



Projet de Renforcement de la Recherche Scientifique pour la Gouvernance et le
Développement humain Durable (G/DHD)

UNIVERSITE DE FIANARANTSOA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE CHIMIE

Laboratoire de chimie appliquée de l'Université de Fianarantsoa

Rapport de Stage financé par la G/DHD

Présenté par :

RAZAFINDRAZANAKOLONA A. Daniel

Intitulé :

**OPTIMISATION DU FONCTIONNEMENT D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE
D'ETHANOL A EFFET DE SERRE RENFORCE UTILISANT UN SYSTEME DE
POURSUITE DE LA COURSE SOLAIRE**

Encadré par :

Mr RAZANAPARANY Bruno

Professeur titulaire à l'Université d'Antananarivo

Dr Marcelin Hajamalala ANDRIANANTENAINA

Conférences à l'Université de Fianarantsoa

Dr Rivo RABESIAKA

Maître de Conférences à l'Université de Fianarantsoa

Année Universitaire 2013-2014

REMERCIEMENTS :

Je remercie Dieu tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour terminer ce travail.

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire Chimie Appliquée de l'Université de Fianarantsoa (LAPAUF) et financé par la Coopération entre le PNUD et l'UNESCO dans le Domaine de la Gouvernance et du Développement Humain Durable (G/DHD).

Premièrement, je tiens à remercier profondément :

- Le PNUD et l'UNESCO qui ont appuyés les Universités pour leurs efforts de Développement Humain Durable.
- Le Comité Scientifique qui a sélectionné mon dossier de demande de financement proposé par la G/DHD.
- Toute l'Equipe de G/DHD dirigée par Monsieur le Vice-Président chargée de la Formation et de la Recherche qui représente l'Université d'Antananarivo pour l'appui financier, cet appui m'a rendu actif pour faire la partie expérimentale.
- Professeur Roger Marie RAFANOMEZANTSOA, responsable de l'école doctoral en chimie aux Faculté des Sciences de l'Université de Fianarantsoa, qui m'a accordé d'effectuer ce stage au sein du LAPAUF.

- .

Mes vifs remerciements s'adressent à mes encadreurs cite ci-dessus pour leur confiance ainsi que leur qualité scientifique de l'encadrement :

- Professeur RAZANAPARANY Bruno, Professeur Titulaire à l'Université d'Antananarivo,
- Docteur Marcellin Hajamalala ANDRIANANTENAINA Maître de Conférences à l'Université de Fianarantsoa
- Docteur Rivo RABESIAKA.

Je remercie aussi toute l'administration de l'université de Fianarantsoa :

- Monsieur Benjamin RANDRIANIRINA, Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université de Fianarantsoa.
- Madame Honorine RASOARIMANANA, Chef de département de chimie applique aux Faculté des Sciences de l'Université de Fianarantsoa

Je remercie également tous mes enseignants qui sont à l'origine de tout mon savoir.

Je remercie particulièrement toute le technicien qui assure la réalisation le prototype de distillation dirigée par le Proviseur du Lycée Technique Professionnel Beravina Fianarantsoa

Résumé :

Cette étude consiste à établir un modèle mathématique permettant de simuler le fonctionnement de la colonne conique rectificatrice du mélange de vapeur d'éthanol-eau. La modélisation mathématique est basée sur la méthode d'analogie électrique en tenant compte les échanges de flux entre deux étages successifs afin de déterminer la température de la vapeur à l'entrée et à la sortie de chaque étage en tenant compte tous les échanges thermiques sur les différents points du système. Cela permettra de calculer la concentration de la vapeur à la sortie du système et de dimensionner la colonne rectificatrice. La méthode de résolution du système d'équations différentielles est celle de la différence finie aboutissant à un système d'équations linéaire. L'équation matricielle issue de ce système d'équations est résolue à l'aide de l'outil de calcul du MATLAB 7.5. Les résultats obtenus ont montré que la concentration d'éthanol de la vapeur et la température de la vapeur à la sortie d'un étage augmentent. Le nombre d'étage est fonction de la température de la vapeur à la sortie et la concentration de la vapeur à l'entrée de chaque étage de la colonne.

Mots-clés : Colonne rectificatrice, analogie électrique, éthanol, échanges thermiques ; modèle mathématique

SOMMAIRE

Remerciement	
Resume,.....	
Sommaire.....	
Fiche technique.....	
Introduction.....	

PARTIE I Objectifs scientifique et technique

1-1: apport en termes de savoirs scientifiques.....	
1-2.ajoutée au domaine professionnel.....	

PARTIE II. Méthodologie

2-1-Maquette de réacteur conique.....	
2-2 – Nomenclature.....	
2-3-Mise en équation d'échange de chaleur de la conique.....	
2-4- Resolution d' equation.....	
2-4-1 Equation.....	

PARTIE III. RESULTAT

3-1 savoirs scientifiques.....	
3-2 savoirs locaux.....	
3-3 savoirs techniques.....	
3-4 résultats obtenus,.....	
3-5 résultats non attendus mais obtenus.....	

PARTIE IV. ACQUIS PERSONNEL:

- 4-1 Pratiques relationnelles.....
- 4-2 Développement personnel.....
- 4-3 Ouverture professionnelle.....

PARTIE V :

- 5-1 Points à approfondir davantage.....
- 5-2 Autres domaines concernés par le sujet.....
- Conclusion.....
- Annexe.....

FICHE TECHNIQUE DE STAGE

Intitulé du sujet de stage :

« ETUDE D'UN REACTEUR A COLONNE RECTIFICATRICE CONIQUE D'ETHANOL
COMMANDE A DISTANCE. »

1-But

- Nouvelle prototype
- Meilleure qualité d'éthanol
- Réacteur capable de gérer du temps
- Cout de réacteur à la porte de tous

2-Problématique :

- Échange des Flux
- La Température et la pression d'entrée et de sortie
- Concentration du mélange

3-Hypothèses

- Inventaire des différents échanges thermiques
- Etude de l'équilibre liquide-vapeur du mélange binaire
- Etude des différentes Lois thermodynamiques
- Règle du mélange binaire
- Programmation informatique en utilisant le logiciel Matlab et Visual basic

4-Méthodologie :

- Utilisation de la méthode d'analogie électrique
- Résolution par la méthode de RUNGE KUTTA
- Programmation informatique des interfaces

5-Plan de travail et chronogramme :

- Esquisse du réacteur conique
- Inventaire des Températures, échanges des flux,
- Mise en équation par la méthode d'analogie électrique
- Déduction de schéma électrique des équations
- Résolution des équations différentielles par la méthode de RUNGE KUTTA
- Calcul les coefficients d'échanges par les lois Thermodynamique
- Programmation du réacteur par le logiciel Visual Basic
- Mise en place des matériaux pour la réalisation pratique
- Application

I-Introduction :

La recherche actuel est axe sur la protection de l'environnement à cause de dégradation de milieu environnent ainsi que la pollution de l'air et le couche d'ozone .D'où ; cette raison que nous permet de faire une invention en utilisant une modèle de colonne à distillation conique par biaire de protection de l'environnement ainsi que la perte de temps. La colonne de distillation conique permet d'avoir une degré d'éthanol à 96°C dans l'azéotrope

Partie I-

OBJECTIFS SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE :

1-1 Apport en termes de savoirs scientifiques au domaine traité,

La mise en place d'un logiciel informatique pour le fonctionnement de cette réacteur c'est à dire que cette prototype la dit est commande à distance par la nouvelle technologie de l'informatique. En outre ; l'invention du prototype conique permet de donner à la fin de l'application un produit d'alcool à forte concentration

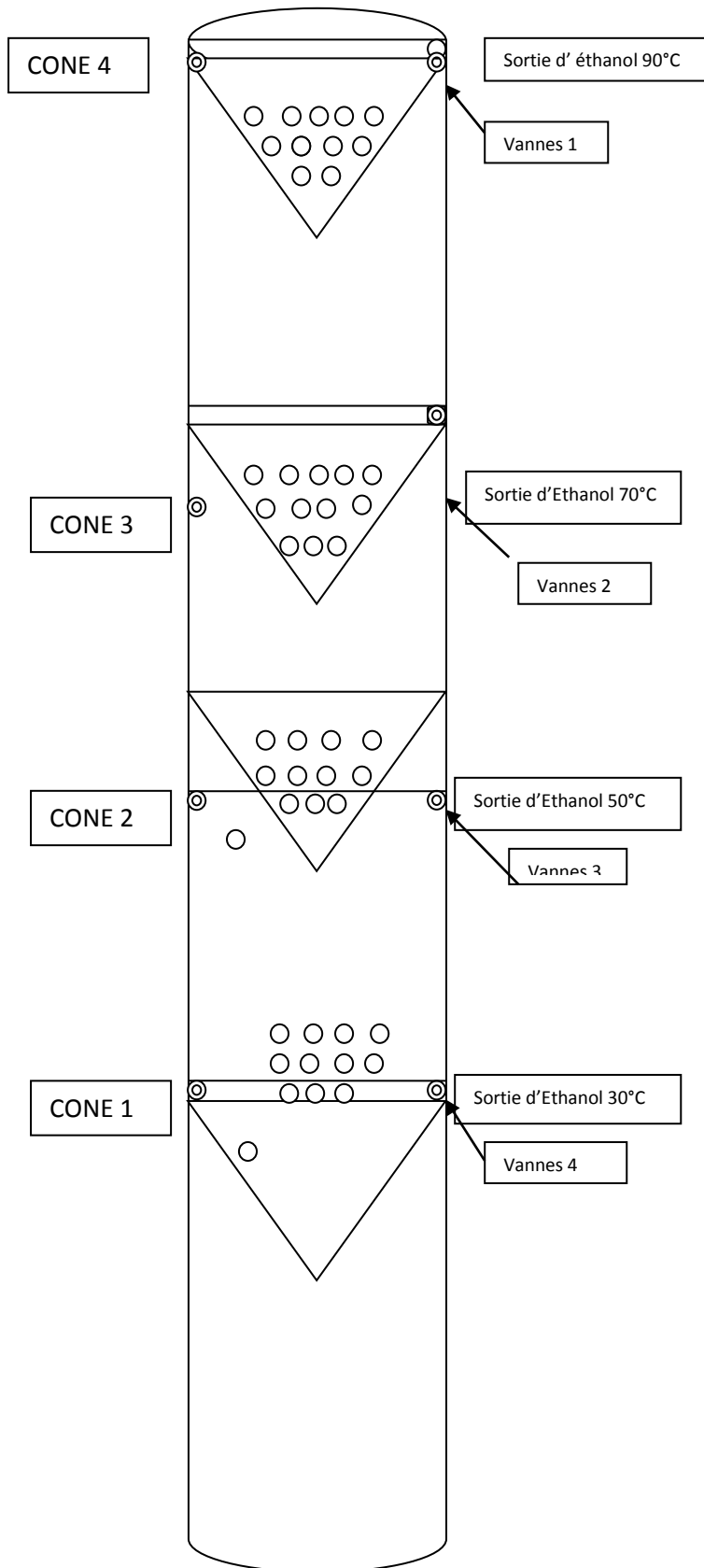
1-2 Valeur ajoutée au domaine professionnel

Au niveau professionnel, l'utilisation de ce réacteur conique permet d'obtenir un bon rendement et une qualité d'éthanol ainsi qu'on peut également gérer le temps en utilisant la nouvelle technologie

PARTIE II -

METHODOLOGIE

2-1-Maquette de réacteur conique



2-2- Nomenclature

2-2-1-Masse et Température

Notation		
Symbole	Désignation	
a	Air ambiante	
R	Rectificateur supérieur	
r	Rectificateur inférieur	
C	Cylindre	
m	mélange	
V	Vapeur	
Masse		
Symbole	Désignation	Unité
M_c	Masse de cylindre	Kg
M_{cR}	Masse de Rectificateur	Kg
M_{cm}	Masse de mélange	Kg
Température		
Symbole	Désignation	Unité
T_{c_x}	Température de cylindre extérieur	$^{\circ}K$
T_{c_n}	Température de cylindre intérieur	$^{\circ}K$
T_{r_E}	Température de Rectificateur externe supérieur	$^{\circ}K$
T_{r_I}	Température de Rectificateur interne supérieur	$^{\circ}K$
T_{r_i}	Température de Rectificateur interne inférieur	$^{\circ}K$
T_{r_e}	Température de Rectificateur interne inférieur	$^{\circ}K$
T_m	Température du mélange	$^{\circ}K$
Aire		
Symbole	Désignation	Unité
A_x	Aire de cylindre extérieur	m^2
A_n	Aire de cylindre intérieur	m^2
A_{r_E}	Aire de Rectificateur externe supérieur	m^2
A_{r_I}	Aire de Rectificateur interne supérieur	m^2
A_{r_i}	Aire de Rectificateur interne inférieur	m^2
A_{r_e}	Aire de Rectificateur interne inférieur	m^2
A_m	Aire du mélange	m^2
Flux thermique		
Flux thermique par convection		
Symbole	Désignation	Unité
Q_{ca}^v	Flux de chaleur échange par convection entre cylindre-air	W
Q_{cv}^v	Flux de chaleur échange par convection entre cylindre-vapeur	W
Q_{rv}^v	Flux de chaleur échange par convection entre Rectificateur externe supérieur et vapeur	W

Q_{Rm}^v	Flux de chaleur échange par convection entre Rectificateur interne supérieur et mélange	W
Q_{rm}^v	Flux de chaleur échange par convection entre Rectificateur interne inférieur-mélange	W
Q_{rV}^v	Flux de chaleur échange par convection entre Rectificateur interne inférieur et vapeur	W
Flux thermique par conduction		
Symbole	Désignation	Unité
Q_C^c	Flux de chaleur échangé par conduction au niveau de cylindre	W
Q_R^c	Flux de chaleur échangé par conduction entre Rectificateur supérieur	W
Q_r^c	Flux de chaleur échangé par conduction entre Rectificateur inférieur	W
Flux thermique par condensation		
Symbole	Désignation	Unité
Q^{CO}	Flux de chaleur échangé par condensation du Cylindre interne	W
Q_1^{CO}	Flux de chaleur échangé par condensation du rectificateur externe supérieur	W
Q_2^{CO}	Flux de chaleur échangé par condensation du rectificateur interne supérieur	W
Q_3^{CO}	Flux de chaleur échangé par condensation du rectificateur externe inférieur	W
Coefficient d'échange thermique par convection		
Symbole	Désignation	Unité
h_{ca}^v	Coefficient d'échange thermique par convection entre cylindre-air	$W / m^2 \cdot ^\circ C$
h_{cV}^v	Coefficient d'échange thermique par convection entre cylindre-vapeur	$W / m^2 \cdot ^\circ C$
h_{RV}^v	Coefficient d'échange thermique par convection entre Rectificateur externe supérieur et vapeur	$W / m^2 \cdot ^\circ C$
h_{Rm}^v	Coefficient d'échange thermique par convection entre Rectificateur interne supérieur et mélange	$W / m^2 \cdot ^\circ C$
h_{rm}^v	Coefficient d'échange thermique par convection entre Rectificateur interne inférieur-mélange	$W / m^2 \cdot ^\circ C$
h_{rV}^v	Coefficient d'échange thermique par convection entre Rectificateur interne inférieur et vapeur	
Coefficient d'échange thermique par conduction		
Symbole	Désignation	Unité
h_C^c	Coefficient d'échange thermique par conduction au niveau de cylindre	$W / m^2 \cdot ^\circ C$
h_{CR}^c	Coefficient d'échange thermique par conduction entre Rectificateur supérieur	$W / m^2 \cdot ^\circ C$
h_{Cr}^c	Coefficient d'échange thermique par conduction entre Rectificateur inférieur	$W / m^2 \cdot ^\circ C$

Flux thermique par condensation		
Symbole	Désignation	Unité
h^{CO}	Coefficient d'échange thermique par condensation du Cylindre interne	$W / m^2 \cdot ^\circ C$
h_1^{CO}	Coefficient d'échange thermique par condensation du rectificateur externe supérieur	$W / m^2 \cdot ^\circ C$
h_2^{CO}	Coefficient d'échange thermique par condensation du rectificateur interne supérieur	$W / m^2 \cdot ^\circ C$
h_3^{CO}	Coefficient d'échange thermique par condensation du rectificateur externe inférieur	$W / m^2 \cdot ^\circ C$
Nombre dimensionnel		
Symbole	Désignation	Unité
α	Diffusivité thermique	m^2 / s
β	Coefficient volumétrique d'expansion	K^{-1}
γ	viscosité cinématique du fluide	
μ	Viscosité dynamique	
ω		
λ	Conductivité thermique	
C_p	Chaleur massique à pression constante	$J / Kg \cdot ^\circ K$
$m \cdot C_p$	La quantité de chaleur échangée	$J / ^\circ K$
P	Pression	Pa
L	Longueur caractéristique	m
m	Débit de distillat	$kg / m^2 \cdot s$
g	Accélération de pesanteur	m / S^2
Nombre adimensionnel		
Symbole	Désignation	Unité
Pr	Nombre de Prandtl	-----
C	Constante numérique	
G_r	Nombre de GRASHOF	
Re	Nombre de Reynolds	
Nu	Nombre de Nusselt	
β_w	coefficient d'expansion volumétrique de l'eau	

2-3-Mise en équation d'échange de chaleur de la conique

❖ Niveau 01 : Cylindre externe

$$\frac{Mc_x Cp_c}{2A_x} \frac{dT_{c_x}}{dt} = Q_{cc} - Q_{vca}(1)$$

$$\frac{Mc_x Cp_c}{2A_x} \frac{dT_{c_x}}{dt} = h_{cc}(T_{ce} - T_{ci}) - h_{vca}(T_{ce} - T_a)(2)$$

$$\frac{Mc_x Cp_c}{2A_x} \frac{dT_{c_x}}{dt} = h_{cc}T_{ce} - h_{cc}T_{ci} - h_{vca}T_{ce} + h_{vca}T_a(3)$$

❖ Niveau 02 : Cylindre interne

$$\frac{Mc_n Cp_c}{2A_n} \frac{dT_{c_n}}{dt} = -Q_{cc} - Q_{vcv} - Q_{co}(4)$$

$$\frac{Mc_n Cp_c}{2A_n} \frac{dT_{c_n}}{dt} = -h_{cc}(T_{ce} - T_{ci}) - h_{vcv}(T_{ci} - T_v) - h_{co}(T_{ci} - T_v)(5)$$

$$\frac{Mc_n Cp_c}{2A_n} \frac{dT_{c_n}}{dt} = -h_{cc}T_{ce} + h_{cc}T_{ci} - h_{vcv}T_{ci} + h_{vcv}T_v - h_{co}T_{ci} + h_{co}T_v(6)$$

Niveau 03 : Rectificateur externe supérieur

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rE}} \frac{dT_{rE}}{dt} = Q_{CrE} - Q_{vEV} - Q_{CO1}(7)$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rE}} \frac{dT_{rE}}{dt} = h_{CrE}(T_{rE} - T_{rI}) - h_{vEV}(T_{rE} - T_V) - h_{CO1}(T_{rE} - T_V)(8)$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rE}} \frac{dT_{rE}}{dt} = h_{CrE}T_{rE} - h_{CrE}T_{rI} - h_{vEV}T_{rE} + h_{vEV}T_V - h_{CO1}T_{rE} + h_{CO1}T_V(9)$$

❖ Niveau 04 : Rectificateur interne supérieur

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rI}} \frac{dT_{rI}}{dt} = -Q_{CrI} - Q_{vriM} + Q_{CO2}(10)$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}} \frac{dT_{ri}}{dt} = -h_{Cri}(T_{rE} - T_{ri}) - h_{vrim}(T_{ri} - T_m) + h_{CO_2}(T_{ri} - T_m) \quad (11)$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}} \frac{dT_{ri}}{dt} = -h_{Cri}T_{rE} + h_{Cri}T_{ri} - h_{vrim}T_{ri} + h_{vrim}T_m + h_{CO_2}T_{ri} - h_{CO_2}T_m \quad (12)$$

❖ **Niveau 05**: rectificateur externe inférieur

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{re}} \frac{dT_{re}}{dt} = Q_{Cre} - Q_{vre} - Q_{CO_3} \quad (13)$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{re}} \frac{dT_{re}}{dt} = h_{Cre}(T_{re} - T_{ri}) - h_{vre}(T_{re} - T_V) - h_{CO_3}(T_{re} - T_V) \quad (14)$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{re}} \frac{dT_{re}}{dt} = h_{Cre}T_{re} - h_{Cre}T_{ri} - h_{vre}T_{re} + h_{vre}T_V - h_{CO_3}T_{re} + h_{CO_3}T_V \quad (15)$$

❖ **Niveau 06**: rectificateur interne inférieur

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}} \frac{dT_{ri}}{dt} = -Q_{Cri} - Q_{vrim} \quad (16)$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}} \frac{dT_{ri}}{dt} = -h_{Cri}(T_{re} - T_{ri}) - h_{vrim}(T_{ri} - T_m) \quad (17)$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}} \frac{dT_{ri}}{dt} = -h_{Cri}T_{re} + h_{Cri}T_{ri} - h_{vrim}T_{ri} + h_{vrim}T_m \quad (18)$$

❖ **Niveau 07**: mélange

$$\frac{Mc_m Cp_m}{A_m} \frac{dT_m}{dt} = Q_{vrim} + m_C Cp_f (T_f - T_m) \quad (19)$$

$$\frac{Mc_m Cp_m}{A_m} \frac{dT_m}{dt} = h_{vrim}(T_{ri} - T_m) + m_C Cp_f (T_f - T_m) \quad (20)$$

$$\frac{M c_m C p_m}{A_m} \frac{dT_m}{dt} = h_{vrim} T_{ri} - h_{vrim} T_m + m_c C p_f T_f - m_c C p_f T_m \quad (21)$$

❖ **Niveau 08** : vapeur

$$A Q_{vap_{cire}} + A Q_{vap_{Cire}} = 0 \quad (22)$$

2-4- Resolution d' equation

2-4-1 Equation

$$\frac{dT_{c_x}}{dt} = \frac{2A_x}{M c_x C p_c} [h_{cc} T_{c_x} - h_{cc} T_{c_n} - h_{vca} T_{c_x} + h_{vca} T_a]$$

$$\frac{dT_{c_n}}{dt} = \frac{2A_n}{M c_n C p_c} [-h_{cc} T_{c_x} + h_{cc} T_{c_n} - h_{vcv} T_{c_n} + h_{vcv} T_v - h_{co} T_{c_n} + h_{co} T_v]$$

$$\frac{dT_{rE}}{dt} = \frac{2A_{rE}}{M c_R C p_R} [h_{cRE} (T_{rE} - T_{rI}) - h_{vEV} (T_{rE} - T_v) - h_{CO1} (T_{rE} - T_v)]$$

$$\frac{dT_{rI}}{dt} = \frac{2A_{rI}}{M c_R C p_R} [-h_{cRI} T_{rE} + h_{cRI} T_{rI} - h_{vrim} T_{rI} + h_{vrim} T_m + h_{CO2} T_{rI} - h_{CO2} T_m]$$

$$\frac{dT_{re}}{dt} = \frac{2A_{re}}{M c_R C p_R} [h_{cre} T_{re} - h_{cre} T_{ri} - h_{vre} T_{re} + h_{vre} T_v - h_{CO3} T_{re} + h_{CO3} T_v]$$

$$\frac{dT_{ri}}{dt} = \frac{2A_{ri}}{M c_R C p_R} [-h_{cri} T_{re} + h_{cri} T_{ri} - h_{vrim} T_{ri} + h_{vrim} T_m]$$

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{A_m}{M c_m C p_m} [h_{vrim} T_{ri} - h_{vrim} T_m + m_c C p_f T_f - m_c C p_f T_m]$$

$$A Q_{vap_{cire}} + A Q_{vap_{Cire}} = 0$$

2-4-2 Methode de RUNGE KUTTA 4

$$*\frac{dT_{Cx}}{dt} = \frac{2A_X}{Mc_x Cp_c} [h_{CC}T_{Cx} - h_{CC}T_{Cn} - h_{vca}T_{Cx} + h_{vca}T_a] \quad (1)$$

$$\frac{dT_{Cx}}{dt} = \frac{2A_X}{Mc_x Cp_c} [T_{Cx}(h_{CC} - h_{vca}) - h_{CC}T_{Cn} + h_{vca}T_a]$$

$$\text{Posons } T_{Cx} = U_1 \quad V_1 = -h_{CC}T_{Cn} + h_{vca}T_a$$

$$\alpha_1 = h_{CC} - h_{vca}$$

$$\text{De la forme : } \frac{dU_1}{dt} = \frac{2A_X}{Mc_x Cp_c} (\alpha_1 U_1 + V_1)$$

$$K_{11} = \left(\frac{2A_X}{Mc_x Cp_c} [\alpha_1 U_1 + V_1] \right) dt \quad K_{21} = \left(\frac{2A_X}{Mc_x Cp_c} [\alpha_1 U_1 + \frac{K_{11}}{2} + V_1] \right) dt$$

$$K_{31} = \left(\frac{2A_X}{Mc_x Cp_c} [\alpha_1 U_1 + \frac{K_{21}}{2} + V_1] \right) dt \quad K_{41} = [\alpha_1 U_1 + K_{31} + V_1] dt$$

$$U_1(t + dt) = U_1(t) + \frac{1}{6} [K_{11} + 2K_{21} + 2K_{31} + K_{41}]$$

$$T_{Cx}(t + dt) = T_{Cx}(t) + \frac{1}{6} [K_{11} + 2K_{21} + 2K_{31} + K_{41}]$$

$$T_{Cx}(t + dt) = T_{Cx}(t) + \frac{1}{6} [K_{11} + 2K_{21} + 2K_{31} + K_{41}]$$

$$*\frac{dT_{Cn}}{dt} = \frac{2A_n}{Mc_n Cp_c} [-h_{CC}T_{Cx} + h_{CC}T_{Cn} - h_{vcv}T_{Cn} + h_{vcv}T_V - h_{CO}T_{Cn} + h_{CO}T_V] \quad (2)$$

$$\frac{dT_{Cn}}{dt} = \frac{2A_n}{Mc_n Cp_c} [-h_{CC}T_{Cx} + (h_{CO} + h_{vcv})T_V + (h_{CC} - h_{vcv} - h_{CO})T_{Cn}]$$

$$\text{Posons } T_{Cn} = U_2 \quad V_2 = -h_{CC}T_{Cx} + (h_{CO} + h_{vcv})T_V$$

$$\alpha_2 = h_{CC} - h_{vcv} - h_{CO}$$

$$\text{De la forme : } \frac{dU_2}{dt} = \frac{2A_n}{Mc_n Cp_c} (\alpha_2 U_2 + V_2)$$

$$K_{12} = \left(\frac{2A_n}{Mc_n Cp_c} [\alpha_2 U_2 + V_2] \right) dt \quad K_{22} = \left(\frac{2A_n}{Mc_n Cp_c} [\alpha_2 U_2 + \frac{K_{12}}{2} + V_2] \right) dt$$

$$K_{32} = \left(\frac{2A_n}{Mc_n Cp_c} \left[\alpha_2 U_2 + \frac{K_{22}}{2} + V_2 \right] \right) dt$$

$$K_{42} = \left(\frac{2A_n}{Mc_n Cp_c} \left[\alpha_2 U_2 + K_{32} + V_2 \right] \right) dt$$

$$U_2(t + dt) = U_2(t) + \frac{1}{6} [K_{12} + 2K_{22} + 2K_{32} + K_{42}]$$

$$Tc_n(t + dt) = Tc_n(t) + \frac{1}{6} [K_{12} + 2K_{22} + 2K_{32} + K_{42}]$$

$$Tc_n(t + dt) = Tc_n(t) + \frac{1}{6} [K_{12} + 2K_{22} + 2K_{32} + K_{42}]$$

$$\frac{dTrE}{dt} = \frac{2A_{rE}}{Mc_R Cp_R} [h_{CrE} T_{rE} - h_{CrE} T_{rI} - h_{vEV} T_{rE} + h_{vEV} T_V - h_{CO1} T_{rE} + h_{CO1} T_V] \quad (3)$$

$$\frac{dTrE}{dt} = \frac{2A_{rE}}{Mc_R Cp_R} [(h_{CrE} - h_{CO1} - h_{vEV}) T_{rE} - h_{CrE} T_{rI} + (h_{vEV} + h_{CO1}) T_V] \quad (3)$$

$$\text{Posons } TrE = U_3 \quad V_3 = -h_{CrE} T_{rI} + (h_{vEV} + h_{CO1}) T_V$$

$$\alpha_3 = h_{CrE} - h_{CO1} - h_{vEV}$$

$$\text{De la forme : } \frac{dU_3}{dt} = \frac{2A_{rE}}{Mc_R Cp_R} (\alpha_3 U_3 + V_3)$$

$$K_{13} = \left(\frac{2A_{rE}}{Mc_R Cp_R} (\alpha_3 U_3 + V_3) \right) dt$$

$$K_{23} = \left(\frac{2A_{rE}}{Mc_R Cp_R} \left[\alpha_3 U_3 + \frac{K_{13}}{2} + V_3 \right] \right) dt$$

$$K_{33} = \left(\frac{2A_{rE}}{Mc_R Cp_R} \left[\alpha_3 U_3 + \frac{K_{23}}{2} + V_3 \right] \right) dt$$

$$K_{43} = [\alpha_3 U_3 + K_{33} + V_3] dt$$

$$U_3(t + dt) = U_3(t) + \frac{1}{6} [K_{13} + 2K_{23} + 2K_{33} + K_{43}]$$

$$TrE(t + dt) = TrE(t) + \frac{1}{6} [K_{13} + 2K_{23} + 2K_{33} + K_{43}]$$

$$TrE(t + dt) = TrE(t) + \frac{1}{6} [K_{13} + 2K_{23} + 2K_{33} + K_{43}]$$

$$*\frac{dTrI}{dt} = \frac{2A_{rI}}{Mc_R Cp_R} [-h_{CrI} T_{rE} + h_{CrI} T_{rI} - h_{vrlm} T_{rI} + h_{vrlm} T_m + h_{CO2} T_{rI} - h_{CO2} T_m] \quad (4)$$

$$\frac{dTrI}{dt} = \frac{2A_{rI}}{Mc_R Cp_R} [(h_{CrI} - h_{vrlm} + h_{CO2}) T_{rI} + (h_{vrlm} - h_{CO2}) T_m - h_{CrI} T_{rE}]$$

$$\text{Posons } TrI = U_4 \quad V_4 = (h_{vri} - h_{CO_2})T_m - h_{CrI}T_{rE}$$

$$\alpha_4 = h_{CrI} - h_{vri} + h_{CO_2}$$

$$\text{De la forme : } \frac{dU_4}{dt} = \frac{2A_{rI}}{McRCpR} (\alpha_4 U_4 + V_4)$$

$$K_{14} = \left(\frac{2A_{rI}}{McRCpR} [\alpha_4 U_4 + V_4] \right) dt \quad K_{24} = \left(\frac{2A_{rI}}{McRCpR} [\alpha_4 U_3 + \frac{K_{14}}{2} + V_3] \right) dt$$

$$K_{34} = \left(\frac{2A_{rI}}{McRCpR} [\alpha_4 U_4 + \frac{K_{24}}{2} + V_4] \right) dt \quad K_{44} = [\alpha_4 U_3 + K_{34} + V_3] dt$$

$$U_4(t + dt) = U_4(t) + \frac{1}{6} [K_{14} + 2K_{24} + 2K_{34} + K_{44}]$$

$$TrE(t + dt) = TrE(t) + \frac{1}{6} [K_{14} + 2K_{24} + 2K_{34} + K_{44}]$$

$$TrI(t + dt) = TrI(t) + \frac{1}{6} [K_{14} + 2K_{24} + 2K_{34} + K_{44}]$$

$$* \frac{dTre}{dt} = \frac{2A_{re}}{McRCpR} [h_{Cre}T_{re} - h_{Cre}T_{ri} - h_{vre}T_{re} + h_{vre}T_V - h_{CO_3}T_{re} + h_{CO_3}T_V] (5)$$

$$\frac{dTre}{dt} = \frac{2A_{re}}{McRCpR} [(h_{Cre} - h_{vre} - h_{CO_3})T_{re} + (h_{CO_3} + h_{vre})T_V - h_{Cre}T_{ri}]$$

$$\text{Posons } Tre = U_5 \quad V_5 = (h_{CO_3} + h_{vre})T_V - h_{Cre}T_{ri}$$

$$\alpha_5 = h_{Cre} - h_{vre} - h_{CO_3}$$

$$\text{De la forme : } \frac{dU_5}{dt} = \frac{2A_{re}}{McRCpR} (\alpha_5 U_5 + V_5)$$

$$K_{15} = \left(\frac{2A_{re}}{McRCpR} [\alpha_5 U_5 + V_5] \right) dt \quad K_{25} = \left(\frac{2A_{re}}{McRCpR} [\alpha_5 U_5 + \frac{K_{15}}{2} + V_5] \right) dt$$

$$K_{35} = \left(\frac{2A_{re}}{McRCpR} [\alpha_5 U_5 + \frac{K_{25}}{2} + V_5] \right) dt \quad K_{45} = [\alpha_5 U_5 + K_{35} + V_5] dt$$

$$U_5(t + dt) = U_5(t) + \frac{1}{6} [K_{15} + 2K_{25} + 2K_{35} + K_{45}]$$

$$Tre(t + dt) = Tre(t) + \frac{1}{6} [K_{15} + 2K_{25} + 2K_{35} + K_{45}]$$

$$Tre(t + dt) = Tre(t) + \frac{1}{6} [K_{15} + 2K_{25} + 2K_{35} + K_{45}]$$

$$* \frac{dT_{ri}}{dt} = \frac{2A_{ri}}{Mc_R Cp_R} [-h_{Cri} T_{re} + h_{Cri} T_{ri} - h_{vrim} T_{ri} + h_{vrim} T_m] (6)$$

$$\frac{dT_{ri}}{dt} = \frac{2A_{ri}}{Mc_R Cp_R} [(h_{Cri} - h_{vrim}) T_{ri} + h_{vrim} T_m - h_{Cri} T_{re}]$$

$$\text{Posons } T_{ri} = U_6 \quad V_6 = h_{vrim} T_m - h_{Cri} T_{re}$$

$$\alpha_6 = h_{Cri} - h_{vrim}$$

$$\text{De la forme : } \frac{dU_6}{dt} = \frac{2A_{ri}}{Mc_R Cp_R} (\alpha_6 U_6 + V_6)$$

$$K_{16} = \frac{2A_{ri}}{Mc_R Cp_R} [\alpha_6 U_6 + V_6] dt \quad K_{26} = \frac{2A_{ri}}{Mc_R Cp_R} [\alpha_6 U_6 + \frac{K_{16}}{2} + V_6] dt$$

$$K_{35} = \frac{2A_{ri}}{Mc_R Cp_R} [\alpha_6 U_6 + \frac{K_{26}}{2} + V_6] dt \quad K_{45} = [\alpha_6 U_6 + K_{36} + V_6] dt$$

$$U_6(t + dt) = U_6(t) + \frac{1}{6} [K_{16} + 2K_{26} + 2K_{36} + K_{46}]$$

$$T_{re}(t + dt) = T_{re}(t) + \frac{1}{6} [K_{16} + 2K_{26} + 2K_{36} + K_{46}]$$

$$T_{ri}(t + dt) = T_{ri}(t) + \frac{1}{6} [K_{16} + 2K_{26} + 2K_{36} + K_{46}]$$

$$* \frac{dT_m}{dt} = \frac{A_m}{Mc_m Cp_m} [h_{vrim} T_{ri} - h_{vrim} T_m + m_c Cp_f T_f - m_c Cp_f T_m] (7)$$

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{A_m}{Mc_m Cp_m} [-(m_c Cp_f + h_{vrim} + m_c Cp_f) T_m + m_c Cp_f T_f + h_{vrim} T_{ri}]$$

$$\text{Posons } T_m = U_7 \quad V_7 = m_c Cp_f T_f + h_{vrim} T_{ri}$$

$$\alpha_7 = -(m_c Cp_f + h_{vrim} + m_c Cp_f)$$

$$\text{De la forme : } \frac{dU_7}{dt} = \frac{A_m}{Mc_m Cp_m} (\alpha_7 U_7 + V_7)$$

$$K_{17} = \frac{A_m}{Mc_m Cp_m} [\alpha_7 U_7 + V_7] dt \quad K_{27} = \frac{A_m}{Mc_m Cp_m} [\alpha_7 U_7 + \frac{K_{17}}{2} + V_7] dt$$

$$K_{37} = \frac{A_m}{Mc_m Cp_m} [\alpha_7 U_7 + \frac{K_{27}}{2} + V_7] dt \quad K_{45} = [\alpha_7 U_7 + K_{37} + V_7] dt$$

$$U_7(t + dt) = U_7(t) + \frac{1}{6} [K_{17} + 2K_{27} + 2K_{37} + K_{47}]$$

$$T_m(t + dt) = T_m(t) + \frac{1}{6} [K_{17} + 2K_{27} + 2K_{37} + K_{47}]$$

$$T_m(t + dt) = T_m(t) + \frac{1}{6} [K_{17} + 2K_{27} + 2K_{37} + K_{47}]$$

$$* A_{Qvap_{cire}} + A_{Qvap_{CireE}} = 0(8)$$

2-5 Methode par difference Finie

2-5-1 Résolution d'équation : Différence finie

1°Etapas

$$\frac{Mc_X Cp_c}{A_X} \frac{d(T_{c_x} - T_{c_x}^*)}{dt} = (-h_{vca} + h_{CC})T_{c_x} - h_{CC}T_{c_n} + h_{vca}T_a$$

$$\frac{Mc_n Cp_c}{2A_n} \frac{d(T_{c_n} - T_{c_n}^*)}{dt} = -h_{CC}T_{c_x} + (h_{CC} - h_{vcv} - h_{CO})T_{c_n} + (h_{vcv} + h_{CO})T_V$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rE}} \frac{d(T_{rE} - T_{rE}^*)}{dt} = (-h_{vEV} + h_{CrE} - h_{CO1})T_{rE} - h_{CrE}T_{rI} + (h_{vEV} + h_{CO1})T_V$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rI}} \frac{d(T_{rI} - T_{rI}^*)}{dt} = -h_{CrI}T_{rE} + (h_{CrI} - h_{vriM} + h_{CO2})T_{rI} + (h_{vriM} - h_{CO2})T_m$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{re}} \frac{d(T_{re} - T_{re}^*)}{dt} = (h_{Cre} - h_{vre} - h_{CO3})T_{re} - h_{Cre}T_{ri} + (h_{vre} + h_{CO3})T_V$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}} \frac{d(T_{ri} - T_{ri}^*)}{dt} = -h_{Cri}T_{re} + (h_{Cri} - h_{vrim})T_{ri} + h_{vrim}T_m$$

$$\frac{Mc_m Cp_m}{A_m} \frac{d(T_{m_x} - T_{m_x}^*)}{dt} = h_{vrim}T_{ri} - (h_{vrim} + m_c Cp_f)T_m + m_c Cp_f T_f$$

2°Etapas

$$\frac{Mc_X Cp_c}{A_X} \frac{T_{c_x}}{dt} = (-h_{vca} + h_{CC})T_{c_x} - h_{CC}T_{c_n} + h_{vca}T_a + \frac{Mc_X Cp_c}{A_X} \frac{T_{c_x}^*}{dt}$$

$$\frac{Mc_n Cp_c}{2A_n} \frac{T_{c_n}}{dt} = -h_{CC}T_{c_x} + (h_{CC} - h_{vcv} - h_{CO})T_{c_n} + (h_{vcv} + h_{CO})T_V + \frac{Mc_n Cp_c}{2A_n} \frac{T_{c_n}^*}{dt}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rE}} \frac{T_{rE}}{dt} = (-h_{vEV} + h_{CrE} - h_{CO1})T_{rE} - h_{CrE}T_{rI} + (h_{vEV} + h_{CO1})T_V + \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rE}} \frac{T_{rE}^*}{dt}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rI}} \frac{T_{rI}}{dt} = -h_{CrI}T_{rE} + (h_{CrI} - h_{vriM} + h_{CO2})T_{rI} + (h_{vriM} - h_{CO2})T_m + \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rI}} \frac{T_{rI}^*}{dt}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{re}} \frac{T_{re}}{dt} = (h_{Cre} - h_{vre} - h_{CO3})T_{re} - h_{Cre}T_{ri} + (h_{vre} + h_{CO3})T_V + \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{re}} \frac{T_{re}^*}{dt}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}} \frac{Tri_x}{dt} = -h_{Cri} T_{re} + (h_{Cri} - h_{vrim}) T_{ri} + h_{vrim} T_m + \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}} \frac{Tri_x^*}{dt}$$

$$\frac{Mc_m Cp_m}{A_m} \frac{Tm_x}{dt} = h_{vrim} T_{ri} - (h_{vrim} + m_c Cp_f) T_m + m_c Cp_f T_f + \frac{Mc_m Cp_m}{A_m} \frac{Tm_x^*}{dt}$$

3°Etapas

$$\frac{Mc_X Cp_c}{A_X} \frac{Tc_x}{\Delta t} - (-h_{vca} + h_{CC}) T_{C_x} + h_{CC} T_{C_n} = h_{vca} T_a + \frac{Mc_X Cp_c}{A_X} \frac{Tc_x^*}{\Delta t}$$

$$\frac{Mc_n Cp_c}{2A_n} \frac{Tc_n}{\Delta t} + h_{CC} T_{C_x} - (h_{CC} - h_{vcV} - h_{CO}) T_{C_n} = (h_{vcV} + h_{CO}) T_V + \frac{Mc_n Cp_c}{2A_n} \frac{Tc_n^*}{dt}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rE}} \frac{TrE}{\Delta t} - (-h_{vEV} + h_{CrE} - h_{CO1}) T_{rE} + h_{CrE} T_{rI} = (h_{vEV} + h_{CO1}) T_V + \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rE}} \frac{TrE^*}{\Delta t}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rI}} \frac{TrI}{\Delta t} + h_{CrI} T_{rE} - (h_{CrI} - h_{vrim} + h_{CO2}) T_{rI} - (h_{vrim} - h_{CO2}) T_m = \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rI}} \frac{TrI^*}{\Delta t}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rE}} \frac{Tre}{\Delta t} - (h_{Cre} - h_{vre} - h_{CO3}) T_{re} + h_{Cre} T_{ri} = (h_{vre} + h_{CO3}) T_V + \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{re}} \frac{Tre^*}{\Delta t}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}} \frac{Tri_x}{\Delta t} + h_{Cri} T_{re} - (h_{Cri} - h_{vrim}) T_{ri} - h_{vrim} T_m = \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}} \frac{Tri_x^*}{\Delta t}$$

$$\frac{Mc_m Cp_m}{A_m} \frac{Tm_x}{\Delta t} - h_{vrim} T_{ri} + (h_{vrim} + m_c Cp_f) T_m = m_c Cp_f T_f + \frac{Mc_m Cp_m}{A_m} \frac{Tm_x^*}{\Delta t}$$

4°Etapas

$$\frac{Mc_X Cp_c}{A_X} \frac{Tc_x^*}{\Delta t} + h_{vca} T_a = \frac{Mc_X Cp_c}{A_X} \frac{Tc_x}{\Delta t} - (-h_{vca} + h_{CC}) T_{C_x} + h_{CC} T_{C_n}$$

$$\frac{Mc_n Cp_c}{2A_n} \frac{Tc_n^*}{dt} + (h_{vcV} + h_{CO}) T_V = \frac{Mc_n Cp_c}{2A_n} \frac{Tc_n}{\Delta t} + h_{CC} T_{C_x} - (h_{CC} - h_{vcV} - h_{CO}) T_{C_n}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rE}} \frac{TrE^*}{\Delta t} + (h_{vEV} + h_{CO1}) T_V = \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rE}} \frac{TrE}{\Delta t} - (-h_{vEV} + h_{CrE} - h_{CO1}) T_{rE} + h_{CrE} T_{rI}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rI}} \frac{TrI^*}{\Delta t} = \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rI}} \frac{TrI}{\Delta t} + h_{CrI} T_{rE} - (h_{CrI} - h_{vrim} + h_{CO2}) T_{rI} - (h_{vrim} - h_{CO2}) T_m$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{rE}} \frac{Tre^*}{\Delta t} + (h_{vre} + h_{CO3}) T_V = \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{re}} \frac{Tre}{\Delta t} - (h_{Cre} - h_{vre} - h_{CO3}) T_{re} + h_{Cre} T_{ri}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}} \frac{Tri_x^*}{\Delta t} = \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}} \frac{Tri_x}{\Delta t} + h_{Cri} T_{re} - (h_{Cri} - h_{vrim}) T_{ri} - h_{vrim} T_m$$

$$\frac{Mc_m Cp_m}{A_m} \frac{Tm_x^*}{\Delta t} + m_c Cp_f T_f = \frac{Mc_m Cp_m}{A_m} \frac{Tm_x}{\Delta t} - h_{vrim} T_{ri} + (h_{vrim} + m_c Cp_f) T_m$$

5°Etapas

$$\frac{Mc_x Cp_c T_{Cx}^*}{2A_x \Delta t} + h_{vca} T_a = \left(\frac{Mc_x Cp_c}{2A_x \Delta t} + h_{vca} - h_{CC} \right) T_{Cx} + h_{CC} T_{Cn}$$

$$\frac{Mc_n Cp_c T_{Cn}^*}{2A_n \Delta t} + (h_{vcv} + h_{CO}) T_V = h_{CC} T_{Cx} + \left(\frac{Mc_n Cp_c}{2A_n \Delta t} - h_{CC} + h_{vcv} + h_{CO} \right) T_{Cn}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R T_{RE}^*}{2A_{RE} \Delta t} + (h_{vEV} + h_{CO1}) T_V = \left(\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{RE} \Delta t} + h_{vEV} - h_{CrE} + h_{CO1} \right) T_{RE} + h_{CrE} T_{RI}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R T_{RI}^*}{2A_{RI} \Delta t} = \left(\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{RI} \Delta t} - h_{CrI} + h_{vrim} - h_{CO2} \right) T_{RI} - (h_{vrim} - h_{CO2}) T_m + h_{CrI} T_{RE}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R T_{RE}^*}{2A_{RE} \Delta t} + (h_{vre} + h_{CO3}) T_V = \left(\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{RE} \Delta t} + h_{vre} + h_{CO3} - h_{Cre} \right) T_{RE} + h_{Cre} T_{RI}$$

$$\frac{Mc_R Cp_R T_{RI}^*}{2A_{RI} \Delta t} = h_{CrI} T_{RE} + \left(\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{RI} \Delta t} - h_{CrI} + h_{vrim} \right) T_{RI} - h_{vrim} T_m$$

$$\frac{Mc_m Cp_m T_m^*}{A_m \Delta t} + m_c C_{Pf} T_f = - h_{vrim} T_{RI} + \left(\frac{Mc_m Cp_m}{A_m \Delta t} + h_{vrim} + m_c C_{Pf} \right) T_m$$

6°Etapas

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} & A_{17} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} & A_{27} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} & A_{37} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} & A_{47} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} & A_{57} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} & A_{67} \\ A_{71} & A_{72} & A_{73} & A_{74} & A_{75} & A_{76} & A_{77} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{Cx} \\ T_{Cn} \\ T_{RE} \\ T_{RI} \\ T_{re} \\ T_{ri} \\ T_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \end{pmatrix}$$

- $A_{11} = \frac{Mc_x Cp_c}{2A_x \Delta t} + h_{vca} - h_{CC}$
- $A_{12} = h_{CC}$
- $A_{13} = A_{14} = A_{15} = A_{16} = A_{17} = 0$

- $A_{21} = h_{CC}$
- $A_{22} = \frac{Mc_n Cp_c}{2A_n \Delta t} - h_{CC} + h_{vcv} + h_{CO}$
- $A_{23} = A_{24} = A_{25} = A_{26} = A_{27} = 0$

- $A_{31} = A_{32} = A_{35} = A_{36} = A_{37} = 0$
- $A_{33} = h_{vEV} - h_{CrE} + h_{CO1} + \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{RE} \Delta t}$
- $A_{34} = h_{CrE}$

- $A_{41} = A_{42} = A_{45} = A_{46} = 0$
- $A_{43} = h_{Cri}$
- $A_{44} = \left(\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}\Delta t} - h_{Cri} + h_{vrim} - h_{CO2} \right)$
- $A_{47} = -h_{vrim} + h_{CO2}$

- $A_{51} = A_{52} = A_{53} = A_{54} = A_{57} = 0$
- $A_{55} = \left(\frac{Mc_R Cp_R}{2A_{re}\Delta t} - h_{Cre} + h_{vre} + h_{CO3} \right)$
- $A_{56} = h_{Cre}$

- $A_{61} = A_{62} = A_{63} = A_{64} = A_{67} = 0$
- $A_{65} = h_{Cri}$
- $A_{66} = \frac{Mc_R Cp_R}{2A_{ri}\Delta t} + h_{vrim} - h_{Cri}$
- $A_{67} = -h_{vrim}$

- $A_{71} = A_{72} = A_{73} = A_{74} = A_{75} = 0$
- $A_{76} = -h_{vrim}$
- $A_{77} = h_{vrim} + m_c C_{Pf} + \frac{Mc_m Cp_m}{A_m \Delta t}$

$$B_1 = \frac{Mc_x Cp_c Tc_x^*}{2A_x \Delta t} + h_{vca} T_a$$

$$B_2 = \frac{Mc_n Cp_c Tc_n^*}{2A_n \Delta t} + (h_{vcv} + h_{CO}) T_V$$

$$B_3 = \frac{Mc_R Cp_R TrE^*}{2A_{rE} \Delta t} + (h_{vEV} + h_{CO1}) T_V$$

$$B_4 = \frac{Mc_R Cp_R Tri^*}{2A_{ri} \Delta t}$$

$$B_5 = \frac{Mc_R Cp_R Tre^*}{2A_{re} \Delta t} + (h_{vre} + h_{CO3}) T_V$$

$$B_6 = \frac{Mc_R Cp_R Tri_x^*}{2A_{ri} \Delta t}$$

$$B_7 = \frac{Mc_m Cp_m Tm_x^*}{A_m \Delta t} + m_c C_{Pf} T_f$$

2-6-Programmation par le logiciel Matlab

EN COURS

III-Résultats :

3-1-savoirs scientifiques

La valeur qui a obtenu par le calcul par la méthode différentielle finie est plus exactes par rapport à la valeur de température obtenue à l'aide de la méthode de RUNGE KUTTA 4.

La méthode de RUNGE KUTTA donne la valeur précise pour l'expérience

On peut remarquer que notre programmation informatique par le logiciel matlab pour résoudre le système d'équation est en cours

3-2-savoirs locaux,

Pendant l'application théorique que je fais, on sait que la valeur de la température du cône dans les différents réseaux coniques n'est pas la même dans les différents endroits, c'est-à-dire que le degré d'éthanol obtenu à chaque endroit que l'on déroulera l'expérience ne sont pas égaux.

En fait, le local qui a une température trop élevée a obtenu un meilleur degré d'éthanol par rapport à l'autre qui a la température inférieure.

3-3- savoirs techniques

Pour la condensation, on peut atteindre une meilleure qualité d'éthanol en utilisant le réfrigérant Co-courant par rapport au réfrigérant contre-courant vu son mode de fonctionnement.

3-4-les résultats obtenus par rapport

Par calcul théorique, on obtient le degré d'éthanol à 96°C ainsi que les différences de température à travers les surfaces coniques

3-5-résultats attendus,

La gestion de temps en utilisant la technologie de l'informatique par le logiciel VISUAL BASIC. Ainsi, le point d'azéotrope

3-6-les résultats non attendus mais obtenus.

IV-Acquis personnels

4-1 pratiques relationnelles,

La fabrication du prototype est réalisée par des différentes entités du lycée technique professionnel Fianarantsoa comme les étudiants, les professeurs ainsi que les ingénieurs dans toute spécialité

4-2 développement personnel,

L'éthanol que l'on peut distiller permet d'utiliser comme carburant d'une moto scooter JOG 125, d'après la recherche particulière. Cela répond le but des nations unies pour la protection de l'environnement.

4-3 ouvertures professionnelles

Au monde professionnel, le lycée technique professionnel propose une idée aux étudiants chercheurs de l'université de Fianarantsoa un partenariat sur fabrication n ainsi que son multiplication de leur prototype

V-Perspective :

5-1 les points à approfondir davantage,

On peut approfondir la programmation en informatique à cause de sa difficulté pour la résolution du système ainsi que l'application pratique pendant l'expérience.

5-2 Autres domaines concernés par le sujet

Ce sujet concerne plusieurs domaines comme l'ouvrage métallique, la fabrication mécanique ; le physique, la chimie' électricité

1-PRESSION DE LA VAPEUR

$$\log (P_{\text{sat}}) = A - B / (T+C) :$$

$$P_{\text{sat}} [\text{torr}], T [C] \quad \text{torr} \times 133.22 = \text{Pa}$$

TEMPERATURE	ETHANOL KPa	EAU KPa
90	158.1	70
80	108.3	47.2
70	72.2	31.1
60	46.9	19.9
50	29.5	12.3
40	17.9	7.4
30	10.4	4.2
20	5.8	2.3
10	3.1	1.2
5	2.2	0.9
0	1.6	0.6

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Point d'ébullition : 79°C
 Point de fusion : -117°C) : 0.8
 Solubilité dans l'eau : miscible
 Tension de vapeur à 20°C : 5.8 kPa
 Densité de vapeur relative (air = 1) : 1.6

Densité relative du mélange air/vapeur à 20°C (air = 1) : 1.03
 Point d'éclair : 13°C c.f.
 Température d'auto-inflammation : 363°C
 Limites d'explosivité en volume % dans l'air : 3.3-19
 Coefficient de partage éthanol/eau tel que log Poe : -0.32

Températures de changement d'état

Le tableau suivant regroupe les températures de changement d'état de quelques alcools courants.

Nom de l'alcool	TF (°C)	TE (°C)	Densité <i>d</i>

méthanol	\square 97	64,7	0,792
éthanol	\square 114	78,3	0,789
propan-1-ol	\square 126	97,2	0,804
propan-2-ol	\square 88	82,3	0,786
butan-1-ol	-90	117,7	0,810
2-méthylpropan-2-ol	2	82,5	0,789
hexan-1-ol	\square 52	155,8	0,820
dodécanol	24	259	0,831

Ces constantes physiques sont beaucoup plus élevées que celle des hydrocarbures de même masse molaire.

Composé	propane ($M = 44 \text{ g.mol}^{-1}$)	éthanol ($M = 46 \text{ g.mol}^{-1}$)
Température d'ébullition	\square 42 °C	78,5 °C

Cela s'explique par l'association des molécules d'alcool par liaison hydrogène. Le dessin ci-dessous schématise un exemple d'association dans le cas du méthanol

2-Données de base pour un mélange binaire eau-éthanol

a-Propriétés physiques

Valeur	Unités	Éthanol	Eau	Référence
Densité liquide	g/ml	0.789	1.000	Perry 3.2
Densité de la vapeur à 90°C	g/ml	0.0015	0.001	PV=nRT
Poids moléculaire	g/mol	46.0634	18.0152	Perry 3.2
Capacité de chaleur liquide	J/gK	2.845	4.184	Perry 3-183
Chaleur de vaporisation	J/g	855	2260	Perry 3-178
Pression de la vapeur à 90°C	torr	1187	525	Perry 13-4
Viscosité du liquide	kg/ms	0.00037	0.00032	Perry 3-252

Viscosité de la vapeur	kg/ms	108x10 ⁻⁷	125x10 ⁻⁷	Perry 3-311
Tension superficielle à 20°C	mN/m	22.39	72.75	Kay et Laby
Diffusibilité de la vapeur éthanol/eau	m ² /s	?		?
Diffusibilité de la vapeur Éthanol/air	m ² /s	102 x 10 ⁻⁷		Perry 3-319
Diffusibilité du liquide éthanol/eau	m ² /s	128 x 10 ⁻¹¹		Perry 3-319

Perry = Perry's Chemical Engineers' Handbook, 6th Ed, 1987, Robert H. Perry & Don Green
 Kaye & Laby = Tables of Physical & Chemical Constants, Kaye & Laby, 16th Ed, 1995

3-SEPARATION DES CONSTITUANTS DE L'ETHANOL

L'eau et de l'éthanol qui forment un azéotrope c'est-à-dire un mélange possédant sa propre température d'ébullition. Lors du chauffage, le composé arrivant en tête de colonne vers 78,1 °C, est un mélange contenant environ 95% d'éthanol.

TEMPERATURE	CONSTITUANTS
78,1 °C	95% éthanol
Éthanol	

Propriétés physiques

T° fusion	-117 °C ^[1]
T° ébullition	79 °C ^[1]
Solubilité	dans l'eau : miscible ^[1] , Complète dans les solvants polaires et apolaires (acétone, éther diéthylique)
Masse volumique	D_4^{20} 0,789 ^[5]
T° d'auto-inflammation	423 à 425 °C; 363 °C (selon les sources) ^[5]
Point d'éclair	coupelle fermée : 13 °C pur 17 °C 95 %vol. 21 °C 70 %vol. 49 °C 10 %vol.

Géométrie et orientation de la paroi	Coefficient de convection Laminaire h_c (W/m.°C)	Dimension caractéristique (m)
--------------------------------------	--	-------------------------------

62 °C 5 %vol ^[5].

Limites d'explosivité dans l'air
 Inférieure : 3,3 %vol ^[1]
 Supérieure : 19 %vol ^[1]

Pression de vapeur saturante
 à 20 °C : 5,8 kPa ^[1]

Viscosité dynamique
 1,20×10⁻³ Pa·s à 20 °C

Point critique
 240,85 °C, 6,14 MPa, 0,168 l·mol⁻¹^[7]

Vitesse du son
 1 162 m·s⁻¹ à 20 °C ^[8]

Thermochimie

$S^0_{\text{liquide, 1 bar}}$
 159,86 J·mol⁻¹·K^[9]

$\Delta_f H^0_{\text{gaz}}$
 -235,3 kJ·mol⁻¹

$\Delta_f H^0_{\text{liquide}}$
 -77,0 kJ·mol⁻¹^[10]

C_p
 111 J·K⁻¹·mol⁻¹

Propriétés électroniques

1^{re} énergie d'ionisation
 10,43 ± 0,05 eV (gaz)^[12]

II-ECHANGE DE CHALEUR

1-Etude de chaleur par convection

1-1-Flux échangée par convection à l'extérieur de cylindre et l' air

1-1-1-Coefficient d'échange pour l'air en convection naturelle (régime laminaire)

Cylindre verticale dont la hauteur est inférieure à 30cm

$$h_{ca}^v = 1,42 \left(\frac{\Delta T}{H} \right)^{0,25}$$

H : Hauteur du cylindre

Cylindre verticale dont la hauteur est supérieure à 30cm

$$h_{ca}^v = 1,78 \Delta T^{0,25}$$

$$h_{ca}^v = 1,78 (T_s - T_a)^{0,25}$$

ΔT : écart de la température paroi du cylindre et air

b-Calcul de Flux Thermique Q

$$Q_{ca}^v = h_{ca}^v (T_s - T_a) \cdot S$$

Avec

$$h_{ca}^v = 1,78 (T_s - T_a)^{0,25} \text{ et } S = 2\pi rH$$

$$\text{D'où : } Q_{ca}^v = 1,78 \times 2\pi rH (T_s - T_a)^{\frac{5}{4}}$$

$$Q_{ca}^v = 1,78 \times 2\pi rH (T_s - T_a)^{\frac{5}{4}}$$

1-1-2-Flux échangée par convection à l'intérieur de cylindre et la vapeur

a-Coefficient d'échange par convection à l'intérieur de cylindre et la vapeur h_{cv}^v

$$h_{cv}^v = \frac{\lambda}{D} \left(\frac{Dv\rho}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)^{0,4} \quad D : \text{Diamètre de cylindre}$$

b-Calcul de Flux Thermique Q_{cv}^v

$$Q_{cv}^v = h_{cv}^v (T_c - T_v) \cdot S$$

Avec

$$h_{cv}^v = 0,023 \frac{\lambda}{D} \left(\frac{Dv\rho}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)^{0,4} \text{ et } S = 2\pi rH$$

$$\text{D'où : } Q_{cv}^v = 0,023 \frac{\lambda}{D} \left(\frac{Dv\rho}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)^{0,4} (T_c - T_v) 2\pi rH$$

ETUDE DE CHALEUR PAR CONDUCTION

1-Flux échangée par conduction au niveau de cylindre Q_C^c

D'après la Loi de FOURRIER : Densité de flux à travers le cylindre T

$$Q_C^c = -\lambda S \frac{dT}{dr}$$

S : surface latérale du cylindre de rayon r et de longueur L soit : $S=2r\pi L$

$$Q_C^c = -\lambda 2r\pi L \frac{dT}{dr}$$

Q_C^c est constant à travers le cylindre coaxial

Comme Φ est constant à travers tout cylindre coaxial de rayon r compris entre r_1 et r_2 , l'équation précédente peut donc s'intégrer de l'intérieur (vapeur) à l'extérieur (air) du cylindre de la manière suivante :

$$Q_C^c = -\lambda 2r\pi L \frac{dT}{dr}$$

$$\int_{T_v}^{T_a} dT = \frac{Q_C^c}{2\lambda\pi L} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}; \quad T_a - T_v = \frac{Q_C^c}{2\lambda\pi L} (\ln r_2 - \ln r_1) = \frac{-Q_C^c}{2\lambda\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

On en déduit l'expression du flux thermique $Q_C^c = \frac{2\lambda\pi L}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (T_v - T_a)$

$$Q_C^c = \frac{2\lambda\pi L}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (T_v - T_a)$$

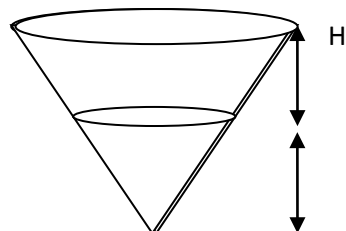
2-Flux échangée par conduction du rectificateur conique supérieur Q_R^c

D'après la Loi de FOURRIER : Densité de flux à travers rectificateur conique supérieur

V_1 =volume du cône $V_1 = \frac{1}{3}(\text{Aire de base}) \times \text{hauteurs}$

V_1 =volume du cône $V_1 = \frac{1}{3}(\pi R^2) \times H$

S_1 =Surface du cône $S_1 = \frac{2}{3}(\pi R) \times H$



H

$V_2 = \text{volume du c\^one}$ $V_2 = \frac{1}{3}(\text{Aire de base}) \times \text{hauteurs}$

$S_2 = \text{Surface du c\^one}$ $S_2 = \frac{2}{3}(\pi r) \times h$



$$Q_R^C = -\lambda S_1 \frac{dT}{dr}$$

S : surface latérale du rectificateur conique de rayon r et hauteur H soit : $S_1 = \frac{2}{3}(\pi R) \times H$

$$Q_R^C = -\frac{2}{3} \lambda \pi R H \frac{dT}{dr}$$

Q_R^C est constant à travers le rectificateur conique coaxial

Comme Q_R^C est constant à travers tout rectificateur conique coaxial de rayon r compris entre r_1 et r_2 , l'équation précédente peut donc s'intégrer de l'intérieur (mélange) à l'extérieur (vapeur) du rectificateur conique de la manière suivante :

$$Q_R^C = -\frac{2}{3} \lambda \pi R H \frac{dT}{dr}$$

$$\int_{T_m}^{T_v} dT = \frac{Q_R^C}{-\frac{2}{3} \lambda \pi H} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r}; \quad T_v - T_m = \frac{Q_R^C}{-\frac{2}{3} \lambda \pi H} (\ln R_2 - \ln R_1) = \frac{-Q_R^C}{-\frac{2}{3} \lambda \pi H} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

On en déduit l'expression du flux thermique $Q_R^C = \frac{\frac{2}{3} \lambda \pi H}{\ln \frac{R_2}{R_1}} (T_m - T_v)$

$$Q_R^C = \frac{\frac{2}{3} \lambda \pi H}{\ln \frac{R_2}{R_1}} (T_m - T_v)$$

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- [1] Michimasa Kishimoto, 'J* yuko nitta,' yuya kamoshita,' takahiro suzuki,'and ken-ichi suga2 (1997). Ethanol Production in an Immobilized Cell Reactor Coupled with the Recycling of Effluent from the Bottom of a Distillation Column. Journal of fermentation and bioengineering. Vol. 84, No. 5, 449-454
- [2] Christopher Enweremadu a, Adekoko Waheed a, Jeremiah Ojediran .(2009). Parametric study of an ethanol–water distillation column with direct vapour recompression heat pump Energy for Sustainable Development 13 ; 96–105
- [3] N. Vorayosa, T. Kiatsiriroatb,_, N. Vorayosb (2006) Performance analysis of solar ethanol distillation Renewable Energy Science Direct Vol (31) 2543–2554
- [4] Albet, J. ; LeLann, J. M. ; Joulia ; X.Koelnet, B. (1994); Development and trends in simulation of batch distillation columns., Chem. Eng. J., , 54(2), 95-106
- [5] Barbosa D., Doherty M.F. (1998); Design and minimum-reflux calculations for single-feed multicomponent reactive distillation columns., Chemical. Enge. Sci., Vol(43),1523-1537
- [6] Dragomir, R. M. ; Jobson, M. ; Conceptual design of single-feed hybrid reactive distillation columns, Chem. Eng. Sci.,(2005), 60, 4377 -4395
- [7] Doherty, M. F. ; Buzad, G. ; (1992), Reactive distillation by design., Trans. I. Chem. E., 70(A), 448-458
- [8] Espinosa, J. ; Aguirre, P. ; Perez, G. (1996), ; Some aspects in the design of multicomponent reactive distillation columns with a reacting core : mixtures containing inerts., Ind. Eng. Chem. Res. 35, 4537-4549
- [9] Dragomir, R. M. ; Jobson, M. (2005),; Conceptual design of single-feed hybrid reactive distillation columns, Chem. Eng. Sci., 60, 4377 -4395
- [10] Stein, E. ; Kienle, A. ; Sundmacher, K.(2000) ;Separation using coupled reactive distillation columns., Chem. Eng68-72.