

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique*

*UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES*  
*FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE*



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

Laboratoire de Fiabilité des Equipements Pétroliers et Matériaux

**MEMOIRE**

**DE**

**MAGISTER**

*Spécialité : Génie Mécanique*

*Option : Fiabilité et  
Maintenance  
Industrielle*

Présenté par

**HARKAT YAMINA**

---

**Diagnostic de l'encrassement par monitoring des paramètres de  
service aux bornes d'un échangeur de chaleur**

---

**JURY**

B. Hamada.	Professeur	UMBB	<b>Président</b>
M. Kessal.	Maître de conférence	UMBB	<b>Examineur</b>
H. Mimoun.	Maître de conférence	UMBB	<b>Examineur</b>
El-Bahi	Maître de conférence	USTHB	<b>Examineur</b>
N. Zemmour.	Maître de conférence	UMBB	<b>Rapporteur</b>

**BOUMERDES 2007**

## ملخص:

إن اتساخ أجهزة التبريد الحراري هو مشكل اقتصادي عانت منه المصانع منذ القدم، هذا المشكل عموما ينضح بفقدان الجودة الصناعية، مراقبة هذه الظاهرة تتم بطريقتين:

- طريقة مباشرة وتكون بقياس مقاييس العمل (حرارة، الضغط) عند كل حدود الجهاز.

- عن طريق استعمال مسبار مخصص لقياس غلاظة الوسخ داخل جهاز تبريد الحرارة.

هذه المراقبة تسمح بتعيين الوقت المثالي لتوقيف الجهاز وذلك لتنظيفه. تحديد مدة النظافة تعتمد على تقديرات واعتبارات تقنية اقتصادية. في عملنا هذا، وبالاتماد على معطيات تخص الأجهزة لتبريد الحرارة لوحدة تصفية البترول الخام لمصفاة البترول لولاية الجزائر قد وضع معادلات لمشكل الاتساخ مع معرفة مقاومة الاتساخ بدلالة الزمن لهذه الأجهزة. تقدير التكاليف لهذا المشكل مع تحليل إجمالي لمعطيات ومعالجتها، قد أدت إلى تحديد المدة المثالية لتشغيل هذه الأجهزة قبل تنظيفها. النظرة الاحتمالية لهذا المشكل هو ضمن وسائل المتوقعة للصيانة، في عملنا هذا وبالاتماد على معطيات المخابر سمح بتحديد نموذج احتمالي قد يساعد في استعماله من طرف المستخدم لهذه الأجهزة للتصدي للاتساخ الحرج بدلالة الزمن، وذلك بتأثير على العوامل الخارجية. باستعمال هذه النماذج يمكن التنبؤ باحتمال قوي بظهور مقاومة حرجة للاتساخ.

## Abstract

The fouling in heat exchangers is an economic problem which has been damaging the industries for a long time. It is generally expressed by the important loss of performance; the control of this phenomenon may forecast the right time for cleaning the equipment, this control may be made by two ways:

- By direct measuring of functioning parameters at the boundaries of heat exchangers;

- By using the sensors of measuring the fouling thickness.

The technical-economic considerations may help to set the schedule of cleaning. In our work the data of heat exchangers that is used in a crude oil preheat train of refineries of Algiers may plot the determinist models of fouling: to know the fouling resistance in terms of time. The estimation of the cost and the data processing may plan the optimal period of work of heat exchangers studies before cleaning.

The probabilistic approach of this problem is a help for the maintenance, in our work, the laboratory data may determine the probabilistic models which can be used by workers of the equipment to help them to make up the critical resistance in terms of time: to act on the external factors. Using these models, it allows to avoid the highest probabilistic to show the critical resistance of fouling.

## Résumé

L'encrassement dans les échangeurs de chaleur est un problème économique qui tourmente les industries depuis longtemps. Il se traduit par une perte de performances assez importante, le contrôle de ce phénomène a pour but de prévoir le bon moment pour le nettoyage des équipements, ce contrôle peut être fait par deux moyens:

- Par mesure des paramètres de fonctionnement aux bornes d'échangeurs de chaleur;
- En utilisant les capteurs de mesure de l'épaisseur de l'encrassement.

La considération technico-économiques aidera à établir un programme de nettoyage. Dans notre travail, les données de paramètre de service d'échangeurs de chaleur de circuit de préchauffe de l'unité de distillation du pétrole brut de la raffineries d'Alger permet d'analyser les modèles déterministes de l'encrassement: à savoir la résistance de l'encrassement en fonction du de temps. L'estimation du coût du à l'encrassement permet de planifier la période optimale de fonctionnement des échangeurs de chaleur études avant de le nettoyer.

L'approche probabiliste de ce problème est une aide pour le maintien, dans notre travail , les données de laboratoire permet de déterminer les modèles probabilistes qui peuvent être utilisés par les utilisateurs de l'équipement pour les aider à faire la critique de résistance en termes de temps: d'agir sur les facteurs externes. L'utilisation de ces modèles, il permet d'éviter la plus haute probabilité d'atteindre la résistance critique d'encrassement.

# **Remerciements**

## Remerciements

Dans mon imaginaire, l'écriture de cette page était loin de représenter autant de choses ; la joie immense d'avoir mené ce projet à bien mais aussi la tristesse qui cache toujours derrière le mot *Fin*.

Rien n'aurait été possible seule. Par cette simple phrase, cette page prend ici tout son sens et la peur d'oublier quelqu'un. A tout ceux là, *MERCI*.

J'exprime toute ma gratitude à *Monsieur ZEMMOUR* pour avoir accepté d'encadrer et de co- diriger ce travail. Pour m'avoir supporté dans les moments de doute comme dans les moments d'allégresse, pour son enthousiasme permanent et ses implications tant humaines que scientifiques ainsi que pour la confiance qu'il a bien voulu m'accorder tout au long de ce travail...*merci*

Je tiens à exprimer, en premier lieu, mes plus vifs remerciements à *Monsieur HAMADA*, de m'avoir aidé pour continuer mes études et sans lui j'aurai jamais cette chance et pour avoir accepté de présider ce jury.

Je tiens à remercier vivement *Monsieur SMATI* pour ses qualités humaines et scientifiques en toute modestie.

Je remercie aussi *Monsieur MIMOUN* pour ses qualités humaines et scientifiques ainsi que pour ses précieuse remarques.

Je remercie aussi *Monsieur AOUACHRIA et Monsieur KESSEL* pour ses qualités humaines et scientifiques.

Mon plaisir n'est pas moins grand à remercier *Monsieur YOUNSI* par sa précieuse aide, sa disponibilité, sa compétence et sa bonne humeur ainsi que pour ses remarques constructives sur ce travail.

Je remercie *Monsieur MIMOUN, Monsieur KESSEL et Monsieur EL BAH* qui ont aimablement accepté de faire partie du jury.

Je tenais aussi à remercier *Monsieur MAHDI* ingénieur en raffinage à la raffinerie d'Alger de m'avoir bien orienté et aidé.

J'adresse mes profondes gratitudee au personnel de la raffinerie d'Alger qui m'ont aidée, je cite : le personnel de la formation, de la fabrication, du service technique et du laboratoire.

Je tiens à remercier plus particulièrement :

- *Monsieur CHOCRANE* chef service de chaudronnerie pour ses conseils, ô combien précieux qu'il m'a accordé, encore merci.

- *Monsieur SOUAR* directeur des études de l'université de SAIDA, pour ses qualités d'écoute, sa disponibilité et ses précieuses remarques.

- *Monsieur BEN AZOUZ* pour ses conseils et pour ses suggestions.

- *Madame BENAMEUR AICHA* de l'université de MAROC et *Madame REMMAS YAMINA* pour ses conseils précieux et pour ses suggestions.

Parce que le mémoire est aussi une grande aventure humaine, je tiens à remercier les nombreuses personnes que j'ai côtoyées, *OUARDIA, ABD RABI, HAMADACHE.KHALED, MOUSSAOUI, HAMIDI, OBACHA, AZZIDINE* et *FATEH*.

Enfin les mots les plus forts étant simples, j'adresse ici toute mon affection à ma mère, mon père, mes sœurs, mes frères et *SORAYA*, leur confiance, leur tendresse, leur amour n'ont cessé de me porter et de me guider, je vous aime.

# **Tables des Matières**

# TABLES DE MATIERES

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>3</b>
-----------------------------------	----------

## **CHAPITRE I : Description de la raffinerie d'Alger**

<b>I.1 Historique.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2 Raffinerie d'Alger.....</b>	<b>5</b>
<b>I .2.1 Description De l'unité De Distillation Atmosphérique.....</b>	<b>8</b>
<b>I .2.2 Circuit De Préchauffe De Brut.....</b>	<b>8</b>
<b>I .2.3 Notions Sur Le Dessalage De Brut .....</b>	<b>10</b>
<b>I .2.4 Dessalage Electrostatique .....</b>	<b>11</b>

## **CHAPITRE II : Echangeurs de chaleur**

<b>II .1 Notions sur les échangeurs.....</b>	<b>14</b>
<b>II.1.1 Modes d'écoulement des deux fluides.....</b>	<b>15</b>
<b>A/ Ecoulement co-courants .....</b>	<b>15</b>
<b>B/ Ecoulement a contre courants.....</b>	<b>16</b>
<b>C/ Ecoulement des fluides croisés avec ou sans brassage .....</b>	<b>16</b>
<b>II .1.2 Différents types d'échangeurs de chaleur .....</b>	<b>17</b>
<b>A/ Echangeurs tubulaires .....</b>	<b>18</b>
<b>B/ Echangeurs a plaques .....</b>	<b>21</b>
<b>C/ Echangeurs particuliers.....</b>	<b>23</b>
<b>II.1.3 Coefficient de transfert de chaleur.....</b>	<b>24</b>
<b>A/ Coefficients de transfert de chaleur locaux et globaux.....</b>	<b>26</b>
<b>B/ Transfert de chaleur sous forme adimensionnelle .....</b>	<b>27</b>
<b>II .2 Méthodes de calcul .....</b>	<b>29</b>
<b>II .2.1 Méthode analytique.....</b>	<b>30</b>
<b>II .2.2 Méthode numérique.....</b>	<b>32</b>
<b>II .3 Considération sur le calcul d'un appareil a faisceau et calandre .....</b>	<b>33</b>



## CHAPITRE III : Encrassement

III.1 Aspect économique lié a l'encrassement .....	35
III.1.1 Coûts liés a la conception de l'échangeur.....	36
III.1.2 Coûts liés au fonctionnement de l'échangeur.....	36
III.1.3 Coûts liés a l'arrêt de l'installation.....	37
III.2 Classification : Différents types d'encrassement.....	37
III.2.1 Encrassement particulaire.....	39
III.2.2 Entartrage.....	39
III.2.3 Corrosion .....	40
III.2.4 Encrassement biologique .....	41
III.2.5 Encrassement par réaction chimique.....	42
III.2.6 Encrassement par solidification .....	42
III .3 Apparition et développement de l'encrassement .....	42
III.3.1 Mécanisme de l'encrassement.....	42
III.3.2 Transport des particules .....	43
III.4 Facteurs favorisant l'encrassement .....	44
III.4.1 Zones stagnantes.....	44
III.4.2 Effet de la vitesse.....	44
III.4.3 Effet de la température.....	45
III.4.4 Etat de surface, rugosité.....	45
III.4.5 Matériau de construction, corrosion .....	45
III.5 Prévention de l'encrassement dans les échangeurs .....	46
III.5.1 Pendant la phase de dimensionnement.....	47
A/ Sensibilité a l'encrassement des divers types d'échangeurs .....	47
B/ Paramètres physiques permettant de réduire la tendance a l'encrassement.....	48
III.5.2 Pendant la phase de fabrication de l'échangeur et de sa mise en route.....	48
III.5.3 Pendant les phases de fonctionnement .....	49

III.5.4 Méthodes de nettoyage des échangeurs pendant les phases d'arrêts.....	50
A/ Nettoyage mécanique.....	50
B/ Nettoyage chimique .....	52
III.6 Contrôle de l'encrassement .....	52
III.6.1 Mesure aux bornes d'échangeur.....	53
III.6.2 Mesure a l'aide d'une sonde .....	54
III.7 Résistance d'encrassement .....	56
III.7.1 Calcul de la résistance d'encrassement .....	56
III.7.2 Modélisation de la cinétique du dépôt .....	58
III.7.3 Dimensionnement d'un échangeur .....	62

## CHAPITRE IV : Contexte Expérimental

IV.1 Modélisation .....	66
IV.1.1 Finalités d'une modélisation.....	66
IV.1.2 Comment modéliser ? .....	66
IV.2 Extrapolation déterministe .....	67
IV.3 Procédure expérimentale .....	69
IV.3.1 Description de l'unité.....	69
IV.3.2 Pose du problème.....	71
IV.3.3 Résultats et interprétations.....	84
A/ Résistance d'encrassement .....	84
A.1/ modélisation des résistance d'encrassement .....	84
A.2/choix du modèle de la résistance d'encrassement .....	88
B/ Pertes de charge .....	89
B.1/ modélisation des pertes de charge .....	89
B.2/ choix du modèle de la perte de charge .....	94
IV.3.4 Aspect économique du phénomène .....	95
A/ Coût de nettoyage.....	95
B/ Coût du à l'encrassement.....	97

B.1/ Le pouvoir calorifique du gaz combustible.....	98
B.2/ Quantité de chaleur absorbée par le brut flashé .....	98
B.3/ Débit du combustible.....	99
C/ Optimisation du cycle de nettoyage par la méthode du moindre coût.....	99

## **CHAPITRE V : Aspect stochastique de l'encrassement**

V.1 Approche probabiliste.....	103
V.1.1 Fonction de distribution.....	103
V.1.2 Distribution normale.....	104
V.1.3 Autres distributions .....	106
V.2 Description du problème .....	109
V.2.1 Modèle linéaire .....	109
A/ Description.....	109
B/ Résultats et interprétations .....	111
V.2.2 Modèle de puissance .....	113
A/ Description.....	113
B/ Résultats et interprétations .....	115
<b>Conclusion .....</b>	<b>118</b>

<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>119</b>
---	------------

## **ANNEXE**

# **Tables des Figures**

## TABLE DES FIGURES

- Figure I.1 : Organigramme des différentes opérations de la raffinerie d'Alger.
- Figure I.2 : Schéma simplifié du circuit de préchauffe de l'unité de distillation atmosphérique.
- Figure II.1: Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire co-courants.
- Figure II.2: Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à contre-courants.
- Figure II.3: Exemples d'échangeurs à courants croisés.
- Figure II.4 : Ailettes transversales.
- Figure II.5: Ailettes longitudinales.
- Figure II.6: Pas des tubes.
- Figure II.7: Divers constituants d'un échangeur a tubes et calandre.
- Figure II.8: Echangeur à tube et calandre : principales technologies à boite fixe,boite flottante et à tube en U.
- Figure II.9: Echangeur a plaques brasées, assemblage de plaques.
- Figure II.10: Echangeur à lit fluidisé.
- Figure II.11: Analogie conduction-convection.
- Figure II.12: Différents types d'écoulement en fonction du nombre de Reynolds
- Figure III.1: Problème d'encrassement pour différents types d'échangeurs.
- Figure III.2 : Echangeur sale et propre.
- Figure III.3 : Dépôt de forte épaisseur dans un tube de surchauffeur de chaudière de MP.
- Figure III.4 : Entartrage d'une chaudière à tubes de fumées (P=15bars).
- Figure III.5 : Importante corrosion.
- Figure III.6 : Dépôt de slime bactérien, hydrocarbures et oxydes.
- Figure III.7 : Représentation schématique de l'encrassement dans le cas liquide.

Figure III.8 : Nettoyage à l'aide d'un pistolet hydraulique.

Figure III.9 : Outil de nettoyage mécanique.

Figure III.10 : Schéma simplifié d'une mesure directe.

Figure III.11 : Principe d'une mesure avec une sonde.

Figure III.12 : Schéma du capteur à excitation thermique interne.

Figure III.13 : Résistance thermique d'encrassement des dépôts interne et externe localisés sur une surface d'échange.

Figure III.14 : Profil de température et la résistance au transfert de chaleur.

Figure III.15: Représentation de l'évolution des dépôts.

Figure III.16: Excès de surface d'échange en fonction de la résistance d'encrassement.

Figure IV.1 : Schéma simplifié du circuit de préchauffe.

Figure IV.2 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E101 CBA en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire.

Figure IV.3 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E101 CBA en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique.

Figure IV.4 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E101 CBA en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentielle.

Figure IV.5 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E101 FED en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire.

Figure IV.6 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E101 FED en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique.

Figure IV.7 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E101 FED en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentielle.

Figure IV.8 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E102 en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire.

Figure IV.9 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E102 en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique.

Figure IV.10 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E102 en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentielle.

Figure IV.11 : Evolution de la perte de charge de la cellule E101 CBA en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire.

Figure IV.12 : Evolution de la perte de charge de la cellule E101 CBA en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique.

Figure IV.13 : Evolution de la perte de charge de la cellule E101 CBA en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentielle.

Figure IV.14 : Evolution de la perte de charge de la cellule E101 FED en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire.

Figure IV.15 : Evolution de la perte de charge de la cellule E101 FED en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique.

Figure IV.16 : Evolution de la perte de charge de la cellule E101FED en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentielle.

Figure IV.17 : Evolution de la perte de charge de la cellule E102 en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire.

Figure IV.18 : Evolution de la perte de charge de la cellule E102 en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique.

Figure IV.19 : Evolution de la perte de charge de la cellule E102 en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentielle.

Figure IV.20 : Le coût d'encrassement en fonction du temps.

Figure V.1 : Graphiques des densités des distributions standard Normale, Normale.

Figure V.2 : Graphiques des densités des distributions khé-deux.

Figure V.3 : Distribution de loi de poisson,  $\lambda = 2,5$ .

Figure V.4 : Graphiques des densités des distributions de Student.

Figure V.5 : Evolution de la résistance d'encrassement (modèle linéaire avec plusieurs expériences).

Figure V.6 : La probabilité de la résistance d'encrassement pour le modèle linéaire en fonction de  $R_d$ .

Figure V.7 : Evolution de la résistance d'encrassement (modèle de puissance avec plusieurs expériences).

Figure V.8 : Evolution de la résistance d'encrassement avec plusieurs expériences pour le modèle de puissance pour  $t^{0.5}$  ( $n=0.5$ ).

Figure V.9 : La probabilité de la résistance d'encrassement ( $n=0,5$ ) pour le modèle de puissance



# **Table des Tableaux**

## TABLE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Principe de calcul d'un échangeur.

Tableau II.2 : Principe de la méthode du DTLM.

Tableau II.3 : Principe de la méthode du NUT.

Tableau III.1 : Actions envisageables pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur.

Tableau III.2 : Quelques modèles de dépôts liés à l'encrassement.

Tableau III.3: Quelques modèles de réentraînements.

Tableau III.4 : Valeurs des résistances d'encrassement conseillées pour le dimensionnement des échangeurs à fumées industrielles.

Tableau IV.1 : analyse du dépôt des cellules d'échangeurs étudiés.

Tableau IV.2: caractéristiques des cellules d'échangeurs de chaleur.

Tableau IV.3 : coefficients de corrélation pour chaque modèle de la résistance d'encrassement des cellules étudiées.

Tableau IV.4 : coefficients de corrélation pour chaque modèle de la perte de charge des cellules étudiées.

Tableau IV.5 la composition du gaz de combustible et le pouvoir calorifique de chaque constituant.

Tableau IV.6 : calcul du coût total de l'échangeur E 102.

# **Nomenclature**

## NOMENCLATURE

<b>Ts,Te</b>	Température sortie et d'entrée du fluide chaud	K
<b>ts,te</b>	Température sortie et d'entrée du fluide froid	K
<b>T</b>	Temps	Jour
<b>e</b>	Épaisseur	m
<b>Nu</b>	Nombre de Nusslet	
<b>Re</b>	Nombre de Reynolds	
<b>U</b>	Coefficient d'échange global	W/m <sup>2</sup> .K
<b>Pr</b>	Nombre de Prandlt	
<b>ΔT</b>	Différence de température des fluides à chaque extrémité de l'échangeur	K
<b>ΔT<sub>Lm</sub></b>	Différences moyenne logarithmique de température	K
<b>F</b>	Coefficient correctif	
<b>C<sub>p</sub></b>	Capacité thermique à pression constante	kJ/kg°C
<b>S</b>	Surface d'échange	m <sup>2</sup>
<b>m</b>	Débit massique	kg/s
<b>m<sub>d</sub></b>	Masse déposée par unité de surface	
<b>C<sub>s</sub></b>	Coefficient d'excès de surface	%
<b>R</b>	Coefficient de corrélation	
<b>C</b>	Coût	DA
<b>Q</b>	Pouvoir calorifique	kcal/kg
<b>Q<sub>a</sub></b>	Quantité de chaleur absorbée	kcal/h
<b>G</b>	Débit du combustible	kg/h
<b>H</b>	Enthalpie des phases vapeurs	kcal/kg
<b>h</b>	Enthalpie des phases liquides	kcal/kg
<b>P</b>	Probabilité de bon fonctionnement	
<b>F(T)</b>	Probabilité de mauvais fonctionnement	
<b>R<sub>d</sub></b>	Résistance d'encrassement	W <sup>-1</sup> .m <sup>2</sup> .K
<b>R<sub>dc</sub></b>	Résistance d'encrassement critique	W <sup>-1</sup> .m <sup>2</sup> .K
<b>q•</b>	Le flux de chaleur	W
<b>J</b>	La masse de flux des espèces déposées a la paroi	
<b>E</b>	Energie d'activation	
<b>R<sub>gaz</sub></b>	Constant des gaz parfait	
<b>C<sub>b</sub></b>	Concentration en bloc	
<b>m</b>	Masse déposée sur la surface d'échange	
<b>C<sub>s</sub></b>	Concentration extérieure	
<b>k<sub>d</sub></b>	Coefficient de dépôt	
<b>U*</b>	Vitesse de cisaillement	

$U_w$	Vitesse normale des particules à la paroi
$D_f$	Diffusivité avec la déposition,
$x$	Epaisseur de dépôt
$\Omega$	Facteur de caractéristique de l'eau, $\rho_f$ : Densité de dépôt
$k_r$	Constant du taux de premier ordre
$\tau_s$	Effort de cisaillement
$m_{loose}$	La masse arraché de dépôt sur la surface d'échange

### Symboles grecs :

$\Phi$	Densité surfacique de flux de chaleur	W/m <sup>2</sup>
$\phi$	Flux de chaleur	W
$\lambda$	Conductivité thermique	W/m.K
$\rho$	Masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	Viscosité dynamique	Pa.s
$\nu$	Viscosité cinématique	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	Masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	Viscosité dynamique	Pa.s
$\nu$	Viscosité cinématique	m <sup>2</sup> /s
$\varpi$	Paramètre	

### Indices

<b>o</b>	Initial
<b>e</b>	Entrée
<b>s</b>	Sortie
<b>f</b>	Fluide froid
<b>1</b>	Fluide froid
<b>2</b>	Fluide chaud
<b>min</b>	Minimal

# **Introduction Générale**

## INTRODUCTION GENERALE

Les échangeurs thermiques ont toujours eu de nombreuses applications majoritairement dans l'industrie mais également dans l'habitat ou dans le transport. A titre d'information, 30% des équipements des unités pétrochimiques sont constitués d'appareils d'échange de chaleur. Il est devenu de plus en plus indispensable de posséder des informations complètes sur l'état des procédés industriels de récupération d'énergie à tout instant. Ces renseignements permettraient de déceler, de suivre et de prédire les perturbations et les dégradations du transfert thermique et en même temps d'éviter une augmentation certaine de destruction de la couche d'ozone.

Pour l'industrie pétrolière, les échangeurs de chaleur constituent un composant essentiel, surtout pour le traitement du pétrole brut ou la distillation atmosphérique de ce dernier constitue l'unité de base d'une raffinerie du pétrole. Si l'on veut assurer une bonne rentabilité des ces unités de production dont le rendement dépend la plupart du temps du bon état de surface des échangeurs, il est impératif d'apporter le meilleur soin au suivi de leur état.

L'encrassement des échangeurs est un phénomène prépondérant dans la réduction des performances de ces installations ou son degré s'évalue par la mesure du coefficient global d'échange de transfert et aussi la résistance d'encrassement en fonction du temps, qui est une réplique fidèle de l'évolution de l'état physique des surfaces d'échange : plusieurs travaux ont déjà été effectué dans ce sens. [1]

L'encrassement des échangeurs de chaleur du pétrole brut prétraité est un problème économique majeur, le coût annuel du à l'encrassement était estimé approximativement 4,5 milliards de dollars en 1995 lorsque le prix du pétrole brut était de 20\$ /baril. En 2005 ces dépenses ont augmentées de 20% ce qui équivaut à 6,75 milliards de dollars, ceci est dû à une augmentation annuelle de 2% de la production du pétrole brut et à l'augmentation du prix du baril de pétrole (30 \$/baril).

Ceci permet de supposer que chaque augmentation du prix du pétrole influe directement sur l'augmentation des dépenses dues à l'encrassement. [2]

En dépit des progrès effectués ces dernières décennies, il subsiste toujours la nécessité de connaître en temps réel l'état d'encrassement des surfaces d'échange. Dans cette optique, l'objectif de cette étude est de modéliser la résistance d'encrassement et la perte de charge des cellules d'échangeurs du circuit de préchauffe de la raffinerie d'Alger, de déterminer la durée optimale de leur fonctionnement et appliquer une démarche probabiliste à des modèles déterministes de la résistance d'encrassement pour prédire ce phénomène.

Dans ce but, le mémoire est organisé de la façon suivante :

- Un bref aperçu sur la raffinerie d'Alger.
- Le deuxième et le troisième chapitre constituent une étude bibliographique assez générale mais non exhaustive sur les échangeurs de chaleur et leur problème durant leur exploitation, une description des différents types d'encrassement et les remèdes.
- Le quatrième chapitre concerne la procédure expérimentale : le monitoring des paramètres de service (Température. Pression) aux bornes d'échangeur de chaleur afin de déterminer les modèles déterministes pour chaque échangeur c'est-à-dire de trouver la meilleure tendance de l'évolution de la résistance d'encrassement et de la perte de charge en fonction du temps. L'évaluation des dépenses engendrées par ce problème a été nécessaire pour déterminer la durée optimale de fonctionnement d'un échangeur de chaleur c'est à dire la durée au bout de laquelle, il faut arrêter l'équipement pour son nettoyage.
- Le cinquième chapitre concerne l'aspect stochastique de ce phénomène : à partir des modèles déterministes, on considère le phénomène comme aléatoire. Cette approche nous permet de prédire la probabilité d'avoir une résistance critique pour un temps de fonctionnement déterminé. Ceci présente comme avantage la possibilité d'opérer à temps et temporairement sur les facteurs à risque pour l'encrassement.



# **Chapitre I**

## **Description de la raffinerie d'Alger**

## **CHAPITRE I : Description de la raffinerie d'Alger**

Les hydrocarbures restent la source d'énergie la plus utilisée pour le bon fonctionnement de l'économie mondiale et ils continuent à jouer ce rôle stratégique, aussi longtemps que l'homme n'aura pas trouvé d'autres sources d'énergie qui pourront remplir ce rôle avec plus de rentabilité et d'efficacité.

Le raffinage est un maillon et non des moindres de l'industrie des hydrocarbures de part ses produits vitaux destinés à alimenter les différents secteurs importants de l'économie du pays.

### **I.1 Historique :**

Depuis la nationalisation des hydrocarbures en février 1971 toutes les activités dans les domaines des hydrocarbures étaient dirigées par la SONATRACH, dont la totalité de la capitale est détenue par l'état algérien.

En 1982, le raffinage et la distribution des produits pétroliers sont séparés et dirigés en entreprise nationale de raffinage et de distribution des produits pétroliers (ERDP-NAFTAL).

En 1988, le raffinage, est à son tour, séparé de l'activité de distribution et il dirigé en entreprise nationale de raffinage de pétrole NEFTEC. En avril 1998, l'entreprise devient une filiale dont les actions sont détenues à 100% par le holding raffinage et chimie du groupe SONATRACH avec un capital social de 12 milliards de dinars dénommée société nationale de raffinage de pétrole NAFTEC SPA.

### **I.2 Raffinerie d'Alger :**

Elle est mise en service 1964 avec une capacité de traitement de pétrole brut de 2700.000 tonnes/an, elle est utilisée essentiellement pour la production de l'ensemble des carburants et du GPL.

Elle se situe à 5Km au sud d'El-Harrach et à 20Km à l'est d'Alger, cet emplacement a été choisi après étude des sols et la découverte d'une nappe d'eau qui est nécessaire pour l'alimentation des systèmes de refroidissement.

Elle est constituée des unités suivantes :

### **✱ Unité de distillation atmosphérique :**

Son rôle est de fractionner le pétrole brut en plusieurs coupes pour obtenir divers produits qui sont : essences : solvant lourd et léger, gasoil lourds et léger, kérosène, résidu, GPL, fuel-oil utilisé comme combustible dans les fours.

### **✱ Unité de plat forming :**

Cette unité permet d'avoir du plat format nécessaire pour l'obtention des carburants auto, elle permet aussi d'avoir des GPL et du fuel gaz.

### **✱ Unité de gaz plant :**

Elle traite le GPL qui sont issues des unités précédentes pour obtenir le propane et le butane.

### **✱ Centrale thermoélectronique :**

Son rôle consiste à la production de la vapeur et de l'électricité à partir du fuel et du gaz.

### **✱ Unité pomperie :** elle a deux fonctions :

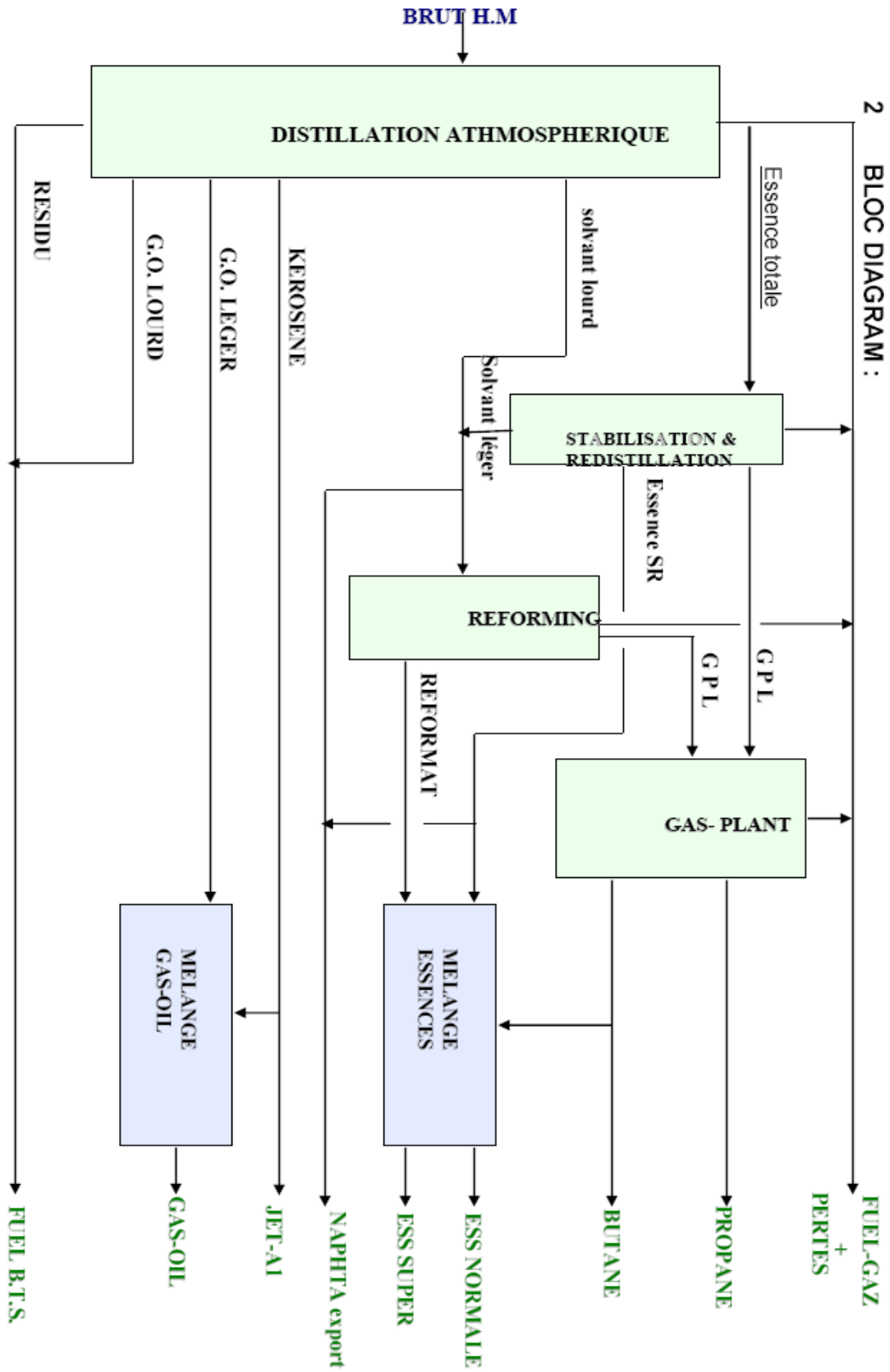
La première consiste pour la fabrication de l'essence à partir du plat format, la deuxième fonction est l'expédition du produit aux dépôts suivants : le port pétrolier d'Alger, les dépôts de carburant, l'aéroport Houari Boumediene.

### **✱ Un laboratoire de contrôle de qualité des produits.**

### **✱ Des ateliers d'entretien.**

### **✱ Magasins généraux pour stockage matériel et outillage.**

**✱ Un parc de stockage :** d'une capacité de 290000 m<sup>3</sup> dont 105000 m<sup>3</sup> pour le pétrole brut et 185000 m<sup>3</sup> pour les produits finis et semi finis.



*Figure I.1* : Organigramme des différentes opérations de la raffinerie d'Alger

### **I.2.1 Description de l'unité de distillation atmosphérique :**

L'unité de distillation atmosphérique est l'unité de base d'une raffinerie, elle a pour but de fractionner le pétrole brut en grandes coupes qui pourront rentrer soit, dans la composition des produits commercialisables soit dans d'autres unités en aval, comme charge pour un ou plusieurs autres traitements.

Cette unité traite le brut de Hassi Messaoud. Soit pur, soit en mélange des proportions variables du condensât, de Hassi R'mel.

Les différents circuits qui traversent le brut pour l'obtention des coupes sont :

### **I.2.2 Circuit de préchauffe du brut :**

C'est le circuit intéressé par notre étude, Le brut est aspiré par la pompe d'alimentation depuis les réservoirs de stockage, qui le refoule à travers un circuit d'échangeurs ou il est réchauffé par le reflux de tête, il passe ensuite dans le dessaleur électrostatique et entre dans un autre circuit d'échangeurs chauffé par le reflux circulant intermédiaire.

Le brut sortant à 160°C entre dans le ballon de flash où les fractions légères et l'eau sont entraînés vers la tête tandis que le brut flashé coule au fond du ballon.

Les produits de tête seront réinjectés dans le brut flashé à la sortie du four.

Le brut flashé est repris du fond de colonne par une pompe (figure I.2) et refoulé dans les échangeurs de chaleur d'où il sort à 220°C et il se divise en huit circuits parallèles pour alimenter le four, à la sortie du four, les circuits se réunissent en une seule ligne qui reçoit les produits légers venant du ballon avant d'entrer dans la colonne de distillation.

Le brut flashé partiellement vaporisé entre à 345°C dans la zone de flash de la colonne où la coupe d'hydrocarbure lourde descend dans le fond de la tour (résidu) et les fractions légères montent et se condensent aux différents plateaux de soutirage suivant les points initiaux et finaux d'ébullition de chaque produit.

Le maintien de la température aux différents niveaux de soutirage de la colonne se fait par les reflux circulant (de tête, intermédiaire et du fond).

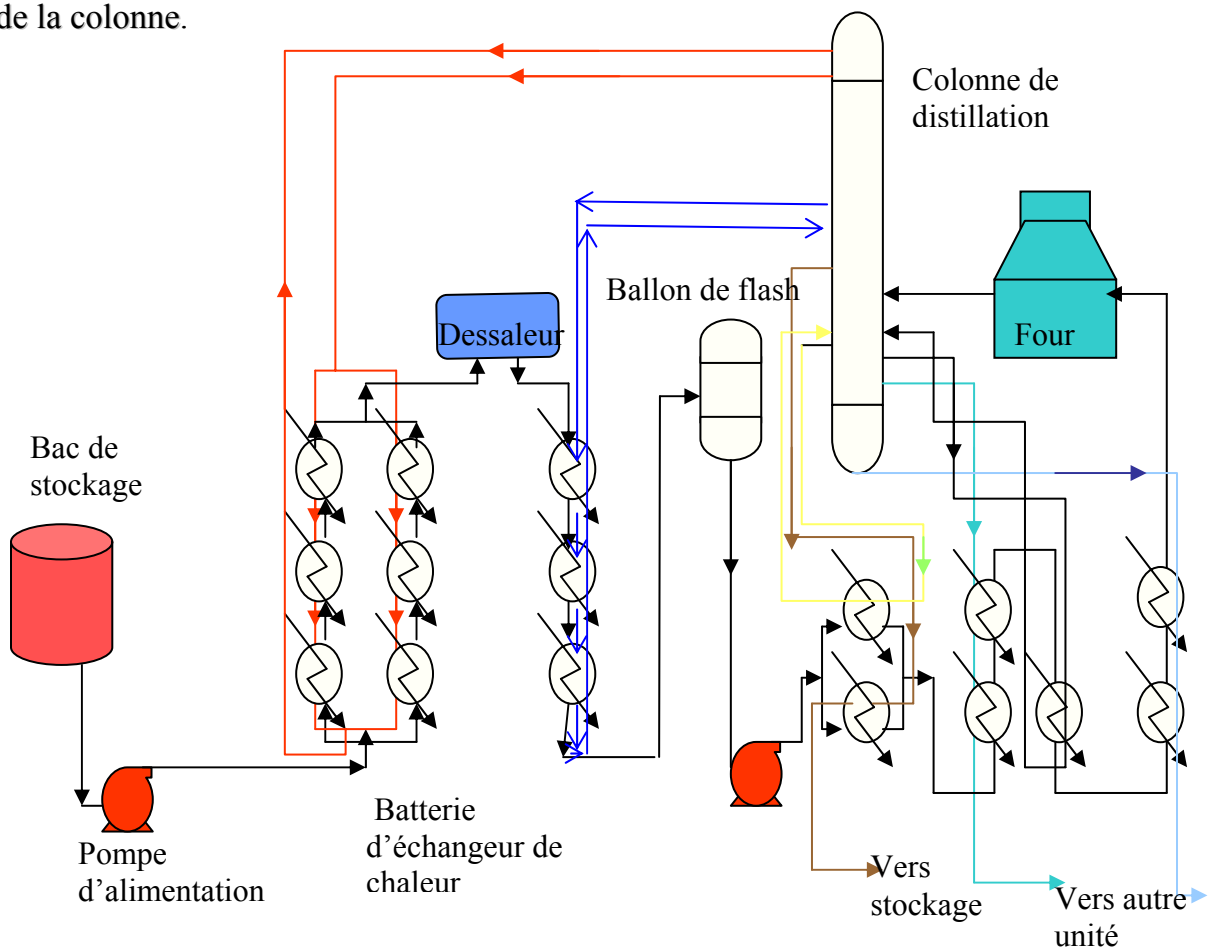
Pour les coupes lourdes (résidu) après avoir éliminer toute fraction légère par injection de la vapeur d'eau surchauffée, le résidu est envoyé par une pompe dans les échangeurs de chaleur ou il chauffe les produits plus froids ou il sera à 155°C, il passe à l'aérorefrigérant pour atteindre 90°C de température pour constituer soit le fuel oil N°01, soit en mélange avec le gasoil lourd et léger pour l'obtention du fuel oil léger.

### Le reflux circulant intermédiaire :

Il est soutiré au plateau N°35, refroidi dans des échangeurs de chaleur de 180°C à 140°C est repris par une pompe qui l'envoi dans la colonne au plateau N°36.

### Le reflux circulant de tête :

Il est soutiré au plateau N°46, le reflux se refroidi de 102°C à 70°C en traversant les circuits d'échangeurs placés en parallèle, le produit est renvoyé par une pompe en partie dans l'aérorefrigérant et retourne à 60°C sur le plateau de tête N° 49 de la colonne.



**Figure I.2:** Schéma simplifié du circuit de préchauffe du pétrole brut

### 1.2.3 Notions sur le dessalage du brut

Le brut extrait du sous sol contient, outre les gaz qui y sont dilués, une certaine quantité d'impureté d'origine non pétrolière telles que les particules solides du sols (argiles, sable), les sédiments formés par les sulfures de fer et les composés de vanadium constituent des boues qui se déposent au fond des dessaleurs, ainsi que l'eau de forage.

On se débarrasse de l'eau de forage et des particules du sol, y compris les cristaux de sel, le pétrole se décante lentement dans des réservoirs soit à froid, soit en le réchauffant. En cas des teneurs élevées en sel, la décantation du pétrole se fait après un traitement préliminaire à l'eau chaude. [3]

Donc le dessalage consiste en l'élimination du maximum de sel contenu dans le brut. Ceci peut se réaliser soit ; par des méthodes traditionnelles utilisées pour le traitement d'huile légère ou moyenne telles que le lavage à l'eau puis décantation, soit par des méthodes plus sophistiquées telles que le dessalage électrostatique. [4.5]

A Hassi Messaoud, l'eau du cambrien contient 370g/l de sels dissous (66%  $NaCl$  et 34%  $CaCl_2$ ) dans les conditions de fond (120°C .400 bars), il suffit d'une proportion très faible d'eau dans le brut pour conduire à des salinités importantes (la quantité de chlorure contenus dans le brut):0.1% d'eau en volume donne au brut une salinité de 377mg/l [5]. Les sels les plus fréquemment trouvés dans le brut sont : le dichlorure de magnésium ( $MgCl_2$ ), le dichlorure de calcium ( $CaCl_2$ ) et le chlorure de sodium ( $NaCl$ ). Ces sels sont généralement présentés soit sous forme de cristaux, soit sous forme dissoute dans des fines gouttelettes d'eau dispersées dans le brut.[3]

Durant la distillation, le sel peut donner du chlorure d'hydrogène et être ainsi une cause de corrosion dans l'unité industrielle s'avérant nuisible lors de l'utilisation des produits pétroliers.

#### Principe de dessalage

Le principe de l'opération de dessalage est de transférer les cristaux de sel insolubles dans le brut dans un milieu où ils sont solubles, puis procéder à une décantation du solvant. Ce dernier doit être :

- Efficace, c'est-à-dire, avoir un grand pouvoir dissolvant vis à vis des sels ;
- Peu coûteux.

L'eau satisfait à ces deux exigences, grâce à sa très grande constante diélectrique et la tendance de ses molécules à se combiner avec les ions pour former des ions hydratés : ces deux propriétés sont dues au moment dipolaire élevé de la molécule d'eau. [4]

### **Mécanismes :**

Le dessalage du brut passe par trois étapes successives :

- Lavage ou diffusion des sels du brut dans l'eau : il s'agit de faire passer les cristaux de sel contenus dans le brut, dans la phase d'eau.
- Coalescence : les agents émulsifiants sont absorbés à l'interface eau- huile, formant un film visible au microscope. Ces molécules polaires stabilisent l'émulsion et empêchent les gouttelettes de coalescer. La coalescence est provoquée soit par un traitement chimique, soit par un champ électrostatique (méthode utilisée dans les raffineries). Elle est favorisée par la quantité d'eau injectée et par l'injection de désémulsifiants dans le cas du pétrole à teneur élevée en asphalte.
- Décantation : les corps sphériques tombent librement obéissant à la loi de Stokes.

Pour améliorer la décantation, il est nécessaire d'augmenter la taille des gouttes d'eau (par augmentation de la quantité d'eau injectée et utilisation de désémulsifiant) et d'opérer à la température la plus élevée pour diminuer la viscosité de la phase continue.

### **1.2.4 Dessalage électrostatique**

C'est un procédé moderne, efficace et largement utilisé dans les raffineries, il s'impose pour les bruts lourds. Le dessalage électrostatique contribue d'une manière efficace à détruire les émulsions eau- brut. Pour cela, il est nécessaire de créer une nouvelle émulsion d'environ 3 à 5% ou 2,5 à 6% d'eau moins salée [6] que l'eau de gisement, appelée eau de lavage



Le dessaleur est en général situé dans le train de préchauffe de façon à ce que la température du dessaleur soit obtenue par échange de chaleur entre les reflux recirculés et la charge de brut. Le traitement doit être effectué à une pression suffisante de façon à éviter la vaporisation.

Le mélange eau brut s'effectuera à travers une vanne de mélange du dessaleur. Son réglage sera effectué de telle manière que l'émulsion soit aussi fine que possible sans pour autant nuire à la décantation ultérieure [5], la dispersion ainsi formée est résolue en l'introduisant dans un champ électrique haute tension à l'intérieur du récipient de dessalage. L'action de ce champ électrique fusionne la phase eau dispersée et la force à se regrouper au fond du récipient. L'eau, qui contient les diverses impuretés prélevées du brut, est déchargée continuellement vers le système d'effluent. Le brut, propre et dessalé, quitte le récipient de dessalage via le système de préchauffe de purificateur. [6]

#### **Les paramètres opératoires :**

Dans le but d'obtenir un meilleur rendement de dessalage, il est nécessaire de respecter des paramètres spécifiques, dont les plus importants sont les suivants [5.6.7] :

##### **1. Niveau d'interface eau / brut :**

Toute variation significative du niveau d'eau perturbe le champ électrique en créant un court-circuit si le niveau d'interface est élevé et provoque le passage d'une quantité de brut dans l'eau d'effluent si ce niveau est bas, il est donc nécessaire de maintenir ce niveau constant.

##### **2. Température de dessalage :**

Puisque la décantation est une fonction croissante de la température, il y a donc intérêt à dessaler à une température élevée mais n'excédant pas la gamme de 90 à 150°C selon les caractéristiques du brut à dessaler. Pour cette raison, le bon emplacement du dessaleur par rapport à la chaîne des échangeurs de chaleur est important. Les températures plus basses que celles spécifiées réduiront l'efficacité de dessalage à cause de l'augmentation de viscosité du pétrole et par conséquent, l'augmentation des difficultés de séparation de l'eau de lavage et du pétrole.

Des températures plus élevées que celles recommandées peuvent réduire l'efficacité du dessalage à cause de la plus grande conductivité électrique du pétrole brut.

### **3. Taux d'eau de lavage :**

Il devrait être maintenu dans une gamme spécifique. Une injection insuffisante d'eau résulte en un pauvre dessalage, si le débit d'eau de lavage est arrêté pour plus de quelques jours, les solides s'amorceront au fond du récipient, couvrant les têtes d'eau d'effluent et donnant de sérieux problèmes au niveau du contrôle de l'interface et de la qualité de l'eau, donc des taux d'injection d'eau de lavage peuvent créer un courant excessif ou un court-circuit entre les électrodes causant une retenue importante d'eau et de sel dans le brut du dessaleur

### **4. Nature de l'eau de lavage :**

Il ne devrait pas contenir des éléments qui pourraient stabiliser les émulsions car celles-ci rendaient la tâche plus difficile au dessaleur en ce qui concerne l'enlèvement de l'eau de lavage (et par conséquent du sel) du pétrole brut. Sinon, l'injection des produits désémulsifiants est nécessaire à condition que cette eau ne contienne pas une dispersion de gouttelettes d'huile dans la phase d'eau continue, une bonne eau de lavage contient :

Sulfures < 20ppm.

Chlorures < 50ppm.

PH = 6 à 7.

## **Conclusion**

Pour l'industrie pétrolière, les échangeurs de chaleur constituent un composant essentiel, surtout pour le traitement du pétrole brut ou la distillation atmosphérique de ce dernier constitue l'unité de base d'une raffinerie du pétrole. Si l'on veut assurer une bonne rentabilité des ses unités de production dont le rendement dépend la plupart du temps du bon état de surface des échangeurs, il est impératif d'apporter le meilleur soin au suivi de leur état.

# **Chapitre II**

## **Echangeurs de chaleur**

## **CHAPITRE II : Echangeur de chaleur**

Les procédés utilisés dans l'industrie demandent souvent que les fluides traités soient réchauffés ou refroidis avec ou sans changement de phases au cours des diverses opérations auxquelles ils sont soumis. La chaleur mise en œuvre représente une importante dépense d'énergie dont il est nécessaire de récupérer la plus grande quantité possible. De ce fait les échangeurs de chaleur constituent des appareillages importants.

### **II.1 Notions sur les échangeurs**

Un échangeur de chaleur est un équipement qui permet d'assurer un transfert de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid. Le même fluide peut conserver son état physique (liquide ou gazeux) ou se présenter successivement sous les deux phases : c'est le cas des condenseurs ; évaporateurs ; rebouilleurs ou des tours de refroidissement. [8]

En principe, pour les échangeurs les plus couramment utilisés dans l'industrie, les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi ou cloison à faible inertie thermique au travers de laquelle les échanges se font par conduction. En effet, la chaleur que l'un des fluides cède à la paroi par convection le long de la surface de contact est transférée par conduction et, est cédée à l'autre fluide par convection le long de l'autre face. Le rayonnement n'intervient de manière significative que s'il existe des différences de température très importantes entre un fluide semi-transparent et la paroi.

De part leurs différentes applications, les caractéristiques des échanges se situent dans une gamme très étendue en encombrement, en puissance échangée, en pression et en température. Les exigences de fonctionnement, les différentes normes imposées par le législateur pour la conception de tels appareils, les technologies ainsi que les matériaux utilisés sont inévitablement variés et difficilement comparables. [9]

Il devient donc difficile d'établir une classification rigoureuse sans faire le choix incontestablement restrictif d'un critère, le plus souvent ; les échangeurs de chaleur sont classifiés selon la configuration d'écoulement des fluides considérés et selon leur type de construction.

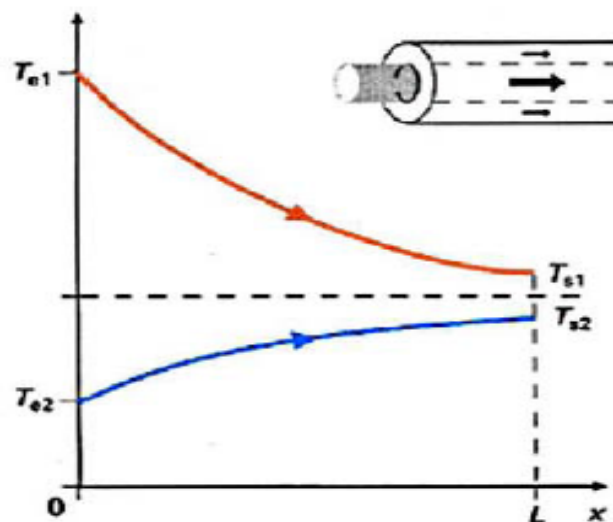
### II.1.1 Modes d'écoulement des deux fluides

On peut distinguer 3 modes d'écoulement différents

#### A/ Ecoulement co-courants (Ecoulement des deux fluides parallèles et de même sens) :

Il s'agit d'échangeurs dits à co- courants ou la température de fluide froid ne peut pas être supérieure à la température de sortie du fluide chaud. Les températures des fluides évoluent pendant leur traversée longitudinale de l'échangeur, à moins que l'un des fluides ne subisse un changement de phase.

La figure II.1 donne l'évolution qualitative de ces températures le long d'un échangeur tubulaire à co-courants très simple, la longueur de l'échangeur a été portée en abscisse, les températures sont repérées à l'aide d'indices  $e$  signifiant entrée et  $s$  sortie [10], 1 désignant le fluide chaud et 2 le fluide froid.

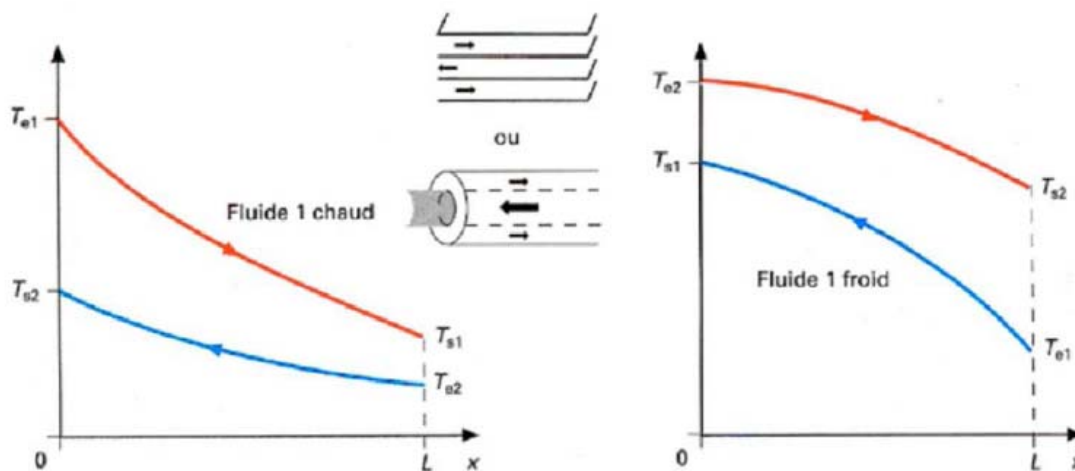


**Figure II.1** : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire co-courants

## B/ Ecoulement contre courants (Ecoulement des fluides parallèles mais de sens contraires) :

Il s'agit d'échangeurs à contre courants ou la température du fluide froid peut dépasser la température de sortie du fluide chaud. Cette disposition est l'une des plus favorables pour l'échange thermique.

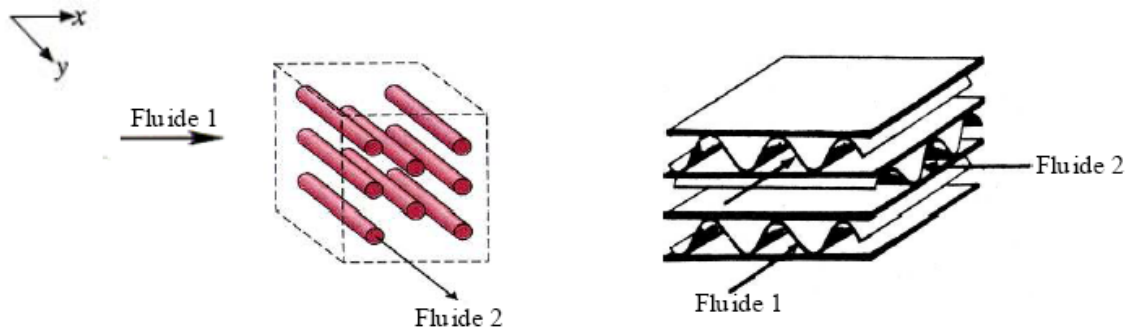
L'avantage de l'échangeur à contre courant sur l'échangeur à co-courant est de nécessiter, pour un même flux de chaleur, des surfaces d'échanges plus faibles.



*Figure II.2 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à contre courants*

## C/ Ecoulement des fluides croisés avec ou sans brassage :

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre (Figure II.3), le fluide non brassé est canalisé : c'est celui dont la veine est divisée entre plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section. L'autre fluide circule librement entre les veines et peut être considéré comme partiellement brassé du fait des tourbillons générés par les tubes. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans les sections droites de la veine fluide. Sans cela, les températures varient non seulement avec la direction de l'écoulement, mais aussi dans la section de veine. Une représentation schématique d'échangeur à courant croisés est donnée par la figure II.3



**Figure II.3 : Exemples d'échangeurs à courants croisés**

Les trois écoulements décrits, sont rarement utilisés dans toute leur simplicité. En effet, un échangeur se réduit rarement à un tube unique ou deux plaques ; néanmoins, l'étude de ces cas élémentaires, dans le cadre d'une première approche, est nécessaire : l'échangeur industriel étant en général constitué par un grand nombre de tubes ou de plaques créant ainsi des problèmes supplémentaire.

Par ailleurs, la conception des échangeurs de chaleur introduit le choix entre deux géométries élémentaires principales :

- ◆ Les tubes qui fixent l'espace dévolu seulement à l'un des deux fluides.
- ◆ Les plaques, planes ou corruguées, choisies pour un fluide qui impose la même géométrie pour l'autre.

Souvent, le choix des combinaisons entre différents types d'échangeurs dans les installations industrielles résulte de contingences technologiques et économiques.

## II.1.2 Différents types d'échangeurs de chaleur

Il est possible de caractériser un échangeur de chaleur par :

- ❖ La nature des matériaux qui le constituent (métallique, verre, plastique, graphite).
- ❖ La nature des fluides de transfert (liquide, gaz, mélange de plusieurs phases, solides pulvérisant).
- ❖ La conception de l'échangeur.

Alors on distingue deux grandes catégories :

- ❖ Echangeurs tubulaires.

Echangeurs à plaques.

## **A / Echangeurs tubulaires :**

Ils présentent un certain nombre d'avantages : en particulier ils sont facile à fabriquer, relativement bon marché, de maintenance aisée et surtout ils peuvent être utilisés à des pressions élevées et à de fortes températures. Leur robustesse et leur fiabilité contrebalancent leur encombrement. [11]

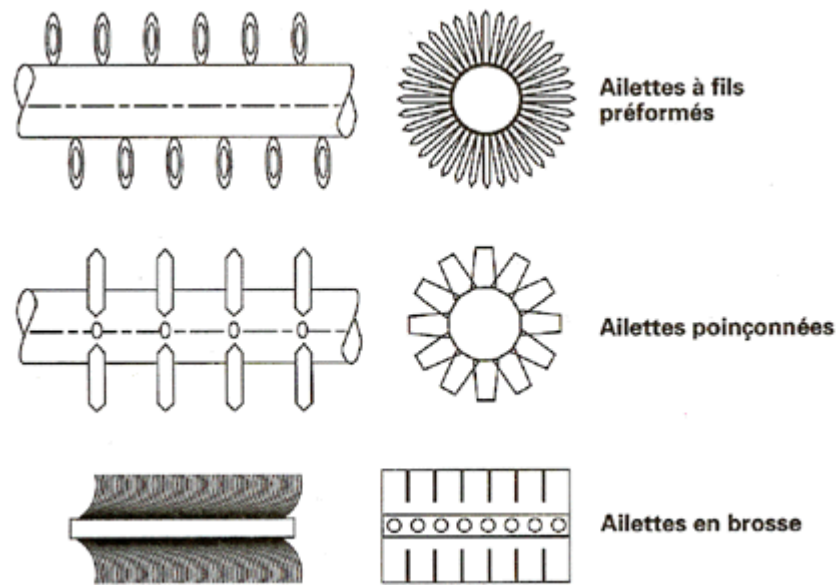
On distingue, le plus souvent, les catégories suivantes :

- a.** Les échangeurs monotubes pour lequel le tube est placé dans un réservoir ;
- b.** Les échangeurs coaxiaux pour lesquels les tubes sont le plus souvent cintrés
- c.** Les échangeurs multitubulaires qui existent sous 4 formes :
  1. Les échangeurs à tubes séparés : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises.
  2. Les échangeurs à tubes rapprochés : les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire de rubans enroulés en spirale autour de certains d'entre eux.
  3. Les échangeurs à tubes ailetés qui permettent d'améliorer le coefficient d'échange : lorsque l'un des fluides transitant dans l'échangeur s'avère moins bon caloporteur que l'autre, l'utilisation d'ailettes autour des tubes ou dans les tubes s'impose pour que la résistance thermique globale ne soit pas entièrement due au fluide ayant le plus petit coefficient d'échange thermique.

Les ailettes peuvent être disposées de différentes façons :

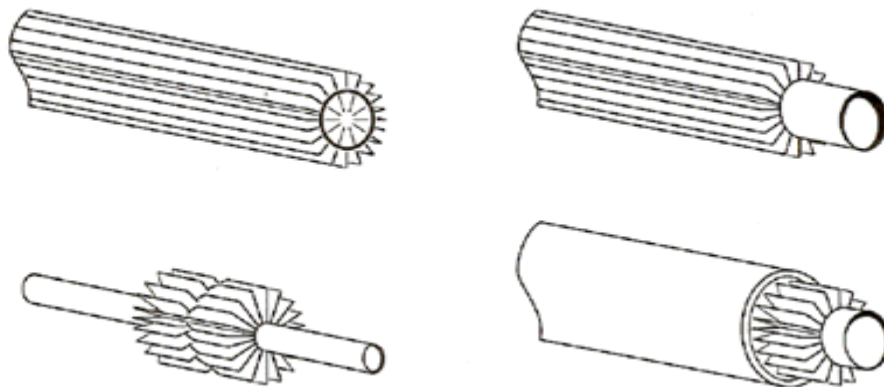
Les ailettes transversales divisées en deux groupes : les ailettes continues qui sont traversées par plusieurs tubes et qui sont généralement de forme rectangulaires planes ou ondulées, et les ailettes indépendantes qui sont traversées par un seul tube et qui peuvent être annulaires ou hélicoïdales, pleines ou segmentées. Elles peuvent être aussi à fil performé, poinçonnées ou en brosse.





**Figure II.4:** Ailettes transversales.

Les ailettes longitudinales qui sont disposées selon l'axe des tubes et qui peuvent être localement torsadées.

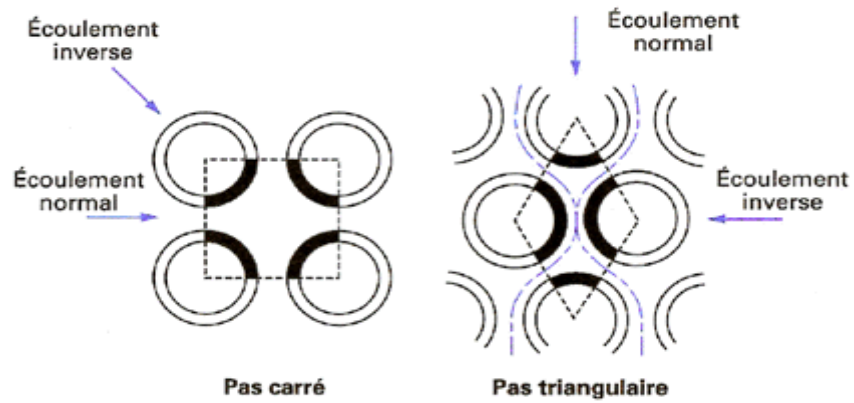


**Figure II.5 :** Ailettes longitudinales.

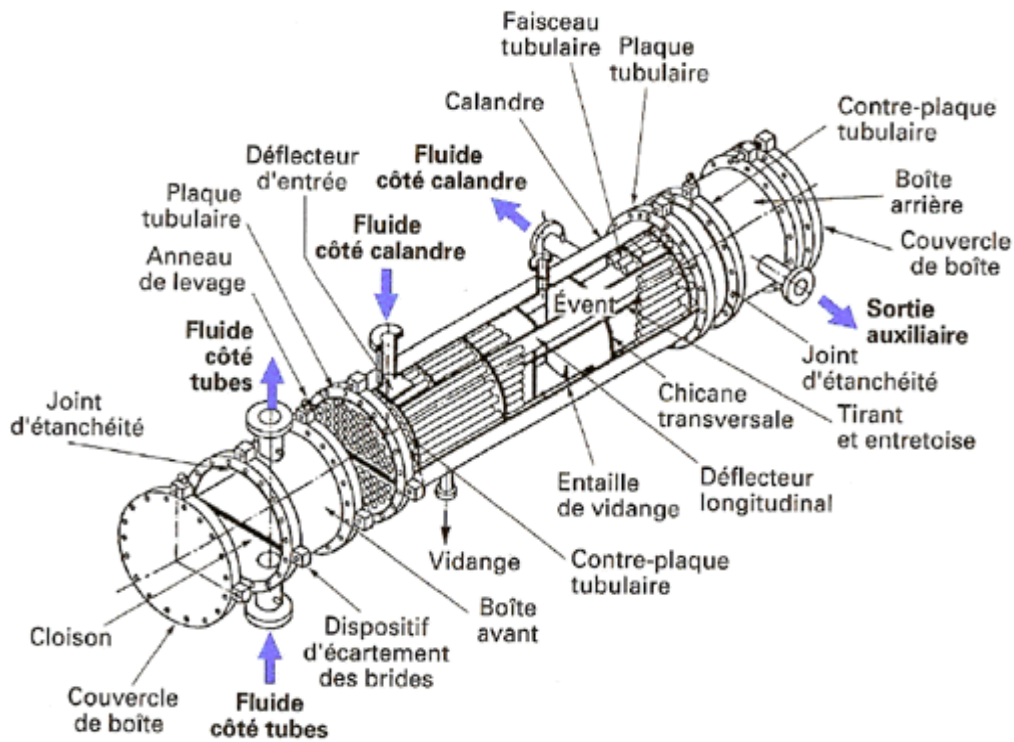
4. Les échangeurs à tube et calandre ou la calandre est une enveloppe métallique cylindrique entourant un faisceau de tubes : ils possèdent une boîte de distribution c'est-à-dire un dispositif qui distribue ou recueille le fluide aux extrémités des tubes.

Ils peuvent être à boîte fixe, à boîte flottante, ou à tube en U avec une boîte à chaque extrémité de l'échangeur.

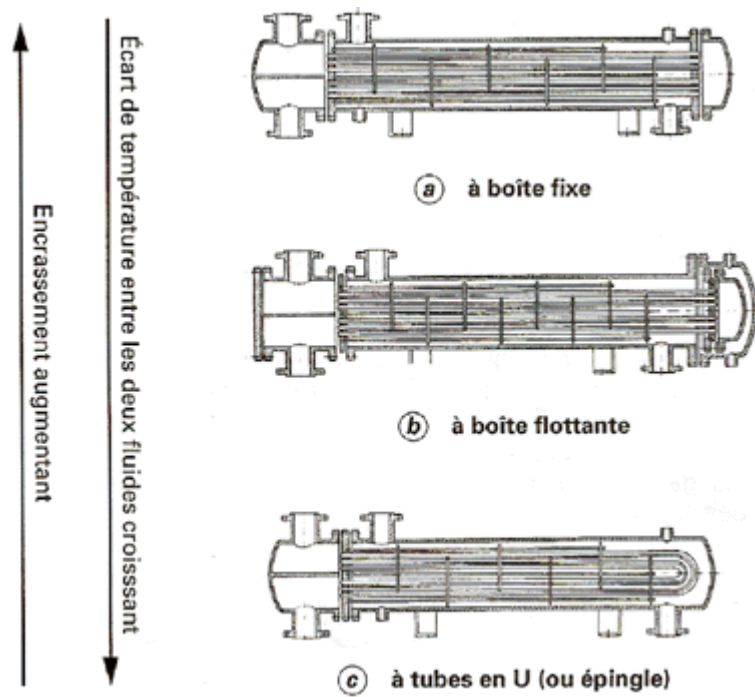
Les tubes peuvent être supportés par des chicanes afin d'augmenter la vitesse du fluide dans la calandre dans le but d'améliorer le coefficient d'échange [12]. Pour cela, un compromis doit être trouvé pour avoir simultanément un coefficient d'échange global et des pertes de charge acceptables.



**Figure II.6:** Pas des tubes



**Figure II.7:** Divers constituants d'un échangeur à faisceau et calandre



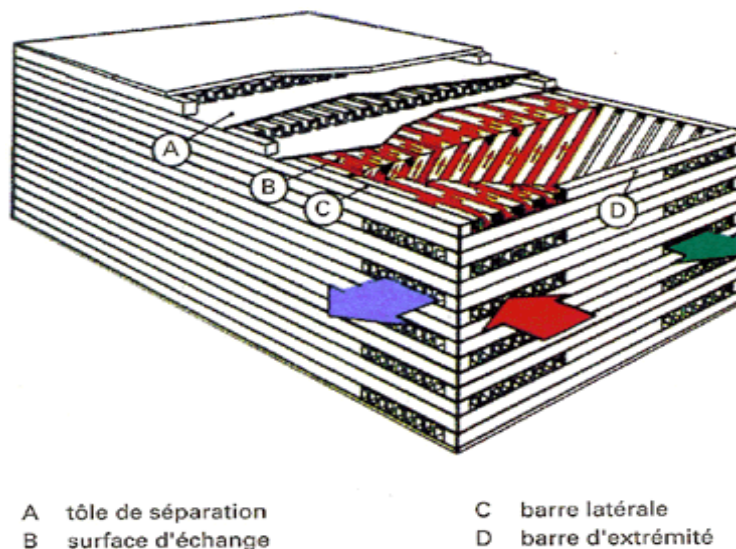
*Figure II.8 : Échangeur à tubes et calandre : principales technologies à boîte fixe, boîte flottante et à tubes en U*

**B / Echangeurs à plaques :**

Les échangeurs à plaques ont subi depuis leur création, il y a environ 60 ans, des améliorations substantielles. Ils sont formés par l'emplacement d'un ensemble de plaques métalliques embouties, au travers desquelles s'effectue le transfert de chaleur entre deux fluides. S'ils ne peuvent pas toujours être utilisés pour les températures élevées et les fortes pressions, les échangeurs à plaques bénéficient d'avantages tenant notamment à leur meilleur rendement et à leur compacité. Plusieurs technologies sont en concurrence. La principale, et la plus ancienne, est celle des échangeurs à plaques avec joints. Un joint par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par deux plaques. Ces échangeurs ne peuvent être utilisés que pour des pressions maximales de 30 bars et des températures maximales de 200degrés Celsius.

D'autres technologies plus récentes permettent de remédier aux inconvénients de l'existence de joints, comme les échangeurs à plaques soudées, ces dernières sont adaptés à l'utilisation de fluides encrassant corrosifs [13], chauds, sous pression, présentant des débits très différents de part et d'autre de la surface d'échange.

Il existe d'autres échangeurs à plaques dont la diffusion est moins importantes tels que les échangeurs de chaleur à spirales et les échangeurs à plaques brasées [14]. Les échangeurs à plaques brasées sont formés de plaques embouties, mais sans joints, qui forment ainsi un appareil compact et résistant à hautes pressions. Les échangeurs à spirales sont constitués de deux rubans de tôles gaufrées, enroulés et maintenus parallèle et où la circulation du fluide, est de type monocanal à courants parallèle ou croisés. Reste encore les échangeurs à plaques serties qui sont constitués d'un assemblage de tôles planes parallèle entre lesquelles sont disposées des ailettes.



**Figure II.9:** Échangeur à plaques brasées : assemblage de plaques.

## C / Échangeurs particuliers :

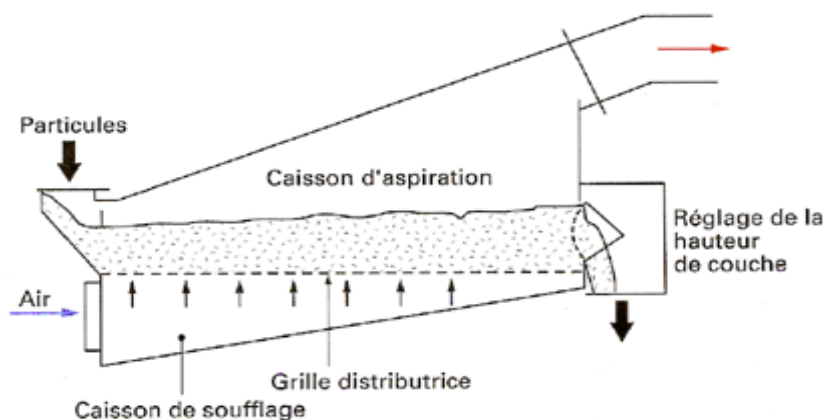
Un autre type d'échangeur comporte également une colonne fixe de remplissage ; c'est celui où les deux fluides coexistent dans le passage en circulant à contre courant, le garnissage permettant le contact direct entre les deux fluides.

Les tours de refroidissement sont un exemple courant de ce type : elles permettent de réemployer l'eau utilisée dans divers échangeurs d'une centrale thermique, cette eau chaude, pompée au sommet de la tour, descend par gravité en s'étalant sur les surfaces de garnissage et reste ainsi en contact continu avec l'air, l'air s'humidifie et dans ce cas, le transfert de chaleur est donc accompagné d'un transfert de masse.

Les refroidisseurs à grilles avec changement de matière granulaire assimilable à un fluide homogène peuvent être considérés comme des échangeurs à courants croisés.

Les systèmes à lits, constitués par une matière finement divisée, sont rattachés aux échangeurs à cause de l'aspect fluide que prend la poudre en suspension : celui-ci reçoit de la chaleur d'une source extérieure et le transmet avec un très grand coefficient d'échange au fluide qui traverse le lit en le fluidisant. [15]

Compte tenu des diverses applications dans lesquelles interviennent les échangeurs de chaleur et de leurs développements actuels, nous n'avons pas ici, la prétention de fournir une liste exhaustive des différentes configurations existantes



**Figure II.10:** Échangeur à lit fluidisé (contact direct)

### II.1.3 Coefficients de transfert de chaleur

Les échanges de chaleur par convection, qu'elle soit forcée ou naturelle, sont la conséquence de mouvement du fluide provoqué respectivement par une action extérieure ou de la différence de densité entre les parties chaudes et froides du fluides [16].

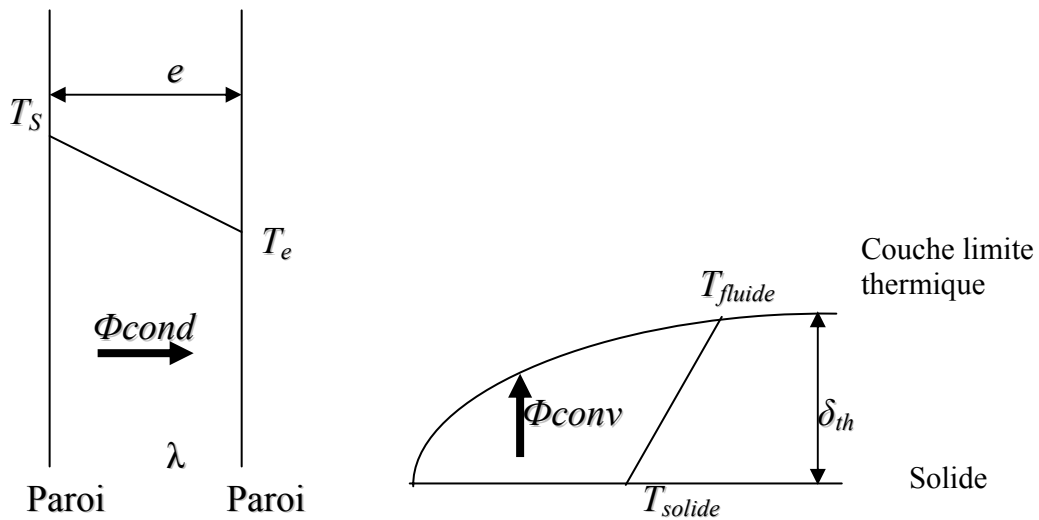
Le concept de coefficient de transfert repose sur la proportionnalité entre les flux échangés entre les phases et les différences de leurs températures [17], ainsi, la densité surfacique de flux de chaleur par convection entre deux phases solide et fluide à deux températures moyennes différentes s'écrit selon la loi de Newton telle que :

$$\Phi_{conv} = U \cdot (T_{solide} - T_{fluide})$$

Le coefficient d'échange  $U$  (w/m<sup>2</sup>°k), traduit de manière empirique les échanges de chaleur du solide avec le fluide.

Il représente une conductance par analogie avec le transfert de chaleur par conduction, en effet, dans le cas d'un mur plan homogène et isotrope (Figure II.11), d'épaisseur  $e$  et de conductivité thermique  $\lambda_{paroi}$  dont les deux faces sont soumises respectivement aux températures  $T_e$  et  $T_s$ , la densité surfacique de flux de chaleur s'écrit selon la loi de Fourier telle que :

$$\Phi_{cond} = \frac{\lambda_{paroi}}{e} (T_s - T_e)$$



**Figure II.11.:** Analogie conduction- convection

D'autre part, en assimilant le profil de température à une droite dans la couche limite thermique qui se développe lorsqu'un écoulement fluide frotte sur une paroi solide (figure II.11), la densité de flux convectée peut aussi s'écrire :

$$\Phi_{conv} = U \cdot (T_{solide} - T_{fluide}) = \frac{\lambda_{gaz}}{\delta_{th}} (T_{solide} - T_{fluide})$$

Cette notion de coefficient d'échange convectif est très controversée. En effet, il faut remarquer que les considérations concernant ce coefficient d'échange sont uniquement valables en régime établi.

Généralement, les valeurs du coefficient d'échange  $U$  dépendent des conditions hydrodynamiques et thermiques de la phase fluide en présence :

- Viscosité.
- Conductivité.
- Chaleur volumique.
- Vitesse d'écoulement.
- Température.

En régime instationnaire, les effets d'inertie du transfert de chaleur sont à prendre en compte dans le fluide, et ne peuvent plus être considérées aussi simplement. [18]

Il est à noter que le degré d'encrassement des échangeurs de chaleur s'apprécie par la mesure du coefficient global de transfert de chaleur. En effet, l'évolution de ce paramètre est une réplique fidèle de l'état physique des surfaces d'échange. [19]

### **A / Coefficients de transfert de chaleur locaux et globaux :**

Dans certaines situations, il est parfois utile de considérer un coefficient d'échange local  $U(x)$

Ce dernier dénote d'une différence de comportements locaux tels ceux observés lors de l'écoulement d'un fluide en convection forcée autour d'un cylindre (point d'arrêt, couche limite, effet de sillage). Cette multiple dépendance résulte du fait que le transfert convectif est déterminé par la couche limite thermique qui se développe sur la surface du solide. Ainsi, en chaque point de la surface, la vitesse de l'écoulement est nulle, le transfert de chaleur s'effectue uniquement par conduction entre les molécules de fluide. Au sein de cette couche limite, le gradient de température influence le coefficient de transfert local : son épaisseur augmente le long de la surface, le gradient à la paroi diminue. Finalement, le flux convectif diminue en s'éloignant au bord d'attaque.

Malgré cela, le plus souvent, il est fait référence à des coefficients de transfert de chaleur globaux correspondant à des valeurs dans le temps ou à l'échelle du système considéré. Ils peuvent être définis soit à partir de l'équation

$$\Phi_{conv} = U \cdot (T_{solide} - T_{fluide})$$

Soit à partir des valeurs des coefficients locaux tel que :

$$U = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U(x) \cdot dx$$



## B/Coefficient de transfert de chaleur sous forme adimensionnelle:

Lorsque le fluide est en écoulement forcé, l'écriture sous forme universelle des corrélations de convections fait intervenir 3 groupements adimensionnels :

- Le nombre de Nusselt qui représente le rapport entre les flux de chaleur transmis par convection et par conduction :

$$Nu = \frac{UL}{\lambda_{\text{gaz}}} = \frac{\Phi_{\text{conv}}}{\Phi_{\text{cond}}}$$

Où  $L$  est la grandeur caractéristique du système.  $\lambda_{\text{gaz}}$  la conductivité thermique du gaz en présence et  $h$  le coefficient d'échange local ou global suivant les cas considérés.

- Le nombre de Reynolds qui traduit, d'une part, la compétition qui existe entre convection et diffusion, et d'autre part, le type d'écoulement du fluide :

$$Re = \frac{Lu}{V} = \frac{\rho u L}{\mu}$$

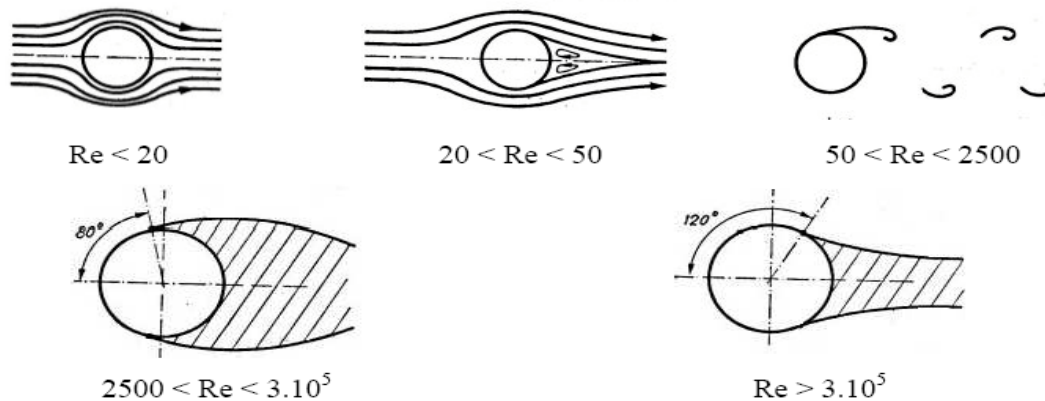
Où  $L$  et  $u$  représentent les longueur et vitesse caractéristiques de l'écoulement, et  $\rho$ ,  $\nu$  et  $\mu$  représentent respectivement la masse volumique, la viscosité cinématique, et la viscosité dynamique du fluide.

Pour décrire l'écoulement autour d'un cylindre, la longueur caractéristique à considérer est le diamètre extérieur du cylindre. Suivant les valeurs obtenues pour le nombre de Reynolds, le régime d'écoulement (Figure II.12) présente des caractéristiques différentes qui vont influencer la distribution du coefficient de transfert de chaleur local et global.

Dans le cas où :

- $Re < 20$  : L'écoulement est de type visqueux sans décollement.
- $20 < Re < 50$  : L'écoulement présente une poche de recirculation stable et symétrique dans le sillage.
- $50 < Re < 2500$  : Des allées de tourbillons alternés apparaissent à l'arrière du cylindre.

- $2500 < Re < 3.10^5$  : Le point de décollement se situe à  $80-100^\circ$  à partir du point d'arrêt.
  - $Re > 3.10^5$  : Le point de décollement se situe à  $120-140^\circ$  à partir du point d'arrêt.
- Quel que soit le régime d'écoulement considéré, il y a développement d'une couche limite sur la face amont du tube jusqu'au point de décollement.



**Figure II.12:** Différents type d'écoulements en fonction du nombre de Reynolds

- Le nombre de Prandtl qui caractérise l'importance relative des effets thermiques et visqueux d'un fluide dans un état donné :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$$

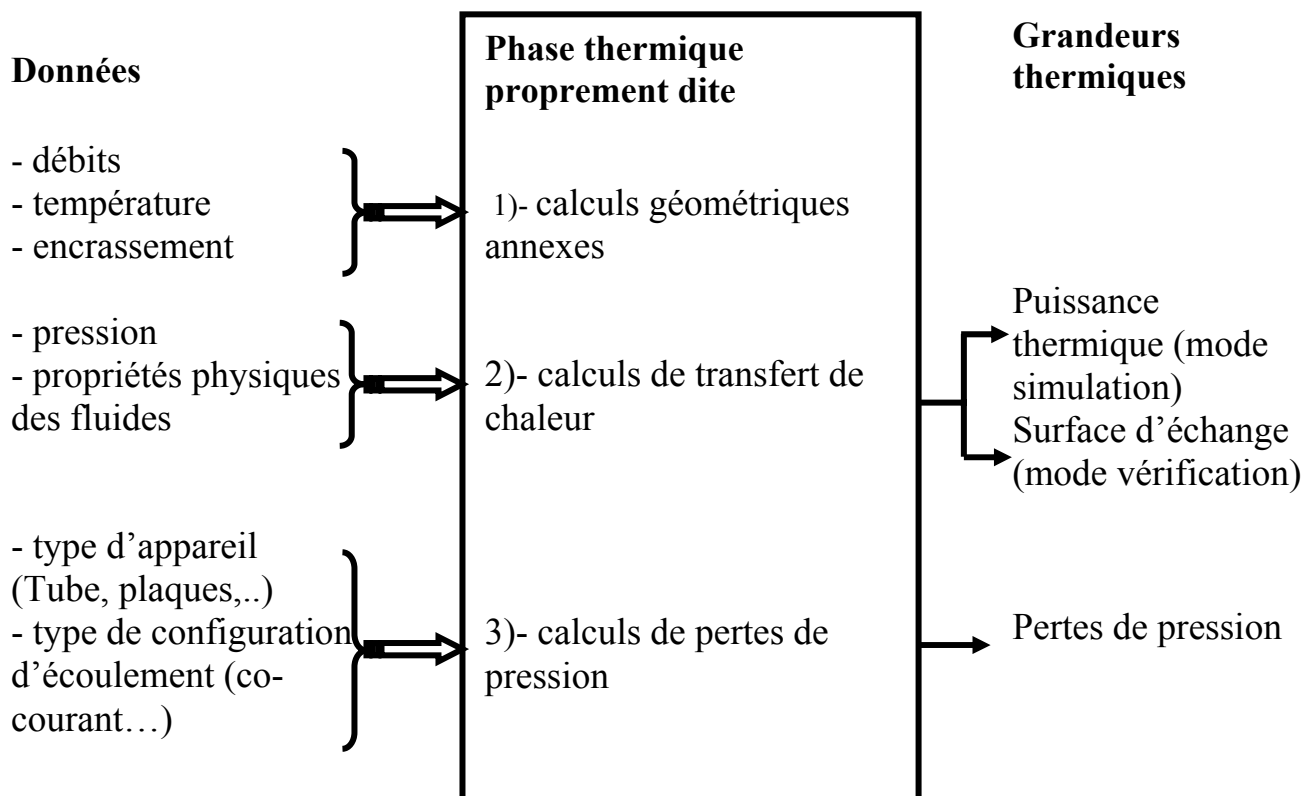
Le coefficient de transfert de chaleur, traduit par le nombre de Nusselt, est généralement exprimé en fonction du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl :

$$Nu = f(Re, Pr)$$

Quel que soit le régime d'écoulement, il existe, dans la littérature, une multitude de relations empiriques ou semi-empiriques permettant d'exprimer le nombre de Nusselt.

## II.2 Méthodes de calcul

La dualité perte de charge – transfert de chaleur est à la base de tout calcul d'échangeur de chaleur, afin d'évaluer leur performances thermiques il faut obtenir une puissance d'échange donnée, avec la plus faible surface d'échange et le moins de perte de charge, le tableau suivant (tableau II.1) donne principe de calcul d'un échangeur de chaleur :



**Tableau II.1:** Principe de calcul d'un échangeur

Les méthodes utilisées sont des méthodes analytiques et numériques destinées pour le dimensionnement des échangeurs :

### - Méthode analytique :

Telles que la méthode de l'écart moyen logarithmique ou la méthode de l'efficacité en supposant un coefficient d'échange constant le long de l'échangeur et pas de pertes de charge.

- **Méthode numérique :**

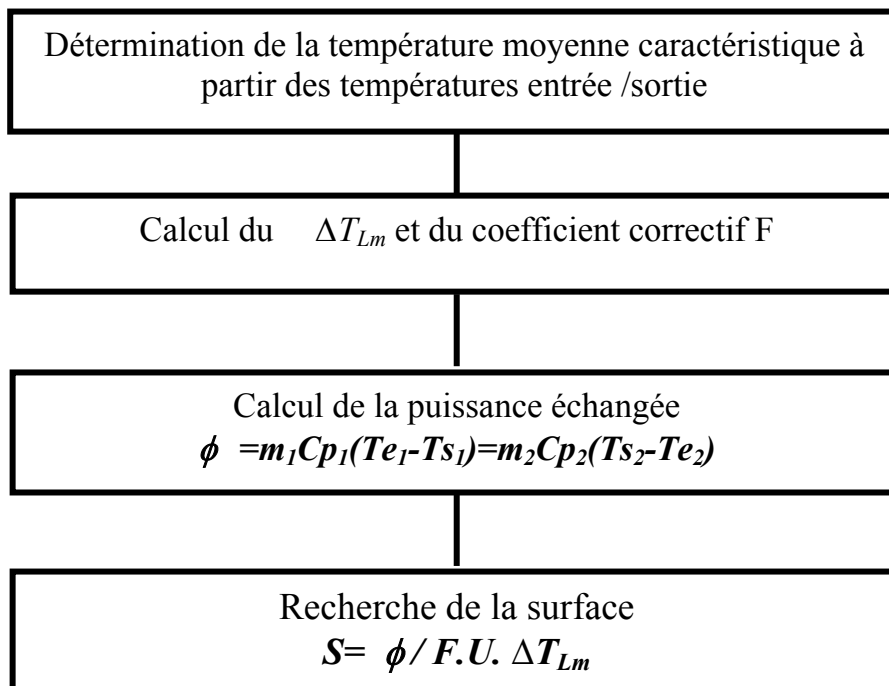
Elles permettent de préciser le calcul en décomposant les phénomènes physiques mis en jeu et en prenant en compte la nature d'écoulement.

**I.2.1 Méthode analytique :**

Deux types de calcul sont envisageables pour la caractérisation de l'échangeur :

**A / Méthodes du DTLM :**

Le déroulement du calcul peut être schématiquement le suivant :



**Tableau II.2 :** Principe de la méthode du DTLM

Avec :

$$\Delta T_{Lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{2,3 \log \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

$\Delta T_1$  et  $\Delta T_2$  : différences de températures des fluides à chaque extrémité.

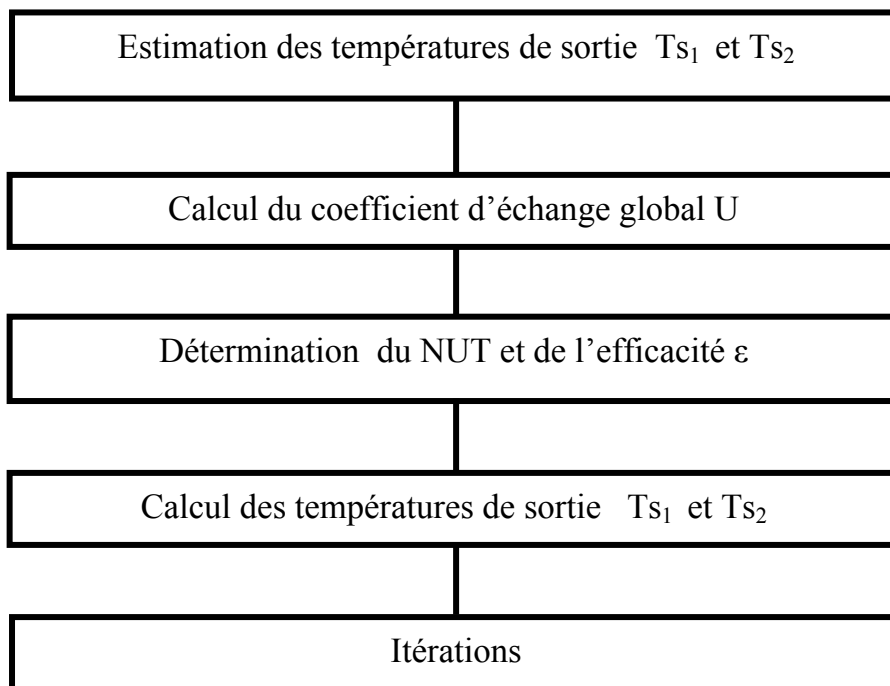
$\Delta T_{Lm}$  : est la différence moyenne de température entre deux fluides sur tout l'échangeur.

Dans la pratique on préfère exprimer cette différence moyenne à partir de la différence moyenne logarithmique d'un échangeur à contre-courant, calculée avec les mêmes températures d'entrée et de sortie des fluides multipliée par un facteur correctif F (F se détermine à partir des abaques et donne l'efficacité de l'appareil par rapport au contre-courant pur, il est conseillé dans les calculs d'échangeurs de n'adapter que des valeurs de  $F < 0,75$ ).

### B / Méthode du NUT :

Dans certaines utilisations d'échangeurs, on doit déterminer les températures de sortie d'un échangeur connaissant les températures d'entrée et la surface d'échange. Ce problème est itératif car on ne peut pas trouver directement une température moyenne caractéristique des fluides,

Le déroulement du calcul peut être schématiquement le suivant :



**Tableau II.3 : Principe de la méthode NUT**

Le groupement sans dimension  $U S/C_{\min}$  est appelé nombre d'unité de transfert, il est représentatif du pouvoir d'échange de l'appareil,

Avec :  $C_{mn} = (mC_p)_{\min}$

$m$  : Débit massique (kg/s)

Ces méthodes nécessitent une bonne connaissance pratique des échangeurs dès que l'on s'éloigne des dimensions standard et elles sont particulièrement inadaptées pour les appareils tels que les évaporateurs ou les condenseurs fonctionnant en régime diphasique. Pour cela des méthodes numériques mise en jeu pour améliorer la précision de calcul comme :

**II.2.2 Méthode numérique :** telles que

**A / Méthode des volumes finis :**

C'est une méthode de simulation, elle suppose connue la géométrie exacte de l'appareil que l'on désire modéliser, ainsi que les caractéristiques des deux fluides à l'entrée de l'appareil et une bonne idée de la configuration d'écoulement c-à-d du champ de vitesse des fluides à l'intérieur de l'appareil.

Elle est axée sur la simulation de la performance des échangeurs, elle repose sur les principes suivants :

- On décompose l'échangeur en un certain nombre de volumes de contrôle ou de maille.
- On effectue sur chacune de ces cellules un bilan d'énergie en supposant la température du fluide constante à l'intérieur du volume.

Cette méthode a été appliquée dans son principe pour la réalisation du logiciel CETUC.[20]

**B / Méthode de diagramme température - enthalpie :**

Le principe de cette méthode est la vérification des performances :

- A partir de la connaissance de la géométrie complète de l'échangeur et de ces conditions de fonctionnement à l'entrée et à la sortie (et donc la puissance qui doit être échangée), ainsi que des propriétés physiques des fluides.
- La méthode permet la qualification de cet appareil en calculant un critère de surdimensionnement ou de sous dimensionnement qui caractérise le fonctionnement de l'appareil.

Les principales étapes de la méthode sont les suivantes :

- Construction du graphe température –enthalpie.
- Evaluation des coefficients d'échange thermiques en fonction de la géométrie et des conditions locales de l'écoulement.
- Calcul de la surface nécessaire pour échanger la puissance imposée.
- Obtention du critère de dimensionnement thermique, comparaison entre la surface géométrique réelle de l'échangeur et la surface nécessaire.

Cette méthode du diagramme température-enthalpie mise en œuvre dans le cas des échangeurs à plaques pour la réalisation du logiciel CEP AJ.

Comme il existe d'autres logiciels tels que TRICOT, TRIO. [20]

### **II.3 Considérations sur le calcul d'un appareil a faisceau et calandre :**

La mise en place des fluides à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes doit prendre en considération la corrosivité des produits et leurs caractères salissant, c'est-à-dire les possibilités de nettoyage, en plaçant à l'intérieur des tubes le fluides le plus corrosif et le plus sale, par ailleurs, il faut tenir également du rapport des débits et de celui des sections de passage dans le faisceau et dans la calandre, en mettant le plus grand débit dans la plus grande section.

Si les débits sont très disproportionnés, on devra prévoir le plus petit débit à l'intérieur du faisceau en augmentant le nombre de passes, coté tubes, afin d'obtenir un nombre de Reynolds raisonnable.

Les valeurs des résistances d'encrassement et des pertes de charges obtenues à partir du choix initial de l'appareil, seront comparées aux standards imposés et il y aura souvent lieu de modifier le choix initial si ils ne sont pas dans les normes.

Il est difficile d'établir une règle générale simple permettant de fixer les modifications à apporter à l'appareil initial, Le diamètre de la calandre, le nombre des tubes, le nombre de passes  $t$ , coté tubes, ainsi que le nombre de chicanes transversales conditionne simultanément les nombres de Reynolds à l'intérieur du faisceau et dans la calandre.

L'augmentation de diamètre provoque un accroissement de résistance et une diminution de perte de charge, en multipliant le nombre de passes, coté tubes, la résistance diminue alors la perte de charge croît.

Enfin, l'augmentation du nombre de calandres, ainsi que le rapprochement des chicanes transversales font diminuer la résistance et croître la perte de charge. [21]

### **Conclusion**

Ce deuxième chapitre constitue une étude bibliographique assez générale mais non exhaustive sur les échangeurs de chaleur, ces derniers constituent des composants essentiels pour les procédés industriels de récupération d'énergie. En possédant des informations complètes sur leurs états à tout instant on peut déceler, suivre et prédire les perturbations et les dégradations du transfert thermique.



# **Chapitre III**

## **Encrassement**

## **CHAPITRE III : Encrassement**

L'encrassement des équipements de transfert de chaleur est un phénomène prépondérant dans la réduction des performances : telles que la diminution des coefficients de transfert de chaleur, l'augmentation de la température de fluide chaud et donc des consommations énergétiques.

Même si l'encrassement est un réel problème, il peut être contrôlé et son traitement doit être planifié.

### **III.1 Aspects économiques liés à l'encrassement**

L'appréciation du coût supplémentaire que représente l'encrassement des échangeurs thermiques n'est pas facile à évaluer de manière directe. Les différentes études réalisées sur le sujet [22.23.24.25] sont d'accord pour répartir les dépenses relatives à l'encrassement selon quatre grandes catégories :

- Investissement supplémentaire en surface d'échange lors du dimensionnement (20%).
- Coût de maintenance incluant les phases de nettoyage (18%).
- Non récupération d'énergie sur les effluents encrassants (41%).
- Coûts supplémentaires en énergie nécessaires (par l'encrassement) pendant les phases de production (21%).

Dans les pays industrialisés du monde entier, les dépenses relatives à l'encrassement ont été estimées à 0,25% de GDP (gross domestic product) sur une période de 1980 à 1990 [2]; pour l'industrie pétrolière et surtout pour le prétraitement du pétrole brut, le coût annuel dû à l'encrassement était estimé approximativement à 4,5 milliards de dollars en 1995 si on prend le prix du pétrole brut de 20\$/baril. En 2005 ces dépenses ont augmentées de 20% ce qui équivaut à 6,75 milliards de dollars, ceci est dû à une augmentation annuelle de 2% de la production du pétrole brut et à l'augmentation du prix du baril de pétrole (30%/baril). Ceci permet de supposer que chaque augmentation du prix du pétrole influe

directement sur l'augmentation des dépenses dues à l'encrassement [26]. En Algérie, ces dépenses sont estimées environ de 109 à 270 millions de dollars. [27]

### **III.1.1 Coûts liés à la conception de l'échangeur :**

Il s'agit surtout, dans cette phase, de surdimensionner les surfaces d'échange par l'affectation d'une valeur, le plus souvent empirique, de résistance d'encrassement. Dans de nombreux procédés industriels, l'utilisation d'échangeurs thermiques fonctionnant avec une efficacité continuellement proche d'une efficacité optimale est souvent requise. Dans ce cas, l'échangeur considéré est dupliqué. Ainsi, lorsque l'échangeur en place est encrassé, il est retiré de l'installation pour entretien, et remplacé par son duplicata. Le coût engendré par la nécessité d'avoir une réserve de réplique vient alors s'ajouter au surcroît lié au surdimensionnement des surfaces d'échange.

Le phénomène de corrosion est aussi pris en compte lors de la conception d'un échangeur. Un des moyens de le minimiser est d'utiliser des matériaux plus onéreux que l'acier, tel que le titane. Il faut donc s'attendre à ce que le coût d'un tel échangeur soit plusieurs fois plus élevé que celui d'un échangeur classique.

### **III.1.2 Coûts liés au fonctionnement de l'échangeur :**

Si le problème de l'encrassement n'est pas anticipé correctement lors de la phase de conception, des coûts supplémentaires dus aux arrêts intempestifs pour maintenance et entretien viennent s'ajouter. En effet, des arrêts non planifiés de l'installation peuvent mener à une perte complète de production qui représente à son tour un manque à gagner pour les industriels. Outre ces dépenses, les démontages et remontages répétés peuvent aboutir à une détérioration plus rapide du matériel, ainsi qu'à une réduction de la durée de vie des échangeurs.

L'encrassement des surfaces d'échange entraîne une perte d'énergie non négligeable due à la diminution du transfert de chaleur et à l'augmentation de la perte de charge. Généralement, cette perte d'énergie au niveau de l'échangeur doit être compensée par une utilisation accrue d'énergie primaire.

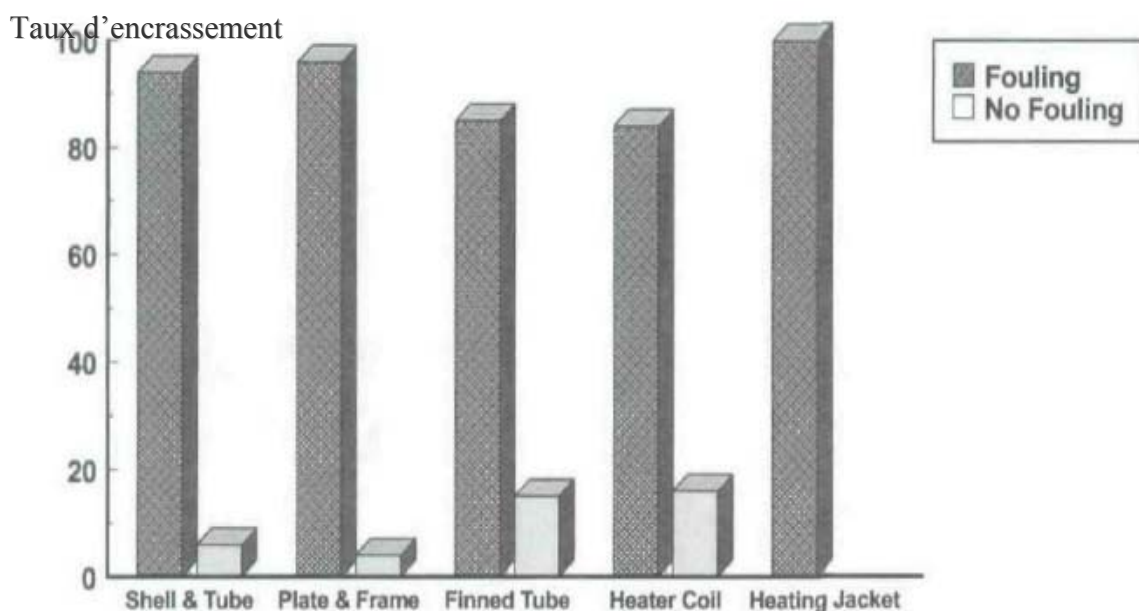
### III.1.3 Coûts liés à l'arrêt de l'installation :

Le nettoyage des échangeurs thermiques entraîne des coûts de main d'œuvre supplémentaires et exige un équipement adéquat surtout si un traitement chimique est requis. Dans ce cas, un circuit complémentaire impliquant des pompes et des réservoirs peut être nécessaire. Les produits chimiques doivent être achetés et les effluents issus du processus de nettoyage doivent être traités. Les processus de nettoyage plus conventionnels, tels que la projection de vapeur ou d'air comprimé, ou la circulation de boules ou de ressorts dans l'installation, exigent des dépenses supplétives à celle liées à la main d'œuvre.

### III.2 Classification : différents types d'encrassement

L'encrassement des équipements de transfert thermique peut être défini comme le dépôt de matériaux ou des substances considérées sur les surfaces d'échanges.

Ce dépôt qui évolue dans le temps ,peut être constitué de cristaux ,de sédiments de résidus biologiques ,des produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments.[28]



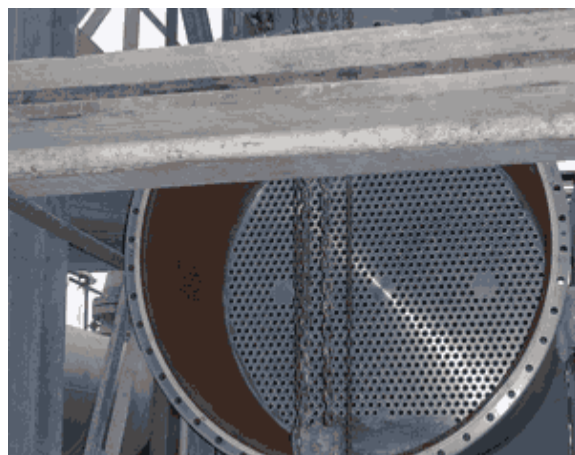
*Figure III.1: Problème d'encrassement pour différents types d'échangeur[29]*

Il est possible de classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de dépôt, selon les conditions d'utilisations de l'échangeur ou selon le mécanisme dominant, même s'il ne contrôle pas la vitesse de dépôt : pour cela on distingue selon [30,31, 32]

- Encrassement particulaire,
- Entartrage,
- Corrosion
- Encrassement biologique
- Encrassement par réaction chimique
- Encrassement par solidification

Mais la plupart des dépôts réels sont le résultat de la combinaison d'au moins deux des types cités, un type peut prédominer et accélérer à la contribution des autres.

En considérant qu'une seule catégorie de ce phénomène plusieurs recherches ont été faites pour prévoir des méthodes performantes qui mettent en évidence des différents moyens pour minimiser l'encrassement ; la plupart des travaux se sont basés seulement sur le type d'encrassement particulaire (phénomène de déposition et de réentraînement)[33]

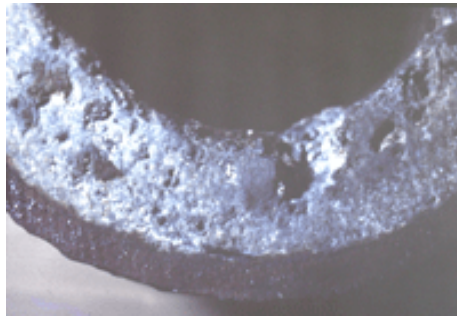


**Figure III.2 : Echangeur sale et propre**

### III.2.1 Encrassement particulaire :

La plupart des écoulements, de fluides industriels (liquides ou gazeux) transportent des particules en suspension dont la taille varie d'une fraction de  $\mu\text{m}$  à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  ; le dépôt est inévitable d'une partie de ces particules sur la surface d'échange [34] :

- L'eau de chaudière contenant des produits de corrosion.
- L'eau de tours de refroidissement.
- Les écoulements gazeux pouvant être fortement chargés de particules de poussières.
- Les fumées industrielles de résidus solides de combustion.

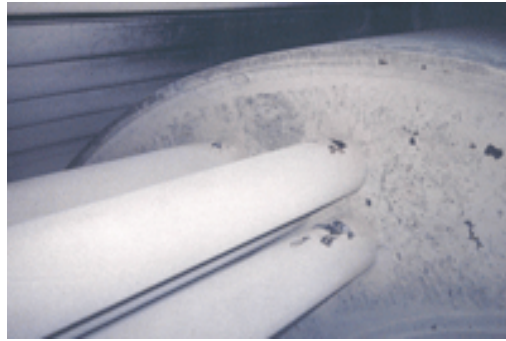


*Figure III.3 : Dépôt de forte épaisseur dans un tube de surchauffeur de chaudière MP.*

### III.2.2 Entartrage :

Il est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide [35] .il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques. Pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être réunies :

- La limite de solubilité doit être dépassée, c'est à dire qu'il y ait saturation : c'est l'aspect thermodynamique
- La vitesse de déposition doit être suffisamment rapide : c'est l'aspect cinétique. [38,39]



*Figure III.4 : Entartrage d'une chaudière à tubes de fumée (P= 15 bars).*

### III.2.3 Corrosion

C'est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement, on distingue :

- La corrosion uniforme caractérisée par une perte d'épaisseur régulière mais dont la vitesse n'est pas forcément proportionnelle au temps.
- La corrosion par piqûres ou l'attaque est limitée à des zones de très petites surfaces ( $\approx 1\text{mm}^2$ ).
- La corrosion fissurant à l'échelle microscopique intergranulaire ou transgranulaire.
- La corrosion sélective ou seul un élément d'un alliage subit une attaque sélective. [39]



*Figure III.5 : Importante corrosion*

L'encrassement par corrosion est un promoteur potentiel pour tous les autres types d'encrassement, les produits de corrosion peuvent servir de germes de nucléation pour des solutions sursaturées, piéger les particules en suspension, servir d'abris pour le développement de micro-organismes et mêmes catalyser certaines réactions. [40]

Les produits de la réaction qui se forment et restent sur la surface d'échange créent le dépôt, il s'agit là, d'un mécanisme de corrosion, in situ, lorsque l'encrassement est dû à des produits de corrosion générée ex situ, l'encrassement correspondant est de type particulaire.

### III.2.4 Encrassement biologique

Il est dû au développement de micro-organismes qui créent un film au contact de la surface d'échange, il peut être causé par trois grands types de micro-organismes: les bactéries, les algues et les champignons. [40]

- Le développement bactérien est dû à un apport nutritif (hydrocarbures, ammoniacs),
- Le développement des algues est dû à la présence d'énergie solaire avec photosynthèse,
- Les champignons se développent avec l'apport de nutriments mais surtout dus aux changements de conditions physiques ambiantes (pH, humidité, température).



*Figure III.6 : Dépôt de slime bactérien, hydrocarbures et oxydes métalliques dans un échangeur de chaleur eau hydrocarbures (Raffinerie de pétrole).*



### III.2.5 Encrassement par réaction chimique :

Il est dû à une réaction chimique qui se produit près d'une surface d'échange de chaleur et que les produits solides de la réaction s'y déposent, cette réaction est souvent une polymérisation et il en résulte la formation d'un dépôt de substance de hauts poids moléculaires. [41,42]

### III.2.6 Encrassement par solidification :

Il s'agit de solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous refroidie, c'est un sujet de plusieurs études sur les pipes soit théorique ou expérimental [43]

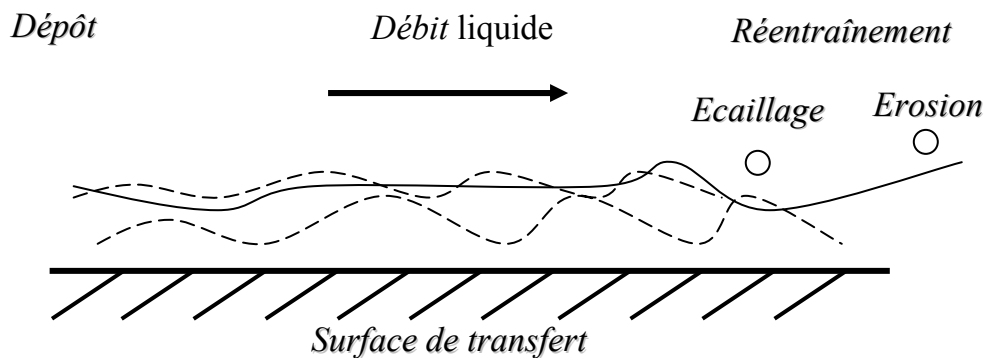
## III.3 Apparition et développement de l'encrassement

### III.3.1 Mécanisme de l'encrassement :

Phénoménologiquement, l'encrassement est un problème transitoire de chaleur et de masse qui nécessite l'action simultanée de plusieurs processus complexes. Selon [44], les mécanismes d'encrassement sont décomposés en cinq (5) événements séquentiels :

- **Initiation** : Cette phase est associée au temps nécessaire avant de pouvoir observer la formation d'un dépôt encrassant sur une surface propre.
- **Transport des particules dans le fluide jusqu'au voisinage de la paroi** : Ce transport peut être mécanique par impaction sur un obstacle, diffusif, par mouvement turbulent ou bien généré par un champ de force extérieur thermique ou électrique. Dans de nombreux cas, ces différents mécanismes peuvent coexister.
- **Adhésion des particules** : Toutes les particules amenées au voisinage de la paroi n'adhèrent pas obligatoirement sur celle-ci, les phénomènes sont essentiellement contrôlés par les forces d'adhésion et de cohésion du dépôt.

- **Réentraînement des particules déposées :** Certaines des particules déposées peuvent être réentraînées sous forme d'agglomérats arrachés à la couche de dépôt sous l'action des forces aérodynamiques.
- **Vieillessement du dépôt :** Il s'agit d'un changement de structure chimique ou cristalline du dépôt dû à des phénomènes tels que la déshydratation ou la polymérisation, il y'a alors diminution des forces d'adhésion du dépôt qui peut être arraché sous l'action des forces aérodynamiques.



**Figure III.7 :** Représentation schématique de l'encrassement dans le cas d'un liquide

### III.3.2 transport des particules :

Le transport des particules dépend fortement de la nature de l'écoulement et de la taille des particules. En effet, le diamètre des particules joue un rôle important dans la détermination du régime de transport à la paroi. L'interaction entre les particules et l'obstacle se trouvant dans l'écoulement est généralement caractérisée par le nombre de stokes  $Stk$ . Ce nombre est un paramètre sans dimension qui dépend du diamètre de la particule et qui rend compte de sa facilité à suivre l'écoulement. Il s'écrit comme le rapport entre les forces d'inertie et de traînée auxquelles est soumise la particule [45]:

$$Stk = \frac{\rho_p d_{part}^2 u}{18 \mu_{gaz} L_s}$$

Où  $L_s$  est la dimension caractéristique de la surface de collecte.

Ainsi, une classification des différents régimes de dépôt a été établie :

- Si  $Stk < 0.004$ , les particules sont de taille inférieure ou égale au micromètre et le dépôt est contrôlé par le phénomène de diffusion brownienne. La thermophorèse s'ajoute lorsqu'il existe un gradient de température entre le fluide et la paroi.
- Si  $0.004 < Stk < 0.125$ , le dépôt se fait par les fluctuations turbulentes de l'écoulement, les particules sont encore de petites dimensions.
- Si  $Stk > 0.125$ , l'impaction inertielle contrôle le transport des particules puisque les effets de la turbulence de l'écoulement s'atténue pour des particules de grandes dimensions.

### **III.4 Facteurs favorisant l'encrassement**

#### **III.4.1 Zones stagnantes :**

Les zones stagnantes sont des zones de dépôts préférentiels par exemple dans l'écoulement externe d'un échangeur à tubes et calandre, les particules se concentreront dans les zones de recirculation à l'aval des chicanes, avec le temps, les dépôts ont tendance dans certains cas à s'agglomérer dans l'espace entre les tubes et les chicanes et créer ainsi un blocage de l'écoulement de fluide.

Dans les échangeurs à plaques, spirales et tubulaires à tiges, l'absence de chicanes réduit le risque d'apparition des zones 'mortes'. Par contre quelque soit le type d'échangeur, des zones de faibles vitesses peuvent apparaître aux raccords entre les tuyauteries et l'échangeur.

#### **III.4.2 Effet de la vitesse :**

En règle générale, plus la vitesse est importante, plus l'encrassement est faible, bien entendu, la vitesse retenue reste limitée par les contraintes de pertes de charges et les risques d'érosion, [46,47] la vitesse a un effet prépondérant sur le

réentraînement [48]. La dureté du dépôt est également un paramètre important pour le réentraînement, cela a été prouvé par Rindt et coll [49], dans leur expérience ils ont utilisé des particules de différentes tailles et matières pour des vitesses d'écoulement différentes. Ils ont trouvé que les petites particules s'attachent premièrement au parois puis les particules larges. Pour éviter l'encrassement une vitesse d'écoulement importante fait diminuer l'épaisseur des dépôts. Avec un dépôt dur et adhérent on constate une évolution linéaire de la résistance d'encrassement par contre avec des dépôts mous, l'évolution de la résistance d'encrassement prend la forme asymptotique classique.

### **III.4.3 Effet de la température de surface :**

La présence des points chauds (ou froids) sur la surface d'échange est souvent liées à un problème de répartition de vitesse au voisinage de la paroi. Il est bien connu que lorsque la température de surface croit, le dépôt des sels de solubilité inverse est favorisé. En ébullition, cela reste vrai quelque soient les sels en présence [50,51]. La même règle est encore vraie pour l'encrassement biologique jusqu'à une certaine température limite (de l'ordre de 35°C).

Les dépôts particuliers sont également influencés par les gradients de températures car les phénomènes de thermophorèses agissent dans la direction de ce gradient, pratiquement, cela revient à accentuer les dépôts lorsqu'on refroidit le fluide encrassant et à diminuer ceux-ci lorsqu'on le chauffe.

### **III.4.4 Etat de surface. Rugosité :**

Les surfaces rugueuses ont tendance à favoriser les dépôts, particulièrement dans la phase d'initiation de l'encrassement, par contre, par la suite, le dépôt modifie la rugosité de la surface et ce n'est plus la rugosité initiale qui contrôle le phénomène, mais celle du dépôt. [52]

### **III.4.5 Matériau de construction, corrosion :**

Le choix d'un matériau approprié constitue la méthode la plus radicale pour éviter la corrosion. En présence de produits chimiques, les problèmes de corrosion

sont complexes, une variation de composition ou la présence d'impuretés dans la solution peuvent modifier le comportement du matériaux.

Pour limiter les effets néfastes de l'encrassement, il est possible d'agir sur ces divers paramètres [52] cités ci-dessus à savoir :

- Vitesses
- Températures
- Etat de surfaces
- Nature des matériaux

### III.5 Prévention de l'encrassement dans les échangeurs

Il existe de nombreuses méthodes pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur, le choix de l'une ou de plusieurs de celle-ci dépend de l'efficacité de la méthode, du type d'encrassement et ainsi de nombreux paramètres économiques. Le tableau suivant résume les différentes actions pendant les quatres stades de vie de l'échangeur. [53]

Phase fonctionnement	Phase construction et montage	Phase fonctionnement	Phase d'arrêt
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Choix de type d'échangeur</li> <li>• choix de la géométrie et de la configuration</li> <li>• choix des conditions de fonctionnement (température, débit,..)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•assurance qualité sur la fabrication</li> <li>• protection pendant le transport et lors du stockage</li> <li>• opération de nettoyage et de passivation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• maintien des conditions de fonctionnement (températures, débit,..)</li> <li>• prétraitement des fluides</li> <li>• utilisation d'additifs (inhibiteurs, antitartres, dispersants, acides)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• démontage et nettoyage manuel</li> <li>•attaques mécanique du dépôts(perçage,..)</li> <li>• nettoyage hydraulique à la lance(vapeur,air)</li> </ul>

*Tableau III.1: Action envisageable pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur*

### **III.5.1 pendant la phase de dimensionnement**

Il y a deux questions fondamentales auxquelles un projeteur est confronté lors du dimensionnement d'un échangeur comportant certains risques d'encrassement :

- quel est le type d'échangeur le mieux adapté au problème posé ?
- quels sont les paramètres physiques qui permettent de réduire la tendance à l'encrassement ?

#### **A/ Sensibilité à l'encrassement des divers types d'échangeurs :**

Pour un service thermique donné, le choix entre les différents types d'échangeurs dépend de très nombreux paramètres tels que :le coût,l'encombrement,le poids,les niveaux de pressions ou de températures mais dans certains cas, l'encrassement peut être considéré comme un paramètre important.

Pour les échangeurs à tubes et calandre: qui sont les plus fréquemment utilisés dans l'industrie, ils peuvent être fabriqués à partir de nombreux matériaux et sont utilisables pratiquement sans limites de températures et de pression.

Le dimensionnement devra prendre en compte les recommandations suivantes : [54]

- Utiliser un jeu réduit entre les chicanes et la calandre pour éviter qu'une partie importante de l'écoulement ne court-circuite le faisceau.
- Utiliser une ouverture des chicanes d'environ 20% du diamètre de la calandre et également une distance entre chicanes adéquate, pour avoir la vitesse la plus uniforme possible dans le faisceau.
- Eviter les zones mortes et les zones de recirculation en particulier aux raccordements de l'échangeur.
- Utiliser de préférence un faisceau à pas carré pour faciliter le nettoyage manuel.
- Equiper l'installation de filtres pour minimiser l'encrassement particulière.

- Equiper l'échangeur de plusieurs événements pour permettre le relâchement des vapeurs corrosives ainsi que des équipements annexes pour recueillir ces vapeurs.
- Minimiser les fissures microscopiques préexistants dans le matériaux pour éviter (ou retarder) l'apparition de la corrosion.

## **B/ Paramètres physiques permettant de réduire la tendance à l'encrassement :**

Il s'agit des paramètres qu'on permet d'ajuster pour réduire la tendance de l'encrassement :

- Des zones stagnantes ou de faibles vitesses, qui sont des zones où les dépôts s'accumuleront plus facilement.
- Des vitesses qui doivent être optimisées.
- Des points chauds (ou froids) qui doivent être évités.
- Des états de surface qui jouent un rôle important vis-à-vis de l'initiation de l'encrassement.
- Des matériaux eux-mêmes qui doivent être choisis pour éviter la corrosion.

### **III.5.2 Pendant la phase de fabrication de l'échangeur et de sa mise en route.**

La construction des équipements de transfert thermique peut s'étendre sur une durée relativement longue et les surfaces d'échange sont alors exposées à des conditions diverses. L'encrassement peut être initié lorsque les essais sous pression de l'échangeur sont réalisées avec une eau de mauvaise qualité, non suffisamment rincée à l'eau propre et à l'azote. En conséquence, il est nécessaire de protéger les surfaces d'échange de tout environnement favorisant la corrosion ou le dépôt.

Lors de la mise en service de l'installation, compte tenu de l'excès de surface attribuée pour tenir compte de l'encrassement, l'échangeur ne fonctionne pas dans des conditions optimales, en effet, des vitesses de circulation plus lentes et des températures de surface plus importantes favorisent l'encrassement .

Des efforts doivent être faits au démarrage de l'installation pour fonctionner aux conditions nominales et employer un moyen de traitement de l'eau limitant l'apparition de l'encrassement, il est conseillé d'équiper l'échangeur de plusieurs capteurs de températures et de débit pour pouvoir suivre l'évolution du degré d'encrassement et agir en conséquence lors d'un arrêt prolongé de l'installation, il faut prendre des précautions nécessaires (vidange, mise sous vide, traitement, ..... ) pour éviter, d'une part la corrosion rapide des surfaces et d'autre part l'apparition d'un encrassement biologique de l'appareil.[55]

### **III.5.3 Pendant la phase de fonctionnement**

Les procédés mécaniques ou chimiques de prévention de l'encrassement pendant la phase de fonctionnement de l'échangeur peuvent améliorer de façon significative les performances de l'appareil, mais également permettent d'augmenter le temps de service entre deux arrêts de maintenance.

Suivant la nature de l'encrassement, différents procédés existent :

- Procédés mécaniques pour les liquides pour le nettoyage en continu de la surface interne d'échangeurs tubulaires :
  - à boules
  - à ressorts
  - à brosses
- Procédés mécaniques pour des échangeurs fonctionnant des gaz encrassant tels que :
  - La projection de vapeur ou d'air comprimé
  - Le nettoyage à l'eau
  - Le grenailage
  - Le soufflage acoustique
  - Le nettoyage par chocs thermiques

En ce qui concerne les échangeurs à plaques, des systèmes analogues existent, toutefois, il est aussi possible d'utiliser :

- des systèmes à inversion de débits,



- des systèmes à surface raclée,
- un nettoyage par chocs thermiques,

De la même façon, des procédés mécaniques, chimiques, électriques ou magnétiques sont utilisés pour éviter ou minimiser les dépôts entartrants ou l'encrassement biologique.

Une autre solution consiste à introduire des filtres en amont des échangeurs.

### III.5.4 Méthodes de nettoyage des échangeurs pendant les phases d'arrêts

Dans de nombreux cas, que les techniques de traitement des fluides et de nettoyage en continu soient ou non utilisées, il est nécessaire de procéder à un nettoyage complet de l'appareil.

Cette opération s'effectue pendant les phases d'arrêts de l'installation et deux méthodes peuvent être utilisées (soit ensemble, soit séparément) :

- Nettoyage mécanique,
- Nettoyage chimique.



*Figure III.8 : nettoyage a l'aide d'un pistolet hydraulique*

#### A / Nettoyage mécanique

Le nettoyage mécanique pendant les phases d'arrêts peut être effectué sur l'échangeur en place lorsque l'espace disponible le permet ou sur une aire de nettoyage (échangeur démonté), plusieurs techniques peuvent être mise en œuvre :

##### ❖ Nettoyage à l'eau sous pression

Elle est efficace pour enlever les dépôts à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes d'échangeur ou pour d'autres types de géométrie, de façon occasionnelle, du

sable peut être injecté avec l'eau pour arracher les dépôts durs mais dans ce cas, il y a risque d'érosion de la surface et surtout de destruction du film protecteur anticorrosion.

#### ❖ **Nettoyage à l'aide d'outils**

Cette technique est utilisée pour enlever les dépôts mêmes très durs à l'intérieur des tubes rectilignes de chaudières, de condenseurs, ou de tous autres échangeurs de chaleur. Ces outils peuvent être :

- A moteur d'entraînement électrique ou pneumatique entraînant une transmission flexible en rotation à l'extrémité de laquelle sont montés des outils tels que : des outils à molettes travaillant par frappe élastique, des outils à lames ou à éléments expansibles travaillant par grattage, des écouvillons (ou brosses),
- A moteur d'entraînement pneumatique pénétrant dans les tubes, montés à l'extrémité d'un tuyau d'alimentation en air, les outils utilisés :
  - Outils à molettes
  - Outils à lames
  - Tarières sur joint de cadran pour casser les dépôts durs
- A moteur d'entraînement pneumatique ou électrique à percussion entraînant des tubes épais se rabotant entre eux et à l'extrémité desquels sont montés les outils de nettoyage :
  - Taillant pour enlèvement de dépôts très durs et épais,
  - Trépan pour enlèvement de tous dépôts,
  - Traceurs pour enlèvement de certains dépôts mous ou pâteux,
  - Ecouvillons
  - Mèches hélicoïdales pour enlèvement de dépôts collants
- Pistolet hydraulique (pression d'utilisation : 6 à 15 bar) propulsant des écouvillons spéciaux dans les tubes : ils permettent d'enlever des dépôts de boues ou d'algues dans des tubes de petit diamètre.



*Figure III.9 : outil de nettoyage mécanique*

## **B / Nettoyage chimique**

Il présente de nombreux avantages [56] :

- Opération rapide et efficace,
- Les surfaces d'échange ne subissent pas de dégâts mécaniques importants,
- Les solutions chimiques pénètrent jusqu'aux zones, inaccessibles de l'échangeur et le traitement de toute la surface d'échange est réalisé,
- Il nécessite moins de main d'œuvre et peut se réaliser sans démontage de l'appareil.

## **C / Autres méthodes :**

D'autres techniques de nettoyage sont également utilisées, notamment dans les échangeurs véhiculant des gaz encrassant, il s'agit des techniques :

- De dissolution des dépôts à l'aide d'un solvant,
- De création d'un choc thermique au niveau de la surface d'échange pour fragiliser le dépôt et permettre son soufflage hydraulique.

## **III.6 Contrôle de l'encrassement**

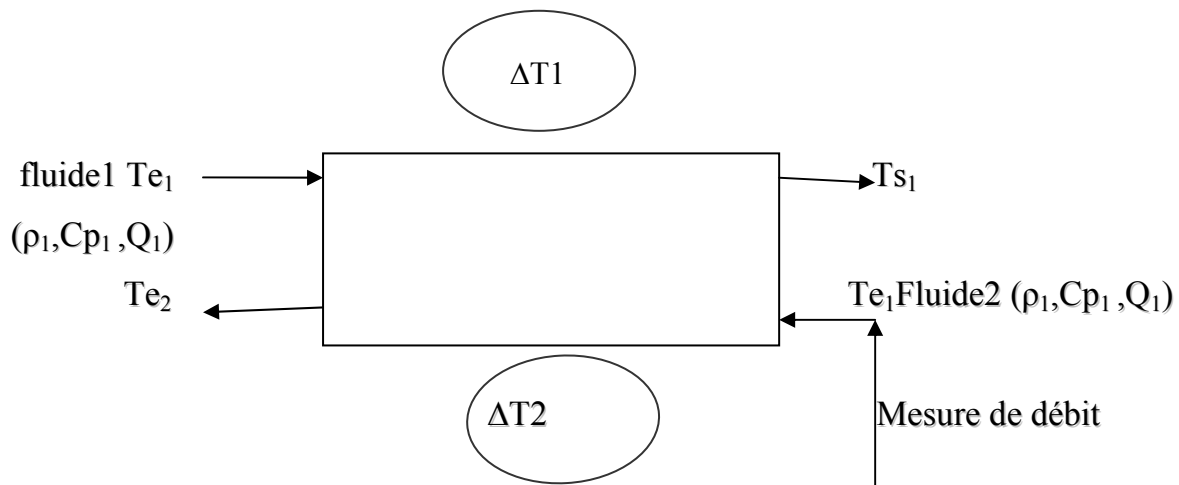
Il s'avère souvent rentable, pour l'utilisateur de l'échangeur, d'être capable de détecter l'apparition de l'encrassement et de suivre son évolution au cours du temps, de manière à établir un programme d'entretien ou bien de décider d'une action pour prolonger le fonctionnement de l'échangeur jusqu'au prochain arrêt prévu.

Les méthodes à mettre en œuvre pour détecter et suivre l'évolution de l'encrassement sont de deux types :

- Mesure directe aux bornes de l'échangeur,
- Mesure à l'aide d'une sonde.

### III.6.1 Mesure directe aux bornes de l'échangeur

Cette méthode consiste à réaliser un bilan thermique aux bornes de l'échangeur par l'intermédiaire des mesures de températures d'entrée et de sortie de chacun des fluides, ainsi qu'au moins une mesure de débit sur un des deux fluides [ 57], il peut être également envisagée de suivre l'évolution de la perte de charge aux bornes de l'échangeur sur le circuit présentant des risques d'encrassement, cette méthode quoique indirecte, permet de détecter à quel moment il faut arrêter l'installation pour nettoyage.



*Figure III.10 : Schéma simplifié d'une mesure directe*

Pour accéder à la résistance d'encrassement  $R_d$ , il faut déterminer :

- Au démarrage de l'installation, le coefficient d'échange en conditions propre  $U_p$
- Périodiquement, le coefficient d'échange global en conditions encrassantes  $U$
- La résistance d'encrassement est donnée par  $R = 1/U - 1/U_p$

Si les conditions aux bornes de l'échangeur (débits, températures d'entrée) ne sont pas stationnaires, il est nécessaire de réévaluer le coefficient d'échange global en conditions propres correspondant aux nouvelles conditions de fonctionnement.

### III.6.2 Mesure à l'aide d'une sonde

L'apparition et le suivi de l'encrassement de l'échangeur sont mesurés grâce à une sonde disposée par exemple en dérivation [58]

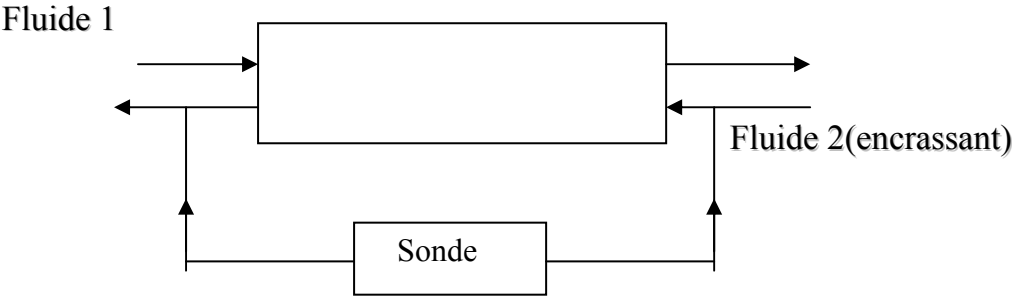


Figure III.11 : Principe d'une mesure avec une sonde

Comme celui élaborée par [59]

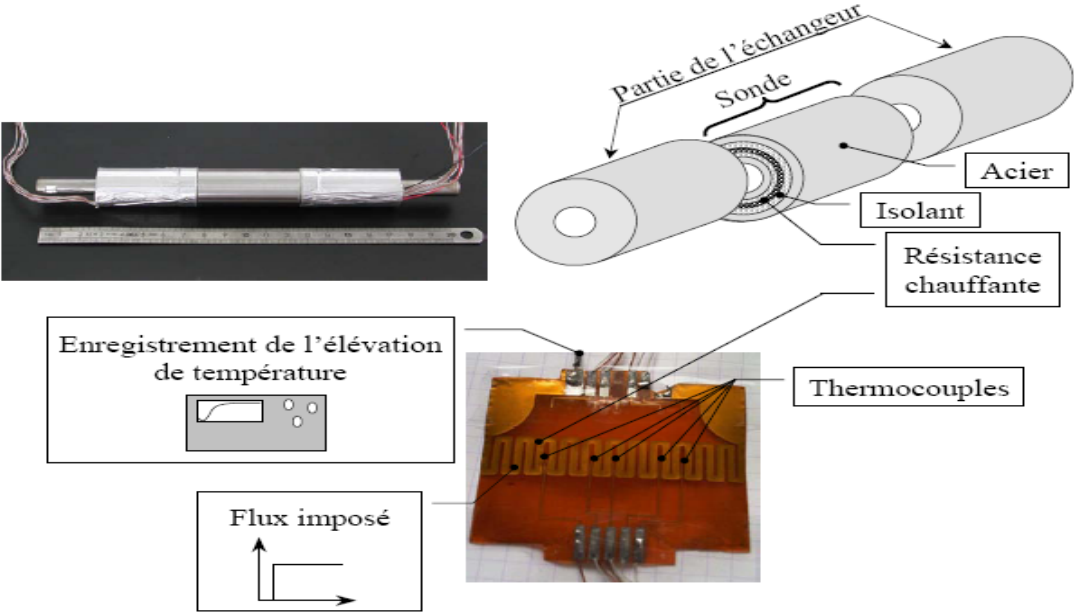


Figure III.12 : Schéma du capteur à excitation thermique interne

Un des principaux avantages de cette méthode est qu'elle opère directement sur le fluide encrassant, il existe différents types de sonde mais pour que les résultats soient directement exploitables, l'élément de mesure doit répondre aux deux conditions suivantes :

- ◆ les conditions thermiques et hydrauliques doivent être représentatives de celles présentés dans l'échangeur et si possible au point le plus sensible de celui-ci vis-à-vis de l'encrassement.
- ◆ l'appareil doit être réalisé si possible avec le même matériau que l'échangeur.

Les différents types de sondes rencontrés utilisent deux méthodes pour la mesure du coefficient d'échange :

#### **Méthode en régime permanent :**

Suivant le type de conditions aux limites recherchées (flux ou températures de paroi constants), le flux de chaleur au niveau de la sonde peut être généré par un chauffage électrique mais également par un chauffage (ou un refroidissement) crée par la condensation d'une vapeur.

Pour un tube parcouru par un fluide à température constante  $T_f$  et recevant un flux de chaleur radial  $P$ , le coefficient d'échange de chaleur  $U$  est donné par la relation suivante :

$$P = U.S. (T_p - T_f)$$

avec  $S$  surface d'échange chauffé et  $T_p$  température de la paroi.

#### **Méthode en régime transitoire :**

Cette méthode est basée sur le principe suivant : le tube étant porté à une température légèrement supérieure à celle du fluide. On supprime brusquement la source de chaleur, l'évolution de la température du tube avec le temps fournit une constante de temps liée au coefficient d'échange que l'on cherche à mesurer.

Cette méthode ne nécessite que la mesure en transitoire de la température de la paroi du tube. [60]

### III.7 Résistance d'encrassement

#### III.7.1 Calcul de la résistance d'encrassement :

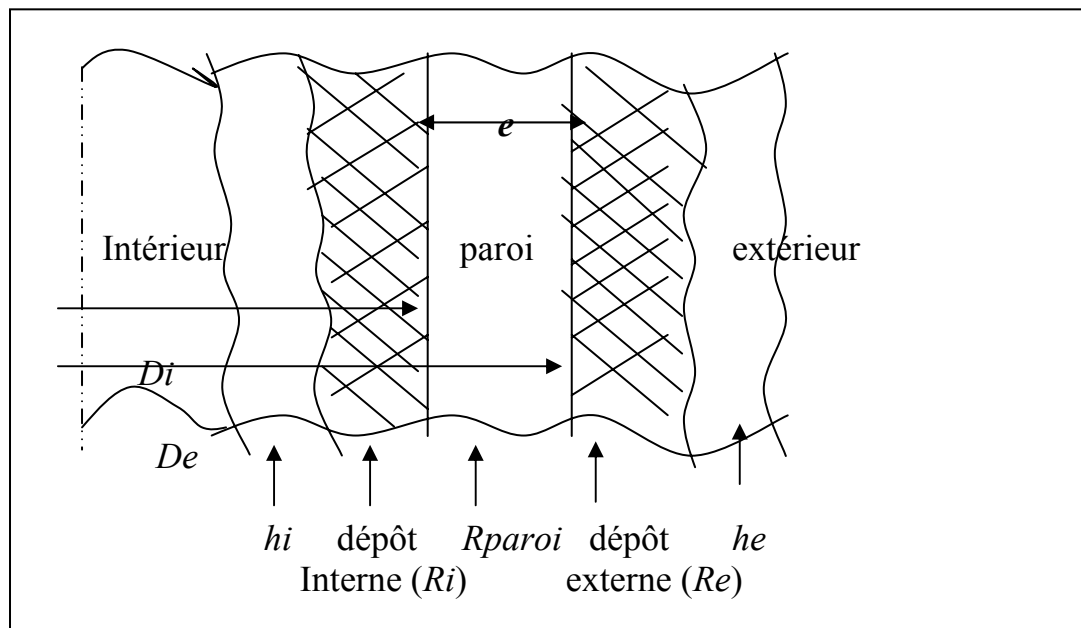
Dans un échangeur classique constitué d'un fluide chaud et d'un fluide froid séparé par une paroi (figure II.11, II.12), le transfert de chaleur du fluide chaud vers le fluide froid peut être décomposé comme suit :

- Convection fluide chaud - paroi (coefficient d'échange convectif  $h_{ext}$  supposé constant)
- Conduction à travers la paroi (de conductivité thermique  $\lambda$  d'épaisseur  $e$  et de surfaces externes et interne  $S_{ext}$  et  $S_{int}$ )
- Convection paroi fluide froid (coefficient d'échange convectif  $h_{int}$  supposé constant).

Le flux de chaleur  $\phi_p$  transmis du fluide chaud au fluide froid s'écrit alors

$$\phi_p = \frac{\Delta T}{\left( \frac{1}{h_{int} S_{int}} + \frac{e}{\lambda \bar{S}} + \frac{1}{h_{ext} S_{ext}} \right) S_{ext}}$$

Où  $\Delta T$  est la différence moyenne de température entre les fluides chaud et froid.

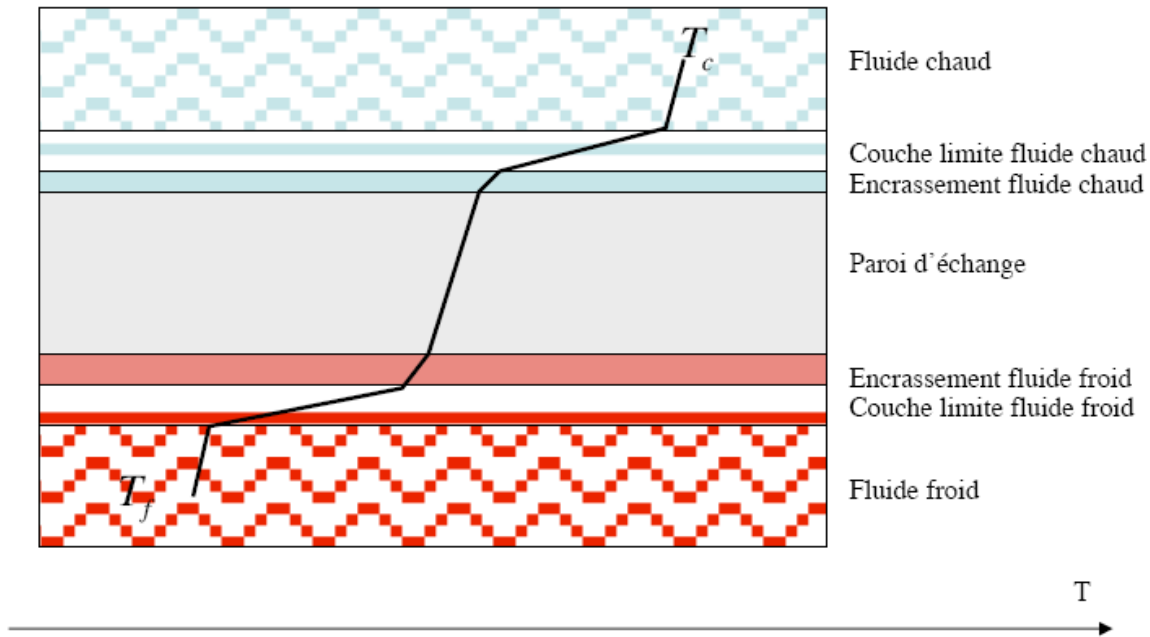


**Figure III.13:** résistances thermiques d'encrassement des dépôts internes et externes localisées sur une surface d'échange

Le coefficient d'échange globale ( $U_p$ ) en condition propre rapporté à la surface extérieure est alors obtenu par

$$\frac{1}{U_p} = \left( \frac{1}{h_{int} \cdot S_{int}} + \frac{e}{\lambda S_m} + \frac{1}{h_{ext} \cdot S_{ext}} \right) S_{ext} = R_p$$

Au bout d'un certain temps de fonctionnement de l'échangeur, la paroi d'échange se recouvre d'un film d'encrassement. Ces dépôts ont une conductivité thermique faible et constituent des couches isolantes supplémentaires s'opposant à l'échange, le schéma suivant montre le profil de température en présence des dépôts.



**Figure III.14 :** Le profil de température et les résistances au transfert de chaleur

En considérant que le coefficient d'échange convectif ne varie pas avec l'encrassement, le coefficient d'échange global est alors obtenu par :

$$\frac{1}{U} = \left( \frac{1}{h_{int} \cdot S_{int}} + \frac{e}{\lambda \cdot S_m} + \frac{1}{h_{ext} \cdot S_{ext}} \right) S_{ext} + R_d = R_p$$



D'où de deux équations on aura

$$R_d = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_p}$$

Les effets de tels dépôts peuvent alors être déterminés en connaissant les valeurs de la résistance d'encrassement et du coefficient d'échange global.

### III.7.2 Modélisation de la cinétique des dépôts :

Le bilan de l'encrassement peut s'exprimer par la différence entre les densités de flux massiques de dépôts  $\Phi_d$  et de réentraînement  $\Phi_r$  soit :

$$\frac{dm_d}{dt} = \Phi_d - \Phi_r = \rho_d \cdot \lambda_d \cdot \frac{dR}{dt}$$

On désigne par  $m_d$  : la masse déposée par unité de surface d'épaisseur  $e_d$  de conductivité thermique  $\lambda_d$  de masse volumique  $\rho_d$  et responsable d'une résistance  $R_d$

On a :

$$e_d = \frac{m_d}{\rho_d} \quad \text{et} \quad R_d = \frac{m_d}{\rho_d \cdot \lambda}$$

D'où la nécessité de connaître les modèles de dépôts et de réentraînement qui dépendent d'un grand nombre de paramètres et peuvent être formulés différemment selon les types d'encrassement et les mécanismes de contrôle des processus de dépôt et de type de réentraînement.

Le tableau suivant donne quelques modèles de dépôts et de réentraînement :

Année	Densité de flux de déposition (dm /dt)=m <sub>d</sub> <sup>•</sup>	Domaine étudié
1948	$m_d^{\bullet} = c^{te} q^{\bullet} = c^{te}_1 u = c^{te}_2 / (c^{te}_3 + m)$ [61]	Entartrage des vaporisateurs, Δt constant
1959	$m_d^{\bullet} = c^{te}_4 u_b c_b$ [62]	L'encrassement particulaire et les autres
1961	$m_d^{\bullet} = JS = Jce^{-E/RT_s}$ [63]	L'encrassement particulaire
1962	$m_d^{\bullet} = c^{te}_5 u^n = c^{te}_6 / (a_7 + m)^n$ [64]	Entartrage de CaCO <sub>3</sub> (Δt constant)
1964	$m_d^{\bullet} = k (C_b - C_s)^n$ [65] $= c^{te}_5 u^n, \Delta t \text{ constant}$ [64] $= c^{te}_8, q^{\bullet} \text{ constante}$ [66]	Entartrage pour les solutions saturées, pour les solutions insaturées est compliquée avec Δt constant
1968	$m_d^{\bullet} = k_d C_b = k_m C_b$ [67]	Transfert de masses par convection des espèces déposables.
1970	$m_d^{\bullet} = k_d C_b$ [68]	Déposition d'oxyde de fer
1970	$m_d^{\bullet} = k_m (C_b - C_s) Sc^{te}$ [69] $= c^{te}_0 k_m (C_b - C_s) c_1 e^{-E/RT_s} / (u^*)^2$	Encrassement par réaction chimique et particulaire
1970	$m_d^{\bullet} = k_d C_b = C_b / ((1/k_m) + (1/Su_w))$ [70]	Encrassement particulaire
1972	$m_d^{\bullet} = a_c p_v \Omega e^{-E/RT_s}$ [71]	Service de l'eau de refroidissement
1973	$m_d^{\bullet} = C_b / ((1/k_m) + (x/D_f))$ [72] $= \rho_f D_f C_b / (\rho_f D_f / k_m) + m$	Transfert de masses par convection de O <sub>2</sub> par séries avec la diffusion de O <sub>2</sub> par l'accroissement des dépôts
1973	$m_d^{\bullet} = C_d C_b = C_b / ((1/k_m) + (1/k_r))$ [73]	Dépôts colloïdaux à travers la barrière de potentiel de zêta au mur
1974	$m_d^{\bullet} = m_{d0}^{\bullet} e^{-cte m}$ [74]	Le dépôt fin de magnétite de la suspension aqueuse
1988	$m_d^{\bullet} = \eta_{tot} (\rho_g u_o w_{part} S_{proj})$ [75]	Encrassement particulaire
1996	$m_d^{\bullet} = m_d \varpi (1 - e^{-(cte m t)})$ [76]	Encrassement particulaire

*Tableau III.2 : Quelques modèles de déposition*

Année	Densité de flux de réentraînement = $(-dm / dt) = \dot{m}_d$	Mécanisme de réentraînement supposée
1959	$\dot{m}_r = c_1^{te} \tau_s m$ [77]	Délitescence
1968	$\dot{m}_r = c_2^{te} \dot{m}_d$ [78]	Erosion et rupture
1970	$\dot{m}_r = c^{te} m$ [79]	Erosion, Délitescence
1972	$\dot{m}_r = c_3^{te} \tau_s m^i / \psi$ [80]	Délitescence
1973	$\dot{m}_r = c_4^{te} m_{loose}$ [81]	Erosion
1977	$\dot{m}_r = c_5^{te} (C_s - C_b) m$ [82]	Dissolution

**Tableau III.3 : Quelques modèles de réentraînement**

Ces modèles laissent apparaître que le flux de dépôts est fonction de la concentration de particules dans l'écoulement.

En revanche, beaucoup d'attention a été portée sur la détermination de méthodes prédictives de l'encrassement sur les surfaces d'échange. En effet très peu d'équations existent pour prédire les résistances d'encrassement et les pertes de charge des échangeurs de chaleur sous conditions encrassantes :

La cinétique de dépôts joue le rôle d'équation d'état thermodynamique faisant apparaître la variable temps ; or ce facteur est indispensable pour la détermination de la durée optimale de fonctionnement  $t_1$  avant le nettoyage qui a lui même une durée  $t_2$

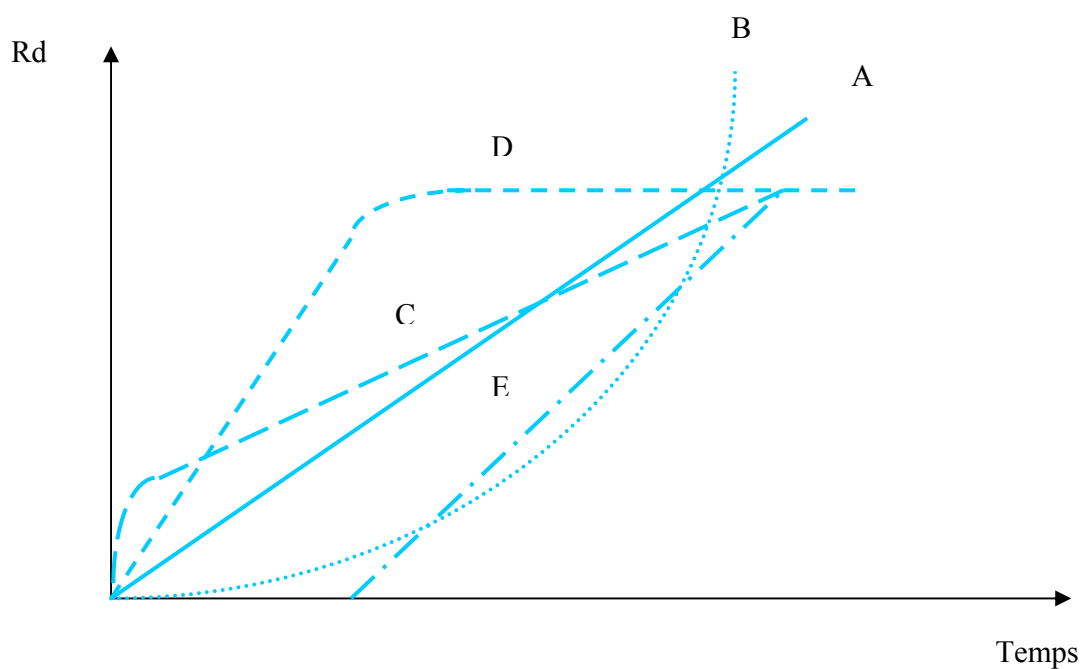
Selon le type de dépôt [83] il apparaît différentes évolutions, dont les plus courantes sont représentées sur la figure (III.13)

Il s'agit

- De l'évolution linéaire (*courbe A*) : ce type de comportement caractérise les dépôts dits durs et adhérents.
- De l'évolution quadratique (*courbe B*).
- De l'évolution en racine carrée du temps (*courbe C*).

Ces trois lois correspondant à une loi en puissance du temps, dont l'exposant est un paramètre qui dépend des propriétés du système.

- De l'évolution asymptotique (*courbe D*) : ce type de comportement est caractéristique des dépôts fragiles s'écaillant facilement sous l'influence des forces de cisaillement provoquées par le passage du fluide. Le comportement asymptotique de cette résistance a été observé de nombreuses fois dans des situations d'encrassement particulière. Dans la pratique, les courbes expérimentales présentent une évolution en dents de scie due au réentraînement d'une partie du dépôt par paquets.
- Dans certaines configurations, on peut observer la présence d'une période d'initiation (*courbe E*)



**Figure III.15** : Représentation de l'évolution des dépôts

### III.7.3 Dimensionnement d'un échangeur

Lors de la conception d'un échangeur de chaleur, il est nécessaire de connaître les valeurs de résistances d'encrassement dans les conditions d'utilisations souhaitées. Les valeurs de coefficient de transfert global sont déterminées à partir de méthodes plus au moins élaborées ; les résistances d'encrassement sont extraites de tables, soit issues de l'expérience même de l'utilisateur, le tableau suivant donne quelques valeurs de résistances d'encrassement conseillées pour le dimensionnement des échangeurs sur fumées industrielles [84]

Nature de l'effluent	Résistance d'encrassement ( $10^3 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ )
<b>Gaz Propre</b>	
Gaz naturel	0,09 – 0,53
Propane	0,17 – 0,53
Butane	0,17 – 0,53
Turbine à gaz	0,17
<b>Gaz moyennement encrassant</b>	
Fuel n°2 (% soufre < 1 %)	0,35 – 0,70
Turbine à gaz	0,26
Moteur diesel	0,53
<b>Gaz fortement encrassant</b>	
Fuel n°6 (% soufre < 4 %)	0,53 – 1,23
Pétrole brut	0,70 – 2,64
Pétrole résiduel	0,90 – 3,52
charbon	0,90 – 8,80

**Tableau III.4 : Valeurs des résistances d'encrassement conseillées pour le dimensionnement des échangeurs sur fumées industrielles[84]**

- Ces valeurs font abstraction complète de l'influence des conditions de fonctionnement réelles et de la nature des surfaces d'échange alors que le processus d'encrassement est évidemment une fonction du temps, une valeur constante de la résistance d'encrassement est utilisées.
- Le fait qu'au temps  $t=0$ , l'échangeur soit propre et qu'il fonctionne, par la suite, sous des conditions drastiques, est rarement pris en compte,
- Les tubes lisses ne subissent pas l'encrassement de la même façon que les tubes ailetés, pourtant la même valeur de la résistance d'encrassement leur est attribuée,
- Ces valeurs sont indépendantes des niveaux de températures de l'échangeur ainsi que des vitesses d'écoulement des fluides.

Ainsi la mauvaise connaissance de ces résistances conduit à un surdimensionnement des surfaces d'échange de l'échangeur par rapport à celui effectué en conditions propres.

L'affectation d'une valeur exagérément grande à la résistance d'encrassement ne garantit pas un temps plus long d'utilisation. Bien au contraire, dans la plupart des cas, l'encrassement conduit à un trop faible échange thermique.

Le calcul d'un coefficient d'excès de surface  $C_s$  permet de vérifier que le surdimensionnement reste dans des limites acceptables :

- $C_s = 10\%$  représente la valeur minimale de surdimensionnement pour la prise en compte de l'encrassement.
- $15\% < C_s < 25\%$  représente les valeurs usuelles pour un grand nombre de cas.
- $30\% < C_s < 50\%$  représente un surdimensionnement extrême à utiliser dans les cas sévères d'encrassement ou quand il y a risque de pénalités si l'échangeur ne réalise pas les performances escomptées.

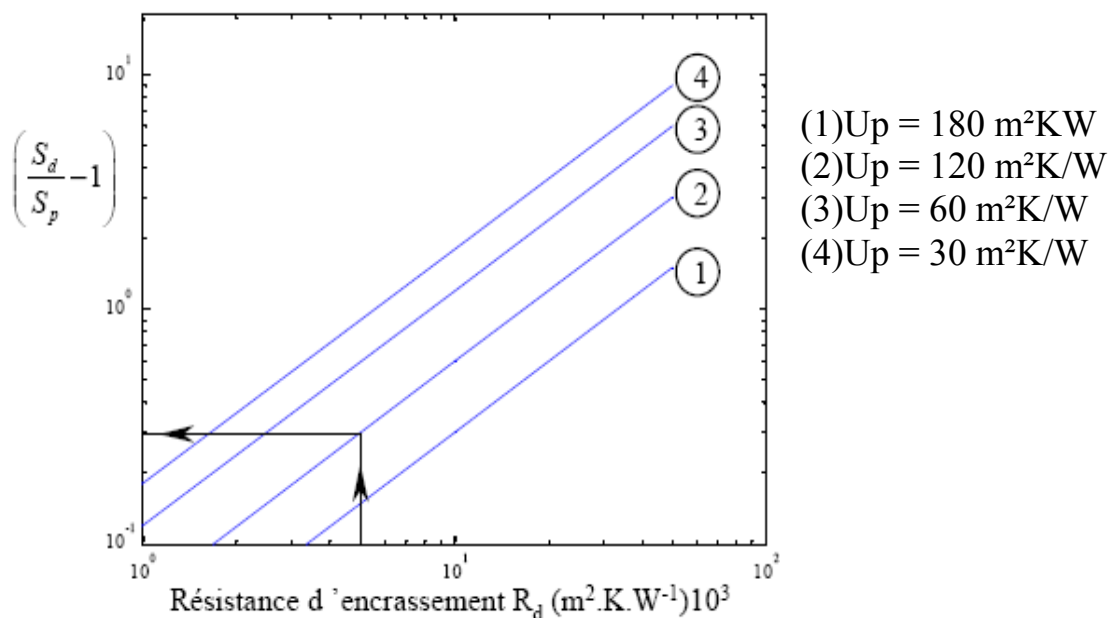
Le coefficient d'excès de surface est tel que :

$$C_s = \left( \frac{U_P}{U - 1} \right) * 100$$

En exprimant ce coefficient en fonction de la surface d'échange en conditions propres  $S_p$  et de la surface d'échange nécessaire en conditions encrassantes  $S_d$ , il vient :

$$\left( \frac{S_d}{S_p} - 1 \right) = (U_p) \cdot R_d$$

Il faut remarquer que plus le coefficient d'échange thermique en conditions propres est grand, plus la surface d'échange en œuvre est importante,



**Figure III.16 :** Excès de surface d'échange en fonction de la résistance d'encrassement  $R_d$

Pour une résistance d'encrassement  $R_d = 0.005 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$  et pour un coefficient d'échange global en conditions propres  $U_p = 60 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ , le rapport de surface à prendre en compte est de 1.3. Le coefficient d'excès de surface  $C_s$  est alors de 30%. En aucun cas, ce coefficient ne doit excéder 50%, sinon il faut envisager d'autres solutions pour pallier les conséquences de l'encrassement.

Le projeteur est donc face à un dilemme ; il est confronté d'une part à des valeurs de résistances d'encrassement peu précises issues de tables,et , d'autre part à des modèles de dépôts sophistiqués mais peu exploitables.

## **Conclusion**

Ce chapitre constitue une étude bibliographique sur l'encrassement des échangeurs de chaleur : une description des différents types d'encrassement et les remèdes.

Il met en évidence que la perspective de l'encrassement des surfaces d'échange est un frein non négligeable à la récupération d'énergie.



# **Chapitre IV**

## **Contexte Expérimental**

## **CHAPITRE IV : Contexte Expérimental**

Les stratégies industrielles actuelles visent à améliorer la qualité en accroissant la sûreté de fonctionnement et en augmentant la vitesse de production, en utilisant parfois des modèles décrivant tels ou tels processus.

La modélisation est souvent faite par la maîtrise d'œuvre informatique. C'est malencontreux, car les priorités de cette maîtrise résident dans le fonctionnement de la plate-forme informatique et non dans les processus de l'entreprise. [85]

### **IV.1 Modélisation**

#### **IV.1.1 Finalités d'une modélisation**

Tout modèle a deux finalités, l'une technique, l'autre intellectuelle :

- Finalité technique : fournir des spécifications claires pour produire, puis exploiter, l'application informatique qui outille chaque processus ;
- Finalité intellectuelle : fournir au métier une élucidation de ses objets, de ses concepts, de son référentiel, de ses processus.

#### **IV.1.2 Comment modéliser ?**

Modéliser consiste à créer des modèles mathématiques de la réalité ; ces derniers, sont en général des équations qui sous certaines conditions ont des solutions. La résolution de ces équations peut dans certains cas se faire soit analytiquement pour les modèles simples soit numériquement pour les modèles compliqués ;

La validité du modèle est fonction du degré de déviation inévitable entre le modèle choisi et la réalité [86], par ailleurs le choix du système de fonction, se base sur le modèle analytique de l'objet si ce dernier est connu, dans le cas contraire, on a recours au principe de la boîte noire qui consiste à supposé un modèle de la classe de fonction puis procéder à la vérification de la justesse du modèle ainsi obtenu. La méthode la plus utilisée pour estimer les coefficients de la régression est la méthode de moindres carrés, méthode des moments.

## IV.2 Extrapolation déterministe :

Les modèles sont dits déterministes lorsque leurs valeurs futures sont connues avec certitude à tout instant. Ainsi ne font-ils aucune référence aux sources d'incertitudes et de hasard des processus stochastiques. Les méthodes purement déterministes apportent une simplicité au détriment de la précision et ne permettent pas d'établir de quantification de l'incertitude via, par exemple, un intervalle de confiance. [87]

### Tendance linéaire

On considère le modèle

$$y = b_0 + x_1 b_1 + \dots + x_k b_k + u$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} y = \text{variable dépendante} \\ x = \text{variables explicatives} \\ u = \text{terme d'erreur} \\ b = \text{inconnue du problème} \end{array} \right.$$

### L'estimateur des moindres carrés ordinaires :

#### Définition :

On appelle estimateurs des moindres carrés tout estimateur qui est obtenu en minimisant un critère quadratique des résidus : l'exemple le plus simple appelé moindres carrés ordinaires (MCO).

#### Analyse de la variance :

La variance se décompose comme :

$$\underbrace{\frac{1}{N} \sum ((y_i - \bar{y})^2)}_{\text{variance totale}} = \underbrace{\frac{1}{N} \sum ((\hat{y} - \bar{\hat{y}})^2)}_{\text{variance expliquée}} + \underbrace{\frac{1}{N} \sum u_i^2}_{\text{variance résiduelle}}$$

Cette équation permet de définir une mesure synthétique de l'ajustement du modèle.

### Définition de : $R^2$

$R^2$  est la mesure habituelle de précision de la régression :

$$R^2 = \frac{\text{variance expliquée}}{\text{variance totale}} = \frac{\sum ((\hat{y} - \bar{y})^2)}{\sum ((y_i - \bar{y})^2)}$$

Du fait du théorème de décomposition

$$R^2 \in [0, 1]$$

Et

$$R^2 = 1 - \frac{\sum u_i^2}{\sum ((y_i - \bar{y})^2)}$$

Plus le  $R^2$  est proche de l'unité meilleure est la régression, comme il fait intervenir la variance de  $Y$  ; il est sensible à la forme de la modélisation. Car le coefficient de corrélation indique uniquement une dépendance linéaire. D'autres phénomènes, par exemple, peuvent être corrélés de manière exponentielle, ou sous forme de puissance.

### Modèles non linéaires

1-Tendance quadratique

$$y_t = a + bt + ct^2$$

2- Tendance exponentielle

$$y_t = a \exp(bt + c)$$

### **IV.3 Procédure expérimentale**

La mesure directe au borne de l'échangeur consiste à réaliser un bilan thermique aux bornes de l'échangeur, par l'intermédiaire des mesures de températures d'entrée et de sortie de chacun des fluides ,ainsi qu'au moins une mesure de débit sur un des deux fluides [ 58], il peut être également envisagée de suivre l'évolution de la perte de charge aux bornes de l'échangeur sur le circuit présentant des risques d'encrassement, cette méthode quoique indirecte, permet de détecter à quel moment il faut arrêter l'installation pour nettoyage.

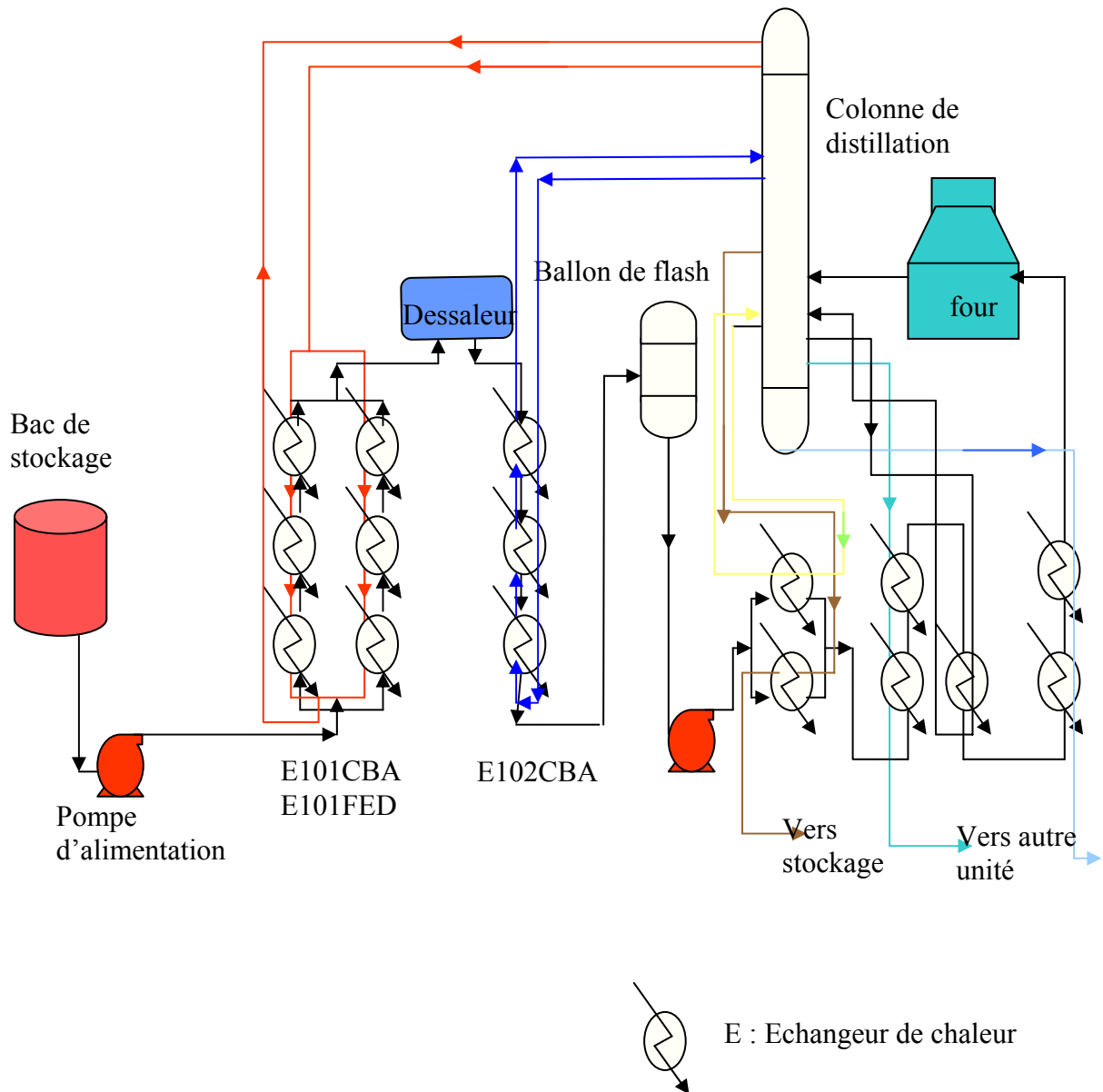
#### **IV.3.1 Description de l'unité**

La distillation atmosphérique est l'unité de base d'une raffinerie d'ALGER, elle a pour but de fractionner le pétrole brut en différentes coupes qui pourront rentrer dans la composition des produits commercialisables et être réutilisés pour un ou plusieurs traitements.

Pour notre étude, on s'intéresse au circuit de préchauffe de cette unité, le pétrole brut qui provient de Hassi Messaoud est refoulé par une pompe d'alimentation depuis les réservoirs de stockages vers un circuit d'échangeurs, ou il est réchauffé par le reflux de tête, il passe ensuite dans le dessaleur électrostatique pour être chauffé à travers un autre circuit d'échangeurs par le reflux circulant intermédiaire (FigureIV.1).

Le brut sortant entre dans le ballon de flash ou les fractions légères et l'eau sont entraînées vers la tête tandis que le brut flashé coule au fond de la colonne du ballon pour être refoulé par une pompe vers une série d'échangeurs.

A sa sortie de cette série, le brut alimente le four pour entrer dans la colonne de distillation.



**Figure IV.1:** Schéma simplifié du circuit de préchauffe du pétrole brut

Le pétrole brut véhiculé à l'intérieur des tubes d'échangeur n'est pas propre et un encrassement des surfaces se produit dans le temps, d'après l'étude déjà faite sur la même unité [55] le tableau suivant donne l'analyse du dépôt formé sur les surfaces d'échange :

Composants	Teneur (%)	
	Cellule I	Cellule II
Insolubles	52.44	50.40
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	18.46	17.40
CL <sup>-</sup>	14.20	10.56
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	0.72	09.82
Fe <sup>+2</sup>	10.04	07.43
Hydrocarbures	4.07	04.00
Silice	00.07	00.30
S <sup>-2</sup>	00.00	00.00
Total	100	100

*Tableau IV.1 : Analyse du dépôt des cellules d'échangeurs*

La formation de ces dépôts, généralement mauvais conducteurs de la chaleur, augmente les résistances au transfert de chaleur et conditionne la fréquence des arrêts pour nettoyage et entretien, qui est le but de notre étude.

### **IV.3.2 Pose du problème**

Chaque cellule d'échangeurs est composée de trois échangeurs de type tube-calandre, disposées en série, ou cette dernière est considérée comme étant un seul échangeur à trois passes coté calandre et six passes coté tube pour la cellule E 102, pour E101 trois passes coté calandre et douze passes coté tube

Les caractéristiques de ces échangeurs sont présentées dans le tableau suivant :

Caractéristiques	E 101		E 102	
	Coté calandre	Coté tube	Co té calandre	Coté tube
Fluide circulant	Reflux de tête	Brut	Reflux inter	Brut
Débit massique (lb/h)	1.000.000	715.260	680.000	608.900
Densité (API)	76.00	44.40	48.00	47.10
Viscosité (cs)	-	2.40-0.96	-	0.82-0.59
Tempé d'entrée (°F)	240	80	340	226
Tempé sortie (°F)	150	220	265	315
Nombre de passes	1	4	1	2
Facteur d'encrassement	0.001	0.002	0.001	0.004
ΔP admissibles (bars)	-	5	-	5
Matériau de construction	Acier au carbone		Acier au carbone	
Diamètre de la calandre(in)	42		42	
Distance entre les chicanes in)	18		18	
Nombre de calandres	6		3	
Diamètreexterne des tubes(in)	0.75		0.75	
Longueur des tubes (in)	20		20	
Nombre total de tubes	6600		3300	
Surface totale d'échange de chaleur (ft²)	25000		12500	
Coefficient global d'échange de chaleur à l'état propre (btu/ft²°F)	63.5		68.5	

**Tableau IV.2** : Caractéristiques des cellules d'échangeurs de chaleur



Etant donné la non existence de moyen technique de mesures adéquates pour traiter séparément chaque échangeur, quelques hypothèses ont été proposées pour notre travail :

- Le même débit de brut traverse le coté tube de chaque échangeur.
- Le même débit de reflux traverse le coté calandre échangeur.
- Le nombre de tubes total est la somme des tubes de chaque échangeur.
- Le nombre total de passes coté tube est égal à trois fois le nombre de passes coté tube de chaque échangeur.
- Les températures d'entrée et de sortie des fluides sont prises aux extrémités de la cellule.
- Le débit volumique du brut reste constant le long du circuit de préchauffe.

Par manque de moyens de mesure des débits des deux reflux, il était nécessaire d'utiliser les débits donnés par la salle de contrôle.

Le monitoring des paramètres de fonctionnement durant une période entre deux arrêts, de chaque cellule, nous a permis de dresser les graphes suivants, en calculant la résistance d'encrassement par l'équation suivante :

$$R_d = \frac{1}{U}$$

Avec U est le coefficient global de transfert de chaleur de la surface en fonction du temps, ce dernier était calculé par la méthode du bilan d'énergie (méthode de DTLM) :

$$U = \frac{m_f C_p (t_s - t_e)}{A.F .\Delta T_{Lm}}$$

Les tableaux suivants donnent le calcul de la résistance d'encrassement de la première cellule (E101 CBA). Pour les autres cellules, le calcul est mis à l'annexe.



Calcul de la résistance d'encrassement de la cellule d'échangeurs E101CBA

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	ρc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
31	29	111	0.0610	749.75	2.159	121	75	655.14	2.362	45.73	82	24.20	8.05	0.143	6.993
32	27	111	0.0610	749.15	2.158	120	77	655.37	2.373	45.70	84	23.50	8.31	0.152	6.571
33	27	112	0.0605	749.33	2.159	121.25	78	654.73	2.374	45.33	85	24.85	8.29	0.143	6.974
34	27	110	0.0610	750.73	2.158	121.5	77	654.38	2.377	45.79	83	25.88	8.25	0.137	7.297
35	26	110	0.0605	750.11	2.158	121	77	654.22	2.376	45.38	84	26.15	8.23	0.135	7.389
36	28	110	0.0605	750.95	2.157	121.8	76	655.54	2.367	45.43	82	25.88	8.03	0.133	7.498
38	29	110	0.0600	749.55	2.159	121.5	75	655.15	2.366	44.97	81	24.82	7.86	0.136	7.337
39	30	110	0.0590	749.75	2.159	122	74	656.92	2.358	44.24	80	24.96	7.59	0.131	7.644
40	29	108	0.0605	750.28	2.158	122.33	73	656.71	2.357	45.39	79	26.84	7.70	0.123	8.109
41	29	109	0.0605	749.23	2.159	120.9	74	656.28	2.357	45.33	80	24.39	7.87	0.139	7.202
42	28	111	0.0615	749.47	2.158	121.75	77	654.37	2.377	46.09	83	25.26	8.25	0.140	7.118
43	28	110	0.0605	749.15	2.156	122	77	654.34	2.376	45.32	82	25.91	8.04	0.133	7.491
44	28	110	0.0605	750.89	2.159	121.25	75	655.29	2.366	45.43	82	25.30	8.02	0.136	7.333
45	29	112	0.0615	749.45	2.161	120.5	76	655.15	2.362	46.09	83	22.58	8.25	0.157	6.366
46	29	113	0.0605	747.28	2.162	120.83	77	655.99	2.368	45.21	84	22.17	8.21	0.159	6.276
47	28	112	0.0620	748.11	2.161	121.25	78	654.42	2.375	46.38	84	23.99	8.42	0.151	6.623
48	27	110	0.0625	750.56	2.156	120.9	76	655.62	2.366	46.91	83	25.34	8.41	0.143	7.007
49	29	115	0.0610	747.85	2.168	120.5	79	654.54	2.376	45.62	86	20.38	8.48	0.179	5.591
50	30	116	0.0615	747.85	2.164	119.5	78	655.56	2.365	45.99	86	17.30	8.53	0.212	4.716
51	28	113	0.0600	748.62	2.164	119.5	77	655.25	2.364	44.92	85	20.82	8.28	0.171	5.844
52	28	111	0.0470	749.68	2.156	120	75	656.42	2.352	35.23	83	22.31	6.33	0.122	8.189
53	23	111	0.0560	751.14	2.151	116.58	77	657.87	2.347	42.06	88	21.02	7.99	0.163	6.119
54	27	115	0.0600	749.94	2.167	119.33	80	654.42	2.374	45.00	88	19.48	8.57	0.189	5.287
55	28	107	0.0620	751.31	2.153	121.42	71	658.96	2.337	46.58	79	26.26	7.88	0.129	7.743
56	29	108	0.0585	750.27	2.155	121.25	71	657.11	2.345	43.89	79	25.12	7.43	0.127	7.862
57	29	107	0.0600	751.89	2.159	120.5	70	658.46	2.336	45.11	78	25.07	7.58	0.130	7.694
58	29	118	0.0590	745.62	2.166	118.08	79	653.54	2.365	43.99	89	10.57	8.44	0.344	2.909
59	29	116	0.0620	746.34	2.167	121	77	656.83	2.358	46.27	87	19.47	8.69	0.192	5.206
60	29	116	0.0590	746.35	2.164	118.33	77	656.83	2.357	44.03	87	15.70	8.26	0.226	4.418
91	24	106	0.0600	733.11	2.154	120.42	66	660.21	2.312	43.99	82	25.71	7.78	0.130	7.683
92	23	104	0.0600	753.51	2.153	121	67	659.34	2.324	45.21	81	28.41	7.89	0.119	8.375
93	23	107	0.0600	754.89	2.154	121.16	65	660.12	2.311	45.29	84	25.83	8.17	0.136	7.348

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	ρf (kg/m³)	Cpf (kJ/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	ρc (kg/m³)	Cpc (kJ/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
94	25	104	0.0605	754.34	2.156	118.42	67	661.93	2.305	45.64	79	26.19	7.74	0.127	7.866
95	25	105	0.0605	754.85	2.156	118.25	66	661.25	2.304	45.67	80	24.88	7.85	0.136	7.372
96	24	109	0.0605	752.13	2.156	119	77	656.73	2.357	45.50	85	25.44	8.36	0.141	7.076
97	22	106	0.0605	754.14	2.153	120.5	64	661.21	2.303	45.63	84	25.62	8.28	0.139	7.195
98	23	108	0.0600	753.35	2.155	122	65	660.54	2.315	45.20	85	25.71	8.25	0.138	7.245
99	22	101	0.0600	751.44	2.151	121.75	71	660.53	2.313	45.09	79	32.80	7.65	0.100	9.971
100	21	100	0.0600	750.35	2.151	122	73	656.57	2.355	45.02	79	35.08	7.62	0.093	10.701
101	22	102	0.0590	751.93	2.156	122.58	70	657.55	2.345	44.36	80	32.63	7.64	0.101	9.933
102	22	103	0.0600	752.73	2.152	122.54	69	658.54	2.334	45.16	81	30.84	7.92	0.110	9.057
105	24	113	0.0590	750.31	2.158	122.58	62	661.12	2.302	44.27	89	20.83	8.47	0.175	5.720
106	22	113	0.0600	751.47	2.157	124.08	61	661.43	2.304	45.09	91	22.17	8.85	0.172	5.827
108	22	119	0.0600	748.35	2.161	123	55	666.42	2.252	44.90	97	14.08	9.38	0.287	3.490
109	19	114	0.0605	752.47	2.156	123.25	56	666.63	2.256	45.52	95	20.06	9.32	0.200	5.004
110	21	113	0.0605	751.11	2.157	123.3	59	662.15	2.291	45.44	92	21.22	9.02	0.183	5.471
112	22	117	0.0580	749.62	2.159	124	56	663.25	2.281	43.48	95	16.93	8.94	0.227	4.405
113	21	111	0.0570	752.14	2.151	122.5	60	662.21	2.282	42.87	90	22.27	8.33	0.161	6.219
114	23	112	0.0565	751.34	2.157	123	62	661.55	2.305	42.45	89	22.47	8.11	0.155	6.441
115	22	108	0.0600	753.02	2.155	122	74	661.83	2.308	45.18	86	28.81	8.38	0.125	7.996
116	21	109	0.0590	754.85	2.154	121.42	61	662.42	2.306	44.54	88	23.96	8.41	0.151	6.621
118	25	110	0.0590	751.73	2.157	122.75	65	660.87	2.317	44.35	85	23.49	8.17	0.150	6.681
120	20	106	0.0590	753.22	2.153	122	63	661.62	2.306	44.44	86	27.07	8.27	0.131	7.608
121	20	107	0.1170	753.44	2.153	122.1	63	661.51	2.305	88.15	87	26.72	16.49	0.265	3.767
122	20	103	0.1160	751.39	2.151	122.33	67	659.79	2.327	87.16	83	31.39	15.52	0.213	4.702
123	20	102	0.1170	751.11	2.151	122.5	68	658.33	2.333	87.88	82	32.36	15.51	0.206	4.851
124	21	106	0.1180	753.43	2.153	121.58	64	660.03	2.311	88.90	85	27.26	16.24	0.256	3.902
125	20	102	0.1200	751.11	2.151	120	66	660.17	2.311	90.13	82	29.97	15.94	0.229	4.372
126	19	100	0.1220	749.31	2.149	121	68	659.54	2.325	91.42	81	33.33	15.84	0.204	4.893
127	18	103	0.1180	750.35	2.151	122	65	660.75	2.317	88.54	85	31.39	16.13	0.221	4.524
128	17	101	0.1200	749.12	2.149	120.42	64	661.11	2.301	89.89	84	30.99	16.27	0.226	4.428
129	19	107	0.1180	753.24	2.153	121.75	61	662.41	2.892	88.88	88	25.80	16.91	0.282	3.547

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	ρf (kg/m³)	Cpf (kJ/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	ρc (kg/m³)	Cpc (kJ/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
130	18	103	0.1090	750.81	2.151	119.66	62	663.88	2.288	81.84	85	28.07	15.00	0.230	4.351
131	20	103	0.1160	751.47	2.151	119.16	64	662.54	2.294	87.17	83	27.81	15.55	0.241	4.157
132	13	94	0.1090	743.44	2.143	117.75	65	662.16	2.292	81.03	81	35.97	14.04	0.168	5.955
135	19	98	0.1070	748.31	2.148	119.5	69	659.11	2.322	80.07	79	33.86	13.52	0.172	5.822
136	18	99	0.0950	748.56	2.146	116.5	70	660.21	2.314	71.11	81	31.56	12.38	0.169	5.927
138	18	102	0.0800	749.85	2.149	112.75	69	663.75	2.286	59.99	84	26.04	10.79	0.178	5.611
140	19	98	0.1040	748.45	2.148	117.58	66	662.95	2.298	77.84	79	31.47	13.20	0.180	5.544
142	19	111	0.0890	754.85	2.154	123.42	60	662.47	2.295	67.18	92	24.07	13.26	0.237	4.222
143	18	104	0.0680	750.98	2.151	121.92	64	661.79	2.307	51.07	86	29.69	9.44	0.137	7.310
150	18	104	0.0890	750.75	2.151	120	62	662.11	2.296	66.82	86	28.11	12.29	0.188	5.319
151	19	107	0.0920	753.18	2.153	122	61	662.16	2.292	69.29	88	25.52	13.18	0.222	4.501
200	24	107	0.1010	753.11	2.155	125.33	70	655.87	2.358	76.06	83	30.50	13.54	0.191	5.237
222	23	108	0.0950	753.64	2.156	120.42	72	657.21	2.343	71.60	85	26.42	13.16	0.214	4.666
223	22	106	0.0910	757.97	2.153	119	75	657.87	2.348	68.98	84	28.29	12.47	0.190	5.276
224	21	106	0.0900	755.48	2.154	118.66	76	655.29	2.354	67.99	85	28.83	12.44	0.186	5.388
225	21	108	0.0920	754.36	2.153	119.75	75	655.37	2.353	69.40	87	27.95	12.96	0.199	5.015
226	21	103	0.0900	756.11	2.151	119.5	74	657.66	2.346	68.05	82	31.20	12.01	0.166	6.041
227	21	104	0.0900	756.47	2.152	118.75	74	657.37	2.343	68.08	83	29.95	12.15	0.175	5.729
228	22	105	0.0890	755.56	2.155	117.75	73	658.43	2.333	67.24	83	27.54	12.04	0.188	5.317
229	25	103	0.0950	754.14	2.154	120.58	71	658.87	2.338	71.64	78	29.41	12.08	0.177	5.660
230	23	101	0.0950	741.52	2.139	120.33	70	658.33	2.334	70.44	78	31.47	11.71	0.160	6.250
231	23	107	0.0930	753.19	2.156	120.92	67	659.12	2.322	70.05	84	25.95	12.74	0.211	4.735
232	25	112	0.0480	750.44	2.158	122	80	653.66	2.386	36.02	87	26.04	6.75	0.112	8.966
233	24	109	0.0445	752.39	2.156	121.58	79	653.12	2.382	33.48	85	28.86	6.12	0.091	10.969
224	24	113	0.0445	750.52	2.158	119.58	71	658.25	2.333	33.40	89	20.49	6.42	0.135	7.424
225	24	112	0.0455	751.85	2.157	119.42	79	654.42	2.374	34.21	88	24.20	6.47	0.115	8.694
226	24	112	0.0445	750.07	2.158	116.66	77	657.88	2.344	33.38	88	19.72	6.35	0.138	7.221
227	22	110	0.0445	753.85	2.156	117.75	78	656.75	2.357	33.55	88	24.65	6.34	0.111	9.035
228	22	111	0.0455	752.73	2.156	117.58	79	655.45	2.364	34.25	89	22.90	6.61	0.124	8.061
229	24	115	0.0445	748.61	2.159	116.82	80	660.57	2.317	33.31	91	15.39	6.56	0.183	5.455

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kJ/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kJ/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
230	23	110	0.0455	752.52	2.156	118.16	78	656.83	2.358	34.24	87	24.36	6.43	0.113	8.815
231	23	105	0.0455	754.18	2.154	118.75	73	657.11	2.342	34.32	82	27.92	6.09	0.094	10.662
232	25	106	0.0455	753.35	2.155	120	73	657.52	2.344	34.28	81	27.83	5.96	0.092	10.854
233	22	106	0.0430	754.11	2.153	118.66	75	657.91	2.348	32.43	84	28.05	5.88	0.090	11.096
234	23	106	0.0430	754.54	2.154	118.5	74	657.16	2.342	32.45	83	27.32	5.80	0.091	10.952
235	25	108	0.0430	752.63	2.156	119.1	75	656.97	2.348	32.36	83	25.54	5.81	0.098	10.224
236	25	107	0.0430	753.64	2.153	116.33	71	660.62	2.316	32.41	82	22.69	5.74	0.109	9.189
237	24	114	0.0430	749.11	2.159	115.75	78	657.95	2.346	32.21	90	15.02	6.27	0.179	5.572
238	24	114	0.0430	748.31	2.162	116.42	81	655.87	2.366	32.18	90	18.08	6.23	0.148	6.743
239	24	112	0.0430	749.62	2.159	115.25	79	656.11	2.353	32.23	88	17.87	6.14	0.148	6.767
240	24	111	0.0435	749.26	2.153	113.75	77	658.16	2.333	32.59	87	16.11	6.14	0.164	6.103
241	23	111	0.0430	750.76	2.158	113.83	78	658.74	2.338	32.28	88	17.92	6.11	0.147	6.813
242	23	111	0.0430	750.52	2.156	113.58	77	658.25	2.333	32.27	88	16.48	6.14	0.160	6.242
243	24	110	0.0435	747.11	2.162	112.33	79	658.58	2.335	32.50	86	17.24	6.02	0.150	6.659
244	24	109	0.0430	750.11	2.152	111.42	72	657.63	2.334	32.25	85	15.62	5.88	0.162	6.171
245	24	100	0.0430	751.11	2.157	108.42	67	666.58	2.255	32.30	76	20.82	5.32	0.110	9.103
268	24	106	0.0555	753.13	2.155	124.2	70	657.92	2.348	41.80	82	29.65	7.41	0.107	9.304
269	25	113	0.0580	749.22	2.159	122.75	62	661.37	2.303	43.45	88	20.06	8.30	0.178	5.620
270	25	104	0.0570	754.45	2.154	121	72	657.66	2.346	43.00	79	29.65	7.31	0.106	9.431
271	25	108	0.0495	752.66	2.156	120.5	76	655.25	2.385	37.26	83	27.21	6.68	0.106	9.466
272	24	108	0.0435	753.89	2.158	119.66	76	656.71	2.354	32.79	84	27.08	5.93	0.094	10.620
273	24	113	0.0370	750.72	2.158	119.1	81	654.92	2.378	27.78	89	22.20	5.36	0.104	9.627
274	25	110	0.0370	751.56	2.157	120	77	655.71	2.367	27.81	85	25.49	5.11	0.086	11.608
275	25	112	0.0335	750.68	2.158	118.25	78	655.11	2.363	25.15	87	21.41	4.74	0.095	10.498
276	25	115	0.0310	749.11	2.161	118.25	81	654.42	2.374	23.22	90	18.43	4.52	0.105	9.488
277	25	109	0.0365	752.94	2.156	120.66	77	654.11	2.372	27.48	84	27.04	4.97	0.079	12.651
278	25	109	0.0335	751.08	2.152	119.25	76	656.45	2.354	25.16	84	25.19	4.55	0.078	12.859
279	25	109	0.0335	751.23	2.153	118.9	76	656.28	2.352	25.17	84	24.53	4.58	0.080	12.464
280	24	108	0.0325	752.15	2.155	120.1	77	655.33	2.363	24.44	84	27.44	4.43	0.069	14.401
282	25	109	0.0335	751.05	2.153	119.33	76	656.49	2.352	25.16	84	25.36	4.55	0.077	12.960

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
372	21	111	0.0570	752.14	2.151	122.5	60	662.21	2.282	42.87	90	22.27	8.33	0.161	6.219
373	23	112	0.0565	751.34	2.157	123	62	661.55	2.305	42.45	89	22.47	8.11	0.155	6.441
374	22	108	0.0600	753.02	2.155	122	74	661.83	2.308	45.18	86	28.81	8.38	0.125	7.996
375	21	109	0.0590	754.85	2.154	121.42	61	662.42	2.306	44.54	88	23.96	8.41	0.151	6.621
377	25	110	0.0590	751.73	2.157	122.75	65	660.87	2.317	44.35	85	23.49	8.17	0.150	6.681
379	20	106	0.0590	753.22	2.153	122	63	661.62	2.306	44.44	86	27.07	8.27	0.131	7.608
380	20	107	0.0585	753.44	2.153	122.1	63	661.51	2.305	44.08	87	26.72	8.24	0.133	7.535
381	20	103	0.0580	751.39	2.151	122.33	67	659.79	2.327	43.58	83	31.39	7.76	0.106	9.405
382	20	102	0.0585	751.11	2.151	122.5	68	658.33	2.333	43.94	82	32.36	7.75	0.103	9.702
383	21	106	0.0590	753.43	2.153	121.58	64	660.03	2.311	44.45	85	27.26	8.12	0.128	7.805
384	20	102	0.0600	751.11	2.151	120	66	660.17	2.311	45.07	82	29.97	7.97	0.114	8.743
385	19	100	0.0610	749.31	2.149	121	68	659.54	2.325	45.71	81	33.33	7.92	0.102	9.787
386	18	103	0.0590	750.35	2.151	122	65	660.75	2.317	44.27	85	31.39	8.07	0.111	9.048
387	17	101	0.0600	749.12	2.149	120.42	64	661.11	2.301	44.95	84	30.99	8.14	0.113	8.856
388	19	107	0.0590	753.24	2.153	121.75	61	662.41	2.892	44.44	88	25.80	8.46	0.141	7.094
389	18	103	0.0545	750.81	2.151	119.66	62	663.88	2.288	40.92	85	28.07	7.50	0.115	8.702
390	20	103	0.0580	751.47	2.151	119.16	64	662.54	2.294	43.59	83	27.81	7.78	0.120	8.315
391	13	94	0.0545	743.44	2.143	117.75	65	662.16	2.292	40.52	81	35.97	7.02	0.084	11.910
393	19	98	0.0535	748.31	2.148	119.5	69	659.11	2.322	40.03	79	33.86	6.76	0.086	11.645
394	18	99	0.0475	748.56	2.146	116.5	70	660.21	2.314	35.56	81	31.56	6.19	0.084	11.855
396	18	102	0.0400	749.85	2.149	112.75	69	663.75	2.286	29.99	84	26.04	5.40	0.089	11.223
398	19	98	0.0520	748.45	2.148	117.58	66	662.95	2.298	38.92	79	31.47	6.60	0.090	11.087
400	19	111	0.0445	754.85	2.154	123.42	60	662.47	2.295	33.59	92	24.07	6.63	0.118	8.444
401	18	104	0.0340	750.98	2.151	121.92	64	661.79	2.307	25.53	86	29.69	4.72	0.068	14.620
408	18	104	0.0445	750.75	2.151	120	62	662.11	2.296	33.41	86	28.11	6.14	0.094	10.638
409	19	107	0.0460	753.18	2.153	122	61	662.16	2.292	34.65	88	25.52	6.59	0.111	9.002
410	17	105	0.0595	751.16	2.151	123	62	661.63	2.306	44.69	88	29.31	8.49	0.125	8.026
411	16	103	0.0595	749.31	2.149	123	64	660.37	2.316	44.58	87	32.10	8.30	0.111	8.995
412	19	103	0.0590	751.11	2.151	122	66	660.92	2.309	44.32	84	30.86	8.01	0.112	8.956
413	19	105	0.0590	751.72	2.171	122	64	660.16	2.311	44.35	86	29.25	8.24	0.121	8.257

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
414	18	105	0.0600	751.32	2.151	123	64	660.73	2.317	45.08	87	30.32	8.40	0.119	8.390
415	19	117	0.0585	751.85	2.157	124	54	665.51	2.265	43.98	98	17.06	9.27	0.234	4.278
416	19	109	0.0590	753.93	2.153	125	63	660.38	2.318	44.48	90	27.71	8.61	0.134	7.485
418	16	104	0.0555	749.81	2.149	123	63	660.37	2.313	41.61	88	31.57	7.83	0.107	9.368
419	15	104	0.0590	749.72	2.149	124.58	63	660.71	2.317	44.23	89	32.01	8.50	0.114	8.752
421	16	106	0.0590	750.82	2.151	126.42	65	658.46	2.336	44.30	90	32.72	8.54	0.112	8.908
424	16	101	0.0590	748.72	2.148	123.25	66	659.37	2.326	44.17	85	33.78	8.11	0.103	9.686
426	14	105	0.0590	749.66	2.149	126.2	63	659.59	2.325	44.23	91	32.80	8.68	0.114	8.787
429	18	99	0.0590	748.27	2.155	123	70	657.58	2.345	44.15	81	36.58	7.66	0.090	11.099
431	17	95	0.0580	745.13	2.166	121.75	71	657.47	2.345	43.22	78	38.71	7.32	0.081	12.288
432	17	96	0.0580	746.26	2.146	123.08	74	655.54	2.365	43.28	79	40.47	7.30	0.078	12.897
433	17	96	0.0580	746.27	2.146	122.2	74	655.49	2.363	43.28	79	39.90	7.30	0.079	12.715
435	16	96	0.0580	746.18	2.146	121	68	659.66	2.326	43.28	80	36.76	7.46	0.087	11.449
437	15	95	0.0370	745.11	2.145	117.92	66	662.71	2.297	27.57	80	34.83	4.74	0.059	17.093
439	19	104	0.0445	750.93	2.153	122.33	64	660.24	2.314	33.42	85	29.85	6.11	0.088	11.364
499	19	101	0.0590	750.22	2.152	124.25	70	657.87	2.348	44.26	82	34.83	7.85	0.097	10.312
501	19	102	0.0580	750.27	2.152	124.35	70	657.22	2.348	43.52	83	34.83	7.73	0.095	10.476
503	19	105	0.0580	752.11	2.153	124.5	66	658.35	2.333	43.62	86	31.34	8.08	0.111	9.020
508	20	100	0.0580	750.24	2.154	127	75	653.83	2.388	43.51	80	38.88	7.54	0.083	11.994
510	19	98	0.0585	748.68	2.148	126.5	78	651.33	2.403	43.80	79	41.75	7.47	0.077	13.000
512	20	101	0.0590	750.35	2.151	125	72	655.54	2.365	44.27	81	36.41	7.68	0.091	11.016
513	20	109	0.0585	754.35	2.154	127.25	66	657.75	2.347	44.13	89	30.32	8.43	0.120	8.361
515	21	102	0.0590	751.73	2.151	126.42	73	654.54	2.375	44.35	81	36.05	7.77	0.093	10.786
518	22	103	0.0605	752.11	2.152	125.46	72	655.89	2.368	45.50	81	34.65	7.92	0.098	10.180
530	23	111	0.0460	752.97	2.156	124.4	64	659.28	2.334	34.64	88	24.78	6.57	0.114	8.774
532	26	114	0.0520	749.97	2.159	125.25	72	655.55	2.365	39.00	88	24.64	7.40	0.129	7.738
534	23	106	0.0555	754.56	2.154	125	70	656.29	2.354	41.88	83	30.67	7.50	0.105	9.511
537	24	104	0.0585	753.95	2.153	125.2	73	654.11	2.371	44.11	80	33.25	7.59	0.098	10.188
539	25	104	0.0495	754.55	2.154	122.8	74	655.54	2.365	37.35	79	31.53	6.36	0.087	11.519
545	23	102	0.0520	752.64	2.152	123	71	656.25	2.352	39.14	79	32.56	6.67	0.088	11.350



Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
547	24	104	0.0430	754.21	2.154	126.2	74	654.85	2.378	32.43	80	33.78	5.62	0.072	13.983
548	26	105	0.0430	753.39	2.153	121.33	72	657.87	2.346	32.40	79	28.95	5.50	0.082	12.250
550	25	109	0.0435	751.03	2.157	121.8	65	660.92	2.316	32.67	84	23.98	5.92	0.106	9.413
551	26	107	0.0480	752.35	2.156	124.1	71	656.64	2.346	36.11	81	29.08	6.28	0.093	10.762
552	26	105	0.0520	753.32	2.155	123.4	74	655.86	2.366	39.17	79	31.25	6.64	0.091	10.947
553	28	107	0.0555	751.35	2.157	122	71	657.50	2.345	41.70	79	26.81	7.08	0.114	8.804
554	27	107	0.0585	752.95	2.156	123	71	657.92	2.349	44.05	80	27.68	7.59	0.118	8.481
555	26	107	0.0575	752.85	2.155	123.9	71	656.90	2.346	43.29	81	28.87	7.53	0.112	8.916
556	25	110	0.0600	751.84	2.157	124	68	658.95	2.338	45.11	85	26.14	8.23	0.135	7.384
557	26	107	0.0600	752.68	2.156	123.9	70	656.94	2.342	45.16	81	28.18	7.92	0.121	8.270
558	26	107	0.0600	751.45	2.157	126	75	653.45	2.385	45.09	81	31.66	7.87	0.107	9.356
559	28	107	0.0570	751.45	2.157	126	75	653.42	2.384	42.83	79	30.91	7.29	0.101	9.858
560	27	105	0.0435	752.12	2.156	124.2	74	655.93	2.369	32.72	78	30.76	5.52	0.077	12.958
561	28	110	0.0345	749.14	2.158	121.58	76	655.97	2.357	25.85	82	25.43	4.59	0.078	12.881
562	26	107	0.0370	752.35	2.156	115	68	662.51	2.295	27.84	81	20.78	4.84	0.100	9.977
563	25	106	0.0385	753.35	2.155	116.1	69	661.64	2.306	29.00	81	23.33	5.04	0.093	10.753
566	29	110	0.0590	749.42	2.159	117.6	71	659.22	2.322	44.22	81	20.14	7.72	0.165	6.067
568	28	110	0.0590	749.21	2.159	127.6	73	653.21	2.382	44.20	82	28.79	7.87	0.118	8.506
570	28	115	0.0590	747.49	2.162	123.2	73	655.11	2.361	44.10	87	21.61	8.29	0.165	6.058
571	29	108	0.0590	750.64	2.158	123.16	72	656.37	2.353	44.29	79	26.35	7.58	0.124	8.084
574	23	102	0.0590	751.45	2.157	124.25	73	655.66	2.366	44.34	79	34.39	7.54	0.094	10.601
577	29	108	0.0590	750.55	2.158	123	74	655.76	2.368	44.28	79	27.37	7.56	0.119	8.418
579	29	108	0.0590	750.56	2.158	124.58	73	655.87	2.369	44.28	79	28.07	7.56	0.116	8.631
580	27	106	0.0590	752.54	2.156	124.08	73	655.42	2.364	44.40	79	29.78	7.57	0.109	9.153
632	27	114	0.0370	748.31	2.161	119	78	655.46	2.365	27.69	87	20.26	5.18	0.110	9.090
633	27	110	0.0410	750.70	2.158	120.33	78	654.16	2.371	30.78	83	25.74	5.49	0.092	10.897
634	27	107	0.0475	752.81	2.156	123.9	76	654.77	2.377	35.76	80	30.25	6.14	0.087	11.458
635	27	109	0.0520	751.86	2.157	123.3	77	653.32	2.383	39.10	82	28.85	6.89	0.103	9.731
637	25	108	0.0570	752.55	2.156	124.3	69	2.34	2.394	42.90	83	27.79	7.69	0.119	8.406
641	25	104	0.0585	754.32	2.154	122.4	73	656.86	2.358	44.13	79	31.25	7.47	0.103	9.723

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
643	28	106	0.0590	752.95	2.156	122.3	73	656.42	2.344	44.42	78	28.15	7.46	0.114	8.772
647	25	105	0.0590	754.93	2.154	122.5	70	657.42	2.344	44.54	80	29.37	7.66	0.112	8.910
650	26	108	0.0590	752.92	2.156	123	73	655.11	2.361	44.42	82	28.21	7.83	0.119	8.371
652	25	105	0.0590	753.21	2.155	123.2	76	654.47	2.374	44.44	80	31.56	7.69	0.105	9.547
655	23	102	0.0590	752.35	2.152	124.5	74	654.11	2.371	44.39	79	34.83	7.52	0.093	10.773
658	25	107	0.0590	752.13	2.156	124.4	70	656.21	2.352	44.38	82	28.98	7.85	0.117	8.577
661	28	110	0.0590	749.18	2.159	124	69	657.66	2.346	44.20	82	24.97	7.86	0.135	7.386
662	13	97	0.0595	745.11	2.154	122.33	66	659.16	2.321	44.33	84	37.46	8.02	0.092	10.853
663	13	95	0.0595	744.14	2.144	120.25	66	661.95	2.309	44.28	82	37.10	7.81	0.091	11.043
664	15	106	0.0595	750.26	2.151	123.08	60	662.66	2.296	44.64	91	29.25	8.69	0.128	7.822
665	15	105	0.0595	750.13	2.151	124.9	62	660.62	2.316	44.63	90	31.47	8.67	0.118	8.444
666	14	99	0.0520	746.39	2.146	121.75	70	658.71	2.337	38.81	85	36.93	7.06	0.082	12.157
667	15.5	97	0.0580	746.47	2.144	123.83	70	657.95	2.349	43.30	81	39.21	7.56	0.083	12.057
668	15	96	0.0590	745.47	2.145	123.58	70	657.95	2.349	43.98	81	39.89	7.64	0.082	12.144
669	15	94	0.0590	744.31	2.144	123.42	73	656.96	2.356	43.91	79	42.14	7.40	0.076	13.237
671	17	100	0.0535	748.35	2.148	121	66	660.54	2.315	40.04	83	33.25	7.11	0.092	10.869
672	16	100	0.0540	748.17	2.148	122.75	66	659.42	2.324	40.40	84	34.41	7.32	0.091	10.930
673	15	95	0.0555	745.11	2.145	121.5	69	658.35	2.335	41.35	80	38.71	7.10	0.079	12.684
674	20	98	0.0580	749.15	2.149	121.7	71	657.45	2.345	43.45	78	35.47	7.31	0.089	11.278
675	19	98	0.0590	748.25	2.148	122	71	657.62	2.346	44.15	79	36.62	7.44	0.087	11.438
676	19	100	0.0580	749.52	2.149	119	66	661.33	2.303	43.47	81	30.76	7.57	0.106	9.446
677	17	97	0.0580	746.92	2.146	119.1	67	660.15	2.315	43.32	80	34.34	7.42	0.093	10.763
678	18	101	0.0585	749.47	2.149	123.75	69	657.12	2.342	43.84	83	34.83	7.82	0.097	10.362
679	16.5	99	0.0580	747.85	2.147	124	69	657.51	2.345	43.38	83	36.93	7.70	0.090	11.150
680	19	99	0.0580	749.11	2.149	123	71	657.75	2.347	43.45	80	35.89	7.49	0.090	11.142
681	17	100	0.0580	748.48	2.148	123	73	656.92	2.359	43.41	83	37.08	7.73	0.090	11.152
682	16	96	0.0580	745.87	2.145	123.3	72	656.77	2.357	43.26	80	40.21	7.40	0.079	12.632
683	15	98	0.0580	744.17	2.144	123.2	73	653.09	2.402	43.16	83	39.35	7.68	0.084	11.911
685	13	96	0.0505	744.77	2.144	123.3	75	654.15	2.372	37.61	83	42.04	6.73	0.069	14.532
686	16	96	0.0505	745.95	2.145	122.2	73	656.82	2.358	37.67	80	39.85	6.46	0.070	14.350

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kJ/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kJ/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
687	18	96	0.0505	746.89	2.146	123.33	73	655.37	2.367	37.72	78	39.87	6.30	0.068	14.721
688	16	95	0.0505	745.62	2.145	124	74	655.75	2.367	37.65	79	41.51	6.40	0.066	15.087
689	15	98	0.0505	746.54	2.146	122.5	70	657.35	2.345	37.70	83	37.79	6.72	0.076	13.086
690	16	96	0.0495	745.93	2.145	116.92	69	660.11	2.311	36.92	80	34.64	6.32	0.079	12.732
691	19	98	0.0505	748.47	2.148	122	71	657.37	2.347	37.80	79	36.15	6.41	0.076	13.112
692	16	99	0.0505	747.48	2.147	121.92	72	656.11	2.351	37.75	83	37.13	6.72	0.078	12.838
693	16	94	0.0445	745.11	2.145	117.25	68	661.42	2.304	33.16	78	35.53	5.55	0.067	14.882
694	16	99	0.0470	747.35	2.145	113.66	69	662.66	2.296	35.13	83	29.96	6.23	0.089	11.178
695	16	100	0.0470	747.76	2.146	115.83	72	660.74	2.307	35.14	84	32.05	6.30	0.085	11.828
696	15	97	0.0480	746.11	2.146	119	74	657.25	2.342	35.81	82	37.18	6.32	0.073	13.683
697	17	100	0.0535	748.59	2.148	118.1	74	658.84	2.338	40.05	83	33.63	7.16	0.092	10.925
698	18	99	0.0490	748.46	2.148	120.1	73	657.72	2.347	36.67	81	35.56	6.38	0.077	12.967
699	19	99	0.0520	749.11	2.149	121	73	656.16	2.351	38.95	80	35.74	6.70	0.081	12.404
700	17	96	0.0520	746.66	2.146	120.83	72	657.58	2.345	38.83	79	37.93	6.60	0.075	13.364
701	17	97	0.0520	746.76	2.146	121	73	657.58	2.346	38.83	80	38.02	6.63	0.075	13.337
702	16	96	0.0505	745.85	2.145	120.5	73	657.52	2.345	37.67	80	38.50	6.44	0.072	13.901
703	16	101	0.0505	748.73	2.148	121.25	71	657.04	2.344	37.81	85	34.38	6.94	0.087	11.518
704	15	95	0.0510	745.24	2.145	122.33	74	655.21	2.362	38.01	80	40.88	6.56	0.069	14.489
705	18	98	0.0505	747.94	2.147	122.92	75	654.11	2.371	37.77	80	38.89	6.48	0.072	13.959
706	18	97	0.0505	747.94	2.147	122.33	74	655.11	2.361	37.77	79	38.46	6.42	0.072	13.922
707	17	95	0.0505	746.16	2.146	122.2	73	656.54	2.354	37.68	78	39.60	6.33	0.069	14.536
708	18	97	0.0510	747.39	2.147	122.25	73	656.97	2.357	38.12	79	38.49	6.45	0.072	13.880
709	18	97	0.0510	747.42	2.147	121.9	73	656.45	2.354	38.12	79	38.12	6.45	0.073	13.741
710	17	95	0.0510	745.22	2.145	123	73	655.11	2.361	38.01	78	40.56	6.34	0.067	14.869
711	18	97	0.0505	747.54	2.147	122.2	74	656.84	2.358	37.75	79	38.36	6.41	0.072	13.913
713	18	97	0.0520	747.37	2.147	122.25	71	657.71	2.347	38.86	79	37.67	6.57	0.075	13.328
714	17	96	0.0505	746.37	2.146	122.25	71	657.72	2.347	37.69	79	38.71	6.37	0.071	14.130
715	18	97	0.0505	747.51	2.147	120.2	72	658.86	2.338	37.75	79	36.26	6.41	0.076	13.160
716	18	98	0.0510	749.54	2.149	120.56	73	657.65	2.346	38.23	80	36.38	6.56	0.078	12.889
717	17	95	0.0510	746.14	2.146	120.42	71	658.71	2.347	38.05	78	37.75	6.39	0.073	13.730

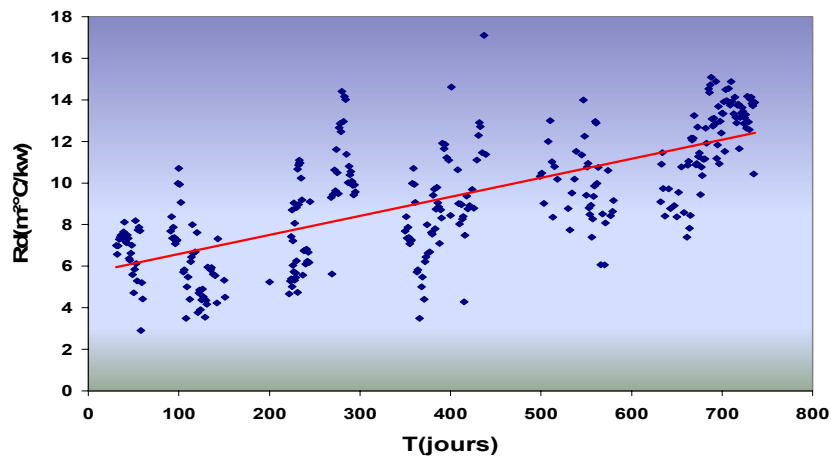
Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	ΔtIm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
718	18	97	0.0505	747.73	2.147	122.16	74	655.11	2.361	37.76	79	38.21	6.44	0.073	13.790
719	19	101	0.0520	749.82	2.149	120.1	74	656.11	2.351	38.99	82	34.24	6.84	0.086	11.642
720	18	98	0.0520	748.13	2.148	122.1	75	655.38	2.363	38.90	80	37.91	6.71	0.076	13.143
721	19	97	0.0525	748.11	2.148	122.92	72	656.67	2.356	39.28	78	37.90	6.60	0.075	13.356
722	18	97	0.0525	747.64	2.147	123	75	655.79	2.367	39.25	79	39.14	6.68	0.073	13.622
723	19	97	0.0520	748.11	2.147	122.75	72	656.54	2.356	38.90	78	37.75	6.53	0.074	13.439
724	19	97	0.0520	748.18	2.148	121.5	71	657.16	2.342	38.91	78	36.23	6.55	0.078	12.862
725	19	97	0.0525	747.85	2.147	121.58	72	657.58	2.345	39.26	78	37.02	6.55	0.076	13.141
726	19	97	0.0525	747.98	2.147	122	72	656.29	2.342	39.27	78	37.56	6.57	0.075	13.286
727	18	100	0.0520	748.89	2.148	122.92	74	655.46	2.364	38.94	82	37.18	6.84	0.079	12.637
728	17	96	0.0520	746.35	2.146	123	73	655.11	2.361	38.81	79	39.95	6.55	0.071	14.169
729	19	98	0.0525	748.73	2.148	122.33	74	655.22	2.362	39.31	79	37.33	6.71	0.077	12.933
730	19	98	0.0525	748.64	2.148	122.33	71	657.54	2.345	39.30	79	36.15	6.69	0.080	12.557
731	16	95	0.0520	745.51	2.145	122.42	71	657.86	2.345	38.77	79	39.65	6.57	0.071	14.030
732	16	95	0.0520	745.25	2.145	121.9	71	657.52	2.345	38.75	79	39.65	6.53	0.071	14.128
733	18	96	0.0525	746.88	2.146	122.42	72	656.39	2.354	39.21	78	38.88	6.54	0.072	13.815
734	17	96	0.0525	746.26	2.146	122.25	71	657.83	2.348	39.18	79	38.94	6.60	0.073	13.713
735	19	102	0.0525	750.41	2.151	121.45	66	660.84	2.318	39.40	83	31.47	7.02	0.096	10.427
736	18	97	0.0445	747.61	2.147	117.9	69	660.65	2.316	33.27	79	33.75	5.66	0.072	13.873

### IV.3.3 Résultats et Interprétations

#### A/ Résistance d'encrassement :

##### A.1/ Modélisation des résistances d'encrassement

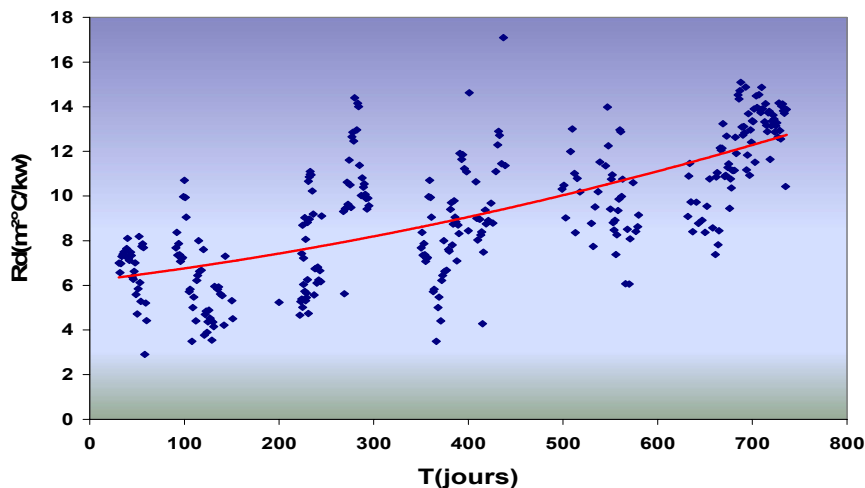
Pour la cellule E101 CBA, on a examiné les trois modèles donnés par les graphes suivants :



*Figure II.1 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E101 CBA en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire*

Le modèle de cette évolution est linéaire

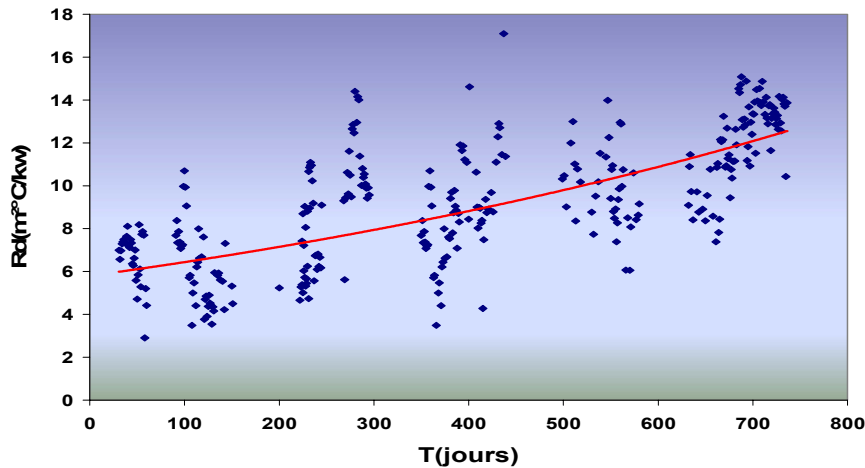
$$R_d = 6,331 + (0,0081 \times T) \quad \text{Avec } R=0,71$$



*Figure II.2 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E101 CBA en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique*

Le modèle de cette évolution est quadratique :

$$R_d = 7,033 + (0,0027 \times T) + (6,7 \cdot 10^{-6} \times T^2) \text{ avec } R=0,72$$

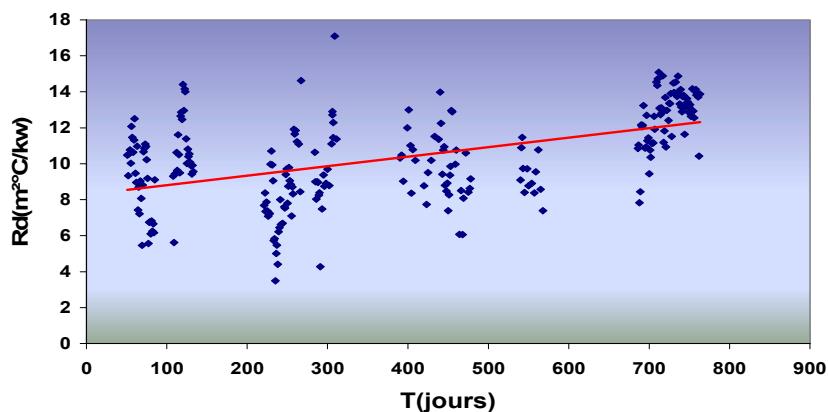


*Figure II.3 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E101CBA en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentielle*

Le modèle de cette évolution est exponentiel :

$$R_d = 6,536 \exp(0,00085 \times T) \text{ avec } R=0,70$$

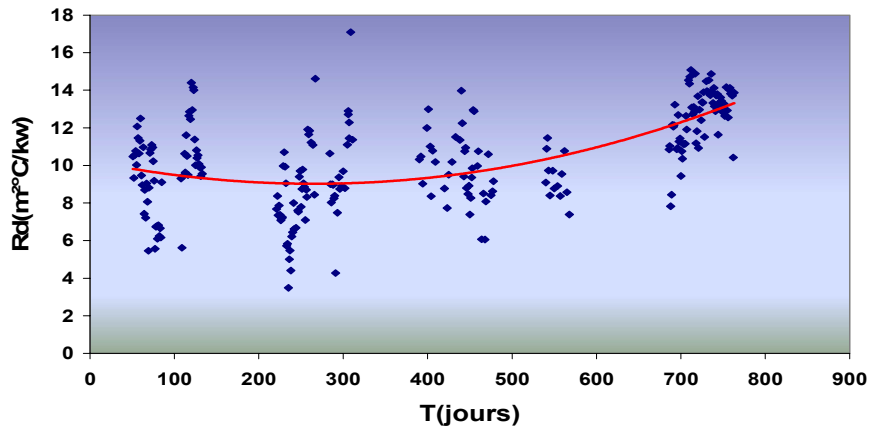
Pour la cellule E101 FED, on a examiné les trois modèles donnés par les graphes suivants



*Figure II.4: Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E101FED en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire*

Le modèle de cette évolution est linéaire :

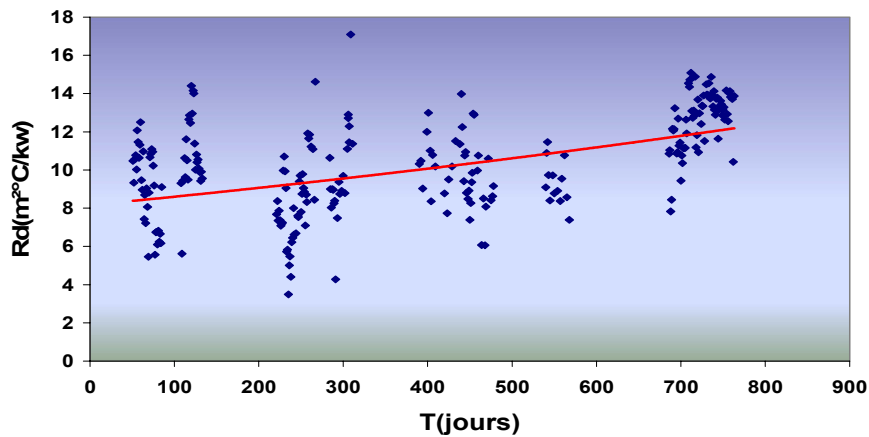
$$R_d = 8,613 + (0,0047 \times T) \text{ avec } R=0,56$$



*Figure II.5: Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E101FED en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique.*

Le modèle de cette évolution est quadratique :

$$R_d = 10,03 - (0,0057 \times T) + (1,25 \times 10^{-5} T^2) \text{ avec } R=0,63$$

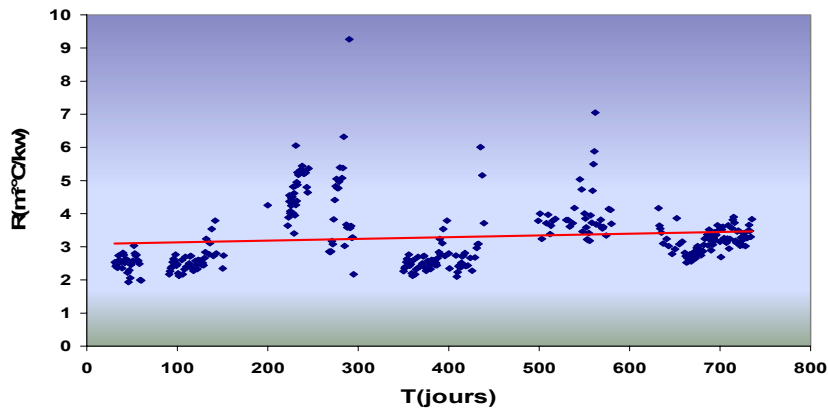


*Figure II.6 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E101FED en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentielle.*

Le modèle de cette évolution est exponentiel :

$$R_d = 8,605 \exp(0,00044 \times T) \text{ avec } R=0,54$$

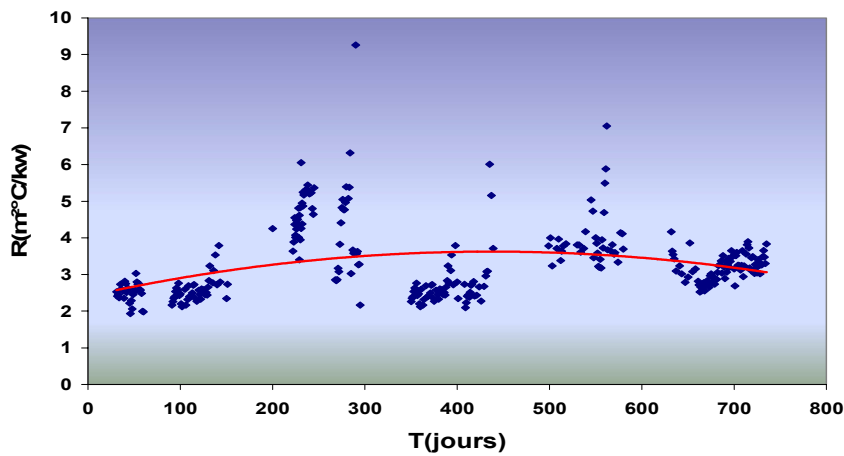
Pour la cellule E102 CBA, on a examiné les trois modèles donnés par les graphes suivants



*Figure II.7: Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E102 en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire.*

Le modèle de cette évolution est linéaire :

$$R_d = 2,704 + (0,0082 \times T) \quad \text{avec} \quad R = 0,86$$

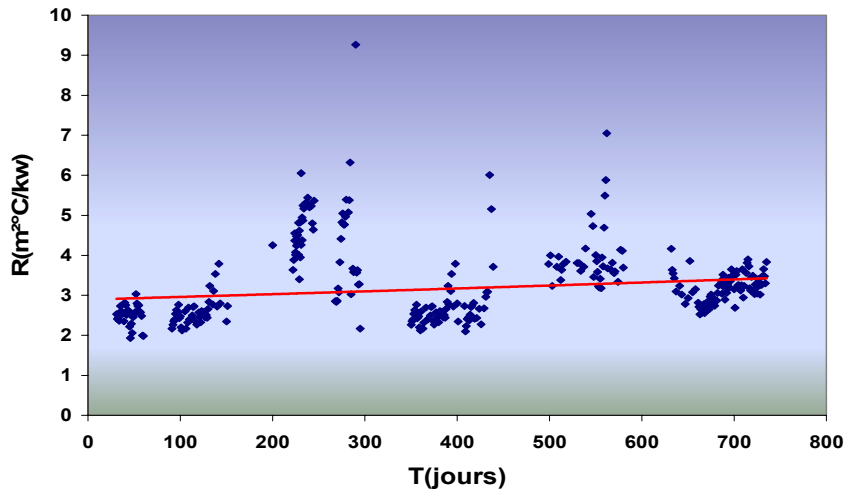


*Figure II.8 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E102 en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique.*

Le modèle de cette évolution est quadratique :

$$R_d = 1,023 + (0,021 \times T) - (0,0000161 \times T^2) \quad \text{avec} \quad R = 0,91$$





*Figure II.9 : Evolution de la résistance d'encrassement de la cellule E102 en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentielle.*

Le modèle de cette évolution est exponentiel

$$R_d = 2,794 \exp(0,00167 \times T) \quad \text{avec } R = 0,85$$

## A.2/ Choix du modèle de la résistance d'encrassement

Le tableau suivant donne les coefficients de corrélation des différents modèles pour les cellules étudiées

Cellules \ Modèles	Cellule E101 CBA	Cellule E101 FED	Cellule E102 CBA
Modèle linéaire	<b>0,71</b>	<b>0,56</b>	<b>0,86</b>
Modèle quadratique	<b>0,72</b>	<b>0,63</b>	<b>0,91</b>
Modèle exponentielle	<b>0,70</b>	<b>0,54</b>	<b>0,85</b>

*Tableau IV.3 Différents modèles de la résistance d'encrassement avec leurs coefficients de corrélation.*

L'évolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps suit une allure quadratique pour les trois cellules (Le meilleur modèle des cellules est celui qui correspond au meilleur coefficient de corrélation).

L'augmentation de la valeur de la résistance pour la cellule E101CBA s'explique par la présence importante des dépôts sur les surfaces d'échanges jusqu'à une valeur pratiquement stable, cette dernière est imposé par le phénomène de réentraînement qui élimine l'accumulation des dépôts par arrachement des particules de la surface d'échange.

Pour la cellule E101 FED, on constate que l'encrassement est relativement important par rapport à celui de la cellule E101CBA, malgré le second nettoyage de cette cellule ayant eu lieu bien avant l'arrêt des trois cellules. Ceci s'explique par le mauvais nettoyage ainsi que par le nettoyage répétitif, ce dernier réduit l'efficacité des surfaces d'échange.

Pour la cellule E102 CBA, on remarque que la valeur de la résistance est moins importante que pour les autres cellules, ceci s'explique par la présence de dessaleur en amont de cette cellule.

## **B/ Pertes de charge**

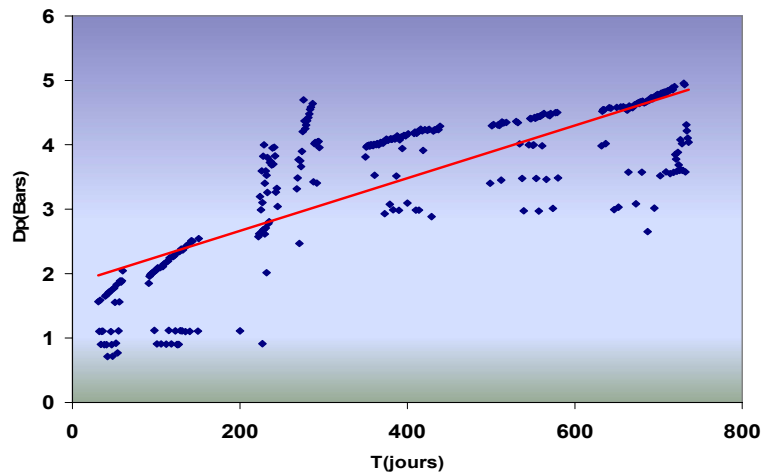
Les résultats de l'évolution de la résistance d'encrassement s'accompagnent avec celles de la perte de charge, cette dernière peut donner une idée sur l'état d'encrassement d'un échangeur pour un débit constant. [21]

En effet, l'encrassement entraîne une augmentation de la perte de charge en réduisant le diamètre interne des tubes d'échangeur et en augmentant le facteur de friction suite aux effets de rugosité.

### **B.1/ Modélisation des pertes de charge**

L'analyse des données concernant les pertes de charges pour les différentes cellules nous donne les évolutions suivantes :

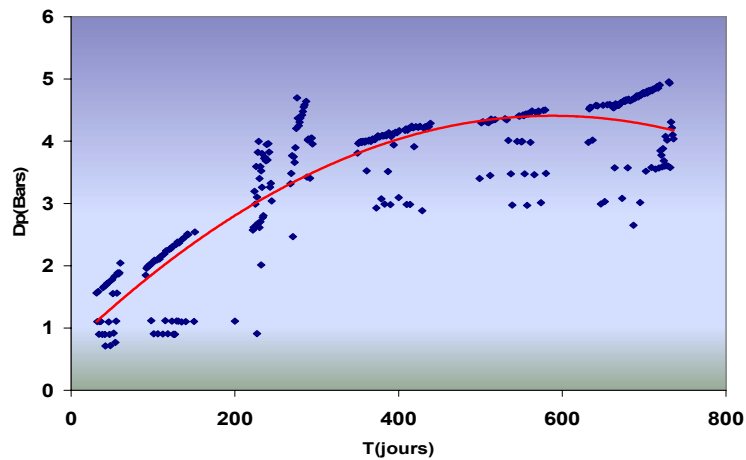
Perte de charge de la cellule E101CBA



*Figure II.10 : Evolution de la perte de charge de la cellule E101CBA en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire.*

Le modèle de cette évolution est linéaire :

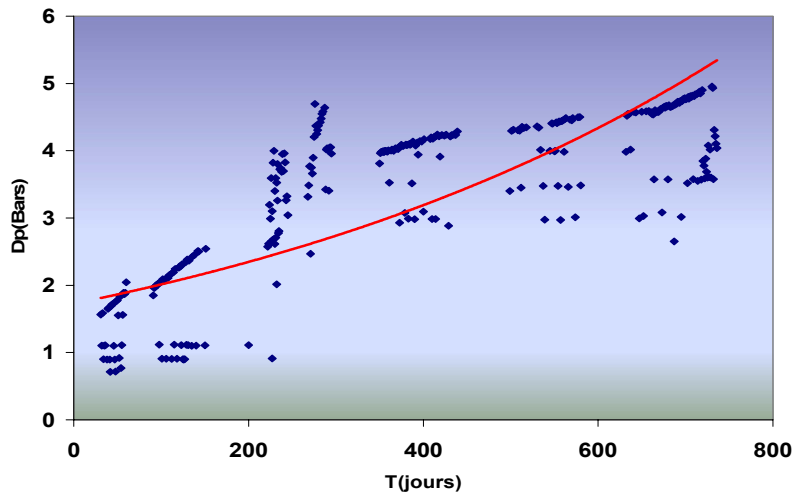
$$\Delta P = 1,844 + (0,0041 \times T) \quad \text{avec } R=0,78$$



*Figure II.11 : Evolution de la perte de charge de la cellule E101CBA en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique*

Le modèle de cette évolution est quadratique :

$$\Delta P = 0,725 + (0,0125 \times T) - (0,000011 \times T^2) \quad \text{avec } R=0,87$$

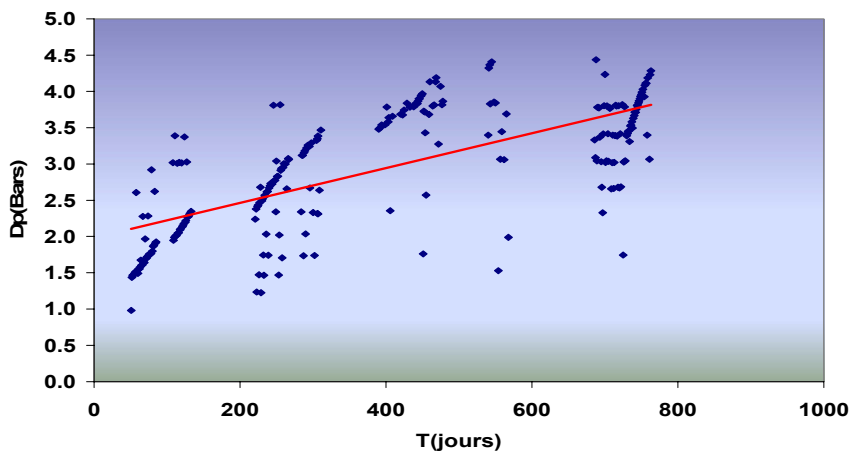


*Figure II.12 : Evolution de la perte de charge de la cellule E101CBA en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentielle*

Le modèle de cette évolution est exponentiel :

$$\Delta P = 1,725 \exp(0,00153 \times T) \quad \text{avec} \quad R = 0,74$$

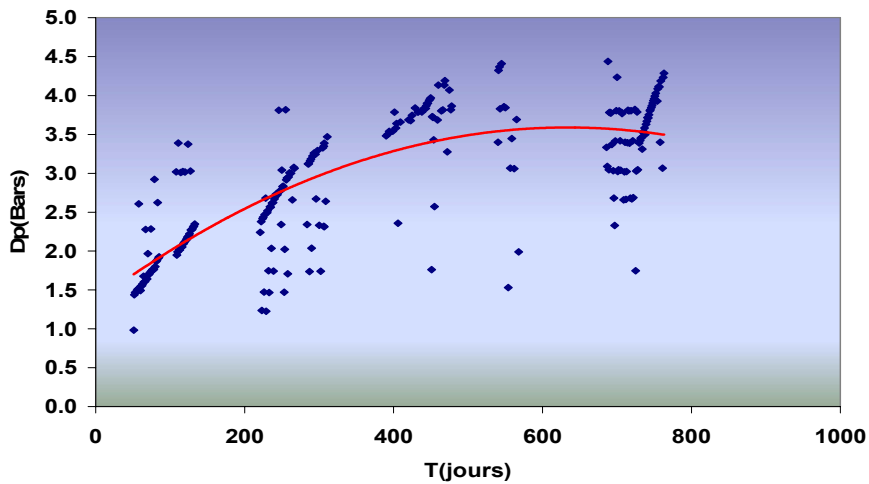
Perte de charge de la cellule E101 FED



*Figure II.13: Evolution de la perte de charge de la cellule E101FED en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire.*

Le modèle de cette évolution est linéaire :

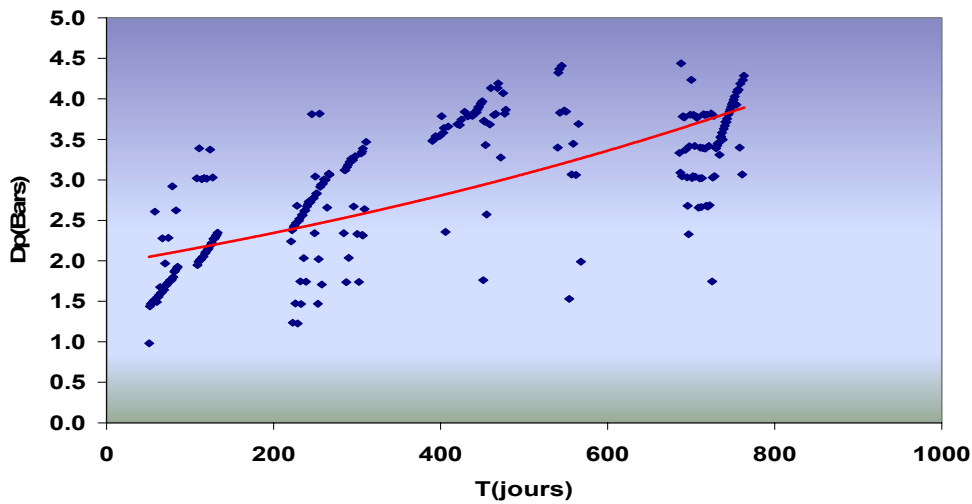
$$\Delta P = 1,984 + (0,0024 \times T) \quad \text{avec} \quad R = 0,70$$



*Figure II.14 : Evolution de la perte de charge de la cellule E101FED en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique.*

Le modèle de cette évolution est quadratique :

$$\Delta P = 1,354 + (0,007 \times T) - (5,6 \cdot 10^{-6} T^2) \quad \text{avec} \quad R = 0,76$$

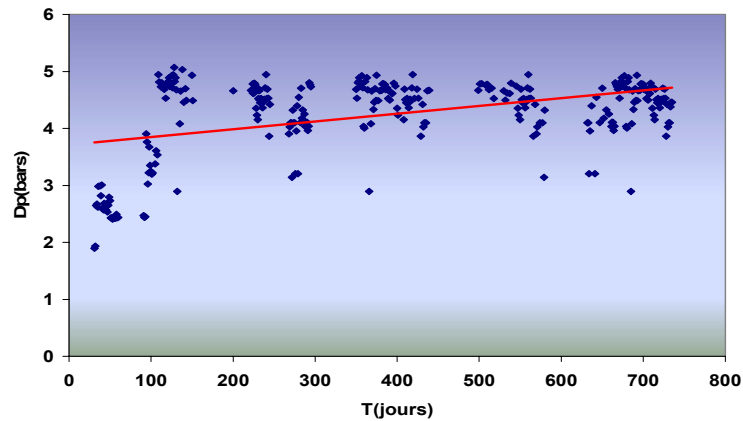


*Figure II.15 : Evolution de la perte de charge de la cellule E101FED en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentielle*

Le modèle de cette évolution est exponentiel :

$$\Delta P = 1,958 \exp(0,000897 \times T) \quad \text{avec} \quad R = 0,69$$

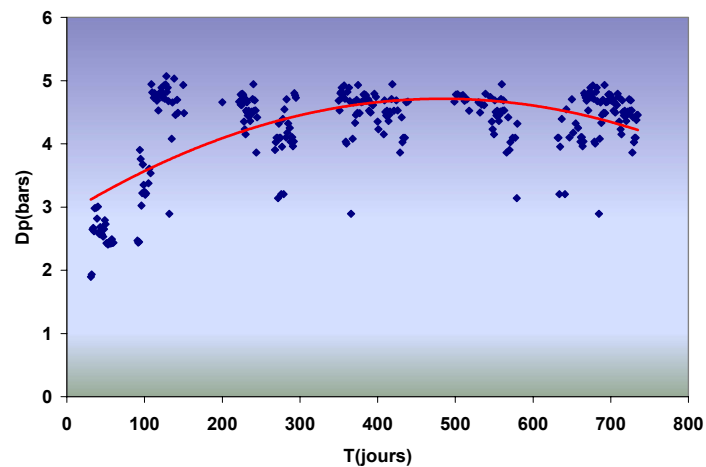
Perte de charge de la cellule E102 CBA



**Figure II.16:** Evolution de la perte de charge de la cellule E102 en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire.

Le modèle de cette évolution est linéaire :

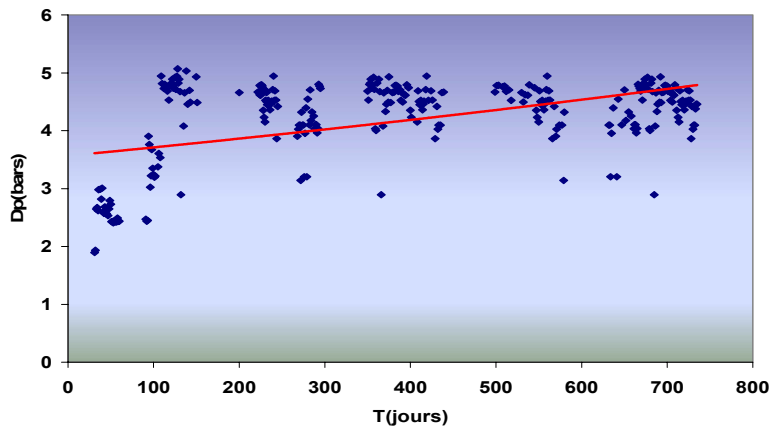
$$\Delta P = 3,442 + (0,00174 \times T) \quad \text{avec } R = 0,55$$



**Figure II.17:** Evolution de la perte de charge de la cellule E102 en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique.

Le modèle de cette évolution est quadratique :

$$\Delta P = 3,28 + (0,00289 \times T) - (1,5 \cdot 10^{-6} \times T^2) \quad \text{avec } R = 0,56$$



*Figure II.18: Evolution de la perte de charge de la cellule E102 en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentielle.*

Le modèle de cette évolution est exponentiel :

$$\Delta P = 3,373 \exp(0,00046 \times T) \quad \text{avec} \quad R = 0,54$$

## B.2 Choix du modèle des pertes de charge

Le tableau suivant donne la comparaison entre les trois modèles :

Cellules Modèles	Cellule E101 CBA	Cellule E101 FED	Cellule E102 CBA
Modèle linéaire	<b>0,78</b>	<b>0,70</b>	<b>0,55</b>
Modèle quadratique	<b>0,87</b>	<b>0,76</b>	<b>0,56</b>
Modèle exponentielle	<b>0,74</b>	<b>0,69</b>	<b>0,54</b>

*Tableau IV.4 : Différents modèles de la perte de charge avec leurs coefficients de corrélation.*

L'évolution de la perte de charge en fonction du temps suit une allure quadratique (le meilleur modèle qui correspond au meilleur coefficient de corrélation), Après un certain temps de fonctionnement, il y apparition de dépôts à l'intérieur et à l'extérieur des tubes. Ces dépôts constituent des résistances supplémentaires au transfert de chaleur de sorte que ce dernier diminue. Dans ces conditions, la résistance d'encrassement devient donc très rapidement assez importante. Il est donc clair que l'augmentation de la résistance d'encrassement s'accompagne avec l'augmentation de la perte de charge.

#### **IV.3.4 Aspect économique du phénomène :**

L'encrassement est un problème qui se traduit par des dépenses pendant le fonctionnement d'un échangeur de chaleur et pendant l'arrêt de ce dernier pour le nettoyage. Une optimisation du cycle de nettoyage de la cellule E 102 étudiée a été faite pour une période entre deux arrêts. [57]

##### **A/ Coûts de nettoyage**

Le coût de nettoyage d'une seule cellule constituée de 3 échangeurs pendant une période entre deux arrêts :

##### **1. Coût de montage et de démontage $C_1$**

Six ouvriers travaillant pendant 46 heures (16heures pour le démontage et 30 heures pour le remontage), sur une seul échangeur avec une salaire de 870 DA/h

$$\begin{aligned} C_1 &= [(870*6)*46]*3 \\ &= 720360 \text{ DA} \end{aligned}$$

##### **2. Coût d'entretien $C_2$**

Le temps d'entretien est estimé à 40 heures, le même nombre d'ouvriers et le même salaire que précédemment

$$\begin{aligned} C_2 &= [(870*6)*40]*3 \\ &= 626400 \text{ DA} \end{aligned}$$



### 3. Coût de l'eau de rinçage C<sub>3</sub>

Une quantité de 24 m<sup>3</sup> d'eau est utilisée pour le rinçage des échangeurs, son prix est estimé à 12 DA/m<sup>3</sup>

$$\begin{aligned}C_3 &= 12 * 24 \\ &= 864 \text{ DA}\end{aligned}$$

Le prix de nettoyage d'une cellule d'échangeur est évalué

$$\begin{aligned}C_4 &= C_1 + C_2 + C_3 \\ C_4 &= 720360 + 626400 + 864 \\ C_4 &= 1347624 \text{ DA}\end{aligned}$$

La cellule étudiée (E 102CBA) a subi deux nettoyages entre deux arrêts de l'unité ; on se propose d'optimiser le cycle de nettoyage de cette cellule :

Le coût C<sub>5</sub> de nettoyage de cette cellule revient à :

$$\begin{aligned}C_5 &= 2 \times C_4 \\ C_5 &= 2 \times 1347624 \\ C_5 &= 2695248 \text{ DA}\end{aligned}$$

### 4. Manque à gagner C<sub>6</sub>

Le manque à gagner pour un nettoyage est estimé à 393.7 tonnes approximativement, si le prix d'une tonne de produit est de 7960 DA/T, le manque à gagner serait alors :

$$\begin{aligned}C_{61} &= 7960 \times 393.7 \\ &= 31296332 \text{ DA}\end{aligned}$$

Pour E102 avec deux nettoyages

$$\begin{aligned}C_{62} &= 2 \times C_{61} \\ &= 62592664 \text{ DA}\end{aligned}$$

La production annuelle de la raffinerie est de 2725834 tonnes équivalent de 315 tonnes/heures, puisque le nettoyage des échangeurs prend en moyenne 86 heures

Le manque à gagner serait :

$$\begin{aligned} C_{63} &= (315 \times 86) \times 7960 \\ &= 215636400 \text{ DA} \end{aligned}$$

Le manque à gagner total durant une période entre deux arrêts pour **E102**

$$\begin{aligned} C_6 &= C_{62} + C_{63} \\ &= 62592664 + 215636400 \\ &= 278229064 \text{ DA} \end{aligned}$$

Le prix total d'un arrêt de la cellule d'échangeur étudiée est la somme des coûts de nettoyage et de manque à gagner :

$$\begin{aligned} C_7 &= C_5 + C_6 \\ &= 2695248 + 278229064 \\ &= 280924312 \text{ DA} \end{aligned}$$

## **B/ Coût dû à l'encrassement**

Pendant le fonctionnement des échangeurs de chaleurs, le mauvais fonctionnement de ces derniers a des conséquences sur la production soit arrêter la production pour procéder au nettoyage soit prolonger leur fonctionnement. Mais à ce niveau il y aura des effets néfastes sur les dépenses qui peuvent être engendrées. Dans notre cas l'encrassement des échangeurs de chaleurs peut être exprimé par l'ajout de quantité en plus du combustible qui alimente le four, afin de maintenir la température d'entrée de la colonne de distillation.

L'évaluation du coût associé à l'addition du gaz consommé est le coût du à l'encrassement. Pour cela on doit calculer le débit du gaz combustible ajouté pendant le fonctionnement.

### B.1/ Le pouvoir calorifique du gaz combustible :

Gaz Combustible	% Molaire	M	Pouvoir Calorifique Inférieur [kcal/kg]
H <sub>2</sub>	6.76	2	2580
CH <sub>4</sub>	0.41	16	8550
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	64.6	30	14100
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	26.78	44	21800
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.45	58	28340

*Tableau IV..5 : La composition du gaz de combustible et le pouvoir calorifique de chaque constituant*

Le pouvoir calorifique inférieur du gaz combustible est de

$$\begin{aligned} Q_{\text{inf}} &= \sum Q_{\text{inf}} X_i \\ &= 2580 \cdot 0.076 + 8550 \cdot 0.0041 + 14100 \cdot 0.646 + 21800 \cdot 0.6278 + 28340 \cdot 0.0145 \\ &= 15567.033 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

### B.2/ Quantité de chaleur absorbée par le brut flashé

Le chauffage des produits se fait par l'intermédiaire des calories dégagées pendant la combustion, nous pouvons considérer que la chaleur apportée par le combustible aux produits est égale à la chaleur de combustion :  $Q_{\text{app}} = Q_{\text{com}}$

La quantité de chaleur absorbée par le brut flashé est de :

$$Q_a = G[(h_s - h_e) + e(H_s - h_e)]$$

Avec

G : Débit du brut flashé, qui est égale pendant le fonctionnement normal à 302923 kg/h. mais avec l'encrassement des échangeurs de chaleur ce débit varie pour maintenir la production

Q<sub>a</sub>: Quantité de chaleur absorbée par le brut flashé.

e : Taux de vaporisation de la charge à la sortie du four qui est égale à 65%.

$h_s, h_e, H_s$  : les enthalpies des phases liquides et vapeur aux température d'entrée et de sortie du four (la température à la sortie du four égale à 360°C) , elles sont déterminées graphiquement.

$$h_s = 230 \text{ kcal/kg}, H_s = 270 \text{ kcal/kg}$$

La quantité de chaleur dégagée dans la chambre de combustion, elle est déterminée par la formule :

$$Q_{\text{éel}} = Q_a / \eta$$

Avec

$Q_a$  : Quantité de chaleur absorbée par la charge.

$\eta$  : Rendement thermique du four égal à 80% .

### **B.3/ Débit du combustible :**

Le débit du combustible ajouté est la différence entre le débit initial (dans le cas d'un fonctionnement normal des échangeurs de chaleurs, il égale à 4846,57 kg/ h) et le débit final

$$\text{Avec} \quad G_{\text{comb final}} = Q_{\text{réel}} / Q_{\text{inf}}$$

$$\text{Donc} \quad \Delta G_{\text{combi}} = G_{\text{combi initial}} - G_{\text{comb final}}$$

$$\text{Le coût associé est : } C_{\text{com}} = C_{\text{unitaire}} \times \Delta G_{\text{comb}}$$

$$\text{Avec} \quad C_{\text{unitaire}} = 1678,61 \text{ DA h/kg ;}$$

### **C/ Optimisation du cycle de nettoyage par la méthode du moindre coût :**

La méthode du moindre coût nous permet de calculer le coût qui correspond à un coût total minimal, ce dernier est la somme entre deux coûts :

- Coût du au nettoyage : égal au coût de nettoyage divisé par le nombre de jour :  $Y_1 = C_7 / T$

- Coût de la quantité du combustible ajoutée :  $Y_2 = C_{\text{com}} * T$

$$\text{Avec } Y_2 = \alpha T + \beta \quad \text{ou } \alpha = 578,443$$

$$\beta = 24855,3$$

Le tableau suivant donne les valeurs des différents paramètres permettant ce calcul

Temps (jour)	Débit du brut (kg/h)	Coût du au nettoyage (DA)	Enthalpie de brut à L'entrée (Kcal/kg)	Débit du combustible final (kg/h)	$\Delta G$ combustible (Kg/h)	Coût de combustible ajouté (DA)	Coût total (DA)
100	375983	2791286.32	94	4889.88	43.31	72700.5991	2863986.92
150	382812	1860857.55	97	4907.11	60.54	101623.049	1962480.6
200	389641	1395643.16	99	4924.34	77.77	130545.5	1526188.66
250	396470	1116514.53	101	4941.57	95	159467.95	1275982.48
300	403299	930428.773	103	4958.8	112.23	188390.4	1118819.17
350	410128	797510.377	105	4976.03	129.46	217312.851	1014823.23
400	416957	697821.58	107	4993.26	146.69	246235.301	944056.881
450	423786	620285.849	109	5010.49	163.92	275157.751	895443.6
500	430615	558257.264	111	5027.72	181.15	304080.202	862337.466
550	437444	507506.604	112	5054.95	208.38	349788.752	857295.355
600	444273	465214.387	114	5070.18	223.61	375353.982	840568.369
650	451102	429428.665	116	5089.41	242.84	407633.652	837062.317
700	45793	398755.189	118	5090.13	243.56	408842.252	807597.44
750	464760	372171.509	119	5134.869	288.299	483941.584	856113.094
800	471589	348910.79	120	5155.099	308.529	517899.865	866810.655

*Tableau IV 6 : calcul du coût total de l'échangeur E 102*

Le coût total est la somme des deux équations :

$$Y = Y_1 + Y_2$$

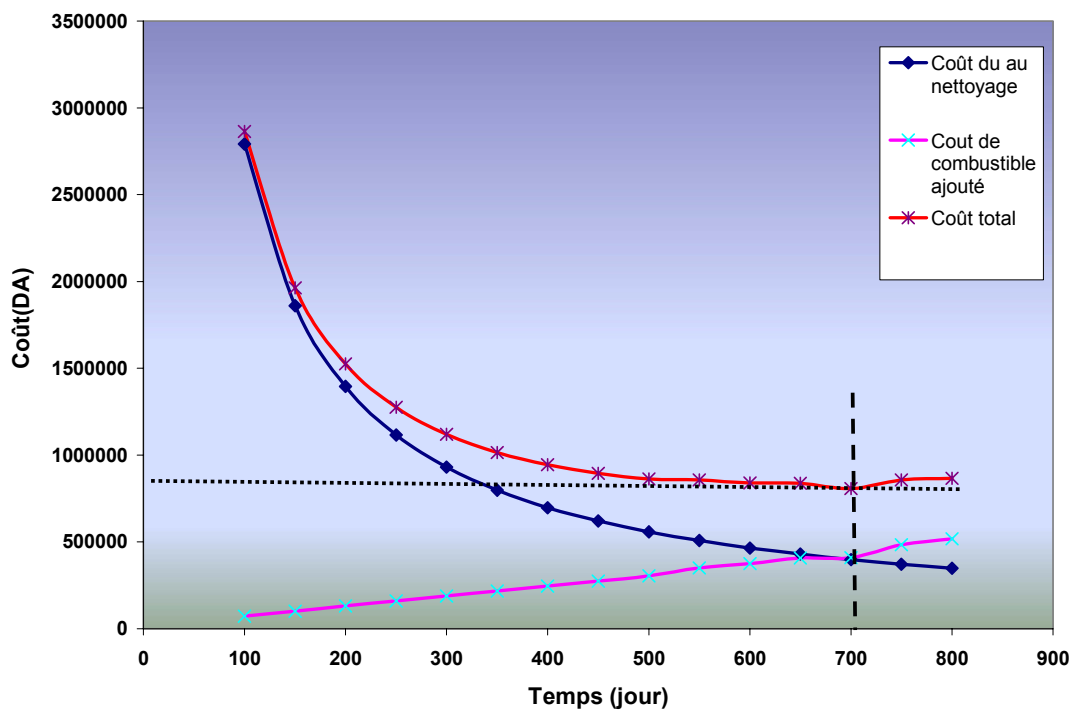
Le temps optimal quand  $\frac{dY}{dT} = 0$

$$\frac{dY}{dT} = \frac{d(Y_1 + Y_2)}{dT} = 0$$

$$\frac{dY}{dT} = \frac{-280924312}{T^2} + 578,449T = 0$$

Donc  $T = 700$  jours

Le graphe suivant donne l'évolution des coûts du au nettoyage de la cellule étudié ainsi le coût associé à l'ajout de la quantité de combustible :



*Figure IV.20 : Le coût d'encrassement en fonction du temps*

Cette approche d'optimisation par la méthode du moindre coût nous a permis de déterminer la périodicité d'arrêt de la cellule E102 pour le nettoyage et sa remise en état. D'après les calculs et le graphe obtenus par cette méthode la périodicité de nettoyage est évaluée à 700 jours.

Cette approche peut servir de feuille de route et constitue un sérieux outil d'aide de prise de décision pour les arrêts objectifs des échangeurs de chaleur.

Le temps optimal pour arrêter le fonctionnement de l'échangeur correspond à 700 jours c'est-à-dire que si on arrête avant cette période, les coûts de maintenance seront importants. Par contre si on arrête après, les coûts dus à l'encrassement seront importants, ce qui cause l'augmentation de la quantité de combustible. Par conséquent les dépenses de cet ajout vont augmenter et engendrer aussi des surplus de pollution.

Donc arrêter à ce moment nous donne un compromis entre les frais de maintenance et de fonctionnement, une stratégie de nettoyage pour assurer le transfert de chaleur et réduire la consommation du gaz de combustible.

## **Conclusion**

L'analyse et le traitement des données recueillis in situ (raffinerie d'Alger) nous a permis d'élaborer des modèles mathématiques, à savoir :

- l'évolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps des différentes cellules ;
- l'évolution des pertes de charge en fonction du temps.

Ces modèles sont des modèles déterministes qui peuvent servir de feuille de route pour la prise de décision des arrêts pour le nettoyage.

En prenant en considération l'aspect économique de l'exploitation d'une cellule d'échangeur , il nous a été permis de déterminer la périodicité d'arrêt de cette dernière pour nettoyage et ceci en utilisant la méthode du moindre coût.

# **Chapitre V**

## **Aspect stochastique de l'encrassement**



## CHAPITRE V : Aspect stochastique de l'encrassement

L'encrassement des échangeurs de chaleur est un phénomène très compliqué, il est la raison de l'augmentation d'énergie, des coûts de maintenance et des coûts opérationnels, ce qui a poussé différents chercheurs à l'étude de ce phénomène afin de remédier ces effets néfastes.

L'utilisation des modèles déterministes (linéaire ou non linéaire) est limitée [88.89], mais les résultats obtenus par ces modèles ne décrivent pas la situation réelle à cause de l'incertitude du processus ce qui a entraîné une nouvelle tentative d'approche : l'approche probabiliste du processus. Le développement des méthodes probabilistes dans le contexte d'une compréhension détaillée des données a permis d'obtenir des analyses empiriques rigoureuses.

### V.1 Approche probabiliste

La notion de variable aléatoire est à la fois le concept et l'outil mathématique qui permettra de faire un lien opératoire entre le calcul des probabilités (étude des espaces probabilisés pour faire des prévisions relatives à une expérimentation à venir) et la statistique (étude des résultats des expérimentations) en vue de retrouver le modèle probabiliste et ses paramètres.

#### V.1.1 Fonction de distribution

La fonction de distribution d'une variable aléatoire  $X ; \Omega \longrightarrow \mathcal{R}$  (ou  $\mathcal{N}$ ) est définie par :

$$F_X : \mathcal{R} \text{ (ou } \mathcal{N}) \longrightarrow [0 ; 1]$$

$$: \mathcal{X} \longrightarrow \Pr ( X \leq \mathcal{X} )$$

Où  $X$  est ici évaluée sur  $\Omega$  (pour l'ensemble des événements).

La densité de  $X$  est (pour les variables aléatoires continues) :

$$F_X(x) = \frac{\delta F_X}{\delta x}$$

On note que pour les fonctions continues,

$$Pr (X = x) = 0,$$

Pour tout  $x$  et qu'on peut noter en revanche,

$$Pr (X \in [x, x+dx]) = f_X(x)dx$$

Et que si  $X$  prend un nombre fini de valeur

$$f_X(x)dx = Pr (X = x) .$$

Le lien entre les distributions et densité est donc fourni par :

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(u)du$$

On note que pour les variables aléatoires réelles (définies sur  $\mathbb{R}$ ) :

$$F_X(x) \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} 1,$$

$$F_X(x) \xrightarrow{x \rightarrow -\infty} 0,$$

$$F_X(x) \xrightarrow{x \rightarrow \pm\infty} 0.$$

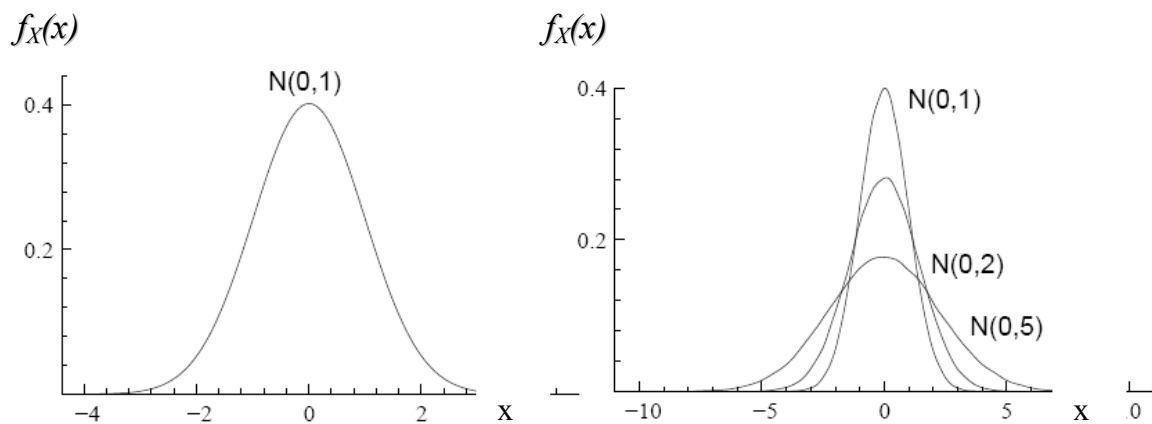
## V.1.2 Distribution Normale

La distribution Normale ou Gaussienne est la plus couramment utilisée. Elle apparaît naturellement lorsque on s'intéresse à la distribution de la moyenne et présente des propriétés pratiques de translation. Sa densité est :

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad x, \mu \in \mathbb{R}, \sigma^2 \in \mathbb{R}_+$$

Les distributions étant des familles de variables aléatoires, on constate ici que chaque  $X$  Gaussienne est paramétrée par sa moyenne  $\mu$  et sa variance  $\sigma^2$ , ce qu'on note :

$$X \sim N(\mu, \sigma^2).$$



**Figure V.1:** Graphiques des densités des distributions standard Normale, Normale

Mathématiquement, on peut penser à la densité  $f_X$  de la manière suivante :

$$\text{Log}f_X(x) = c - \frac{1}{2\sigma^2}(x - \mu)^2$$

La log-densité est quadratique en  $x$ , la constante  $c$  est déterminée de sorte que

$$\Pr(\Omega) = 1 = \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) dx$$

La densité Normale à  $\mathcal{R}$  comme support est centrée autour de  $\mu$ ,  $\sigma$  contrôle sa dispersion. Une propriété importante de la distribution Normale est que si

$$X \sim N(\mu, \sigma^2)$$

Alors

$$\gamma + \lambda X \sim N(\gamma + \lambda\mu, \lambda^2 \sigma^2)$$

Cela veut dire que les transformations affines d'une Normale sont normales. Ceci entraîne qu'on puisse écrire toute distribution Gaussienne comme :

$$X = \mu + \sigma N$$

Ou N suit une loi Normale standard  $N \sim N(0,1)$  ; ainsi si X et Y suivent deux Normales indépendantes :

$$X + Y \sim N(\mu_X + \mu_Y, \sigma_X^2 + \sigma_Y^2).$$

### V.1.3 Autres distributions :

Il existe une multitude de distributions parmi lesquelles on rencontre fréquemment :

#### ➤ Khi deux

Supposons que  $X_i \sim N(0,1)$ , alors

$$Y = \sum_{I=1}^v X_I^2 - X_v^2$$

Une distribution Khi-deux avec v degrés de liberté, l'espérance et la variance d'une distributions  $X_v^2$  sont respectivement v et 2v

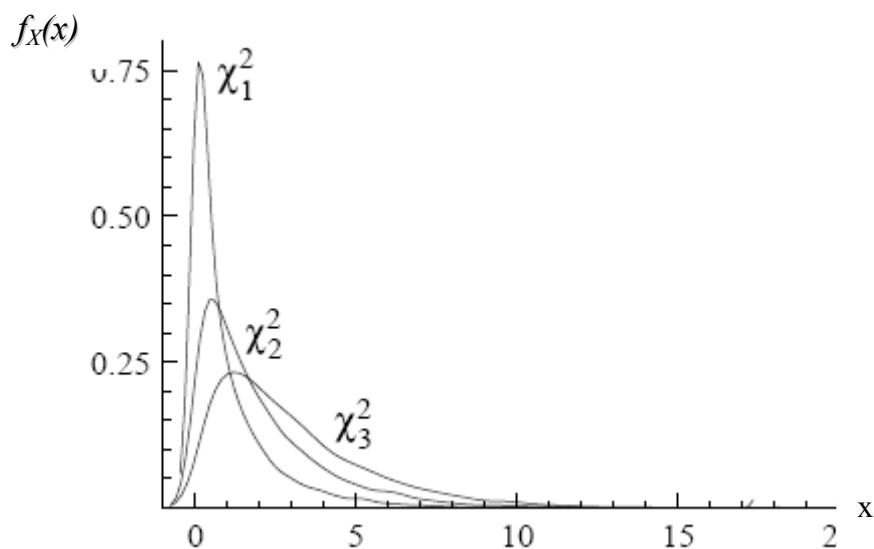


Figure V.2 : Graphiques des densités des distributions de khi - deux

## ► Uniforme

On contraint parfois les variables sur de petits intervalles, l'exemple le plus simple est la distribution uniforme standard

$$f_X(x) = 1, x \in [0,1].$$

Cette variable n'a que le segment  $[0,1]$  comme support, cette distribution est souvent utilisée dans les modèles stylisés afin d'introduire une idée ou un concept, elle est aussi utilisée en simulation. Une uniforme plus générale se définit comme

$$f_X(x) = \frac{1}{b-a}, x \in [a, b]$$

## ► Poisson

Soit  $X$  une variable aléatoire discrète, ou  $x = 0, 1, 2, \dots$ , loi de poisson ou loi des événements rares est défini comme :

$$f_X(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}$$

Le domaine d'application de cette loi a été longtemps limité à celui des événements rares mais depuis quelques décennies son champ d'application s'est considérablement élargi, lorsque le paramètre  $\lambda$  de cette loi devient grand (pratiquement lorsqu'il supérieur à 5) son diagramme en bâton est correctement approché par l'histogramme d'une loi d'espérance et de variance égales  $\lambda$

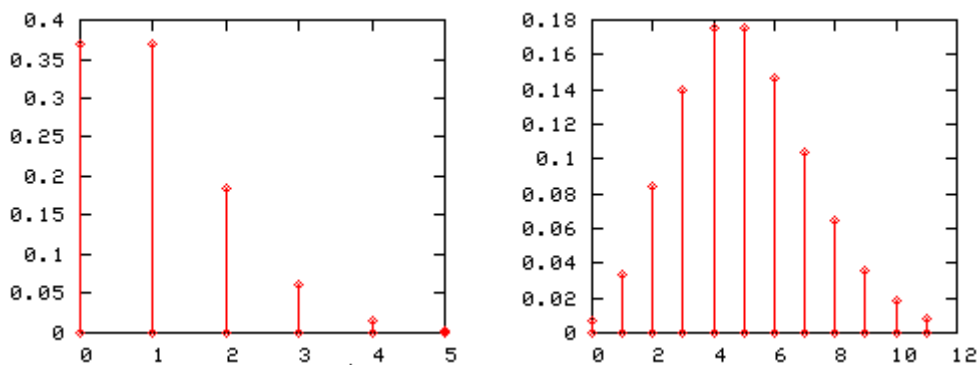


Figure V.3 : Distribution de loi de poisson,  $\lambda = 2,5$

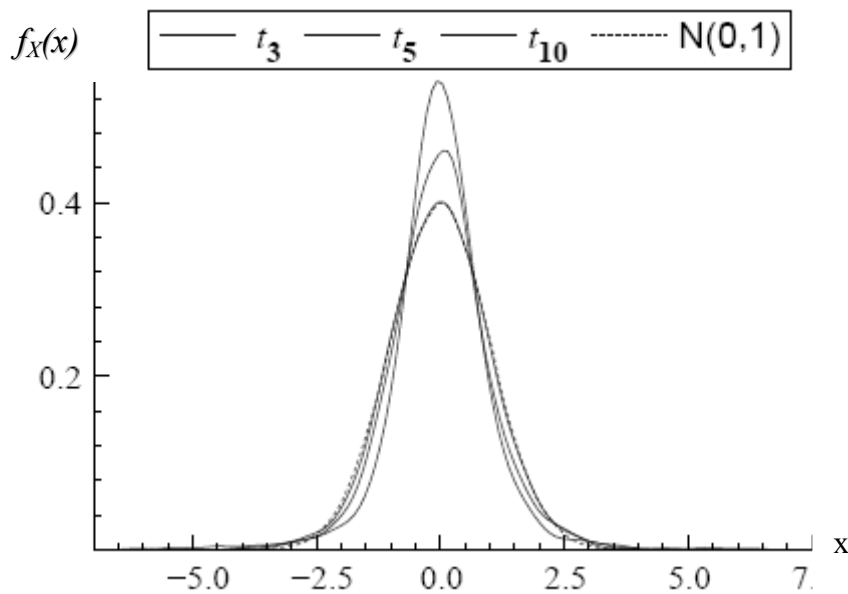
## ► Student

Si  $Z$  suit une  $N(0,1)$  et  $X$  suit Une distribution Khi-deux indépendant de  $Z$ , alors le ratio

$$t_v = \frac{Z}{\sqrt{X/v}}$$

Suit une distribution dite de Student avec  $v$  degrés de liberté, celle-ci à la même forme qu'une distribution normale, mais avec des bords plus épais.

Quand  $v$  augmente,  $t_v$  se comporte de plus en plus comme une loi Normale, entre  $v=30$  et  $100$  une Normale standard une bonne approximation, au-delà de  $100$  on ne peut les distinguer.



**Figure V.4 :** Graphiques des densités des distributions de Student

## V.2 Description du problème

Le contrôle d'un grand nombre des facteurs internes et externes du phénomène d'encrassement est compliqué, pour prédire la vraie situation c'est de trouver son évolution en fonction du temps. La littérature [89] montre une grande différence entre les résultats théoriques obtenus en laboratoire et l'industrie, cette différence a permis de considérer le phénomène aléatoire pour des raisons suivantes [90,91]

1. Le débit de fluide est mal distribué dans les tubes d'un échangeur.
2. Les perturbations dans la vitesse d'écoulement et pression autour de la valeur moyenne.
3. Les fluctuations de la température de surface d'échange autour de la valeur moyenne.
4. Les perturbations dans la composition chimique des dépôts.
5. Variations dans les caractéristiques métallurgiques des tubes ou plaques d'un échangeur de chaleur.

Cette considération a pour but de trouver la probabilité d'atteindre le niveau critique de l'encrassement c'est avoir la plage de fonctionnement normale d'un échangeur de chaleur en se basant sur des modèles déterministes de la résistance d'encrassement comme :

- Modèle linéaire
- Modèle de puissance

### V.2.1 Modèle linéaire

#### A/ Description

En se basant sur les données (figure V.5) [91] ou les mêmes expériences sont faites plusieurs fois dans les mêmes conditions, on a constaté que :

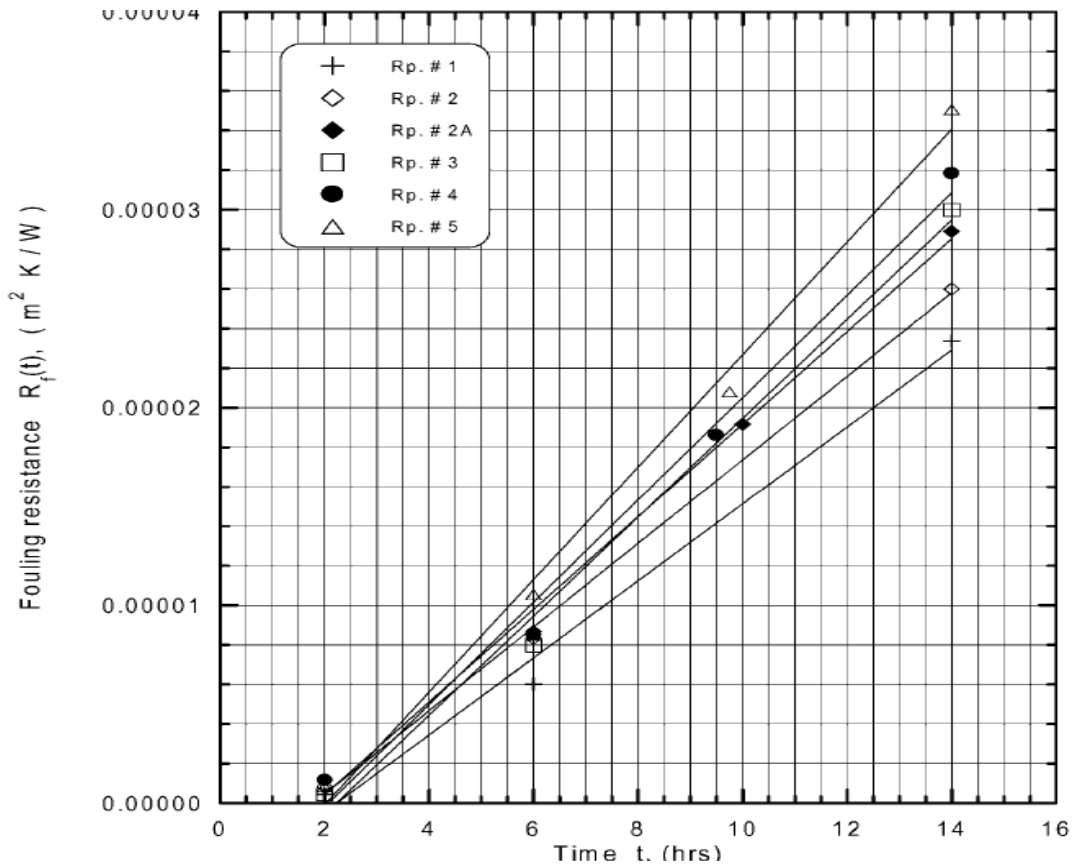
L'évolution de la résistance d'encrassement est généralement caractérisée par un modèle linéaire dont l'expression :

$$R_d(t) = R_o + B \times (T)$$

Où  $R_0$  : est la résistance initiale,

$B$  : est le taux de changement de la résistance d'encrassement, avec

$$B = d(R_d(T)) / d(T)$$



**Figure V.5 :** L'évolution de la résistance d'encrassement (modèles linéaires avec différentes expériences [91])

On définit une vitesse d'évolution de la résistance d'encrassement comme étant la variation de la résistance d'encrassement par rapport au temps, elle est donnée par l'équation suivante :

$$B = \frac{\Delta R_d(T)}{\Delta T}$$



En supposant que la résistance d'encrassement initial et la vitesse d'évolution de la résistance d'encrassement sont des paramètres aléatoires, suivent une loi Normale, généralement la résistance d'encrassement initiale est négligeable de ce fait, sa probabilité est nulle, la distribution de la vitesse d'évolution de la résistance d'encrassement est caractérisée par la moyenne  $\mu(B)$  et l'écart type  $\sigma(B)$ .

En se basant sur les propriétés de la loi Normale, la moyenne de la résistance d'encrassement à un moment donné est :

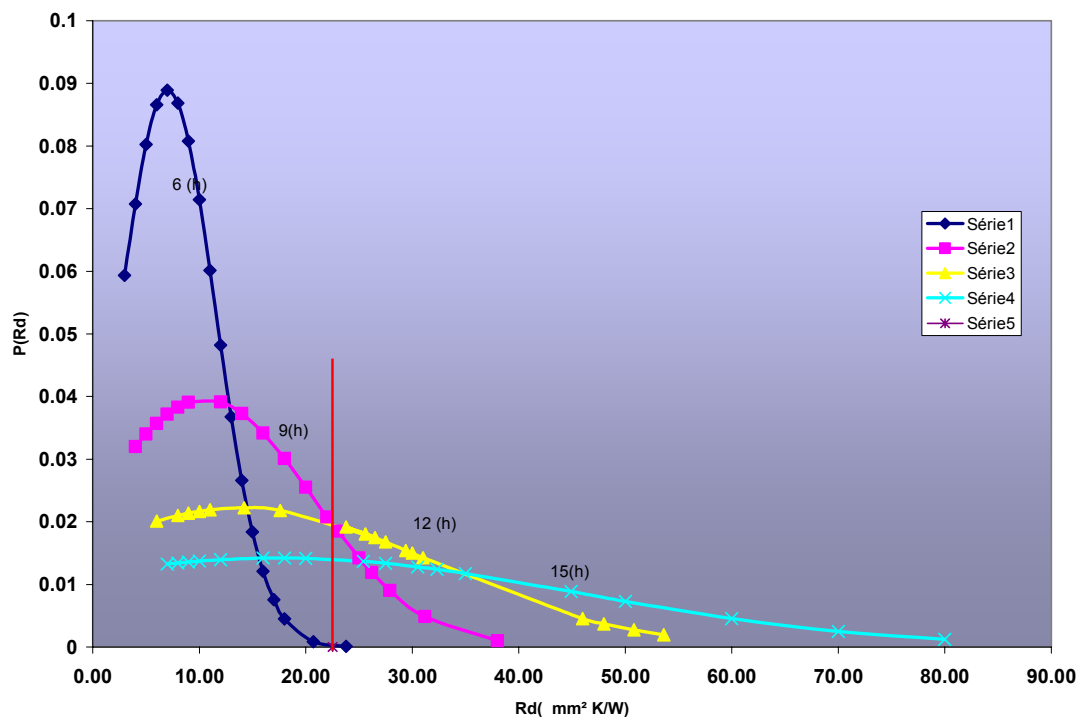
$$\mu(R_d(T)) = \mu(R_o) + \mu(B)T$$

Et la variance de cette résistance est :

$$\sigma^2(R_d(T)) = \sigma^2(R_o) + \sigma^2(B) \times T^2$$

## B/ Résultats et Interprétations

Après avoir calculé la moyenne et l'écart type, la distribution la résistance d'encrassement à un moment donné est présentée sur le graphe suivant :



**Figure V.6 :** La probabilité de la résistance d'encrassement avec plusieurs expériences pour le modèle linéaire.

Il faut noter que la surface d'échange doit être nettoyée quand la résistance d'encrassement atteint ou dépasse la valeur maximale (critique) ; c'est de déterminer le temps critique qui correspond à cette valeur.

La probabilité de bon fonctionnement est définie par l'aire limitée par la courbe de la distribution de la résistance d'encrassement à un moment donné et l'axe de la résistance d'encrassement critique (en utilisant la loi Normale standard).

La probabilité de bon fonctionnement est définie par :

$$\begin{aligned} P [T_c > T] &= P [R_d(t) < R_{dc}] \\ &= \Psi \left[ \frac{R_{dc} - \mu R_d(T)}{\sigma R_d(T)} \right] \end{aligned}$$

Avec  $T_c$ : est le temps d'atteindre la valeur critique de l'encrassement

$R_{dc}$  : la résistance d'encrassement critique ( $R_{dc} = 22 \text{ mm}^2 \cdot \text{K/W}$ ).[91]

La probabilité de mauvais fonctionnement est définie par :

$$\begin{aligned} F(T) &= 1 - P [T_c > T] \\ &= 1 - P [R_d(T) < R_{dc}] \\ &= 1 - \Psi \left[ \frac{R_{dc} - \mu R_d(T)}{\sigma R_d(T)} \right] \end{aligned}$$

La probabilité de mauvais fonctionnement à l'instant de 6 heures est :

$$\begin{aligned} F(T) &= 1 - P [T_c > T] \\ &= 1 - P [R_d(T) < R_{dc}] \\ &= 1 - \Psi \left[ \frac{R_{dc} - \mu R_d(T)}{\sigma R_d(T)} \right] \\ &= 0,00028 \end{aligned}$$

La probabilité de mauvais fonctionnement à l'instant de 9 heures est :

$$\begin{aligned} F(T) &= 1 - P [T_c > T] \\ &= 1 - P [R_d(T) < R_{dc}] \end{aligned}$$

$$= 1 - \Psi \left[ \frac{R_{dc} - \mu R_d(T)}{\sigma R_d(T)} \right]$$

$$= 0,0118$$

La probabilité de mauvais fonctionnement à l'instant de 12 heures est :

$$F(T) = 1 - P [T_c > T]$$

$$= 1 - P [R_d(T) < R_{dc}]$$

$$= 1 - \Psi \left[ \frac{R_{dc} - \mu R_d(T)}{\sigma R_d(T)} \right]$$

$$= 0,319$$

La probabilité de mauvais fonctionnement à l'instant de 15 heures est :

$$F(T) = 1 - P [T_c > T]$$

$$= 1 - P [R_d(T) < R_{dc}]$$

$$= 1 - \Psi \left[ \frac{R_{dc} - \mu R_d(T)}{\sigma R_d(T)} \right]$$

$$= 0,431$$

D'après le graphe le seuil de la résistance critique montre que au bout de 12 heures la probabilité de bon fonctionnement sera réduite mais au bout de 15 heures la probabilité d'atteindre le niveau critique s'accroît à cause de l'importance de l'encrassement sur les surfaces d'échange, en laissant l'équipement en marche cette probabilité va être importante donc procéder à la maintenance préventive durant 15 heures permet de réduire l'encrassement et prolonger l'exploitation de l'équipement.

## V.2.2 Modèle de puissance

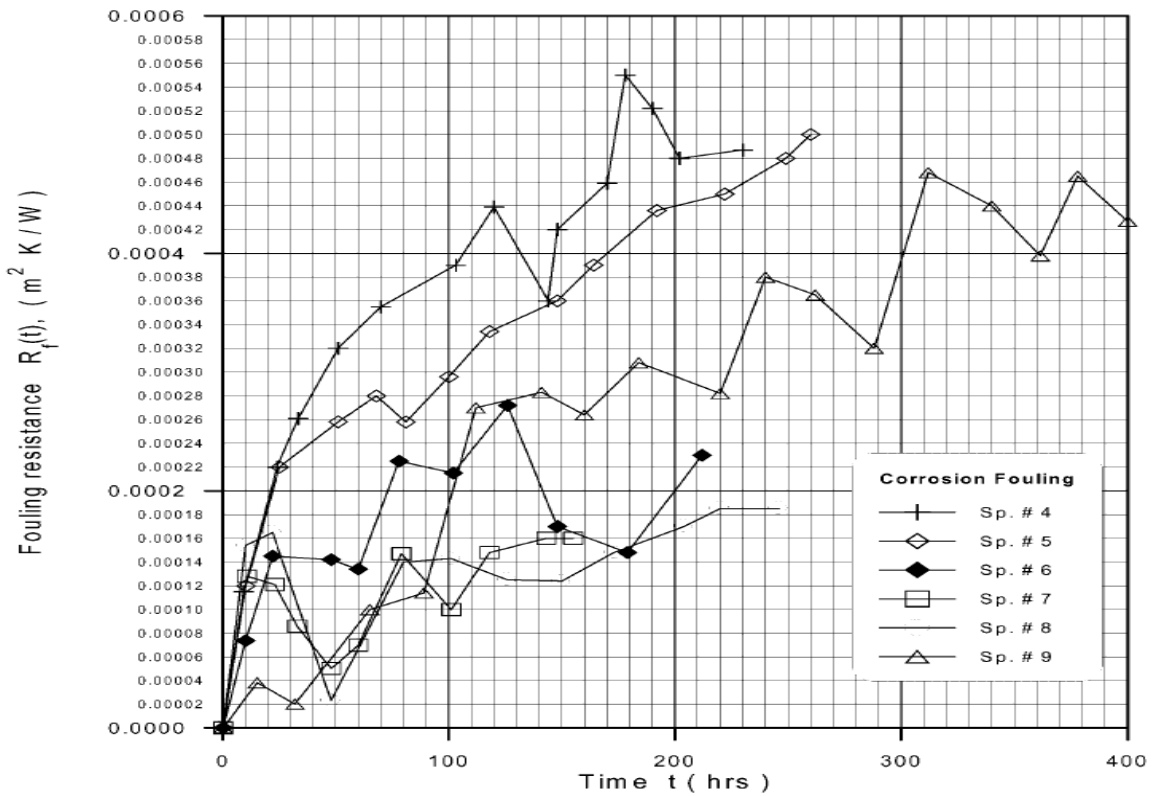
### A/ Description

Généralement la corrosion généralisée ou l'entartrage suit le modèle de puissance [92] suivant :

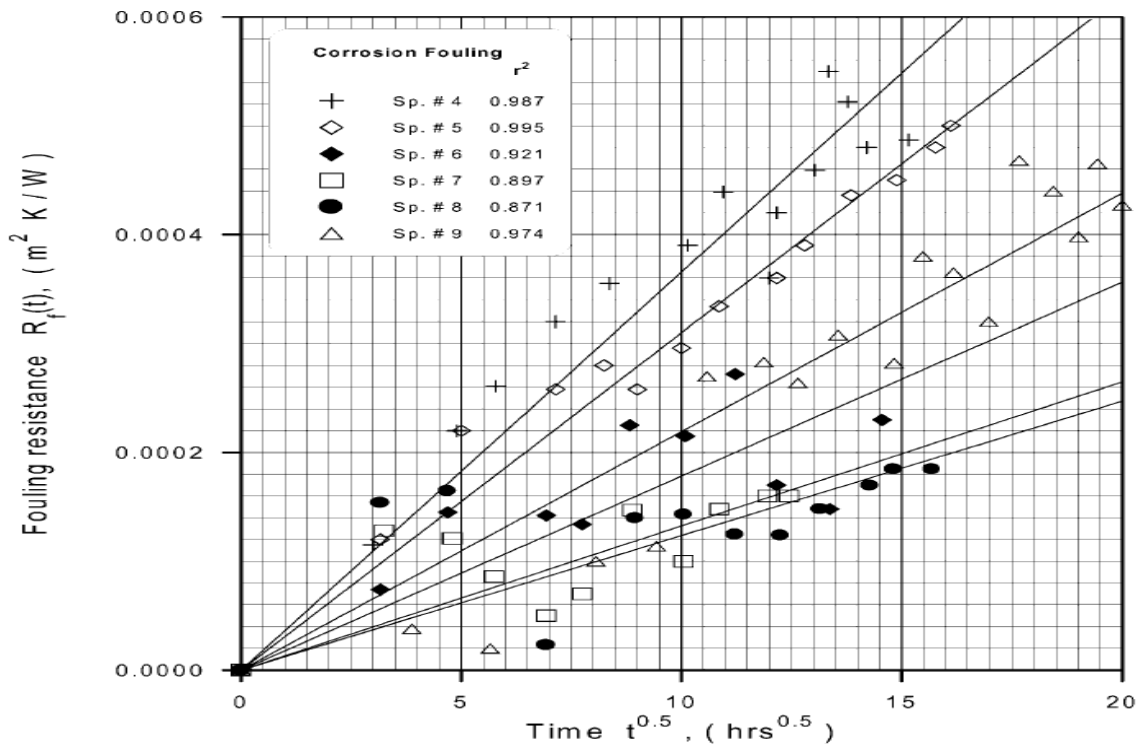
$$R_d(T) = m \times (T)^n \quad 0 < n \leq 1$$

Ou  $m$  représente la pente de  $\ln[Rd(t)]$  en fonction de  $\ln[T]$ .

En se basant sur les données du graphe (V.7), la meilleure interprétation de ces données est obtenue en traçant la résistance d'encrassement en fonction de temps pour  $n=0,5$  (figure V.8), ce qui permet de trouver la pente de la résistance d'encrassement par rapport au temps :



*Figure V.7 : L'évolution de la résistance d'encrassement (modèles de puissances avec différentes expériences [89]).*



**Figure V.8 :** L'évolution de la résistance d'encrassement (modèles de puissances pour  $T^{0.5}$  ( $n=0,5$ ) avec différentes expériences [91]).

En utilisant les résultats [89] obtenus expérimentalement, on détermine  $m$  c'est-à-dire la variation de la résistance d'encrassement en fonction du temps pour  $n=0.5$ . Cette variation exprime la vitesse d'évolution de la résistance par rapport au temps :

$$m = \frac{\Delta R_d (T^*)}{\Delta T^*} \quad \text{Ou} \quad T^* = T^{0.5}$$

En supposant que la vitesse d'évolution de la résistance d'encrassement est une quantité aléatoire qui suit une loi Normale ou la distribution de cette vitesse est caractérisée par la moyenne  $\mu(m)$  et l'écart type  $\sigma(m)$  et en se basant sur les propriétés de la loi Normal, la moyenne de la résistance d'encrassement à un moment donné (pour  $n=0,5$ ) est :

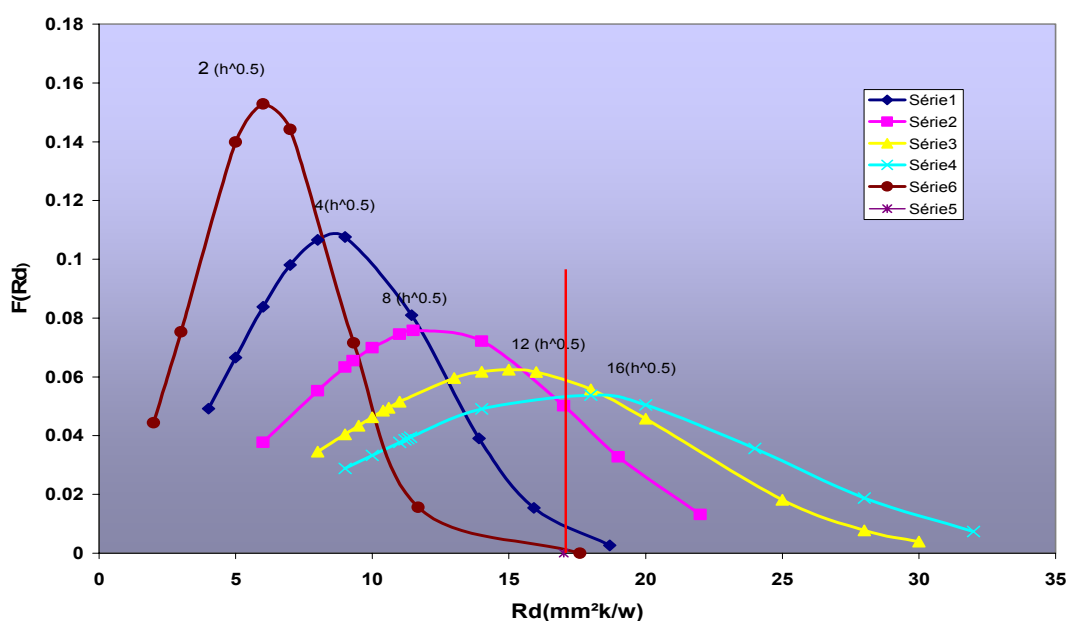
$$\mu(R(t)) = \mu(m)(T)^n$$

Et l'écart type de la résistance d'encrassement

$$\sigma(R(t)) = \sigma(m)(T)^n$$

## B/ Résultats et Interprétations

Après avoir calculé la moyenne et l'écart type, la distribution de la résistance d'encrassement à un moment donné est donnée sur le graphe suivant :



**Figure V.9:** La probabilité de la résistance d'encrassement ( $n=0,5$ ) avec plusieurs expériences Pour le modèle de puissance.

Il faut noter que la surface d'échange doit être nettoyée quand la résistance d'encrassement atteinte ou dépasse la valeur maximale (critique) : c'est de connaître le temps critique qui correspond à cette valeur.

La probabilité de bon fonctionnement est définie par :

$$\begin{aligned} P [T_C > T] &= P [R_d(T) < R_{dc}] \\ &= \Psi \left[ \frac{R_{dc} - \mu R_d(T)}{\sigma R_d(T)} \right] \end{aligned}$$

Avec  $T_C$  : est le temps d'atteindre la valeur critique de l'encrassement

$R_{dc}$  : la résistance d'encrassement critique ( $R_{dc} = 17 \text{ mm}^2 \cdot \text{K/W}$ ).[91]

La probabilité de mauvais fonctionnement est définie par :

$$\begin{aligned} F(T) &= 1 - P [T_c > T] \\ &= 1 - P [R_d(T) < R_{dc}] \\ &= 1 - \Psi \left[ \frac{R_{dc} - \mu R_d(T)}{\sigma R_d(T)} \right] \end{aligned}$$

La probabilité de mauvais fonctionnement à l'instant de 4 heures<sup>(0.5)</sup> est :

$$\begin{aligned} F(T) &= 1 - P [T_c > T] \\ &= 1 - P [R_d(T) < R_{dc}] \\ &= 1 - \Psi \left[ \frac{R_{dc} - \mu R_d(T)}{\sigma R_d(T)} \right] \\ &= 0,0116 \end{aligned}$$

La probabilité de mauvais fonctionnement à l'instant de 8 heures<sup>(0.5)</sup> est :

$$\begin{aligned} F(T) &= 1 - P [T_c > T] \\ &= 1 - P [R_d(T) < R_{dc}] \\ &= 1 - \Psi \left[ \frac{R_{dc} - \mu R_d(T)}{\sigma R_d(T)} \right] \\ &= 0,179 \end{aligned}$$

La probabilité de mauvais fonctionnement à l'instant de 12 heures<sup>(0.5)</sup> est :

$$\begin{aligned} F(T) &= 1 - P [T_c > T] \\ &= 1 - P [R_d(12 \text{ heures}) < R_{dc}] \\ &= 1 - \Psi \left[ \frac{R_{dc} - \mu R_d(T)}{\sigma R_d(T)} \right] \\ &= 0,901 \end{aligned}$$

La probabilité de mauvais fonctionnement à l'instant de 16 heures<sup>(0.5)</sup> est :

$$\begin{aligned} F(T) &= 1 - P [T_c > T] \\ &= 1 - P [R_d(16 \text{ heures}) < R_{dc}] \\ &= 1 - \Psi \left[ \frac{R_{dc} - \mu R_d(T)}{\sigma R_d(T)} \right] \\ &= 0,994 \end{aligned}$$

D'après le graphe, le seuil de la résistance critique montre que au bout de 12 heures la probabilité de bon fonctionnement sera réduite à cause de l'importance de l'encrassement sur les surfaces d'échange donc il faut procéder à la maintenance préventive durant 15heures pendant le fonctionnement ce qui permet de réduire l'encrassement et prolonger l'exploitation de l'équipement.

## **Conclusion**

En se basant sur des modèles déterministes (linéaire et de puissance) et en considérant l'encrassement comme phénomène aléatoire ; la probabilité de bon fonctionnement a permis de prédire le temps pour prendre des mesures prédictives afin d'éviter la probabilité d'avoir le risque d'atteindre une résistance critique de l'encrassement et ceci pendant l'exploitation, sans arrêt de production de l'équipement ; en agissant sur les paramètres permettant de minimiser temporairement les risques probables.



# **Conclusion**

## CONCLUSION

Le monitoring des échangeurs de chaleur permet la bonne connaissance de l'évolution de l'encrassement sous les conditions spécifiques au processus .C'est le but de cette étude. La formation des dépôts est une résistance thermique qui provoque des pénalités économiques et écologiques assez importantes : les coûts d'exploitation et de maintenance augmentent, l'énergie additionnelle pour le rétablissement des paramètres de service des procédés en aval des cellules d'échangeurs de chaleur augmente, la pollution atmosphérique augmente.

L'exploitation rationnelle des échangeurs de chaleur est soumise à des impératifs technico-économiques et écologiques.

Dans notre travail, l'analyse et le traitement des données recueillis in situ (raffinerie d'Alger) nous a permis d'élaborer des modèles mathématiques, à savoir :

- l'évolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps des différentes cellules ;
- l'évolution des pertes de charge en fonction du temps.

Ces modèles sont des modèles déterministes qui peuvent servir de feuille de route pour la prise de décision des arrêts pour le nettoyage.

- En prenant en considération l'aspect économique de l'exploitation d'une cellule d'échangeur , il nous a été permis de déterminer la périodicité d'arrêt de cette dernière pour nettoyage et ceci en utilisant la méthode des moindres coûts.
- En se basant sur des modèles déterministes (linéaire et de puissance) et en considérant l'encrassement comme phénomène aléatoire ; la probabilité de bon fonctionnement a permis de prédire le temps pour prendre des mesures prédictives afin d'éviter la probabilité d'avoir le risque d'atteindre une résistance critique de l'encrassement et ceci pendant l'exploitation, sans arrêt de production de l'équipement ; en agissant sur les paramètres permettant de minimiser temporairement les risques probables.

Au regard des résultats obtenus, de nombreuses perspectives sont envisagées :

- Refaire le monitoring des paramètres de service d'un échangeur de chaleur pour d'autres périodes ou pour des échangeurs de même procédés pour d'autres raffineries.
- Etablir l'aspect économique pour tous les échangeurs de chaleur de ce circuit.
- Introduire la notion du variable aléatoire dans les coûts (de maintenance, et d'exploitation) pour prédire la durée optimale du fonctionnement d'un échangeur de chaleur.

# **Références Bibliographiques**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Harkat, Y. Zemmour; N. « Modélisation de la résistance d'encrassement en fonction du temps d'une cellule d'échangeur de chaleur du circuit de préchauffe du brut de la raffinerie d'Alger » *3rd international symposium on hydrocarbon and chemistry, ISSN.1112.6736.P.52.*(2006)
- [2] Klaren, D.G, Boer, F, Sullivan, D.W «Unique Configurations Of Proven Self Cleaning Fluidized Bed Heat Exchangers Virtually Eliminate Fouling In This Application » *Hydrocarbon Processing.*(2005)
- [3] Douib, A. Bouchkima, B.Et Zerrouk, M « Amélioration Du Procédé De Dessalage Des Huiles Par Utilisation Des Desémulsionnants », *I.C.I.C.U. Ouargla Et C.R.D De Hassi Messaoud .*(2002)
- [4] Marcheschi, M. « Dessalage Sur Le Champ De Hassi-Messaoud », *Revue De L'a.F.T.P.N°209, Pp.82-85 .*(1971)
- [5] Baumann, C.Neu, J.M « Dessalage Du Pétrole Brut Sur Le Champ De Production », *Pétrole Et Technique N°273.* (1980)
- [6] « Manuel Du Dessaleur D110 », *Howwar International Limited.*(1978)
- [7] Scherrer, M. « Choix Des Conditions Industrielles De Dessalage », *Revue De L'a.F.T.P.N°209, Pp.86-88 .*(1971)
- [8] Afgan, Schlunder, Ozisik, Sacaduraafgan V, S « Heat Exchangers; Design and Theory» , *Source Book, Editions Mac Graw-Hill.* (1993)
- [9] Perz, L. Batsale, J.C. Ladevie, B, Tochon P « Mise Au Point D'une Son De La Détection D'encrassement Pour Echangeurs Tubulaires » *Congrès Français De Thermique .Sft P. 681-686, 200.* (2003)
- [10] Sacadura J, F« Initiation Aux Transfert Thermiques » *Edition Lavoisier.*Et Ozisik M.N, Heat Conduction, *Editions John Wily and Sons, New –York.* (1993)

- [11] Finkbeiner F, Gonad, T, Et Filiol, B « Echangeurs Thermiques Enjeux Marche, Technologie Et Politique D'innovation » *Editions Européennes Thermiques Et Industries (ETI), France.* (1993)
- [12] Gauthier, Villas, L *Weil Elément Des Echanges Thermiques.* (1965)
- [13] Thonon, B.Mercier, P « Les Echangeurs A Plaques : Dix Ans De Recherche Au Greth. Dimensionnement Et Mauvaise Distribution » *Revue Général Thermique N°416 (35) ,561-568. ;* (1996)
- [14] « Construction Of Shell And Tube Heat Exchanger » *Wolverine Tube Heat Transfer Data Book*
- [15] Klaren, D.G, Boer, F, Sullivian, D.W«Unique Configurations of Proven Self Cleaning Fluidized Bed Heat Exchangers Virtually Eliminate Fouling In This Application » *Hudrocarbon Processing.* (2005)
- [16] Padet « Principes Des Transferts Convectifs » *Blytechnica Edition.*
- [17] Kay, J.M 1964 « Introduction A La Mécanique Des Fluides Et La Transmission De La Chaleur » *Editions Dunad.* (1997)
- [18] Lachi, M, « Caractérisation Et Couplage Conduction –Convection En Régime Transitoire » *Habilitation A Diriger Des Recherches.* (2002)
- [19] Detrigne, « Evolution De L'encrassement Des Echangeur De Chaleur Par L'eau De Refroidissement », *Heat Transfert.* (1990)
- [20] Leconte, J. « Echangeur de chaleur dimensionnement thermique », *Technique de l'ingénieur traité mécanique et chaleur B2342*
- [21] Wuithier, P « Le Raffinage Et Génie Chimique » *Tome II, Publication De L'institut Français Du Pétrole, Technip 2ème Edition ,* (1972)
- [22] Bott, T, R, « Fouling Of Heat Exchanger » *Edition Elsevier.* (1995)
- [23] Goyhenetche, M, « Diagnostic Technique Et Economique De L'encrassement Des Equipement De Transfert Thermique Dans L'industrie Française ». (1991)
- [24] Pritchard, A, M « The Economics of Fouling, Fouling Science and Technology » *Editions, L, F, P 31-43.* (1988)

- [25] Garrett-Price, B, A, Smith, S, A, Sutor, J, W « Fouling Of Heat Exchanger, Characteristics, Costs Prevention, Control And Removal » *Chapter 2, Pp, 9-19, Noyes Publications, Nj.* ,(1985)
- [26] Masri, M, A, « Méthodologie D'approche D'étude De L'encrassement D'un Train De Préchauffe » *Jour, Sci, De Sonatrach N°1449.* (1998)
- [27] Michel Robert, Michel Porte « Capteurs Intelligents Et Méthodologie D'évaluation », *HERMES.* (1993)
- [28] Croix, J. « Généralités Sur L'encrassement Des Echangeurs » *Note Technique Greth 83/12.* (1983)
- [29] Muller-Steinhagen, Malayeri, M, R, Watkinson, A, P « Fouling Of Heat Exchangers-New Approaches To Solve And Old Problem » *Heat Transfer Engineering 26.* (2005)
- [30] Epstein, N « Fouling In Heat Exchangers » *Fouling Of Heat Transfert.* , (1981)
- [31] Knudsen J.G, Somerscales E, F, C *Equipment; Hemisphere, Wash DC* , (1975)
- [32] Bott, M, N, *Process Engineering P76.* (1975)
- [33] Somerscales, E, F, C, Knudsen, J, G, *personal Communication, (1), 1-4.* (1977)
- [34] Nancollas, G. H. Reddy, M.M « The Crystallization Of Calcium Carbonate: Part Ii-Calcite Growth Mechanism », *J .Colloid Interface Sci 37,824-830.* (1971)
- [35] Rodier, J « L'analyse Chimique Et Physicochimique De L'eau » *Editions Dunod.* (1971)
- [36] Grillot, J, M. « Encrassement Particulaires Des Echangeurs De Chaleur En Phases Gazeuses ». *Note Technique Greth 85/35.* (1985)
- [37] Legrand, Poirier, Leroy « Les Equilibres Carboniques Et L'équilibre Calco Carbonique Dans Les Eaux Naturelles ». *Collection A.G.H.T.M Eyrolles.*(1981)

- [38] Anastasios, J Karablas « Scale Formation in Tubular Heat Exchangers Research Priorities » *Research Institute*. (2002).
- [39] Leconte, J. « Protection Contre La Corrosion ». *Techniques De L'ingénieur A830*.
- [40] Epstein, N « Fouling : Technical Aspects In Fouling Of Heat Transfer Equipment », *Somerscales Efc, Kundsens J G.Hemispheres WASHDCP3*.(1981)
- [41] Memento « Technique De L'eau De Degremont ET Nalco" *Waters Hand Book- Mac Graw Hill Book Company*.
- [42] Froment, G, F. « Fouling Of Heat Transfer Surfaces by Coke Formation in Petrochemical Reactor » *Idem P 411*.(1991)
- [43] Lund, D.Sandhuc, N. « Chemical Reaction Fouling Due To Foods Staffs » *Idem P 437*.( 1998)
- [44] Epstein. "Thinking About Heat Transfer Fouling :A 5x5 Matrix", *Heat Transfer Engineering*.4(1),P 43-56. (1983)
- [45] Fichman, M. Pneuili; D; "Sufficient Conditions for Small Particles To Hold Together Because Of Adhesion Forces" *ASME J. Appl. Mech*.52 P 105-108. (1985)
- [46] Duffau, C, Grillot, J, M, « L'encrassement Dans Les Echangeurs, Description, Prévention, Remèdes », *GRETH*. (1991)
- [47] Muller-Steinhagen, M, Watkinson, P« Influence Of Operating Conditions On Particulate Fouling » *Can,J, Chem,Eng*,66 42-50. (1988)
- [48] Grillott, J, Icart, J« Fouling Of A Cylindrical Probe and A Finned Tube Bundle In A Diesel Exhaust Environment", *Exp, Thermal Fluid, Sci* 14.442-454.(1997)
- [49] Rindt, C, Abd-Elhady, M, S. « Minimum Gas Speed In Heat Exchanger To Avoid Particulate Fouling » *Int, J, Of Heat And Mass Transfer*47.3943-3955. (2004)



- [50] Crittenden, B, Khater, E « Fouling From Vaporising Kerosene » *Fouling Of Heat Exchanger Equipment; ASME.HTD. VOL.35, ED.JW. SUITOR.AM A.M. PRITCHARD, Pp 57-64.*(1984)
- [51] Story, M.Knudsen, J.G. « The Effect of Heat Transfer Surface Temperature on the Scaling Behavior of Simulated Cooling Tower Water ». *Am.Inst. Chem.Engn Symp.74 (124), 25-30.* (1978)
- [52] Garret, Price « Problem Characterisation, Economic Assessment And Review Of Prevention, Mitigation And Accommodation », *Techniques Pnl-4883.* (1983)
- [53] Marner,J,Webb,R,L« Worschop On An Assesment Of Gas Side Fouling In Fossing Fuel Exhaust Environment » *Doe/Id,12138.* (1982)
- [54] Cousins, L, B.Pritchard, A, M. « Fouling Resistances and the Designer Fouling », *Prev, Res, Dig N °3 (2).* (1980)
- [55] Duffau, J, M. Grillot, J, M.Navarro, R. « L'encrassement Dans Les Echangeurs, Description, Prévention, Remèdes » *GRETH.* (1991)
- [56] French, M, A. « Chemical Cleaning In Practice », *Proceedings Of A Conference At Nottingham University.* (1981)
- [57] Lapsi, N. Oufer,L « Etude De L'encrassement Des Echangeurs De Chaleurs Du Circuit De Préchauffe De La Raffinerie D'Alger », *International Center For Heat and Mass Transfer.* (2003)
- [58] Cassagne, Fourcher. « Étude Du Système De Contrôle De L'encrassement Biologique Des Tubes D'échangeurs D'une Centrales » *Etm.Contract Cmexon°83-7280.* (1984)
- [59] Laetitia Perez, « Développement, Etude De Performances Et Intégration Des Sondes Thermiques Pour La Caractérisation De L'encrassement D'échangeurs Tubulaires A Courant Croisés » *Ademe/Cea.GRETH.* (2003)
- [60] Bott, T, R, « Heat Exchanger Fouling, The Challenge, Fouling Mechanisms: Theorical And Practical Aspects”, *Eurotherm Seminar 23, P 3,10 .*(1992)
- [61] Zercle,R,D,Sunderland,J,E,Asme,J of ;Heat Transfer,*Vol,90.P ;183,* (1968)

- [62] Reed's, Ed. « A State Of-The-Art Survey Of Methods For The Prevention Of Scale Formation In Sea Water Distillation Plants », *Ornl-Tm -1346*. (1966)
- [63] Meccutchan, J.W. & Sieder, E.N, « Fouling in Heat Exchanger » *Chem .Eng .Prog. Symp. Series, Vol. 64. No.90, P.255*. Elliot, M.N. *Desalination, Vol .6, P .87*.(1969)
- [64] Elliot, M, N, « Fouling in Heat Exchanger » *Desalination Vol, 6, P, 87*. (1969)
- [65] Taborek, J., Aoki, T., Ritter, R .B. Palen, J .W . & Knudsen, J.G. « Fouling in Heat Exchanger » *Chem. Eng. Prog. , Vol. 68, P .59-69*. (1972)
- [66] Bott, T.R. & Walker, R.A. « Fouling in Heat Exchanger »; *The Chemical Engineer, No. 255, P.391*. (1971)
- [67] Bott, T .R« Fouling in Heat Exchanger »; *Process Engineering, P.76*. (1975)
- [68] Watkinson, A.P., Louis, L. & Brent, R. Can .J. « Fouling in Heat Exchanger » *Chem. Eng. , Vol. 52, P .558*,(1975)
- [69] Somerscales, E.F.C.Knudsen, J.G. « Fouling in Heat Exchanger » *Personal Communication*. (1977)
- [70] Perera, W.G.Rafique, « Fouling in Heat Exchanger », *the Chemical Engineer, P, 107*. (1976)
- [71] Meeter. V.V.Krzyzhanovski, R.E. Tchoudnovskaya, I.I, Pavlov, I.S, Konopelko, I., Z.I, « Heat Exchangers » *Session, 6th Int.Heat Transf.Conf'ce, Toronto*. (1978)
- [72] Elliot, M.N, Hodgson, T.D.Harris, A. « Fouling in Heat Exchanger ». *Desalination, Vol.14, P.43*. (1974)
- [73] Fisher, P.Suitor, J. W. Kitter, R.B. « Fouling in Heat Exchanger ». *Chem., Eng, Prog, Vol.71, P66*. (1975)
- [74] Braun, R. Haussier, R.H. « Fouling in Heat Exchanger ». *Paper No 76-C sme/Cshe-23, 16th National Heat Trans.Conf'Ce*. (1976)
- [75] Benson, P.R.Martini, W. R, « Fouling in Heat Exchanger ». *Ind. Et Eng. Chem. Prod. Res Et Dev. Vol.1, P. 7*. (1962)

- [76] Glen, N.F.Howarth; J.H. « Modelling Refuse Incineration Fouling »*Second Refuse Conference on Heat Transfer.Institute of Mechanical Engeneering.1.P401-420.* (1988)
- [77] Bouris, D.Bergeles, G. « Particale-Surface Interactions In Heat Exchanger Fouling »*J.Fluids Engineering, 118, P 574-581.* (1996)
- [78] Hatcher, S.R.Finally, B.A.Smee, J.L, « *Atomic Energy of Canada Ltd* »*Report No 2642, Wnre.*( 1966)
- [79] Kerst, H. « Fouling in Heat Exchanger , Materials Protection»*Vol.1,P10.* (1962)
- [80] Taylor, W. F.Wallace, T.J, « Fouling in Heat Exchanger » *.Ind.Eng, Chem, Pod, Res, Et Dev, Vol 7, P198.* (1968)
- [81] Bott, T. R. Pinheiro, « Fouling in Heat Exchanger » *M.M.V.P.S, Can.J.Chem.Eng .Vol.55, P.473.* (1977)
- [82] Frazier, A. W. Huddle, J.G.Power, W.R. « Fouling in Heat Exchanger » *Oil and Gas.J.P, 117.* (1965)
- [83] Hausler.R.H « Fouling in Heat Exchanger »; *Oil and Gas J.P, 56.* (1973)
- [84] Robert, L. « Optimisation Dynamique Du Comportement D'un Echangeur De Chaleur Soumis Au Problème D'encrassement », *Dea, Uap Nancy.* (1995)
- [85] Borne, F Rotelle « Un Modèle, Comment Faire ? » *Edition Technipe, Modélisation Et Identification P12 .1055.*(2005)
- [86] Guillaume Chevillon « économétrie » *OFCE Et Uni Of Oxford IEP.* (2005)
- [87] Somerscales, E, F, C, « Fouling In Tow Phase Flow Heat Exchanger Thermal Hydraulic Fundamentals and Design”, *Pp 407.460 Kluwer.Dordrechi.* (1988)
- [88] Bott, T, R, « Fouling Of Heat Exchanger », *Elsevier Amsterdam.* (1995)
- [89] Zubair, S, M, Sheikh, A, K, « Probabilitistic Approch To The Maintenance Of Heat Transfer Equipment Subject To Fouling »*Energy, 17(8), 769-776.* (1992)

- [90] Zubair, S, M, Sheikh, A, K, « A Maintenance Strategy for Heat Exchanger Subject To Fouling, A Probabilistic Approach » *Trans ASME, J, Heat Transfert* 119.575-580. (1997)
- [91] Sheikh,A,K,Younas,M, « Statistical Aspects Of Fouling Processes » *Proc , Mech, Engn,Vol,215,Part E.* (2001)
- [92] Wiswanathan, R, Paterson, S, R, « Life Assessment Of Super heater Tubes In Fossil Boilers » *Trans., ASME, Pressure Vessel Technol.* 116 1-16,18-23. (1994 )
- [93] Somerscales, E, F, C, Kassemi, M, « Fouling Due To Corrosion Products Formed On A Heat Transfer Surface », *Trans ASME, J, Heat Transfer* 109 .267-271. (1987)

# **Annexe**

Calcul de la résistance d'encrassement de la cellule E101FED

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²)	Rd (m²°C/kw)
51	24	106.61	0.051	753.11	2.155	125.33	70.42	655.87	2.358	38.03	83	30.50	6.77	0.095	10.474
52	23	108.28	0.048	753.64	2.156	120.42	72.00	657.21	2.343	35.80	85	26.42	6.58	0.107	9.332
53	22	105.95	0.046	757.97	2.153	118.75	75.00	657.87	2.348	34.49	84	28.29	6.23	0.095	10.553
54	21	105.96	0.045	755.48	2.154	118.66	75.92	655.29	2.354	34.00	85	28.83	6.22	0.093	10.775
55	21	107.72	0.046	754.36	2.153	119.75	75.00	655.37	2.353	34.70	87	27.95	6.48	0.100	10.030
56	21	103.03	0.045	756.11	2.151	119.5	73.83	657.66	2.346	34.02	82	31.20	6.00	0.083	12.081
57	21	103.95	0.045	756.47	2.152	118.75	74.00	657.37	2.343	34.04	83	29.95	6.08	0.087	11.457
58	22	105.10	0.045	755.56	2.155	117.75	73.10	658.43	2.333	33.62	83	27.54	6.02	0.094	10.634
59	25	103.28	0.048	754.14	2.154	120.58	71.16	658.87	2.338	35.82	78	29.41	6.04	0.088	11.320
60	23	100.70	0.048	741.52	2.139	120.33	70.33	658.33	2.334	35.22	78	31.47	5.85	0.080	12.501
61	23	107.39	0.047	753.19	2.156	120.92	67.33	659.12	2.322	35.02	84	25.95	6.37	0.106	9.469
62	25	111.87	0.048	750.44	2.158	121.58	79.75	653.66	2.386	36.02	87	26.04	6.75	0.112	8.966
63	24	108.75	0.045	752.39	2.156	121.58	78.66	653.12	2.382	33.48	85	28.86	6.12	0.091	10.969
64	24	113.04	0.045	750.52	2.158	119.58	70.92	658.25	2.333	33.40	89	20.49	6.42	0.135	7.424
65	24	111.70	0.046	751.85	2.157	119.42	79.42	654.42	2.374	34.21	88	24.20	6.47	0.115	8.694
66	24	112.14	0.045	750.07	2.158	116.66	77.10	657.88	2.344	33.38	88	19.72	6.35	0.138	7.221
67	22	109.70	0.045	753.85	2.156	117.75	77.75	656.75	2.357	33.55	88	24.65	6.34	0.111	9.035
68	22	111.45	0.046	752.73	2.156	117.58	79.33	655.45	2.364	34.25	89	22.90	6.61	0.124	8.061
69	24	115.21	0.045	748.61	2.159	116.82	80.33	660.57	2.317	33.31	91	15.39	6.56	0.183	5.455
70	23	110.04	0.046	752.52	2.156	118.16	77.50	656.83	2.358	34.24	87	24.36	6.43	0.113	8.815
71	23	105.37	0.046	754.18	2.154	118.75	73.42	657.11	2.342	34.32	82	27.92	6.09	0.094	10.662
72	25	105.70	0.046	753.35	2.155	120.00	73.00	657.52	2.344	34.28	81	27.83	5.96	0.092	10.854
73	22	106.20	0.043	754.11	2.153	118.66	75.16	657.91	2.348	32.43	84	28.05	5.88	0.090	11.096
74	23	106.00	0.043	754.54	2.154	118.5	73.83	657.16	2.342	32.45	83	27.32	5.80	0.091	10.952
75	25	108.25	0.043	752.63	2.156	119.1	74.75	656.97	2.348	32.36	83	25.54	5.81	0.098	10.224
76	25	107.29	0.043	753.64	2.153	116.33	70.92	660.62	2.316	32.41	82	22.69	5.74	0.109	9.189
77	24	114.11	0.043	749.11	2.159	115.75	78.16	657.95	2.346	32.21	90	15.02	6.27	0.179	5.572
78	24	113.61	0.043	748.31	2.162	116.42	81.33	655.87	2.366	32.18	90	18.08	6.23	0.148	6.743
79	24	112.22	0.043	749.62	2.159	115.25	78.75	656.11	2.353	32.23	88	17.87	6.14	0.148	6.767

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kJ/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kJ/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
80	24	111.43	0.044	749.26	2.153	113.75	76.58	658.16	2.333	32.59	87	16.11	6.14	0.164	6.103
81	23	110.76	0.043	750.76	2.158	113.83	77.66	658.74	2.338	32.28	88	17.92	6.11	0.147	6.813
82	23	111.22	0.043	750.52	2.156	113.58	76.92	658.25	2.333	32.27	88	16.48	6.14	0.160	6.242
83	24	109.67	0.044	747.11	2.162	112.33	78.83	658.58	2.335	32.50	86	17.24	6.02	0.150	6.659
84	24	108.77	0.043	750.11	2.152	111.42	71.83	657.63	2.334	32.25	85	15.62	5.88	0.162	6.171
85	24	100.33	0.043	751.11	2.157	108.42	66.75	666.58	2.255	32.30	76	20.82	5.32	0.110	9.103
108	24	106.27	0.056	753.13	2.155	124.2	69.63	657.92	2.348	41.80	82	29.65	7.41	0.107	9.304
109	25	113.45	0.058	749.22	2.159	122.75	62.00	661.37	2.303	43.45	88	20.06	8.30	0.178	5.620
110	25	103.90	0.057	754.45	2.154	121.00	72.20	657.66	2.346	43.00	79	29.65	7.31	0.106	9.431
111	25	108.20	0.050	752.66	2.156	120.5	76.00	655.25	2.385	37.26	83	27.21	6.68	0.106	9.466
112	24	107.79	0.044	753.89	2.158	119.66	75.75	656.71	2.354	32.79	84	27.08	5.93	0.094	10.620
113	24	113.43	0.037	750.72	2.158	119.1	80.83	654.92	2.378	27.78	89	22.20	5.36	0.104	9.627
114	25	110.12	0.037	751.56	2.157	120.00	77.42	655.71	2.367	27.81	85	25.49	5.11	0.086	11.608
115	25	112.37	0.034	750.68	2.158	118.25	77.92	655.11	2.363	25.15	87	21.41	4.74	0.095	10.498
116	25	115.00	0.031	749.11	2.161	118.25	80.58	654.42	2.374	23.22	90	18.43	4.52	0.105	9.488
117	25	108.87	0.037	752.94	2.156	120.66	76.83	654.11	2.372	27.48	84	27.04	4.97	0.079	12.651
118	25	109.11	0.034	751.08	2.152	119.25	75.66	656.45	2.354	25.16	84	25.19	4.55	0.078	12.859
119	25	109.46	0.034	751.23	2.153	118.9	75.66	656.28	2.352	25.17	84	24.53	4.58	0.080	12.464
120	24	108.10	0.033	752.15	2.155	120.1	76.50	655.33	2.363	24.44	84	27.44	4.43	0.069	14.401
121	25	109.00	0.034	751.05	2.153	119.33	75.66	656.49	2.352	25.16	84	25.36	4.55	0.077	12.960
122	25	109.03	0.032	751.11	2.152	120.25	76.58	655.42	2.304	24.04	84	26.46	4.35	0.071	14.153
123	25	108.53	0.032	752.76	2.156	119.75	75.58	656.66	2.156	24.09	84	26.14	4.34	0.071	14.009
124	26	110.45	0.034	750.22	2.158	118.5	75.25	657.87	2.348	25.51	84	22.75	4.65	0.088	11.377
125	26	110.26	0.045	750.13	2.157	121.1	77.66	654.38	2.373	33.38	84	26.14	6.07	0.100	10.018
126	26	108.42	0.045	751.21	2.156	121.5	76.25	655.87	2.368	33.43	82	27.62	5.94	0.093	10.809
127	25	105.70	0.049	753.35	2.153	120.75	73.75	656.25	2.353	36.91	81	28.67	6.41	0.096	10.394
128	24	104.73	0.052	754.36	2.154	121.8	74.83	655.32	2.363	39.23	81	30.94	6.82	0.095	10.546
129	26	106.43	0.054	752.22	2.156	122.89	76.16	650.11	2.412	40.24	80	30.24	6.98	0.099	10.076
130	26	106.12	0.052	752.06	2.155	121.58	74.00	656.79	2.355	39.11	80	28.72	6.75	0.101	9.890
131	26	107.85	0.052	752.93	2.156	121.6	75.75	655.67	2.366	39.15	82	27.99	6.91	0.106	9.420

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	ρf (kg/m³)	Cpf (kJ/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	ρc (kg/m³)	Cpc (kJ/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
132	26	106.53	0.052	752.26	2.156	121.92	74.75	655.33	2.363	39.12	81	28.93	6.79	0.101	9.905
133	25	105.97	0.056	753.94	2.155	123.9	71.66	656.78	2.356	41.84	81	30.04	7.30	0.105	9.566
221	24	106.12	0.060	733.11	2.154	120.42	66.00	660.21	2.312	43.99	82	25.71	7.78	0.130	7.683
222	23	104.02	0.060	753.51	2.153	121.00	67.08	659.34	2.324	45.21	81	28.41	7.89	0.119	8.375
223	23	106.78	0.060	754.89	2.154	121.16	65.18	660.12	2.311	45.29	84	25.83	8.17	0.136	7.348
224	25	103.68	0.061	754.34	2.156	118.42	67.44	661.93	2.305	45.64	79	26.19	7.74	0.127	7.866
225	25	104.70	0.061	754.85	2.156	118.25	66.25	661.25	2.304	45.67	80	24.88	7.85	0.136	7.372
226	24	109.20	0.061	752.13	2.156	119.00	76.50	656.73	2.357	45.50	85	25.44	8.36	0.141	7.076
227	22	106.28	0.061	754.14	2.153	120.5	63.92	661.21	2.303	45.63	84	25.62	8.28	0.139	7.195
228	23	107.70	0.060	753.35	2.155	122.00	65.00	660.54	2.315	45.20	85	25.71	8.25	0.138	7.245
229	22	100.87	0.060	751.44	2.151	121.75	70.58	660.53	2.313	45.09	79	32.80	7.65	0.100	9.971
230	21	99.70	0.060	750.35	2.151	122.00	73.00	656.57	2.355	45.02	79	35.08	7.62	0.093	10.701
231	22	101.86	0.059	751.93	2.156	122.58	70.42	657.55	2.345	44.36	80	32.63	7.64	0.101	9.933
232	22	103.46	0.060	752.73	2.152	122.54	68.66	658.54	2.334	45.16	81	30.84	7.92	0.110	9.057
233	24	112.62	0.059	750.31	2.158	122.58	61.66	661.12	2.302	44.27	89	20.83	8.47	0.175	5.720
234	22	112.95	0.060	751.47	2.157	124.08	60.83	661.43	2.304	45.09	91	22.17	8.85	0.172	5.827
235	22	118.70	0.060	748.35	2.161	123.02	54.92	666.42	2.252	44.90	97	14.08	9.38	0.287	3.490
236	19	113.95	0.061	752.47	2.156	123.25	56.00	666.63	2.256	45.52	95	20.06	9.32	0.200	5.004
237	21	113.00	0.061	751.11	2.157	123.3	59.00	662.15	2.291	45.44	92	21.22	9.02	0.183	5.471
238	22	117.20	0.058	749.62	2.159	123.90	56.40	663.25	2.281	43.48	95	16.93	8.94	0.227	4.405
239	21	111.28	0.057	752.14	2.151	122.5	59.92	662.21	2.282	42.87	90	22.27	8.33	0.161	6.219
240	23	111.60	0.057	751.34	2.157	123.00	62.10	661.55	2.305	42.45	89	22.47	8.11	0.155	6.441
241	22	108.04	0.060	753.02	2.155	122.00	73.66	661.83	2.308	45.18	86	28.81	8.38	0.125	7.996
242	21	108.70	0.059	754.85	2.154	121.42	61.42	662.42	2.306	44.54	88	23.96	8.41	0.151	6.621
244	25	110.45	0.059	751.73	2.157	122.75	65.00	660.87	2.317	44.35	85	23.49	8.17	0.150	6.681
246	20	106.45	0.059	753.22	2.153	122.00	63.22	661.62	2.306	44.44	86	27.07	8.27	0.131	7.608
247	20	106.88	0.059	753.44	2.153	122.1	62.92	661.51	2.305	44.08	87	26.72	8.24	0.133	7.535
248	20	102.78	0.058	751.39	2.151	122.33	67.25	659.79	2.327	43.58	83	31.39	7.76	0.106	9.405
249	20	102.04	0.059	751.11	2.151	122.5	68.16	658.33	2.333	43.94	82	32.36	7.75	0.103	9.702



Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
250	21	105.86	0.059	753.43	2.153	121.58	64.42	660.03	2.311	44.45	85	27.26	8.12	0.128	7.805
251	20	102.20	0.060	751.11	2.151	120.42	65.92	660.17	2.311	45.07	82	29.97	7.97	0.114	8.743
252	19	99.62	0.061	749.31	2.149	121.00	68.08	659.54	2.325	45.71	81	33.33	7.92	0.102	9.787
253	18	102.70	0.059	750.35	2.151	122.25	65.25	660.75	2.317	44.27	85	31.39	8.07	0.111	9.048
254	17	101.24	0.060	749.12	2.149	120.42	63.88	661.11	2.301	44.95	84	30.99	8.14	0.113	8.856
255	19	107.37	0.059	753.24	2.153	121.75	61.08	662.41	2.892	44.44	88	25.80	8.46	0.141	7.094
256	18	103.20	0.055	750.81	2.151	119.66	62.16	663.88	2.288	40.92	85	28.07	7.50	0.115	8.702
257	20	102.94	0.058	751.47	2.151	119.16	63.92	662.54	2.294	43.59	83	27.81	7.78	0.120	8.315
258	13	93.87	0.055	743.44	2.143	117.75	64.58	662.16	2.292	40.52	81	35.97	7.02	0.084	11.910
259	19	97.62	0.054	748.31	2.148	119.5	68.58	659.11	2.322	40.03	79	33.86	6.76	0.086	11.645
260	18	99.12	0.048	748.56	2.146	116.5	69.92	660.21	2.314	35.56	81	31.56	6.19	0.084	11.855
262	18	101.70	0.040	749.85	2.149	112.75	68.75	663.75	2.286	29.99	84	26.04	5.40	0.089	11.223
264	19	97.95	0.052	748.45	2.148	117.58	66.33	662.95	2.298	38.92	79	31.47	6.60	0.090	11.087
266	19	110.60	0.045	754.85	2.154	123.42	59.52	662.47	2.295	33.59	92	24.07	6.63	0.118	8.444
267	18	103.96	0.034	750.98	2.151	121.92	63.66	661.79	2.307	25.53	86	29.69	4.72	0.068	14.620
284	18	103.50	0.045	750.75	2.151	120.00	62.20	662.11	2.296	33.41	86	28.11	6.14	0.094	10.638
285	19	107.37	0.046	753.18	2.153	121.50	60.83	662.16	2.292	34.65	88	25.52	6.59	0.111	9.002
286	17	105.32	0.060	751.16	2.151	122.92	62.33	661.63	2.306	44.69	88	29.31	8.49	0.125	8.026
287	16	102.61	0.060	749.31	2.149	122.83	63.92	660.37	2.316	44.58	87	32.10	8.30	0.111	8.995
288	19	103.03	0.059	751.11	2.151	122.08	65.75	660.92	2.309	44.32	84	30.86	8.01	0.112	8.956
289	19	104.53	0.059	751.72	2.171	122.08	64.25	660.16	2.311	44.35	86	29.25	8.24	0.121	8.257
290	18	104.65	0.060	751.32	2.151	123.20	64.25	660.73	2.317	45.08	87	30.32	8.40	0.119	8.390
291	19	116.70	0.059	751.85	2.157	123.50	53.50	665.51	2.265	43.98	98	17.06	9.27	0.234	4.278
293	19	108.87	0.059	753.93	2.153	125.00	62.83	660.38	2.318	44.48	90	27.71	8.61	0.134	7.485
295	16	103.61	0.056	749.81	2.149	123.33	63.42	660.37	2.313	41.61	88	31.57	7.83	0.107	9.368
296	15	104.45	0.059	749.72	2.149	124.58	62.83	660.71	2.317	44.23	89	32.01	8.50	0.114	8.752
298	16	105.62	0.059	750.82	2.151	126.42	64.50	658.46	2.336	44.30	90	32.72	8.54	0.112	8.908
300	16	101.45	0.059	748.72	2.148	123.25	65.50	659.37	2.326	44.17	85	33.78	8.11	0.103	9.686
302	14	105.32	0.059	749.66	2.149	126.2	62.58	659.59	2.325	44.23	91	32.80	8.68	0.114	8.787
305	18	98.54	0.059	748.27	2.155	123.00	70.16	657.58	2.345	44.15	81	36.58	7.66	0.090	11.099

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
307	17	95.25	0.058	745.13	2.166	121.75	71.20	657.47	2.345	43.22	78	38.71	7.32	0.081	12.288
306	17	95.54	0.058	746.26	2.146	123.08	73.92	655.54	2.365	43.28	79	40.47	7.30	0.078	12.897
306	17	95.54	0.058	746.27	2.146	122.2	73.92	655.49	2.363	43.28	79	39.90	7.30	0.079	12.715
307	16	96.37	0.058	746.18	2.146	121.00	68.33	659.66	2.326	43.28	80	36.76	7.46	0.087	11.449
309	15	95.12	0.037	745.11	2.145	117.92	65.50	662.71	2.297	27.57	80	34.83	4.74	0.059	17.093
311	19	103.87	0.045	750.93	2.153	122.33	64.16	660.24	2.314	33.42	85	29.85	6.11	0.088	11.364
390	19	101.45	0.059	750.22	2.152	124.25	69.50	657.87	2.348	44.26	82	34.83	7.85	0.097	10.312
392	19	101.55	0.058	750.27	2.152	124.35	69.50	657.22	2.348	43.52	83	34.83	7.73	0.095	10.476
394	19	105.00	0.058	752.11	2.153	124.5	66.20	658.35	2.333	43.62	86	31.34	8.08	0.111	9.020
399	20	100.40	0.058	750.24	2.154	126.66	75.00	653.83	2.388	43.51	80	38.88	7.54	0.083	11.994
401	19	98.36	0.059	748.68	2.148	126.5	78.16	651.33	2.403	43.80	79	41.75	7.47	0.077	13.000
403	20	100.70	0.059	750.35	2.151	125.00	72.00	655.54	2.365	44.27	81	36.41	7.68	0.091	11.016
404	20	108.70	0.059	754.35	2.154	127.25	66.25	657.75	2.347	44.13	89	30.32	8.43	0.120	8.361
406	21	102.46	0.059	751.73	2.151	126.42	72.66	654.54	2.375	44.35	81	36.05	7.77	0.093	10.786
409	22	102.83	0.061	752.11	2.152	125.46	72.33	655.89	2.368	45.50	81	34.65	7.92	0.098	10.180
420	23	110.94	0.046	752.97	2.156	124.4	64.16	659.28	2.334	34.64	88	24.78	6.57	0.114	8.774
423	26	113.94	0.052	749.97	2.159	125.25	71.75	655.55	2.365	39.00	88	24.64	7.40	0.129	7.738
425	23	106.12	0.056	754.56	2.154	125.00	69.58	656.29	2.354	41.88	83	30.67	7.50	0.105	9.511
429	24	103.90	0.059	753.95	2.153	125.2	73.00	654.11	2.371	44.11	80	33.25	7.59	0.098	10.188
433	25	104.10	0.050	754.55	2.154	122.8	74.20	655.54	2.365	37.35	79	31.53	6.36	0.087	11.519
438	23	102.20	0.052	752.64	2.152	123.00	71.10	656.25	2.352	39.14	79	32.56	6.67	0.088	11.350
440	24	104.40	0.043	754.21	2.154	126.2	73.50	654.85	2.378	32.43	80	33.78	5.62	0.072	13.983
441	26	104.79	0.043	753.39	2.153	121.33	72.42	657.87	2.346	32.40	79	28.95	5.50	0.082	12.250
443	25	109.06	0.044	751.03	2.157	121.8	65.44	660.92	2.316	32.67	84	23.98	5.92	0.106	9.413
444	26	106.70	0.048	752.35	2.156	124.1	71.10	656.64	2.346	36.11	81	29.08	6.28	0.093	10.762
445	26	104.63	0.052	753.32	2.155	123.4	74.33	655.86	2.366	39.17	79	31.25	6.64	0.091	10.947
446	28	106.70	0.056	751.35	2.157	122.00	71.00	657.50	2.345	41.70	79	26.81	7.08	0.114	8.804
448	27	106.90	0.059	752.95	2.156	123.00	70.80	657.92	2.349	44.05	80	27.68	7.59	0.118	8.481
449	26	106.70	0.058	752.85	2.155	123.9	70.90	656.90	2.346	43.29	81	28.87	7.53	0.112	8.916
450	25	109.60	0.060	751.84	2.157	124.00	68.00	658.95	2.338	45.11	85	26.14	8.23	0.135	7.384

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
451	26	107.37	0.060	752.68	2.156	123.9	70.33	656.94	2.342	45.16	81	28.18	7.92	0.121	8.270
452	26	106.90	0.060	751.45	2.157	126.00	74.80	653.45	2.385	45.09	81	31.66	7.87	0.107	9.356
453	28	106.90	0.057	751.45	2.157	126.00	74.80	653.42	2.384	42.83	79	30.91	7.29	0.101	9.858
454	27	105.24	0.044	752.12	2.156	124.2	73.66	655.93	2.369	32.72	78	30.76	5.52	0.077	12.958
455	28	110.28	0.035	749.14	2.158	121.58	76.16	655.97	2.357	25.85	82	25.43	4.59	0.078	12.881
459	26	106.70	0.037	752.35	2.156	115.00	68.00	662.51	2.295	27.84	81	20.78	4.84	0.100	9.977
460	25	105.70	0.039	753.35	2.155	116.1	69.10	661.64	2.306	29.00	81	23.33	5.04	0.093	10.753
464	29	109.85	0.059	749.42	2.159	117.6	70.59	659.22	2.322	44.22	81	20.14	7.72	0.165	6.067
466	28	110.47	0.059	749.21	2.159	127.6	72.83	653.21	2.382	44.20	82	28.79	7.87	0.118	8.506
468	28	114.98	0.059	747.49	2.162	123.2	72.92	655.11	2.361	44.10	87	21.61	8.29	0.165	6.058
469	29	108.28	0.059	750.64	2.158	123.16	71.58	656.37	2.353	44.29	79	26.35	7.58	0.124	8.084
472	23	101.87	0.059	751.45	2.157	124.25	73.08	655.66	2.366	44.34	79	34.39	7.54	0.094	10.601
475	29	108.11	0.059	750.55	2.158	123.00	74.41	655.76	2.368	44.28	79	27.37	7.56	0.119	8.418
477	29	108.12	0.059	750.56	2.158	124.58	73.16	655.87	2.369	44.28	79	28.07	7.56	0.116	8.631
478	27	106.03	0.059	752.54	2.156	124.08	72.75	655.42	2.364	44.40	79	29.78	7.57	0.109	9.153
540	27	113.62	0.037	748.31	2.161	119.00	77.92	655.46	2.365	27.69	87	20.26	5.18	0.110	9.090
541	27	109.70	0.041	750.70	2.158	120.33	78.00	654.16	2.371	30.78	83	25.74	5.49	0.092	10.897
542	27	106.62	0.048	752.81	2.156	123.9	75.50	654.77	2.377	35.76	80	30.25	6.14	0.087	11.458
543	27	108.73	0.052	751.86	2.157	123.3	77.33	653.32	2.383	39.10	82	28.85	6.89	0.103	9.731
545	25	108.10	0.057	752.55	2.156	124.3	68.90	2.34	2.394	42.90	83	27.79	7.69	0.119	8.406
548	25	103.63	0.059	754.32	2.154	122.4	73.33	656.86	2.358	44.13	79	31.25	7.47	0.103	9.723
550	28	105.90	0.059	752.95	2.156	122.3	72.50	656.42	2.344	44.42	78	28.15	7.46	0.114	8.772
554	25	104.87	0.059	754.93	2.154	122.5	70.42	657.42	2.344	44.54	80	29.37	7.66	0.112	8.910
557	26	107.80	0.059	752.92	2.156	123.00	73.10	655.11	2.361	44.42	82	28.21	7.83	0.119	8.371
559	25	105.25	0.059	753.21	2.155	123.2	75.75	654.47	2.374	44.44	80	31.56	7.69	0.105	9.547
562	23	101.70	0.059	752.35	2.152	124.5	73.50	654.11	2.371	44.39	79	34.83	7.52	0.093	10.773
565	25	107.10	0.059	752.13	2.156	124.4	70.00	656.21	2.352	44.38	82	28.98	7.85	0.117	8.577
568	28	110.37	0.059	749.18	2.159	124.00	69.33	657.66	2.346	44.20	82	24.97	7.86	0.135	7.386
686	13	97.03	0.060	745.11	2.154	122.33	66.00	659.16	2.321	44.33	84	37.46	8.02	0.092	10.853
687	13	95.29	0.060	744.14	2.144	120.25	65.66	661.95	2.309	44.28	82	37.10	7.81	0.091	11.043

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kJ/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kJ/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
688	15	105.53	0.060	750.26	2.151	123.08	60.25	662.66	2.296	44.64	91	29.25	8.69	0.128	7.822
689	15	105.27	0.060	750.13	2.151	124.9	62.33	660.62	2.316	44.63	90	31.47	8.67	0.118	8.444
690	14	98.79	0.052	746.39	2.146	121.75	69.66	658.71	2.337	38.81	85	36.93	7.06	0.082	12.157
691	15.5	96.95	0.058	746.47	2.144	123.83	70.33	657.95	2.349	43.30	81	39.21	7.56	0.083	12.057
692	15	95.95	0.059	745.47	2.145	123.58	70.33	657.95	2.349	43.98	81	39.89	7.64	0.082	12.144
693	15	93.62	0.059	744.31	2.144	123.42	72.50	656.96	2.356	43.91	79	42.14	7.40	0.076	13.237
695	17	99.70	0.054	748.35	2.148	121.00	66.00	660.54	2.315	40.04	83	33.25	7.11	0.092	10.869
696	16	100.35	0.054	748.17	2.148	122.75	66.10	659.42	2.324	40.40	84	34.41	7.32	0.091	10.930
697	15	95.00	0.056	745.11	2.145	121.5	69.20	658.35	2.335	41.35	80	38.71	7.10	0.079	12.684
698	20	98.30	0.058	749.15	2.149	121.7	71.10	657.45	2.345	43.45	78	35.47	7.31	0.089	11.278
699	19	97.50	0.059	748.25	2.148	122.00	71.20	657.62	2.346	44.15	79	36.62	7.44	0.087	11.438
700	19	100.04	0.058	749.52	2.149	119.00	65.66	661.33	2.303	43.47	81	30.76	7.57	0.106	9.446
701	17	96.80	0.058	746.92	2.146	119.1	67.10	660.15	2.315	43.32	80	34.34	7.42	0.093	10.763
702	18	100.95	0.059	749.47	2.149	123.75	68.50	657.12	2.342	43.84	83	34.83	7.82	0.097	10.362
703	16.5	99.20	0.058	747.85	2.147	124.00	69.00	657.51	2.345	43.38	83	36.93	7.70	0.090	11.150
704	19	99.20	0.058	749.11	2.149	123.00	70.50	657.75	2.347	43.45	80	35.89	7.49	0.090	11.142
705	17	99.90	0.058	748.48	2.148	123.00	72.80	656.92	2.359	43.41	83	37.08	7.73	0.090	11.152
706	16	95.75	0.058	745.87	2.145	123.3	72.25	656.77	2.357	43.26	80	40.21	7.40	0.079	12.632
707	15	98.00	0.058	744.17	2.144	123.2	73.00	653.09	2.402	43.16	83	39.35	7.68	0.084	11.911
709	13	96.40	0.051	744.77	2.144	123.3	75.00	654.15	2.372	37.61	83	42.04	6.73	0.069	14.532
710	16	95.90	0.051	745.95	2.145	122.2	73.40	656.82	2.358	37.67	80	39.85	6.46	0.070	14.350
711	18	95.79	0.051	746.89	2.146	123.33	73.42	655.37	2.367	37.72	78	39.87	6.30	0.068	14.721
712	16	95.20	0.051	745.62	2.145	124.00	73.50	655.75	2.367	37.65	79	41.51	6.40	0.066	15.087
713	15	98.00	0.051	746.54	2.146	122.5	70.20	657.35	2.345	37.70	83	37.79	6.72	0.076	13.086
714	16	95.86	0.050	745.93	2.145	116.92	69.08	660.11	2.311	36.92	80	34.64	6.32	0.079	12.732
715	19	97.95	0.051	748.47	2.148	122.00	70.75	657.37	2.347	37.80	79	36.15	6.41	0.076	13.112
716	16	98.96	0.051	747.48	2.147	121.92	72.18	656.11	2.351	37.75	83	37.13	6.72	0.078	12.838
717	16	94.04	0.045	745.11	2.145	117.25	67.58	661.42	2.304	33.16	78	35.53	5.55	0.067	14.882
718	16	98.70	0.047	747.35	2.145	113.66	68.66	662.66	2.296	35.13	83	29.96	6.23	0.089	11.178
719	16	99.53	0.047	747.76	2.146	115.83	71.66	660.74	2.307	35.14	84	32.05	6.30	0.085	11.828

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
720	15	97.20	0.048	746.11	2.146	119.00	73.50	657.25	2.342	35.81	82	37.18	6.32	0.073	13.683
721	17	100.18	0.054	748.59	2.148	118.1	73.58	658.84	2.338	40.05	83	33.63	7.16	0.092	10.925
722	18	98.93	0.049	748.46	2.148	120.1	73.33	657.72	2.347	36.67	81	35.56	6.38	0.077	12.967
724	19	99.03	0.052	749.11	2.149	121.00	73.33	656.16	2.351	38.95	80	35.74	6.70	0.081	12.404
725	17	96.20	0.052	746.66	2.146	120.83	72.33	657.58	2.345	38.83	79	37.93	6.60	0.075	13.364
726	17	96.53	0.052	746.76	2.146	121.00	72.83	657.58	2.346	38.83	80	38.02	6.63	0.075	13.337
727	16	95.70	0.051	745.85	2.145	120.5	72.50	657.52	2.345	37.67	80	38.50	6.44	0.072	13.901
728	16	101.46	0.051	748.73	2.148	121.25	70.83	657.04	2.344	37.81	85	34.38	6.94	0.087	11.518
730	15	95.47	0.051	745.24	2.145	122.33	74.10	655.21	2.362	38.01	80	40.88	6.56	0.069	14.489
731	18	97.88	0.051	747.94	2.147	122.92	75.10	654.11	2.371	37.77	80	38.89	6.48	0.072	13.959
732	18	97.20	0.051	747.94	2.147	122.33	73.83	655.11	2.361	37.77	79	38.46	6.42	0.072	13.922
733	17	95.33	0.051	746.16	2.146	122.2	72.83	656.54	2.354	37.68	78	39.60	6.33	0.069	14.536
734	18	96.78	0.051	747.39	2.147	122.25	73.33	656.97	2.357	38.12	79	38.49	6.45	0.072	13.880
735	18	96.80	0.051	747.42	2.147	121.9	73.00	656.45	2.354	38.12	79	38.12	6.45	0.073	13.741
736	17	94.80	0.051	745.22	2.145	123.00	73.10	655.11	2.361	38.01	78	40.56	6.34	0.067	14.869
737	18	97.08	0.051	747.54	2.147	122.2	73.58	656.84	2.358	37.75	79	38.36	6.41	0.072	13.913
738	18	96.75	0.052	747.37	2.147	122.25	71.20	657.71	2.347	38.86	79	37.67	6.57	0.075	13.328
739	17	95.75	0.051	746.37	2.146	122.25	71.20	657.72	2.347	37.69	79	38.71	6.37	0.071	14.130
740	18	97.03	0.051	747.51	2.147	120.2	71.53	658.86	2.338	37.75	79	36.26	6.41	0.076	13.160
741	18	97.89	0.051	749.54	2.149	120.56	72.75	657.65	2.346	38.23	80	36.38	6.56	0.078	12.889
742	17	95.28	0.051	746.14	2.146	120.42	71.00	658.71	2.347	38.05	78	37.75	6.39	0.073	13.730
743	18	97.46	0.051	747.73	2.147	122.16	73.92	655.11	2.361	37.76	79	38.21	6.44	0.073	13.790
744	19	100.60	0.052	749.82	2.149	120.1	74.00	656.11	2.351	38.99	82	34.24	6.84	0.086	11.642
745	18	98.26	0.052	748.13	2.148	122.1	74.66	655.38	2.363	38.90	80	37.91	6.71	0.076	13.143
746	19	97.20	0.053	748.11	2.148	122.92	72.42	656.67	2.356	39.28	78	37.90	6.60	0.075	13.356
747	18	97.28	0.053	747.64	2.147	123.00	74.58	655.79	2.367	39.25	79	39.14	6.68	0.073	13.622
748	19	97.20	0.052	748.11	2.147	122.75	72.33	656.54	2.356	38.90	78	37.75	6.53	0.074	13.439
749	19	97.37	0.052	748.18	2.148	121.5	70.83	657.16	2.342	38.91	78	36.23	6.55	0.078	12.862
750	19	96.70	0.053	747.85	2.147	121.58	71.58	657.58	2.345	39.26	78	37.02	6.55	0.076	13.141
751	19	96.96	0.053	747.98	2.147	122.16	72.42	656.29	2.342	39.27	78	37.56	6.57	0.075	13.286

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δt <sub>lm</sub> (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
752	18	99.78	0.052	748.89	2.148	122.92	74.00	655.46	2.364	38.94	82	37.18	6.84	0.079	12.637
754	17	95.70	0.052	746.35	2.146	123.00	73.00	655.11	2.361	38.81	79	39.95	6.55	0.071	14.169
755	19	98.47	0.053	748.73	2.148	122.33	74.10	655.22	2.362	39.31	79	37.33	6.71	0.077	12.933
756	19	98.28	0.053	748.64	2.148	122.33	70.75	657.54	2.345	39.30	79	36.15	6.69	0.080	12.557
757	16	95.02	0.052	745.51	2.145	122.42	71.10	657.86	2.345	38.77	79	39.65	6.57	0.071	14.030
758	16	94.50	0.052	745.25	2.145	121.9	71.10	657.52	2.345	38.75	79	39.65	6.53	0.071	14.128
759	18	95.76	0.053	746.88	2.146	122.42	72.36	656.39	2.354	39.21	78	38.88	6.54	0.072	13.815
761	17	95.53	0.053	746.26	2.146	122.25	71.42	657.83	2.348	39.18	79	38.94	6.60	0.073	13.713
762	19	101.82	0.053	750.41	2.151	121.45	66.33	660.84	2.318	39.40	83	31.47	7.02	0.096	10.427
763	18	97.20	0.045	747.61	2.147	117.9	69.40	660.65	2.316	33.27	79	33.75	5.66	0.072	13.873

Calcul de la résistance d'encrassement de la cellule E102CBA

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
31	107.4	162	0.122	700.34	2.402	184.80	133.4	660.25	2.552	85.441	54.600	24.365	11205.582	0.396	2.528
32	106.4	162.6	0.122	699.54	2.408	185.00	132	661.54	2.551	85.344	56.200	23.964	11549.553	0.415	2.412
33	108.9	162.7	0.121	698.84	2.415	184.80	133.2	660.13	2.551	84.560	53.800	23.183	10986.580	0.408	2.453
34	108	162.7	0.122	698.35	2.414	183.58	133.08	661.33	2.552	85.199	54.700	22.916	11250.131	0.422	2.368
35	105.1	160.25	0.121	701.65	2.388	185.00	133.00	660.13	2.551	84.900	55.200	26.318	11191.268	0.366	2.734
36	106.7	161.5	0.121	699.11	2.409	185.00	133.40	660.28	2.552	84.592	54.800	25.066	11167.302	0.383	2.609
38	100.8	161.5	0.120	701.43	2.388	183.30	133.20	661.25	2.534	84.172	60.720	26.760	12204.828	0.392	2.549
39	100.3	164.25	0.118	701.25	2.386	183.80	133.00	661.43	2.535	82.748	64.000	25.585	12635.874	0.425	2.354
40	99.9	158.6	0.121	704.25	2.372	183.00	133.50	661.25	2.424	85.214	58.700	28.755	11864.925	0.355	2.817
41	99.12	158.4	0.121	705.76	2.376	182.08	133.00	662.54	2.532	85.397	59.280	28.476	12028.100	0.363	2.752
42	106.5	161.75	0.123	699.11	2.408	183.50	134.40	661.95	2.535	85.991	55.300	24.721	11450.705	0.398	2.510
43	107	161.83	0.121	699.41	2.406	185.40	133.75	660.57	2.542	84.629	54.850	25.136	11168.361	0.382	2.616
44	99.38	161.5	0.121	703.44	2.384	184.58	133.66	660.62	2.543	85.116	62.120	28.312	12605.211	0.383	2.611
45	100.1	165.08	0.123	701.56	2.386	184.58	132.75	661.66	2.538	86.292	65.030	25.534	13389.184	0.451	2.217
46	103.5	169.66	0.121	697.66	2.414	186.08	133.16	660.25	2.552	84.417	66.120	22.375	13474.086	0.518	1.930
47	108	164.41	0.124	697.23	2.412	186.00	132.83	660.42	2.553	86.457	56.370	23.153	11755.012	0.437	2.290
48	100.6	166.9	0.125	700.75	2.403	185.60	132.50	660.11	2.552	87.594	66.300	24.715	13955.340	0.486	2.059
49	102.9	163.58	0.122	700.23	2.402	186.00	133.50	660.75	2.556	85.428	60.700	26.307	12455.531	0.407	2.455
50	104.9	163.33	0.123	699.11	2.401	188.00	132.75	659.75	2.543	85.991	58.450	26.237	12067.778	0.396	2.527
51	104	163.5	0.120	700.74	2.402	187.66	133.33	659.49	2.543	84.089	59.530	26.676	12023.947	0.388	2.579
52	101.6	162.16	0.094	702.89	2.389	186.00	127.66	663.83	2.526	66.072	60.540	24.924	9555.948	0.330	3.032
53	104.2	160.25	0.112	701.25	2.388	184.00	131.16	662.54	2.532	78.540	56.040	25.316	10510.499	0.357	2.800
54	106.4	162	0.120	699.23	2.401	186.80	134.40	659.75	2.546	83.908	55.600	26.368	11201.295	0.365	2.737
55	99.8	161.8	0.124	703.81	2.371	187.80	135.00	658.42	2.544	87.272	62.000	30.368	12829.223	0.363	2.752
56	100.9	164.75	0.117	701.84	2.388	187.42	134.80	658.42	2.542	82.115	63.820	27.896	12514.546	0.386	2.591
57	99.13	163.83	0.120	702.48	2.389	187.00	134.50	659.75	2.546	84.298	64.700	28.841	13029.737	0.389	2.573
58	106.8	164.16	0.118	698.47	2.413	187.00	132.83	662.91	2.538	82.419	57.370	24.405	11409.640	0.402	2.487
59	105.8	168.58	0.124	696.53	2.428	187.58	132.50	659.75	2.544	86.370	62.780	22.632	13165.323	0.500	1.998
60	100.8	169.25	0.118	698.02	2.411	186.50	131.25	661.87	2.538	82.366	68.450	23.228	13593.163	0.503	1.987
91	101.7	167.33	0.120	699.52	2.402	187.25	131.83	660.54	2.534	83.942	65.620	24.670	13230.937	0.461	2.168

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	ρf (kg/m³)	Cpf (kJ/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	ρc (kg/m³)	Cpc (kJ/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw))	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
92	99.13	167.16	0.120	700.14	2.404	188.25	132.42	659.34	2.546	84.017	68.030	26.728	13740.454	0.442	2.261
93	100.8	165.75	0.120	700.25	2.406	188.42	131.66	659.04	2.546	84.030	65.000	26.577	13141.452	0.425	2.351
94	99.61	163.9	0.121	702.75	2.389	187.42	130.33	661.87	2.538	85.033	64.290	26.960	13060.079	0.417	2.400
95	99.29	162.66	0.121	703.19	2.384	187.75	130.58	660.16	2.536	85.086	63.370	28.076	12854.288	0.394	2.539
96	102.8	162	0.121	701.41	2.388	188.08	131.08	660.58	2.538	84.871	59.200	27.165	11998.124	0.380	2.632
97	100.2	162.2	0.121	702.22	2.389	187.58	130.75	662.22	2.522	84.969	62.000	27.885	12585.382	0.388	2.576
98	101.9	162.5	0.120	701.19	2.388	190.42	132.00	658.24	2.542	84.143	60.620	29.006	12180.559	0.361	2.768
99	99.1	164.75	0.120	702.93	2.389	188.08	131.58	660.83	2.536	84.352	65.650	27.653	13229.524	0.412	2.430
100	95.88	164.5	0.120	703.19	2.384	187.75	132.33	659.04	2.542	84.383	68.620	29.357	13804.189	0.404	2.472
101	99.97	168	0.118	700.98	2.404	187.58	132.75	659.16	2.543	82.716	68.030	25.616	13527.657	0.454	2.201
102	101.4	168.08	0.120	699.73	2.402	186.66	133.16	660.95	2.536	83.968	66.700	24.592	13452.735	0.471	2.125
105	109.8	162.2	0.118	698.97	2.413	188.58	130.33	660.45	2.531	82.478	52.450	23.360	10438.626	0.384	2.602
106	109.4	166.16	0.120	696.76	2.424	188.00	130.42	660.26	2.532	83.611	56.800	21.448	11511.858	0.462	2.166
108	111.7	162.75	0.120	696.22	2.424	187.00	129.10	661.11	2.531	83.546	51.100	20.664	10348.592	0.431	2.321
109	101.2	160.6	0.121	703.92	2.388	187.00	130.83	661.92	2.539	85.174	59.370	27.969	12075.637	0.371	2.693
110	100.5	165.5	0.121	700.02	2.402	188.42	132.66	659.54	2.545	84.702	64.960	27.262	13216.451	0.417	2.398
112	104.1	165	0.116	699.55	2.408	188.25	130.50	660.37	2.535	81.148	60.900	24.792	11900.098	0.413	2.422
113	100.1	165.42	0.114	701.77	2.404	188.10	132.00	659.11	2.541	80.002	65.300	27.019	12558.775	0.400	2.501
114	100.5	163.9	0.113	701.17	2.406	189.58	131.33	659.45	2.546	79.232	63.450	28.200	12095.645	0.369	2.710
115	101.8	160.2	0.120	702.02	2.389	187.66	129.50	661.58	2.538	84.242	58.360	27.560	11745.247	0.367	2.728
116	102.6	166.42	0.118	699.52	2.408	188.25	132.66	659.45	2.545	82.543	63.790	25.712	12679.182	0.424	2.357
118	103.9	166.5	0.118	695.19	2.424	188.33	130.92	660.62	2.533	82.032	62.610	24.337	12449.785	0.440	2.273
120	102.5	161.9	0.118	701.21	2.404	186.50	130.33	661.42	2.534	82.743	59.370	26.167	11809.503	0.388	2.576
121	102.7	163.25	0.117	701.98	2.406	187.00	129.60	661.33	2.533	82.132	60.540	25.288	11963.235	0.407	2.457
122	100.2	166.42	0.116	700.32	2.402	188.42	130.42	660.42	2.534	81.237	66.200	25.884	12917.709	0.429	2.329
123	99.27	163.42	0.117	702.34	2.389	188.20	131.25	660.73	2.536	82.174	64.150	28.227	12593.489	0.384	2.606
124	101.1	163.5	0.118	700.32	2.402	187.58	130.42	660.11	2.532	82.638	62.360	26.595	12378.204	0.400	2.498
125	99.46	161.58	0.120	703.52	2.388	187.42	129.50	661.46	2.536	84.422	62.120	27.887	12523.435	0.386	2.589
126	90.22	161.75	0.122	708.98	2.369	187.58	129.25	661.42	2.534	86.496	71.530	31.977	14657.068	0.394	2.536
127	99.47	164.75	0.118	701.11	2.406	188.66	130.58	660.62	2.536	82.731	65.280	27.352	12994.032	0.409	2.447



Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
128	99.83	162.2	0.120	702.02	2.389	187.75	128.58	661.24	2.532	84.242	62.370	27.119	12552.280	0.398	2.512
129	102.4	162.5	0.118	701.42	2.388	186.33	128.42	662.37	2.527	82.768	60.150	24.933	11888.583	0.410	2.438
130	101.2	162.9	0.109	701.17	2.388	186.00	129.75	662.87	2.528	76.428	61.730	25.743	11266.277	0.376	2.656
131	100.4	159.5	0.116	704.94	2.377	186.42	129.50	662.96	2.526	81.773	59.120	28.006	11491.421	0.353	2.833
132	88.25	156.95	0.109	711.62	2.355	185.66	130.20	662.93	2.527	77.567	68.700	34.913	12549.381	0.309	3.234
135	93.28	164.1	0.107	705.69	2.372	188.20	130.58	660.39	2.539	75.509	70.820	30.221	12684.354	0.361	2.770
136	91.05	163.5	0.095	706.27	2.376	188.25	129.00	661.62	2.534	67.096	72.450	30.881	11549.926	0.322	3.108
138	99.23	160.6	0.080	704.92	2.374	184.00	125.83	665.92	2.515	56.394	61.370	24.966	8216.118	0.283	3.532
140	93.65	163.6	0.104	705.62	2.372	186.00	129.25	663.63	2.522	73.384	69.950	28.492	12176.056	0.368	2.720
142	100.8	162.16	0.089	702.46	2.389	194.50	128.33	658.42	2.543	62.519	61.400	29.892	9170.566	0.264	3.789
143	102.4	162	0.068	701.19	2.388	172.25	126.83	666.04	2.504	47.681	59.620	16.334	6788.455	0.358	2.797
150	102	167.9	0.089	699.92	2.408	182.00	129.25	664.63	2.516	62.293	65.950	19.978	9892.583	0.426	2.348
151	103.1	163.83	0.092	700.48	2.402	182.50	129.00	664.75	2.517	64.444	60.700	22.075	9396.049	0.366	2.731
200	104.5	166.25	0.101	698.36	2.412	198.50	149.92	654.42	2.592	70.534	61.780	38.473	10510.562	0.235	4.255
222	102	166.5	0.095	699.25	2.401	189.66	145.25	654.74	2.567	66.429	64.500	32.166	10287.455	0.275	3.635
223	100.6	162.83	0.091	702.69	2.389	186.40	142.33	657.89	2.553	63.945	62.270	31.807	9512.621	0.257	3.887
224	101.6	159.5	0.090	703.56	2.371	186.50	143.83	656.16	2.565	63.320	57.870	34.036	8688.178	0.220	4.554
225	103	164.75	0.092	700.87	2.402	189.58	145.75	654.66	2.568	64.480	61.750	32.983	9563.905	0.249	4.009
226	102	160.92	0.090	702.46	2.388	188.60	143.75	655.22	2.562	63.221	58.920	34.234	8895.312	0.224	4.474
227	99.72	157	0.090	705.36	2.376	184.33	140.25	658.25	2.555	63.482	57.280	33.498	8639.782	0.222	4.507
228	97.21	157	0.089	706.11	2.375	187.75	141.16	657.45	2.558	62.844	59.790	36.958	8923.897	0.208	4.814
229	96.47	158	0.095	706.23	2.374	190.66	142.33	655.49	2.567	67.092	61.530	38.887	9800.255	0.217	4.613
230	96.13	156.58	0.095	707.35	2.366	190.25	143.00	655.62	2.566	67.198	60.450	39.907	9611.010	0.207	4.827
231	104	160.41	0.093	701.21	2.388	185.00	145.16	656.11	2.562	65.213	56.410	32.167	8784.589	0.235	4.257
232	100.2	161.9	0.096	702.04	2.381	192.00	145.83	654.14	2.578	67.396	61.720	37.337	9904.177	0.228	4.382
233	99.98	161.33	0.089	703.65	2.371	193.25	145.10	653.54	2.597	62.625	61.350	38.140	9109.464	0.205	4.867
224	103.7	162.58	0.089	700.11	2.402	189.50	143.83	655.66	2.566	62.310	58.870	33.082	8810.962	0.229	4.365
225	104.5	165.1	0.091	699.78	2.401	191.42	144.00	654.71	2.567	63.680	60.640	32.483	9271.591	0.246	4.073
226	105	163.58	0.089	699.27	2.403	189.42	144.00	655.71	2.567	62.235	58.620	31.987	8766.667	0.236	4.242
227	104.5	163.54	0.089	699.09	2.402	190.58	144.75	654.66	2.567	62.219	59.030	33.204	8822.037	0.229	4.375

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
228	108.9	165.42	0.091	696.11	2.428	189.33	146.00	654.66	2.567	63.346	56.570	30.045	8700.699	0.249	4.014
229	114	165	0.089	694.52	2.435	180.10	145.90	657.11	2.553	61.812	51.000	22.463	7676.158	0.294	3.402
230	109	167.5	0.091	695.25	2.424	191.20	147.42	653.31	2.573	63.268	58.500	30.470	8971.620	0.253	3.948
231	96	145.66	0.091	713.83	2.333	189.50	130.83	659.21	2.542	64.959	49.660	39.162	7525.886	0.165	6.049
232	97.72	159.42	0.091	705.57	2.376	193.25	144.75	653.51	2.572	64.207	61.700	40.068	9412.676	0.202	4.949
233	101	157.25	0.086	704.11	2.372	187.50	144.42	650.96	2.566	60.553	56.280	36.453	8083.654	0.191	5.242
234	99.73	159.75	0.086	704.74	2.373	191.92	145.10	654.54	2.578	60.608	60.020	38.393	8632.192	0.193	5.170
235	102.1	162.1	0.086	701.11	2.388	194.83	148.00	651.42	2.586	60.295	60.030	38.958	8643.453	0.191	5.240
236	99.1	158.2	0.086	705.05	2.376	190.92	145.00	654.96	2.567	60.634	59.100	38.939	8514.365	0.188	5.316
237	101.9	158.25	0.086	703.11	2.386	189.27	146.10	654.67	2.566	60.467	56.350	37.222	8129.917	0.188	5.322
238	100.9	157.42	0.086	704.15	2.372	189.66	145.33	654.49	2.565	60.557	56.530	38.014	8120.024	0.184	5.442
239	102.3	158.66	0.086	703.47	2.384	189.42	146.25	654.83	2.567	60.498	56.370	36.968	8130.146	0.189	5.286
240	102	157.58	0.087	704.77	2.372	187.58	145.16	655.37	2.567	61.315	55.620	36.200	8089.326	0.192	5.202
241	101.8	157.66	0.086	704.73	2.373	187.58	144.92	655.25	2.567	60.607	55.860	36.119	8033.779	0.191	5.226
242	101	158.83	0.09	704.92	2.371	189.66	145.83	654.74	2.567	60.623	57.830	37.394	8312.335	0.191	5.230
243	105	160.5	0.087	701.75	2.386	187.58	145.58	655.58	2.566	61.052	55.500	33.376	8084.722	0.208	4.799
244	100.2	156.66	0.086	705.45	2.376	183.42	139.20	658.31	2.544	60.669	56.420	32.479	8132.877	0.215	4.642
245	99.83	152.5	0.086	707.16	2.361	184.40	137.92	658.28	2.544	60.816	52.670	34.904	7562.675	0.186	5.365
268	100.2	160	0.111	703.08	2.384	183.00	132.36	662.68	2.521	78.042	59.840	27.343	11133.342	0.350	2.855
269	102	159.33	0.116	703.77	2.386	182.58	133.66	661.12	2.534	81.637	57.330	27.239	11167.118	0.353	2.836
270	99.63	159.25	0.114	704.44	2.374	182.42	133.00	662.71	2.525	80.306	59.620	27.961	11366.364	0.350	2.860
271	100	160	0.099	703.11	2.386	182.00	133.20	662.63	2.526	69.608	60.000	27.217	9965.066	0.315	3.175
272	101.6	163.1	0.087	701.34	2.387	180.42	133.10	663.76	2.516	61.017	61.520	23.716	8960.177	0.325	3.077
273	102.2	160.2	0.074	702.21	2.389	177.90	133.10	664.54	2.515	51.964	58.000	23.690	7200.172	0.261	3.825
274	99.92	157.25	0.074	705.53	2.376	179.50	132.27	664.88	2.518	52.209	57.330	26.986	7111.735	0.227	4.411
275	99.95	156.25	0.067	705.11	2.371	178.50	130.50	664.54	2.514	47.242	56.300	26.181	6306.256	0.207	4.826
276	106	156.9	0.062	702.25	2.389	178.50	130.42	665.31	2.514	43.540	50.900	22.981	5294.408	0.198	5.046
277	100.2	153.9	0.073	706.06	2.372	177.92	130.25	665.35	2.512	51.542	53.680	26.913	6562.838	0.210	4.767
278	100.7	155.42	0.067	705.07	2.376	177.58	129.20	666.39	2.512	47.240	54.690	25.183	6138.488	0.210	4.769
279	100.9	154.2	0.067	706.57	2.377	178.00	128.42	666.21	2.511	47.340	53.260	25.596	5993.222	0.201	4.965

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kJ/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kJ/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
280	100.1	154	0.065	706.05	2.375	178.40	130.40	665.31	2.514	45.893	53.890	27.239	5873.820	0.185	5.391
282	100.1	155.1	0.067	706.58	2.376	178.75	130.75	665.75	2.514	47.341	55.040	27.017	6191.003	0.197	5.073
283	101	154	0.064	706.51	2.376	177.50	130.42	666.96	2.506	45.217	53.000	26.349	5694.041	0.186	5.379
284	100.6	154.33	0.064	706.48	2.377	182.25	135.75	660.11	2.532	45.215	53.700	31.382	5771.428	0.158	6.321
285	101.8	162.58	0.089	701.17	2.388	180.20	132.58	663.58	2.521	62.404	60.820	23.608	9063.461	0.330	3.028
287	100.8	158.33	0.089	704.56	2.373	181.00	132.66	663.83	2.524	62.706	57.540	27.009	8562.007	0.273	3.667
288	99.71	155.66	0.098	706.68	2.376	180.20	132.25	663.16	2.526	69.255	55.950	28.352	9206.518	0.279	3.580
289	98.89	155.75	0.104	706.32	2.378	182.66	134.00	661.33	2.533	73.457	56.860	30.828	9932.385	0.277	3.608
290	99.61	129.89	0.107	704.75	2.374	182.58	134.50	661.54	2.534	75.408	30.280	43.180	5420.701	0.108	9.260
291	99.4	156.25	0.104	704.83	2.372	182.33	134.42	661.37	2.534	73.302	56.850	30.331	9884.686	0.280	3.567
292	100.5	155.5	0.104	705.02	2.378	182.42	133.66	661.04	2.532	73.322	54.960	29.913	9582.820	0.276	3.629
293	100.5	157.75	0.104	704.12	2.372	182.25	132.20	662.23	2.522	73.228	57.250	27.946	9944.208	0.306	3.267
294	100.8	156	0.111	705.41	2.378	182.50	132.50	660.52	2.525	78.301	55.200	29.022	10278.163	0.305	3.283
295	101.7	167.33	0.120	699.52	2.402	187.25	131.83	660.54	2.534	83.942	65.620	24.670	13230.937	0.461	2.168
350	99.13	167.16	0.120	700.14	2.404	188.25	132.42	659.34	2.546	84.017	68.030	26.728	13740.454	0.442	2.261
351	100.8	165.75	0.120	700.25	2.406	188.42	131.66	659.04	2.546	84.030	65.000	26.577	13141.452	0.425	2.351
352	99.61	163.9	0.121	702.75	2.389	187.42	130.33	661.87	2.538	85.033	64.290	26.960	13060.079	0.417	2.400
353	99.29	162.66	0.121	703.19	2.384	187.75	130.58	660.16	2.536	85.086	63.370	28.076	12854.288	0.394	2.539
354	102.8	162	0.121	701.41	2.388	188.08	131.08	660.58	2.538	84.871	59.200	27.165	11998.124	0.380	2.632
355	100.2	162.2	0.121	702.22	2.389	187.58	130.75	662.22	2.522	84.969	62.000	27.885	12585.382	0.388	2.576
356	101.9	162.5	0.120	701.19	2.388	190.42	132.00	658.24	2.542	84.143	60.620	29.006	12180.559	0.361	2.768
357	99.1	164.75	0.120	702.93	2.389	188.08	131.58	660.83	2.536	84.352	65.650	27.653	13229.524	0.412	2.430
358	95.88	164.5	0.120	703.19	2.384	187.75	132.33	659.04	2.542	84.383	68.620	29.357	13804.189	0.404	2.472
359	99.97	168	0.118	700.98	2.404	187.58	132.75	659.16	2.543	82.716	68.030	25.616	13527.657	0.454	2.201
360	101.4	168.08	0.120	699.73	2.402	186.66	133.16	660.95	2.536	83.968	66.700	24.592	13452.735	0.471	2.125
361	109.8	162.2	0.118	698.97	2.413	188.58	130.33	660.45	2.531	82.478	52.450	23.360	10438.626	0.384	2.602
363	109.4	166.16	0.120	696.76	2.424	188.00	130.42	660.26	2.532	83.611	56.800	21.448	11511.858	0.462	2.166
364	111.7	162.75	0.120	696.22	2.424	187.00	129.10	661.11	2.531	83.546	51.100	20.664	10348.592	0.431	2.321
366	101.2	160.6	0.121	703.92	2.388	187.00	130.83	661.92	2.539	85.174	59.370	27.969	12075.637	0.371	2.693
368	100.5	165.5	0.121	700.02	2.402	188.42	132.66	659.54	2.545	84.702	64.960	27.262	13216.451	0.417	2.398

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
369	104	165	0.116	699.55	2.408	188.25	130.50	660.37	2.535	81.148	60.900	24.792	11900.098	0.413	2.422
371	100	165.42	0.114	701.77	2.404	188.10	132.00	659.11	2.541	80.002	65.300	27.019	12558.775	0.400	2.501
372	100	163.9	0.113	701.17	2.406	189.58	131.33	659.45	2.546	79.232	63.450	28.200	12095.645	0.369	2.710
373	102	160.2	0.120	702.02	2.389	187.66	129.50	661.58	2.538	84.242	58.360	27.560	11745.247	0.367	2.728
374	103	166.42	0.118	699.52	2.408	188.25	132.66	659.45	2.545	82.543	63.790	25.712	12679.182	0.424	2.357
375	104	166.5	0.118	695.19	2.424	188.33	130.92	660.62	2.533	82.032	62.610	24.337	12449.785	0.440	2.273
377	103	161.9	0.118	701.21	2.404	186.50	130.33	661.42	2.534	82.743	59.370	26.167	11809.503	0.388	2.576
379	103	163.25	0.117	701.98	2.406	187.00	129.60	661.33	2.533	82.132	60.540	25.288	11963.235	0.407	2.457
380	100	166.42	0.116	700.32	2.402	188.42	130.42	660.42	2.534	81.237	66.200	25.884	12917.709	0.429	2.329
381	99	163.42	0.117	702.34	2.389	188.20	131.25	660.73	2.536	82.174	64.150	28.227	12593.489	0.384	2.606
382	101	163.5	0.118	700.32	2.402	187.58	130.42	660.11	2.532	82.638	62.360	26.595	12378.204	0.400	2.498
383	99	161.58	0.120	703.52	2.388	187.42	129.50	661.46	2.536	84.422	62.120	27.887	12523.435	0.386	2.589
384	90	161.75	0.122	708.98	2.369	187.58	129.25	661.42	2.534	86.496	71.530	31.977	14657.068	0.394	2.536
385	99	164.75	0.118	701.11	2.406	188.66	130.58	660.62	2.536	82.731	65.280	27.352	12994.032	0.409	2.447
386	100	162.2	0.120	702.02	2.389	187.75	128.58	661.24	2.532	84.242	62.370	27.119	12552.280	0.398	2.512
387	102	162.5	0.118	701.42	2.388	186.33	128.42	662.37	2.527	82.768	60.150	24.933	11888.583	0.410	2.438
388	101	162.9	0.109	701.17	2.388	186.00	129.75	662.87	2.528	76.428	61.730	25.743	11266.277	0.376	2.656
389	100	159.5	0.116	704.94	2.377	186.42	129.50	662.96	2.526	81.773	59.120	28.006	11491.421	0.353	2.833
390	88	156.95	0.109	711.62	2.355	185.66	130.20	662.93	2.527	77.567	68.700	34.913	12549.381	0.309	3.234
391	93	164.1	0.107	705.69	2.372	188.20	130.58	660.39	2.539	75.509	70.820	30.221	12684.354	0.361	2.770
393	91	163.5	0.095	706.27	2.376	188.25	129.00	661.62	2.534	67.096	72.450	30.881	11549.926	0.322	3.108
394	99	160.6	0.080	704.92	2.374	184.00	125.83	665.92	2.515	56.394	61.370	24.966	8216.118	0.283	3.532
396	94	163.6	0.104	705.62	2.372	186.00	129.25	663.63	2.522	73.384	69.950	28.492	12176.056	0.368	2.720
398	101	162.16	0.089	702.46	2.389	194.50	128.33	658.42	2.543	62.519	61.400	29.892	9170.566	0.264	3.789
400	102	162	0.068	701.19	2.388	172.25	126.83	666.04	2.504	47.681	59.620	16.334	6788.455	0.358	2.797
401	102	167.9	0.089	699.92	2.408	182.00	129.25	664.63	2.516	62.293	65.950	19.978	9892.583	0.426	2.348
408	103	163.83	0.092	700.48	2.402	182.50	129.00	664.75	2.517	64.444	60.700	22.075	9396.049	0.366	2.731
409	101	162	0.119	702.52	2.388	179.25	128.50	667.87	2.504	83.600	60.950	21.957	12167.845	0.477	2.098
410	100	162.5	0.119	702.41	2.388	182.00	129.00	664.51	2.514	83.587	62.200	23.804	12415.447	0.449	2.229
411	101	162.5	0.118	702.83	2.387	184.80	129.40	662.11	2.543	82.934	61.500	25.227	12174.744	0.415	2.409

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
412	94	162.42	0.118	706.97	2.377	185.10	129.40	662.25	2.544	83.422	68.900	28.777	13662.538	0.408	2.449
413	95	162.6	0.120	705.85	2.375	184.30	130.00	662.21	2.546	84.702	67.500	27.779	13578.789	0.420	2.378
414	95	161.33	0.117	705.13	2.374	183.40	130.20	662.84	2.526	82.500	66.400	28.156	13004.805	0.397	2.517
415	89	160	0.118	709.16	2.376	186.60	129.00	662.84	2.546	83.681	70.800	32.758	14076.865	0.370	2.705
416	92	162	0.111	706.21	2.372	186.40	130.00	661.24	2.535	78.389	69.600	30.526	12941.385	0.365	2.742
418	89	160.3	0.118	709.75	2.355	188.00	130.10	660.12	2.532	83.751	71.100	33.872	14023.226	0.356	2.808
419	97	165	0.118	703.93	2.388	187.00	132.00	660.53	2.534	83.064	68.200	28.085	13527.894	0.414	2.413
421	99	163.25	0.118	702.15	2.389	185.50	130.50	661.24	2.536	82.854	64.200	26.585	12707.587	0.411	2.432
424	101	161	0.118	702.15	2.388	186.00	130.50	661.25	2.534	82.854	59.700	27.046	11811.922	0.376	2.662
426	92	162.75	0.118	706.43	2.372	180.00	132.80	663.42	2.524	83.359	70.700	27.337	13979.294	0.440	2.273
429	92	163.2	0.116	706.73	2.373	187.58	132.83	659.24	2.544	81.981	70.950	31.795	13802.624	0.373	2.678
431	94	160.9	0.116	706.33	2.372	188.00	134.00	658.04	2.556	81.934	67.200	33.265	13060.193	0.338	2.961
432	93	159.4	0.116	707.05	2.365	187.50	134.00	659.75	2.545	82.018	66.700	34.277	12937.939	0.325	3.080
433	89	159	0.116	710.92	2.354	189.00	132.00	695.55	2.544	82.467	70.200	36.200	13627.691	0.324	3.088
435	89	149.33	0.074	714.35	2.335	186.00	129.25	662.63	2.526	52.862	59.950	38.248	7399.781	0.166	6.009
437	99	149.8	0.089	709.57	2.355	185.00	130.75	662.87	2.528	63.152	50.450	33.264	7503.041	0.194	5.154
439	100	156.9	0.118	705.35	2.374	190.40	138.50	657.45	2.554	83.231	57.100	36.037	11282.452	0.269	3.713
499	100	156.9	0.116	705.35	2.375	190.50	138.50	657.55	2.555	81.821	57.100	36.090	11095.896	0.264	3.781
501	100	155.58	0.116	706.84	2.372	193.16	136.80	657.98	2.558	81.993	55.560	37.179	10805.778	0.250	4.000
503	99	164.7	0.116	701.03	2.388	193.40	142.30	654.85	2.567	81.319	65.340	35.343	12688.435	0.309	3.238
508	96	160	0.117	706.93	2.373	194.00	143.00	654.54	2.575	82.711	64.200	40.240	12600.711	0.269	3.712
510	98	155	0.118	707.54	2.375	191.50	138.70	656.12	2.562	83.490	57.000	38.562	11302.421	0.252	3.966
512	104	159.8	0.117	702.66	2.389	190.40	137.33	657.86	2.556	82.211	56.270	32.173	11051.575	0.295	3.384
513	102	159.5	0.118	703.65	2.388	193.70	139.20	655.45	2.565	83.031	57.700	35.776	11440.601	0.275	3.635
515	102	156.8	0.121	703.65	2.388	192.90	138.50	656.74	2.565	85.142	55.000	36.399	11182.504	0.264	3.784
518	105	157.5	0.092	702.15	2.389	189.00	127.50	661.25	2.535	64.598	52.700	26.860	8132.882	0.260	3.839
530	106	156.75	0.104	702.55	2.387	188.00	132.80	659.75	2.544	73.065	50.400	28.783	8790.094	0.263	3.807
532	103	154.5	0.111	705.74	2.377	187.40	133.00	659.75	2.542	78.337	51.600	31.479	9608.301	0.263	3.809
534	100	156.6	0.117	705.45	2.374	189.90	135.50	657.74	2.547	82.538	56.300	34.241	11031.669	0.277	3.608
537	101	158.7	0.099	704.85	2.372	186.70	134.20	659.45	2.544	69.780	57.700	30.526	9550.418	0.269	3.716

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kj/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kj/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
539	99	154.6	0.104	706.01	2.372	188.00	135.00	658.55	2.545	73.425	55.200	34.488	9613.864	0.240	4.170
545	102	154	0.086	706.93	2.373	187.00	134.00	659.55	2.546	60.796	52.200	32.598	7530.835	0.199	5.032
547	102	157.58	0.086	704.68	2.372	189.60	135.00	658.35	2.543	60.602	55.800	32.616	8021.199	0.212	4.727
548	103	165	0.087	700.94	2.402	184.00	140.00	657.14	2.543	60.982	62.200	27.089	9110.946	0.289	3.456
550	105	161	0.096	700.22	2.404	190.40	138.00	657.24	2.552	67.221	55.600	30.972	8984.936	0.250	4.007
551	101	161.58	0.104	702.48	2.389	192.00	141.00	655.58	2.567	73.058	60.200	34.818	10507.029	0.260	3.852
552	104	162.4	0.111	700.33	2.402	192.00	142.00	654.24	2.567	77.737	58.200	33.533	10867.301	0.279	3.587
553	103	162	0.117	701.65	2.389	190.00	139.50	657.75	2.557	82.093	58.700	31.925	11512.261	0.310	3.224
554	104	164.2	0.115	699.11	2.404	191.40	141.40	655.57	2.565	80.398	60.200	32.030	11635.212	0.312	3.200
555	107	160.6	0.120	698.37	2.413	192.40	138.50	654.13	2.566	83.804	53.900	32.000	10899.659	0.293	3.413
556	106	163.9	0.120	701.46	2.404	194.00	140.00	654.13	2.566	84.175	57.480	31.808	11631.491	0.315	3.179
557	105	158.5	0.120	700.74	2.404	195.00	142.10	654.55	2.575	84.089	53.900	36.998	10895.857	0.253	3.947
558	105	162.8	0.114	700.71	2.406	195.00	144.30	654.82	2.578	79.881	58.200	35.819	11185.664	0.269	3.723
559	104	159.25	0.087	702.55	2.389	188.90	139.70	657.36	2.552	61.122	55.400	32.652	8089.514	0.213	4.692
560	108	159	0.069	700.25	2.404	185.70	137.40	658.55	2.545	48.317	51.500	28.270	5981.965	0.182	5.494
561	105	150	0.074	703.25	2.385	180.50	131.20	664.85	2.518	52.041	45.500	28.558	5647.305	0.170	5.879
562	104	145.2	0.077	709.35	2.355	184.00	130.50	662.25	2.525	54.620	41.700	32.544	5363.870	0.142	7.053
563	105	159.5	0.118	701.44	2.404	193.00	140.00	655.55	2.566	82.770	54.200	34.096	10784.656	0.272	3.675
566	107	159.6	0.118	700.43	2.403	193.20	139.00	655.12	2.562	82.651	52.400	32.692	10407.150	0.274	3.652
568	111	157.25	0.118	698.32	2.402	189.50	138.80	657.21	2.552	82.402	45.900	29.786	9084.942	0.262	3.811
570	105	159.6	0.118	700.11	2.406	190.00	141.00	656.54	2.561	82.613	54.200	32.932	10773.162	0.281	3.554
571	104	160.2	0.118	701.28	2.404	191.70	141.90	655.83	2.564	82.751	56.000	34.507	11140.276	0.278	3.601
574	107	162.2	0.118	699.43	2.402	189.90	142.50	655.21	2.564	82.533	55.600	31.623	11022.346	0.300	3.335
577	105	155.7	0.118	703.26	2.388	190.00	142.33	655.21	2.563	82.985	50.870	35.876	10080.776	0.242	4.137
579	105	155.25	0.118	704.95	2.378	188.60	142.20	656.44	2.564	83.184	50.600	35.408	10009.277	0.243	4.112
580	109	166.25	0.074	696.45	2.428	183.20	138.80	658.69	2.542	51.537	57.600	22.920	7207.636	0.271	3.697
632	104	165.6	0.082	699.95	2.402	188.90	142.80	656.85	2.568	57.396	61.300	30.267	8451.122	0.240	4.163
633	103	165.2	0.095	699.11	2.401	188.58	143.20	656.89	2.568	66.415	62.200	31.034	9918.629	0.275	3.637
634	107	165	0.104	698.93	2.413	190.00	145.00	654.56	2.565	72.689	58.200	31.135	10208.157	0.282	3.546
635	102	161.6	0.114	702.95	2.388	188.90	142.80	656.85	2.568	80.136	59.300	33.467	11347.973	0.292	3.428

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	ρf (kg/m³)	Cpf (kJ/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	ρc (kg/m³)	Cpc (kJ/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
637	106	165.6	0.117	698.84	2.414	191.00	144.20	654.11	2.567	81.764	59.800	31.454	11803.263	0.323	3.098
641	102	162.7	0.118	701.25	2.388	190.00	142.3	655.23	2.532	82.748	60.900	33.467	12033.903	0.309	3.233
643	102	165.5	0.118	700.94	2.404	192.00	142.00	654.04	2.564	82.711	63.200	32.657	12566.502	0.331	3.021
647	103	168	0.118	698.74	2.414	191.00	143.60	654.34	2.565	82.451	64.600	30.804	12857.822	0.359	2.785
650	105	166.25	0.118	698.44	2.413	191.25	142.23	654.23	2.563	82.416	61.620	30.873	12254.346	0.341	2.929
652	100	157	0.118	705.43	2.374	192.00	140.00	655.18	2.564	83.241	57.200	37.540	11303.493	0.259	3.861
655	104	163	0.118	700.44	2.404	188.00	142.00	656.26	2.566	82.652	59.200	31.135	11762.757	0.325	3.077
658	105	164	0.118	699.32	2.406	190.70	142.50	656.67	2.567	82.520	59.400	31.974	11793.427	0.317	3.152
661	81	156.33	0.119	715.52	2.325	186.42	124.00	664.28	2.513	85.147	75.620	36.291	14970.226	0.355	2.818
662	87	160.42	0.119	710.53	2.344	188.42	127.83	661.13	2.535	84.553	73.790	34.176	14624.617	0.368	2.717
663	100	161.92	0.119	703.11	2.382	189.16	126.33	662.74	2.526	83.670	62.030	26.838	12362.713	0.396	2.524
664	96	162.5	0.119	704.02	2.374	189.92	129.16	660.54	2.534	83.778	66.960	30.415	13317.666	0.377	2.655
665	94	162.75	0.104	707.64	2.366	181.20	130.18	664.69	2.515	73.595	69.220	26.517	12052.914	0.391	2.558
666	81	159.2	0.116	714.29	2.334	187.25	123.66	664.95	2.516	82.858	78.440	34.951	15169.491	0.373	2.678
667	81	157.83	0.118	714.29	2.334	187.87	124.00	664.93	2.516	84.286	77.070	36.240	15161.522	0.360	2.779
668	85	160.83	0.118	711.89	2.345	187.50	124.83	662.22	2.522	84.003	75.870	32.829	14945.410	0.392	2.554
669	86	160.75	0.107	710.27	2.358	186.50	124.75	664.63	2.516	75.999	74.950	31.896	13431.443	0.362	2.761
671	93	163	0.108	705.62	2.377	187.90	130.83	660.36	2.537	76.207	69.520	30.705	12593.127	0.353	2.834
672	93	163.33	0.111	705.03	2.376	187.90	132.50	659.24	2.542	78.258	70.600	31.562	13127.491	0.358	2.795
673	96	164.33	0.116	703.11	2.382	188.50	133.25	659.87	2.546	81.561	68.450	30.292	13298.311	0.378	2.648
674	90	160.83	0.118	708.23	2.366	190.58	132.58	658.58	2.546	83.571	71.200	35.947	14078.327	0.337	2.968
675	95	158	0.116	707.69	2.366	190.00	126.58	661.29	2.532	82.092	62.620	31.598	12162.668	0.331	3.020
676	87	160.5	0.116	710.52	2.356	188.50	127.75	661.13	2.531	82.420	73.950	34.176	14359.779	0.361	2.767
677	99	161.75	0.117	703.15	2.385	190.25	130.25	659.25	2.546	82.269	63.200	30.072	12400.503	0.355	2.819
678	90	160.75	0.116	708.52	2.365	189.00	131.75	659.37	2.543	82.188	70.450	34.429	13693.745	0.342	2.923
679	95	163.75	0.116	704.22	2.374	189.20	133.33	658.26	2.552	81.690	69.070	31.592	13394.809	0.365	2.742
680	91	164.5	0.116	706.93	2.379	190.10	138.10	656.11	2.552	82.004	73.200	35.141	14280.385	0.350	2.861
681	94	163.25	0.116	705.72	2.374	189.75	134.90	657.33	2.543	81.864	69.050	33.094	13419.453	0.349	2.867
682	93	164.58	0.101	705.63	2.376	188.80	134.10	658.45	2.554	71.269	71.900	32.055	12175.134	0.327	3.061
683	95	162.5	0.101	705.51	2.376	188.00	134.20	658.13	2.552	71.257	68.000	32.078	11512.772	0.309	3.239

Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	pf (kg/m³)	Cpf (kJ/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	pc (kg/m³)	Cpc (kJ/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	ΔtIm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
685	90	161.66	0.101	707.06	2.364	187.20	134.21	659.73	2.547	71.413	71.200	33.832	12020.018	0.306	3.272
686	93	161.25	0.101	705.14	2.372	187.60	134.58	658.13	2.552	71.219	68.220	33.375	11524.527	0.297	3.367
687	95	164.83	0.101	703.02	2.384	188.25	134.83	658.58	2.554	71.005	69.620	30.813	11784.993	0.329	3.040
688	84	157.5	0.099	713.91	2.334	187.83	127.83	662.83	2.526	70.677	73.200	36.533	12075.096	0.284	3.517
689	95	163.16	0.101	704.02	2.377	188.83	133.75	658.34	2.543	71.106	68.280	31.815	11540.618	0.312	3.205
690	95	168	0.101	702.43	2.384	191.00	135.00	657.09	2.542	70.945	73.200	30.804	12380.602	0.346	2.892
691	91	160.42	0.089	708.65	2.366	184.25	127.92	656.13	2.562	63.070	69.530	29.947	10375.494	0.298	3.355
692	93	160.58	0.094	707.64	2.366	183.50	126.83	664.29	2.512	66.518	67.870	28.150	10681.514	0.326	3.064
693	94	158.92	0.094	707.53	2.365	183.58	127.00	664.29	2.513	66.508	64.780	28.564	10189.311	0.307	3.259
694	92	156.42	0.096	709.53	2.353	182.66	127.33	665.99	2.518	68.115	64.530	30.610	10342.501	0.291	3.441
695	98	158	0.107	705.43	2.375	186.00	129.25	662.63	2.526	75.481	59.950	29.571	10747.081	0.313	3.199
696	97	164	0.098	703.14	2.384	190.58	134.58	657.58	2.545	68.908	67.200	31.852	11039.348	0.298	3.354
697	90	161.5	0.098	708.93	2.369	192.10	134.10	657.12	2.552	69.475	71.200	36.806	11718.566	0.274	3.651
698	92	161.25	0.104	707.53	2.365	191.33	135.10	657.22	2.553	73.583	69.430	36.281	12082.492	0.286	3.491
699	92	161.42	0.104	707.53	2.366	191.92	135.33	657.63	2.555	73.583	69.790	36.705	12150.276	0.285	3.512
700	93	163.75	0.101	705.36	2.377	188.83	134.25	658.54	2.552	71.241	70.780	32.510	11985.936	0.317	3.153
701	96	162.83	0.101	704.65	2.376	180.75	132.58	663.66	2.526	71.170	66.370	25.966	11223.106	0.372	2.690
702	93	160.58	0.102	707.89	2.364	188.33	136.16	657.24	2.542	72.205	67.370	34.798	11499.527	0.284	3.518
703	96	160.5	0.101	705.45	2.377	188.00	137.10	657.55	2.546	71.250	64.100	33.670	10856.125	0.277	3.605
704	96	163	0.101	704.52	2.372	188.10	135.33	658.72	2.558	71.157	66.970	31.671	11303.415	0.307	3.257
705	91	162.25	0.101	707.37	2.363	187.80	134.25	658.11	2.543	71.444	71.750	33.838	12113.054	0.308	3.247
706	94	162.25	0.102	706.98	2.378	187.60	133.20	659.43	2.542	72.112	68.530	31.895	11751.678	0.317	3.155
707	94	162.66	0.102	705.36	2.376	187.60	133.20	659.43	2.544	71.947	68.600	31.509	11726.855	0.320	3.123
708	92	161.83	0.102	707.82	2.363	187.75	133.92	659.84	2.548	72.198	70.030	33.367	11947.330	0.308	3.247
709	92	158.25	0.101	708.35	2.365	187.92	133.33	659.63	2.546	71.543	65.790	34.972	11131.669	0.274	3.652
710	94	163.42	0.104	705.86	2.378	187.83	131.92	660.61	2.537	73.409	69.110	30.536	12064.370	0.340	2.942
711	93	161	0.101	706.05	2.378	186.90	132.20	659.55	2.535	71.311	67.900	32.048	11514.324	0.309	3.236
713	88	157.5	0.101	711.65	2.354	187.42	130.92	659.17	2.532	71.877	69.700	36.119	11793.075	0.281	3.560
714	94	156.58	0.102	708.25	2.365	188.20	132.75	659.47	2.544	72.242	62.650	35.097	10703.824	0.262	3.812
715	91	155.33	0.102	710.35	2.354	189.33	130.58	660.95	2.538	72.456	63.950	36.538	10907.358	0.257	3.894



Nbre de jour	te (°C)	ts (°C)	Q (m³/s)	ρf (kg/m³)	Cpf (kJ/kg°C)	Te (°C)	Ts (°C)	ρc (kg/m³)	Cpc (kJ/kg°C)	mf (kg/s)	Δtf (°C)	Δtlm (°C)	φ*10³ (kw)	U (kw/m²°C)	Rd (m²°C/kw)
716	94	158.33	0.101	707.34	2.363	188.10	134.33	658.22	2.542	71.441	63.970	34.620	10799.152	0.268	3.727
717	98	162.1	0.104	703.24	2.382	188.18	133.50	658.62	2.542	73.137	63.800	30.412	11114.741	0.314	3.181
718	95	162.33	0.104	705.61	2.376	187.75	133.50	658.46	2.544	73.383	67.450	31.561	11760.518	0.321	3.120
719	93	159.58	0.105	707.44	2.364	188.92	133.83	658.37	2.543	74.281	66.280	34.634	11638.818	0.289	3.459
720	94	159.33	0.105	707.68	2.366	188.92	133.83	658.37	2.543	74.306	65.290	34.439	11478.566	0.287	3.488
721	93	161.83	0.104	706.83	2.372	187.83	132.25	658.04	2.541	73.510	68.720	32.123	11982.464	0.321	3.117
722	118	161.66	0.104	706.56	2.375	188.25	132.25	659.58	2.542	73.482	44.160	20.092	7706.817	0.330	3.031
723	94	160.5	0.105	706.36	2.374	188.50	132.42	659.46	2.544	74.168	66.280	32.836	11670.208	0.306	3.271
724	93	161.66	0.105	706.36	2.377	188.50	133.33	659.92	2.548	74.168	68.370	33.001	12053.416	0.314	3.183
725	97	165.58	0.104	702.19	2.389	189.58	137.00	657.29	2.543	73.028	68.780	31.407	11999.587	0.329	3.043
726	93	161.45	0.104	706.26	2.377	189.33	136.25	657.75	2.556	73.451	68.370	34.970	11936.932	0.294	3.406
727	95	161.1	0.105	705.12	2.372	189.00	134.25	658.63	2.546	74.038	65.950	33.186	11581.953	0.300	3.331
728	96	163.66	0.105	704.89	2.372	188.33	134.00	658.16	2.541	74.013	67.530	30.800	11855.560	0.331	3.020
729	94	162.16	0.104	705.12	2.376	189.50	134.10	658.81	2.548	73.332	68.200	33.331	11883.030	0.307	3.261
730	90	162.58	0.104	707.34	2.364	190.10	134.83	657.46	2.555	73.563	72.470	35.427	12602.807	0.306	3.268
731	92	160.58	0.105	707.35	2.365	190.42	135.16	657.79	2.558	74.272	68.460	36.038	12025.183	0.287	3.484
732	93	157.33	0.104	708.32	2.366	187.58	133.75	659.66	2.546	73.665	64.030	35.103	11159.920	0.273	3.657
733	93	160.58	0.105	707.35	2.367	190.00	135.45	657.73	2.557	74.272	67.750	35.613	11910.533	0.288	3.476
734	99	163.63	0.105	702.45	2.389	190.50	137.42	657.96	2.546	73.757	64.280	32.145	11326.526	0.303	3.299
735	94	158.5	0.089	707.45	2.367	183.00	134.11	661.55	2.535	62.963	64.090	31.491	9551.560	0.261	3.833