



Université de Reims Champagne Ardenne

ÉCHANGEURS THERMIQUES

**Méthodes globales de calcul
avec problèmes résolus**

Jacques PADET
Professeur Émérite

Seconde édition

TABLE DES MATIÈRES

PROLOGUE

PLAN DE L'OUVRAGE

NOMENCLATURE

CHAPITRE 1. – Caractéristiques géométriques des échangeurs

- 1.1. – Échangeurs à fluides séparés : les grandes familles
 - 1.1.1. – *Échangeurs tubulaires*
 - 1.1.2. – *Échangeurs à plaques*
- 1.2. – Disposition des écoulements
- 1.3. – Aspects structurels dans la conception des échangeurs
 - 1.3.1. – *Échangeurs à modules*
 - 1.3.2. – *Échangeurs à passes*
- 1.4. – Données d'avant-projet

CHAPITRE 2. – Première approche : distribution des températures dans un échangeur à courants parallèles

- 2.1. – Données préliminaires
- 2.2. – Échangeurs co-courant
- 2.3. – Échangeurs à contre-courant
- 2.4. – Échangeurs à fluide isotherme
- 2.5. – Puissance d'un échangeur à courants parallèles
 - 2.5.1. – *Expression de la puissance*
 - 2.5.2. – *Influence de la surface d'échange*
 - 2.5.3. – *Cas général*

CHAPITRE 3. – Méthode générale de calcul pour les échangeurs

- 3.1. – Flux thermique maximum dans un échangeur
- 3.2. – Efficacité thermique d'un échangeur
- 3.3. – Nombre d'Unités de Transfert : *NUT*
- 3.4. – Étude de la fonction $E = E(R, NUT)$
 - 3.4.1. – *Échangeur co-courant*
 - 3.4.2. – *Échangeur à contre-courant*
 - 3.4.3. – *Échangeurs de configuration quelconque*
- 3.5. – Cas particuliers et valeurs limites
 - 3.5.1. – *Cas limite R = 1 dans un échangeur à contre-courant*
 - 3.5.2. – *Cas limite R = 0*
 - 3.5.3. – *Cas limite NUT → ∞*
- 3.6. – *NUT* : discours de la méthode

- 3.7. – Une illustration de la méthode *NUT*
 - 3.7.1. – *Notion de « pincement »*
 - 3.7.2. – *Le risque des croisements de températures*
 - 3.7.3. – *La règle d'or : pincer sans croiser*

CHAPITRE 4. – Détermination des coefficients d'échange dans les échangeurs à fluides séparés

- 4.1. – Définition et choix des températures de référence
 - 4.1.1. – *Où est le problème ?*
 - 4.1.2. – *La température de mélange*
 - 4.1.3. – *La température de film*
 - 4.1.4. – *Utilisation de T_m et T_F comme températures de référence*
 - 4.1.5. – *Présentation des informations*
- 4.2. – Coefficients d'échange internes
 - 4.2.1. – *Écoulements laminaires*
 - 4.2.2. – *Écoulements turbulents*
 - 4.2.3. – *Régimes de transition*
- 4.3. – Coefficients d'échange externes
 - 4.3.1. – *Échangeurs tubulaires à courants croisés*
 - 4.3.2. - *Échangeurs tubulaires à courants parallèles*
 - 4.3.3. - *Échangeurs à faisceau de tubes et chicanes*
 - 4.3.4. - *Échangeurs à tubes ailetés*
- 4.4. – Coefficients d'échange dans un conduit annulaire
- 4.5. – Lits de particules

CHAPITRE 5. – Coefficients d'échange dans les échangeurs à changement de phase

- 5.1. – Généralités
- 5.2. – Condenseurs
- 5.3. – Évaporateurs et générateurs de vapeur

CHAPITRE 6. – Évaluation du *NUT* et du flux transféré

- 6.1. – Résistances d'encrassement
- 6.2. – Calcul du *NUT*
 - 6.2.1. - *Échangeurs à paroi plane*
 - 6.2.2. – *Paroi de forme quelconque non encrassée*
 - 6.2.3. – *Cas général*
 - 6.2.4. – *Aspects pratiques*
 - 6.2.5. – *Calcul du flux*

CHAPITRE 7. – Les réseaux d'échangeurs

- 7.1. – Généralités
 - 7.1.1. – *Comment assembler des échangeurs*
 - 7.1.2. – *Hypothèses de calcul*
- 7.2. – Montage en ligne en série sur les deux fluides
 - 7.2.1. – *Présentation*
 - 7.2.2. – *Approche méthodologique*
 - 7.2.3. – *Efficacité de l'échangeur équivalent au réseau*
 - 7.2.4. – *Applications*
 - 7.2.5. – *NUT de l'échangeur à contre-courant équivalent*
 - 7.2.6. – *Modes opératoires*

- 7.3. – Montage en série-parallèle
 - 7.3.1. – *Le circuit série est le circuit du fluide chaud*
 - 7.3.2. – *Le circuit série est le circuit du fluide froid*
 - 7.3.3. – *Efficacité du réseau : forme générale*
 - 7.3.4. – *Calcul du NUT total*
 - 7.3.5. – *Modes opératoires*
 - 7.3.6. – *Quel type d'assemblage choisir ?*
- 7.4. – Réseaux maillés
 - 7.4.1. – *Exemple d'un réseau série maillé*
 - 7.4.2. – *Application à l'évaluation des températures locales dans un échangeur tubulaire*
 - 7.4.3. – *Le concept de réseau adapté aux échangeurs à plaques*
- 7.5. – Notions sur les réseaux à courants multiples
 - 7.5.1. – *Réseaux à fluide intermédiaire*
 - 7.5.2. – *Réseaux ouverts (NSPM)*
- 7.6. – Pincement et optimisation

CHAPITRE 8. – Les régimes variables dans les échangeurs

- 8.1. – L'inadaptation du concept de coefficient d'échange au cas des régimes variables
- 8.2. – Comportement d'un échangeur tubulaire en régime variable
 - 8.2.1. – *Bilan sur le fluide chaud*
 - 8.2.2. – *Bilan d'ensemble*
- 8.3. – Le modèle à deux paramètres
 - 8.3.1. – *Réponse à un échelon de température*
 - 8.3.2. – *Expression de la constante de temps*
 - 8.3.3. – *Commentaires sur τ et t_r*
- 8.4. – Calcul pratique de τ pour un échangeur bitube
 - 8.4.1. – *Méthode*
 - 8.4.2. – *Exemple de calcul*
- 8.5. – Valeurs de τ pour diverses dispositions
 - 8.5.1. – *Échangeur co-courant*
 - 8.5.2. – *Échangeur à contre-courant, échelon sur le fluide chaud*
 - 8.5.3. – *Échangeur à contre-courant, échelon sur le fluide froid*
- 8.6. – Informations complémentaires
 - 8.6.1. - *Constante de temps des échangeurs à faisceau de tubes*
 - 8.6.2. – *Constante de temps des capteurs solaires*
 - 8.6.3. – *Détermination du temps de retard t_r*
- 8.7. – Réponse à un échelon de débit
- 8.8. – Efficacité moyenne en régime variable

PROBLÈMES RÉSOLUS

- N° 1 – Coefficient d'échange
- N° 2 – Méthode NUT
- N° 3 – Échangeur bitube
- N° 4 – Cheminée
- N° 5 – Échangeur à changement de phase
- N° 6 – Échangeur à faisceau de tubes et calandre
- N° 7 – Échangeur à plaques
- N° 8 – Échangeur tubulaire à courants croisés
- N° 9 – Échangeur tubulaire, faisceau en quinconce

- N° 10 – Condenseur
- N° 11 – Échangeur compact
- N° 12 – Assemblage de deux échangeurs
- N° 13 - Échangeur en épingle
- N° 14 – Réseau à 3 fluides

REPÈRES BIBLIOGRAPHIQUES

INDEX ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

PROLOGUE de la première édition (1993)

*Ce n'est pas parce qu'on dit en hiver
« Fermez la porte, il fait froid dehors » qu'il fait
moins froid dehors quand on a fermé la porte.*

Pierre DAC

Le principe constructif des échangeurs thermiques est simple : ce sont des appareils destinés à transférer de la chaleur entre deux fluides de températures différentes, ou plus rarement d'un fluide à un milieu solide. Il s'agit donc *d'échangeurs de chaleur*, et non pas « *d'échangeurs de température* » comme cela se dit (et s'écrit) parfois, car la température n'est pas une grandeur physique extensive susceptible de faire l'objet d'un bilan.

Dans des sociétés industrielles dont le fluide vital est l'énergie, les échangeurs thermiques ont acquis une importance économique majeure. On estime que presque toute l'énergie thermique produite ou recueillie transite au moins une fois par un échangeur et que, en France, les économies réalisables par une meilleure utilisation des échangeurs sont de l'ordre de 1,5 MTep, soit un tiers du gisement à moyen terme dans l'industrie.

Cependant, la réalisation des échangeurs rencontre des difficultés à la mesure de leur importance : difficultés de calcul en particulier, dues à l'extrême complexité des formes géométriques et des écoulements ; difficultés de maintenance également, avec les problèmes de corrosion, d'enrassement, et les pertes de performances qui en découlent. Il est donc essentiel de bien maîtriser leur conception et les calculs qui s'y rapportent.

Les choses sont d'autant moins simples que ces appareils sont d'une très grande diversité, puisqu'ils vont du radiateur de chauffage central aux générateurs de vapeur des centrales nucléaires, en passant par les échangeurs des moteurs turbocompressés et les récupérateurs divers. Mais tous font appel essentiellement aux mécanismes des transferts thermiques par convection (forcée, libre ou mixte).

Ainsi, le présent manuel constitue un prolongement direct de « *Fluides en écoulement, méthodes et modèles* », publié en 1991, qui se présente comme une introduction mécanique à l'étude des transferts convectifs. On ne sera donc pas surpris de trouver ici un certain nombre de références à ce volume (désigné en abrégé dans le texte par FEMM), la filiation étant plus particulièrement marquée dans le chapitre 4 qui traite des coefficients d'échange, ainsi que dans les problèmes. Les notations adoptées sont également les mêmes (à quelques détails près) dans les deux ouvrages.

Dans un volume de taille relativement limitée comme celui-ci, il a fallu faire un choix qui est celui d'une marche d'approche. D'une part, nous insistons sur les bases méthodologiques et thermiques, sans entrer dans la description technologique. D'autre part, dans les calculs, nous avons préféré privilégier une approche globale, qui cerne un peu moins bien les phénomènes physiques mais qui est plus intéressante pour le technicien ou l'ingénieur puisqu'elle conduit naturellement aux méthodes de calcul utilisées en ingénierie et aux études

d'avant-projet. Mais bien que celles-ci reposent assez largement sur des données relativement empiriques, elles peuvent et doivent être conduite avec un maximum de rigueur. Cette exigence sera présente en filigrane dans tout le texte.

L'ouvrage a été conçu pour rendre service aussi bien à des débutants dans la discipline qu'à des étudiants de second cycle ou à des ingénieurs, l'acquisition des connaissances étant opérée de façon progressive. Le même souci de progressivité a guidé la rédaction des problèmes groupés en fin de volume : certains d'entre eux sont originaux, d'autres trouvent leur source d'inspiration dans des ouvrages antérieurs, mais dans chacun d'eux l'énoncé, la solution et les commentaires ont été rédigés pour être le mieux possible en harmonie avec la présentation adoptée dans les chapitres de cours.

PROLOGUE de la seconde édition (2012)

Pour répondre à une demande exprimée à de nombreuses reprises depuis que cet ouvrage est épuisé, une seconde édition en est présentée ici. Par rapport à l'édition originale, elle comporte, avec quelques additions ponctuelles, un chapitre sur les régimes variables et trois nouveaux problèmes inédits.

Je remercie vivement la SFT d'accueillir ce document, en plus de ceux qui sont déjà présents sur son site.

PLAN DE L'OUVRAGE

Cet *itinéraire dans les échangeurs thermiques* comporte huit étapes et quelques plans de visite.

Le **chapitre 1** présente brièvement les principales dispositions constructives adoptées dans la conception des échangeurs.

Dans le **chapitre 2** on étudie les échangeurs à courants parallèles, pour lesquels des calculs relativement élémentaires permettent d'obtenir les champs de températures et de poser les problèmes physiques essentiels qui concernent tous les autres modèles.

Une méthode synthétique de calcul – la méthode NUT – est présentée de façon détaillée au **chapitre 3**. Elle permet de traiter la plus grande partie des situations classiques et d'aborder la pathologie et l'optimisation des échangeurs (croisements de températures, pincement).

Le **chapitre 4** constitue une compilation des principaux résultats concernant les coefficients d'échange entre une paroi et un fluide monophasique, où le problème des grandeurs de référence (spécialement des températures) fait l'objet d'une attention particulière. Il se prolonge par un court chapitre (**chapitre 5**) consacré aux coefficients d'échange en présence d'un changement de phase.

Un récapitulatif axé sur le calcul du coefficient d'échange moyen dans un échangeur est proposé au **chapitre 6**.

Le **chapitre 7** présente une étude détaillée des réseaux d'échangeurs à deux courants, basée sur la méthode NUT. La fin du chapitre est une introduction aux réseaux à courants multiples.

Pour la description des régimes variables, les bases d'un modèle simple à deux paramètres sont présentées dans le **chapitre 8**.

On trouvera enfin 14 **problèmes** résolus et commentés, suivis par un rappel de données thermophysiques relatives aux fluides usuels.

NOMENCLATURE

d	: diamètre intérieur d'un tube
e^+	: pas relatif d'un faisceau = pas / D
h	: coefficient d'échange par convection ($W / m^2 K$)
k	: coefficient global d'échange à travers une paroi ($W / m^2 K$)
l	: distance entre deux chicanes ou deux ailettes
q	: débit-volume (m^3 / s)
q_m	: débit-masse (kg / s)
q_t	: débit thermique unitaire (W / K)
C	: capacité calorifique totale (J / K)
C_p	: chaleur massique à pression constante ($J / kg K$)
D	: diamètre extérieur d'un tube
D_c	: diamètre de calandre
D_h	: diamètre hydraulique
E	: efficacité thermique (<i>sans dimension</i>)
E_c, E_f	: efficacité relative (côté chaud ou froid)
E_t	: efficacité totale (réseau)
G	: vitesse massique ($kg / m^2 s$)
K	: conductance globale d'un échangeur (W / K)
L	: longueur d'un tube
L°	: longueur de référence
L_V	: chaleur latente de changement de phase (J / kg)
N_L	: nombre de nappes longitudinales (faisceau de tubes)
N_T	: nombre de nappes transversales
NUT	: nombre d'unités de transfert (<i>sans dimension</i>)
Pe	: nombre de Péclet
Pr	: nombre de Prandtl
R	: facteur de déséquilibre = $q_{t \min} / q_{t \max}$
Re	: nombre de Reynolds
Re_h	: nombre de Reynolds corrigé (§ 4.3.3.2)
S	: surface d'échange mesurée depuis l'entrée du fluide chaud (m^2)
S_D	: pas diagonal d'un faisceau en quinconce (m)
S_L	: pas longitudinal d'un faisceau (m)
S_T	: pas transversal d'un faisceau (m)
St	: nombre de Stanton
t_r	: temps de retard (s)
T	: température ($^{\circ}C$ ou K)
V	: vitesse débitante (de mélange) (m / s)

Lettres grecques

ε	: rugosité d'une paroi (m)
	: efficacité d'une ailette (<i>sans dimension</i>)
φ	: densité de flux (W / m^2)
Φ	: flux total, puissance thermique (W)
λ	: conductivité thermique ($W / m.K$)
μ	: viscosité dynamique ($kg / m.s = Pa.s$)
ν	: viscosité cinématique (m^2 / s)
ρ	: masse volumique (kg / m^3)
σ	: tension superficielle (N / m)
Σ	: surface totale d'échange (m^2)
Θ	: température volumique moyenne ($^{\circ}C$)
τ	: constante de temps (s)

Indices

a	: annulaire
c	: fluide chaud
e	: entrée
f	: fluide froid
F	: film
i	: intérieur
l	: phase liquide
m	: mélange
p	: paroi
s	: sortie
v	: phase vapeur

Divers

$<>$: moyenne sur la surface d'échange
<i>surlignage</i>	: moyenne sur une section (§ 8.4), ou moyenne temporelle (§ 8.8)

<i>FEMM</i>	: Fluides en Ecoulement, Méthodes et Modèles. Par J. PADET (site web SFT)
<i>PTC</i>	: Principes des Transferts Convectifs. id.