

Pierre Rapin
Patrick Jacquard
Serge Sandre

FORMULAIRE DU FROID

16^e édition

-  Technologie des matériels frigorifiques
-  Automatismes et régulation
-  Applications sectorielles
-  Maintenance et sécurité

DUNOD

Direction et conception graphiques de la couverture :
Nicolas Wiel et Elizabeth Riba (Graphiste)

© Dunod, 1998, 2003, 2006, 2010, 2014, 2025

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff.

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-088732-3

AVANT-PROPOS

à la 16^e édition

*« C'est le rôle essentiel du professeur d'éveiller
la joie de travailler et de connaître. »*

Albert Einstein

Beaucoup de choses ont changé depuis la dernière publication : nouveaux arrêtés, normes abrogées et/ou remplacées par d'autres, notamment le règlement européen (UE) 2024/573 (dit F-gaz). Ce règlement permet de consolider les textes sur différents articles, comme la formation et la certification des techniciens, la lutte contre le trafic de fluides frigorigènes, l'interdiction de certains fluides frigorigènes avec un GWP élevé et gaz à effet de serre nocifs pour notre planète...

Cette nouvelle édition a donc été enrichie, soit par des paragraphes entièrement refondus, soit en supprimant la mention de certains fluides frigorigènes (désormais interdits d'utilisation en France, en installation neuve et en maintenance), alors que d'autres ont fait leur entrée dans l'ouvrage, comme le R471A et le R507A.

Une nouvelle partie fait aussi son entrée, elle concerne les installations fonctionnant avec du dioxyde de carbone (CO₂ ou R744).

Ce fut une immense joie de travailler de nouveau à la mise à jour et à l'amélioration du *Formulaire du froid*. En reprenant cet ouvrage et en relisant certaines pages, je ne peux m'empêcher d'avoir une pensée pour mon ancien professeur, Pierre Rapin. Des souvenirs me reviennent du temps où j'étais assis sur le « banc des écoliers » et je me rappelle avec émotion les savoirs et savoir-faire qu'il m'a transmis.

Pour finir, je reprendrai ce que j'ai déjà écrit dans l'avant-propos de la 15^e édition :

« J'espère que cette nouvelle édition vous apportera le savoir nécessaire et suffisant afin de pouvoir répondre à vos attentes. Ce legs de notre cher Pierre Rapin, est le souhait qui a toujours animé les auteurs de cet ouvrage depuis sa première édition. »

Mai 2025

Serge SANDRE



TABLE DES MATIÈRES

1 ■ Généralités	1
1.1 Notions de physique.....	1
1.2 Propriétés générales des gaz.....	19
1.3 Caractéristiques de l'air humide.....	19

Partie A : PRODUCTION DU FROID

2 ■ Fluides frigorigènes	46
2.1 Introduction	46
2.2 Généralités	59
2.3 Fluides frigorigènes employés dans les installations frigorifiques	61
2.4 Relation température-pression	90
2.5 Textes réglementaires (non exhaustif).....	94
3 ■ Production du froid	142
3.1 Généralités.....	142
3.2 Réfrigération par évaporation	143
3.3 Machines à compression mécanique.....	144
3.4 Machines à absorption de faible puissance	147
3.5 Machines à absorption de moyenne et forte puissances.....	154
3.6 Réfrigération thermoélectrique	168

Partie B : TECHNOLOGIE DES MATÉRIELS FRIGORIFIQUES

4 ■ Compresseurs et motocompresseurs	176
4.1 Compresseurs alternatifs ouverts	177
4.2 Motocompresseurs hermétiques.....	185
4.3 Motocompresseurs hermétiques accessibles	190

4.4	Motocompresseurs à spirales	194
4.5	Motocompresseurs à vis birotors	196
4.6	Les compresseurs centrifuges	200
4.7	Compresseurs spéciaux	206
4.8	Lubrifiants	207
4.9	Robinets de service	210

5 ■ Condenseurs 214

5.1	Condenseurs à air	214
5.2	Condenseurs ménagers	217
5.3	Condenseurs à eau	217

6 ■ Tours de refroidissement (TAR) 224

6.1	Tours de refroidissement à circuit ouvert	224
6.2	Tours de refroidissement à circuit fermé	227

7 ■ Refroidisseurs secs ou dry-cooler ou aéroréfrigérants 231

8 ■ Condenseurs évaporatifs 235

9 ■ Réglementation et légionella 239

9.1	La rubrique supplémentaire 2921	239
9.2	Les installations du type circuit primaire fermé	241
9.3	Les installations qui ne sont pas du type circuit primaire fermé	243
9.4	Prescriptions	244
9.5	Déclaration des installations	245
9.6	Legionella	247

10 ■ Évaporateurs 252

10.1	Évaporateurs ménagers	252
10.2	Évaporateurs commerciaux	255
10.3	Dégivrage des évaporateurs	265

11 ■ Appareillages annexes du circuit tuyauteries et robinetterie 270

11.1	Séparateurs d'huile	270
11.2	Réservoirs de liquide	272
11.3	Bouteilles d'aspiration	273
11.4	Filtres	274
11.5	Cartouches filtrantes	276
11.6	Voyants de liquide	277

11.7	Clapets de retenue	278
11.8	Échangeur de chaleur liquide-vapeur	279
11.9	Déshydrateurs	280
11.10	Éliminateurs de vibrations	285
11.11	Silencieux de refoulement	286
11.12	Dispositif antipulsatoire	286
11.13	Robinetterie	287
11.14	Dispositif de retour et de contrôle de niveau d'huile dans une installation avec plusieurs compresseurs	289
11.15	Tuyautes	290

Partie C : AUTOMATISME ET RÉGULATION

12 ■ Appareillages principaux d'automatisme 296

12.1	Organes de conduite	296
12.2	Organes d'alimentation	297
12.3	Organes de régulation	314

13 ■ Appareillages secondaires d'automatisme 337

13.1	Vanne à pression constante	338
13.2	Régulateur de démarrage	339
13.3	Régulateur de capacité	340
13.4	Montage des régulateurs	340
13.5	Vanne magnétique	340
13.6	Vannes à eau	343
13.7	Variateurs de vitesse pressostatique	345
13.8	Régulation de la pression de condensation	349

14 ■ La régulation 351

14.1	Introduction	351
14.2	Vocabulaire	353
14.3	Principe de la régulation	356
14.4	Les modes de régulation	357
14.5	Méthode de réglage des régulations proportionnelle, proportionnelle intégrale et proportionnelle intégrale dérivée	368
14.6	Quelques exemples de régulation sur les groupes frigorifiques	369

Partie D : CONSTRUCTIONS ISOTHERMIQUES

BILANS FRIGORIFIQUES

15 ■ Isolants	374
16 ■ Chambres froides	378
16.1 Construction en dur	378
16.2 Construction modulable	379
16.3 Sécurité et réglementation dans les chambres froides.....	381
17 ■ Bilan frigorifique	382

Partie E : APPLICATIONS DU FROID

18 ■ Réfrigération et congélation	394
18.1 Chaîne du froid.....	394
18.2 Réfrigération	394
18.3 Congélation (congélation lente)	395
18.4 Surgélation (congélation rapide)	395
18.5 Conservation des denrées à température positive	401
18.6 Conditions de conservation des denrées	403
18.7 Textes réglementaires	413
19 ■ Refroidissement des liquides	417
19.1 Bière et eau.....	417
19.2 Lait	427
20 ■ Glace hydrique glace carbonique	433
20.1 Glace hydrique	433
20.2 Glace carbonique.....	442
21 ■ Boulangerie-pâtisserie crèmes glacées	443
21.1 Panification	443
21.2 Crèmes glacées.....	449
21.3 Machines à Soft Ice	454

22 ■ Meubles frigorifiques congélateurs domestiques 456

22.1 Meubles frigorifiques ouverts	456
22.2 Conservateurs	460
22.3 Congélateurs domestiques	461

23 ■ Véhicules de transport de denrées périssables 463

23.1 Coefficient de transmission de chaleur	464
23.2 Caractéristiques des véhicules	466
23.3 Accord Transfrigoroute International (1 ^{er} juin 1957)	471
23.4 Constitution des carrosseries	472
23.5 Nature des denrées	474
23.6 Chargement	474
23.7 Réfrigération des engins	475
23.8 Véhicules routiers	480
23.9 Marquage des véhicules	480

24 ■ Réfrigérateurs ménagers 482

24.1 Fabrication	482
24.2 Essais de fonctionnement	485
24.3 Matières plastiques	490

25 ■ Accumulation ou stockage de froid 492

25.1 Généralités	492
25.2 Solutions d'accumulation	494
25.3 Stockage de l'énergie par chaleur sensible	497
25.4 Stockage de l'énergie par chaleur latente	499
25.5 Processus de stockage par chaleur latente	501

Partie F : APPAREILLAGES ÉLECTRIQUES

26 ■ Installations fonctionnant avec du dioxyde de carbone (CO₂ ou R744) 512

27 ■ Moteurs 527

27.1 Types de moteurs	527
27.2 Caractéristiques des moteurs électriques	532
27.3 Installation et utilisation des moteurs	537

28 ■ Alimentation électrique d'un moteur 544

28.1	Sectionneurs à fusibles	544
28.2	Discontacteurs	545
28.3	Relais thermiques	545
28.4	Disjoncteur	546
28.5	Sectionneur-contacteur-disjoncteur intégral.....	546
28.6	Anomalies de fonctionnement des discontacteurs.....	546

29 ■ Conducteurs électriques 548

29.1	Densité de courant	548
29.2	Détermination de la section des conducteurs	548

30 ■ Relais 552

30.1	Généralités	552
30.2	Relais de protection et de démarrage.....	552

Partie G : MISE EN ŒUVRE ET MAINTENANCE

31 ■ Montage 558

31.1	Outillage du monteur.....	558
31.2	Montage sur chantier.....	561
31.3	Réalisation des tuyauteries	563
31.4	Sécurité du chantier.....	567

32 ■ Mise en service 569

32.1	Pose d'un bypass	574
32.2	Vérification de l'étanchéité	577
32.3	Mise sous vide d'une installation	581
32.4	Charge en fluide frigorigène.....	583
32.5	Critères de détermination d'une charge optimale	586
32.6	Relevés types.....	588
32.7	Vérifications après mise en service	609
32.8	Réglage d'un détendeur thermostatique.....	609
32.9	Méthode de réglage des pressostats	610

33 ■ Dépannage 612

33.1	Causes principales de dysfonctionnement	613
33.2	Dépannage des unités hermétiques	619

33.3 Dépannage des armoires ménagères et des équipements à unités hermétiques.....	621
33.4 Vérification d'ordre électrique.....	624
33.5 Changement d'un appareil défectueux.....	625
33.6 Intervention sur le compresseur	627
33.7 Récupération des fluides frigorigènes	627
33.8 Changement de fluide.....	631
33.9 Travail en atelier.....	644

34 ■ Mesure des caractéristiques d'une installation 651

34.1 Rendement volumétrique d'un compresseur.....	651
34.2 Puissance frigorifique.....	652
34.3 Mesure de débits	655

35 ■ Maintenance 658

35.1 Analyse du lubrifiant	658
35.2 Généralités sur la maintenance.....	662
35.3 Contrats de maintenance	664
35.4 Exemple : production d'eau glacée.....	670
35.5 Exemple : circuit frigorifique	673
35.6 Exemple de planning de maintenance des chambres froides.....	674

36 ■ Schémas fluidiques et schémas électriques 683

36.1 Rôle d'un schéma.....	683
36.2 Applications.....	710

37 ■ Évaluation des risques professionnels 720

37.1 Réglementation	720
37.2 Définitions.....	720
37.3 L'évaluation des risques	721
37.4 Le document unique.....	722
37.5 Exemple de présentation d'un document unique	723
37.6 L'organigramme de prévention	724
37.7 L'identification des risques.....	724
37.8 Les symboles de danger des substances dangereuses (SGH).....	728
37.9 Les règles à respecter	730



Partie H : ANNEXES

1 • Lexique anglais/français.....	734
2 • Facteurs de conversion	736
3 • Recherche de pannes sur une installation frigorifique.....	738
Index	741

1 Généralités

1.1 NOTIONS DE PHYSIQUE

■ CHALEUR

La chaleur est une forme de l'énergie. C'est la sensation perçue par nos organes des sens lorsque nous sommes placés devant un foyer en activité ou un corps incandescent par exemple. La vie terrestre est tributaire d'une des principales sources de chaleur : le soleil. La chaleur se manifeste également lors du passage d'un courant électrique dans une résistance, lors de la compression brusque d'un gaz, lors de certaines réactions chimiques, etc.

■ FROID

C'est la sensation que fait éprouver l'absence, la perte ou la diminution de la chaleur. Par comparaison, le froid est à la chaleur ce que l'obscurité est à la lumière. Froid et obscurité sont des termes négatifs. Ils indiquent simplement l'absence ou la diminution, soit de la chaleur, soit de la lumière.

■ TEMPÉRATURE

C'est le « niveau » auquel la chaleur (énergie calorifique) se trouve dans un corps. Elle caractérise l'action plus ou moins énergétique de la chaleur sur nos sens. C'est la température qui nous permet de dire qu'un corps est plus ou moins chaud qu'un autre.

■ ÉCHANGE DE CHALEUR

Lorsque deux corps sont en présence, la chaleur va toujours du corps chaud au corps froid, l'échange de chaleur ne cessant que lorsque les deux corps sont à la même température.

EXEMPLE

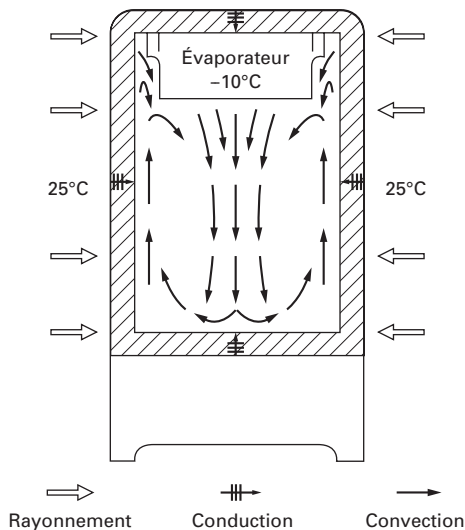
Corps froid : l'évaporateur d'un système frigorifique.

Corps chaud : les denrées entreposées dans le réfrigérateur.

Les denrées (corps chaud) cèdent une partie de leur chaleur à l'évaporateur (corps froid), leur chaleur ayant diminué, leur température s'abaisse.

■ TRANSMISSION DE LA CHALEUR

La chaleur peut se transmettre d'un corps à un autre par trois modes de transmission différents (fig. 1.1).



*Fig. 1.1 Transmission de la chaleur à travers les parois d'un réfrigérateur.
Association des trois modes de transmission.*

1. **Par conduction.** La transmission de chaleur par conduction a lieu dans un seul et même corps lorsque ses parties présentent des températures différentes, ou d'un corps à un autre si ses deux corps ayant des températures différentes sont en contact.

EXEMPLES

Chauffage d'une tige métallique, à partir d'un foyer ou chauffage d'un récipient posé sur la sole d'un réchaud électrique.

Il y a des corps bons conducteurs de la chaleur, par exemple : le cuivre, l'argent, l'aluminium, etc., et des corps mauvais conducteurs (ou calorifuges) tels que le bois, le liège, les polystyrènes, le carton, etc.

2. **Par rayonnement** (fig. 1.2). Les rayons calorifiques se propagent en ligne droite dans l'espace, et émis par un corps à température élevée ils sont absorbés partiellement

par les corps plus froids qui forment écran à leur propagation, la partie non absorbée est réfléchiée d'une façon identique à la réflexion des rayons lumineux par un miroir.

EXEMPLE

Le rayonnement solaire.

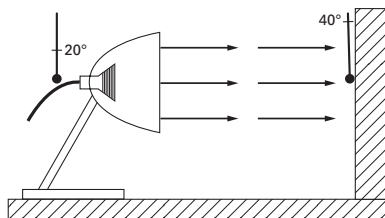


Fig. 1.2 Mise en évidence de la transmission de chaleur par rayonnement.

3. Par convection. Ce mode de transmission est propre aux liquides et aux gaz. Le médium (liquide ou gaz) entre en mouvement par différence de densité, les parties chaudes étant plus légères et véhiculant la chaleur.

EXEMPLE

Un radiateur chauffe une pièce par convection, l'air servant de véhicule à la chaleur. Un évaporateur refroidit une chambre froide de façon similaire.

■ REPÉRAGE DE LA TEMPÉRATURE

La température caractérise le niveau auquel se situe la chaleur dans un corps. Pour repérer la température, on a choisi la dilatation du mercure, de l'alcool ou du toluène, corps servant à la fabrication des thermomètres.

On utilise également les variations de tensions de vapeur de certains fluides ainsi que les phénomènes thermo-électriques. Pour la graduation des thermomètres deux repères ont été choisis. Ils correspondent à deux températures constantes auxquelles se produisent deux phénomènes physiques :

- la fusion de la glace d'eau distillée,
- l'ébullition de l'eau distillée,

les deux phénomènes devant avoir lieu sous la pression atmosphérique normale. Ces deux phénomènes sont appelés **points fixes de l'échelle thermométrique**.

Deux échelles thermométriques sont utilisées :

Échelle Celsius. Le point $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ est défini par la température de la glace fondante et le point $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ par la température de la vapeur d'eau bouillante, sous la pression atmosphérique normale.

Échelle Fahrenheit. Le zéro de l'échelle ayant été fixé arbitrairement par Fahrenheit il s'ensuit que le point $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ devient le point $32\text{ }^{\circ}\text{F}$ et l'intervalle $0\text{--}100$ ayant été divisé en 180 parties égales le point $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pour valeur $212\text{ }^{\circ}\text{F}$.

L'échelle Fahrenheit est encore utilisée dans les pays anglo-saxons toutefois l'échelle Celsius est en usage en Grande-Bretagne pour l'énoncé des températures officielles (données météorologiques). L'échelle Celsius est d'un usage général dans les pays ayant adopté le système SI.

La conversion des températures de l'échelle Celsius dans l'échelle Fahrenheit et réciproquement se fait à l'aide des formules ci-dessous :

$$\theta\text{ }^{\circ}\text{F} = 1,8 \times \theta\text{ }^{\circ}\text{C} + 32$$

$$\theta\text{ }^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(\theta\text{ }^{\circ}\text{F} - 32)$$

ou bien à l'aide d'un tableau de conversion (voir tableau 1.1).

D'autres thermomètres que le thermomètre à mercure (inutilisable aux très basses températures : le mercure se solidifiant à $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$) sont utilisés en réfrigération. Citons, parmi ces appareils :

Le thermomètre à alcool, qui permet de repérer les températures jusqu'à $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Le thermomètre à bulbe thermostatique, dans lequel on enregistre les variations de pressions inhérentes aux variations de températures d'un fluide à l'aide d'un « tube de Bourdon » ou d'une lame d'acier les variations étant repérées sur un cadran gradué en températures.

Le thermomètre à couple thermo-électrique, qui se prête remarquablement au repérage des températures à distance.

Le thermocouple formé de deux conducteurs de nature différente – Cuivre et Constantan par exemple – indique la différence de potentiel provoquée par la différence de température entre les deux extrémités de ces conducteurs préalablement réunies par soudure et dont l'une est maintenue à température constante (glace fondante).

Cette différence de potentiel peut être lue sur un millivoltmètre étalonné et gradué en degrés (fig. 1.3).

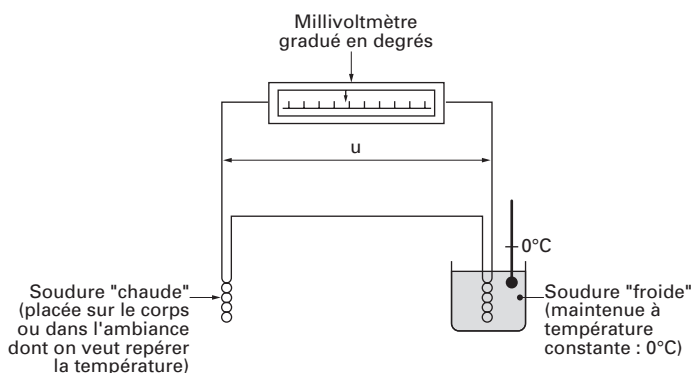


Fig. 1.3 Utilisation d'un thermocouple.

ZÉRO ABSOLU ET ÉCHELLE THERMODYNAMIQUE

La chaleur est présente dans tout corps dont la température est au-dessus de $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tableau 1.1 Table de conversion de température $[^{\circ}\text{C}] - [^{\circ}\text{F}]$.

°C	↓	°F	°C	↓	°F	°C	↓	°F	°C	↓	°F
-273	-459		-39,4	-39	-38,2	-10,0	14	57,2	19,4	67	152,6
-268	-450		-38,9	-38	-36,4	- 9,4	15	9,0	20,0	68	154,4
-262	-440		-38,3	-37	-34,6	- 8,9	16	60,8	20,6	69	156,2
-257	-430		-37,8	-36	-32,8	- 8,3	17	62,6	21,1	70	158,0
-251	-420		-37,2	-35	-31,0	- 7,8	18	64,4	21,7	71	159,8
-246	-410		-36,7	-34	-29,2	- 7,2	19	66,2	22,2	72	161,6
-240	-400		-36,1	-33	-27,4	- 6,7	20	68,0	22,8	73	163,4
-234	-390		-35,6	-32	-25,6	- 6,1	21	69,8	23,3	74	165,2
-229	-380		-35,0	-31	-23,8	- 5,6	22	71,6	23,9	75	167,0
-223	-370		-34,4	-30	-22,0	- 5,0	23	73,4	24,4	76	168,8
-218	-360		-33,9	-29	-20,2	- 4,4	24	75,2	25,0	77	170,6
-212	-350		-33,3	-28	-18,4	- 3,9	25	77,0	25,6	78	172,4
-207	-340		-32,8	-27	-16,6	- 3,3	26	78,8	26,1	79	174,2
-201	-330		-32,2	-26	-14,8	- 2,8	27	80,6	26,7	80	176,0
-196	-320		-31,7	-25	-13,0	- 2,2	28	82,4	27,2	81	177,8
-190	-310		-31,1	-24	-11,2	- 1,7	29	84,2	27,8	82	179,6
-184	-300		-30,6	-23	- 9,4	- 1,1	30	86,0	28,3	83	181,4
-179	-290		-30,0	-22	- 7,6	- 0,6	31	87,8	28,9	84	183,2
-173	-280		-29,4	-21	- 5,8	0	32	89,6	29,4	85	185,0
-169	-273	-459,4	-28,9	-20	- 4,0	0,6	33	91,4	30,0	86	186,8
-168	-270	-454	-28,3	-19	- 2,2	1,1	34	93,2	30,6	87	188,6
-162	-260	-436	-27,8	-18	- 0,4	1,7	35	95,0	31,1	88	190,4
-157	-250	-418	-27,2	-17	1,4	2,2	36	96,8	31,7	89	192,2
-151	-240	-400	-26,7	-16	3,2	2,8	37	98,6	32,2	90	194,0
-146	-230	-382	-26,1	-15	5,0	3,3	38	100,4	32,8	91	195,8
-140	-220	-364	-25,6	-14	6,8	3,9	39	102,2	33,3	92	197,6
-134	-210	-346	-25,0	-13	8,6	4,4	40	104,0	33,9	93	199,4
-129	-200	-328	-24,4	-12	10,4	5,0	41	105,8	34,4	94	201,2
-123	-190	-310	-23,9	-11	12,2	5,6	42	107,6	35,0	95	203,0
-118	-180	-292	-23,3	-10	14,0	6,1	43	109,4	35,6	96	204,8
-112	-170	-274	-22,8	- 9	15,8	6,7	44	111,2	36,1	97	206,6
-107	-160	-256	-22,2	- 8	17,6	7,2	45	113,0	36,7	98	208,4
-101	-150	-238	-21,7	- 7	19,4	7,8	46	114,8	37,2	99	210,2
-95,6	-140	-220	-21,1	- 6	21,2	8,3	47	116,6	37,8	100	212,0
-90,0	-130	-202	-20,6	- 5	23,0	8,9	48	118,4	38,3	101	213,8
-84,4	-120	-184	-20,0	- 4	24,8	9,4	49	120,2	38,9	102	215,6
-78,9	-110	-166	-19,4	- 3	26,6	10,0	50	122,0	39,4	103	217,4
-73,3	-100	-148	-18,9	- 2	28,4	10,6	51	123,8	40,0	104	219,2
-67,8	-90	-130	-18,3	- 1	30,2	11,1	52	125,6	40,6	105	221,0
-62,2	-80	-112	-17,8	0	32,0	11,7	53	127,4	41,1	106	222,8
-56,7	-70	- 94	-17,2	1	33,8	12,2	54	129,2	41,7	107	224,6
-51,1	-60	- 76	-16,7	2	35,6	12,8	55	131,0	42,2	108	226,4
-45,6	-50	-58,0	-16,1	3	37,4	13,3	56	132,8	42,8	109	228,2
-45,0	-49	-56,2	-15,6	4	39,2	13,9	57	134,6	43,3	110	230,0
-44,4	-48	-54,4	-15,0	5	41,0	14,4	58	136,4	43,9	111	231,8
-43,9	-47	-52,6	-14,4	6	42,8	15,0	59	138,2	44,4	112	233,6
-43,3	-46	-50,8	-13,9	7	44,6	15,6	60	140,0	45,0	113	235,4
-42,8	-45	-49,0	-13,3	8	46,4	16,1	61	141,8	45,6	114	237,2
-42,2	-44	-47,2	-12,8	9	48,2	16,7	62	143,6	46,1	115	239,0
-41,7	-43	-45,4	-12,2	10	50,0	17,2	63	145,4	46,7	116	240,8
-41,1	-42	-43,6	-11,7	11	51,8	17,8	64	147,2	47,2	117	242,6
-40,6	-41	-41,8	-11,1	12	53,6	18,3	65	149,0	47,8	118	244,4
-40,0	-40	-40,0	-10,6	13	55,4	18,9	66	150,8	48,3	119	246,2

Chercher dans la colonne repérée par une flèche la température en $^{\circ}\text{C}$ ou $^{\circ}\text{F}$ à convertir. Relever alors dans la colonne de gauche la conversion en degrés Celsius, et dans la colonne de droite la conversion en degrés Fahrenheit.

°C	↓	°F	°C	↓	°F	°C	↓	°F	°C	↓	°F
48,9	120	248,0	78,3	173	343,4	107,8	226	438,8	282	540	
49,4	121	249,8	78,9	174	345,2	108,3	227	440,6	288	550	
50,0	122	251,6	79,4	175	347,0	108,9	228	442,4	293	560	
50,6	123	253,4	80,0	176	348,8	109,4	229	444,2	299	570	
51,1	124	255,2	80,6	177	350,6	110,0	230	446,0	304	580	
51,7	125	257,0	81,1	178	352,4	110,6	231	447,8	310	590	
52,2	126	258,8	81,7	179	354,2	111,1	232	449,6	316	600	
52,8	127	260,6	82,2	180	356,0	111,7	233	451,4	321	610	
53,3	128	262,4	82,8	181	357,8	112,2	234	453,2	327	620	
53,9	129	264,2	83,3	182	359,6	112,8	235	455,0	332	630	
54,4	130	266,0	83,9	183	361,4	113,3	236	456,8	338	640	
55,0	131	267,8	84,4	184	363,2	113,9	237	458,6	343	650	
55,6	132	269,6	85,0	185	365,0	114,4	238	460,4	349	660	
56,1	133	271,4	85,6	186	366,8	115,0	239	462,2	354	670	
56,7	134	273,2	86,1	187	368,6	115,6	240	464,0	360	680	
57,2	135	275,0	86,7	188	370,4	116,1	241	465,8	366	690	
57,8	136	276,8	87,2	189	372,2	116,7	242	467,6	371	700	
58,3	137	278,6	87,8	190	374,0	117,2	243	469,4	377	710	
58,9	138	280,4	88,3	191	375,8	117,8	244	471,2	382	720	
59,4	139	282,2	88,9	192	377,6	118,3	245	473,0	388	730	
60,0	140	284,0	89,4	193	379,4	118,9	246	474,8	393	740	
60,6	141	285,8	90,0	194	381,2	119,4	247	476,6	399	750	
61,1	142	287,6	90,6	195	383,0	120,0	248	478,4	404	760	
61,7	143	289,4	91,1	196	384,8	120,6	249	480,2	410	770	
62,2	144	291,2	91,7	197	386,6	121	250	482	416	780	
62,8	145	293,0	92,2	198	388,4	127	260	500	421	790	
63,3	146	294,8	92,8	199	390,2	132	270	518	427	800	
63,9	147	296,6	93,3	200	392,0	138	280	536	432	810	
64,4	148	298,4	93,9	201	393,8	143	290	554	438	820	
65,0	149	300,2	94,4	202	395,6	149	300	572	443	830	
65,6	150	302,0	95,0	203	397,4	154	310	590	449	840	
66,1	151	303,8	95,6	204	399,2	160	320	608	454	850	
66,7	152	305,6	96,1	205	401,0	166	330	626	460	860	
67,2	153	307,4	96,7	206	402,8	171	340	644	466	870	
67,8	154	309,2	97,2	207	404,6	177	350	662	471	880	
68,3	155	311,0	97,8	208	406,4	182	360	680	477	890	
68,9	156	312,8	98,3	209	408,2	188	370	698	482	900	
69,4	157	314,6	98,9	210	410,0	193	380	716			
70,0	158	316,4	99,4	211	411,8	199	390	734			
70,6	159	318,2	100,0	212	413,6	204	400	752			
71,1	160	320,0	100,6	213	415,4	210	410	770			
71,7	161	321,8	101,1	214	417,2	216	420	788			
72,2	162	323,6	101,7	215	419,0	221	430	806			
72,8	163	325,4	102,2	216	420,8	227	440	824			
73,3	164	327,2	102,8	217	422,6	232	450	842			
73,9	165	329,0	103,3	218	424,4	238	460	860			
74,4	166	330,8	103,9	219	426,2	243	470	878			
75,0	167	332,6	104,4	220	428,0	249	480	896			
75,6	168	334,4	105,0	221	429,8	254	490	914			
76,1	169	336,2	105,6	222	431,6	260	500				
76,7	170	338,0	106,1	223	433,4	268	510				
77,2	171	339,8	106,7	224	435,2	271	520				
77,8	172	341,6	107,2	225	437,0	277	530				

°C	écart de température ↓	°F
0,56	1	1,8
1,11	2	3,6
1,67	3	5,4
2,22	4	7,2
2,78	5	9,0
3,33	6	10,8
3,89	7	12,6
4,44	8	14,4
5,00	9	16,2

On a déterminé que $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ est la température la plus basse pouvant être obtenue ; c'est le point où toute chaleur est absente d'un corps.

Cette température est appelée **zéro absolu**.

Les températures évaluées à partir de ce nouveau point zéro sont appelées **températures absolues** ou **températures thermodynamiques** et l'échelle thermométrique nouvelle ainsi définie a reçu le nom d'**échelle Kelvin** ou échelle thermodynamique. Les températures s'expriment dans cette échelle en **Kelvin (K)**. Le Kelvin a même valeur que le degré Celsius et le passage d'une échelle à l'autre se fait en écrivant :

$$T \text{ K} = \theta \text{ }^{\circ}\text{C} + 273$$

EXEMPLE

Quelles sont les températures absolues correspondant aux températures Celsius de $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Nous devons avoir :

$$\begin{aligned} T &= 25 + 273 = 298 \text{ K} \\ \text{et } T &= (-10) + 273 = 263 \text{ K} \end{aligned}$$

■ CHALEUR SENSIBLE ET CHALEUR LATENTE

Un corps (ou une substance) peut recevoir ou fournir de la chaleur sous deux formes différentes (fig. 1.4).

1. Sous forme sensible : l'absorption de chaleur sous cette forme se manifeste par une élévation de température du corps récepteur ; si le corps a, au contraire, fourni de la chaleur sa température s'abaisse.

Absorption ou fourniture de chaleur ne provoquent pas de modification d'état physique du corps, et la variation de température est fonction de la quantité de chaleur échangée et d'une caractéristique physique propre à chaque corps : sa chaleur massique.

2. Sous forme latente : l'absorption de chaleur par un corps sous cette forme – ou la fourniture de chaleur par ce corps – se caractérise par une constance de la température du corps et par son changement d'état physique.

■ CHALEUR MASSIQUE D'UN CORPS

C'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 kilogramme de ce corps pour élever sa température de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, sans modifier son état physique. Par définition, la chaleur massique de l'eau est, à pression normale (1 013 mbar), de 4 185 joules par kilogramme et par degré Celsius à $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4,185 kJ/kg . K).

■ CHALEUR LATENTE DE SOLIDIFICATION

C'est la quantité de chaleur qu'il faut enlever à 1 kilogramme d'un corps pour le faire passer de l'état liquide à l'état solide **sans abaisser sa température**.

■ CHALEUR LATENTE DE FUSION

C'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 kilogramme d'un corps pour le faire passer de l'état solide à l'état liquide, **sans élever sa température**.

■ CHALEUR LATENTE DE VAPORISATION

C'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 kilogramme d'un corps pour le faire passer de l'état liquide à l'état gazeux, **sans élever sa température**. Elle varie suivant la nature et la température du liquide.

■ CHALEUR LATENTE DE LIQUÉFACTION

C'est la quantité de chaleur qu'il faut enlever à 1 kilogramme d'un corps pour le faire passer de l'état gazeux à l'état liquide **sans abaisser sa température**.

■ MESURE DES QUANTITÉS DE CHALEUR

Unités de quantités de chaleur. Le système légal de mesures en France en vigueur depuis le 1^{er} janvier 1962 (système SI) admet comme unité de chaleur le Joule (J). L'utilisation des anciennes unités calorifiques : calorie, kilocalorie, frigorie est interdite dans les documents légaux depuis le 31 décembre 1977. Nous donnons toutefois ci-dessous leur équivalence en kilojoules (kJ) :

1 kilocalorie (1 kcal)	= 4,1855 kJ
1 calorie (1 cal)	= 4,1855 x 10 ⁻³ kJ
1 frigorie (1 fg)	= - 4,1855 kJ

Dans les pays utilisant le système anglo-saxon de mesures, l'unité de quantité de chaleur est différente et dépend des unités de base de ce système. C'est la BTU (*British Thermal Unit*).

B.T.U. C'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 livre d'eau (1 lb = 0,453 kg) pour élever sa température de 1 °F.

Donc, 1 BTU = 4,185 × 0,453 × 100/180 = 1,053 kJ, le rapport 100/180 étant celui des échelles Celsius et Fahrenheit entre les points fixes des deux échelles thermométriques.

La quantité de chaleur à fournir ou à soustraire à un corps est proportionnelle :

- à la masse du corps,
- à la variation de température qu'il a subie,
- à sa chaleur massique.

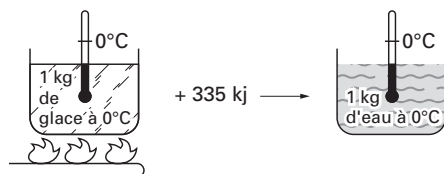
D'où la formule générale donnant la quantité de chaleur échangée :

$$Q = C \times m \times \Delta\theta$$

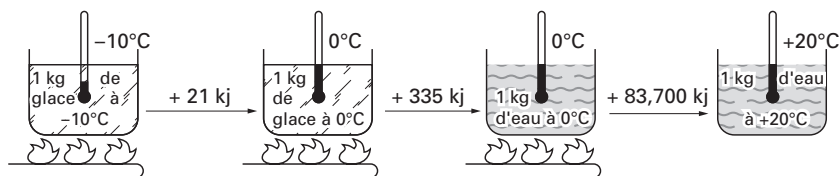
EXEMPLE

Quelle quantité de chaleur faut-il soustraire à 1 500 kg de viande de chaleur massique $C = 2,93 \text{ kJ/kg.K}$ pour abaisser sa température de 30 à + 2 °C ?

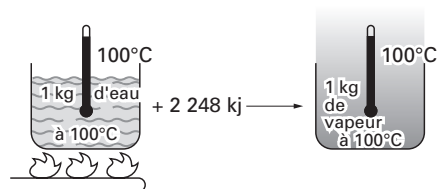
$$\begin{aligned}\text{Il faut : } Q &= C \times m \times \Delta\theta \\ &= 2,93 \times 1\,500 \times [30 - 2] = 123\,060 \\ Q &= 123\,060 \text{ kJ}\end{aligned}$$



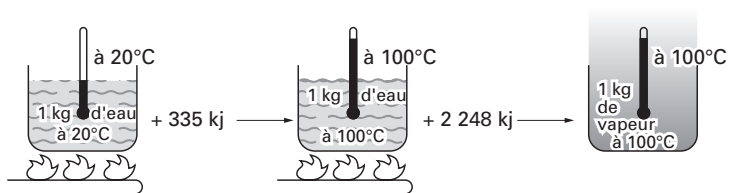
Chaleur latente absorbée au cours de la fusion de la glace



Comparaison de la chaleur latente et de la chaleur sensible



Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 100°C



Chaleur sensible et chaleur latente de vaporisation de l'eau

Fig. 1.4 Chaleur latente et chaleur sensible.

Tableau 1.2 Tableau de conversion des unités d'énergie.

	joule J	kilo- calorie kcal	kilowatt- heure kWh	cheval- heure ch h	Foot pound ft . lb	BTU
J	1	0,000 239	$27,77 \times 10^{-8}$	$37,75 \times 10^{-8}$	0,737	0,000 947
kcal	4 185	1	0,001 161	0,001 578	3 081,25	3,959
kWh	$3\,600 \times 10^{-3}$	860 ⁽¹⁾	1	1,359 2	$2,655 \times 10^6$	3 142,8
ch h	2 648 700	633,69	0,736	1	1 952 855	2 509
ft . lb	1 356,7	0,000325	$3\,768 \times 10^{-7}$	$5,121 \times 10^7$	1	$1,285 \times 10^{-3}$
BTU	1 053	0,252	$0,293 \times 10^{-3}$	$0,398 \times 10^{-3}$	776,44	1

1. Kilowatt-heure international.

Tableau 1.3 Tableau de conversion des unités de puissance.

	watt W	kilowatt kW	cheval-vapeur ch	Horse Power HP
watt	1	0,001	0,001 36	0,001 34
kilowatt	1 000	1	1,359	1,341
cheval-vapeur	736	0,736	1	0,986
Horse Power	746	0,746	0,760	1

■ CORPS PURS ET MÉLANGES

■ Corps purs

Un corps pur est un élément chimique constitué d'atomes formant une molécule (R32, R134a, R1234yf...).

■ Mélanges

Il existe deux catégories de mélanges : les mélanges azéotropes et les mélanges zéotropes.

Un mélange azéotrope est un mélange de corps purs, dans des proportions bien définies, qui se comporte comme un nouveau fluide pur.

Dans la zone de changement d'état, pour une pression constante, la température reste constante d'un bout à l'autre de la courbe de saturation.

EXEMPLES DE MÉLANGES AZÉOTROPES : R508B, R507A.

Un mélange zéotrope est un mélange de corps purs. Les propriétés du mélange dépendent des constituants du mélange et de leurs proportions respectives.

Actuellement, les mélanges zéotropes sont constitués de 2 ou 3 corps purs.

Dans la zone de changement d'état et à pression constante, on constate une variation de température.

EXEMPLES DE MÉLANGES ZÉOTROPES : R404A, R407C, R409A, R410A, R427A.

Le R404A est constitué de 52 % de R143a, 44 % de R125 et 4 % de R134a.

Le R407C est constitué de 23 % de R32, 25 % de R125 et 52 % de R134a.

Le R450A est constitué de 50 % de R1234ze et de 50 % de R134a.

Le R410A est constitué de 50 % de R22 et 50 % de R125.

Le R427A est constitué de 50 % de R134a, 25 % de R125, 15 % de R32 et 10 % de R143a.

■ CHANGEMENTS D'ÉTAT PHYSIQUE

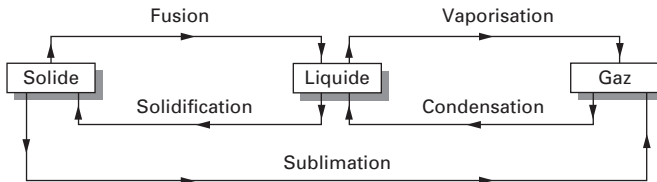


Fig. 1.5 Changements d'état physique.

■ Fusion et solidification

La fusion est le passage d'un corps de l'état solide à l'état liquide sous l'action de la chaleur.

La solidification est la transformation inverse, par refroidissement.

Lois de la fusion et de la solidification

1. Sous une même pression la température de fusion et la température de solidification d'un corps sont identiques.

$$\theta_f = \theta_s$$

C'est une caractéristique physique du corps.

2. Sous une même pression, cette température reste constante tout le temps du changement d'état.

REMARQUE

Pendant le changement d'état, il y a variation de volume.

■ Vaporisation

C'est le passage d'un corps de l'état liquide à l'état gazeux. Elle peut se faire par évaporation ou par ébullition.

■ Évaporation

C'est la formation de vapeur à la surface libre d'un liquide. Elle est d'autant plus rapide :

- que la température est élevée ;

- que la surface libre du liquide est grande ;
- que l'atmosphère est sèche et renouvelée ;
- que la pression est basse ;
- que la tension de la vapeur saturante du liquide est élevée.

■ Ébullition

C'est la vaporisation rapide d'un liquide avec formation de bulles de vapeur au sein de ce liquide.

Lois de l'ébullition pour un corps pur et un mélange azéotrope

1. Sous une même pression, le liquide commence toujours à bouillir à la même température.
2. Pendant toute la durée de l'ébullition, la température d'ébullition reste constante si la pression reste constante.
3. La tension de vapeur saturante de la vapeur émise est égale à la pression supportée par le liquide.

Loi de l'ébullition pour un mélange zéotrope

1. Sous une même pression, un liquide commence toujours à bouillir à la même température.
2. À pression constante, pendant toute la durée de l'ébullition la température d'ébullition augmente.

Cette variation de température d'ébullition est appelée glissement de température ou glide. La température de début d'ébullition est appelée *température de saturation liquide* ou *température de bulle* ou *bubble temperature*.

La température de fin d'ébullition est appelée *température de saturation vapeur* ou *température de rosée* ou *dew temperature*.

Point normal d'ébullition

C'est la température d'ébullition sous la pression atmosphérique normale.

EXEMPLES

Eau : 100 °C. R32 : -51,65 °C. R600 butane : -0,5 °C. R744 (CO₂) : -78,5 °C.

Si l'on veut abaisser la température d'ébullition, il faut abaisser la pression supportée par le liquide en ébullition. Inversement, si l'on veut élever la température d'ébullition, il faut augmenter cette pression.

■ Condensation

C'est le passage de l'état gazeux à l'état liquide.

On obtient la condensation d'une vapeur par deux moyens.

1. Par compression jusqu'à la pression correspondant à la tension de vapeur saturante du fluide à la température considérée.
2. Par refroidissement jusqu'à la température correspondant à la tension de vapeur saturante du fluide considéré.

Lois de la condensation pour un corps pur et un mélange azéotrope

1. Sous une même pression, la vapeur commence toujours à se condenser à la même température.
2. Pendant toute la durée de la condensation, la température de condensation reste constante si la pression reste constante.
3. La tension de vapeur saturante de la vapeur est égale à la pression supportée par le liquide.

Loi de la condensation pour un mélange zéotrope

1. Sous une même pression, la vapeur commence toujours à se condenser à la même température.
2. À pression constante, pendant toute la durée de la condensation, la température de condensation diminue.

Cette variation de température de condensation est appelée *glissement de température* ou *glide*.

La température de début de condensation est appelée *température de saturation vapeur* ou *température de rosée* ou *dew temperature*.

La température de fin de condensation est appelée *température de saturation liquide* ou *température de bulle* ou *bubble temperature*.

■ **Sublimation**

C'est le passage de l'état solide à l'état gazeux, sans passer par l'état liquide. Cette propriété n'appartient qu'à certains corps. Ce phénomène se produit à pression constante à une température bien déterminée.

EXEMPLES

La neige carbonique, l'iode, le camphre, la glace.

■ **Dissolution**

Si elle se forme avec absorption de chaleur, le mélange est réfrigérant ; mais la dissolution ne s'effectue pas à point fixe.

EXEMPLE

On peut atteindre $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec un mélange de glace et de sel ; donc ici, il n'existe pas de température fixe de dissolution.

■ TEMPÉRATURE CRITIQUE

La liquéfaction avec un palier de changement d'état d'un gaz ou d'une vapeur n'est plus possible au-delà d'une température limite, quelle que soit la pression exercée sur le gaz ou la vapeur : cette température limite a reçu le nom de **température critique**.

Fluide frigorigène	Température critique °C	Fluide frigorigène	Température critique °C
R32	78,4	R452A	75,05
CO ₂ (R744)	31,1	R455	85,6
R600 butane	152	R717 (NH3)	132,4
R404A	72	R407C	86,2
R507A	70,75	R449	82,08
R290	96,7	R410A	72,2
R134a	101	R450	104,47

■ NOTIONS SUR LES PRESSIONS

■ Définition générale de la pression

Etant donné une force F s'appuyant sur la surface A d'un corps on dit que cette force exerce une pression $p = F/A$.

■ Unité de pression

C'est la pression exercée par l'unité de force agissant sur l'unité de surface du système d'unités considéré.

■ Unité légale

Le pascal : c'est la pression exercée par une force de 1 newton agissant uniformément sur une surface de 1 m². L'unité usuelle est le **bar** multiple 10⁵ du pascal.

L'équivalence entre le bar et les anciennes unités que sont : le kilogramme force par centimètre carré (kgf), l'hectopièze (hpz) et l'atmosphère (atm) est indiquée ci-dessous :

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 1,02 \text{ kgf/cm}^2 = 1 \text{ hpz} = 0,086 \text{ atm.}$$

■ Unité anglaise

C'est la livre par pouce carré (psi).

C'est la pression exercée par l'unité de poids : la livre (0,453 kg) sur la surface unité : le pouce carré (1 pouce = 1 inch = 2,54 cm).

$$1 \text{ psi} = \frac{0,453}{(2,54)^2} = 0,070307 \text{ kgf/cm}^2$$
$$1 \text{ psi} = \frac{0,070307}{1,02} = 0,0687 \text{ bar}$$

soit

■ Pression atmosphérique

C'est la pression exercée sur la surface de tous les corps par la couche gazeuse qui constitue l'atmosphère. Cette pression, au niveau de la mer, est égale à celle d'une colonne de mercure de 760 mm de hauteur.

Si, au lieu de mercure, on utilise un autre liquide, la hauteur équilibrant la pression atmosphérique est inversement proportionnelle au poids volumique du liquide utilisé.

Pour l'eau, cette hauteur est 10,33 m.

La pression atmosphérique diminue lorsque l'altitude augmente.

■ Pression relative

Elle est mesurée à partir de la pression atmosphérique.

■ Pression absolue

Elle est mesurée à partir du vide absolu.

Pression absolue = pression relative + pression atmosphérique.

REMARQUE

Dans le cas de mesures de pression sur le chantier, on admet :

pression absolue = pression relative + 1 bar.

La pression relative est donnée par la lecture des manomètres.

■ Vide

Lorsqu'on a des pressions inférieures à la pression atmosphérique, on dit que l'on est dans le domaine du vide.

Le vide relatif est mesuré à partir de la pression atmosphérique ; il varie suivant les systèmes d'unités utilisés de :

0 à 76 cm de Hg de vide absolu ;

0 à 30 pouces de Hg de vide absolu ;

0 à 1,013 bar de vide absolu.

■ Appareils de mesure des pressions et du vide

Pour la mesure de la pression atmosphérique, on se sert de baromètres.

- a) Baromètre à mercure, sur lequel on mesure la hauteur de la colonne barométrique.
- b) Baromètre anéroïde. Appareil inventé par Vidi et perfectionné par Bourdon. Il se compose d'un tube de cuivre formant un cercle presque complet. Ce tube, dans lequel on a fait le vide, est fixé à l'une de ses extrémités ; l'autre est réunie à un petit levier, lequel met en mouvement un secteur denté qui s'engrène avec un pignon portant une aiguille indicatrice. La courbure du tube s'accroît quand la pression atmosphérique augmente. L'aiguille indique la variation sur un cadran.

■ MESURE DES PRESSIONS EN GÉNÉRAL

On utilise des manomètres métalliques basés sur le système Bourdon. Une extrémité du tube en spirale est fermée, l'autre est en communication avec la pression à mesurer. L'extrémité fermée actionne l'aiguille indicatrice de variations par le même procédé du levier et du secteur denté.

En réfrigération, on utilise des manomètres dont le cadran est gradué de -1 à 30 bars pour la mesure des pressions de refoulement et des manomètres dits « basse pression », dont le cadran est gradué de -1 à 10 bars pour la mesure des pressions d'aspiration. La lecture des dépressions se faisant sur l'échelle 0 -1 (c'est-à-dire de zéro au vide relatif).

Mais, en réfrigération commerciale et ménagère, on utilise également des manomètres ayant des cadrans gradués en livres par pouces carrés pour la mesure des pressions de refoulement ; en pouces et livres par pouces carrés pour la mesure des vides et des pressions d'aspiration.

Pratiquement, la transformation de livres par pouce carré en bars est rapidement faite en adoptant l'équivalence :

$$1 \text{ bar} = 14,5 \text{ psi et } 1 \text{ psi} = 0,069 \text{ bar}$$

Les manipulations fréquentes exposent ces appareils à des secousses pouvant nuire à l'exactitude de leurs indications. Les monteurs doivent donc de temps à autre les étalonner en atelier, en comparant leurs indications à celles données par des manomètres étalons.

Pour la mesure des très basses pressions, on se sert des appareils suivants, utilisés surtout en laboratoires :

- a) le manomètre tronqué à mercure, dans lequel on utilise la différence de niveau dans les deux branches d'un tube de verre en forme de U (lecture entre 760 et 0,5 mm de Hg) ;
- b) le manomètre à branche inclinée, analogue au précédent, mais dont la lecture est plus précise (lecture entre 20 mm et 0,1 mm de Hg) ;
- c) la jauge de Mac Leod, dans laquelle on utilise les dénivellations du mercure dans un tube capillaire ;
- d) le micro-manomètre à ionisation qui met en œuvre les variations de la conductibilité électrique des gaz ionisés avec la pression. On peut ainsi mesurer des pressions de l'ordre de $1/1\ 000$ à $1/10\ 000\ 000$ mm de mercure.

■ DENSITÉ

C'est le rapport de la masse volumique d'un corps à celle d'un autre corps pris comme corps de référence. Pour les solides et les liquides, le corps de référence est l'eau. Pour les corps gazeux le corps de référence est l'air.

Tableau 1.4 Correspondance bars et livres par pouce carré.

Bars	Livres par pouce carré (psi)	Bars	Livres par pouce carré (psi)
1	14,493	10	144,928
2	28,986	15	217,391
3	43,478	20	289,855
4	57,971	25	362,319
5	72,464	30	434,783
6	86,957	40	579,710
7	101,449	50	724,638
8	115,942	75	1 086,957
9	130,35	100	1 449,275

Tableau 1.5 Conversions des pouces de vide en millibars.

Pouces de vide	Millibars de vide	Pouces	Millibars
1	33,9	16	541,7
2	67,7	17	575,5
3	101,6	18	609,4
4	135,4	19	643,3
5	169,2	20	677,1
6	203,1	21	711
7	237	22	744,8
8	270,8	23	778,7
9	304,7	24	812,5
10	338,5	25	846,4
11	372,4	26	880,2
12	406,3	27	914,1
13	440,1	28	948
14	474	29	981,8
15	507,8	30	1013

1 1 mbar = 10^2 Pa = 1 hPa (hectopascal)

*Tableau 1.6 Table de conversion des pressions.
Livres par pouce carré en bars et réciproquement.*

Livres par pouce carré	Bars	Livres par pouce carré	Bars	Livres par pouce carré	Bars	Livres par pouce carré	Bars
1	0,0687	44	3,022	87	5,976	129	8,862
2	0,1374	45	3,091	88	6,044	130	8,931
3	0,2061	46	3,160	89	6,114	131	9,000
4	0,2748	47	3,228	90	6,183	132	9,068
5	0,3435	48	3,297	91	6,251	133	9,137
6	0,4122	49	3,366	92	6,320	134	9,205
7	0,4809	50	3,435	93	6,389	135	9,274
8	0,5496	51	3,503	94	6,456	136	9,343
9	0,6183	52	3,572	95	6,526	137	9,411
10	0,6870	53	3,641	96	6,594	138	9,480
11	0,7557	54	3,709	97	6,663	139	9,549
12	0,8244	55	3,778	98	6,732	140	9,618
13	0,8931	56	3,847	99	6,801	141	9,686
14	0,9618	57	3,915	100	6,870	142	9,755
15	1,0305	58	3,984	101	6,938	143	9,824
16	1,1292	59	4,053	102	7,006	144	9,892
17	1,1679	60	4,122	103	7,076	145	9,961
18	1,2366	61	4,190	104	7,144	146	10,030
19	1,3053	62	4,258	105	7,213	147	10,098
20	1,3740	63	4,328	106	7,282	148	10,167
21	1,4427	64	4,396	107	7,351	149	10,236
22	1,5114	65	4,465	108	7,418	150	10,305
23	1,5801	66	4,534	109	7,488	155	10,648
24	1,6488	67	4,602	110	7,557	160	11,292
25	1,7175	68	4,670	111	7,625	165	11,335
26	1,7862	69	4,740	112	7,694	170	11,679
27	1,8549	70	4,809	113	7,763	175	12,022
28	1,9236	71	4,877	114	7,830	180	12,366
29	1,9923	72	4,946	115	7,900	185	12,709
30	2,061	73	5,015	116	7,968	190	13,053
31	2,129	74	5,082	117	8,037	195	13,396
32	2,198	75	5,152	118	8,106	200	13,740
33	2,267	76	5,220	119	8,175	210	14,427
34	2,335	77	5,289	120	8,244	220	15,114
35	2,404	78	5,358	121	8,312	230	15,801
36	2,473	79	5,427	122	8,338	240	16,488
37	2,541	80	5,496	123	8,450	250	17,175
38	2,610	81	5,564	124	8,516	260	17,862
39	2,679	82	5,632	125	8,587	270	18,549
40	2,748	83	5,702	126	8,656	280	19,236
41	2,816	84	5,770	127	8,724	290	19,923
42	2,885	85	5,839	128	8,792	300	20,610
43	2,954	86	5,908				

1.2 PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES GAZ

Les gaz sont élastiques, c'est-à-dire expansibles et compressibles.

Les gaz transmettent intégralement et dans tous les sens les pressions qu'on leur fait subir.

Les gaz sont pesants.

Loi de Mariotte. À température constante le volume occupé par une masse gazeuse est inversement proportionnel à la pression qu'elle supporte.

1.3 CARACTÉRISTIQUES DE L'AIR HUMIDE

■ COMPOSITION DE L'AIR ATMOSPHERIQUE

L'air atmosphérique est constitué :

1. d'un mélange de nombreux gaz parmi lesquels on distingue :

- l'azote $N_2 \approx 78 \%$ en volume du mélange
- l'oxygène $O_2 \approx 21 \%$
- le gaz carbonique $CO_2 \approx 0,03 \%$
- les gaz rares $\approx 0,97 \%$

(ce mélange de gaz a une composition à peu près constante autour de la planète) ;

2. de vapeur d'eau facilement condensable et dont la proportion est largement variable ;

3. d'impuretés.

■ Grandeurs caractéristiques de l'air humide

- | | |
|-----------------------------|------------------------------------|
| ■ La température sèche | $\theta \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| ■ La température humide | $\theta_h \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| ■ La température de rosée | $\theta_r \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| ■ La teneur en vapeur d'eau | $w \text{ kg/kg as}$ |
| ■ L'enthalpie massique | $h \text{ kJ/kg as}$ |
| ■ L'humidité relative | $e \%$ |
| ■ Le volume massique | $v \text{ m}^3/\text{kg as}$ |

■ Diagrammes de l'air humide

Les caractéristiques physiques sont rapportées au kilogramme d'air sec.

Canevas des différentes familles de courbes.

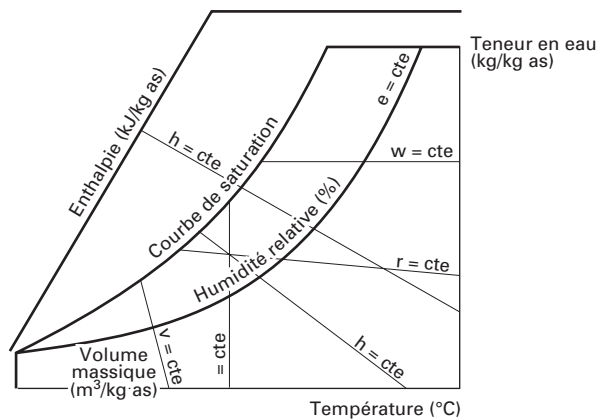


Fig. 1.6 Diagramme de l'air humide.

REMARQUE

Dans certains diagrammes, les courbes d'enthalpie sont confondues avec les courbes de température humide.

■ Détermination des caractéristiques d'un point (méthode à suivre)

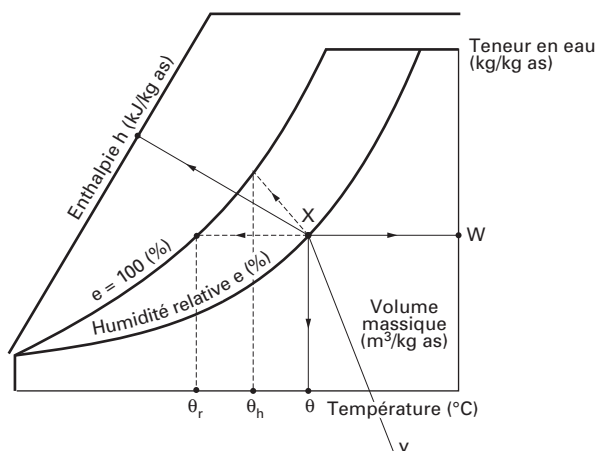


Fig. 1.7 Caractéristiques d'un point.

■ ÉVOLUTIONS DE L'AIR

Le diagramme de l'air humide permet de déterminer les caractéristiques physiques de l'air à chaque étape de traitement de celui-ci. À partir des résultats obtenus, il est possible de calculer les puissances thermiques des batteries, la quantité d'eau condensée dans l'air, etc.

La plupart des diagrammes sont établis pour une pression atmosphérique dite « normale », soit 101 325 Pa, mais il existe des diagrammes pour d'autres valeurs de la pression atmosphérique.

■ Mélange d'air

Il est parfois nécessaire de mélanger de l'air pris à l'extérieur (appelé air neuf) avec de l'air repris dans un local. Pour cela on utilise un caisson de mélange.

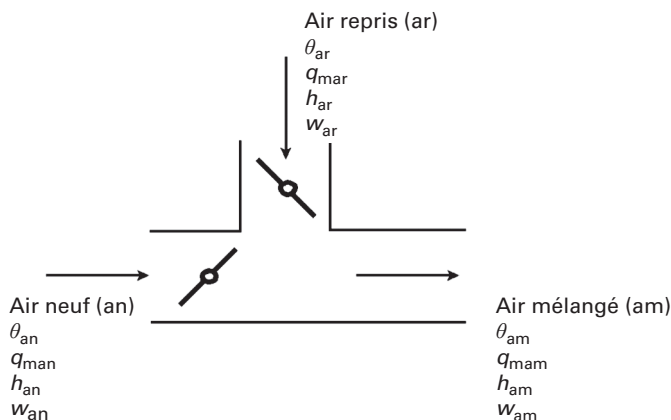


Fig. 1.8 Caisson de mélange.

- θ_{an} : température sèche de l'air neuf (°C) ;
- q_{man} : débit masse d'air neuf (kg/s) ;
- h_{an} : enthalpie massique de l'air neuf (kJ/kg as) ;
- w_{an} : teneur en vapeur d'eau de l'air neuf (kg/kg as) ;
- θ_{ar} : température sèche de l'air repris (°C) ;
- q_{mar} : débit masse de l'air repris (kg/s) ;
- h_{ar} : enthalpie massique de l'air repris (kJ/kg as) ;
- w_{ar} : teneur en vapeur d'eau de l'air repris (kg/kg as) ;
- θ_{am} : température sèche de l'air mélangé (°C) ;
- q_{mam} : débit masse de l'air mélangé (kg/s) ;
- h_{am} : enthalpie massique de l'air mélangé (kJ/kg as) ;
- w_{am} : teneur en vapeur d'eau de l'air mélangé (kg/kg as).

■ Caractéristiques de l'air de mélange

Les caractéristiques de l'air mélangé sont déterminées par le calcul ou par la méthode graphique :

- *Par le calcul.* En isolant le caisson de mélange, il est possible d'écrire trois équations afin de calculer les caractéristiques du point de mélange :

$$\text{Bilan massique : } q_{mam} = q_{man} + q_{mar}$$

Bilan énergétique :

$$q_{mam} \cdot h_{am} = q_{mam} \cdot h_{an} + q_{mar} \cdot h_{ar} \Rightarrow h_{am} = \frac{q_{man} \cdot h_{an} + q_{mar} \cdot h_{ar}}{q_{mam}}$$

$$\Rightarrow h_{am} = \frac{q_{man} \cdot h_{an} + q_{mar} \cdot h_{ar}}{q_{man} + q_{mar}}$$

Bilan hydrique :

$$q_{mam} \cdot w_{am} = q_{man} \cdot w_{an} + q_{mar} \cdot w_{ar} \Rightarrow w_{am} = \frac{q_{man} \cdot w_{an} + q_{mar} \cdot w_{ar}}{q_{mam}}$$

$$\Rightarrow w_{am} = \frac{q_{man} \cdot w_{an} + q_{mar} \cdot w_{ar}}{q_{man} + q_{mar}}$$

- *Par la méthode graphique.* Pour positionner le point de mélange sur le diagramme de l'air humide, il suffit de placer les points correspondant à l'air neuf et à l'air recyclé (points qui sont généralement déduits de la température sèche et de l'humidité relative). Une fois les deux points placés sur le diagramme, le point de mélange se trouve obligatoirement sur le segment de droite reliant ces deux points.

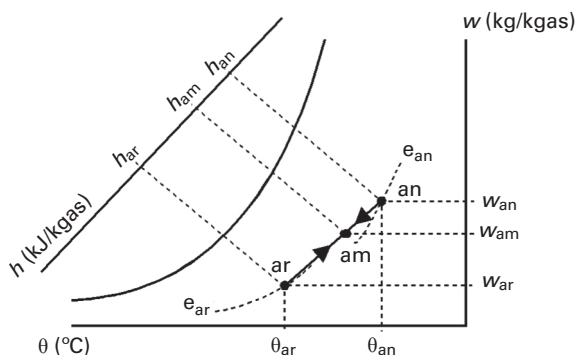


Fig. 1.9 Point de mélange.

EXEMPLE

On mélange de l'air neuf et de l'air repris ayant les caractéristiques suivantes :

Air neuf :

$$q_{an} = 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$e_{an} = 50 \text{ \%}$$

$$q_{man} = 2 \text{ kg/s}$$

Air repris :

$$q_{ar} = 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$e_{ar} = 50 \text{ \%}$$

$$q_{mar} = 1,33 \text{ kg/s}$$

Pour déterminer les caractéristiques de l'air mélangé par le calcul :

- Positionner les deux points sur le diagramme.
- Lire les valeurs de l'enthalpie et de la teneur en vapeur d'eau de l'air neuf et de l'air repris :

$$h_{an} = 70,5 \text{ kJ/kg as ; } w_{an} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ kg/kg as}$$

$$h_{ar} = 48 \text{ kJ/kg as ; } w_{ar} = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/kg as}$$

- Calculer l'enthalpie et la teneur en vapeur d'eau du point de mélange :

$$h_{am} = \frac{q_{man} \cdot h_{an} + q_{mar} \cdot h_{ar}}{q_{man} + q_{mar}} = \frac{2 \times 70,5 + 1,33 \times 48}{2 + 1,33} = 61,51 \text{ kJ/kg as}$$

$$r_{am} = \frac{q_{man} \cdot r_{an} + q_{mar} \cdot r_{ar}}{q_{man} + q_{mar}} = \frac{2 \times 15 \cdot 10^{-3} + 1,33 \times 9,5 \cdot 10^{-3}}{2 + 1,33} = 12,8 \cdot 10^{-3} \text{ kJ/kg as}$$

Pour déterminer les caractéristiques de l'air mélangé par la méthode graphique :

- Positionner sur le diagramme de l'air humide les points correspondant à l'air neuf et à l'air recyclé.
- Tracer une droite entre ces deux points.
- Mesurer le segment entre ces deux points : $d_{an,ar} = 65 \text{ mm}$
- Calculer le taux de mélange :

$$\tau = \frac{q_{man}}{q_{man} + q_{mar}} = \frac{2}{2 + 1,33} = 0,60 \Rightarrow \tau = 60 \text{ \%}$$

- Calculer la distance entre l'air neuf et l'air mélangé :

$$d_{an,am} = \tau \times d_{an,ar} = 0,60 \times 65 = 39 \text{ mm}$$

- Reporter cette distance sur le diagramme.

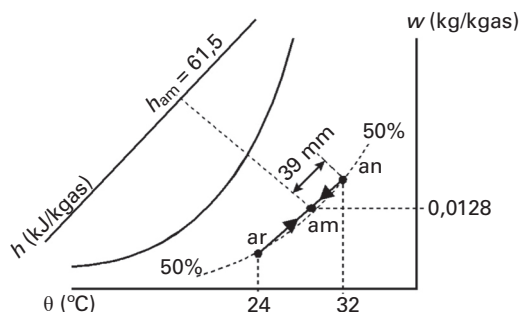


Fig. 1.10 Caractéristiques de l'air mélangé.

- Lire les différentes valeurs du point de mélange.

$$h_{am} = 61,5 \text{ kJ/kg as}$$

$$w_{am} = 0,0128 \text{ kg/kg as}$$

■ Évolution de l'air dans un condenseur

L'air traversant le condenseur est chauffé.

Le fait de chauffer l'air augmente l'enthalpie de l'air sans modifier la teneur en vapeur d'eau de celui-ci : $w = \text{constant}$ (Les évolutions d'air dans les batteries à eau chaude ou électriques sont similaires.)

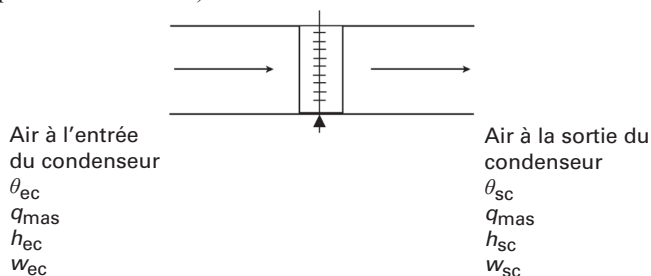


Fig. 1.11 Caractéristiques de l'air entre l'entrée et la sortie du condenseur.

q_{ec} : température sèche de l'air à l'entrée du condenseur (°C) ;

q_{mas} : débit masse d'air (kg/s) ;

h_{ec} : enthalpie massique de l'air à l'entrée du condenseur (kJ/kg as) ;

w_{ec} : teneur en vapeur d'eau de l'air à l'entrée du condenseur (kg/kg as)

q_{sc} : température sèche de l'air à la sortie du condenseur (°C) ;

q_{mas} : débit masse d'air (kg/s) ;

h_{sc} : enthalpie massique de l'air à la sortie du condenseur (kJ/kg as) ;

w_{sc} : Teneur en vapeur d'eau de l'air à la sortie du condenseur (kg/kg as).

■ Détermination de la puissance thermique du condenseur par le calcul

En isolant le condenseur, il est possible d'écrire deux équations qui permettent de calculer la puissance thermique :

Bilan hydrique : $w_{ec} = w_{sc}$

w_{ec} : teneur en vapeur d'eau à l'entrée de la batterie (kg/kg as) ;

w_{sc} : teneur en vapeur d'eau à la sortie de la batterie (kg/kg as).

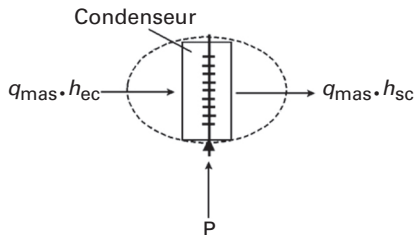


Fig. 1.12 Bilan du condenseur.

Bilan enthalpique :

$$q_{mas} \cdot h_{ec} + P - q_{mas} \cdot h_{sc} = 0$$

$$\Rightarrow P = q_{mas} \cdot (h_{sc} - h_{ec})$$

Avec P : puissance thermique du condenseur (kW).

EXEMPLE

Les caractéristiques de l'air à l'entrée du condenseur sont :

$$t_{ec} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$e_{ec} = 45 \%$$

$$q_{mas} = 3,33 \text{ kg/s}$$

Les caractéristiques de l'air à la sortie du condenseur sont :

$$t_{sc} = 37 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Calcul de la puissance thermique évacuée au condenseur :

- Positionner les deux points sur le diagramme.
- Lire la valeur de l'enthalpie de l'air à l'entrée et à la sortie du condenseur.

$$h_{ec} = 61 \text{ kJ/kg as}$$

$$h_{sc} = 68 \text{ kJ/kg as}$$

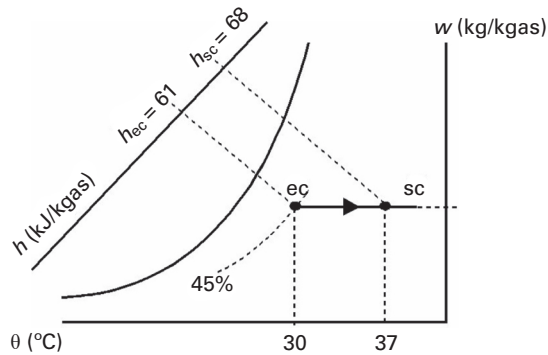


Fig. 1.13 Évolution du condenseur.

La puissance thermique évacuée au condenseur est égale à :

$$P_{BC} = q_{mas} \cdot (h_{sc} - h_{ec}) = 3,33 \times (68 - 61) = 23,3 \text{ kW}$$

■ Batterie froide : évaporateur, batterie à eau glacée

À certaines périodes de l'année (particulièrement en été), il est nécessaire de refroidir l'air avant de l'insuffler dans une pièce. Pour cela, la batterie froide est alimentée par de l'eau froide ou par un fluide frigorigène.

Il existe deux types de régime :

- Batterie froide fonctionnant en régime sec : la température moyenne de surface (θ_{ms}) est supérieure à la température de rosée (θ_r) ; ($\theta_{ms} > \theta_r$).
- Batterie froide fonctionnant en régime humide la température moyenne de surface (θ_{ms}) est inférieure à la température de rosée (θ_r) ; ($\theta_{ms} < \theta_r$).

■ Batterie froide fonctionnant en régime sec

L'air est refroidi sur une surface d'échange sèche. La vapeur d'eau contenue dans l'air ne se condense pas et l'évolution de la batterie froide se fait à teneur en vapeur d'eau constante.

θ_{ebf} : température sèche de l'air à l'entrée de la batterie froide (°C) ;

q_{mas} : débit masse d'air (kg/s) ;

h_{ebf} : enthalpie massique de l'air à l'entrée de la batterie froide (kJ/kg as).