

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2018



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité : Electromécanique

Par : (Ksouri Zakaria et Cheriet Abdelaali)

Thème

**Etude d'un évaporateur à effets multiple utilisé dans
l'industrie de la tomate concentré**

Soutenu publiquement, le 02/07/2019 devant le jury composé de:

M/Djebala Abderrazak	Professeur	Univ. Guelma	Président
Mme/ lilia chaabi	MAA	Univ. Guelma	Examineur
M/ KRIBES NABIL	MCA	Univ. Guelma	Examineur
M/Cherif OULD LAHOUCINE	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur

Année Universitaire : 2018/2019

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier DIEU le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadrant **Pr. CHERIF OULD LAHOUCINE** pour l'orientation, la confiance et la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nous présentons nos remerciements pour les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail qui nous a aidé beaucoup et encourage toute à la longue de notre formation.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au chef de département Electrotechnique et Automatique, tous les enseignants, le staff administratif.

Toute l'équipe de production de la tomate du **CAB**

Enfin, toute personne avais élaborés de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Et notre section « 2019 »

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à la lumière de ma vie, au cœur le plus tendre et le plus doux, à celle qui s'est tellement sacrifiée pour me voir toujours meilleur ma très chère **mère**

A l'être le plus cher à mon cœur, à celui qui m'a toujours guidée par ses conseils et qui m'a encouragée à poursuivre mes études **Mon père**

A ma sœur Chérie Et à mes petits frères **Abdou** et **Mohamed** , je vous souhaite une bonne continuation.

A ma femme « **Maroua** » à qui je dois une grande part de la réussite de mon projet grâce à sa soutien et à qui souhaite tout le bonheur du monde

Toute ma famille Mes amis les plus proches **zaki,hamza,amer,mahdi** et **mourad** Tous mes camarades de classe que j'aime beaucoup A tous ceux qui méconnaissent et dont la compagnie m'a été si agréable sur cette terre qui m'a vu naître.

Abdelaali

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à la lumière de ma vie, au cœur le plus tendre et le plus doux, à celle qui s'est tellement sacrifiée pour me voir toujours meilleur ma très chère **mère**

A l'être le plus cher à mon cœur, à celui qui m'a toujours guidée par ses conseils et qui m'a encouragée à poursuivre mes études **Mon père**

A ma sœur Chérie Et à mon frère **Akram**, je vous souhaite une bonne continuation.

A mes frères Toute ma famille Mes amis les plus proches **Oussama ,Hamza ,zaid ,aimen, amar et heythem** Tous mes camarades de classe que j'aime beaucoup A tous ceux qui méconnaissent et dont la compagnie m'a été si agréable sur cette terre qui m'a vu naître.

Zakarya

Sommaire

Sommaire	
Liste des Figures	-
Liste des tableaux	-
Nomenclature	-
Introduction générale	1
Chapitre I : Processus de fabrication de triple concentré de tomate	
I. Introduction	3
II. Le procédé de transformation à l'usine et les équipements	3
II.1 Les opérations préliminaires	3
II.1.1 Pesage	3
II.1.2 La réception	3
II.1.3 Stockage des matières premières	4
II.1.4 Lavage	4
II.1.5 Le triage et parage	5
II.2. Transformation	6
II.2.1 Broyage	6
II.2.2 Préchauffage	6
II.2.3 Tamisage – Raffinage	6
II.2.4 La Concentration	6
II.3 Le conditionnement	8
II.3.1 Le remplissage	8
II.3.2 Le sertissage	8
II.3.3 Pasteurisation	8
II.3.4 Etiquetage	8
II.3.5 Encartonnage	8
II.3.6 Contrôle de qualité	9
A. Contrôle de fabrication	9
B. Contrôle sur le produit fini	9
III. Diagramme de production	10
IV. Conclusion	12
Chapitre II : L'évaporateur	
I. Introduction	13
II. Théorie de l'évaporateur	13

III. Les facteurs de base qui influent sur le taux d'évaporation	13
IV. Principe de fonctionnement	14
V. Evaporateur simple effet	15
VI. Evaporateur multiple effet	16
VI.1 Principe de fonctionnement	17
VI.2 Les différents types d'évaporation multiples effet	18
<i>A. Evaporation triple effet à co-courant</i>	18
<i>B. Evaporation triple effet à contre-courant</i>	19
C. Evaporation triple effet à alimentations parallèles	19
D. Evaporation triple effet à alimentations mixte	20
VII. Exemple de calcul d'une évaporation triple effet à Co-courant	22
VIII. Conclusion	24
Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant	
I. Introduction	25
II. Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant	25
II.1 Evaporateur a simple effet	25
II.2 Méthodes de calcul pour les évaporateurs à effets multiples	27
II.3 Bilan Energétique de l'évaporateur à multiple effets	31
III. Résultats et Interprétations	34
Conclusion général	39
Bibliographie & Webographie	-
Annexe	-
Résumé	-

Liste des Tableau

Tableau	Titre	Page
Tableau III.1	Effet du débit d'alimentation du la solution de tomate.	34
Tableau III.2	Effet des pressions dans les 3 évaporateurs en série.	35
Tableau III.3	Effet de la pression de la vapeur vive P_0 .	36
Tableau III.4	Effet de la concentration de la tomate à sa sortie.	36
Tableau III.5	Evolution de l'efficacité E avec les pressions.	37
Tableau III.6	Evolution de l'efficacité E et des débits V_0 , V_1 , V_2 et V_3 avec les pressions.	37
Tableau III.7	Evolution de l'efficacité E avec la température de la solution à l'entrée.	38

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure I. 1	La réception de tomate.	04
Figure I. 2	Lavage de tomate.	05
Figure I. 3	Contrôle de triage.	05
Figure I. 4	Evaporateur triple effet.	07
Figure I. 5	Diagramme de production	10
Figure I.6	L'usine de pâte de tomate [3]	11
Figure II. 1	Principe de fonctionnement d'un évaporateur.	14
Figure II. 2	évaporateur simple effet.	15
Figure II. 1	Evaporateur avec rebouilleur thermosiphon.	15
Figure II. 2	Evaporateur avec rebouilleur à circulation forcée.	16
Figure II. 3	Multiple-effet évaporateur plants.	17
Figure II. 4	Principe de fonctionnement d'un évaporateur multiple effet.	18
Figure II. 5	évaporation triple effet à co-courant.	18
Figure II. 6	évaporation triple effet à contre-courant.	19
Figure II. 7	Evaporation triple effet à alimentations parallèles.	20
Figure II. 8	Evaporation triple effet à alimentations mixte.	20
Figure II. 11	Système d'évaporation " <i>réel</i> " utilisé pour la concentration de la tomate dans l'usine d'Amor Benamor.	21
Figure III. 1	Diagramme simplifié des différents flux pour l'évaporateur a simple effet.	25
Figure III. 2	Équipement d'évaporation a effets multiples (co-courant).	28

Nomenclature

Symbole	Paramètre	Unité
G_f	le débit de la solution d'alimentation.	kg/h
G_p	le débit du produit concentré.	kg/h
W	le débit de la vapeur sortant de l'évaporateur.	kg/h
X_f	la concentration de concentrée jus de tomate entrant dans l'évaporateur (en poids).	%
X_p	la concentration de concentré de tomate (en poids).	%
Q	La charge thermique de l'évaporateur.	kJ/kg
Q	taux de chaleur transférée.	W
C_1	la chaleur spécifique de l'alimentation.	kJ/kg.°C
C_2	la chaleur spécifique du produit solution.	kJ/kg.°C
C_p	la chaleur spécifique de la solution	kJ /kg
H_v	l'enthalpie de vapeur secondaire.	kJ/kg
H_1	l'enthalpie de la vapeur sortant de l'évaporateur	kJ /kg
t	le point d'ébullition le produit.	°C
t_0	la température de la solution d'alimentation.	°C
C_{H2O}	la chaleur spécifique de l'eau liquide.	kJ/kg °C
L_n	le débit de la solution produite à partir de chaque effet.	kg/h
V_n	La quantité de vapeur produite par chaque effet.	kg /h
T_n	température de la solution dans l'évaporateur (n).	°C
U_n	le coefficient de transfert de chaleur pour le n-ème effet.	kW/m ² .K
D_{vapeur}	le débit massique de la consommation de vapeur.	kg/s
λ	la chaleur lente d'évaporation.	kJ/kg
G_1	le débit de l'évaporateur premier effet.	kg/s

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

En 1984, le Groupe Benamor naît à partir d'une petite unité de transformation de concentré de tomates, la Conserverie Amor Benamor (CAB). Chaque jour, 240 tonnes de tomates fraîches fournissent alors la matière première de son activité.

Deux décennies plus tard, le chemin parcouru est considérable. La filiale CAB est devenue le leader algérien tant en capacité de production (réception de 7 600 tonnes/jour pour produire 1 500 tonnes/jour) qu'en parts de marché (50 %). Ses produits, conserves de tomates, harissa et confitures, sont largement adoptés par les consommateurs algériens.

La production totale de la Conserverie Amor Benamor a été multipliée par plus de 20 entre 1986 à et 2011 passant de 3 000 à 67 000 tonnes. Elle est assurée par trois unités situées à : Bouati Mahmoud et El fedjoudj (wilaya de Guelma), et Boumaiza (wilaya de Skikda).

La tomate est un fruit saisonnier, hautement périssable, et délicat à manipuler puisque relativement fragile à transporter. En comparaison, le concentré quel que soit son conditionnement, pot, tube, boîte de conserve, est pratique, et toujours disponible en toutes saisons.

Au niveau industriel, afin d'économiser l'énergie consommée pour assurer la concentration des solutions de tomate, les évaporateurs sont généralement agencés en multiple effet avec, éventuellement, thermo compression, compression mécanique de vapeur et prélèvement de vapeur pour assurer d'autres besoins dans l'usine.

On appelle évaporateur multiple-effet un ensemble d'évaporateurs dans lesquels la vapeur (de solvant) générée dans un évaporateur (i) est réutilisée comme vapeur de chauffage dans l'évaporateur suivant (i+1). Seul le premier évaporateur est chauffé à l'aide de vapeur vive. Ce principe de fonctionnement est obtenu en décalant les pressions de chacun des évaporateurs, de façon à obtenir dans l'évaporateur (i) une vapeur se condensant à une température supérieure à la température d'ébullition de l'évaporateur (i+1) (de 1 à 20°C par exemple).

Ainsi, avec 1-kg de vapeur vive, on peut générer +/-1-kg de vapeur (de solvant) dans le premier effet, lui-même générant +/-1-kg de vapeur (de solvant) dans le deuxième effet, et

INTRODUCTION GENERALE

ainsi de suite jusqu'au dernier effet, en général sous vide. Dans une évaporation à n effets, 1 kg de vapeur de chauffe peut ainsi évaporer +/-n kg de vapeur d'évaporation. En pratique, le débit évaporé par évaporateur est plus faible.

L'**économie** d'une installation d'évaporation multiple effet est le rapport $(V1+V2+...+Vn)/G$, avec G débit de vapeur de chauffe.

Selon le sens de circulation du liquide et de la vapeur, on parle d'évaporateur à co-courant, si la vapeur et le liquide suivent la même direction, d'évaporateur à contre-courant, si le liquide circule dans le sens contraire de la vapeur ou encore d'évaporateur combiné.

Le présent travail de Master s'intéresse à l'évaporateur triple effet en co-courant de l'usine de concentré de tomate du groupe Amor Benamor. Il faudra noter qu'actuellement la technique d'évaporation utilisée par le Groupe Amor Benamor pour concentrer la tomate de 5% à 35-38% est très énergivore sans aucune économie d'énergie. Toute la vapeur est rejetée vers l'atmosphère ou bien récupérée sous forme de condensat : aussi l'évaporateur triple effet est complètement différent.

Le sujet est un début de collaboration directe entre l'université du 8 Mai 1945 de Guelma et un très grand groupe industriel Algérien, qu'on espèrera pérenne et aboutira à plusieurs autres sujets de recherche-développement de niveaux licence, master et doctorat. Les recommandations proposées à la fin du mémoire peuvent être d'une très grande utilité pour améliorer l'efficacité énergétique de l'usine de tomate d'Amor Benamor.

Le présent mémoire s'articule autour de 3 chapitres. Le premier s'attache à présenter le processus de fabrication du triple concentré de tomate. Le second chapitre concerne l'évaporateur, son principe de fonctionnement ainsi que les différents types d'évaporateurs existants, tout particulièrement ceux utilisés dans l'industrie de la tomate. Dans le chapitre 3, le modèle de l'évaporateur à triple effet en co-courant sera présenté avec les bilans thermiques et massiques, les hypothèses simplificatrices utilisées et l'algorithme de calcul. Quelques résultats importants obtenus et leurs interprétations seront présentés à la fin du chapitre. Finalement, une conclusion de l'étude complètera ce mémoire de master.

Chapitre I

Processus de fabrication de triple concentré de tomate

Chapitre I: Processus de fabrication de triple concentré de tomate

I. INTRODUCTION

La chaîne de fabrication ou le procédé de fabrication, est un ensemble d'opération unitaire réalisée sur la matière première (matière brute) pour la transformer à un autre produit (final ou commercial). Il s'agit de transformer la tomate en concentré. Nous étudierons en détail dans le paragraphe suivant les différentes opérations de ce processus.[3]

II. LE PROCEDE DE TRANSFORMATION A L'USINE ET LES EQUIPEMENTS

II.1 Les opérations préliminaires

II.1.1 Pesage

Avant de rentrer dans la chaîne de transformation, il faudra connaître la quantité des entrants (input). A l'aide d'une bascule, on mesure le poids des tomates input. Ces données permettront aussi de faire les calculs de rendement

Equipement : Nécessité d'une capacité de mesure des petites jusqu'aux grandes quantités (0,5 Kg à 100 Kg). - Grand plateau pouvant supporter les cageots. [1]

II.1.2 La réception

C'est l'opération qui consiste à décharger les cageots de tomates (voir la figure 1.1), la marchandise est ensuite pesée puis subit un échantillonnage pour avoir sa qualité.

Après avoir déterminé le pourcentage des impuretés on choisit 10 tonnes et on le met dans un mixeur pour en extraire un jus, cette opération sert à déterminer le brix de la marchandise[1]



Figure I. 1 : La réception de tomate.

II.1.3 Stockage des matières premières

Il s'agit de stocker la tomate fraîche pendant un temps avant son entrée dans la chaîne de transformation. Ce temps doit être bien approprié car il permet le mûrissement de la tomate. Il suffit de laisser la tomate dans un local bien aéré. [1]

II.1.4 Lavage

Cette opération est essentielle pour l'élimination du "sol" (voir la figure 1.2) qui est les types de sol présents sur les tomates peuvent inclure des résidus de pulvérisation, des micro-organismes, de la saleté, des moisissures, des rongeurs et des œufs et des larves de drosophile, l'eau servant à ce lavage doit être potable. Le sol doit être enlevé parce que tout résidu présent dans le produit en conserve peut le classer comme adultéré. [1]

Equipement : Pour les chaînes de grande capacité, on peut utiliser la machine à laver rotative universelle. Elle permet un lavage à pluie et/ou à immersion avec frottement. Mais pour l'unité en question nous utiliserons un bac à laver. Cette opération sera faite par des femmes-mancœuvres. L'eau servant à ce lavage doit être potable. [1]



Figure I. 2 : Lavage de tomate.

II.1.5 Le triage et parage

L'objectif du triage et du détourage est l'élimination des fruits ou des parties défectueuses et de mauvaise qualité (zones pourries, parties de moisissures, dommages causés par les insectes). Si les tomates lavées sont soigneusement triées de sorte que seul le gros fruit parfait va à l'éplucheur ou au scaldier (voir la figure 1.3), le fruit pourri à la décharge, et le petit fruit difforme à la ligne de mise en pâte, le tri sera un investissement rentable. [1]

Equipement : Couteaux tranchants en acier inoxydable (opération manuelle).



Figure I. 3 : Contrôle de triage.

Chapitre I: Processus de fabrication de triple concentré de tomate

II.2. Transformation

Les étapes de transformation sont :

II.2.1 Broyage

En revanche les tomates fraîches et de bon état seront convoyés vers les huit trémies où elles seront frappées par la vapeur afin de faciliter leur broyage.

II.2.2 Préchauffage

Il consiste à chauffer les tomates broyées avec de la vapeur d'eau dans un milieu contrôlé. La température est voisine de 75°C. Le but est :

- Ramollir la tomate.
- Inhiber les microorganismes.
- Chasser l'air.
- Eviter aussi la décoloration (contrôle de température).

II.2.3 Tamisage – Raffinage

Le produit passe à travers des extracteurs centrifuges à axe vertical. Le jus extrait est pompé vers des évaporateurs, alors que les déchets (pellicules, graines...) sont évacués par une vis sans fin dans un réservoir de collecte.

Equipement : Il s'agit d'un groupe de passoire et de raffineuse. Il en existe à axe horizontal comme à axe vertical. La version à axe vertical plus moderne permet d'obtenir un rendement plus élevé. Elle évite la concentration de la pulpe sur le tamis. [1]

II.2.4 La Concentration

Permet d'obtenir de la tomate avec un taux en matière sèche élevé (Brix) par évaporation ou par osmose inverse. L'eau contenue dans la tomate et celle ajoutée au préchauffage est évacuée et on obtient une pâte selon le degré de concentration désirée. Pour le concentré de tomate (voir figure 1.4), on peut avoir :

- Une simple concentration : le Brix est inférieur à 28% soit 22%
- Un double concentration (la plus commercialisée) : 28%
- Une triple concentration Brix supérieur à 28% soit 38%.

Chapitre I: Processus de fabrication de triple concentré de tomate

La triple concentration permet de conserver de grandes quantités de concentré de tomate dans des volumes réduits. On pourra par la suite obtenir de rupture la tomate dans les la double concentration par une dilution. Cette possibilité est parfois utilisée en cas d'approvisionnement en matière première. [1]

Equipement : Nous avons choisi la boule de concentration par évaporation. C'est l'équipement le plus employé actuellement. Il s'agit de faire bouillir le jus sous vide (afin de garder les propriétés organiques et nutritionnelles). Ainsi, l'eau contenue dans ce jus s'évapore et est condensée en rencontrant de l'eau froide Elle peut être récupérée pour un recyclage afin de diminuer la consommation. Il en existe en simple ou en double effet. Pour une installation de petite capacité, celle à simple effet suffit. Néanmoins la concentration durera beaucoup plus longtemps à cause de l'alimentation discontinue et répétée de la boule [2]

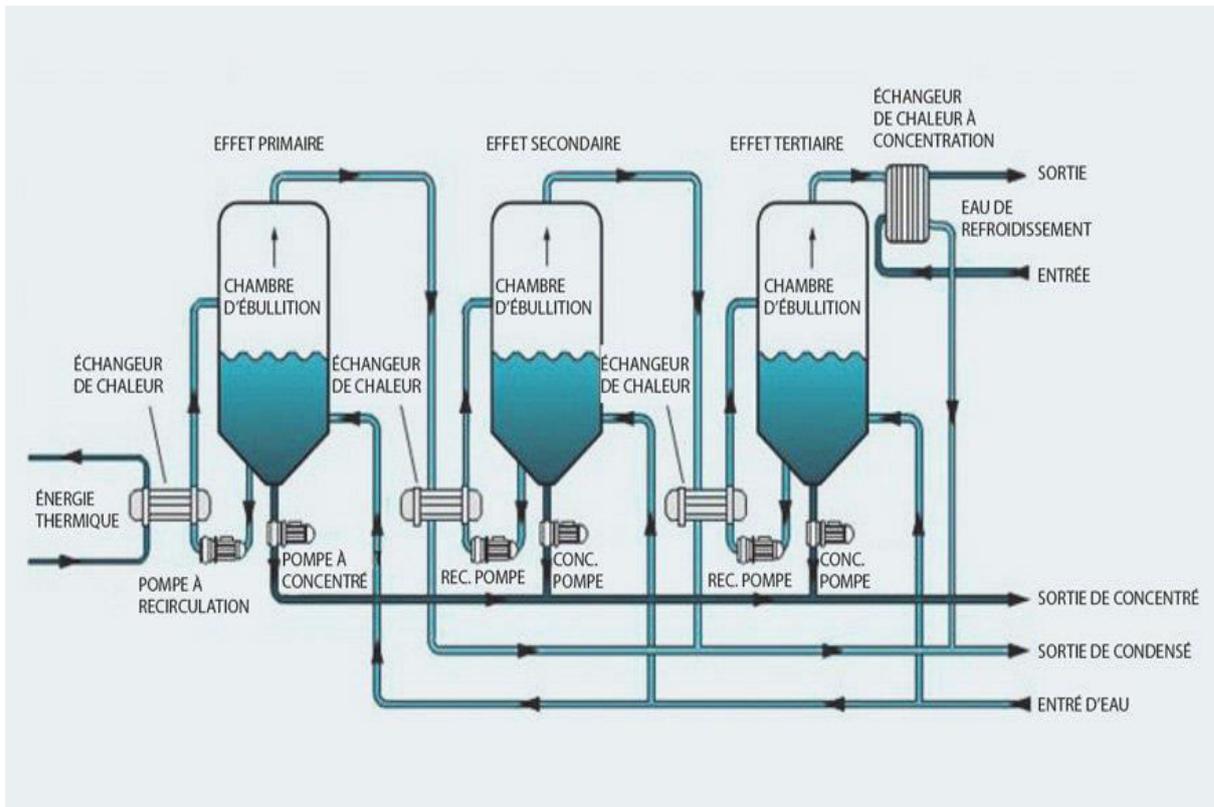


Figure I. 4 : Evaporateur triple effet.

Chapitre I: Processus de fabrication de triple concentré de tomate

II.3 Le conditionnement

II.3.1 Le remplissage

C'est l'étape qui consiste à remplir les boîtes métalliques par le concentré obtenu. C'est une opération qui doit se faire rapidement de façon à éviter un trop grand contact du produit avec de l'air atmosphérique.

II.3.2 Le sertissage

Elle permet d'assembler le corps (cylindrique en général) à un ou deux fonds (circulaires en général). Cette opération est réalisée à l'aide d'une sertisseuse, qui peut être manuelle ou automatique.

II.3.3 Pasteurisation

Elle consiste à plonger les boîtes serties dans une atmosphère de vapeur surchauffée pendant une demi-heure environ et de les refroidir rapidement. Cette opération est nécessaire surtout pour les boîtes de 2,5 Kg à 5Kg. En effet la quantité de chaleur reçue par un point de la boîte est inversement proportionnelle au carré de la distance entre ce point et l'extérieur de la boîte. Elle doit être suivie d'une trempe dans de l'eau froide afin de stabiliser le contenu. La pasteurisation se fera avec un équipement de fabrication locale.

Equipement : Il se fait dans une enceinte qui permet d'éviter tous les problèmes rencontrés avec les équipements artisanaux décrits par le Bureau International du Travail. Les tomates broyées sont entraînées par la rotation de la vis du Thermobreak permettant une homogénéisation. [1]

II.3.4 Etiquetage

Après le séchage des boîtes, elles seront étiquetées. Il s'agit de coller sur la boîte des étiquettes indiquant essentiellement la date limite de consommation, l'usine productrice, le poids et le Brix du contenu. Il faudra veiller à l'aspect esthétique de cette étiquette. La loi fixe le contenu des étiquettes.

II.3.5 Encartonnage

C'est l'emballage d'un certain nombre de boîtes dans un carton pour le stockage.

II.3.6 Contrôle de qualité

L'industrie agro-alimentaire est un domaine où le contrôle de la qualité s'avère indispensable, car les produits proposés ont une influence directe sur la santé des populations. De manière générale, il s'agira de veiller à ce que les différentes transformations conservent les propriétés nutritionnelles et organoleptiques de la tomate. Pour ce faire le contrôle se fera à différents niveaux. [2]

A. Contrôle de fabrication

Il s'agit ici de respecter les spécifications des spécialistes et du fabricant des équipements. Les contrôles à effectuer seront au niveau des températures, des pressions, de la qualité de l'eau de service et du Brix. A cet effet, on élaborera dans le cadre de l'exploitation un manuel de contrôle rassemblant l'ensemble des opérations et des vérifications à effectuer à chaque étape du processus. [2]

B. Contrôle sur le produit fini

Il portera sur les caractères physiques, organoleptiques et chimiques d'une part et d'autre part sur la stabilité et la qualité du serti.

Contrôle de sertissage Pendant la pasteurisation la pâte de tomate sortira de la boîte si le serti est mal fait. C'est déjà un critère de contrôle. On peut aussi observer le même phénomène pendant la trempe (différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur). [2]

- Sinon on peut supposer que le serti est bien fait. Cependant on ne peut rien dire s'il tiendra pendant longtemps.
- **Contrôle de la stabilité** Il faut garder des échantillons de chaque production au 21 laboratoire et l'observer pendant une période assez longue. Si la boîte n'est pas rouillée alors on peut conclure que le contenu est en bon état. Pour les contrôles des caractéristiques du concentré il faut vérifier :
 - La couleur : rouge.
 - La texture et la consistance.
 - Le taux d'impuretés.
 - La saveur et l'arôme la teneur en sucres, vitamines et minéraux.
 - L'acidité Il s'agira de comparer ces valeurs aux normes. [2]

III. DIAGRAMME DE PRODUCTION

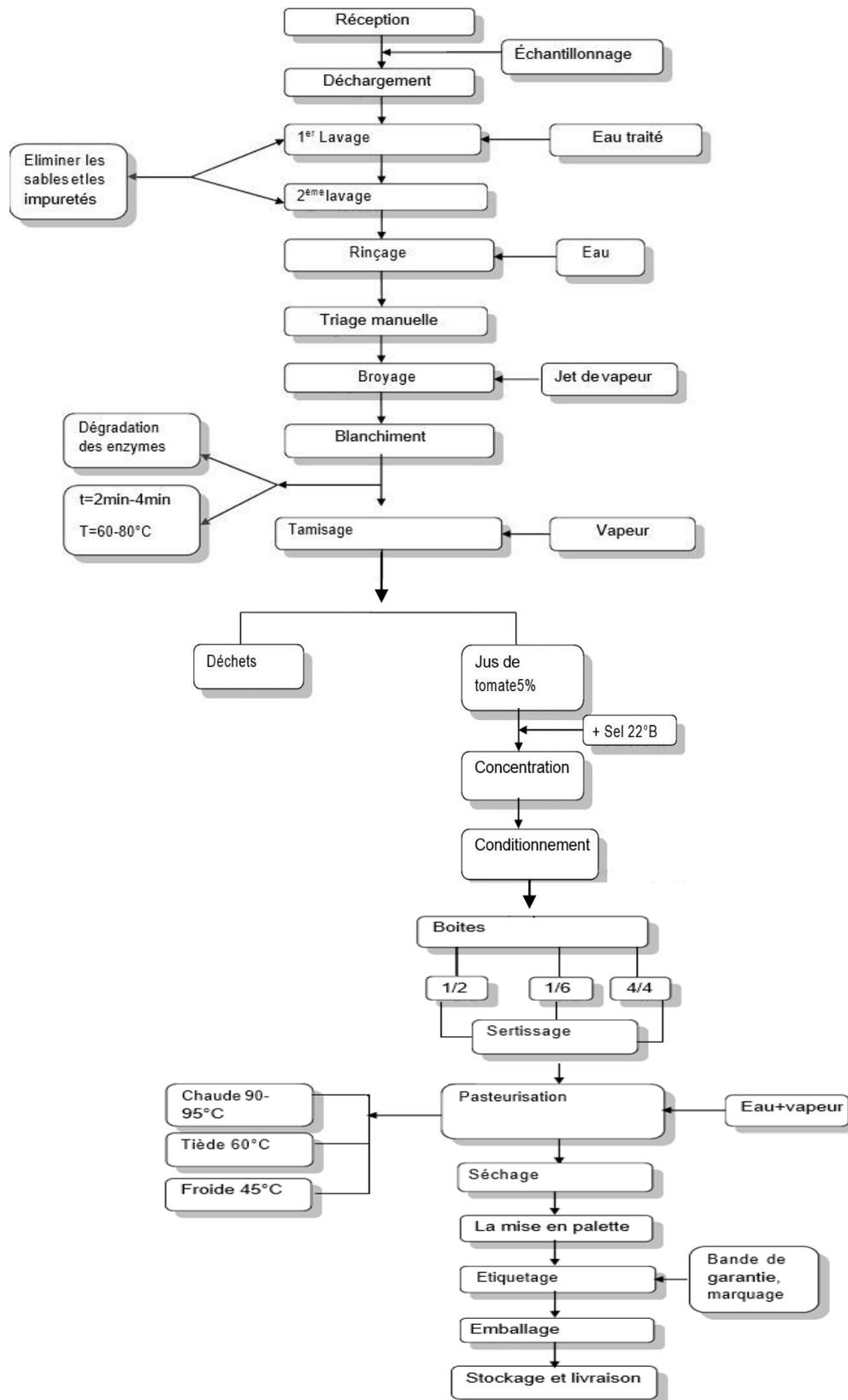


Figure I. 5 : Diagramme de production

IV. CONCLUSION

Nous avons vu dans ce chapitre le processus de fabrication de la matière première afin de la transformer en un produit final.

Le prochain chapitre certainement le plus important, sera consacré à l'évaporateur puisque c'est l'équipement thermique utilisé pour évaporer une partie de la phase liquide qui se trouve dans la solution de la tomate afin d'obtenir en sortie du dernier évaporateur la concentration voulue.

Chapitre II

Evaporateur

I. INTRODUCTION

En termes simples, l'évaporation est le processus de concentration d'une solution pour éliminer l'excès de solvant (l'eau dans la plupart des cas) de manière à obtenir un produit final concentré. L'évaporateur est utilisé pour effectuer ce processus en utilisant la vapeur comme un moyen de chauffage dans la plupart des cas.

II. THEORIE DE L'EVAPORATEUR

Chaque évaporateur est constitué de deux sections. La première est une section de chauffage dans laquelle la vapeur est introduite dans un caisson à vapeur, où elle se condense sur les parois extérieures des tubes à travers lesquels passe le jus. Le jus est généralement introduit dans l'évaporateur au-dessous de la plaque tubulaire inférieure et remonte dans les tubes soit à la suite de phénomènes d'ébullition, soit par circulation forcée. Au-dessus de la plaque du tube supérieur se trouve un espace de dégagement dans lequel le jus et la vapeur peuvent se séparer. Le jus est ensuite canalisé vers une prise descendante, qui peut être centrale ou annulaire, et la vapeur est canalisée pour alimenter le coffre à vapeur de l'effet suivant. [7]

III. LES FACTEURS DE BASE QUI INFLUENT SUR LE TAUX D'EVAPORATION

Les facteurs de base qui influent sur le taux d'évaporation sont :

- Taux auquel la chaleur peut être transférée au liquide,
- Quantité de chaleur nécessaire pour évaporer chaque kilogramme d'eau,
- Température maximale admissible du liquide,
- La pression à laquelle l'évaporation a lieu,
- Les changements qui peuvent survenir dans la denrée alimentaire au cours du processus d'évaporation.

L'évaporateur a deux fonctions principales, d'échanger de la chaleur et de séparer la vapeur qui se forme du liquide. Les considérations pratiques importantes dans les évaporateurs sont les suivantes :

- Température maximale admissible, qui peut être sensiblement inférieure à 100 ° C.
- La promotion de la circulation du liquide à travers les surfaces de transfert de chaleur, afin d'atteindre des coefficients de transfert de chaleur raisonnablement élevés et d'éviter toute surchauffe locale,
- La viscosité du fluide qui augmente souvent de façon substantielle à mesure que la concentration des substances dissoutes augmente,
- Une tendance à la mousse qui rend la séparation du liquide et de la vapeur difficile.[7]

IV. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'effluent est porté à ébullition pour évaporer l'eau et concentrer les produits qui ont une température d'ébullition supérieure à celle de l'eau. Il s'effectue une séparation entre le concentrat (produit concentré) et le condensat (produit dilué). Selon le type de problématique, il peut être recherché la valorisation du concentrat ou du distillat, rarement les deux (voir figure 2.1).[4]

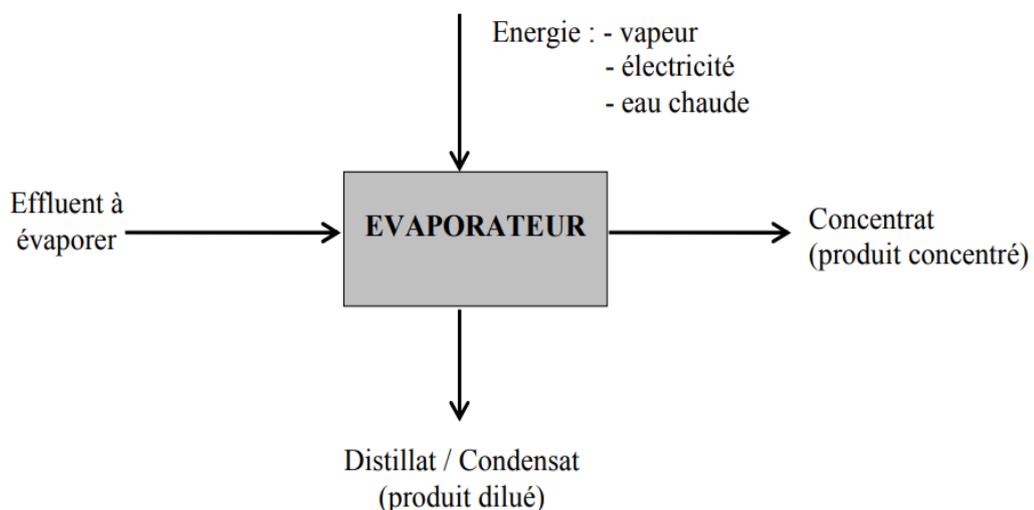


Figure II. 1 : Principe de fonctionnement d'un évaporateur.

La température d'ébullition peut être modifiée par ajustement de la pression, en fonction des effluents à traiter. Elle varie en général de 20°C jusqu'à 100-110°C.

V. EVAPORATEUR SIMPLE EFFET

On appelle évaporateur simple effet (par opposition à évaporateur multiple-effet), un évaporateur dans lequel la vapeur (de solvant) générée n'est pas réutilisée. Cette vapeur peut être soit rejetée à l'atmosphère (voir figure 2.2), soit condensée (condenseur à eau de refroidissement ou condenseur à mélange), soit subir un autre traitement.[4]

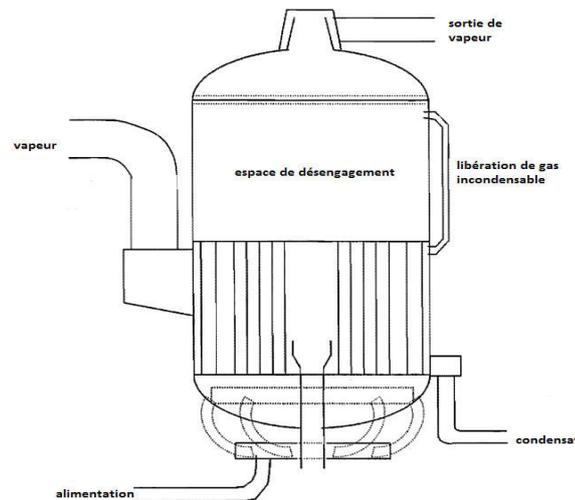


Figure II. 2 : évaporateur simple effet.

Exemple : les évaporateurs représentés ci-dessous présentent un dôme large, équipé d'un déflecteur, permettant de séparer efficacement le liquide et la vapeur. La jambe assure un inventaire de liquide pour le fonctionnement de la pompe et/ou du rebouilleur externe à la vapeur.[5]

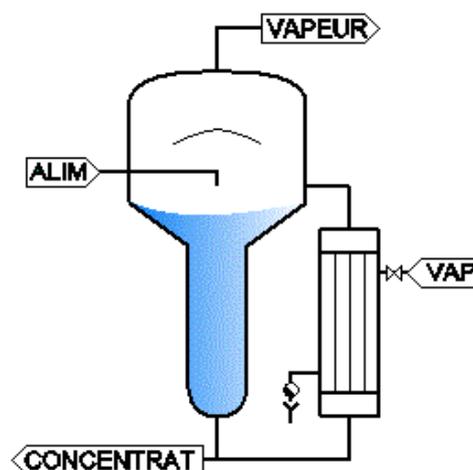


Figure II. 3 : Evaporateur avec rebouilleur thermosiphon.

La circulation naturelle dans le rebouilleur est obtenue par vaporisation partielle du mélange alimentant l'échangeur. La baisse de densité moyenne provoque une diminution de la charge hydrostatique, et une mise en circulation du mélange dans l'échangeur. Ce système constitue ce que l'on appelle un rebouilleur thermosiphon (voir figure 2.3).[5]

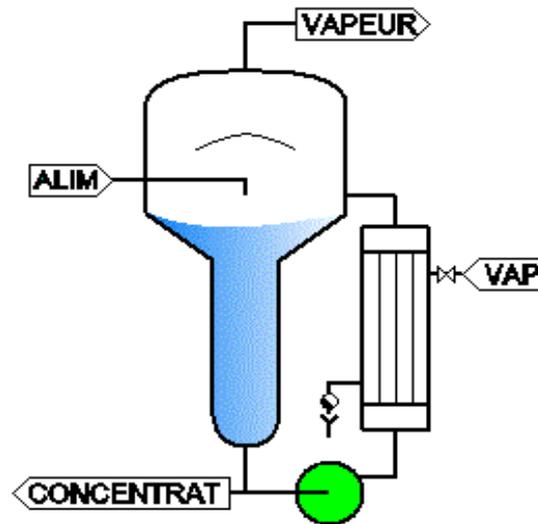


Figure II. 4 : Evaporateur avec rebouilleur à circulation forcée.

Dans les cas difficiles (viscosité élevée du concentrat, problèmes d'amorçage du thermosiphon, volonté de limiter la vaporisation dans l'échangeur pour cause d'encrassement), on force un débit de circulation élevé dans l'échangeur, ce qui permet également parfois d'obtenir de meilleurs coefficients d'échange.

Quand un seul évaporateur est utilisé, la vapeur du liquide bouillant est condensée et jetée. C'est ce qu'on appelle l'évaporation à effet unique. C'est simple mais utilise la vapeur de manière inefficace (voir figure 2.4).

Pour évaporer 1 kg d'eau de la solution, nous avons besoin de 1 à 1,3 kg de vapeur.[5]

VI. EVAPORATEUR MULTIPLE EFFET

On appelle évaporateur multiple-effet (voir figure 2.5) un ensemble d'évaporateurs dans lesquels la vapeur (de solvant) générée dans un évaporateur (i) est réutilisée comme vapeur de chauffage dans l'évaporateur suivant (i+1). Seul le premier évaporateur est chauffé à l'aide de vapeur vive. Ce principe de fonctionnement est obtenu en décalant les pressions de chacun des évaporateurs, de façon à obtenir dans l'évaporateur (i) une vapeur se condensant à

une température supérieure à la température d'ébullition de l'évaporateur (i+1) (de 1 à 20°C par exemple). Ainsi, avec 1 kg de vapeur vive, on peut générer +/-1 kg de vapeur (de solvant) dans le premier effet, lui-même générant +/-1kg de vapeur (de solvant) dans le deuxième effet, et ainsi de suite jusqu'au dernier effet, en général sous vide. Dans une évaporation à n effets, 1 kg de vapeur de chauffe peut ainsi évaporer +/-n kg de vapeur d'évaporation. En pratique, le débit évaporé par évaporateur est plus faible. L'économie d'une installation d'évaporation multiple effet est le rapport $(V_1+V_2+...+V_n) /G$, avec G débit de vapeur de chauffe.[4]



Figure II. 5 : Multiple-effet évaporateur plants.

VI.1 Principe de fonctionnement

Le multiple effet consiste en à mettre en série plusieurs évaporateurs à simple effet, chaque évaporateur fonctionnant à une pression différente (voir figure 2.6). L'intérêt de ce type d'évaporateur est de pouvoir multiplier le nombre d'effets et de diminuer d'une façon presque proportionnelle le coût énergétique en fonction du nombre d'effets. Le multiple effet n'a pas de limitation de débit. Deux types principaux d'évaporateurs peuvent être associés dans une même installation, ce sont les évaporateurs à flot tombant et les évaporateurs à circulation forcée.[7]

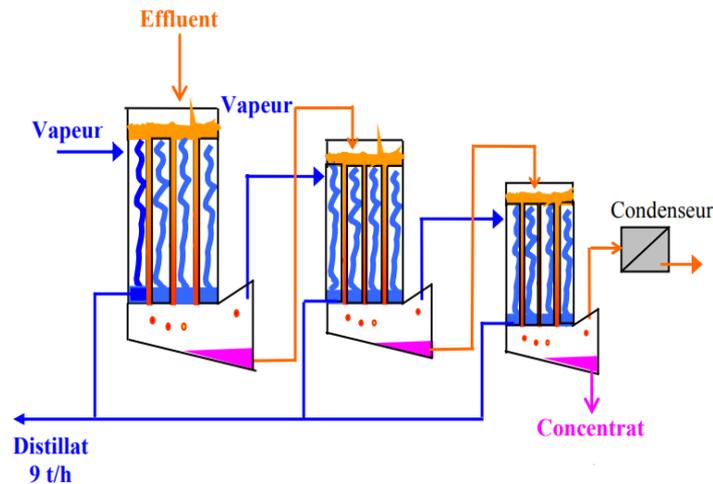


Figure II. 6 : Principe de fonctionnement d'un évaporateur multiple effet.

VI.2 Les différents types d'évaporation multiples effet

Les différents types d'évaporation multiples effet sont :

A. *Evaporation triple effet à co-courant*

- Évaporateur 1er effet à gauche (pression et température la plus élevée).
- Évaporateur 3ème effet à droite (pression et température la plus faible, éventuellement sous vide).
- Solution la plus concentrée sortant de l'évaporateur à la plus basse température.
- Minimise le risque de dégradation pour les produits thermosensibles.
- Peut générer des problèmes si le concentrât est visqueux à faible température (voir figure 2.7). [5]

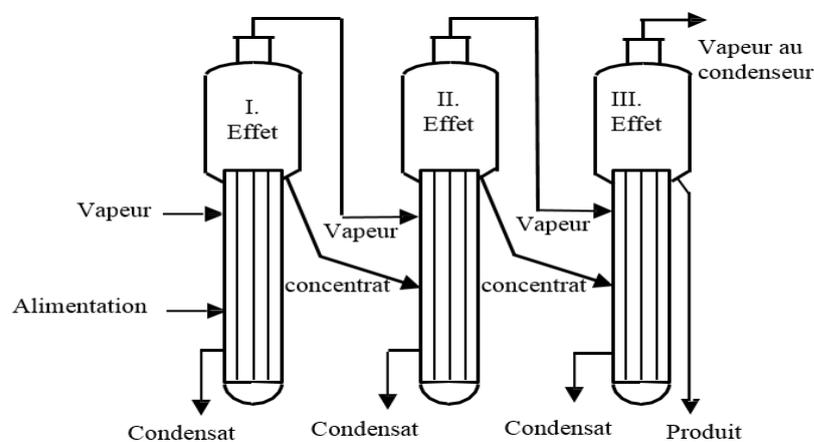


Figure II. 7 : évaporation triple effet à co-courant.

B. Evaporation triple effet à contre-courant

- Évaporateur 1er effet à droite (pression et température la plus élevée).
- Évaporateur 3ème effet à gauche (pression et température la plus faible, éventuellement sous vide).
- Solution la plus concentrée sortant de l'évaporateur à la température la plus élevée
- Risque de dégradation pour les produits thermosensibles.
- Avantageux dans le cas où le concentrât est visqueux à faible température.
- Nécessité d'une pompe de reprise des concentrats de chaque évaporateur vers le suivant, à pression plus élevée (voir figure 2.7). [5]

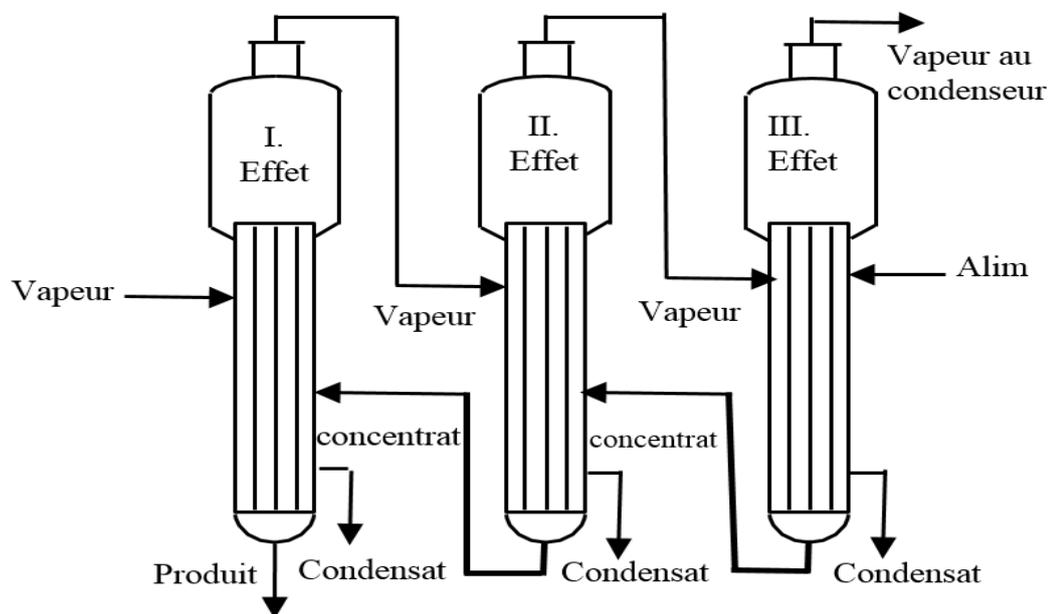


Figure II. 8 : évaporation triple effet à contre-courant.

C. Evaporation triple effet à alimentations parallèles

- Alimentation de chaque évaporateur réglable indépendamment.
- Possibilité de régler plusieurs qualités de concentrats (voir figure 2.9). [5]

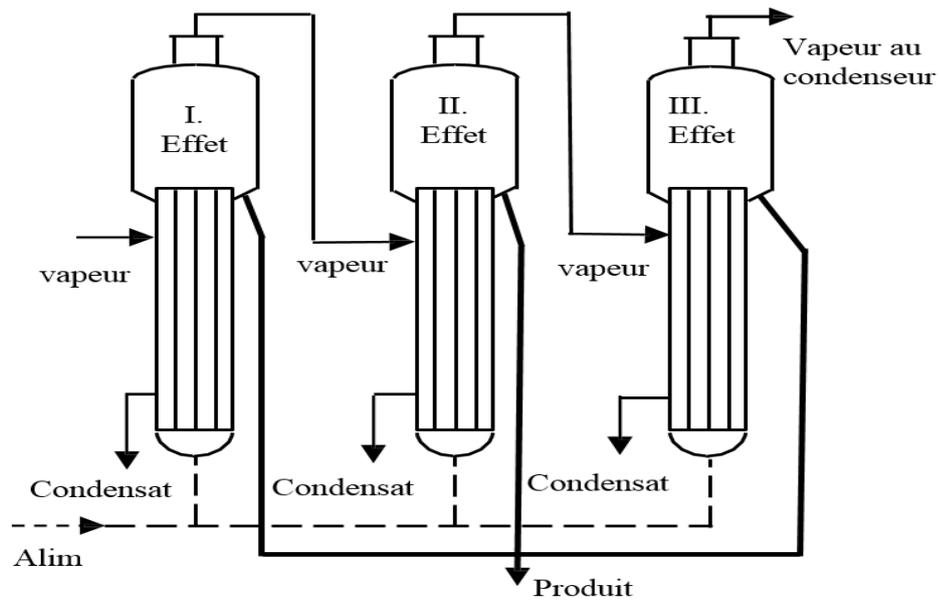


Figure II. 9 : Evaporation triple effet à alimentations parallèles.

D. Evaporation triple effet à alimentations mixte

- L'opération d'alimentation mixte (voir figure 2.10) est utilisée dans des solutions qui tiennent compte de la modification de la viscosité avec la température sur la plage de concentration.[5]

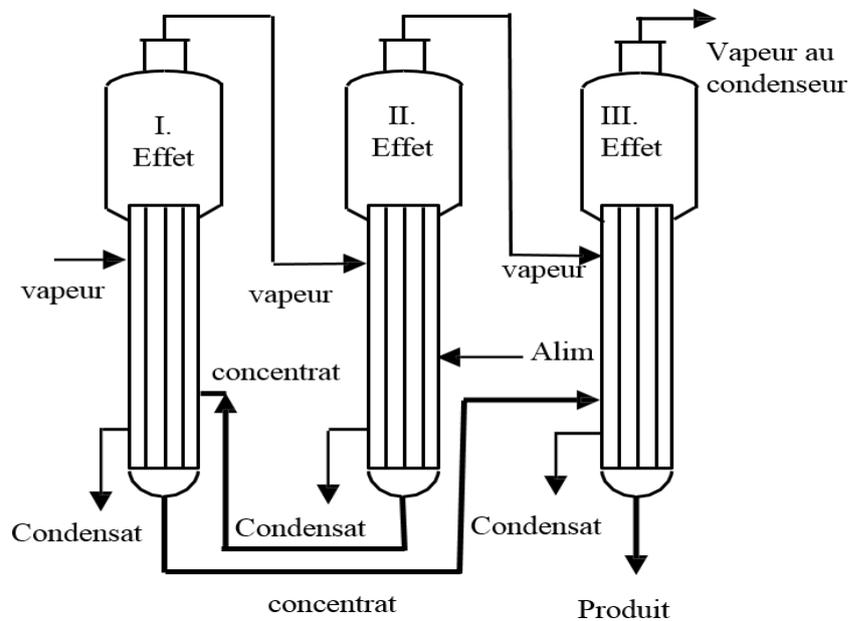


Figure II. 10 : Evaporation triple effet à alimentations mixte.

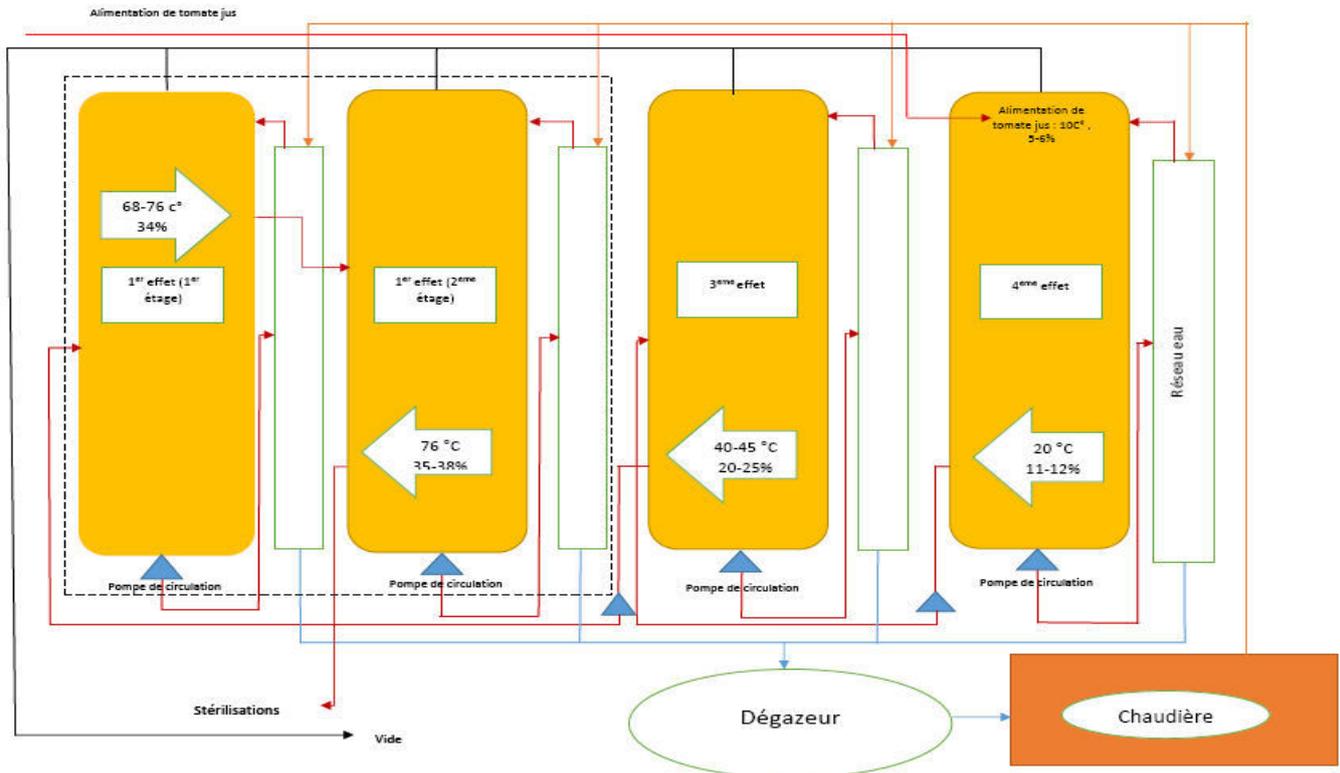


Figure II. 11 : Système d'évaporation "réel" utilisé pour la concentration de la tomate dans l'usine d'Amor Benamor.

D'après la figure 2.11, le système utilisé par le Groupe Amor Benamor pour l'évaporation de la solution de tomate n'est pas économique. La chaudière produit de la vapeur à 0.5 bar, et la distribue aux différents évaporateurs (4 en tout) qui sont placés en série. La vapeur vive entre dans ce cas non pas dans un seul évaporateur mais dans tous les évaporateurs, de plus, il n'y a aucune récupération de la vapeur dans un évaporateur pour la réinjecter dans le suivant. Ce système est par conséquent très énergivore, il n'existe de ce fait dans cette usine aucune économie d'énergie, et l'efficacité est égale à 0 (somme des débits de vapeur récupérée sur chaque évaporateur divisée par le débit de la vapeur vive produite dans la chaudière). Il est important de noter que très peu d'informations techniques nous ont été fournies par le Groupe Amor Benamor concernant le système d'évaporation utilisé. A titre d'exemple, nous n'avons pas pu avoir les informations sur les types d'évaporateurs (surfaces d'échanges, nombre de tubes, diamètres des tubes, types d'écoulement croisé ou mixte, etc..), ce qui complique la tâche d'évaluer les pertes thermiques dans les différents évaporateurs, et de déterminer avec plus de précision l'efficacité d'un évaporateur multiple effet étudié dans le présent mémoire de master.

VII. EXEMPLE DE CALCUL D'UN EVAPORATION TRIPLE EFFET A CO-COURANT

On considère une évaporation à triple effet à co-courant alimentée par $1000 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ d'une solution aqueuse de titre massique en soluté à 7% et à 20°C . Le débit de vapeur de chauffe à 10 bar absolus, utilisé pour le premier effet est $G=540 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Le 1^{er} effet fonctionne à 2.5 bar absolus. Le 2^{ème} effet fonctionne à 0.45 bar absolus, tandis que le 3^{ème} effet il fonctionne à 0.2 bar.

Le cp de l'alimentation et des concentrâts est considéré comme égal à $4.18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$. Les propriétés de l'eau et de sa vapeur sont $P_{\text{vap}}=(\theta_{\text{eb}}/100)^4$ et $L_v(\theta_{\text{eb}})=2535-2.9\times\theta$, avec θ en $^\circ\text{C}$, P en bar absolu et L_v en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

- 1°) Calculer le débit évaporé V_1 sur le 1^{er} effet. En déduire le débit B_1 et le titre x_{B1} des concentrât du 1^{er} effet. 2°) En prenant un débit d'alimentation du 2^{ème} effet $B_1=700 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ et un débit de vapeur de chauffe $V_1=290 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, calculer le débit évaporé V_2 , le débit de concentrât B_2 et son titre x_{B2} pour le 2^{ème} effet, et enfin le le débit de concentrât B_3 et son titre x_{B3} pour le 3^{ème} effet
- 3°) Calculer l'économie de cette installation d'évaporation.[6]

Réponses

1°) On a dans le procédé quatre niveaux de pression (donc de température) pour l'évaporation ou la condensation de la vapeur. On commence par calculer, pour ces trois niveaux, la température de changement d'état et la chaleur latente de vaporisation.

- Vapeur de chauffe G , $P_G=10 \text{ bar a}$, $\theta_G=100\times(P_G)^{0.25}=177.83^\circ\text{C}$, $L_v(G)=2535-2.9\times\theta_G=2535-2.9\times177.83=2019.3 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- Evaporateur V_1 , $P_1=2.5 \text{ bar a}$, $\theta_1=100\times(P_1)^{0.25}=125.74^\circ\text{C}$, $L_v(\theta_1)=2535-2.9\times\theta_1=2535-2.9\times125.74=2170.4 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- Evaporateur V_2 , $P_2=0.45 \text{ bar a}$, $\theta_2=100\times(P_2)^{0.25}=81.90^\circ\text{C}$, $L_v(\theta_2)=2535-2.9\times\theta_2=2535-2.9\times81.90=2297.5 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- Evaporateur V_3 , $P_2=0.2 \text{ bar a}$, $\theta_2=100\times(P_2)^{0.25}=66.87^\circ\text{C}$, $L_v(\theta_2)=2535-2.9\times\theta_2=2535-2.9\times66.87= 2341,077 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Pour le bilan énergétique de l'évaporateur n°1, on écrit que le flux apporté par la vapeur de chauffe qui se condense, soit $\Phi_B = G \times 2019.3 = 540 \times 2019.3 = 1090422 \text{ kJ.h}^{-1}$, est égal au flux nécessaire pour chauffer l'alimentation de 20 à 125.74°C, soit $A \times c_{pA} \times (125.74 - 20) = 1000 \times 4.18 \times 105.74 = 441993 \text{ kJ.h}^{-1}$, additionné du flux nécessaire pour vaporiser V_1 , soit $V_1 \times 2170.4$. On en tire :

$$V_1 = (1090422 - 441993) / 2170.4 = 298.8 \text{ kg.h}^{-1}.$$

Le bilan matière global donne $B_1 = A - V_1 = 1000 - 298.8 = 701.2 \text{ kg.h}^{-1}$.

Le bilan matière partiel donne $x_{B1} = A_{xA} / B_1 = 1000 \times 0.07 / 701.2 = 0.100$, soit **10.0%**.

2°) Pour le bilan énergétique de l'évaporateur n°2, on écrit que le flux apporté par la vapeur de chauffe qui se condense, soit $\Phi_{V1} = V_1 \times 2170.4 = 300 \times 2170.4 = 651120 \text{ kJ.h}^{-1}$, additionné au flux apporté par la surchauffe de l'alimentation, soit

$B_1 \times c_{pB1} \times (125.74 - 81.90) = 700 \times 4.18 \times 43.84 = 128276 \text{ kJ.h}^{-1}$, est égal au flux de vaporisation de V_2 , soit $V_2 \times 2297.5$. On en tire $V_2 = (651120 + 128276) / 2297.5 = 339.2 \text{ kg.h}^{-1}$.

Le bilan matière global donne $B_2 = B_1 - V_2 = 700 - 339.2 = 360.8 \text{ kg.h}^{-1}$.

Le bilan matière partiel donne $x_{B2} = A_{xA} / B_2 = 1000 \times 0.07 / 360.8 = 0.194$, soit **19.4%**.

3) Pour le bilan énergétique de l'évaporateur n°3, on écrit que le flux apporté par la vapeur de chauffe qui se condense, soit $\Phi_{V2} = V_2 \times 2297.5 = 339.2 \times 2297.5 = 779312 \text{ kJ.h}^{-1}$, additionné au flux apporté par la surchauffe de l'alimentation, soit $B_2 \times c_{pB2} \times (81.90 - 66.87) = 360.8 \times 4.18 \times 15.03 = 22667.4 \text{ kJ.h}^{-1}$, est égal au flux de vaporisation de V_3 , soit $V_3 \times 2297.5$. On en tire $V_3 = (779312 + 22667.4) / 2297.5 = 342.56 \text{ kg.h}^{-1}$.

Le bilan matière global donne $B_3 = B_2 - V_3 = 360.8 - 342.56 = 18.24 \text{ kg.h}^{-1}$.

Le bilan matière partiel donne $x_{B3} = A_{xA} / B_3 = 1000 \times 0.07 / 18.24 = 0.383$, soit **38.3%**.

3°) L'économie est définie par $E = (V_1 + V_2 + V_3) / G = (300 + 339.2 + 342.56) / 540 \approx 1.81$.

VIII. CONCLUSION

Nous avons vu dans ce chapitre la partie théorique sur l'évaporateur, les facteurs de base qui influent sur le taux d'évaporation, principe de fonctionnement d'évaporateur simple et multiple effet, et quatre types d'évaporateurs. L'évaporateur simple effet est un gaspilleur d'énergie, ce qui rend le triple effet très attractif et qu'il faudra absolument l'intégrer surtout pour les industries énergivores comme pour les usines de transformation de tomates.

Chapitre III

Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

I. Introduction

Les évaporateurs à effets multiples sont largement utilisés dans les industries alimentaires car ils sont appropriés pour la concentration de solutions alimentaires. Certains modèles mathématiques pour les évaporateurs à effets multiples sont décrits dans des études antérieures. Dans ce chapitre, le modèle Co-courant, est développé pour un évaporateur industriel à film descendant à triple effet qui est utilisé pour concentrer le jus de tomate.

II. Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

- I. Une étude expérimentale a été menée pour déterminer le BPR (élévation du point d'ébullition).
- II. Une solution de jus de tomate de concentration 5 % (% en poids) a été bouillie. La concentration était mesurée à intervalles de temps égaux (15 minutes). La concentration mesurée a été tracée en fonction de la différence de température entre le point d'ébullition de la solution et le point d'ébullition de l'eau.[9]

II.1 Evaporateur a simple effet

Un évaporateur à simple effet utilise plus de 1 kg de vapeur pour évaporer 1 kg d'eau. La configuration générale pour l'évaporation dans ce travail est représentée schématiquement dans la figure.1. Selon ce schéma, la vapeur quittant l'évaporateur est rejetée vers l'extérieur, donc un évaporateur a simple effet peut être considéré comme un gaspilleur d'énergie, puisque la chaleur latente de la vapeur n'est pas utilisée mais rejetée vers l'extérieur. [9]

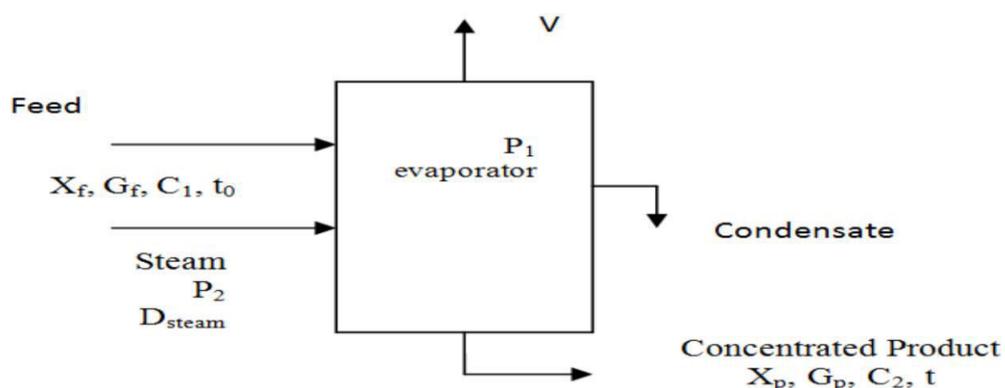


Figure III. 1 : Diagramme simplifié des différents flux pour l'évaporateur à simple effet.

Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

Le modèle mathématique représentant le processus peut être formulé comme suit :

La quantité de produit concentré et la quantité de la vapeur quittant l'évaporateur peuvent être calculées en utilisant un bilan massique global comme suit :

$$G_f = G_p + W \quad (1)$$

Où, G_f est le débit de la solution d'alimentation, kg/h, G_p est le débit du produit concentré sortant de l'évaporateur, en kg/h, W est le débit de la vapeur sortant de l'évaporateur, kg/h. Pour déterminer G_p , le bilan massique d'un composant *sur des solides* est nécessaire :

$$G_f \cdot X_f = G_p \cdot X_p \quad (2)$$

Où, X_f est la concentration du jus de tomate entrant dans l'évaporateur (en poids) et, X_p la concentration de concentré de tomate (en poids) quittant l'évaporateur. La charge thermique de l'évaporateur (Q) peut être représentée par un bilan thermique sur l'évaporateur :[11]

$$Q + G_f \cdot C_1 \cdot t_0 = W \cdot H_v + G_p \cdot C_2 \cdot t + Q_{perte} \quad (3)$$

Où C_1 et C_2 sont les chaleurs spécifiques de l'alimentation et du produit solution, kJ/kg.°C, respectivement. Q est la charge thermique de l'évaporateur, kJ/kg, H_v est l'enthalpie de la vapeur secondaire, kJ/kg, t est le point d'ébullition du produit, °C, et t_0 est la température de la solution d'alimentation, °C. En considérant la solution d'alimentation comme un mélange de concentré (produit solide) et d'eau évaporée, nous pouvons écrire :

$$G_f \cdot C_1 \cdot t = \quad (4)$$

$$G_p \cdot C_2 \cdot t + W \cdot C_{H_2O} \cdot t \quad (5)$$

$$G_p \cdot C_2 = G_f \cdot C_1 - W \cdot C_{H_2O} \quad (6)$$

Où, C_{H_2O} est la chaleur spécifique de l'eau liquide, kJ/kg °C. En substituant la valeur de $G_p \cdot C_2$ dans l'équation (3), on obtient :[11]

$$Q = G_f \cdot C_1 (t - t_0) + W \cdot (H_v - C_{H_2O} \cdot t) + Q_{perte} \quad (7)$$

Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

Si les pertes de chaleur sont négligées (Q_{perte}), on peut écrire :

$$Q = G_f \cdot C_1(t - t_0) + W \cdot (H_v - C_{H2O} \cdot t) \quad (8)$$

II.2 Méthodes de calcul pour les évaporateurs à effets multiples

L'évaporation à effets multiples est l'évaporation dans plusieurs étapes, où les vapeurs générées dans une étape servent de « vapeurs de chauffage » à l'étape suivante. Ainsi, la première étape agit comme un « générateur de vapeur » pour le second qui agit comme un condenseur (voir fig.2). Les conséquences économiques et environnementales de ces résultats sont évidentes. Dans un évaporateur multi-effets pour chaque kilogramme d'eau évaporé :

- A. La quantité de vapeur consommée est inversement proportionnelle au nombre d'effets.
- B. La quantité d'eau de refroidissement utilisée dans le condenseur est inversement proportionnel au nombre d'effets.
- C. Pour que le transfert de chaleur se produise, une chute de température doit exister à chaque effet.

En d'autres termes, la température des vapeurs générées dans un effet donne doit être supérieure à la température d'ébullition dans l'effet suivant :

$$T_1 > T_2 \dots \dots > T_n, \text{ donc : } P_1 > P_2 \dots \dots \gg \gg P_n,$$

En faisant des calculs pour un évaporateur à effets multiples, les valeurs à obtenir sont généralement la surface d'échange de chauffage dans chaque effet. Les valeurs données ou connues sont généralement les suivants : [11]

1. Pression de vapeur dans le premier effet,
2. Pression finale dans l'espace de vapeur du dernier effet,
3. Conditions d'alimentation et flux du premier effet,.....(n)
4. La concentration finale dans le liquide quittant le dernier effet,
5. Propriétés physiques telles que les enthalpies et/ ou les capacités thermiques du liquide et des vapeurs, et
6. Les coefficients globaux de transfert de chaleur dans chaque effet. Habituellement, les aires des surfaces de chaque effet sont supposées égales. Les calculs sont effectués en

Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

utilisant des bilans matières, des bilans thermiques, et des capacités $q = U.A. \Delta T$ pour chaque effet.[11]

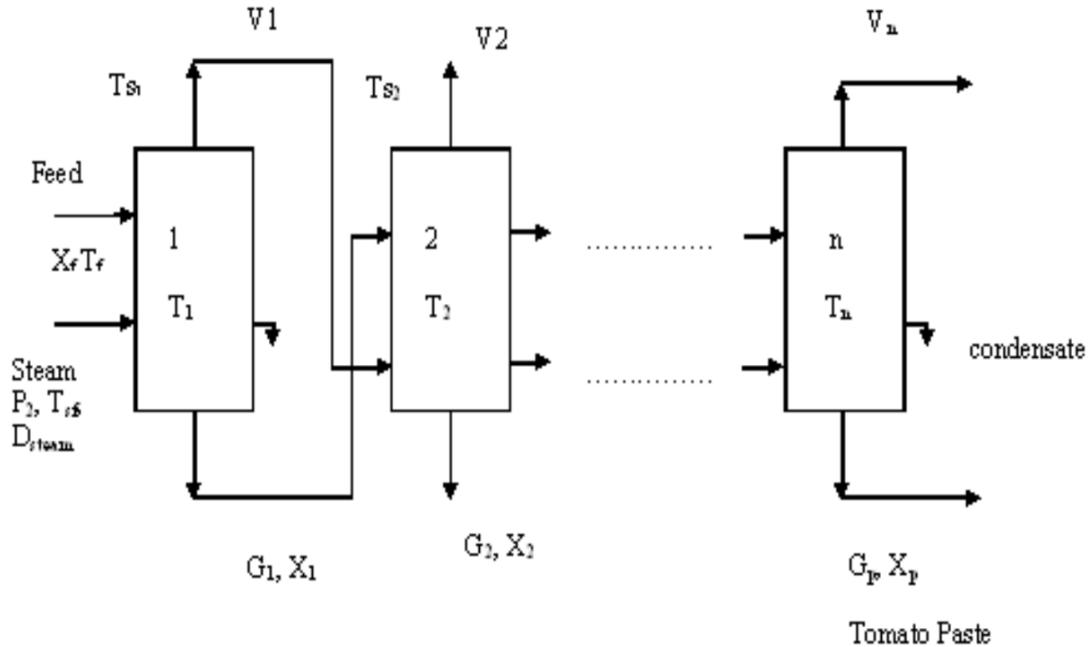


Figure III. 2 : Équipement d'évaporation a effets multiples (co-courant).

Les équations représentant le processus des évaporations à effet multiple peuvent être formulées comme suit :

- 1- A partir de la concentration de sortie connue et de la pression du dernier du dernier effet, le point d'ébullition dans le dernier effet peut être déterminé par le bilan massique global et la masse du composant à l'équilibre, nous pouvons calculer $L_1, L_2, \dots, L_n, V_1, V_2, \dots, V_n$
Où, L_1, L_2, \dots, L_n sont le débit de la solution produite à partir de chaque effet, kg/h ;
 $V_1, V_2 \dots V_n$ sont les quantités de vapeur produites par chaque effet , kg /h.
- 2- La quantité de chaleur transférée par heure dans le premier effet d'un évaporateur à effets multiples avec alimentation vers l'avant sur la Figure 16 Sera :

$$q_1 = U_1 A_1 \Delta T_1 \quad (9)$$

Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

Où ΔT_1 est la différence de température entre la vapeur de condensation et le point d'ébullition du liquide ($T_s - T_1$). En supposant que les solutions n'ont pas d'élévation du point d'ébullition et pas de chaleur de solution et en négligeant la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'alimentation jusqu'au point d'ébullition, à peu près toute la chaleur lente de la vapeur de condensation apparaît sous forme de chaleur lente dans la vapeur. Cette vapeur donc se condense ensuite dans le second effet, dégageant approximativement la même quantité de chaleur.

$$q_2 = U_2 A_2 \Delta T_2 \quad (10)$$

Ce même raisonnement vaut pour q_n puis puisque $q_1 = q_2 = \dots = q_n$ alors approximativement

$$U_1 A_1 \Delta T_1 = U_2 A_2 \Delta T_2 = \dots = U_n A_n \Delta T_n \quad (11)$$

Habituellement, dans la pratique commerciale les surfaces d'échange de chaleur dans tous les évaporateurs sont égales, ainsi

$$q/A = U_1 \Delta T_1 = U_2 \Delta T_2 = \dots = U_n \Delta T_n \quad (12)$$

3- Ainsi les différences de températures dans un évaporateur à effet multiple sont approximativement inversement Proportionnelles à la valeur de U . Appelant $\sum \Delta T$ comme suit avec la présence d'élévation du point d'ébullition (BPR),

$$\sum \Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots + \Delta T = T_{sf} - T_5 - [(BPR)_1 + (BPR)_2 + \dots + (BPR)_n] \quad (13)$$

Où, ΔT_1 = différence de température disponible pour le premier effet ($T_{sf} - T_1$).

ΔT_2 = différence de température disponible pour le deuxième effet ($T_{s1} - T_2$).

ΔT_5 = différence de température disponible pour le cinquième effet ($T_{s_{n-1}} - T_n$).

T_1 = température de la solution dans le premier évaporateur, °C.

T_2 = Température de la solution dans le second évaporateur, °C.

T_n = température de la solution dans l'évaporateur (n), °C.

T_{sf} = température d'entrée de la vapeur au premier effet, °C.

T_{s1} = Température d'entrée de la vapeur au second effet, °C.

Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

T_{s1} = température d'entrée à l'effet (n-ième), °C.

Notez que,

$$\Delta T_1(^{\circ}\text{C}) = \Delta T(\text{K}), \Delta T_2(^{\circ}\text{C}) = \Delta T_2(\text{K}), \Delta T_3(^{\circ}\text{C}) = \Delta T_3(\text{K}), \Delta T_n(^{\circ}\text{C}) = \Delta T_n(\text{K}) \quad (14)$$

Puisque ΔT_1 est proportionnel à $1/U_1$, alors

$$\Delta T_1 = \sum \Delta T \frac{1/u_1}{1/u_1 + 1/u_2 + \dots + 1/u_n} \quad (15)$$

Des équations similaires peuvent être écrites pour $\Delta T_2, \Delta T_3, \dots, \Delta T_n$. Où :

U_1 est le coefficient de transfert de chaleur pour le premier effet en $\text{kW/m}^2 \cdot \text{K}$.

U_2 est le coefficient de transfert de chaleur pour le deuxième effet en $\text{kW/m}^2 \cdot \text{K}$.

U_3 est le coefficient de transfert de chaleur pour le troisième effet en $\text{kW/m}^2 \cdot \text{K}$.

U_n est le coefficient de transfert de chaleur pour effet (n), $\text{kW/m}^2 \cdot \text{K}$.

Tout effet qui a une charge de chauffage supplémentaire, comme une alimentation d'un fluide de refroidissement, nécessite un ΔT proportionnellement plus grand.

- 4- En utilisant les bilans de chaleur et de masse dans le premier effet, la quantité vaporisée peut être calculée de même que le débit de vapeur (D_{vapeur}) entrant dans le premier évaporateur, et la valeur de la chaleur q transférée dans chaque effet peut être estimée.
- 5- En utilisant l'équation du taux de chaleur transférée $q = UA\Delta T$ Pour chaque effet, on peut calculer les surfaces d'échange de chaleur A_1, A_2, \dots, A_n la valeur moyenne A_m est :

$$A_m = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n} \quad (16)$$

Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

Les valeurs des surfaces d'échange obtenues sont raisonnablement proches les unes des autres (en supposant une tolérance d'erreur de 1% par exemple), les calculs sont complets et un deuxième essai n'est pas nécessaire. Si par contre la différence $d \gg 1\%$ un deuxième essai devrait être effectué comme mentionné ci-dessus, puis obtenir de nouvelles valeurs de $\Delta T_1', \Delta T_2', \dots, \Delta T_n'$ à partir de ces équations :

$$\Delta T_1' = \frac{\Delta T_1 + A_1}{A_m} \quad (17) ; \quad \Delta T_2' = \frac{\Delta T_2 + A_2}{A_m} \quad (18) \quad \Delta T_n' = \frac{\Delta T_n + A_n}{A_m} \quad ; (19)$$

La somme $\Delta T_1' + \Delta T_2' + \dots + \Delta T_n'$ doit être égale à l'original $\sum \Delta T$, si non réajuster proportionnellement toutes les valeurs $\sum \Delta T$ puis calculer l'augmentation du point d'ébullition dans chaque effet, et comme indiqué avant, nous sommes en mesure d'obtenir q_1, q_2, \dots, q_n et A_1, A_2, \dots, A_n en utilisant les nouvelles valeur de $\Delta T_1' + \Delta T_2' + \dots + \Delta T_n'$.

II.3 Bilan Energétique de l'évaporateur à multiple effets

La consommation de vapeur peut être représentée selon les équations suivantes :

- a) Pour un évaporateur à effet unique vapeur

$$D_{vapeur} = Q/\lambda \quad (20)$$

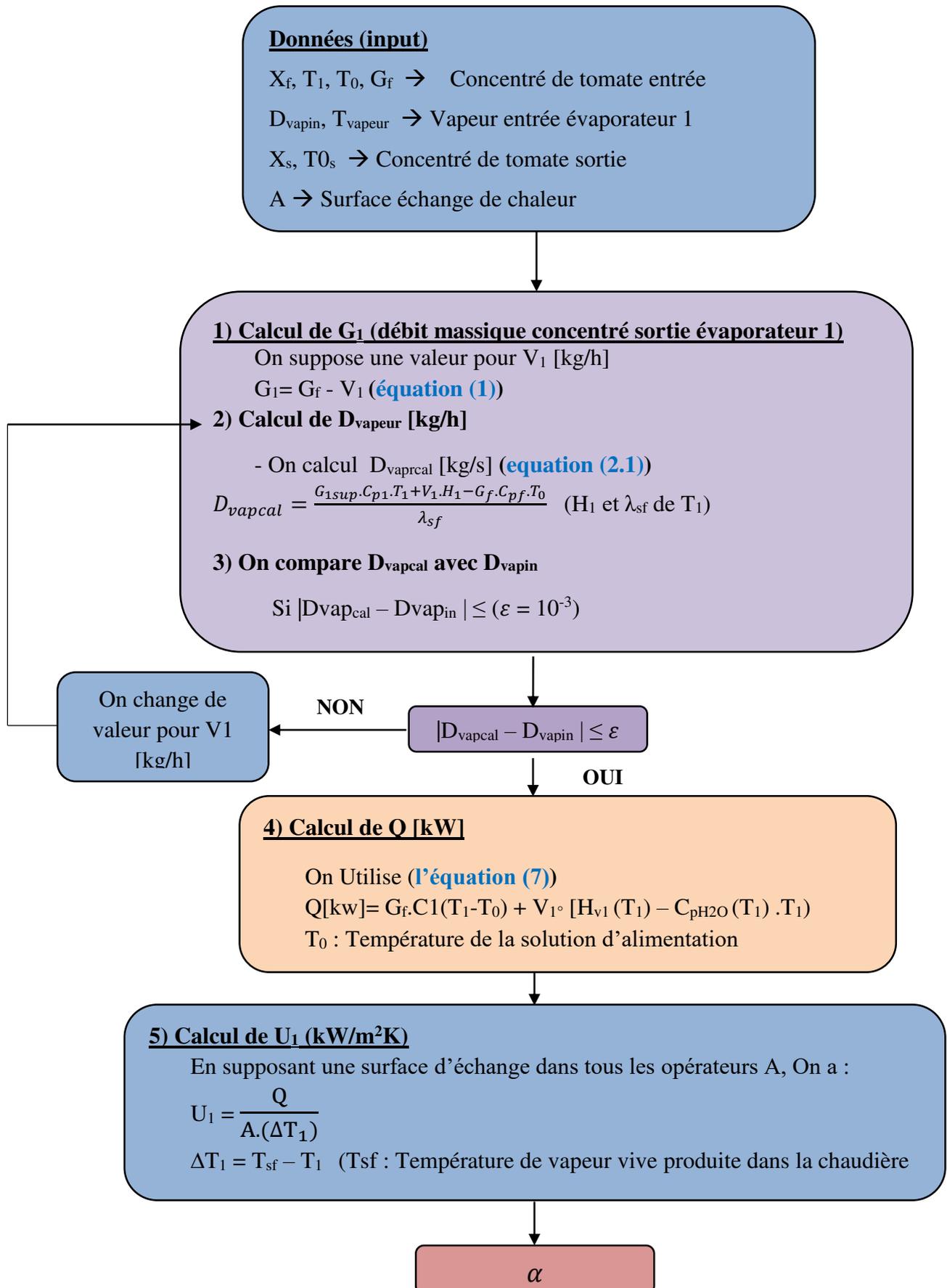
- b) Pour un évaporateur à effet multiples vapeur

$$D_{vapeur} \cdot \lambda_{sf} + G_f \cdot C_p \cdot T_f = G_1 \cdot C_p \cdot T_1 + V_1 \cdot H_1 \quad (21)$$

Où D_{vapeur} est le débit massique de la consommation de vapeur en kg/s, λ est la chaleur latente de vaportisation, kJ/kg, G_f est le débit de solution d'alimentation, kg/s, G_1 est le débit de l'évaporateur premier effet, kg/s, T_1 est la température de la solution dans le premier effet, °C, C_p est la chaleur spécifique de la solution, kJ/kg de V_1 est la quantité de vapeur produite à partir du premier effet, kg/h, H_1 est l'enthalpie de la vapeur sortant de l'évaporateur, kJ/kg, Q est la chaleur thermique de l'évaporateur, kJ/s.

Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

ALGORITHME DE CALCUL



Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

α

6) Calcul de U_2 (kW/m²K)

On suppose une valeur pour la température T_2 dans l'évaporateur 2 $T_2 = T_{2sup}$

7) Détermination de H_v , C_{H2O}

D'un tableau de propriétés thermodynamique de l'eau

$H_v = H_v(T_2)$ et $C_{H2O}(T_2)$

8) Calcul de V_2 (débit de valeur quittant évaporateur 2)

On utilise l'équation (7)

$$V_2 = \frac{Q - G_1 \cdot C_2(T_2 - T_1) + V_1 \cdot H_1 - G_f \cdot C_{pf} \cdot T_0}{H_v - C_{H2O} \cdot T_2}$$

9) Calcul de G_2 (débit concentré sortant de l'évaporateur 2)

$$G_2 = G_1 - V_2$$

10) Calcul de ΔT_2 et V_2

$$\Delta T_2 = T_1 - T_2$$

$$U_2 = \frac{Q}{A \cdot (\Delta T_2)}$$

11) Calcul de V_3 , G_3 et ΔT_3

$$G_3 = \frac{G_1 \cdot x_1}{x_3} \text{ (équation 2)}$$

$$V_3 = G_2 - G_3 \text{ (équation 1)}$$

$$\Delta T_3 = T_2 - T_3 \text{ (} T_3 = T_s \text{ sortie donnée du problème)}$$

12) Calcul de V_3

$$U_3 = \frac{Q}{A \cdot (\Delta T_3)}$$

13) Calcul de $\sum \Delta T$ calculée

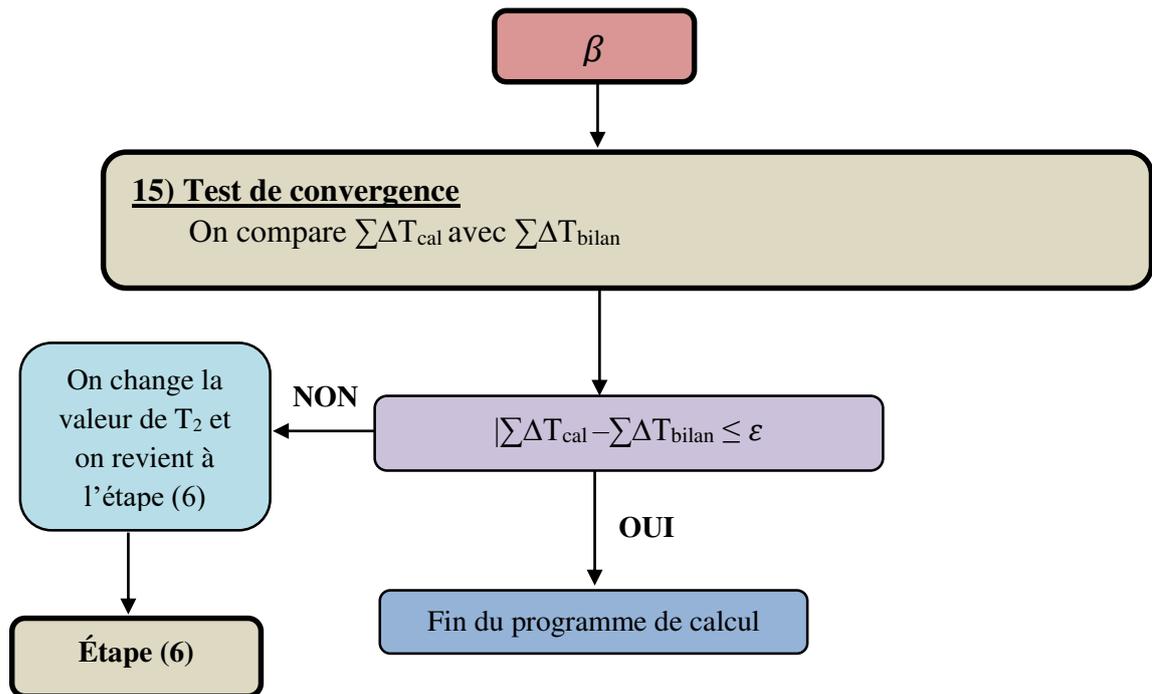
$$\sum_{i=1}^3 \Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3$$

14) Calcul de $\sum \Delta T_{bilan}$

$$\sum \Delta T_{bilan} = \Delta T_1 \cdot v_1 \left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} + \frac{1}{v_3} \right) \text{ équation 14}$$

β

Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant



III. Résultats et Interprétations

Tableau III.1. Effet du débit d'alimentation de la solution de tomate.

Débit alimentation du concentré de tomate (kg/h)	Concentration massique de la tomate à la sortie ω_s (%)	Efficacité E (V_{tot}/V_0)	Pression P ₀ de la vapeur vive (bar)	Pression P ₁ (bar) dans évaporateur 1	Pression P ₂ (bar) dans évaporateur 2	Pression P ₃ (bar) dans évaporateur 3
10000	35	2.18	0.5	0.4	0.2	0.1
20000	35	2.18	0.5	0.4	0.2	0.1
30000	35	2.18	0.5	0.4	0.2	0.1
50000	35	2.18	0.5	0.4	0.2	0.1
100000	35	2.18	0.5	0.4	0.2	0.1
200000	35	2.18	0.5	0.4	0.2	0.1

Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

Les résultats du tableau III.1, montrent que l'efficacité de l'évaporateur triple effet ne change pas avec les différentes valeurs du débit d'alimentation du concentré de tomate, ceci en considérant des valeurs des pressions que ce soit pour la vapeur vive (venant de la chaudière), ainsi que dans les trois évaporateurs comme des constantes. Dans la présente simulation, l'efficacité est égale à 2.18.

Tableau III.2. Effet des pressions dans les 3 évaporateurs en série.

Débit alimentation du concentré de tomate (kg/h)	Concentration massique de la tomate à la sortie ω_s (%)	Efficacité $E (V_{tot}/V_0)$	Pression P_0 de la vapeur vive (bar)	Pression P_1 (bar) dans évaporateur 1	Pression P_2 (bar) dans évaporateur 2	Pression P_3 (bar) dans évaporateur 3
10000	35	2.18	0.5	0.4	0.2	0.1
10000	35	2.21	0.5	0,3	0.2	0.1
10000	35	2.31	0.5	0.2	0.1	0.05
10000	35	2.45	0.5	0.1	0.05	0.01

Dans le tableau III.2, un autre effet intéressant concerne l'évolution de l'efficacité de l'évaporateur avec les différentes pressions dans les trois évaporateurs lorsque la pression P_0 de la vapeur vive est prise constante égale à la valeur 0.5 bar (valeur fixée par l'usine Amor Benamor). La valeur la plus élevée (dans le présent exemple 2.45) est obtenue pour des pressions P_1 , P_2 et P_3 égales à 0.1, 0.05 et 0.01, respectivement. Il faudra donc choisir des pressions existantes dans les 3 évaporateurs en série P_1 , P_2 et P_3 , respectivement, les plus faibles possibles. On notera que ces pressions sont décroissantes (ainsi que les températures, T_1 , T_2 et T_3) c'est-à-dire que :

$$P_1 > P_2 > P_3 \quad \text{et} \quad T_1 > T_2 > T_3.$$

Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

Tableau III.3. Effet de la pression de la vapeur vive P_0 .

Débit alimentation du concentré de tomate (kg/h)	Concentration massique de la tomate à la sortie ω_s (%)	Efficacité E (V_{tot}/V_0)	Pression P_0 de la vapeur vive (bar)	Pression P_1 (bar) dans évaporateur 1	Pression P_2 (bar) dans évaporateur 2	Pression P_3 (bar) dans évaporateur 3
10000	35	2.45	0.5	0.1	0.05	0.01
10000	35	2.22	0.4	0.3	0.2	0.1
10000	35	2.34	0.3	0.2	0.1	0.05
10000	35	2.5	0.2	0.1	0.05	0.01

Les résultats présentés dans le tableau III.3 ci-dessus montrent que la pression de la vapeur vive est très importante concernant l'efficacité de l'installation de l'évaporateur triple effet. Comme pour les pressions existantes dans les trois évaporateurs en série, la pression P_0 , doit être à son tour la plus faible possible, de préférence la plus proche de 0.2 bar. Actuellement, le groupe Amor Benamor utilise une pression de 0.5 bar pour son usine de la tomate concentrée.

Tableau III.4. Effet de la concentration de la tomate à sa sortie.

Débit alimentation du concentré de tomate (kg/h)	Concentration massique de la tomate à la sortie ω_s (%)	Efficacité E (V_{tot}/V_0)	Pression P_0 de la vapeur vive (bar)	Pression P_1 (bar) dans évaporateur 1	Pression P_2 (bar) dans évaporateur 2	Pression P_3 (bar) dans évaporateur 3
10000	38	2.45	0.5	0.1	0.05	0.01
10000	38	2.23	0.4	0.3	0.2	0.1
10000	38	2.35	0.3	0.2	0.1	0.05
10000	38	2.51	0.2	0.1	0.05	0.01

Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

Dans le tableau III.4, pour une concentration massique de la tomate à la sortie du 3^{ème} évaporateur prise égale à 38% au lieu de 35% (comme pour les résultats présentés précédemment), on remarquera que l'efficacité de l'évaporateur triple effet reste quasiment la même. La valeur la plus élevée égale à 2.51 étant celle correspondant aux pressions 0.2, 0.1, 0.05 et 0.01 pour P_0 , P_1 , P_2 et P_3 , respectivement.

Tableau III.5. Evolution de l'efficacité E avec les pressions.

Débit alimentation du concentré de tomate (kg/h)	Concentration massique de la tomate à la sortie ω_s (%)	Efficacité E (V_{tot}/V_0)	Pression P_0 de la vapeur vive (bar)	Pression P_1 (bar) évaporateur 1	Pression P_2 (bar) évaporateur 2	Pression P_3 (bar) évaporateur 3
10000	35	2.45	0.5	0.1	0.05	0.01
10000	35	2.46	0.4	0.1	0.05	0.01
10000	35	2.48	0.3	0.1	0.05	0.01
10000	35	2.5	0.2	0.1	0.05	0.01

Les résultats du tableau III.5 montrent l'évolution de l'efficacité énergétique qu'on peut obtenir dans le cas d'un évaporateur en co-courant avec une concentration de la tomate à l'entrée de 35%. En fixant les valeurs des pressions à 0.1, 0.05 et 0.01 pour P_1 , P_2 et P_3 , respectivement, une valeur maximale de 2.5 est obtenue pour P_0 égale à 0.2 bar. Sous ces mêmes conditions de pressions, et une concentration à la sortie de 38%, la valeur obtenue est quasi la même ; elle est égale à 2.51.

Tableau III.6. Evolution de l'efficacité E et des débits V_0 , V_1 , V_2 et V_3 avec les pressions.

Efficacité E (V_{tot}/V_0)	Pression P_0 de la vapeur vive (bar)	Pression P_1 (bar) évaporateur 1	Pression P_2 (bar) évaporateur 2	Pression P_3 (bar) évaporateur 3	V_0 (kg/h)	V_1 (kg/h)	V_2 (kg/h)	V_3 (kg/h)
2.45	0.5	0,1	0,05	0,01	35009	27487	28754	29473
2.46	0.4	0,1	0,05	0,01	34801	27487	28754	29473
2.48	0.3	0,1	0,05	0,01	34549	27487	28754	29473
2.5	0.2	0,1	0,05	0,01	34223	27487	28754	29473

Chapitre III : Développement d'un modèle pour Evaporateur Multiple en Co-courant

Le tableau III.6 montre les différentes valeurs des débits de vapeurs quittant chaque évaporateur et entrant dans le suivant. Le débit V_0 est celui de la vapeur vive entrant dans le premier évaporateur. L'efficacité E est calculée comme $(V_1 + V_2 + V_3)/V_0$. On remarquera que les débits quittant les évaporateurs restent inchangés car les pressions sont fixées (les débits ne dépendent donc que des pressions), et que seule la valeur du débit V_0 change car justement la valeur de la pression de la vapeur vive P_0 change dans les simulations. La concentration massique de la tomate est dans ce cas 35% et la température de la solution de la tomate 10°C.

Ces deux valeurs (concentration et température) correspondent à celles utilisées réellement dans l'usine Amor Benamor.

Tableau III.7. Efficacité E pour une température de 15°C de la solution à l'entrée.

Efficacité $E (V_{tot}/V_0)$	Pression P_0 de la vapeur vive (bar)	Pression P_1 (bar) évaporateur 1	Pression P_2 (bar) évaporateur 2	Pression P_3 (bar) évaporateur 3	V_0 (kg/h)	V_1 (kg/h)	V_2 (kg/h)	V_3 (kg/h)
2.51	0.5	0,1	0,05	0,01	34121	27487	28754	29473
2.53	0.4	0,1	0,05	0,01	33917	27487	28754	29473
2.55	0.3	0,1	0,05	0,01	33672	27487	28754	29473
2.57	0.2	0,1	0,05	0,01	33354	27487	28754	29473

Afin de bien évaluer l'effet de la température sur l'efficacité d'une installation d'évaporation triple effet, le tableau III.7 ci-dessus montre comment l'efficacité évolue lorsque la température de la solution de tomate à l'entrée du premier évaporateur est de 15°C.

Comparativement au cas où la température est de 10°C, l'efficacité est meilleure lorsque la température de la solution augmente ; elle est de 0.014/°C. La raison est due au fait qu'un bilan énergétique de l'évaporateur n°1, montre que la chaleur apportée par la vapeur de chauffe vive qui se condense est égal à la chaleur nécessaire pour chauffer l'alimentation de 15 à $\theta_G = 100 \times (P_0)^{0.25}$, soit $Q_m \cdot C_{p_{tomate}} \cdot (\theta_G - 15)$ additionné du flux nécessaire pour vaporiser V_1 , soit V_1 multiplier par la chaleur latente de vaporisation. Donc la puissance thermique sensible $Q_m \cdot C_{p_{tomate}} \cdot (\theta_G - T_{entrée})$ nécessaire pour 'chauffer la partie solide de la solution de tomate' diminue lorsque la température d'entrée de la solution augmente. Ce fait est similaire à une centrale électrique à vapeur avec régénération où l'eau avant son entrée à la chaudière est chauffée par une partie de la vapeur tirée de la turbine.

Conclusion générale

Conclusions

L'étude de l'évaporateur à triple effet a montré que ce genre d'évaporateur propose une économie d'énergie est par suite d'argent très importante par rapport à l'évaporateur simple effet. A partir du modèle simplifié basé sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices, des résultats qualitatifs ont été obtenus, et nous ont permis de faire les constatations suivantes :

1. Pour des concentrations massiques du concentré de tomate fixes (entrée et sortie), il s'avère que les paramètres les plus importants permettant d'obtenir la plus grande efficacité possible est la pression d'alimentation de la vapeur vive P_0 , ainsi que les pressions dans les 3 évaporateurs en série (P_1 , P_2 , P_3). Ces quatre pressions doivent être fixées à des valeurs les plus faibles possibles ceci tout en tenant compte des contraintes pratiques liées aux problèmes techniques inhérentes.
2. La pression de la vapeur vive est très importante concernant l'efficacité de l'installation de l'évaporateur triple effet. Comme pour les pressions existantes dans les trois évaporateurs en série, la pression P_0 , doit être à son tour la plus faible possible, de préférence la plus proche de 0.2 bar. Actuellement, le groupe Amor Benamor utilise une pression de 0.5 bar pour son usine de la tomate concentrée.
3. Pour une concentration massique de la tomate à la sortie du 3^{ème} évaporateur prise égale à 38% au lieu de 35%, on remarquera que l'efficacité de l'évaporateur triple effet reste quasiment la même. La valeur la plus élevée égale à 2.51 étant celle correspondant aux pressions 0.2, 0.1, 0.05 et 0.01 pour P_0 , P_1 , P_2 et P_3 , respectivement.
4. Pour des concentrations fixées, les résultats montrent que l'efficacité de l'évaporateur triple effet ne changent pas avec les différentes valeurs du débit d'alimentation du concentré de tomate.
5. Comparativement au cas où la température est de 10°C, l'efficacité est meilleure lorsque la température de la solution augmente ; elle augmente de 0.014/°C.
6. Pour des résultats quantitatifs et plus précis, un modèle avec moins d'hypothèses simplificatrices est nécessaire. Il considérera les pertes thermiques dans les différents évaporateurs (il est pour l'instant impossible d'avoir des renseignements techniques sur les évaporateurs utilisés par le groupe Amor Benamor). Il pourra faire l'objet d'un travail futur de master/ou doctorat.

7. Enfin, l'étude nous a permis d'apprendre la méthodologie à adopter pour traiter un problème technologique réel. La démarche consiste à choisir un modèle, de considérer les bilans thermiques et massiques, de proposer un algorithme de calcul, d'écrire un programme de simulation avec un langage de programmation, et finalement faire quelques simulations et interpréter les résultats obtenus. L'objectif recherché lors de la définition du présent mémoire de master est de ce fait complètement atteint.

Références

BIBLIOGRAPHIE & WEBOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE & WEBOGRAPHIE

- [1] El Aouni Bouchra, Projet de fin d'études : Les processus de double concentré de tomate et les contrôles qualités au sein de la société Aicha, Université Sidi Mohamed Ben Abdallah (Maroc), Faculté des Sciences et Techniques, (Juin 2015).
- [2] Kangni KIDJA, Projet de fin d'études : Conception d'une Usine de Conservation de la Tomate, Ecole Polytechnique de Thies (SENEGAL), Département Génie Mécanique, (Juin 1991).
- [3] M.Mojarab , A. Dadak , Analyse exergetique complete d'un usine commerciale de pâte de tomate à double effet évaporateur . Article in Energy · June 2016
- [4] <http://tech-alim.univ-lille1.fr/evaporation/co/chap4.html>
- [5] Twaila Zakaria et Motri Samia, Cours de Génie des Procédés alimentaires, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Zaghuan (Tunisie), Département Génie des Procédés, (Année universitaire 2009-2010).
- [6] http://www.azprocede.fr/ex_evaporation_double_effet_co_courant.html#correction
- [7] Miranda, V., & Simpson, R. Modelling and simulation of an industrial multiple effect evaporator: tomato concentrate. Journal of Food Engineering, 66(2), 203-210. (2005).
- [8] S. Khanama, and B. Mohanty, Development of a new model for multiple effect evaporator system, Computers and Chemical Engineering, Vol. 35, pp. 1983– 1993, (2011).
- [9] Kemal Ermis, Ihsan Kucukrendeci, and Murat Karabektas, Investigation of Multiple Effect Evaporator Design, 5th International Symposium of Innovative Technologies in Engineering and Science 29-30 September 2017 (ISITES 2017 Baku – Azerbaijan).
- [10] Brian P. Flannery, Saul Teukolsky et William T. Vetterling, Nymerial Recipes in FORTRAN: The art of Scientific Computing, Cambridge University Press, second edition, 1996
- [11] Monalisha Nayak, Design and simulation of a multiple-effect evaporator using vapor bleeding, Bachelor thesis, National Institute of Technology, Rourkela, India, (May 2012).
- [12] Nicola Onger, A Study of Different Multi Effect Evaporators Designed for Thermal Processing of Tomato Paste: Optimization and Quality Evaluation. Ph.D thesis, Polytechnic of Milano, Department of Chemical Engineering, (June 2010).
- [13] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89vaporateur_%C3%A0_multiples_effets
- [14] Sorour, M. A. Optimization of multiple effect evaporators designed for fruit juice concentrate. American Journal of Energy Engineering, 3(2), 6. (2015).
- [15] Simpson, R., Urtubia, A., Abakarov, A., & Almonacid, S. A study of different multi effect evaporators designed for thermal processing of tomato paste: optimization and quality evaluation. Journal of Biotechnology, 150, 326. (2010).

Annexe

Données thermodynamiques de la vapeur d'eau saturée.

PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-5													
Saturated water—Pressure table													
Press., <i>P</i> kPa	Sat. temp., <i>T</i> _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K			
		Sat. liquid, <i>v</i> _f	Sat. vapor, <i>v</i> _g	Sat. liquid, <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>u</i> _g	Sat. liquid, <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>h</i> _g	Sat. liquid, <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>s</i> _g	
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749	
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270	
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227	
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421	
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765	
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734	
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938	
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501	
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488	
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071	
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073	
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302	
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675	
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691	
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931	
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558	
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589	
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545	
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841	
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231	
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716	
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270	
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877	
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525	
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207	
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917	
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650	
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402	
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171	
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955	
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561	
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207	
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886	
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593	
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322	
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071	
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837	

Résumé

Dans l'usine de tomate du Groupe Amor Benamor, la chaudière produit de la vapeur et la distribue avec une pression de 0.5 bar de manière uniforme à tous les évaporateurs (4 en tout) : ce système est par conséquent très énergivore ce qui requiert une autre approche plus économique du point de vue énergétique pour la concentration de la tomate. La présente étude propose comme solution technique d'agencer les différents évaporateurs en un système dit 'multiple effet'. Ce système est un ensemble d'évaporateurs dans lesquels la vapeur (de solvant) générée dans un évaporateur (i) est réutilisée comme vapeur de chauffage dans l'évaporateur suivant (i+1). Seul le premier évaporateur est chauffé à l'aide de vapeur vive. Comme résultats importants obtenus à l'issue de cette étude, il s'avère que la plus grande efficacité énergétique est obtenue lorsque la pression d'alimentation de la vapeur vive P_0 , ainsi que les pressions dans les évaporateurs en série sont les plus basses possible ; en générale proche du vide.

Mots clés : Evaporateurs multiple effet, concentration de la tomate, efficacité énergétique, modélisation et simulation.

Abstract

In the Amor Benamor Group's tomato plant, the boiler produces steam and distributes it at a pressure of 0.5 bar evenly to all evaporators (4 in total): this system is therefore very energy intensive, which requires another more energy-efficient approach to tomato concentration. The present study proposes as technical solution to arrange the various evaporators in a so-called 'multiple effect' system. This system is a set of evaporators in which the vapor (of solvent) generated in an evaporator (i) is reused as heating vapor in the following evaporator (i + 1). Only the first evaporator is heated with live steam. As important results obtained from this study, it turns out that the highest energy efficiency is obtained when the feed pressure of the live steam P_0 , as well as the pressures in the series evaporators are set as low as possible ; in general close to the void.

Key words: Multiple effect evaporators, tomato concentration, energy efficiency, modeling and simulation

الملخص:

في مصنع الطماطم التابع لمجموعة، ينتج المرجل البخار ويقوم بتوزيعه بضغط 0.5 بار بالتساوي على جميع المبخرات (4 في المجموع) وبالتالي فإن هذا النظام كثيف الاستهلاك للطاقة ويتطلب نهجًا أكثر كفاءة في استخدام الطاقة لتركيز الطماطم. تقترح الدراسة الحالية كحل تقني لترتيب مختلف المبخرات في نظام يسمى "التأثير المتعدد". هذا النظام عبارة عن مجموعة من المبخرات حيث يتم إعادة استخدام البخار (المذيب) المتولد في المبخر (1) كبخار تدفئة في المبخر التالي (i+1). يتم تسخين المبخر الأول فقط بواسطة البخار المباشر. كما تم الحصول على نتائج مهمة من هذه الدراسة، تبين أنه يتم الحصول على أعلى كفاءة في استخدام الطاقة عندما يكون ضغط التغذية للبخار P_0 ، وكذلك الضغوط في المبخرات المتسلسلة منخفضة قدر الإمكان، بشكل عام قريب من الفراغ.

الكلمات المفتاحية: مبخرات متعددة التأثير، تركيز الطماطم، كفاءة الطاقة، النمذجة والمحاكاة.