

TECHNO-FICHES

**100 FICHES
PRATIQUES**

CLIMATISATION ET VENTILATION

Fonctionnement, optimisation et maintenance

Léoric Le Roy

DUNOD

Conception graphique de la couverture : Pierre André Gualino

Direction artistique : Nicolas Wiel

Illustration de couverture : Roman Zaiets/shutterstock.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2022

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-082474-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

AVANT-PROPOS

L'évolution de notre civilisation a toujours été intimement liée à son niveau de confort. Les grandes avancées scientifiques, techniques, sanitaires et sociétales n'ont été possibles qu'avec une meilleure maîtrise des conditions de confort. La crise sanitaire que nous avons traversée nous rappelle le rôle fondamental des systèmes de traitement d'air dans le maintien de confort des services de santé, des laboratoires de recherche ou tout simplement des immeubles tertiaires.

Avec un parc chauffé de 5 milliards de mètres carrés environ et un parc climatisé d'un milliard de mètres carrés en 2020, le secteur du génie climatique (étude, installation, mise en service et maintenance/*Facility Management*) emploie 250 000 personnes environ en France avec une croissance annuelle du parc de 25 millions de mètres carrés boostée notamment par l'émergence du Grand Paris. Ce développement s'accompagne de surcroît d'un contexte réglementaire (RT 2012, RE 2020) toujours plus contraignant afin de réduire la consommation d'énergie des systèmes installés et leur impact sur l'environnement. Parallèlement, le secteur offre de nouvelles perspectives d'emploi. On évoque chez les grands acteurs des métiers de maintenance (multi technique, multiservice et *Facility Management*), une capacité d'embauche de 2 500 techniciens par an.

Dans ce contexte, la publication de ces 100 fiches pratiques retraçant les connaissances de base du génie climatique prend toute sa place afin d'accompagner les différents acteurs du secteur mais aussi les étudiants dans leur montée en com-

pétences sur la gestion de leurs activités quotidiennes comme :

- la maîtrise du fonctionnement des systèmes ;
- la réalisation des opérations de maintenance ;
- la mise au point de systèmes CVC ;
- le dimensionnement des installations ;
- la prise en main de site ;
- l'audit de fonctionnement des systèmes ;
- la gestion du plan de maintenance ;
- les procédures d'optimisation de fonctionnement ;
- l'identification des sources d'économie d'énergie.

L'ouvrage explique le fonctionnement de l'ensemble des échangeurs et des systèmes permettant d'obtenir des conditions de confort en apportant des explications par le traitement d'applications concrètes. Il traite également des indicateurs permettant de pérenniser la disponibilité d'un système, d'optimiser son fonctionnement et les opérations de maintenance et de réduire sa consommation d'énergie.

Mais la parfaite maîtrise d'un sujet nécessite souvent une formation spécifique, cet ouvrage a pour objectif de vous épauler dans cette démarche. Et comme les actions humaines sont perfectibles, toute remarque et suggestion concernant cet ouvrage seront les bienvenues... Merci par avance.

Léoric Le Roy

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	III
1. La climatisation	1
2. L'histoire de la climatisation	2
3. La climatisation en chiffres	4
4. Conditions de confort	5
5. Grandeurs de l'air humide	6
6. Diagrammes de l'air humide de Carrier et Mollier.....	8
7. Mesure de température	11
8. Mesure de l'hygrométrie relative.....	13
9. Conditions intérieures de référence	15
10. Températures extérieures de référence	18
11. Débits d'air hygiéniques en résidentiel	19
12. Débits d'air hygiéniques non résidentiel.....	22
13. Réglementation sanitaire départementale type	23
14. Réglementation sanitaire européenne CO ₂	25
15. Zone à empoussièremement maîtrisé	26
16. Locaux à risques et locaux à confinement	28
17. Normes liées à la filtration.....	30
18. Critères de sélection d'un filtre	32
19. Débits d'air.....	34
20. Mesure des débits d'air <i>in situ</i>	35
21. Débit d'air aux organes de soufflage.....	39
22. Bilan aéraulique d'un système de climatisation	41
23. Mesure de pression d'air	43
24. Pertes de charge sur l'air	47
25. Courbe de réseau	53
26. Types de ventilateurs	54
27. Courbes de fonctionnement des ventilateurs	58
28. Bilan énergétique des ventilateurs	62
29. Adaptation des ventilateurs au réseau.....	63
30. Chaleur sensible, chaleur latente et changements d'état	65
31. Échanges de chaleur	67
32. Batterie chaude.....	70
33. Batterie froide sèche.....	73
34. Batterie froide humide	76
35. Humidificateur vapeur	79
36. Humidificateur adiabatique.....	82

37. Caisson de mélange.....	86
38. Déshumidification par adsorption.....	89
39. Charges climatiques d'un local.....	92
40. Droite de soufflage d'un local.....	94
41. Conception des cycles de traitement d'air.....	98
42. Cycle de maintien de température en hiver.....	99
43. Cycle hiver avec humidification adiabatique.....	101
44. Cycle hiver avec humidification vapeur.....	103
45. Cycles été avec batterie froide, sèche ou humide.....	105
46. Cycle été : <i>process</i>	107
47. Cycle de traitement d'air en parallèle.....	108
48. Bilan énergétique complet d'un cycle hiver.....	110
49. Principe de la récupération de chaleur.....	113
50. Récupération de chaleur par échangeur à plaque.....	116
51. Récupération de chaleur par échangeur à batteries.....	118
52. Récupération de chaleur par échangeur à caloduc.....	120
53. Récupération de chaleur par échangeur à roue.....	122
54. Récupération de chaleur par pompe à chaleur.....	124
55. Bilan énergétique complet d'un cycle hiver avec récupération d'énergie.....	125
56. Climatisation et production de froid.....	129
57. Circuit frigorifique réversible.....	132
58. Paramètres de contrôle des circuits frigorifiques en climatisation.....	134
59. Systèmes de climatisation.....	137
60. Climatiseur <i>window</i>	139
61. Climatiseur mobile.....	140
62. Climatiseur <i>split system</i> (séparé).....	142
63. Systèmes de climatisation VRV.....	144
64. Armoires de climatisation (ATA).....	147
65. Centrales de traitement d'air (CTA) en simple flux.....	148
66. Centrales de traitement d'air (CTA) en double flux.....	149
67. <i>Rooftops</i> (CTA en terrasse).....	150
68. Modules de traitement d'air (MTA).....	151
69. Systèmes en <i>change over</i>	152
70. Ventilateurs-convecteurs.....	153
71. Éjecto-convecteurs.....	155
72. Poutres froides passives.....	157
73. Poutres froides actives.....	158
74. Pompe à chaleur sur boucle d'eau.....	159
75. Régulation des systèmes CVC.....	160
76. Boucle de régulation fermée.....	161
77. Boucle de régulation ouverte.....	162
78. Sondes passives en régulation.....	163
79. Sondes actives en régulation.....	165
80. Régulation proportionnelle.....	169
81. Régulation tout ou rien (TOR).....	174
82. Actionneurs de type servomoteur.....	178

83. Actionneurs de type contacteur.....	181
84. Actionneurs de type TRIAC	183
85. Actionneurs de type variateur	184
86. Organes de réglage	187
87. Différents points d'une boucle de régulation	191
88. Lois de régulation : réglage en compensation	193
89. Lois de régulation : réglages en limitation	194
90. Synthèse des boucles sur un système	196
91. Maintenance des systèmes de traitement d'air.....	197
92. Différents types de maintenance	199
93. Différents niveaux de maintenance	201
94. Disponibilité d'un système en maintenance	203
95. Analyse des modes de défaillance, des effets et de la criticité d'un système	206
96. Analyse des modes de défaillance d'un système par l'arbre des pannes	208
97. Plan de maintenance.....	210
98. GMAO : Fonctionnalités	212
99. GMAO : Résultats attendus avec sa mise en place.....	213
100. Sigles et abréviations	214
Index.....	216

1. LA CLIMATISATION

Qu'est-ce que la climatisation ?

La climatisation désigne l'ensemble des opérations qui permettent de contrôler, de réguler ou de modifier les conditions de confort d'une ambiance soumise à des perturbations internes ou externes (charges thermiques, charges hydriques et poussières gazeuses ou solides), en maintenant principalement les paramètres suivants :

- la **température** par action sur un système de chauffage ou de rafraîchissement ;
- l'**hygrométrie** par action sur un système d'humidification ou de déshumidification ;
- la **pression** par action sur un système de ventilation ;
- la **qualité de l'air** par action sur un système de filtration, de brassage ou d'admission d'air neuf.

Ce terme climatisation est souvent associé à la production frigorifique alors qu'il met en jeu des objectifs bien plus vastes dans le maintien de confort et qu'il fait appel à des systèmes souvent différents des solutions de production frigorifique classiques comme la ventilation, la filtration ou l'humidification.

Par conséquent, la constitution des matériels de climatisation installés chez les clients va dépendre du cahier des charges et des conditions de confort qu'il est nécessaire de maintenir. En définitive, les « climatiseurs » sont le résultat d'une intégration d'échangeurs montés en série ou en parallèle permettant de traiter les grandeurs physiques d'une ambiance donnée.

2. L'HISTOIRE DE LA CLIMATISATION

Il est très difficile de situer historiquement les débuts de la climatisation moderne. Voici une chronologie des grandes étapes nous amenant à la climatisation telle que nous la connaissons aujourd'hui.

- **500 000 ans av. J.-C.** : maîtrise anthropique du feu pour le confort et pour la cuisson des aliments.
- **200 000 ans av. J.-C.** : début des abris en dur construit par l'Homme de type « hutte ». Le confort d'une ambiance et les liens sociaux prennent forme.
- **4 000 à 1 300 ans av. J.-C.** : début de l'utilisation des principes de confort liés au tirage thermique et éolien avec le développement des « capteurs de vents » (mangh en Inde ou badgirs en Perse, figure 1.1). On retrouve ces systèmes dans l'Égypte des pharaons où des études récentes font état d'un brassage des ambiances avoisinant les 50 vol/h. La présence d'une réserve d'eau ou de pains de glace permettait d'augmenter le rafraîchissement des chaudes atmosphères du Moyen et Proche Orient.

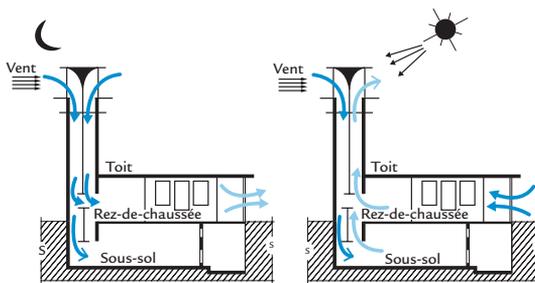


Figure 1.1 Badgirs de la ville de Yazd en Iran

- **1 300 av. J.-C. au xv^e siècle** : les différentes civilisations, notamment méditerranéennes, climatisent les atmosphères par empirisme en utilisant le ruissellement de l'eau dans des fontaines. L'humidificateur adiabatique basé sur la détente de l'eau est créé.
- **xv^e et xvi^e siècles** : la Renaissance voit les locaux s'étanchéifier. Les problématiques de confort se posent alors. Nicolas de Cues, théologien et physicien allemand, en 1430 et Léonard de Vinci en 1500 tentent de mesurer l'humidité de l'air. Les bases de la psychrométrie sont posées.
- **xviii^e siècle** : Anders Celsius et Daniel Fahrenheit élaborent des échelles de température afin de mesurer l'énergie présente dans l'air. Horace de Saussure invente en 1780 le premier hygromètre à cheveu. Les épidémies et la mortalité dans des locaux confinés montrent la nécessité de ventiler. Les premiers ventilateurs centrifuges à vapeur ou éolien commencent à ventiler prisons, hôpitaux et bateaux.
- **1820** : John Frederic Daniell mesure une température de rosée avec un miroir.
- **1825** : Ernst Ferdinand August invente le premier psychromètre à évaporation (température sèche et humide).
- **1850-1860** : les machines frigorifiques à compression et absorption sont brevetées.
- **1888** : le premier gratte-ciel sort de terre à Chicago. Le Home Insurance Building, haut de 42 mètres pour 10 étages, montre l'intérêt d'une maîtrise de la ventilation, du chauffage central, de l'éclairage et de l'ascenseur. La climatisation moderne est en marche.
- **1900-1902** : Willis Carrier et Rose William climatisent des ambiances pour des industriels en utilisant la brumisation de l'eau à des fins de déshumidification.
- **1906** : Richard Mollier, physicien allemand, publie son diagramme psychrométrique
- **1911** : Willis Carrier dépose le *Rational Psychrometric Formulae* consacrant ses 10 ans de recherche. Le confort figure maintenant sous équations et en diagrammes.
- **1930-1934** : les fréons R012 et R022 naissent et permettent l'essor de la production frigorifique par compression. Ils seront complétés par le R 502 en 1961.
- **1940** : le froid à absorption fait aussi son apparition dans les systèmes de climatisation.
- **1950-1960** : les salles propres se développent pour la recherche militaire, l'aéronautique et les locaux de santé et se standardisent en 1961 avec le *Fédéral Standard 209*.
- **1960-2020** : les systèmes de climatisation s'imposent et accompagnent le développement économique des Trente Glorieuses à nos jours. Le tertiaire, la recherche, l'industrie, le secteur de la santé, la communication, l'aéronautique, l'informatique, les loisirs, tous les secteurs doivent leur essor à une parfaite maîtrise des conditions d'ambiance. Cependant, ces systèmes sont consommateurs d'énergie. Il faut par conséquent une parfaite maîtrise des techniques, des règles de dimensionnement et de maintenance afin de limiter leur empreinte sur l'environnement.

3. LA CLIMATISATION EN CHIFFRES

Le Ceren (Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie) et l'ADEME suivent l'impact des systèmes de climatisation sur notre société. Cette fiche présente les chiffres clés recensés pour la France.

Périmètre et consommation d'énergie du secteur climatisation

- 5 milliards de m² nécessitant du confort (surfaces construites).
- 1 milliard de m² climatisés (locaux tertiaires, commerce, locaux de santé, laboratoires etc.).
- 25 millions de m² supplémentaires construits par année.
- 70 Mt équivalent pétrole de consommation d'énergie (2020).
- 45 % de l'énergie totale consommée.
- 66 % de cette consommation pour le résidentiel.
- 25 % des émissions totales de CO₂.

Climatisation et emploi

- 200 000 emplois directs et indirects en chauffage/ventilation/climatisation (monteurs, techniciens, ingénieurs, metteurs au point, plombiers, chauffagistes, frigoristes, fabricants, fournisseurs, etc.)
- 2 500 embauches par an dans les métiers de la maintenance.
- Coût horaire global suivant l'activité de 35 à 100 €.

Contexte réglementaire du secteur

- La RT 2012 et la RE 2020.
- L'hygiénisation des ambiances avec la COVID 19.
- La réglementation F GAZ concernant les fluides frigorigènes.
- Le décret tertiaire afin d'optimiser les consommations d'énergie.
- Le décret 2020/887 du 20/07/2020 lié à la directive européenne 2010/31/U qui impose un système d'automatisation et de contrôle des conditions de confort, de la production à la consommation d'énergie pour les bâtiments tertiaires neufs / existants avant 2025.
- La PCME qui caractérise la prise en compte de l'exploitation et de la maintenance des systèmes et qui fixe la répartition dans le coût global du maintien de confort : coût de conception 4 à 6 %, coût de réalisation 15 à 20 %, coût d'utilisation 75 à 80 %.

4. CONDITIONS DE CONFORT

L'homme moderne passe 90 % de son temps dans des locaux fermés, aussi convient-il de maintenir des conditions de confort adaptées à son activité et son métabolisme (figure 4.1). Ces conditions dépendent :

- de la **température ambiante** : entre 18 et 26 °C suivant le local et la saison (23 °C dans une salle de bains, 18 °C dans une chambre) ;
- de l'**hygrométrie** ambiante (vapeur d'eau) : entre 40 % et 60 % ;
- de la **température des parois** (notion de paroi froide liée au vitrage) ;
- de la **vitesse de l'air** : entre 0 et 0,2 m/s ;
- du **niveau d'habillement** ;
- de l'**activité des personnes** : 27 °C dans une piscine, 19 à 20 °C dans une salle d'opération ;
- de la saison : été ou hiver.

Ces conditions sont souvent fixées par des textes réglementaires propres à chaque type d'ambiance ou de manière empirique par retour d'expérience. Certaines activités spécifiques (industries, santé, informatique, *process*) nécessitent des conditions particulières qui sont alors normalisées.

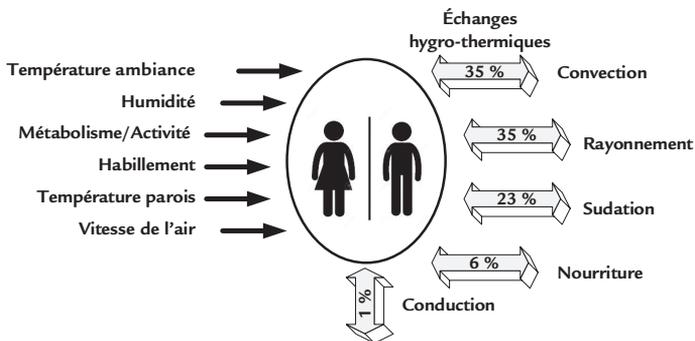


Figure 4.1 Confort des personnes

À partir des années 1900, Richard Mollier et Willis Carrier posent les bases de la psychrométrie permettant de mettre ce confort en équations en publiant le diagramme de l'air humide. Nous pouvons à présent situer un confort et dimensionner les systèmes qui vont le maintenir.

5. GRANDEURS DE L'AIR HUMIDE

On retrouve dans le **diagramme psychrométrique**, l'ensemble des dix grandeurs de l'air humide. Ces grandeurs sont liées les unes aux autres par le formulaire de la psychrométrie en fonction de la pression de l'air humide et de la pression atmosphérique elle-même fonction du lieu et de son altitude.

- La **température sèche** θ_s ou T_s (°C) : c'est la température commune mesurée au thermomètre à bulbe sec.
- La **température humide** θ_h ou T_h (°C) : c'est la température mesurée au bulbe humide qui correspond à la température d'évaporation de l'eau dans l'air (exemple : température de sortie de douche). Couplée avec le thermomètre sec, on crée un psychromètre (figure 5.1).
- La **température de rosée** θ_r , T_r ou T_d (°C) : c'est la température de début de condensation de la vapeur d'eau sur une surface (buée sur un vitrage).



Figure 5.1 Psychromètre et hygromètre à cheveu et numérique

- L'**hygrométrie absolue** X , w ou R ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air}}$) : c'est la masse de vapeur d'eau contenue dans 1 kg d'air sec. Cette grandeur n'est pas directement mesurable.

$$X = 0,622 \times \frac{P_{\text{vap}}}{P_{\text{atm}} - P_{\text{vap}}}$$

- L'**hygrométrie relative** φ (%) : cette grandeur compare la quantité de vapeur présente dans l'air humide à la quantité de vapeur présente à saturation pour une température équivalente.

$$\varphi = \frac{P_{\text{vap}}}{P_{\text{vap sat}}} = \frac{X}{X_{\text{sat}}}$$

- L'**enthalpie** h (kJ/kg_{air}) : c'est la quantité d'énergie contenue dans l'air humide dont la masse est 1 kg d'air sec.

$$h_{\text{tot}} = X \cdot h_{\text{vap}} + h_{\text{as}} = X(h_{\text{lat}} + h_{\text{sens}}) + h_{\text{sens as}} = X(2\,501 + 1,83 T_s) + 1,006 T_s$$

- Le **volume massique** v' (m³/kg_{air}) : c'est le volume qu'occupe 1 kg d'air humide.
- La **masse volumique** ρ (kg_{air}/m³) : c'est la masse de 1 m³ d'air humide.
- La **pression partielle de vapeur d'eau** P_v (Pa) : c'est la composante pression (loi de Dalton) que possède la quantité de vapeur d'eau dans la pression totale de l'air humide.
- La **pression de vapeur saturante** P_{vs} (Pa) : c'est la pression qu'exerce la quantité de vapeur d'eau dans l'air lors de la saturation (équilibre entre la présence d'eau à l'état liquide et vapeur).

En pratique, la température sèche T_s , la température humide T_h et l'humidité relative ϕ sont les grandeurs les plus mesurées. Leur mesure permet alors :

- de placer un point dans le diagramme,
- de définir les autres paramètres,
- de situer le niveau de confort,
- de procéder à la sélection des échangeurs.

Afin de construire le diagramme de l'air humide ou de générer un programme de calculs, il est nécessaire d'identifier les équations importantes qui lient les paramètres de l'air humide entre eux.

6. DIAGRAMMES DE L'AIR HUMIDE DE CARRIER ET MOLLIER

L'ensemble des grandeurs de l'air humide évoquées sont mises sous équation afin de générer un diagramme psychrométrique. Willis Carrier et Richard Mollier sont les premiers à proposer ce type d'outil dès 1906. Les différences existantes entre les deux diagrammes sont liées au système d'axes choisis pour la présentation mais surtout à la maîtrise des utilisateurs.

Le diagramme de l'air humide de Carrier

Willis Carrier construit son diagramme avec un système d'axe constitué par la teneur en eau et la température sèche. Ces grandeurs symbolisent la chaleur latente et la chaleur sensible. La figure 6.1 permet de visualiser un exemple de lecture pour des mesures sur l'air de 20 °C et 50 %.

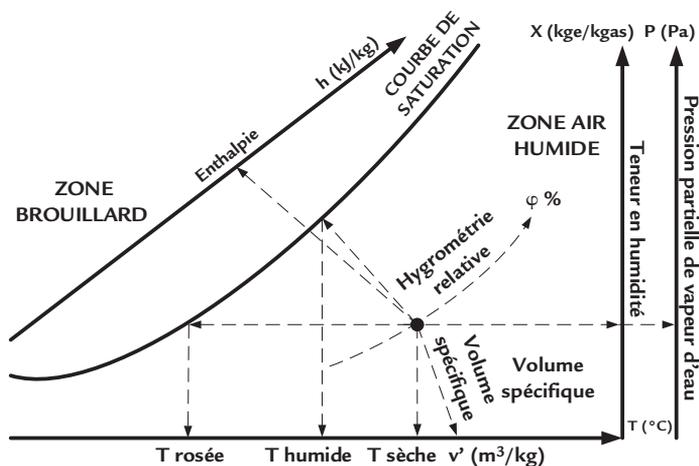


Figure 6.1 Diagramme psychrométrique de Willis Carrier

Le diagramme de l'air humide de Mollier

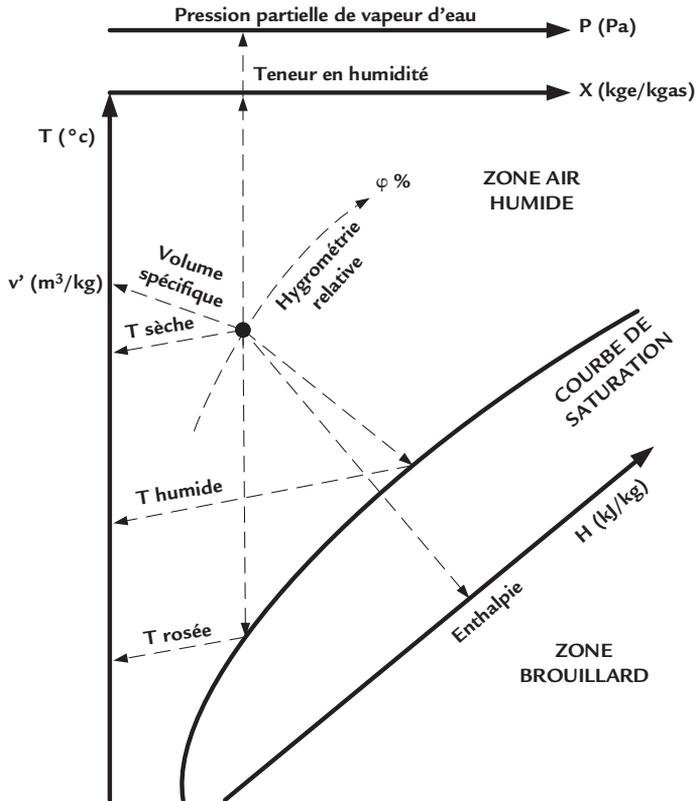


Figure 6.2 Diagramme psychrométrique de Richard Mollier

Un exemple de positionnement de point sur le diagramme est présenté à la figure 6.3.

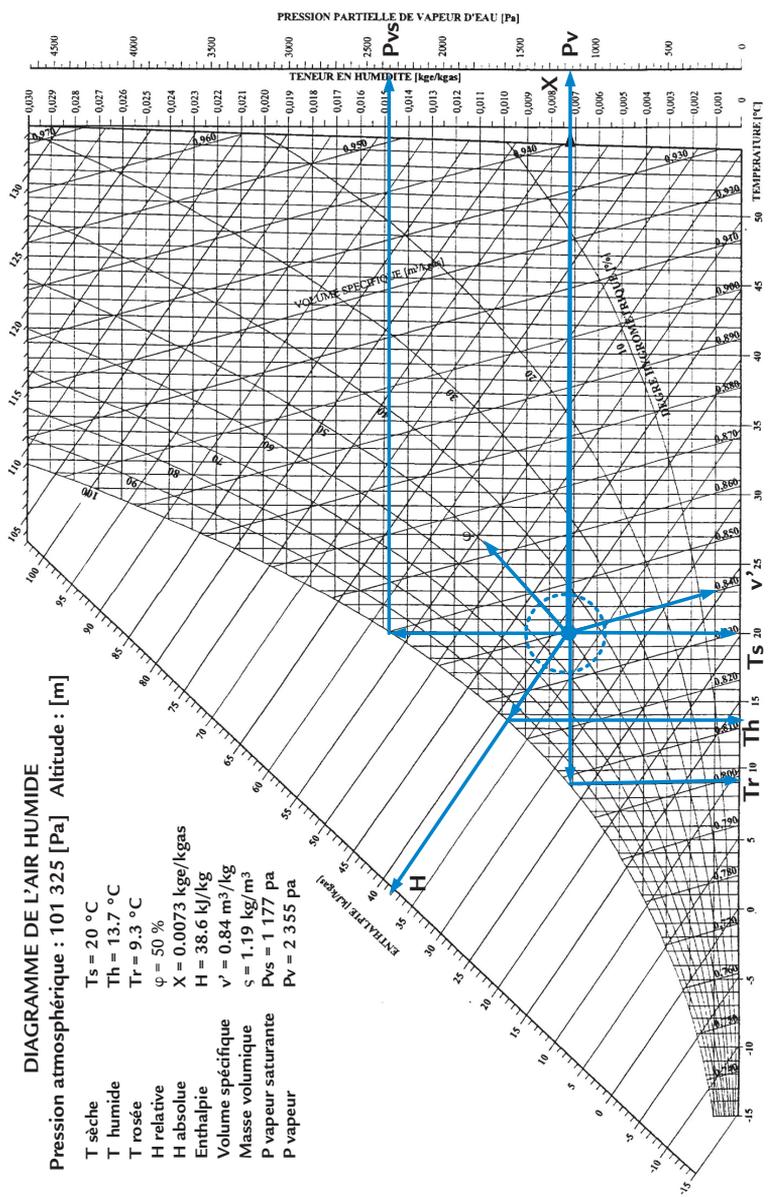


Figure 6.3 Exemple de placement de point pour $T_s = 20\text{ }^\circ\text{C}$ et $\phi = 50\%$