale du saccharose dans l'eau est de 2 kg/L correspondant à 67.5% massique.<sup>1</sup> Le client nous demande de concentrer une solution de 4%m en une solution de 5.7%m, correspondant à une réduction de volume de 30%. La concentration finale reste très inférieure de la limite de solubilité, ce qui devrait prévenir d'éventuels problèmes liés à la cristallisation du produit ou à l'augmentation de la viscosité du produit concentré.

Pour effectuer ces essais de faisabilité, nous avons utilisé un évaporateur de type vertical avec circulation naturelle (voire Figure 1 dans protocole).<sup>2</sup> Celui-ci est constitué d'un tube vertical rempli de la solution de sucre et d'un tube externe contenant de la vapeur qui échange de la chaleur avec le tube interne en se condensant. Les deux flux sont en mode co-courant- La solution monte par circulation naturelle grâce à l'ébullition et à la diminution de la densité. En sortie, la solution concentrée est séparée de la vapeur engendrée par évaporation, qui est condensée et récupérée sous forme d'eau liquide.

Nous présentons ci-après les résultats des expériences effectuées en modifiant le flux d'entrée de la solution. Le taux en sucre dans la solution concentré ainsi que l'énergie de vapeur nécessaire ont été obtenus d'après les équations fournies dans le protocole.<sup>2</sup>

**R&D** : La partie la plus importante du rapport. Elle contient tous les résultats ; tout est commenté par du texte.  
**SEUL** Les graphiques ou figures ou tableaux PRINCIPAUX (ceux qui répondent au problème principal posé dans le TP doivent apparaître dans cette section. Les autres seront dans les annexes.

### 3. Résultats et Discussion (40%)

On utilise pour cette expérience une solution initiale de 10 litres d'eau sucrée avec une concentration massique de 4%. Pour la préparer, 400g de saccharose sont dissous dans 10l d'eau distillée. La concentration de la solution condensée est contrôlée en temps réel en analysant son indice de réfraction en utilisant la courbe d'étalonnage effectué le jour même (voir Figure 1 en Annexe).

Afin de réaliser une expérience reproductible et donc d'obtenir des résultats fiables, la mesure a été effectuée à l'état stationnaire. L'état d'équilibre a été considéré atteint lorsque les nombreuses variables ne varient plus avec le temps, c'est à dire lorsque les quantités de la solution concentrée et de la solution évaporée s'écoulaient du système avec un débit constant, indépendamment du temps. Les mesures ont été effectuées à 3 états stables différents correspondant à 3 flux d'entrée différents de la solution de départ (le débit de vapeur est considéré comme constant). Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 1.

**Tableau 1.** Résultats principaux obtenus à trois flux entrants différents. Les deux concentrations en sucre atteintes ont été calculées d'après le volume évaporée<sup>a</sup> et d'après la courbe d'étalonnage<sup>b</sup>.

Flux entrant	[ml s <sup>-1</sup> ]	0.50	0.75	1.50
Flux sortant <i>Solution Concentrée</i>	[ml s <sup>-1</sup> ]	0.267	0.600	1.433
Flux sortant <i>Solution Evaporée</i>	[ml s <sup>-1</sup> ]	0.200	0.167	0.067
Rapport Flux Conc. / Evap.	[ <sup>-</sup> ]	1.3	3.6	21.5
Concentration Atteinte <sup>a</sup>	[g l <sup>-1</sup> ]	70.1	51.2	41.9
Concentration Atteinte <sup>b</sup>	[g l <sup>-1</sup> ]	71	50	42
Q	[W]	383	441	567
U	[W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	203	220	271

La concentration atteinte<sup>a</sup> est calculée en utilisant le volume évaporé, alors que la concentration atteinte<sup>b</sup> est obtenue à partir de la courbe d'étalonnage. Q et U sont calculés en utilisant respectivement l'équation (4) et l'équation (3) du protocole<sup>2</sup> ainsi que les températures dans le tableau 2 (voir annexe). La solution de départ avait une concentration de 40,05 g l<sup>-1</sup> et la zone d'échange était de 0,122 m<sup>2</sup>.

On peut calculer un coefficient global moyen de transfert de chaleur : en moyennant les 3 résultats obtenus :

$$U_{avg} = 231 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Selon les expériences, plus le flux d'entrée est bas, plus forte est la concentration en sortie. Cela semble raisonnable, car si le débit est faible, la solution a plus de temps pour chauffer et donc est évaporé plus efficacement. Par conséquent, si on veut évaporer beaucoup de solution, et donc la concentrer beaucoup, un faible débit doit être préféré. Cependant, les propriétés physiques de la solution doivent également être prises en compte. En effet, si la solution est trop concentrée, la viscosité, la solubilité, le coefficient de transfert de chaleur et les autres propriétés changeront. Par conséquent, le débit doit être réglé doucement afin d'atteindre la concentration attendue en tenant compte des changements des propriétés physiques de la solution. Autrement dit, un flux d'entrée élevé ne permet pas un transfert de chaleur correct et la solution ne peut pas être ainsi suffisamment chauffée. Comme le montre le tableau (1), le rapport de flux concentré / évaporé est beaucoup plus faible pour un débit faible que pour un débit élevé (voir également Figure 2 en Annexe). Nous avons

ainsi vérifié que nos résultats vérifiaient les données de deux autres groupes (groupes S et G) comme nous l'avait demandé notre assistant pour le TP.

Une autre façon de calculer le transfert de chaleur est de calculer la perte d'énergie par la vapeur. Celle-ci doit être égale à la chaleur échangée par la solution (nous avons supposé des pertes négligeables). Cependant, il n'a pas été possible de quantifier exactement la quantité de vapeur dans le système expérimental. En effet, une vapeur est condensée et coule jusqu'au bas de la colonne alors que la vapeur non condensée quitte le haut de la colonne. Malheureusement, il n'y avait aucun moyen de quantifier la quantité de vapeur recondensée. De plus, l'eau condensée échange de la chaleur avec la solution sucrée et il n'y a aucun moyen de quantifier ce transfert car il n'y a pas de capteur de température pour mesurer sa température.

La question du client était : « Quels devraient être les paramètres afin de réduire le volume d'une solution de 30% avec un débit d'entrée de 300 litres par minute ? »

Avec un système similaire à celui utilisé dans cette expérience, nous constatons qu'une zone d'échange d'environ  $940 \text{ m}^2$  ainsi qu'une alimentation énergétique en vapeur  $Q$  proche de  $3,3 \text{ MW}$ , est nécessaire pour satisfaire le client en négligeant les pertes de chaleur. La zone d'échange nécessaire est plus de 5000 fois plus grande que celle disponible pour l'expérience de sorte que le système sera beaucoup plus grand ou conçu de manière différente comme un système contenant plus de petits tubes pour maximiser la surface de contact. (Voir les calculs en annexe). Afin de pouvoir réduire la superficie nécessaire, il est donc essentiel de considérer un autre design ou de penser à d'autres moyens pour améliorer l'efficacité du système.

**Veuillez inclure vos calculs principaux dans l'annexe**

#### 4. Conclusion (10%)

Le but de l'expérience était d'étudier les propriétés de transfert de chaleur d'un système pour pouvoir appliquer ce processus à une plus grande échelle. Les données expérimentales conduisent à un coefficient de transfert  $U$  moyen de  $231 \text{ W}$ . De plus, nous avons observé qu'un faible flux d'entrée est préférable pour maximiser l'évaporation et par conséquent le « processus de concentration ». Finalement, pour pouvoir concentrer  $300 \text{ l} / \text{min}$  en évaporant 30% du volume d'une solution, nous avons déterminé qu'une alimentation énergétique en vapeur d'environ  $3,3 \text{ MW}$  et qu'une zone d'échange d'environ  $940 \text{ m}^2$  sont nécessaires.

#### 5. Recommandations (20%)

Pour optimiser le processus, plusieurs facteurs doivent être pris en compte : coût, développement du procédé et propriétés physiques. Comme on le voit dans les calculs, le coefficient de transfert de chaleur est proportionnel à l'échange de surface. Par conséquent, plus la surface est grande, meilleur est l'échange de chaleur. Un évaporateur multi-tube doit donc être préféré pour obtenir une meilleure évaporation. Cet évaporateur multi-tube peut également être optimisé avec une boucle. Cette boucle permettrait d'évaporer une fraction moins concentrée en sucre et par conséquent une évaporation plus efficace du solvant. Un évaporateur plus efficace sera peut-être plus coûteux à l'achat, mais pourra diminuer le coût du processus à long terme.

De plus, il est possible de rentabiliser ce processus en récupérant des produits et de l'énergie secondaire. Il est possible recycler la chaleur du solvant évaporé récupérer en haut de colonne pour, par exemple, chauffer de la vapeur d'eau. Le solvant évaporé peut également être purifié de tout le substrat et réutilisé par ailleurs. L'isolation thermique est également un point clé du système, en fait, si l'isolation est mauvaise, il y aura des pertes de chaleur importantes. Afin de minimiser ces pertes, il est donc essentiel de considérer une isolation très efficace dans la conception de l'évaporateur.

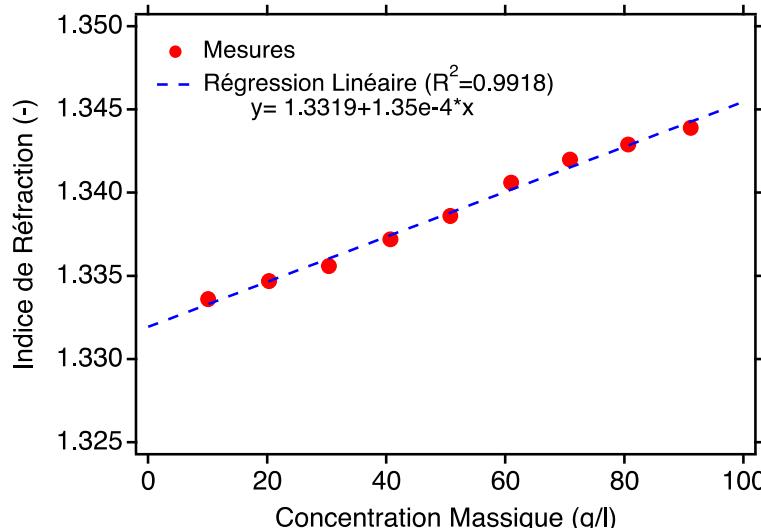
**Recommandations** : Dans une industrie l'ingénieur doit proposer une alternative ou des solutions à tout problème existant ! Ces solutions devraient être quantifiées (prix) dans la mesure du possible. Toute initiative sur un problème observé par l'ingénieur mais non demandé par le client est également bénéfique !

**Recommendations** : Add more references, for example from books or journals. Feel free to ask if you don't know how to look for them

## 6. References (5% de la note finale)

- 1. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Saccharose>, accédé le 01.01.2001
- 2. Manuel de TP « ChE-309 TP9 Evaporation » SIVULA Kevin, Printemps 2015

## 7. Annexes (inclus dans Resultats et discussion)



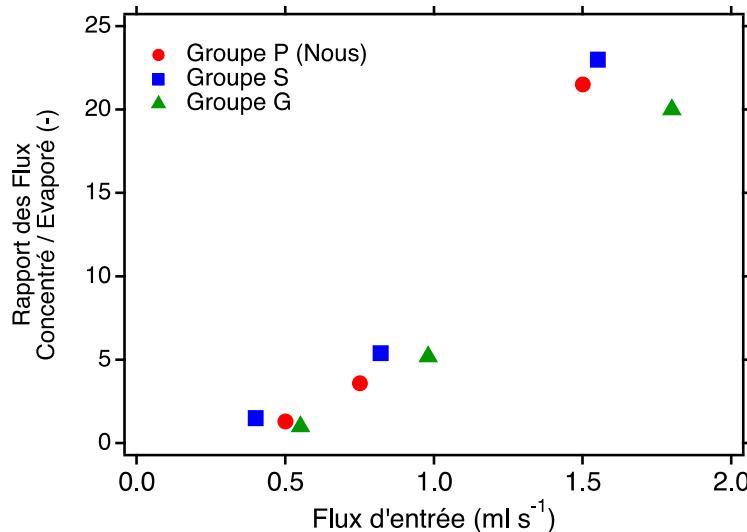
**Exemple de Figure avec graphique :**  
- pas de grille ou de lignes dans le graphique ;  
- des axes graduées équitablement  
- des titres d'axes CLAIRS ET LISIBLES contenant les unités  
- pas besoin de relier les points expérimentaux par une droite à moins que vous ayez un modèle mathématique qui explique cette liaison  
- chaque fit ou régression doit être accompagné d'un  $R^2$  (dans la légende dans ou sous la figure).

**Figure 1.** Courbe de calibration reliant l'indice de réfraction de la solution à la concentration massique. Les points rouges représentent les données mesurées alors que la régression linéaire est montrée avec un ligne bleu pointillées. Le modèle linéaire est raisonnable puisque le coefficient de détermination ( $R^2$ ) est supérieur à 0.99.

**Tableau 2.** Valeurs moyennes des températures en entrée ("in") et en sortie ("out") mesurées pour la solution et pour la vapeur aux trois flux d'entrées de la solution utilisées.

Flux d'entrée	[ml s <sup>-1</sup> ]	0.50	0.75	1.50
$T_{in}$ solution	[K]	396.60	396.84	396.60
$T_{out}$ solution	[K]	473.92	473.54	473.73
$T_{in}$ vapeur	[K]	482.19	486.67	480.01
$T_{out}$ vapeur	[K]	474.26	474.04	474.39

**Les annexes** contiennent toutes les Figures et Tableaux autres que ceux essentiels (dans le cas de ce TP, il n'y a pas de Figure essentiel dans la section R&D par exemple). Mais une ou deux figures essentielles peuvent être placées directement dans la section R & D.



Chaque figure / tableaux doit contenir une légende numérotée qui décrit ce qu'on y voit.

Il est possible de mettre plus qu'une série de données par graphique (exemple : 3 dans celui de gauche). Dans ce cas-là, il faut ajouter une légende (CLAIR et LISIBLE) qui ne cachent pas les données.

**Figure 2.** Evolution du rapport du flux de la solution concentrée par rapport au flux de la solution évaporée, en fonction du flux d'entrée. Nos mesures (ronds rouges) sont comparées aux données relevées par le groupe S (carrés bleus) et par le groupe G (triangles verts).

### Calculs :

En utilisant le même bilan énergétique que l'expérience à l'échelle de laboratoire, il est maintenant possible de calculer la quantité d'énergie nécessaire sous forme de vapeur pour diminuer de 30% le volume de la boisson énergétique «M Budget» et la concentrer à 300 L · min⁻¹. Pour ce faire, les pertes de chaleur sont supposées négligeables et on suppose que la densité de la solution est la même que l'eau pure, ainsi le bilan énergétique (équation (3))<sup>2</sup> devient :

$$\dot{m}_{vap} \cdot \Delta H_{vap}(105^\circ C) = \dot{m}_{in} \cdot C_p \cdot \Delta T + \dot{m}_{evap} \cdot \Delta H_{vap}(100^\circ C)$$

La température de la vapeur qui entre dans la colonne est déterminée en faisant une moyenne de toutes les valeurs enregistrées à la vapeur d'entrée, c'est pourquoi l'enthalpie de vaporisation de la partie vapeur est considérée à 105 ° C. Pour le calcul, toutes les valeurs d'enthalpie sont extraites du Reference-1. La capacité calorifique de la solution de sucre doit également être déterminée et cela est possible grâce à l'équation (4)<sup>2</sup>.

Enfin, le débit massique de vapeur doit être égal à

$$\begin{aligned} \dot{m}_{vap} &= \frac{\dot{m}_{in} \cdot C_p \cdot \Delta T + \dot{m}_{evap} \cdot \Delta H_{vap}(100^\circ C)}{\Delta H_{vap}(105^\circ C)} \\ &= \frac{300[L] \cdot 1 \left[ \frac{kg}{L} \right] \cdot 4.20 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \cdot (373 - 293)[K] + 90[L] \cdot 1 \left[ \frac{kg}{L} \right] \cdot 2256.4 \left[ \frac{kg}{kJ} \right]}{2243.1 \left[ \frac{kg}{kJ} \right]} \end{aligned}$$

On constate que la masse du débit de vapeur est égale à 2,26 kg s⁻¹, ce qui est équivalent en unités d'énergie à 3319 kW.