

Fiche-guide de TD sur la modélisation d'un évapoconcentrateur à trois effets avec thermo-compression

1) Objectifs du TD

L'objectif du projet est d'étudier le fonctionnement d'un évapoconcentrateur et de montrer comment on peut en modéliser de manière réaliste avec Thermoptim.

2) Références

Leleu R., Evaporation, Article J2320, Techniques de l'Ingénieur, Paris.

Reynaud J. F., Concentration par évaporation et recompression mécanique de vapeur, Ed. Eyrolles, Paris, 1984.

3) TD principale

3.1 Enoncé

Cette installation est destinée à concentrer des jus de l'industrie agro-alimentaire (jus de poisson). Elle est composée de 3 corps d'évaporation fonctionnant à des pressions d'évaporation différentes (figure 1).

Un éjecteur (ou thermocompresseur) est associé au 1^{er} corps.

La vapeur chaudière (8 bars) alimente le premier corps par l'intermédiaire de l'éjecteur.

Les vapeurs BP issues du 1^{er} corps sont reprises en partie par l'éjecteur. L'autre partie est envoyée comme vapeur de chauffe du 2^{ème} corps. Les vapeurs BP du 2^{ème} corps sont envoyées comme vapeur de chauffe du 3^{ème} corps. Les buées du 3^{ème} corps sont envoyées vers un condenseur à eau.

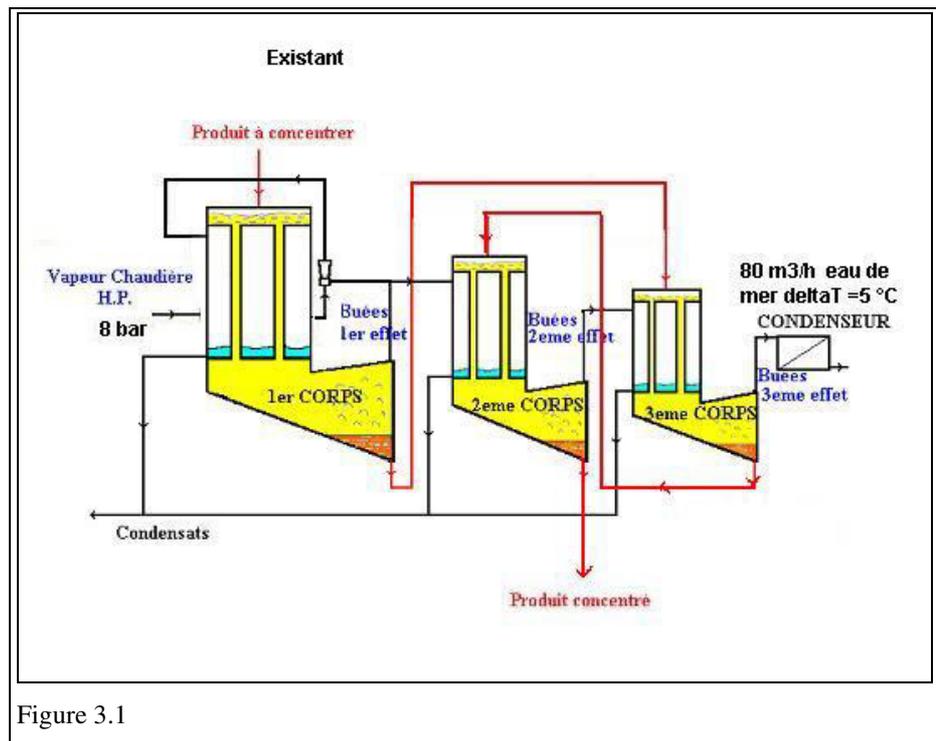


Figure 3.1

Le produit à concentrer (7.5 t/h à 16 % MS (matière sèche) et à 67 °C) est envoyé dans le 1^{er} corps où il se concentre. Le concentrat issu du 1^{er} corps (27 % MS) est envoyé dans le 3^{ème} corps où il passe à 37 % MS. Il est alors envoyé dans le 2^{ème} corps pour atteindre la concentration finale de 50 % MS.

Les pressions des corps sont de 0.578 bar dans le 1^{er}, 0.250 bar dans le 2^{ème} et 0.123 bar dans le 3^{ème}.

Les températures des vapeurs de chauffe sont de 93 °C pour le 1^{er} corps, de 85 °C pour le 2^{ème} corps, de 65 °C pour le 3^{ème} corps.

Il s'agit des pressions et températures de vapeur saturante du jus de poisson, qui dépendent du pourcentage de matière sèche compte tenu du retard à l'ébullition.

On suppose que les pertes thermiques de chaque évaporateur représentent 3 % de l'énergie thermique qui lui est apportée. On supposera que le produit à concentrer peut être représenté par la classe JusPoisson qui est fournie.

On souhaite connaître le débit de vapeur chaudière et la valeur de l'ensemble des paramètres thermodynamiques des fluides entrant et sortant.

Différents taux de recyclage au niveau de l'éjecteur pourront être envisagés.

L'objectif du travail est d'abord de modéliser finement cette installation et de paramétrer le modèle de façon aussi réaliste que possible compte tenu des données disponibles, en justifiant toutes les hypothèses que vous serez amené à faire.

Ce modèle fait appel à deux classes externes : JusPoisson pour modéliser le produit à concentrer, et EvapoConcentrator pour modéliser les différents corps d'évaporation. Elles sont disponibles dans la modélothèque de Thermoptim.

Comme il met en jeu un éjecteur, il est préférable que les élèves aient déjà travaillé avec ce composant. Diverses explications et activités sont proposées à ce sujet dans le portail Thermoptim-Unit¹.

3.2 Modèle JusPoisson

Nous avons développé une classe externe dans laquelle le **produit à concentrer** est modélisé par un **retard à l'ébullition** fonction affine de la concentration x ($\Delta T = 0,5883 + 8,8229 x$), les autres propriétés thermodynamiques étant celles de l'eau (classe JusPoisson²).

Si nécessaire, cette classe pourrait facilement être modifiée pour prendre en compte un modèle plus précis du produit.

3.3 Composant EvapoConcentrator

Un **évapoconcentrateur** (classe EvapoConcentrator³) se comporte comme un diviseur recevant en entrée le produit à concentrer, et d'où sortent deux fluides, des buées (de la vapeur d'eau) et le produit concentré. L'apport de chaleur est assuré par un ou deux fluides, les couplages thermiques étant représentés par un ou deux thermocoupleurs. La raison pour laquelle nous avons introduit deux thermocoupleurs au lieu d'un seul qui semblerait suffire à première vue, est que, dans les cycles à effet multiple, on peut récupérer une partie de l'apport nécessaire à un effet aval en condensant les buées provenant d'un effet amont. Le deuxième thermocoupleur permet ainsi d'apporter le complément manquant à partir d'une autre source de chaleur.

¹ <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/ejecteurs.html>

² <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/jus-poisson.html>

³ <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/modele-evapoconcentr.html>

La structure du modèle d'évapoconcentrateur est donnée figure 2.

Dans un cycle évaporatif à simple effet (figure 3), on injecte en 1 le produit à concentrer (soluté + solvant) dans une unité, chauffée par un apport de chaleur quelconque Q (vapeur 4-5). En 3, en bas de l'unité, est extrait le produit concentré, tandis que la vapeur de solvant (buées) sort en 2 et est condensée, son enthalpie étant perdue.

En appelant x la concentration massique en soluté, les équations qui régissent le comportement de cette unité sont les suivantes :

$$\text{conservation du débit total : } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (1)$$

$$\text{conservation du soluté : } x_1 \dot{m}_1 = x_3 \dot{m}_3 \quad (2)$$

$$\text{conservation de l'enthalpie : } h_1 \dot{m}_1 + Q = h_3 \dot{m}_3 + h_2 \dot{m}_2 \quad (3)$$

Le modèle que l'on peut retenir est le suivant :

- 1) le seul paramètre modifiable est le pourcentage de pertes thermiques (déterminé par rapport à la charge des thermocoupleurs), les concentrations et les pressions du produit en entrée et en sortie du composant étant fixées par leurs valeurs dans l'écran des points ;
- 2) on ne considère pour cet exemple qu'un seul thermocoupleur, le second n'étant pas nécessaire.

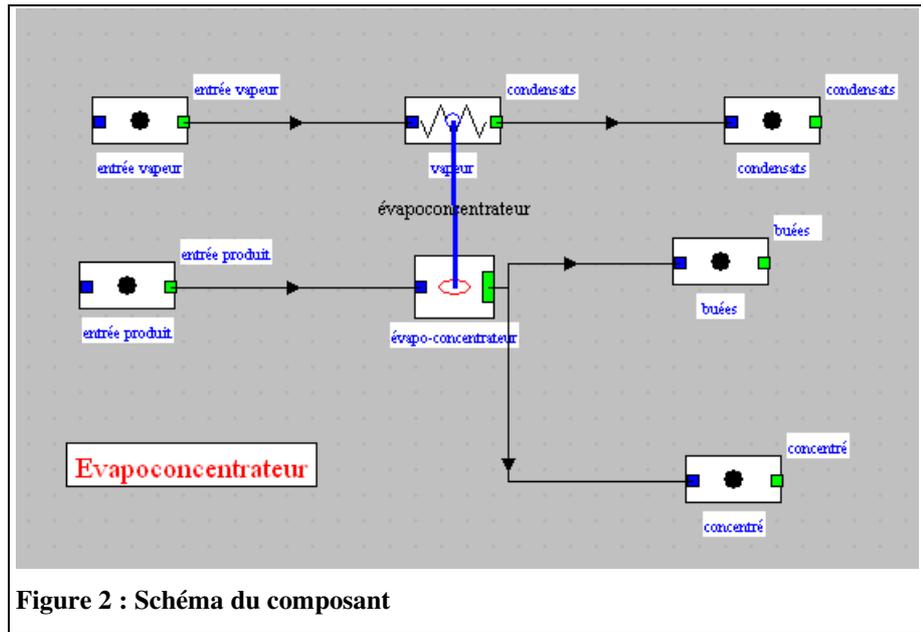


Figure 2 : Schéma du composant

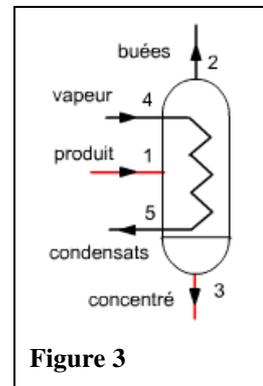


Figure 3

noeud type

veine principale m global

entrée produit h global

isobare T global

nom transfo	m abs	m rel	T (°C)	H
buées	4,5	4,5	102,03	2 680,32
concentré	5,5	5,5	102,03	417,54

EvapoConcentrator

flash temperature (°C) first thermocoupler load share

Poor solution fraction

Conc solution fraction

thermal load

loss coefficient (%)

Figure 4 : Ecran du composant

L'écran du composant est donné figure 4, le produit étant concentré de 11 à 20 %, avec 3 % de pertes thermiques.

nom type

vapeur

thermal fluid

process

Te Te

Ts calculé Ts fluide méthode pinct.

m calculé m pincement minimum

Cp Cp

m ΔH m ΔH

calculate exchange UA

epsilon R

NUT

DTML

Figure 5 : Ecran du thermocoupleur

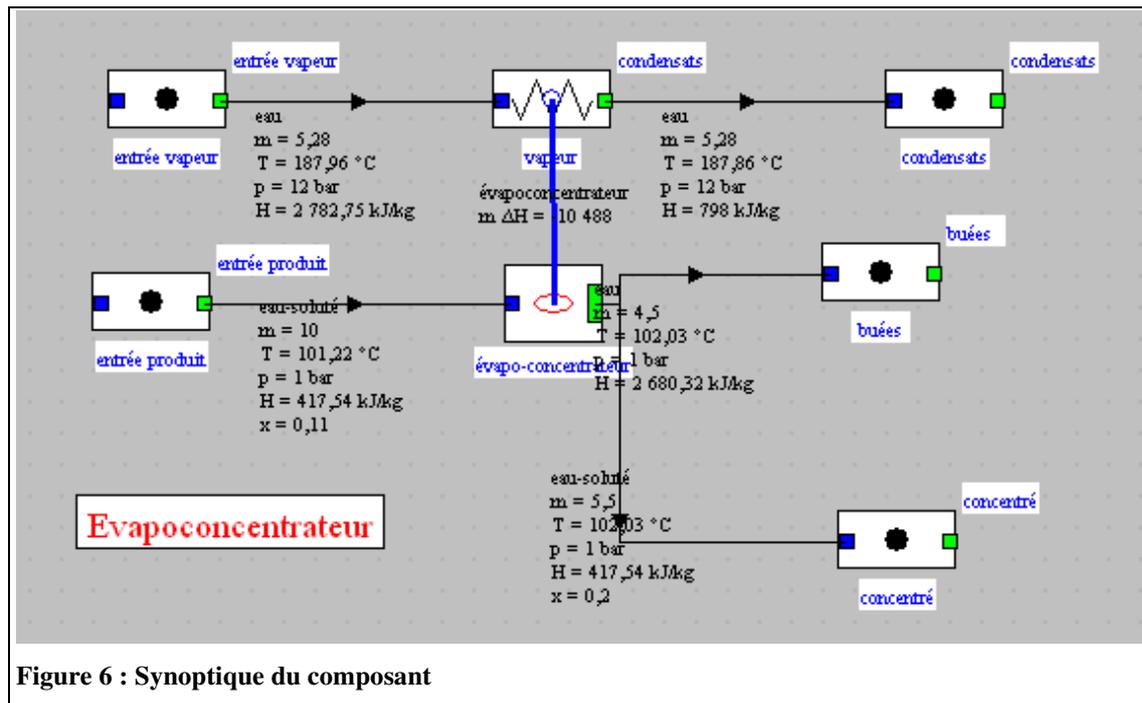


Figure 6 : Synoptique du composant

3.4 Déroulement du TD

On commencera par faire réfléchir les élèves sur la notion de retard à l'ébullition, qui conditionne les pressions et températures du cycle.

On pourra ensuite faire construire le modèle de cycle à simple effet donné section 3.3, qui ne présente aucune difficulté.

On pourra alors construire progressivement le modèle complet (figure 7) en opérant par étapes :

- ajout du deuxième effet
- ajout de l'éjecteur
- ajout du troisième effet

3.5 Dimensionnement technologique

Une activité envisageable si les élèves disposent de suffisamment de temps est de leur demander de calculer des ordres de grandeur de dimensionnement du système (sections de passage...).

4) Variantes

Nous proposons ici quelques variantes, mais de nombreuses autres peuvent être imaginées, en fonction du temps disponible, du niveau des élèves, de leur nombre, et des objectifs pédagogiques poursuivis.

4.1 Remplacement de l'éjecteur par une compression mécanique de vapeur

Il serait intéressant de comparer le modèle avec éjecteur avec un modèle où celui-ci serait remplacé par une compression mécanique de vapeur.

4.2 Etat de l'art des technologies utilisées dans évapoconcentrateurs

Si l'objectif est que les élèves approfondissent leurs connaissances sur les évapoconcentrateurs, il est possible de leur demander de réaliser un état de l'art succinct des technologies utilisées dans ces technologies et des principales contraintes qui existent à ce niveau.

4.3 Bilan exergetique du cycle

Il est enfin possible de demander aux élèves de dresser le bilan exergetique du cycle, s'ils disposent de suffisamment de temps.

La séance Diapason S06⁴ leur fournira si nécessaire des explications sur la manière de procéder.

5) Fichiers de travail, recommandations

5.1 Fichiers de travail

Les fichiers de travail suivants sont joints au dossier dans l'archive evapoconcentr-sujet.zip :

- fichier extUser2.zip contenant ces classes externes
- fichiers de projet et de schéma du modèle Thermoptim

5.2 Recommandations

Il faut que l'enseignant vérifie bien que les élèves ont à leur disposition dans leur environnement de travail Thermoptim les classes externes dont ils auront besoin.

Le plus simple pour cela est de vérifier que les classes EvapoConcentrator, JusPoisson et FluidEjector existent bien dans le fichier extUser2.zip. Sinon, il faut les ajouter.

⁴ Séance S06 : <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S06/seance.html>