

L'EVAPORATION - CONCENTRATION

Par D. MESSAHO



Introduction

- L'évaporation est principalement utilisée pour concentrer une solution aqueuse.
- L'apport de chaleur au moyen d'un échangeur de chaleur provoque l'ébullition de cette solution.
- La vapeur générée est évacuée puis condensée.
- L'eau ou le solvant est le constituant qui est vaporisé. Le concentrat ou le soluté est le constituant qui se concentre dans la solution. En fonction de la nature et de la quantité de salinité de la solution à concentrer, l'enrichissement du concentrat peut conduire à dépasser la limite de saturation et provoquer l'apparition d'une phase solide cristallisée : il s'agit alors d'une étape de cristallisation



Plan du cours

- Voir syllabus
 - TD: un problème et un projet seront traités.
-



Introduction

- Généralement, la matière première contient plus de d'eau qu'il en faut dans le produit fini.
 - L'objectif recherché est d'obtenir des solution plus concentré en soluté
 - En fonction de la nature et de la concentration du soluté, on peut assister à l'apparition d'une phase solide si la saturation est dépassée;
 - Il faut donc maîtriser les conditions opératoires
-



Introduction

- L'évaporation est une opération unitaire de séparation. Le solvant est en effet séparé du soluté en le faisant passer de l'état liquide à l'état vapeur
 - L'évaporation nécessite un apport thermique important,
 - La majorité des installations utilise de la **vapeur** comme fluide caloporteur.
-



Introduction

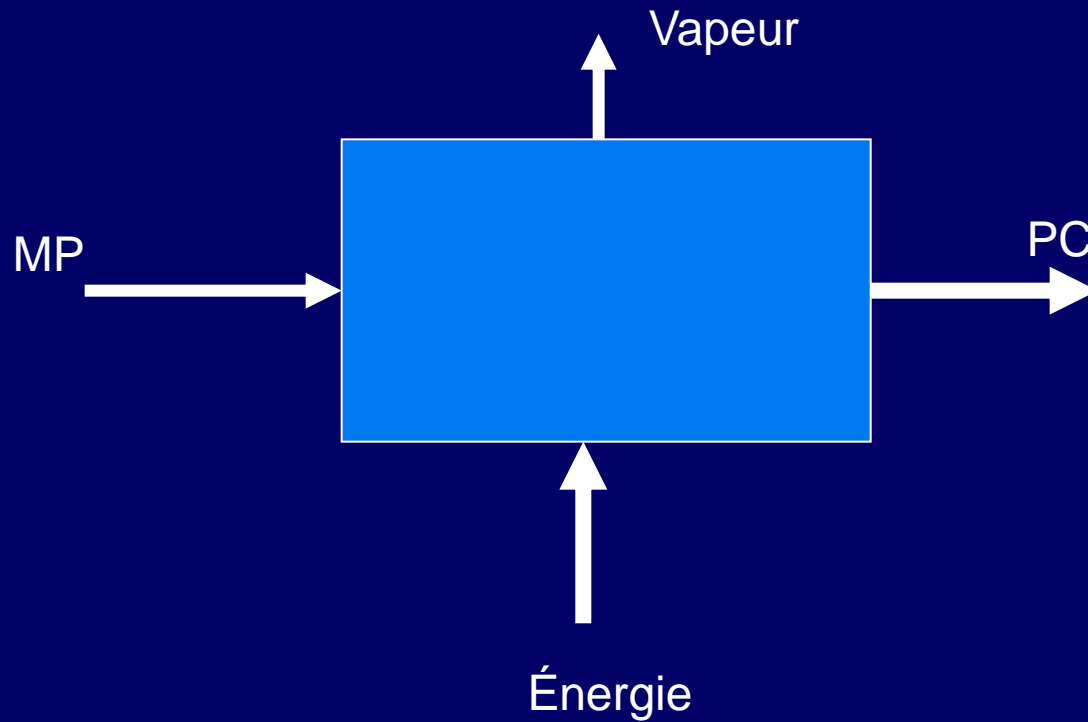
- Les consommations spécifiques théoriques sont de l'ordre de **800 à 1 000 kWh par tonne d'eau évaporée.**
- Les besoins énergétiques nécessaires à la condensation et au fonctionnement des équipements auxiliaires ne sont pas inclus dans le bilan



Introduction

- C'est donc une opération unitaire à fort coût énergétique.
 - Optimisation énergétique passe principalement par une diminution:
 - des consommations en source chaude (vapeur primaire) et en source froide (eau de refroidissement pour la condensation).
 - Consommation des postes énergétiques annexes
-

Principe d'une évaporation





Produit Fini :

□ Il peut être:

- La vapeur: cas de la production de l'eau potable à partir de l'eau de mer
 - La solution concentrée: Laiterie, Sucrierie, Production de jus d'orange
-



Pourquoi concentrer:

- Pour que le produit soit traité dans une opération ultérieure: Évaporation précède la cristallisation de certains sucres (ex. saccharose) ou le séchage du lait, de la tomate ou du café;
 - Pour réduire les coûts du transport et du stockage en réduisant le poids et le volume; c'est le cas des jus de fruits.
-



Pourquoi concentrer:

- Pour assurer la préservation d'un produit alimentaire en diminuant son activité de l'eau; Cas du lait concentré vendu en boîte.
-



Principe de l'évaporation

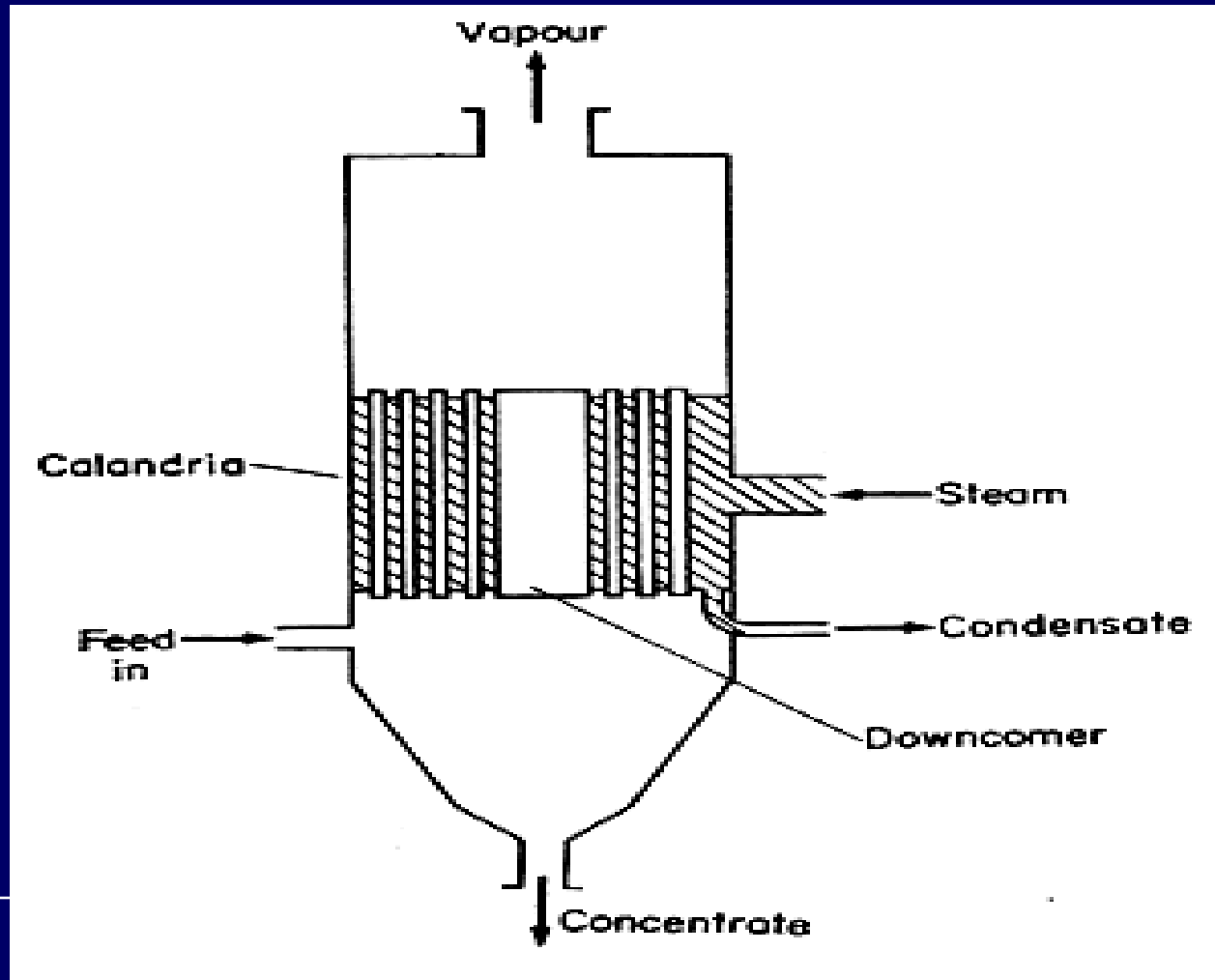
- Évaporation est un phénomène de changement d'état
 - Ébullition a lieu à une température donnée sous une pression donnée
-



Composante d'un évaporateur

- L'évaporateur est composé de trois sections:
 - Section de transfert de chaleur composée d'un échangeur de chaleur
 - Section où le solvant subit une ébullition puis une vaporisation
 - Section de séparation où la vapeur se débarrasse des gouttelettes du solvant entraînée.

Principe de l'évaporation





Facteurs affectant l'évaporation

Ces facteurs sont de trois groupes:

- Thermodynamiques
 - Liés au transfert de chaleur
 - Liés à la nature du produit
-



Implication thermodynamique



Implications thermodynamiques

- Ébullition a lieu quand la pression de vapeur de la solution est supérieure ou égale à la pression totale de la phase vapeur
- La pression qui impose la température d'ébullition est affectée par les conditions de circulation du liquide

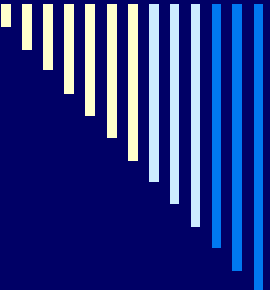


Variation de la pression de vapeur avec la température

- Equation de Clapeyron: Forme intégrée, ΔH_v supposée constante

$$\ln(P/P_0) = (M \cdot \Delta H_v) \cdot (1/T_0 - 1/T)$$

- Elle permet de calculer la pression de vapeur d'équilibre P à la température T à partir de P_0 , T_0 et de ΔH_v



Détermination pratique de la pression de vapeur ou températures d'ébullition

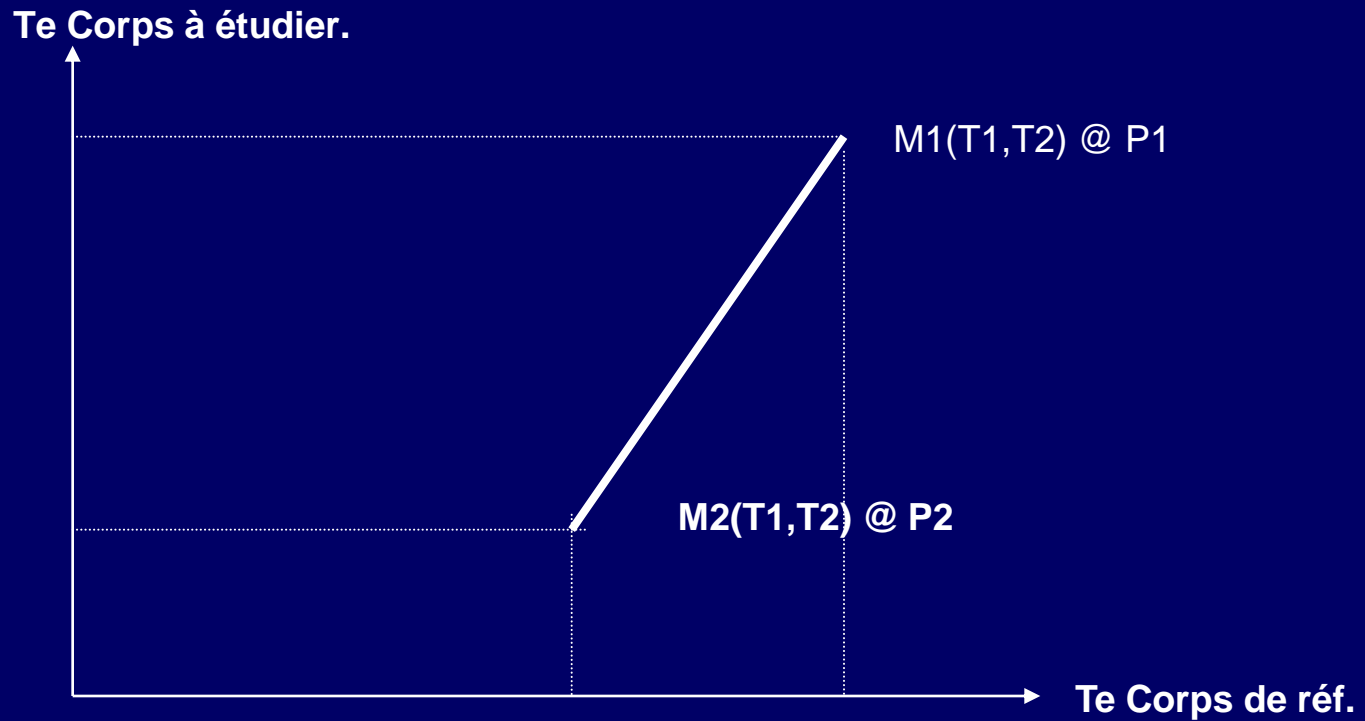
- **Cas des corps purs**
 - **Cas des solutions**
-



Cas des corps purs

- **Méthode DUHRING**
 - **Méthode d'OTHMER**
-

Méthode DUHRING





Méthode DUHRING

Pression	Corps	T ébullition	Point
10**5 Pa	Eau	100 °C	M1
	Hexane	69 °C	
13320 Pa	Eau	52 °C	M2
	Hexane	16 °C	

M1M2 Segment de droite de DUHRING

Pression	Corps	T ébullition	Point
???	Eau	???	M3
	Hexane	100 °C	



Méthode DUHRING

- Projeter 100°C (placée sur l'axe des ordonnées) sur la droite de DUHRING; on obtient le point M3
- Projeter M3 sur l'axe des abscisses et lire T_{eb} de l'eau ($T_{eb \text{ eau}} = 129^{\circ}\text{C}$)
- Lire sur les tables Pv correspondant à 129°C ($P_v = 2.6 \cdot 10^{**6} \text{ Pa}$)



Cas des Solutions

- **Élévation Ebullioscopique**
 - **Influence de la colonne de liquide**
-



Élévation Ébullioscopique

- c'est l'élévation du point d'ébullition de la solution par rapport à celui du solvant pur
- La présence des substances dissoutes dans des solution entraîne :
 - Une réduction de la pression de vapeur,
 - Une élévation de la température d'ébullition;
- Dans le calcul des évaporateurs, c'est l'élévation ébullioscopique qui est utilisée

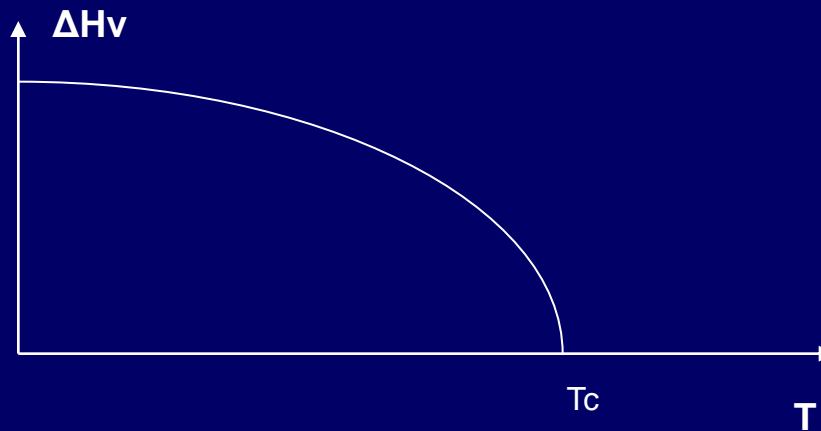


Élévation Ebullioscopique

- Les solutions concentrées suivent généralement la règle du DUHRING;
- Chaque concentration donne lieu à une droite de DUHRING; on aura donc sur le diagramme autant de droites que de concentrations pour lesquelles on veut déterminer le point d'ébullition;
- Le corps de référence est le solvant pur.

Chaleurs latentes de vaporisation: Variation avec T

- Sur un domaine étendu de température, ΔH_v varie considérablement,
- ΔH_v qd $T \nearrow$
- $\Delta H_v \rightarrow 0$, qd $T \rightarrow T_c$





Chaleurs latentes de vaporisation: Estimation

- Formule de Regnault

$$\Delta H_v = 606.5 - 0.695T$$

- Formule de CALLENDAR

$$\text{Log } \Delta H_v = 1.971 + 0.312 \log(374-T)$$

Unités: ΔH_v en kcal/kg et T en °C



Implications liés au transfert de chaleur





Allure de transfert de chaleur

- Dans un évaporateur industriel, le fluide caloporteur est généralement de la vapeur d'eau
 - La vapeur se condense au niveau de la section de l'évaporateur conçue pour assurer le transfert de chaleur; Cette section joue le rôle de l'échangeur thermique
 - Plus on échange de chaleur plus on évapore
-



Allure de transfert de chaleur

Allure de transfert de chaleur est donnée par:

$$dQ/dt = A. \alpha_g. \Delta T$$

A: Surface d'échange

α_g : Coefficient global de transfert de chaleur

ΔT : Facteur de potentialité représentant l'écart entre la température de chauffe et la température d'ébullition de la solution ($T_v - T_{eb}$)



Coefficient global de transfert de chaleur

□ Référence faite à la règle des résistances

$$1/\alpha_g = 1/\alpha_v + \Sigma(e_i/\lambda_i) + 1/\alpha_s$$



Coefficient global de transfert de chaleur

Avec:

α_v : Coefficient superficiel de transfert de chaleur côté vapeur

α_s : Coefficient superficiel de transfert de chaleur côté solution

e_i, λ_i : respectivement épaisseur du matériau constituant l'échangeur thermique et les autres couches qui se sont déposées sur la surface durant le fonctionnement de l'évaporateur, et, les conductibilités thermiques correspondantes



Conductibilités thermiques des matériaux

- Recherche des matériaux offrant :
 - λ la plus élevée possible;
 - Une bonne résistance avec un minimum d'épaisseur;
 - Une surface lisse facile à nettoyer
 - Choix entre alliages et métaux purs
-



Résistance thermique des couches déposées

- La résistance thermique due à ces couches peut ne pas être négligeable: le rapport ' e/λ ' va en augmentant du fait que ' e ' augmente avec le temps et λ de nature est faible;
- Choix judicieux des conditions opératoires (ex. vitesse de circulation) pour minimiser les dépôts
- Utilisation des techniques de nettoyage appropriées (chimique, mécanique et autres)

Coefficient superficiel de transfert de chaleur côté vapeur

- Dépend de:
 - Mode de condensation: Film vs Gouttes.





Coefficient superficiel de transfert de chaleur côté vapeur

- L'allure de transfert de chaleur est favorisée par la condensation en gouttes

Mode condensation	Valeur Min de Alpha Kcal /h.m ² .°C	Valeur Max de Alpha Kcal /h.m ² .°C
Film	5 000	20 000
Gouttes	25 000	100 000



Coefficient superficiel de transfert de chaleur côté vapeur

- Il n'existe pas de relations établies pour décrire la condensation en gouttes
- Pour les calculs de conception il est acceptable d'utiliser les valeurs de α_v en film

$$\alpha_v = [(\lambda_l^3 \rho_l^2 g \Delta H_v) / (L \eta_l (T_v - T_s))]^{0.25}$$



Coefficient superficiel de transfert de chaleur côté vapeur

$\lambda_l, \rho_l, \eta_l$: Conductivité thermique (kcal/hm°C),
masse volumique (kg/m³) et viscosité du
liquide (kg/hm) toutes évaluées à la
température T_m avec

$$T_m = T_v - 0.75(T_v - T_s)$$

T_v : Température de la vapeur

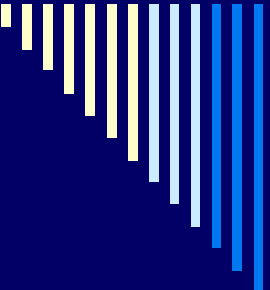
T_s : Température de la surface de chauffe



Coefficient superficiel de transfert de chaleur côté Vapeur

α_v est amélioré si:

- La vitesse de circulation de la vapeur est optimale
- Les gaz incondensables sont absents dans la vapeur

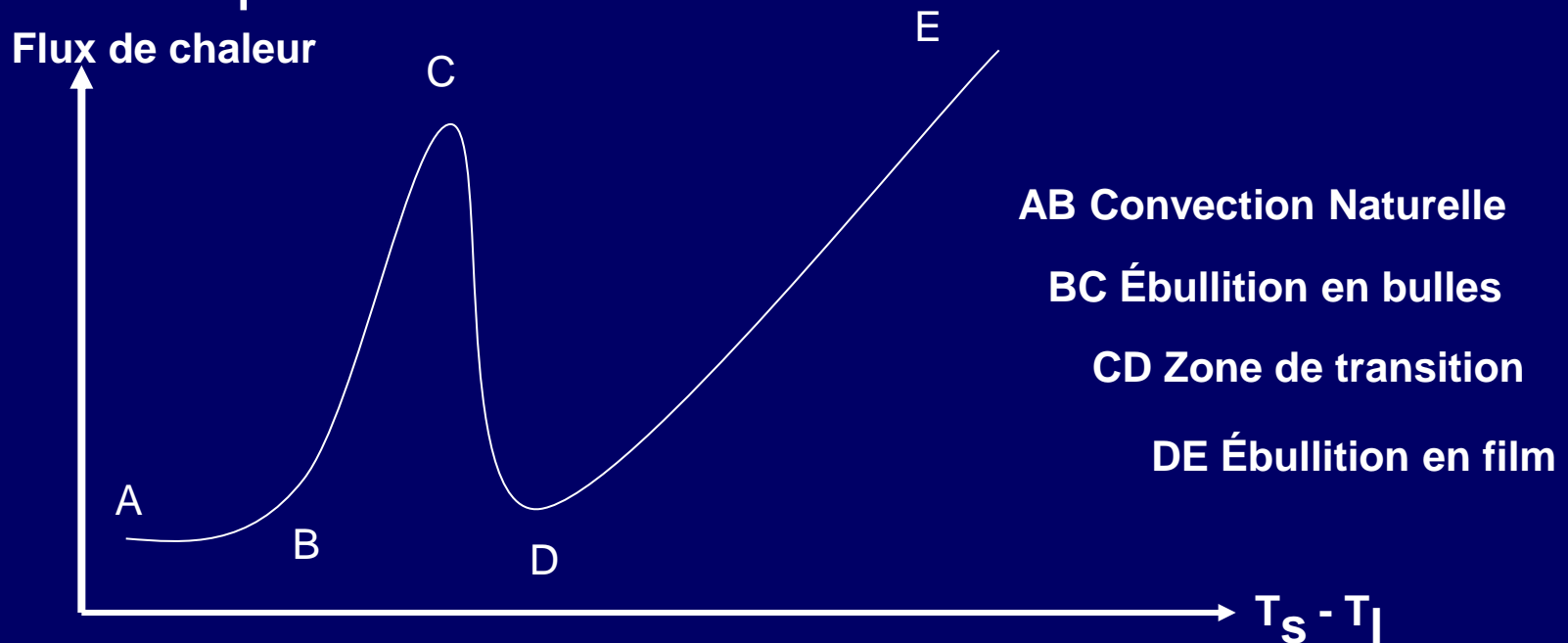


Coefficient superficiel de transfert de chaleur côté solution

- α_s est le facteur déterminant dans le calcul de l'allure de transfert et compliqué à déterminer du fait que la solution traverse plusieurs phases:
 - Convections naturelle
 - Formation des bulles
 - Coalescence des bulles
 - Formation de noyaux de vapeur
 - Écoulement annulaire de film liquide

Coefficient superficiel de transfert de chaleur côté solution

- Le flux de chaleur varie selon le phénomène subi par la solution:





Coefficient superficiel de transfert de chaleur côté solution

- Plusieurs relations proposées pour évaluer α_s dans la zone BC
- Voici une relation empirique développée pour le cas d'une convection forcée:

$$\mathbf{Nu = 1.25 (0.023Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4})}$$

$$Nu = (\alpha_s D / \lambda_s); Re = (v_s \cdot \rho_s \cdot D / \mu_s), Pr = (c_{ps} \cdot \mu_s / \lambda_s)$$



Implications liés à la sensibilité du produit



Comportement du produit

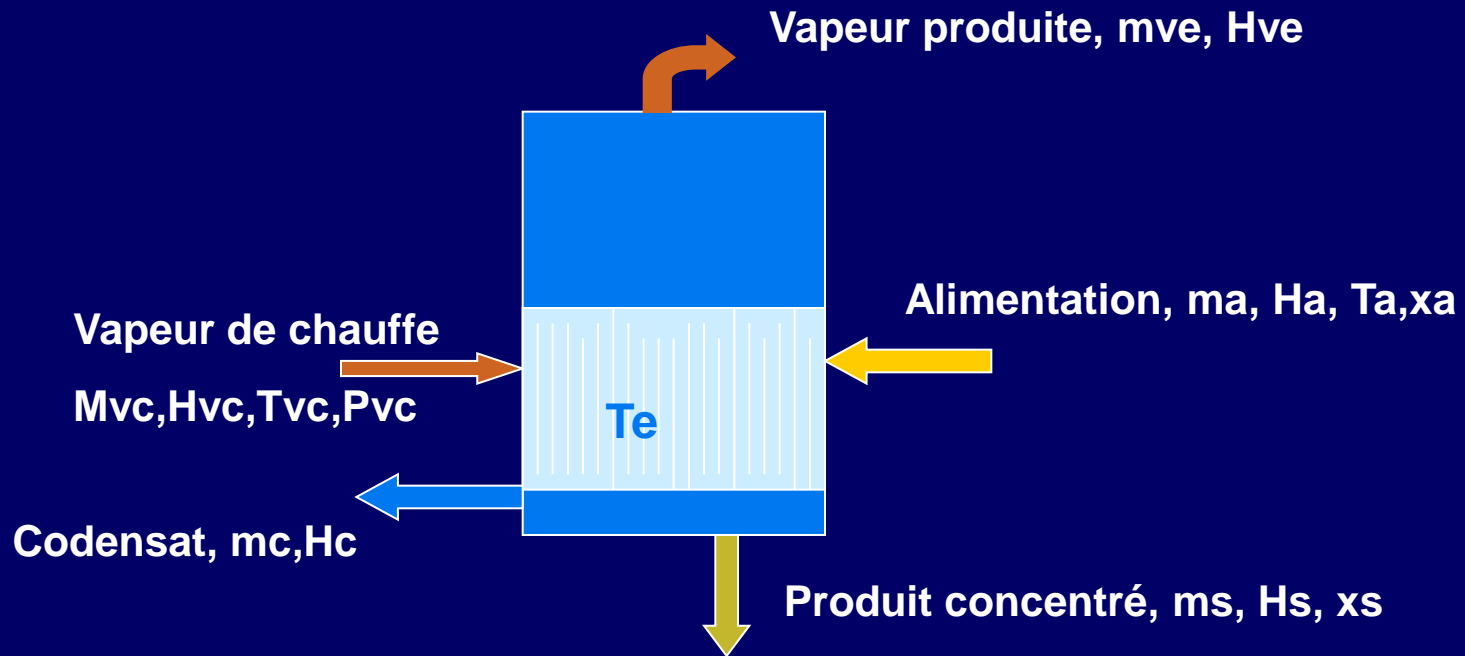
- Changement de Texture; à quelle T
 - Changement de Composition; à quelle T
-



Systemes d'évaporation

- Évaporation simple
 - Évaporation en multiple effet
 - Évaporation avec recompression
-

Évaporation simple effet





Évaporation simple effet

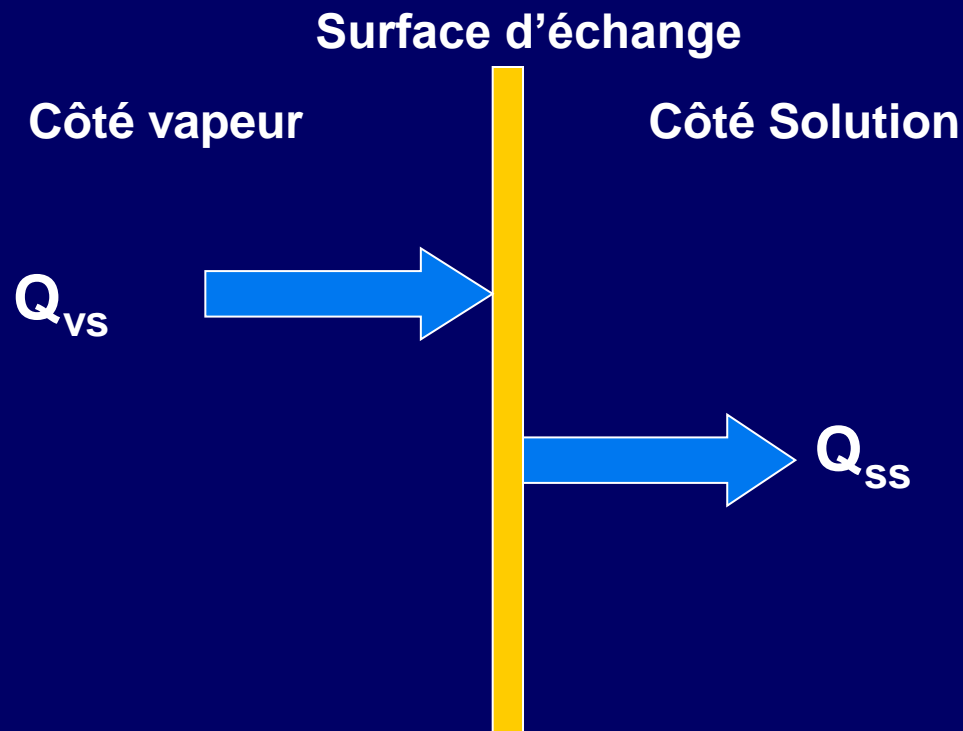
□ Bilan matière

- $m_{vc} = m_c$ (Vapeur totalement condensée et pertes = 0)
- $m_a = m_s + m_{ve}$ (conservation de la matière et pertes = 0)
- $m_a \cdot (1 - x_a) = m_s \cdot (1 - x_s)$ (conservation de la matière sèche et pertes = 0)

‘m’ représente un débit

Évaporation simple effet

□ Bilan énergétique





Évaporation simple effet

□ Bilan énergétique

- $Q_{vs} = m_{vc} \cdot (H_c - H_{vc}) = - m_{vc} \cdot \Delta H_v$

- $Q_{ss} = (m_a - m_s) \cdot H_{ve} + m_s \cdot H_{sc} - m_a \cdot H_a$

$$m_{vc} \cdot \Delta H_v = (m_a - m_s) \cdot H_{ve} + m_s \cdot H_{sc} - m_a \cdot H_a$$



Évaporation simple effet

□ Calcul des enthalpies

- T_e est la température de référence pour le calcul des enthalpies;
- $H_s = 0$
- $H_a = c_{pa} \cdot (T_a - T_e)$
- $H_{ve} = \Delta H_{ve}$ (Élévation ébullioscopique négligeable)



Évaporation simple effet

□ Equation de bilan thermique

$$m_{vc} \cdot \Delta H_v = (m_a - m_s) \cdot \Delta H_{ve} + m_a \cdot c_{pa} \cdot (T_a - T_e)$$

□ Energie de condensation utilisée pour:

- Porter la solution à l'ébullition
- Vaporiser le solvant à raison de m_{ve}
- Si $T_a > T_e$ on a une partie de la vapeur qui est produite par flash évaporation



Évaporation simple effet

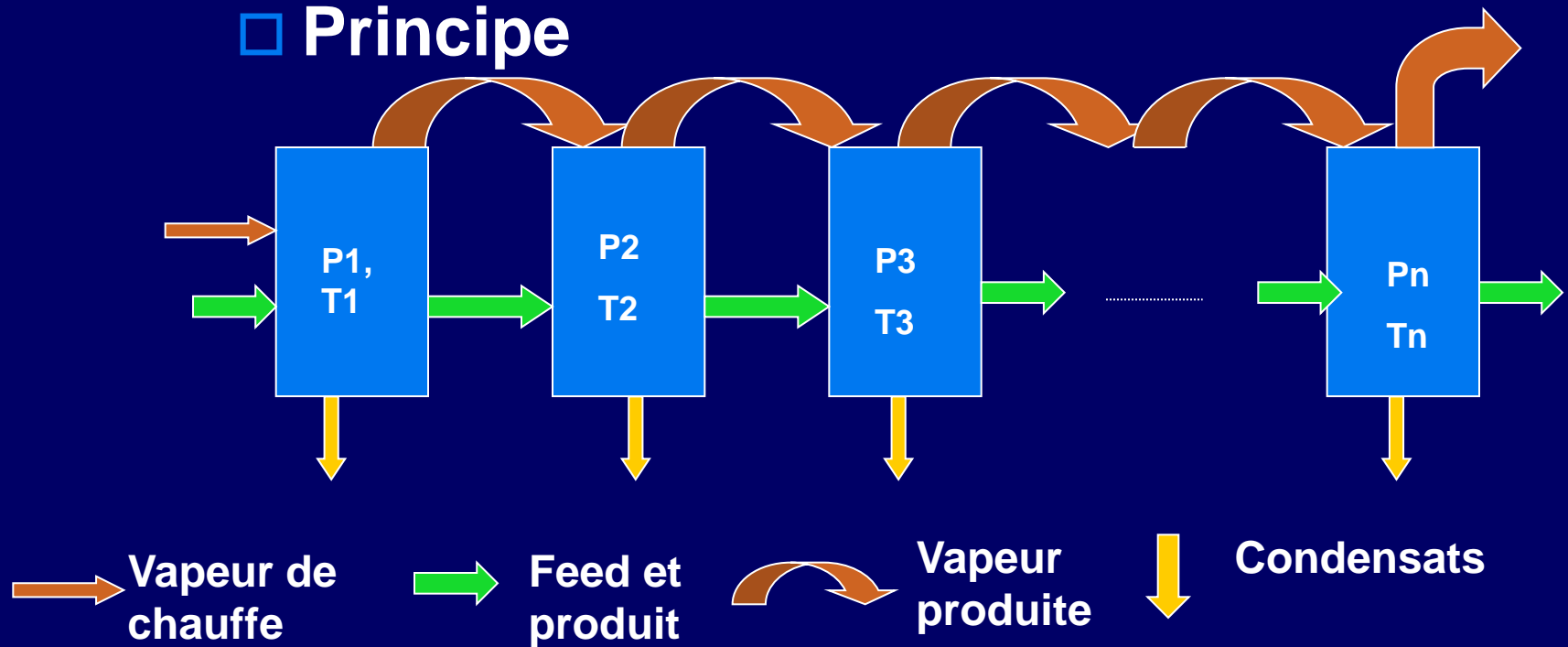
- Économie de l'évaporation

$$E = m_{ve} / m_{vc} = (m_a - m_s) / m_{vc}$$

- Si $T_a = T_e$ et $\Delta H_{ve} \neq \Delta H_v$ on aura alors
 $E \neq 1$, 1kg de vapeur vaporise 1kg
d'eau

Évaporation à multiple effets

□ Principe



Conditions de fonctionnement: $P1 > P2 > P3 > \dots > Pn$



Évaporation à multiple effets

- E proche de N
 - Nombre d'effets limité
-



Évaporation à multiple effets

□ En raison de:

- Chutes nuisibles de température importantes dues aux élévations ébullioscopique si N est grand;
- $T_{vc}-T_n$ est inextensible;
 - T_{vc} a une limite supérieure à ne pas dépasser à cause de la thermosensibilité du produit et
 - T_n a une limite inférieure au-delà de laquelle le vide dans le condenseur est irréalisable;



Évaporation à multiple effets

- **Circulation du produit**
 - **Alimentation en avant:**
 - **Produits thermosensibles: lait, sirop, ...**
 - **Produit concentré plus sensible va être exposé dans les derniers effets à des températures basses**
-



Évaporation à multiple effets

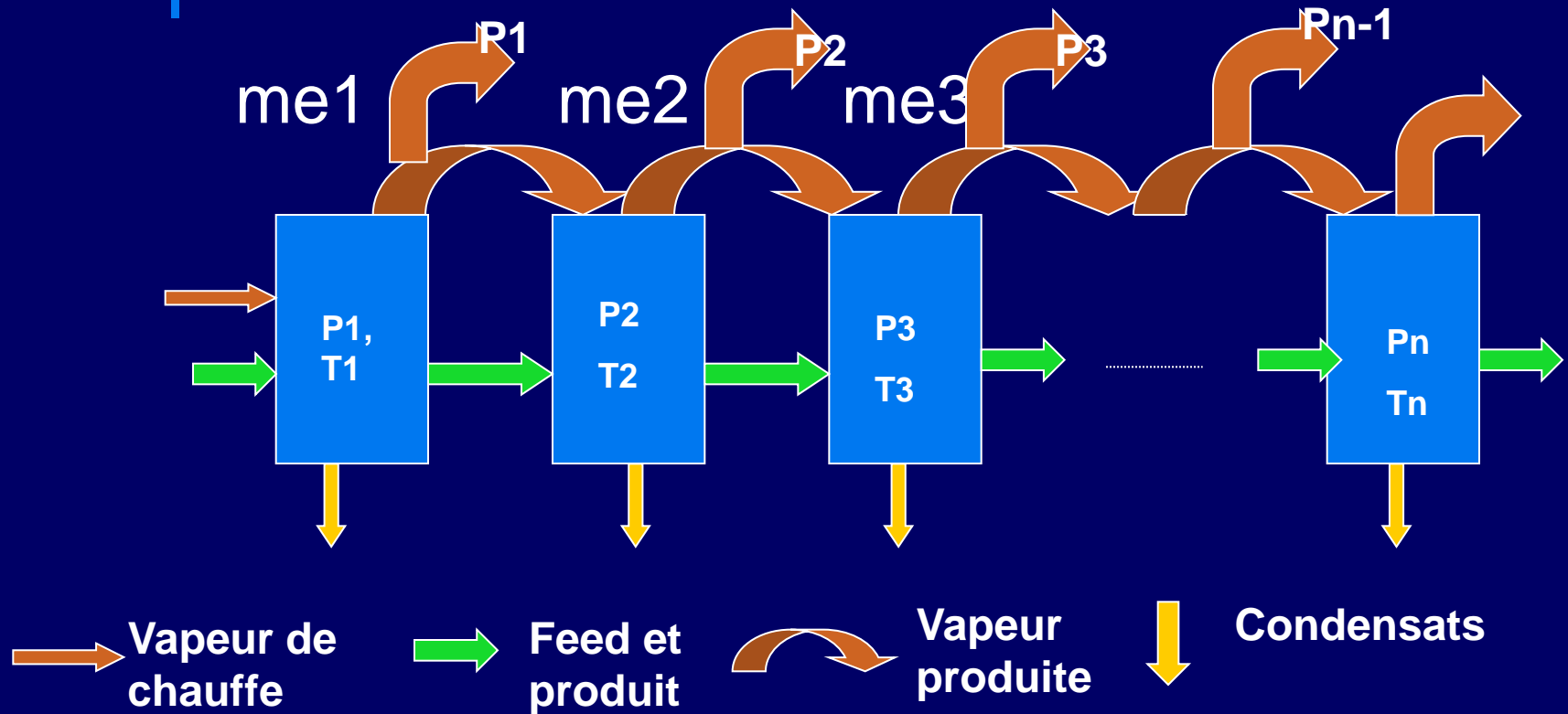
- **Circulation du produit**
- **Alimentation en arrière:**
 - **Produits thermostables: vinasses de distillerie, eau résiduaires, papeterie, ...**
 - **Produit concentré va être exposé dans les derniers effets à des températures élevées: La viscosité diminue et le coefficient de transfert de chaleur augmente**



Évaporation à multiple effets avec prélèvements

- Les prélèvements de la vapeur produite dans les corps d'évaporation sont courants quand la quasi-totalité de la vapeur produite dans les chaudières est envoyée dans l'atelier d'évaporation;
 - Les débits de vapeur en circulation sont donc diminués.
-

Évaporation à multiple effets





Évaporation à multiple effets avec prélèvements

□ Bilan matière

□ $m_{e1} = m_{vc}$

□ $m_{e2} = m_{e1} - P_1 = m_{vc} - P_1$

□ $m_{e3} = m_{e2} - P_2 = m_{vc} - (P_1 + P_2)$

□ $m_{en} = m_{en-1} - P_{n-1} = m_{vc} - (P_1 + P_2 + P_3 + \dots)$



Évaporation à multiple effets avec prélèvements

□ Bilan matière

□
$$m_E = m_a - m_s = n m_{vc} - \sum_{i=1}^{n-1} (n - i)p_i$$



Évaporation à multiple effets avec prélèvements

□ Economie de l'évaporation

$$E = n - (1 / m_{vc}) \cdot \sum_{i=1}^{n-1} (n - i) p_i$$

P_i est le prélèvement réalisé sur le corps i de l'évaporation



Évaporation à multiple effets: Méthode de calcul

- **Grandeurs généralement recherchées: m_{vc} , A , T_{ei} , m_{en} ;**
- **Équations disponibles:**
 - **Bilan matière global: 1 équation**
 - **Bilan enthalpique: 1 équation par effet**
 - **Transfert de chaleur: 1 équation par effet**
- **Cas de 3 effets: 7 inconnues et 7 équations; solution algébrique possible mais impraticable**



Évaporation à multiple effets: Méthode de calcul

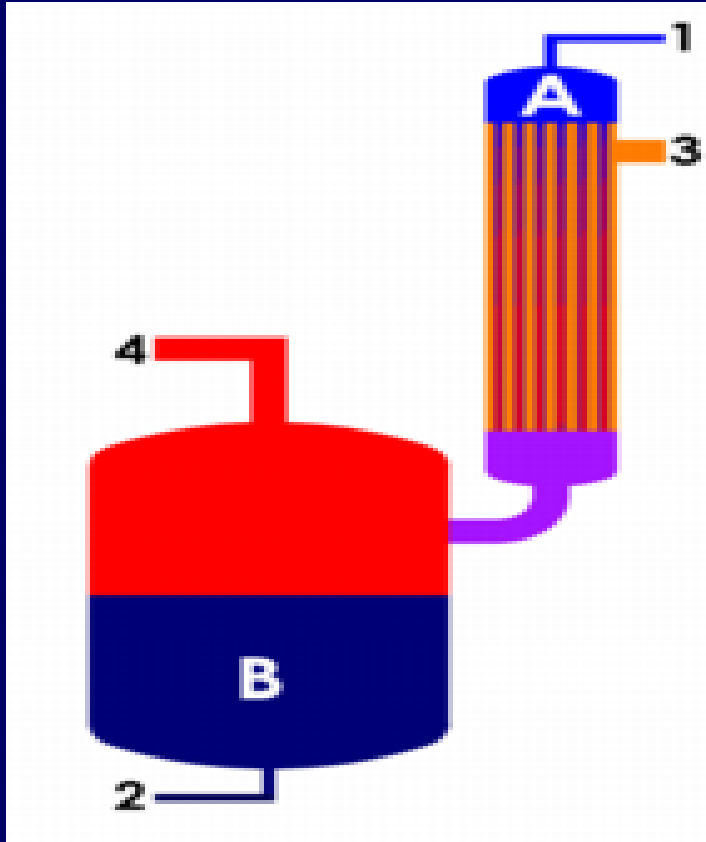
Méthode numérique d'ajustement successifs:

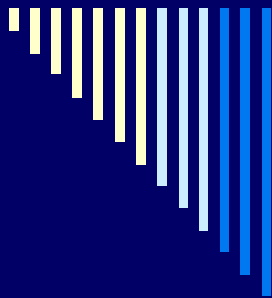
1. Initialiser les températures d'ébullition dans chaque corps
 2. Déterminer les débits de vapeur et de solutions à partir des équation des bilans thermiques
 3. Déterminer les surfaces d'échange à partir des équation de transfert de chaleur
 4. Comparer les valeur des surfaces à la consigne et corriger les températures d'ébullition en fonction des écarts constatés
-



Appareils d'évaporateur

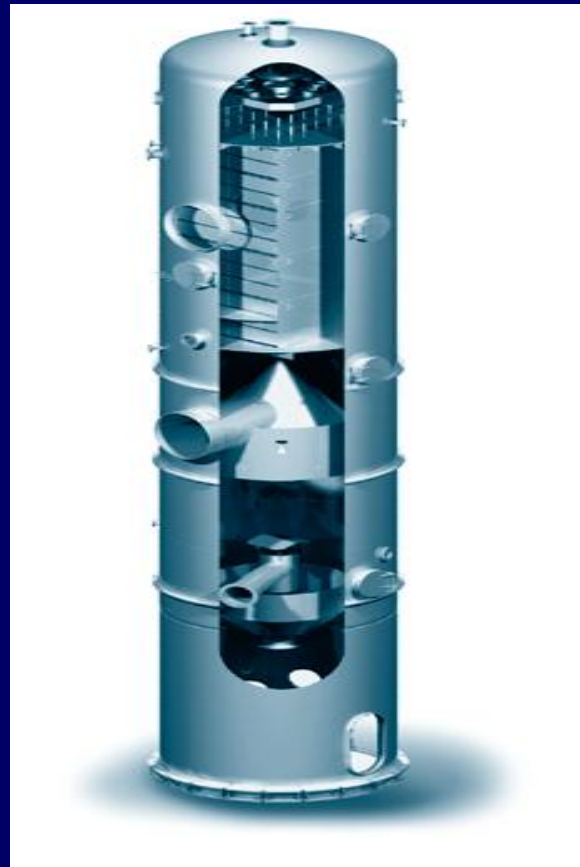
- Cuves simple
 - Évaporateurs ordinaires fonctionnant sous vide
 - Appareils à grimpage
 - Appareils a film tombant
 - Systèmes rotatifs
-



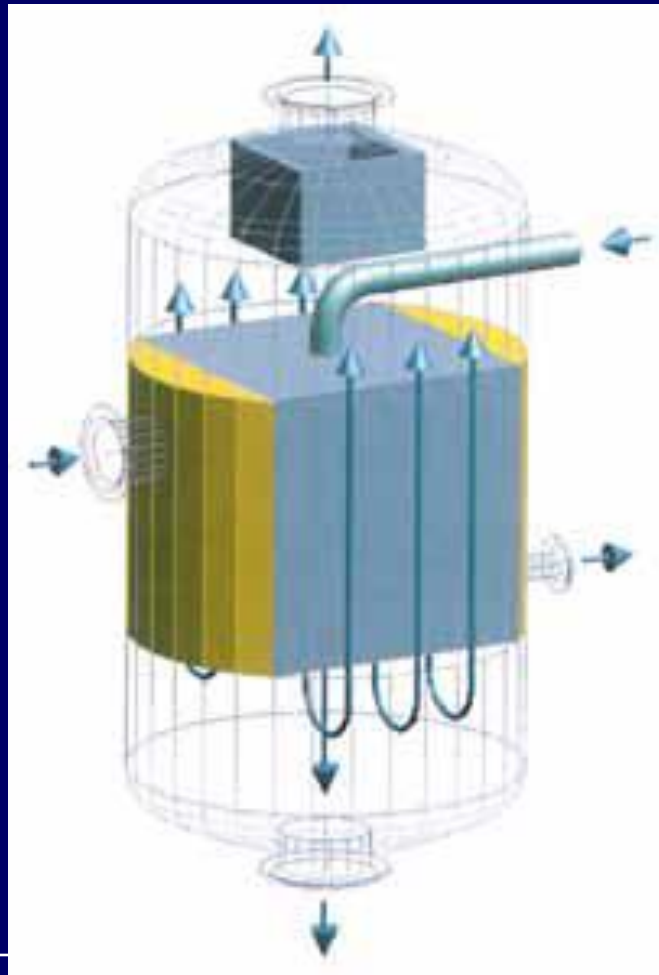




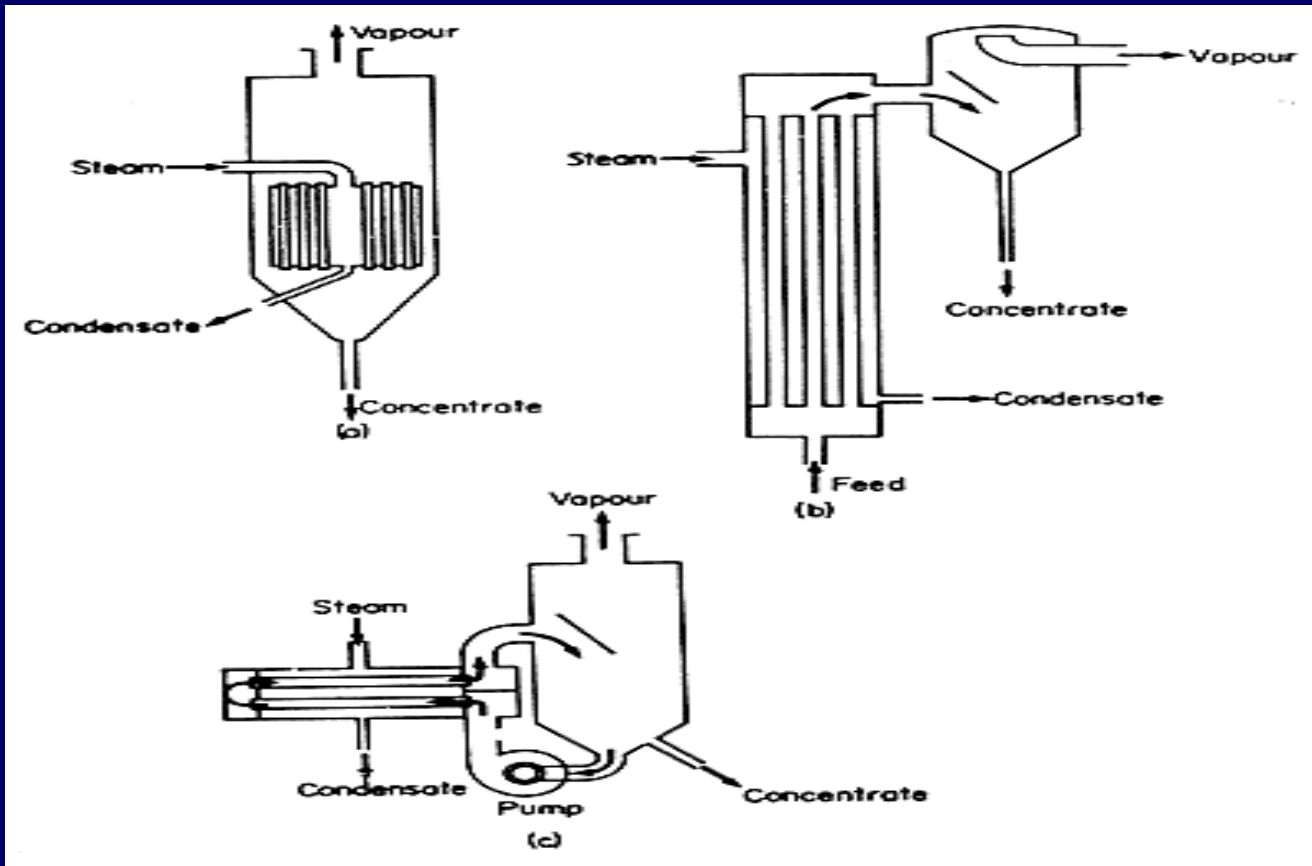
Evaporateur à descendage à plaques avec séparateur de gouttelettes



Evaporateur à descendage à plaques avec séparateur de gouttelettes



Types d'évaporateurs en fonction de la disposition de la section de transfert de chaleur





Appareils d'évaporation: Domaine d'utilisation

- Évaporateur à longs tubes verticaux: Lait
 - Évaporateur à film tombant: Jus de fruits
 - Évaporateurs à film agité: Latex, Gélatine, antibiotiques,
-



Conception des évaporateurs

- Il faut rechercher la conception industrielle qui assure le meilleur compromis entre
 - coût énergétique et
 - coût d'investissement sans oublier
 - les spécifications techniques sur les produits traités.
-



Gestion d'un système d'évaporation

- Développements récents en matière des instruments de mesures
 - Outils informatiques utilisés dans la gestion technique:
 - Hardware
 - Software
-



Applications

On se propose de concentrer une solution du saccharose initialement disponible à un brix de 10% dans un évaporateur à trois effets. Le sirop sortant après concentration doit avoir un brix de 50%



Détails du projet

□ Informations sur le produit

- Solution du saccharose, Thermosensible
 - $C_p = 4.19 - 2.35X$ (C_p en $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ et X en % MS)
 - $\Delta T_e = 1.78X + 6.22X^2$
 - $X_i = 10\%$ & $X_f = 50\%$
 - $Ma = 24.94 \text{ T/hr}$
 - $T_a = 21 \text{ }^\circ\text{C}$
-



Fluide Caloporteur

- Disponibilité de vapeur vive saturée en quantité suffisante à
 - $P_{vc} = 2 \text{ bars}$
 - $T_{vc} = 120.6 \text{ °C}$
-



Informations sur l'évaporateur

- Multiple effets, $N = 3$
 - $A1 = A2 = A3$
 - $P_3 \geq 13560 \text{ Pa}$
 - Alimentation en avant du feed
 - Absence des prélèvements
-



Information sur le transfert de chaleur

- Coefficients globaux de transfert de chaleur
 - $\alpha_1 = 3121 \text{ W/m}^2\text{°C}$
 - $\alpha_2 = 1986 \text{ W/m}^2\text{°C}$
 - $\alpha_3 = 1135 \text{ W/m}^2\text{°C}$
 - Facteurs de potentialité
-



Données techniques

Items	Valeur	Etat
Pc	2 bars	Évaluée
Tc	121 °C	Évaluée
mvc	?	Inconnue
Bxi	10%	Donnée
Bxf	50%	Donnée
Ta	21 °C	Donnée
ma	6.93 kg/s	Donnée
ms, msi	?	Inconnues
ΔH_{vi}	?	Inconnues
Tei	?	Inconnues
mei	?	Inconnues
Ai	?	Inconnues



Méthode de Calcul

- Alimentation en avant, $A_i = Cte$
 - Chute de pression entre effets est presque la même:
 - $P_{vc}-P_1 = P_1-P_2 = P_2-P_3 = \Delta P_i$
 - $\Delta P_i = (203\,425 - 13560) / 3 = 189\,865 \text{ Pa}$
-



Méthode calcul

Vapeur de chauffe

- $P_{vc} = 203\,425\text{ Pa}$,
- $T_{vc} = 121\text{ °C}$
- $\Delta H_{vc} = 2204\text{ kJ/kg}$

Effet 1

- $P_1 = 203\,425 - \Delta P_i = 140\,137\text{ Pa}$,
 - $T_{vc} = 109\text{ °C}$
 - $\Delta H_{vc} = 2234\text{ kJ/kg}$
-



Méthode de calcul

Effet 2

- $P_2 = 76\,849\text{ Pa}$,
- $T_{e2} = 92\text{ °C}$
- $\Delta H_{v2} = 2278\text{ kJ/kg}$

Effet 3

- $P_3 = 13\,560\text{ Pa}$,
 - $T_{e3} = 52\text{ °C}$
 - $\Delta H_3 = 2375\text{ kJ/kg}$
-



Equation Bilan énergétique

$$m_{vc} \cdot \Delta H_{vc} = (m_a - m_1) \cdot \Delta H_{v1} + m_a c_{pa} (T_{e1} - T_a)$$

$$(m_a - m_1) \cdot \Delta H_{v1} = (m_1 - m_2) \cdot \Delta H_{v2} + m_1 c_{p1} (T_2 - T_1)$$

$$(m_1 - m_2) \cdot \Delta H_{v2} = (m_2 - m_3) \cdot \Delta H_{v3} + m_2 c_{p2} (T_3 - T_2)$$



Resolution

- Système à 3 inconnues
 - m_1 , m_2 et m_{vc}
 - Mais il faut d'abord trouver m_s
-



Equation de transfert de chaleur

$$Q1 = \alpha1 A1 \Delta T1 = mvc.\Delta Hvc$$

$$Q2 = \alpha2 A1 \Delta T2 = (ma-m1).\Delta Hv1$$

$$Q3 = \alpha3 A3 \Delta T3 = (m1-m2).\Delta Hv2$$



Resolution

- On obtient A_1 , A_2 et A_3
 - On Calcule A_m
 - On évalue les déviations de A_i par rapport à A_m
 - Les déviations évaluées sont utilisée pour apporter la correction appropriée à ΔT_i (facteur de potentialité)
-



Travaux Dirigés

- TD1:
 - Résoudre le problème sus présenté
-



Travaux Dirigés

□ TD 2:

Concevoir une unité de production d'eau potable à partir des eaux saumâtres pour une ville dans le sud du Maroc



Travaux Dirigés

Collecte de données relatives aux besoins:

- Population: 150000 habitants
 - Besoins spécifiques: 200 litres/habitant
-



Travaux Dirigés

Données relatives à la vapeur de chauffe:

- Source: chaudière à fuel de 5 T/h
 - Pression: 5.5 bars
 - Titre à l'arrivée: 98%
-



Travaux Dirigés

Données relatives à l'eau saumâtre :

- Teneur en NaCl: 35 g/l
 - T_0 : 10°C
-



Travaux Dirigés

Données relatives à l'eau potable

- Teneur en NaCl: 500 ppm
-