

Echangeurs de chaleurs et récupération de la chaleur fatale

Nicolas Rimbert

Professeur, ENSEM Ecole de l'énergie, Université de Lorraine

Bureau 016 Rouge

LEMTA Laboratoire des Energies et de la Mécanique Théorique et Appliquée

Plan du cours (a priori)

- Echangeurs de chaleurs (6 cours)
 - Différents types d'échangeurs, Intensification des échanges
 - Augmentation de surface (ailettes), Chicanes, Turbulence
 - Dimensionnement, Méthode DTLM et NUT
 - Exemple Matlab
 - Exemple Fluent (distribution)
- Changement de phase (6 cours)
 - Intensification des échanges par changement de phase
 - Evaporation/condensation (production de vapeur)
 - Exemple: dimensionnement d'un évaporateur (Cattenom)
 - Fusion/Solidification (stockage de la chaleur)
- *Echangeurs de chaleur à contact direct (0 cours)*
 - *Intensification des échanges par forte augmentation de la surface de contact*
 - *Principes de la pulvérisation liquide*
 - *Exemple: récupération de la chaleur des laitiers, par solidification d'un spray, en sidérurgie*
 - *Exemple: évaporation d'une goutte et d'un spray, application aux tours aéro-réfrigérantes*
- Mini-projet (Matlab grader)
- Examen

Bibliographie

- Techniques de l'ingénieur
 - Echangeurs de chaleur - Définitions et principes généraux, A. Bontemps
 - Echangeurs de chaleur – Description, Z. Minvielle, N. Caney, P. Clément, P. Bandelier, P. Marty, J.A.A Gruss, C. Roussel
 - Echangeurs de chaleur – Dimensionnement thermique, A. Bontemps, J.F. Fourmigué
 - Echangeurs de chaleur – Intensification des échanges thermiques, P. Bandelier, N. Caney, Z. Minvielle
 - Echangeurs de chaleur – Problèmes de fonctionnement, P. Clément
 - Echangeurs de chaleur à contact direct, A. Bricard, L. Tadrist
 - Transfert de chaleur avec changement d'état solide-liquide, A. Bricard, D. Gobin
 - Condensation de mélanges de vapeurs, A. Bontemps
- *Echangeurs de chaleur*
 - Cours de l'ENSEM, J.C. Braun
 - Cours de l'ENSIC, L. Luo, E. Schaer et co-auteurs
- Modélisation et caractérisation expérimentale d'un évaporateur à mini-canaux de climatisation automobile fonctionnant au CO₂
 - Fadil Ayad, Thèse de l'Université Henri Poincaré, 2007
- Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase
 - Adèle Soupert-Caron, Thèse de l'université Grenoble Alpes, 2015
- Livres
 - Transferts thermiques
 - Yves Jannot & Christian Moyne, édilivre
 - Théorie et applications de la thermodynamique
 - Abbot, Van Ness, Schaum
 - Thermo-hydraulique des réacteurs
 - J.M. Delhaye, EDP Science
 - Fundamentals of Statistical and Thermal Physics
 - Frederick Reif, Mc Graw Hill
 - Les changements de phase solide-liquide-vapeur
 - Sous la direction de H. Combeau et L. Tadrist, CNRS ed.
 - Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena
 - Van P. Carey, Taylor & Francis
 - Convective Boiling and Condensation
 - Collier & Thome, Oxford
 - Heat Transfer Handbook
 - Bejan & Kraus, Wiley

Cours n° 1

Différents types d'échangeurs, Intensification des échanges
 Augmentation de surface (ailettes), Chicanes, Turbulence

Exemples d'échangeurs industriels

Production d'énergie

Transport

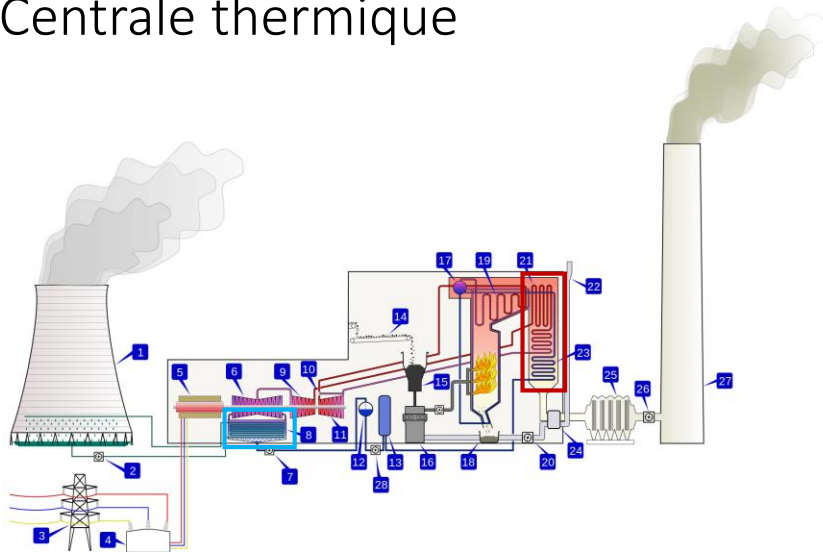
Economie d'énergie

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

5

Centrale thermique



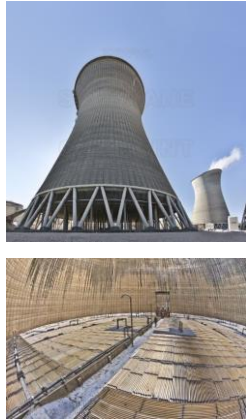
N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

6

Tours aéro-réfrigérantes

Centrale de Bugey



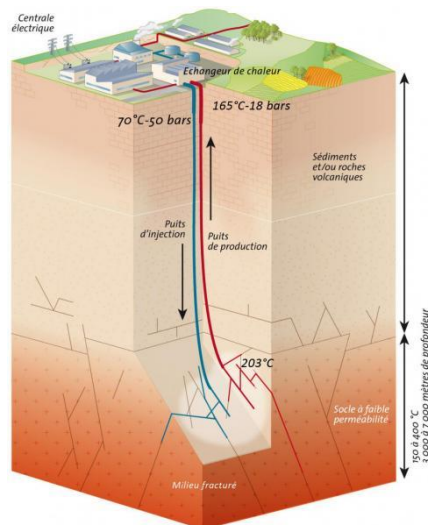
© Stéphane Compoint

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

7

Géothermie

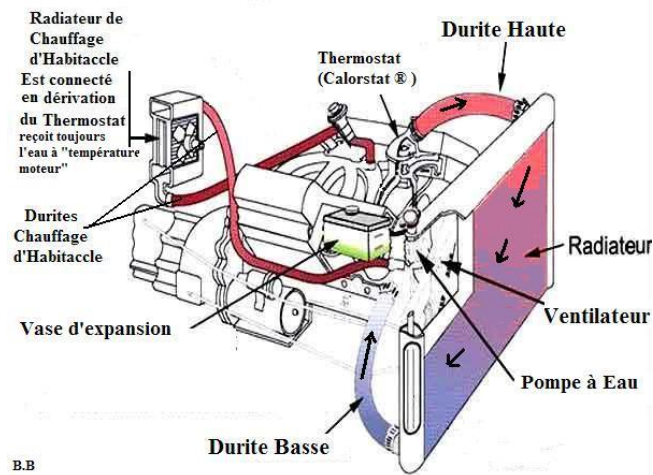


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

8

Automobile



N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

9

Locomotive à vapeur



N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

10

Récupération de l'énergie des eaux grises

- Bâtiment
- Cuve d'échange pour eaux grises
 - Biofluides environnement
 - Circulation gravitaire
 - Vidage journalier
 - Nettoyage automatique



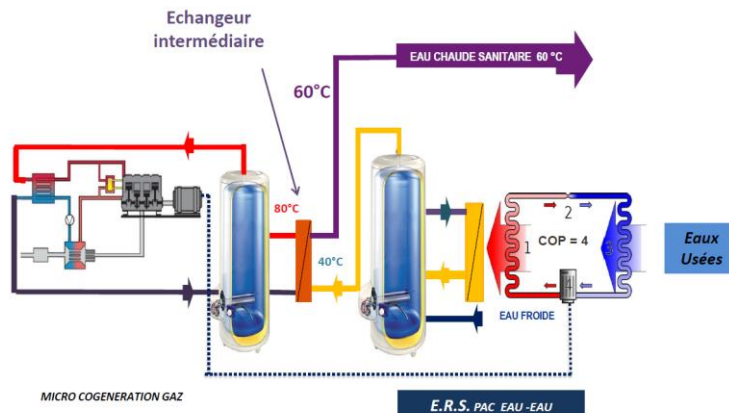
N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

11

Intégration dans un système

© Biofluides environnement



N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

12

Classement

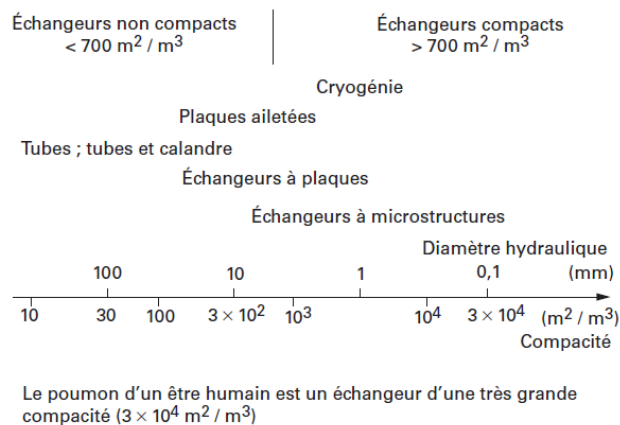
- Technologie
 - Tube
 - Plaque
 - Autres (contact direct, caloducs,...)
- Mode de transfert
 - Conduction, convection, rayonnement
- Régime
 - Avec ou sans stockage
- Etat du fluide
 - Liquide, gaz, voire solide!
- Compacité
- Matériaux

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

13

Compacité

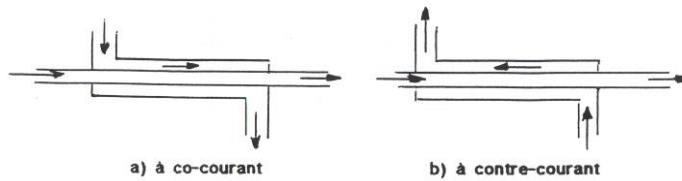


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

14

Echangeurs à courants parallèles

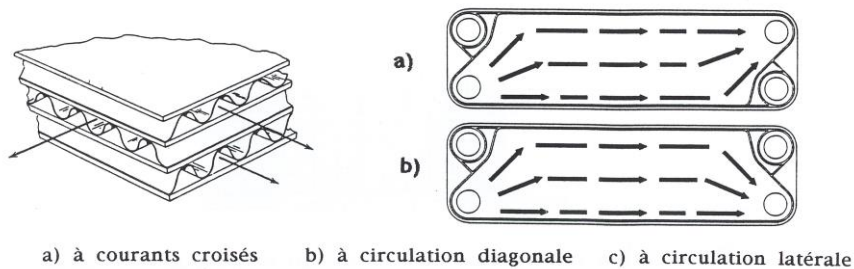


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

15

Echangeurs à courants non parallèles

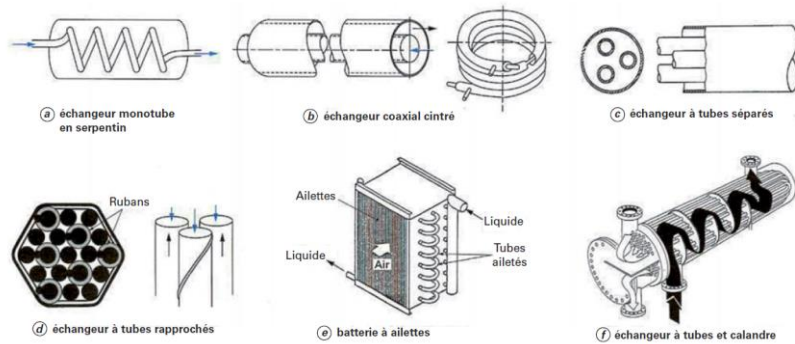


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

16

Echangeurs tubulaires

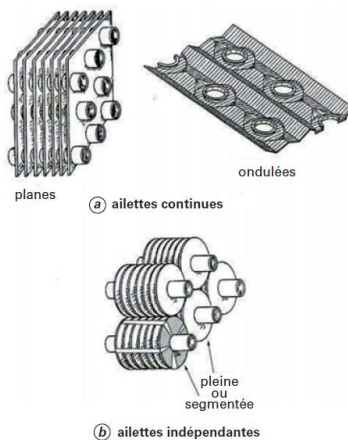


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

17

Échangeurs tubulaires à ailettes

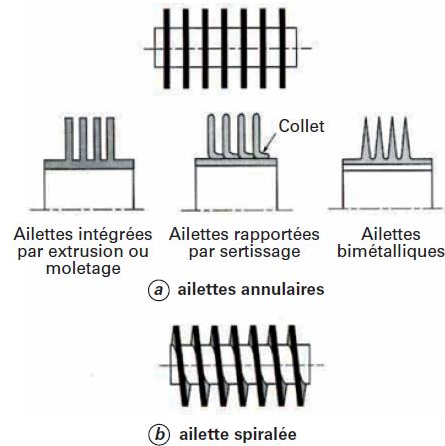


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

18

Ailettes annulaires ou spiralées

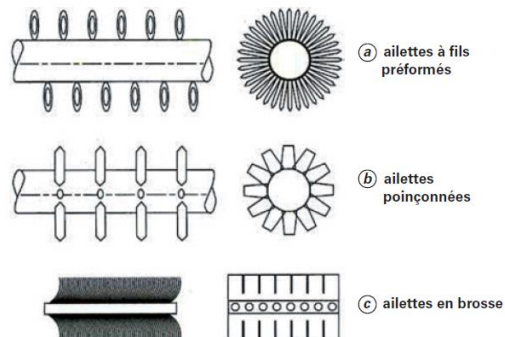


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

19

Ailettes transversales

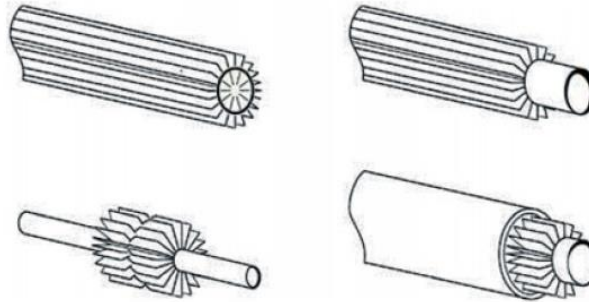


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

20

Ailettes longitudinales



N. Rimbart

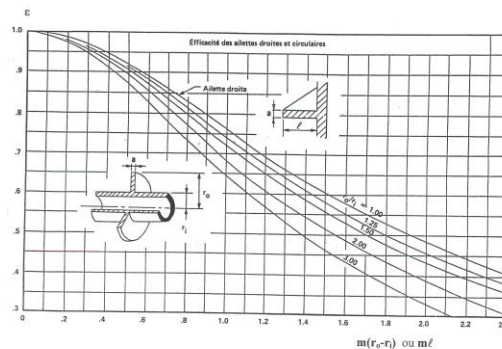
Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

21

Efficacité d'ailettes

- Efficacité globale: η
 - Efficacité d'une ailette: ε
 - Surface des ailettes seules: S_{ail}
 - Surface totale ailettes comprises: S

$$\eta = 1 - (1 - \varepsilon) \frac{S_{ail}}{S}$$

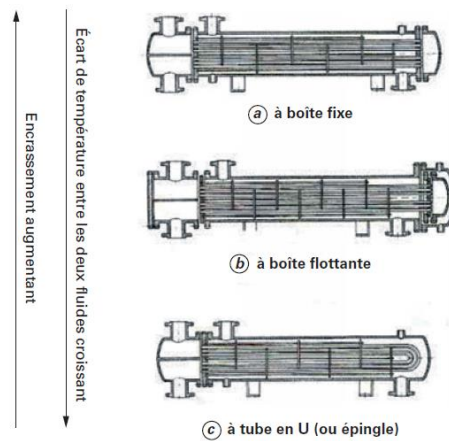
avec $m = \{ 2 h / (\lambda_{ail} a) \}^{1/2}$

N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

22

Tubes et calandres

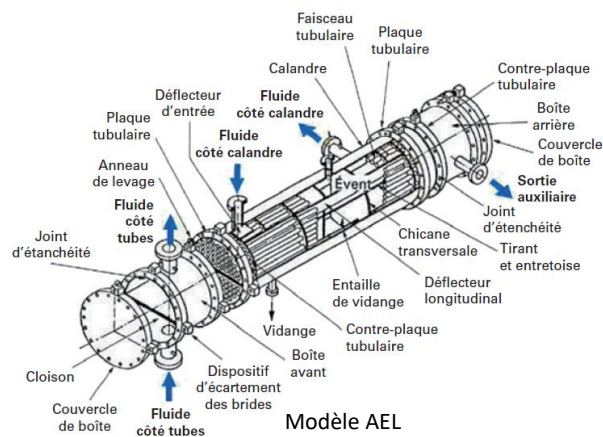


N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

23

Standard TEMA



Modèle AEL

Tubular Exchanger Manufacturers Association

N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

24

Signification des trois lettres

• Boîte d'extrémité avant

- A: couvercle démontable



- B: fond bombé monobloc



- C: couvercle démontable



- N: boîte spéciale haute pression



• Type de calandre

- E: simple passe



- F: deux passes avec chicane longitudinale



- G: circuit divisé par chicane longitudinale



- H: double circuit divisé avec chicane longitudinale



- J: circuit divisé par chicanes transversales



- K: rebouilleur type kettle



• Boîte d'extrémité arrière

- L: plaque tubulaire formant bride de calandre avec boîte type A



- M: plaque tubulaire formant bride de calandre avec boîte type B



- N: plaque tubulaire soudée à l'intérieur de la calandre avec boîte type C



- P: Tête extérieure glissante avec presse garniture



- S: Tête flottante à contre bride



- T: Tête flottante à passage libre



- U: faisceau à tube en U



- W: tête glissante intérieure avec presse étoupe et détecteur de fuite



N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

25

Standard BWG

• Birmingham Wire Gauge

- Taille standard d'aiguilles et de tubes
- Défini par le diamètre extérieur
 - En pouces (2,54cm)
- Plus le chiffre est grand plus le diamètre intérieur est grand

Norme BWG	Épaisseur mm	Diam. ext. mm	Diam. int. mm	Surf. ext. m ² /m
BWG 14	2,11	19,05 (3/4 in)	14,83	0,0598
BWG 12	2,77	25,4 (1 in)	19,86	0,0798

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

26

Birmingham Wire Gauge

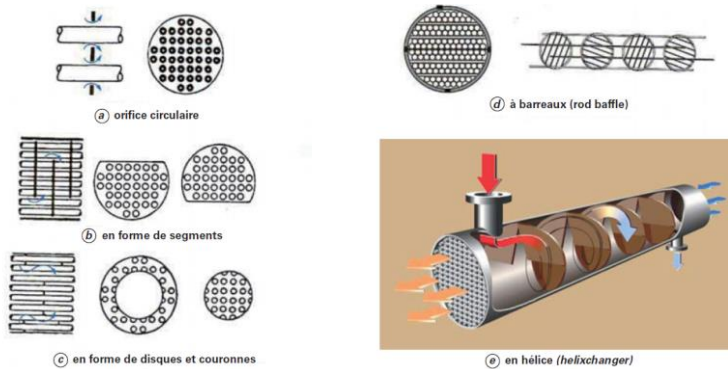
Diam. Ext. (pouces et mm)	BWG	Épaisseur (mm)	Diam. Int. (mm)
½" ou 12,7 mm	14	2,10	8,48
	16	1,65	9,40
	18	1,24	10,21
¾" ou 19,05 mm	10	3,4	12,24
	12	2,77	13,51
	14	2,10	14,85
	16	1,65	15,75
	18	1,24	16,56
	20	0,91	17,23
1" ou 25,4 mm	10	3,4	18,59
	12	2,77	19,86
	14	2,10	21,18
	16	1,65	22,10
	18	1,24	22,91
1¼" ou 31,75 mm	10	3,40	24,94
	12	2,77	26,16
	14	2,10	27,43
	16	1,65	28,45
	18	1,24	29,21
	20	0,91	30,00
1½" ou 38,1 mm	10	3,40	31,24
	12	2,77	32,51
	14	2,10	33,78
	16	1,65	34,80
	18	1,24	35,56

N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

27

Chicanes transversales



N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

28

Echangeurs à plaques

- En raison des fortes turbulences
 - Le coefficient d'échange global est plus élevé que pour les échangeurs tubulaires
 - Les pertes de charges également
 - Par contre, l'encrassement est plus faible
 - État de surface (Polissage)
 - Turbulence

Coefficient d'échange	Constructeur
2300 à 7000 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	CIAT
3500 à 7500 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	Alfa Laval
1750 à 7000 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	Vicarb

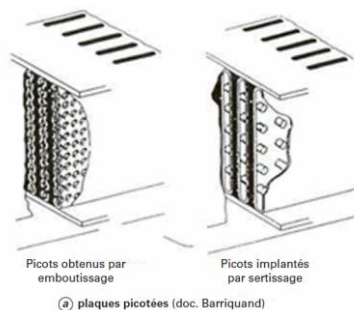
Fluide	Résistance $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$
Eau distillée	1.10^{-5}
Eau de ville	2.10^{-5}
Eau de ville dure	5.10^{-5}
Eau de mer	3.10^{-5}
Eau de rivière	5.10^{-5}
Eau géothermale	4.10^{-5}
Vapeur d'eau	1.10^{-5}
Huile	2 à 5.10^{-5}
Solvants et produits organiques	1 à 3.10^{-5}

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

29

Echangeurs à plaques



N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

30

Echangeurs à plaques et joints

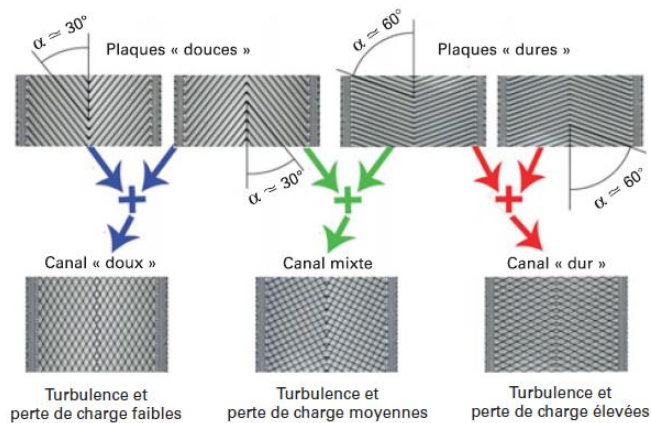


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

31

Arrangement des canaux

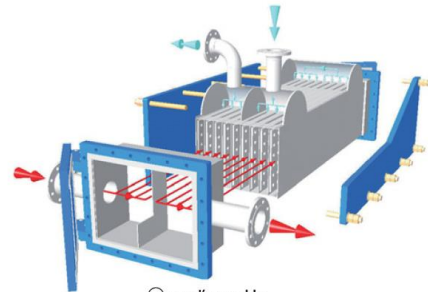


N. Rimbert

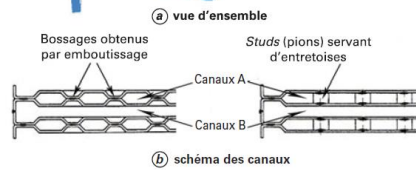
Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

32

Echangeurs platulaires



Barriquand

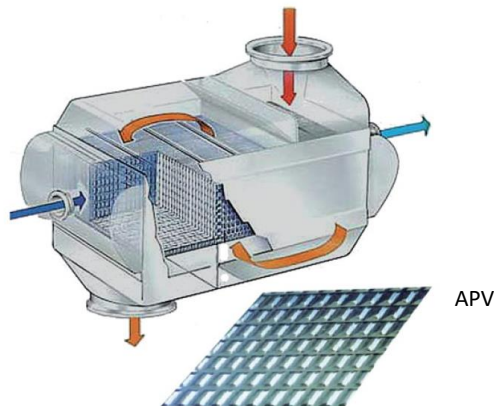


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

33

Echangeur « hybrid »



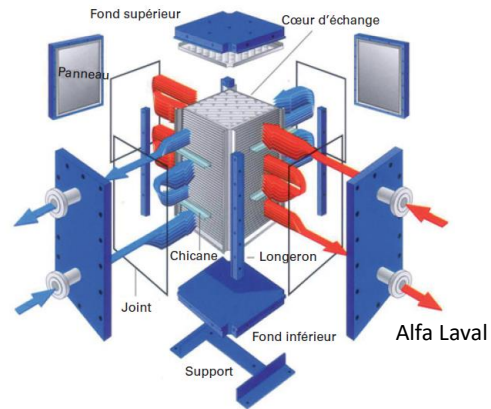
APV

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

34

Echangeur « Compabloc »

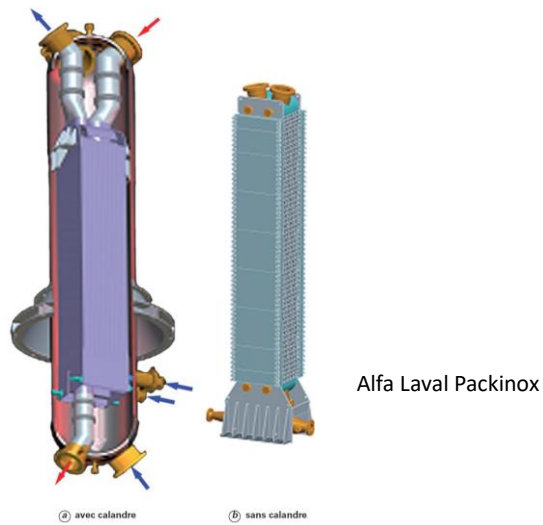


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

35

Echangeur « Packinox »

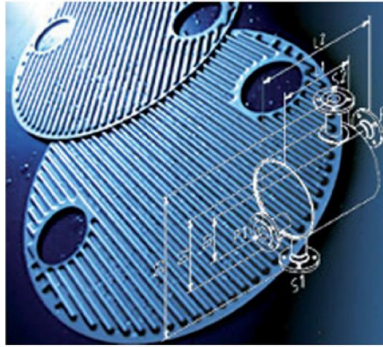


N. Rimbert

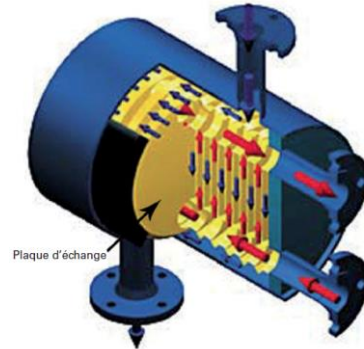
Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

36

Echangeurs à plaque et calandre



(a) plaques d'échange circulaires



Vahterus

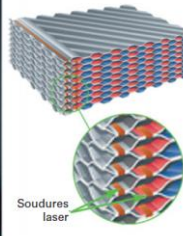
(b) vue éclatée de l'échangeur

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

37

Echangeurs à plaques tout soudés



Schmidt & Alfa Laval

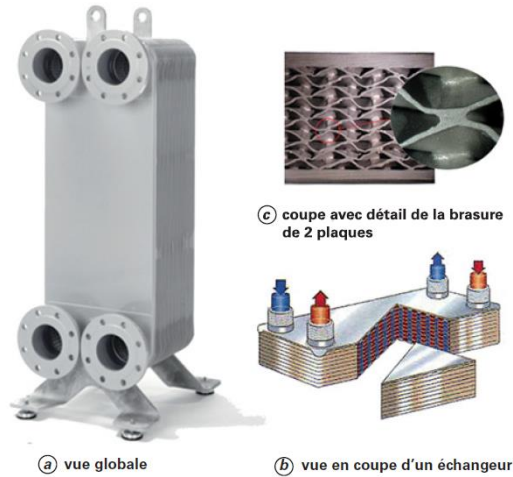


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

38

Echangeurs à plaques brasées

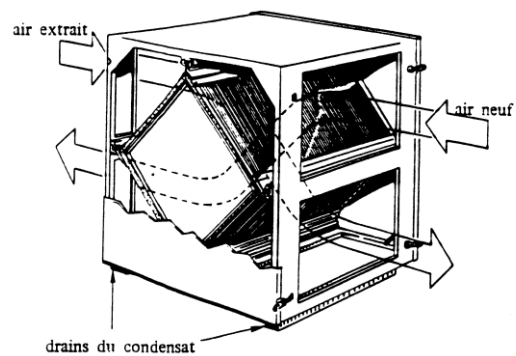


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

39

Echangeur air-air



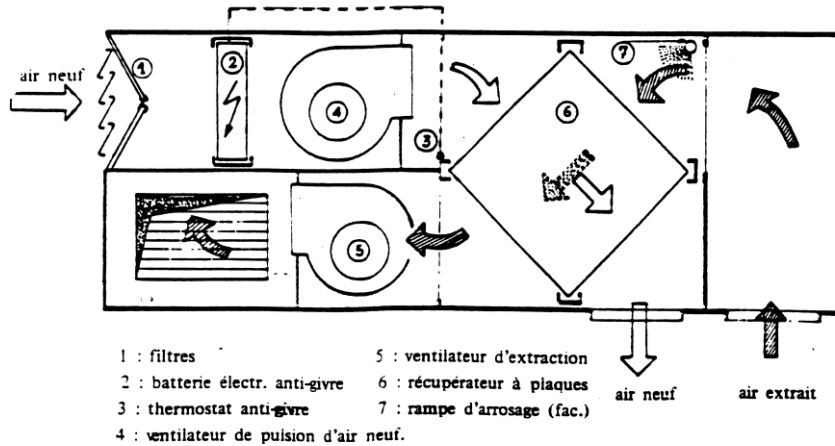
ECHANGEUR A PLAQUES

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

40

VMC double flux

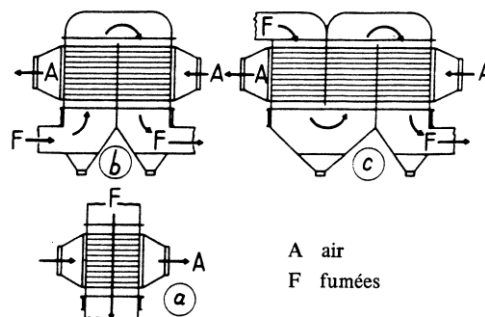


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

41

Réchauffeurs d'air à tubes d'acier horizontaux



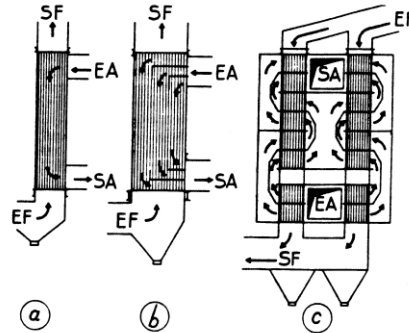
a: simple passage b: double passage
c: triple passage

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

42

Réchauffeurs d'air à tubes d'acier verticaux



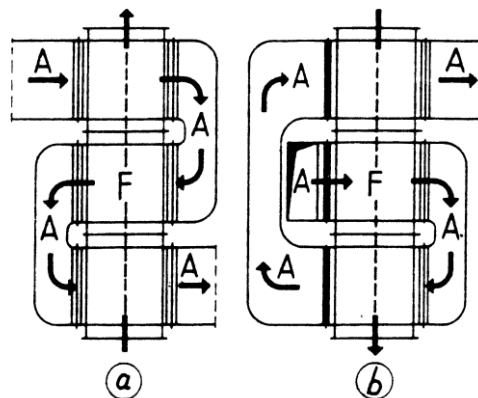
- a: réchauffeur peu important sans chicanes de guidage d'air
 b: réchauffeur d'importance moyenne avec chicanes
 c: réchauffeur très important à passages multiples

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

43

Groupement de blocs réchauffeurs d'air à plaques



parcours méthodique

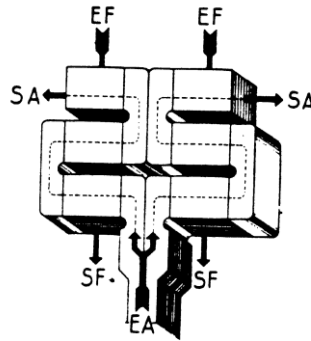
parcours semi-méthodique

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

44

Réchauffeurs d'air à six blocs



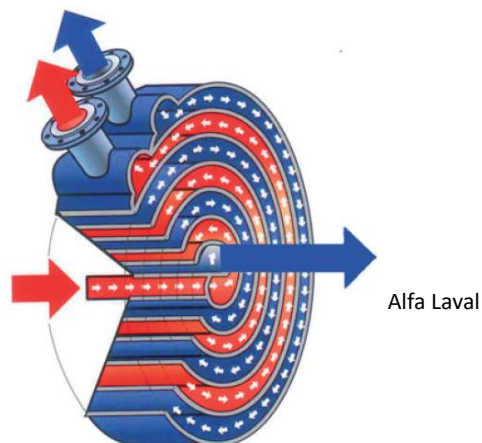
EA, SA entrée et sortie d'air
EF, SF entrée et sortie des fumées

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

45

Echangeurs à spirales

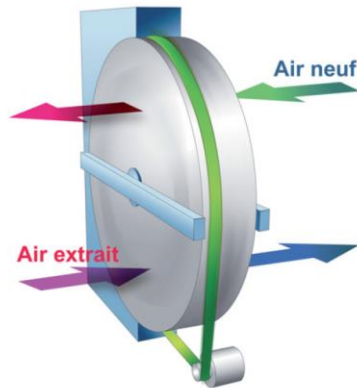


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

46

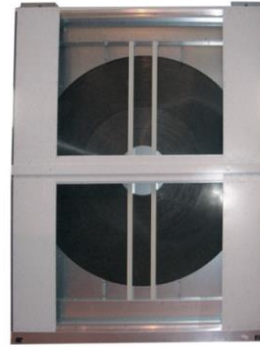
Echangeurs rotatifs (1)



CIAT

a) principe

N. Rimbert

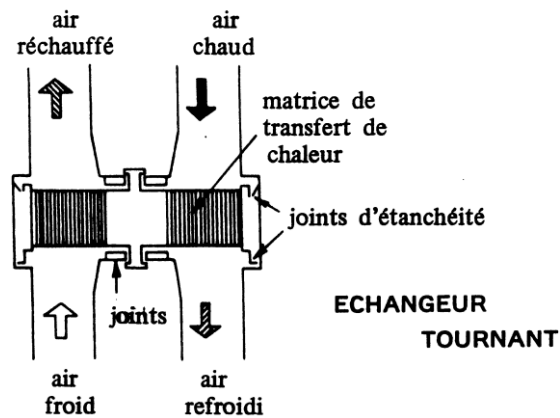


b) photo

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

47

Echangeurs rotatifs (2)

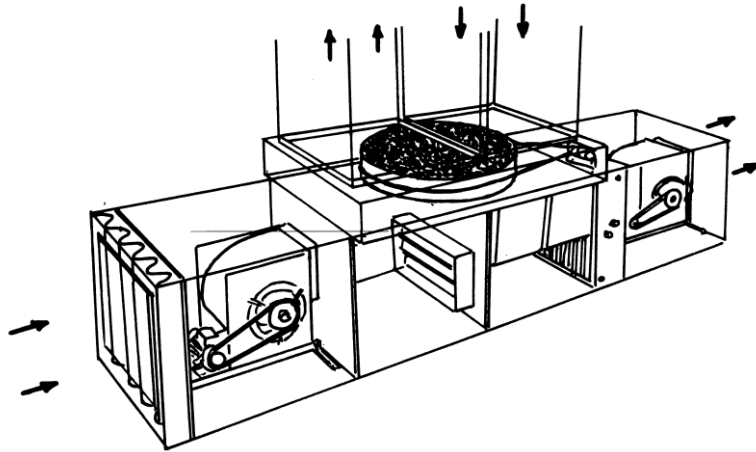
ECHANGEUR
TOURNANT

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

48

Echangeurs rotatifs (3)

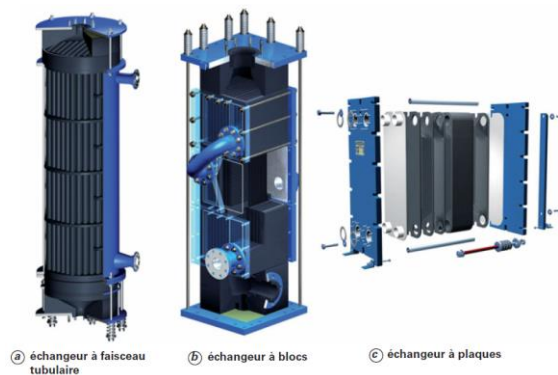


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

49

Echangeurs en carbone

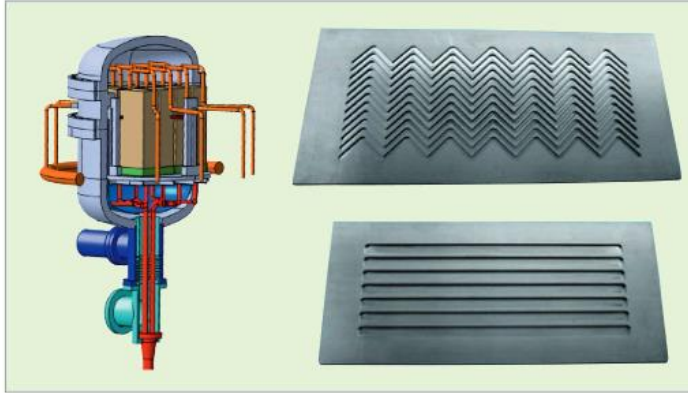


N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

50

Échangeur Na/gaz compact en modules



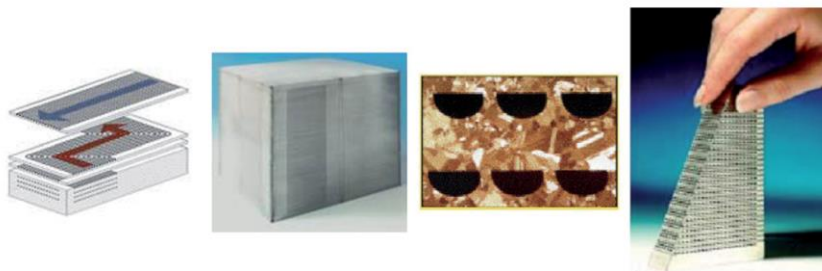
Photos de plaque test des motifs d'échanges à assembler par soudage/diffusion (zigzag = gaz ; droit = sodium) Crédit: CEA

N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

51

Echangeurs à micro-canaux



Heatric

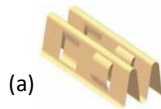
N. Rimbert

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

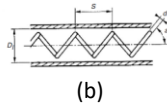
52

Intensification des échanges

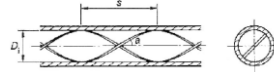
- Pour l'instant
 - Augmentation de la surface de transfert
 - Ailettes
 - Diminution de la taille des canaux
 - Micro/nano structuration de la paroi
- Augmentation du h
 - Augmentation de Re
 - Turbulence
 - Promoteurs de turbulence
 - Ailettes à persiennes (a)
 - Ressorts (b)
 - Rubans torsadés (c)



(a)
 h hauteur de l'ailette
 h_p hauteur de persienne
 l_p longueur de persienne
 p_p pas entre persiennes



(b)



(c)

Cf. TI 9518

N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

53

Conclusion

- Nombreuses technologie
- Des standards mais pas que...
 - innovation
- Difficulté de dimensionnement
 - Prochain cours...
 - Corrélation
 - Configuration de référence
 - Nombreuses approximations
 - Pb de la distribution du fluide dans l'échangeur
 - CFD
- Tenue de service
 - Dilatation
 - Encrassement

N. Rimbart

Echangeurs & Récupération de la chaleur fatale

54