

H. RECKNAGEL
E. SPRENGER • E.-R. SCHRAMEK

GÉNIE CLIMATIQUE

Sous la direction de
Ernst-Rudolf Schramek
Université de Dortmund

Préface à l'édition française de
Bertrand Montmoreau
Président national de l'Association des ingénieurs en climatique,
ventilation et froid (AICVF)

Traduit de l'allemand par
Adélaïde Bodson
Chantal Caradec
Stephan Pastureau
Nathalie Petit



DUNOD

Cet ouvrage est la traduction en langue française, par les éditions Dunod, de la 75^e édition de l'ouvrage de H. Recknagel, E. Sprenger et E.-R. Schramek publié en langue allemande sous le titre :

Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik
Copyright © 2011 Oldenbourg Industrieverlag GmbH

Révision technique : Jean Lannaud, Jean Hrabovsky, Philippe Ménard, Jacques Bossard, Claude Fayet, Roland Hervé, André Regef (membres de l'AICVF)

Les éléments de cette nouvelle édition ont été traduits par Nathalie Petit.

L'éditeur a fait tout ce qui était en son pouvoir pour rendre l'utilisation de cet ouvrage aussi aisée que possible. Toute insuffisance à cet égard qui nous serait signalée sera rectifiée dans un prochain tirage.

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 s'est généralisée dans les établissements

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, Paris, 2007, 2013 pour la traduction française
ISBN 978-2-10-070451-4

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o 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.

PRÉFACE À LA CINQUIÈME ÉDITION FRANÇAISE

C'est à Hermann RECKNAGEL (1869-1919) que l'on doit « Le Recknagel ». La première édition, sous forme d'un annuaire, date de 1897. Rapidement il est complété puis publié annuellement et devient un manuel du génie climatique. En Allemagne, continuellement mis à jour, il fait chaque année l'objet d'une nouvelle édition.

Depuis sa première édition française, en 1980, le RECKNAGEL s'est aussi imposé en France comme un manuel du génie climatique. Il est devenu rapidement une des références de base pour les professionnels. Le manuel traite des phénomènes physiques fondamentaux de la climatique puis de ses applications en chauffage, ventilation, climatisation-conditionnement d'air et froid. La présente édition de Dunod aborde aussi bien les procédés traditionnels que les dernières avancées technologiques en matière de performance énergétique. Le RECKNAGEL nous fait aussi connaître des solutions plus particulièrement en usage outre Rhin.

Pour cette cinquième édition française du RECKNAGEL, les Éditions Dunod ont demandé de nouveau à l'AICVF, Association des ingénieurs en climatique ventilation et froid, de valider la traduction française. Notre association de climaticiens a été très sensible à cet honneur. Les relecteurs, sous l'égide du comité technique, se sont efforcés de gommer les petites imperfections de la traduction et de rendre plus aisée sa lecture.

En France, les installations de génie climatique doivent respecter les exigences de la réglementation thermique, RT 2012 aujourd'hui, et viser à terme les performances énergétiques de la future Réglementation 2020. Les logiciels de calcul, propres à la réglementation, peuvent parfois faire oublier les impératifs de la conception et du dimensionnement, c'est pourquoi le RECKNAGEL est un outil indispensable au bureau d'études ; il aide à concevoir des installations qui répondent au besoin de confort des occupants avec les meilleures solutions de performances énergétiques tout en satisfaisant à la réglementation thermique.

Félicitations aux Éditions Dunod, qui proposent aux climaticiens de langue française cet outil de conception des installations de génie climatique.

Bertrand MONTMOREAU

Président national de l'Association des ingénieurs
en climatique, ventilation et froid (AICVF)

PRÉFACE À LA PRÉCÉDENTE ÉDITION FRANÇAISE (2007)

C'est un honneur pour l'AICVF de vous présenter aujourd'hui la traduction française de la dernière édition du RECKNAGEL. Cet ouvrage, particulièrement apprécié des professionnels du génie climatique en général, et des bureaux d'études thermiques en particulier, est devenu, de longue date, le document européen de référence.

Le choix d'une traduction, plutôt que d'une adaptation, du célèbre manuel allemand a paru préférable face à l'harmonisation grandissante des normes et des bonnes pratiques et à la convergence des préoccupations européennes. L'évolution rapide des technologies, permettant de mieux répondre aux aspirations de plus en plus exigeantes en termes de confort thermique, tout en respectant les objectifs de réduction de la consommation d'énergie et les enjeux du développement durable, sera également favorisée par cette vision européenne.

Cette nouvelle édition s'inscrit aussi dans la démarche internationale menée de longue date par l'AICVF dans le cadre de REHVA et de CLIMAMED (le congrès des climaticiens proches de la Méditerranée). La France, de par sa position et sa diversité géographiques, doit jouer un rôle charnière pour unir les méthodes et les problématiques du génie climatique, du nord de l'Europe jusqu'au bassin méditerranéen.

La traduction d'un ouvrage technique de cette importance, unique en son genre, représente un travail considérable, et nécessite une parfaite connaissance du génie climatique et de son vocabulaire. Le comité technique de l'AICVF est très heureux d'avoir pu être associé à ce challenge et de participer ainsi à une meilleure compréhension européenne du génie climatique et à la diffusion de son savoir-faire.

Cette nouvelle édition du RECKNAGEL complète ainsi harmonieusement la bibliothèque du bon climaticien, notamment aux côtés des recommandations de l'AICVF. Elle s'inscrit parfaitement dans le rôle que notre association s'est fixé depuis bientôt cent ans, de réflexion, d'échange, de modernisation et de diffusion des techniques du génie climatique.

Très bonne lecture à tous.

Bertrand MONTMOREAU

Président national de l'Association des ingénieurs
en climatique, ventilation et froid (AICVF)

AVERTISSEMENT

Cet ouvrage renvoie à des normes et à des recommandations. Celles-ci peuvent avoir une origine :

- allemande : normes DIN de l'Institut allemand de normalisation (Deutsches Institut für Normung), équivalent de l'Association française de normalisation (AFNOR), et recommandations (VDI, VDMA), issues d'organismes professionnels ;
- européenne : normes EN adoptées par le Centre européen de normalisation (CEN) ; elles sont obligatoirement reprises par les instituts nationaux de normalisation (DIN ou AFNOR) en lieu et place des normes nationales ;
- internationale : normes ISO ou CEI, reprises ou non par le CEN.

Mode d'emploi pour trouver les normes françaises équivalentes des normes citées dans l'ouvrage :

- normes ou recommandations d'origine allemande : interroger le site **www.afnor.fr** à la rubrique « Normes en ligne » :
 - à partir de l'indice DIN, VDI ou VDMA, rechercher l'indice ICS (International classification standard),
 - puis, à partir de l'indice ICS, faire une recherche avancée pour obtenir les normes françaises portant sur le même sujet.
- normes d'origine européenne (DIN EN...) ou internationale (DIN EN ISO...) : la version française est publiée par l'AFNOR avec le même indice : NF EN... ou NF EN ISO...

L'ouvrage donne également plusieurs exemples détaillés de calcul de coûts d'installation et d'exploitation. Ils sont à actualiser en fonction des conditions économiques du moment en tenant bien compte des prix de la main-d'œuvre, des produits de construction, des équipements ainsi que des tarifs des énergies et de l'incidence des conditions climatiques du lieu considéré.

Association des ingénieurs en climatique,
ventilation et froid (AICVF)

AVANT-PROPOS

À LA PREMIÈRE ÉDITION ALLEMANDE

Cet almanach destiné aux techniciens de la santé s'adresse en premier lieu aux professionnels non seulement en déplacement mais aussi au bureau, en tant qu'ouvrage de référence concis pour les formules, les coefficients et les valeurs de tableaux.

En conséquence, on y trouve également de nombreuses données pour les calculs approximatifs à effectuer sur place.

Par ailleurs, cet almanach se veut être une aide précieuse pour les non-spécialistes qui recherchent des valeurs empiriques dans les domaines du chauffage et de la ventilation, et qui souhaitent effectuer eux-mêmes rapidement les calculs correspondants.

Plusieurs parties de l'ouvrage tiennent compte des intérêts particuliers des architectes (principes d'élaboration de projets, choix du système de chauffage, notes techniques rapportées à la construction, coûts d'élaboration).

Concernant la matière, celle-ci est, dans la mesure du possible, traitée de manière strictement scientifique, et au besoin transposée dans des formules d'approximation et des tableaux.

Dans les différents tableaux, on s'est employé à indiquer les principes qui ont servi au calcul, pour évaluer clairement si, pour un cas donné de l'application, les mêmes conditions préliminaires sont réunies, même approximativement, ou pour pouvoir mesurer l'ampleur de majorations éventuellement nécessaires, etc.

Des exemples numériques sont destinés à faciliter l'application des différentes formules.

Il est prévu pour les années suivantes un supplément en images représentant alternativement une des parties du domaine de techniques de santé. 1 – Chaudières de chauffage, régulateurs, etc. 2 – Corps de chauffe, habillages, systèmes de chauffage. 3 – Vannes, purgeurs d'eau de pluie, tuyauteries, etc. 4 – Appareils de ventilation et instruments de mesure. 5 – Installations de bains, blanchisseries, appareils de désinfection, etc.

Vous voudrez bien retirer de l'annexe les détails de ce petit recueil, ainsi qu'une invitation faite aux fabricants de bien vouloir le soutenir.

L'établissement d'un annuaire des entreprises qui construisent des chauffages centraux doit permettre de diffuser des questions qui intéressent les milieux professionnels et permettent la parution d'articles sur la technique du chauffage.

J'adresse ici mes meilleurs remerciements à toutes les personnes qui m'ont soutenu dans l'élaboration de cet annuaire, et je prie également mes chers confrères de porter un jugement indulgent sur cet ouvrage. On envisagera volontiers des améliorations, et on utilisera des contributions adéquates avec indication des sources.

Winterthur, août 1896
Hermann RECKNAGEL (1869-1919)

TABLE DES MATIÈRES

1

DONNÉES DE BASE

1.1 • Données météorologiques de base	3
1.1.1 L'air	3
1.1.2 Température de l'air	11
1.1.3 Humidité de l'air	20
1.1.4 Rayonnement solaire	37
1.1.5 Vent	48
1.2 • Notions de base d'hygiène	53
1.2.1 Régulation thermique chez l'homme	53
1.2.2 Échanges thermiques chez l'homme	54
1.2.3 Confort thermique	54
1.2.4 Qualité de l'air intérieur	74
1.2.5 Normes sanitaires	84
1.3 • Données thermodynamiques de base	93
1.3.1 Grandeurs fondamentales	93
1.3.2 Gaz	105
1.3.3 Vapeurs	114
1.3.4 Air humide	126
1.3.5 Transmission de chaleur	137
1.3.6 Combustibles	189
1.3.7 Combustion	205
1.3.8 Moteurs thermiques	225
1.3.9 Piles à combustible	229
1.4 • Lois d'écoulement des fluides	233
1.4.1 Écoulement laminaire	233
1.4.2 Écoulement par un orifice	236
1.4.3 Diaphragmes et tuyères	237
1.4.4 Pression critique	239

1.4.5 Enthalpie et vitesse	239
1.4.6 Détente adiabatique	239
1.4.7 Calcul des pertes de charge	240
1.4.8 Perte de charge singulière	246
1.4.9 Perte de charge totale	249
1.4.10 Courbes caractéristiques des installations	251
1.5 • Acoustique élémentaire	253
1.5.1 Généralités	253
1.5.2 Caractéristiques physiques du son	253
1.5.3 Timbre et spectre acoustique	255
1.5.4 Évaluation du bruit	255
1.5.5 Propagation du son	260
1.5.6 Isolation acoustique aux bruits aériens	261
1.5.7 Insonorisation des constructions	265
1.5.8 Absorption acoustique	265
1.5.9 Acoustique des grands espaces	267
1.6 • Principales techniques de mesure	269
1.6.1 Généralités	269
1.6.2 Mesure de la pression	269
1.6.3 Mesure de la température	271
1.6.4 Mesure de la vitesse d'air	277
1.6.5 Mesure du volume et du débit	280
1.6.6 Calorimétrie	286
1.6.7 Mesure du niveau	291
1.6.8 Contrôle des produits de combustion	294
1.6.9 Hygrométrie	297
1.6.10 Appareils de mesures divers	300
1.7 • Bases techniques de régulation	309
1.7.1 Notions de base	309
1.7.2 Systèmes régulés	311
1.7.3 Équipements de régulation	317
1.8 • Règles de base pour les économies d'énergie	337
1.8.1 Définitions	337
1.8.2 Source d'énergie	337
1.8.3 Transformation de l'énergie	340
1.8.4 Consommation d'énergie	342
1.8.5 Externalisation/Sous-traitance	343

1.9 • Données fondamentales de la protection de l'environnement et de l'épuration de l'air	345
1.9.1 Émissions	345
1.9.2 Action des émissions	346
1.9.3 Mesures destinées à limiter les émissions de polluants dans le secteur de l'énergie	348
1.9.4 Bases juridiques	352
1.10 • Bases concernant la protection contre la corrosion et le tartre	361
1.10.1 Bases sur la corrosion	361
1.10.2 Corrosion dans les installations de chauffage à eau chaude	364
1.10.3 Corrosion dans les installations à vapeur à basse pression	377
1.10.4 Corrosion dans les chauffe-eau	380
1.10.5 Corrosion provenant de gaz de combustion	384
1.10.6 Formation de tartre	387
1.11 • Bases de Facility Management – Planification, élaboration et utilisation	393
1.11.1 Bases	393
1.11.2 Bases de calcul des coûts et de la rentabilité	394
1.11.3 Maître d'ouvrage, architecte, bureau d'études techniques – Du projet à la réalisation	403
1.11.4 Management technique des bâtiments	417
1.11.5 Simulation	439
1.12 • Bases de physique de la construction pour l'isolation thermique des bâtiments	449
1.12.1 Isolation thermique des bâtiments	449
1.12.2 Protection thermique d'été	460
1.12.3 Condensation sur les surfaces intérieures des pièces de construction extérieures	463

2

Chauffage

2.1 • Généralités	469
2.1.1 Exigences concernant les installations de chauffage	469
2.1.2 Codes couleurs et symboles graphiques utilisés dans la technique de chauffage	470
2.2 • Systèmes de chauffage	475
2.2.1 Chauffages divisés	475

2.2.2 Installations de chauffage central	516
2.2.3 Chauffage urbain et cogénération	583
2.3 • Composants des installations de chauffage	619
2.3.1 Générateurs de chaleur	619
2.3.2 Brûleurs et stockage du combustible	682
2.3.3 Systèmes d'évacuation des produits de combustion	729
2.3.4 Tuyauteries	751
2.3.5 Accessoires de tuyauterie	776
2.3.6 Machines et appareils	800
2.3.7 Appareils de mesure, de commande et de régulation	823
2.3.8 Surfaces de chauffe	875
2.3.9 Installations de prévention de la corrosion et de l'entartrage	898
2.3.10 Déperditions thermiques (ou émissions thermiques) des tuyauteries	901
2.3.11 Insonorisation	904
2.4 • Calcul et dimensionnement des installations de chauffage	907
2.4.1 Calcul des déperditions thermiques	907
2.4.2 Dimensionnement des générateurs de chaleur	924
2.4.3 Dimensionnement et calcul des réseaux de canalisations	926
2.4.4 Dimensionnement des équipements de chauffage individuels	949
2.5 • Installation du chauffage dans différents types de bâtiments	969
2.5.1 Décisions techniques et relatives au bâtiment	969
2.5.2 Bâtiments d'habitation	978
2.5.3 Immeubles de bureaux et bâtiments administratifs	984
2.5.4 Écoles et autres	991
2.5.5 Hôpitaux et cliniques	992
2.5.6 Bâtiments destinés aux manifestations sportives et autres	996
2.5.7 Chauffage en extérieur	1008
2.6 • Coûts de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire liés à la consommation	1011
2.6.1 Généralités	1011
2.6.2 Équations fondamentales des besoins énergétiques annuels de chauffage	1013
2.6.3 Besoins thermiques de chauffage et besoins en chaleur utile pour la production d'eau chaude sanitaire	1013
2.6.4 Besoins énergétiques annuels pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire	1017
2.6.5 Modulation du chauffage et influence de la régulation terminale	1027

2.6.6 Dépenses énergétiques annuelles, consommation annuelle de combustible et besoins annuels en énergie	1028
2.6.7 Vue d'ensemble des résultats	1030

3

Production d'eau chaude sanitaire

3.1 • Généralités	1035
3.1.1 Objectifs pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS)	1035
3.1.2 Exigences	1035
3.1.3 Classification des installations	1035
3.1.4 Symboles graphiques	1036
3.1.5 Réglementation relative à la sécurité et aux économies d'énergie	1038
3.2 • Systèmes de chauffage de l'eau chaude sanitaire	1039
3.2.1 Installations individuelles ou de groupes	1039
3.2.2 Installations collectives de production d'eau chaude sanitaire	1048
3.2.3 Production d'eau chaude sanitaire par pompe à chaleur	1060
3.3 • Composants des installations de production d'eau chaude sanitaire	1063
3.3.1 Générateurs de chaleur	1063
3.3.2 Chauffe-eau à accumulation	1066
3.3.3 Préparateurs d'eau chaude sanitaire à accumulation avec pompe de charge	1068
3.3.4 Chauffe-eau instantanés	1070
3.3.5 Systèmes de mélange eau froide/eau chaude	1071
3.3.6 Dispositifs de protection anticorrosion et antitartre	1073
3.3.7 Exigences sanitaires	1074
3.4 • Calcul des installations de production d'eau chaude sanitaire	1077
3.4.1 Débits et températures	1077
3.4.2 Besoins thermiques	1080
3.4.3 Puissance de la chaudière	1086
3.4.4 Volume du réservoir de stockage	1088
3.4.5 Aire des surfaces de chauffe du réservoir de stockage	1089
3.4.6 Vase d'expansion	1091
3.4.7 Réseau de tuyauteries	1091
3.4.8 Exemples	1099

4

Techniques de ventilation et de climatisation

4.1 • Principes de la ventilation et de la climatisation d'air	1105
4.1.1 Objectifs de la ventilation et de la climatisation d'air	1105
4.1.2 Classification des techniques de ventilation et climatisation d'air	1105
4.1.3 Terminologie des installations de ventilation et climatisation d'air	1106
4.2 • Systèmes de ventilation et de climatisation	1109
4.2.1 Ventilation naturelle	1109
4.2.2 Installations de traitement de l'air	1114
4.2.3 Traitement thermique à partir des surfaces d'un local	1129
4.3 • Composants	1153
4.3.1 Ventilateurs	1153
4.3.2 Batterie de chauffage et de refroidissement d'air	1179
4.3.3 Filtres à air	1193
4.3.4 Humidificateurs et déshumidificateurs d'air	1207
4.3.5 Distribution de l'air	1225
4.3.6 Dispositifs de réduction de la puissance acoustique	1288
4.3.7 Appareils de mesure, de contrôle et de régulation	1325
4.3.8 Récupération de la chaleur	1371
4.3.9 Sécurité incendie	1388
4.4 • Matériels de traitement de l'air	1443
4.4.1 Centrales	1445
4.4.2 Appareils décentralisés	1457
4.4.3 Appareils spéciaux	1464
4.5 • Calculs des installations de ventilation et de climatisation (installations de traitement de l'air)	1481
4.5.1 Détermination du débit volume d'air	1481
4.5.2 Dimensionnement du système de conduits aérauliques	1488
4.5.3 Installations frigorifiques	1489
4.5.4 Installations d'humidification de l'air avec laveur	1527
4.5.5 Déshumidification	1530
4.5.6 Installations de climatisation	1532
4.6 • Mise en place des installations de traitement de l'air dans différents bâtiments et locaux	1539
4.6.1 Décisions techniques relatives à la construction	1539

4.6.2 Immeubles d'habitation	1549
4.6.3 Immeubles de bureaux et immeubles administratifs	1555
4.6.4 Écoles, musées et locaux similaires	1604
4.6.5 Hôpitaux	1612
4.6.6 Bâtiments hôteliers et locaux similaires	1626
4.6.7 Magasins	1628
4.6.8 Bâtiments et installations d'exploitation	1634
4.6.9 Bâtiments destinés au sport et aux rassemblements	1671
4.6.10 Autres bâtiments et annexes de bâtiments	1678
4.6.11 Autres espaces	1691
4.7 • Aspiration d'air industriel	1703
4.7.1 Généralités	1703
4.7.2 Dispositifs de captage	1704
4.7.3 Champs des vitesses pour les orifices d'admission	1706
4.7.4 Bases de calcul	1710
4.7.5 Mise en place des dispositifs de captage	1713

5

Technique du froid

5.1 Généralités	1729
5.2 • Principes théoriques	1731
5.2.1 Système de production du froid par compression	1731
5.2.2 Système de production du froid par compression d'air	1741
5.2.3 Système de production du froid par absorption	1741
5.2.4 Système de production du froid par adsorption	1744
5.2.5 Système frigorifique à jet de vapeur	1748
5.2.6 Système de production du froid thermoélectrique	1749
5.2.7 Énergie – Coefficient d'utilisation	1750
5.3 • Composants et fluides utilisés dans une installation frigorifique	1751
5.3.1 Fluide frigorigène	1751
5.3.2 Couples de substances actives dans les installations à absorption	1759
5.3.3 Huile pour machines frigorifiques	1761
5.3.4 Saumure	1761
5.4 • Composants d'une machine frigorifique	1765
5.4.1 Compresseurs à pistons	1765

5.4.2 Compresseurs centrifuges	1772
5.4.3 Condenseurs	1774
5.4.4 Évaporateurs (refroidisseurs)	1780
5.4.5 Éléments auxiliaires du circuit de fluide frigorigène	1785
5.4.6 Moteurs d'entraînement du compresseur	1786
5.4.7 Appareils de mesure, de commande et de régulation	1787
5.4.8 Installation de tours aéroréfrigérantes	1795
5.5 • Conception des installations frigorifiques	1803
5.5.1 Généralités	1803
5.5.2 Condenseurs à air	1804
5.5.3 Refroidissement par frigoporteur	1806
5.5.4 Entraînement par moteur thermique	1819
5.5.5 Équipements collectifs de production de froid	1821
5.5.6 Circuit de tuyauteries de fluide réfrigérant	1824
5.5.7 Réseaux de distribution d'eau glacée	1827
5.6 • Calcul des installations frigorifiques destinées au rafraîchissement de l'air	1829
5.6.1 Dimensionnement de l'installation frigorifique	1829
5.6.2 Comportement des machines frigorifiquesb à charge partielle	1830
5.6.3 Conception de l'installation frigorifique	1840
5.6.4 Accumulateurs de froid	1843
5.6.5 Récupération de chaleur/pompe à chaleur	1849
5.7 • Régulation des installations à détente directe	1855
5.7.1 Régulation des installations à détente directe	1855
5.7.2 Régulation dans le cas du refroidissement par frigoporteur	1862
5.7.3 Régulation du circuit d'eau glacée	1863
5.7.4 Régulation des groupes de production d'eau glacée	1864
5.8 • Conception des installations frigorifiques, salles des machines, bruits	1867
5.8.1 Sites d'installation	1867
5.8.2 Émetteurs de froid	1868
5.8.3 Groupes de fluides frigorigènes	1868
5.8.4 Prescriptions relatives au site d'installation	1869
5.8.5 Salles des machines	1870
5.8.6 Transmission de bruit	1872

6

Réglementation et normalisation françaises

6.1 • Généralités	1877
Réglementation	1877
Normes et autres textes techniques	1877
Les normes DIN	1877
ICS : classement international des normes	1878
6.2 • Données de base	1879
6.3 • Chauffage	1883
Généralités	1883
Systèmes de chauffage	1883
Composants des installations de chauffage	1884
Calcul et dimensionnement des installations de chauffage	1886
Installations de chauffage dans différents types de bâtiments	1886
Coûts de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire liés à la consommation	1886
6.4 • Production d'eau chaude sanitaire	1889
Généralités	1889
Systèmes de chauffage de l'eau	1889
6.5 • Techniques de ventilation et de climatisation	1891
Réglementation	1891
Installations classées pour la protection de l'environnement	1892
Normalisation	1892
Recommandations	1892
6.6 • Technique du froid	1893
Réglementation	1893
Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)	1894
Normalisation	1894
Recommandation	1895
Annexe A.1 • Unités et symboles	1899
Annexe A.2 • Tables de conversion	1902
Index	1907

1

Données de base

1.1 • DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES DE BASE

Remaniement du D^r Jürgen Masuch, Ingénieur à Benningen

1

DONNÉES DE BASE

1.1.1 L'air

-1 Air pur

L'air enveloppe le globe terrestre de toutes parts. La couche inférieure à la surface de la Terre est connue sous le nom de *troposphère* et atteint jusqu'à 11 kilomètres d'altitude sous nos latitudes. Suivent la *stratosphère* (11 à 75 km) et l'*ionosphère* (75 à 600 km).

La pression sur la surface de la Terre résultant du poids de l'air s'élève à 1,013 bar.

Avec une masse volumique constante, l'air atteindrait donc selon les calculs une hauteur d'atmosphère de 7 990 m, où la masse volumique de l'air sec à 0 °C est de 1,293 kg/m³, et une accélération de la pesanteur de 9,81 m/s² :

$$h = \frac{P}{\rho g} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,293 \cdot 9,81} = 7\,990 \text{ m}$$

Mais en réalité, la masse volumique et la température de l'air diminuent avec l'altitude (tableau 1.1.1-1), voir aussi DIN ISO 2533 (12.79).

Tableau 1.1.1-1 – Diminution de la pression atmosphérique et de la température avec l'altitude (norme sur l'atmosphère, DIN ISO 2533:1979-12)

Altitude (km)	0	0,5	1,0	2	3	4	6	8	10	15	20
Pression de l'air (mbar)	1 013	955	899	795	701	616	472	356	264	120	55
Température (°C)	15	11,8	8,5	2,04	-4,5	-11	-24	-37	-50	-55	-55

Diminution de la température avec l'altitude. De 11 à environ 20 km, température pratiquement constante à environ -55 °C. Hausse de température due à la couche d'ozone jusqu'à environ 0 °C puis diminution à nouveau.

Tableau 1.1.1-2 – Composition de l'air sec pur

Gaz	Formule	% massique	% volumique
Oxygène	O ₂	23,01	20,93
Azote	N ₂	75,51	78,10
Argon	Ar	1,286	0,9325
Dioxyde de carbone	CO ₂	0,04	0,03
Hydrogène	H ₂	0,001	0,01
Néon	Ne	0,0012	0,0018
Hélium	He	0,00007	0,0005
Crypton	Kr	0,0003	0,0001
Xénon	Xe	0,00004	0,000009

D'un point de vue chimique, l'air est un mélange de différents gaz présents en permanence, parmi lesquels l'azote, l'oxygène, l'argon et le dioxyde de carbone occupent une place prépondérante et qui, ensemble, représentent près de 99,99 % de la masse de l'air (tableau 1.1.1-2). Que ce soit dans l'espace ou dans le temps, la composition de l'air ne change que très peu à la surface terrestre, alors qu'à de hautes altitudes, ce sont les gaz les plus légers qui prédominent, à savoir l'hydrogène et l'hélium. La teneur en oxygène diminue de 0,3 %/km. Outre les gaz permanents, on trouve dans l'air de la vapeur

d'eau en quantité variable. Le taux le plus faible est de presque 0 % (par des températures très basses), le taux le plus élevé est d'environ 3 % en masse et d'environ 4 % en volume.

-2 Polluants

Voir paragraphe 1.9 : Données fondamentales de la protection de l'environnement et de l'épuration de l'air page 345.

-2.1 Gaz et vapeurs¹

Dans l'air qui nous entoure, indépendamment de la région, du climat, de la saison et d'autres facteurs, on trouve aussi de nombreux gaz et vapeurs, dus en général aux industries, usines, foyers et moyens de transport. Parmi ceux-ci, les plus importants sont les suivants :

L'ozone – O_3 –, produit par les décharges électriques, les cycles d'oxydation et de vaporisation, est présent en très faible quantité dans l'atmosphère (de 0,01 à 0,02 mg/m^3). Son odeur est piquante. Même à une concentration inférieure à 0,02 mg/m^3 , il cause déjà des irritations. La richesse en ozone de l'air marin ou montagnard est un indicateur du degré de pureté de l'air, car l'ozone réagit rapidement au contact d'un air pollué. Le manque d'ozone dans l'atmosphère – principalement au-dessus de l'Antarctique, mais aussi au-dessus de l'Arctique – est provoqué par les chlorofluorocarbones (CFC) contenus dans les aérosols et les fluides frigorigènes (voir paragraphe 5.3.1 page 1751). Le rayonnement ultraviolet du Soleil traverse ainsi l'atmosphère sans être filtré et arrive en masse jusqu'à la surface de la Terre, avec les conséquences sur le climat que l'on connaît. Les risques de maladies dermatologiques augmentent également (cancer de la peau).

Le peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée) – H_2O_2 – se forme comme l'ozone, mais en quantités plus importantes, notamment dans les précipitations : environ 200 mg/m^3 .

Le monoxyde de carbone – CO –, inodore et très toxique, naît de la combustion incomplète lors du chauffage ou d'autres processus de combustion, c'est pourquoi il est présent dans les villes et les zones industrielles. Les véhicules et les combustibles domestiques en sont les principales sources. On le retrouve dans les gaz d'échappement avec un pourcentage en volume allant jusqu'à 8 %, et la réglementation autorise, au point mort, un pourcentage en volume de 3,5 %. On le trouve également dans la fumée de cigarette. Il est particulièrement dangereux, même à très faible dose.

Présence dans les rues avec trafic normal : 25 ppm = 30 mg/m^3 .

Présence dans les rues avec trafic élevé : 50 ppm = 60 mg/m^3 .

Présence dans les gaz d'échappement et les fumées : 3,0 % en volume = 36 000 mg/m^3 .

On peut également trouver des concentrations de 50 mg/m^3 et plus dans les habitations, surtout lorsqu'il y a des fumeurs.

Le dioxyde de carbone – CO_2 – sa faible quantité dans l'air augmente lentement chaque année d'environ 1 ppm lors des processus de combustion d'éléments fossiles, ce qui donne une teneur actuelle d'environ 340 ppm. D'aucuns craignent une influence sur le climat, à savoir une augmentation de la température de l'air (effet de serre), car la chaleur qui se dégage de la surface du globe est piégée lorsqu'il y a des pics de CO_2 dans l'atmosphère (il absorbe beaucoup de chaleur). Solutions possibles : réduire la consommation de combustibles fossiles grâce à des économies d'énergie (récupération de la chaleur), à la substitution par l'énergie nucléaire ou la combustion d'hydrogène.

Par temps de smog (en anglais, *smog* : composition entre *smoke* et *fog*, c'est-à-dire mélange de fumées et de brouillard), on note une hausse jusqu'à 450 ppm en pleine journée².

Le dioxyde de soufre – SO_2 – naît de la combustion de charbon ou de fioul, c'est pourquoi il est présent notamment dans les secteurs industriels. Pour les quantités des émissions selon les sources, voir le tableau 1.9.1-2 page 347.

Le gaz de ville et le gaz naturel ne contiennent pratiquement pas de soufre et sont ainsi les combustibles les plus propres. De plus, ils produisent relativement peu de CO_2 lors de leur combustion grâce à leur taux élevé en hydrogène. Avec le fioul, ce sont de plus en plus des pétroles bruts pauvres en soufre qui sont traités. Lors de la combustion du gazole (ou fioul) avec 0,3 % de soufre, les produits de combustion contiennent 0,5 g de SO_2 par m^3 , et ceux d'une centrale à charbon sans désulfurisation de 1 à 3 g de SO_2 par m^3 .

Le SO_2 s'oxyde progressivement dans l'air pour se transformer en SO_3 , lequel au contact de l'air humide se transforme en acide sulfurique (H_2SO_4).

1. Manuel VDI : Maintien de la propreté de l'air. Düsseldorf, Édition VDI 1959/2003. 6 volumes (plus de 500 directives), Bases météorologiques dans le volume 1, météorologie de l'environnement.

Lahnmann, E. : Ges.-Ing. 5/75 page 121/6 et 1/2-79 page 17/22.

Fanger, P. O. : Ki 2/82 page 437/8.

Baumüller, J. et Reuter, U. : Génie thermique 5/82 page 185/8 et KKT 11/82 page 486.

Kremer, H. : Rapport VDI 486 page 25/9 (1983).

2. Lahnmann, E. : Liste d'écrits WaBoLu 52, 1981 pages 251 et suivantes.

Le SO_2 est présent dans l'air à raison d'environ 0,1 à 1 mg/m^3 (0,04 à 0,4 ppm), taux variable en fonction du lieu et du moment, nettement plus élevé en hiver qu'en été. Nuisible pour la flore dès 0,5 mg/m^3 , voire moins pour certaines plantes. Réaction sur l'être humain dès 0,5 mg/m^3 (voir directive générale VDI 2310)¹. Odeur désagréable, irritation des muqueuses, nocif.

L'ammoniac – NH_3 – naît lors de processus de décomposition et de putréfaction, voire de carbonisation. Plus léger que l'air, s'échappe dès qu'on le libère. Présent dans l'environnement à raison de 0,02 à 0,05 mg/m^3 .

Les gaz nitreux – NO_x (N_2O , NO , NO_2) – résultent de la circulation automobile et des installations de chauffage à des températures de combustion dépassant 1 300 °C. D'un brun mordoré, odeur piquante, présents dans l'air à raison de 0,1 à 0,5 mg/m^3 (NO_2). Toxiques, avec les mêmes effets que le SO_2 .

Autrefois contenu dans l'essence en tant qu'antidétonant, le plomb sous forme d'aérosol dans l'atmosphère provient principalement des gaz d'échappement des véhicules. Très toxique, sa concentration moyenne dans l'air varie entre 1 et 3 $\mu\text{g/m}^3$ et, aux heures de pointe de circulation, entre 25 et 30 $\mu\text{g/m}^3$. Restriction en raison de la loi sur le plomb dans l'essence. Depuis la réduction de la teneur en plomb autorisée par le TA Luft (le guide technique pour maintenir l'air propre), sa concentration doit être $\leq 2 \mu\text{g/m}^3$, d'où réduction immédiate de la teneur en plomb dans l'atmosphère. Loi sur le plomb dans l'essence, modification du 18.02.1987. Essence contenant du plomb interdite sur tout le territoire. Recommandation de l'OMS $\leq 0,5\text{--}1 \mu\text{g/m}^3$, et d'après le nouveau TA Luft (2001), sa concentration doit être $\leq 0,5 \mu\text{g/m}^3$.

D'autres gaz et vapeurs non régulièrement détectables dans l'air proviennent d'exhalations et d'odeurs des animaux et des plantes, ainsi que des travaux effectués en usine, notamment des usines chimiques et des fonderies.

Par temps de smog, on a mesuré des concentrations de plus de 4 mg/m^3 en poussières et en SO_2 . Si l'on compare les différents types de pollution de l'environnement, il faut prendre en compte non seulement les principaux agents tels CO , SO_2 , NO_x , etc., mais aussi les zones les plus exposées, comme les centres-villes et les sites industriels.

Toutefois, du fait que la propagation des polluants a été localement moins régulièrement mesurée, des changements significatifs sont apparus au cours des dernières décennies. La qualité de l'atmosphère dans les régions industrielles s'est nettement améliorée (filtres à poussières, systèmes de désulfuration et de dénitrification dans les centrales électriques, très hautes cheminées qui rejettent les résidus plus loin). Mais la situation a empiré dans les zones rurales, qui reçoivent désormais davantage d'émissions.^{2,3}

En général, la quantité de polluants dans l'air augmente chaque jour et tous les ans. Ainsi, le SO_2 provenant des systèmes de chauffage est émis principalement en hiver. Une absorption de substances nocives peut survenir avec la pluie, la neige, l'ozone et l'effet filtrant de la végétation.

Dans les zones d'habitation, outre les composants mentionnés ci-dessus, on peut encore détecter occasionnellement d'autres impuretés de l'air. Le formaldéhyde peut provenir de panneaux de particules de bois et de mousses stratifiées d'aminoplaste. Teneur autorisée dans les logements : 0,12 mg/m^3 , soit 0,1 ppm. Les valeurs mesurées⁴ atteignent 0,6 mg/m^3 . En outre, on trouve du pentachlorophénol (PCP) dans les mélanges de traitement du bois.

Dans de nombreux pays, on a détecté des particules radioactives dans l'air des habitations. Elles ont pour origine les gaz rares radioactifs radon et thoron, qui résultent d'émanations d'uranium/radium, voire de thorium, et sont présents partout dans la nature. Provenant du sol, de matériaux de construction ou de l'eau présente dans l'air, le radon et le thoron se désagrègent par la suite en plomb ou en polonium, qui se déposent sur des particules de poussière dans l'air et sont inhalés par les poumons. D'où apparition du cancer des poumons, comme ce fut le cas chez des mineurs, particulièrement exposés. On a récemment constaté aux États-Unis que le degré de menace par le radon est nettement plus grand qu'on ne le supposait autrefois. C'est la deuxième cause de cancer du poumon après le tabac.

Malgré une large dispersion, la concentration moyenne de radon mesurée dans l'air des logements est de l'ordre de 50 Bq/m^3 , mais la valeur critique largement répandue est actuellement estimée à 500 Bq/m^3 . Le radon provient principalement du sol. Élimination de préférence par aération des sous-sols (caves)⁵.

1. VDI 2310. Valeurs maximales de nuisance. Présentation détaillée, constamment remise à jour. Feuilles 1 à 37. Nouvelles éditions : feuillet 6, L'ozone pour protéger la végétation, 06.02, feuillet 15, L'ozone pour protéger l'homme, 12.01, feuillet 26, 11.01 (fluorures) feuillet 27, 9.98 (plomb), feuillet 28, 3.96 (cadmium), feuillet 29, 11.00 (thallium), feuillet 30 (nickel) E 11.03, feuillet 31 (zinc), E 11.03, feuillet 37, 4.98 (molybdène), ces feuilles surtout pour la protection des animaux utilisés en agriculture.

2. Kasten, F., entre autres : BMFT – rapport de recherche T 84-125.

3. VDI 2078:1996-07.

4. Wanner, H. U. : TAB 8/83 page 645/8.

5. Urban, M. : Ki 12/84 page 507/512.

Recommandation de la commission de protection contre les rayonnements, Journal officiel du 08.01.1986 et CCI 2/86.

Indoor Air. An Integrated Approach. Elsevier London (1995), entre autres : page 123: Atzmüller, Steinhäusler : Radon ... in Indoor Environments. Page 178: Steinhäusler : Radon.

D'autres gaz et vapeurs apparaissent fréquemment dans les entreprises industrielles, selon le type de travail, et parfois en quantités dangereuses. On prend donc des dispositions hygiéniques particulières pour protéger les personnes travaillant dans de tels secteurs (voir également le tableau 1.2.3-11 page 70). Pour les installations industrielles, existent en outre « l'Ordonnance sur les lieux de travail » et les « Directives concernant le lieu de travail » qui posent les exigences à respecter sur le lieu de travail¹. L'Institut des coopératives pour la sécurité du travail a rassemblé, dans la « liste des valeurs limites 2003 »², la plupart des valeurs limites ayant trait aux effets chimiques, biologiques et physiques, valeurs cruciales pour préserver la santé des employés sur le lieu de travail :

- TGRS 900 Valeurs limites dans l'air sur le lieu de travail ;
- TGRS 903 Valeurs de tolérance biologique sur le lieu de travail ;
- TGRS 905 Liste de substances cancérigènes altérant le patrimoine génétique et menaçant la fertilité ;
- TGRS 906 Liste des procédés et des activités cancérigènes ainsi que les valeurs limites pour l'ensemble des nuisances connues à l'heure actuelle dans les locaux (bruit, vibrations, pollution thermique, rayonnement, électricité, pollutions biomécaniques et indications sur leurs effets biologiques). L'ordonnance sur les matières dangereuses réunit des considérations essentielles par rapport aux risques.

Bien que tous les problèmes inhérents étudiés n'aient pas d'impact sur l'air extérieur et donc sur la météorologie, on a déjà recours à ce catalogue exhaustif.

Pour les odeurs, voir paragraphe 1.2.3-5.2 page 68.

Les principales prescriptions réglementaires sont résumées dans le TA Luft (guide technique sur la pureté de l'air).³

-2.2 Poussière³

Définition

Par poussière on entend des particules solides en suspension et dispersées dans l'air, de forme, structure et masses volumiques variables, qui peuvent être classées suivant leur calibre (poussière grosse > 10 µm, fine de 1 à 10 µm, et très fine < 1 µm). Dimensions des particules mesurables entre environ 0,02 et 1 000 µm. La poussière fine reste en suspension dans l'air calme, puis retombe plus ou moins lentement. La vitesse de sa chute dans un air calme à 20 °C est déterminée par la loi de Stokes (tableau 1.1.1-3) :

$$v = 3.10^4 \cdot q \cdot d^2$$

v = vitesse de chute en m/s

q = densité en kg/m³

d = diamètre équivalent en m

Les particules inférieures à 0,1 µm sont qualifiées de poussière colloïdale, leur mouvement est similaire à celui de molécules (mouvement brownien) et il n'obéit pas à la loi de Stokes. Seules sont visibles les particules > 20 à 30 µm.

Tableau 1.1.1-3 – Vitesses de chute des particules de poussière dans un air à 20 °C selon la loi de Stokes

Diamètre équivalent en µm	Vitesse de chute en cm/s		Tracé de chute par heure en m	
	$q = 1\,000 \text{ kg/m}^3$	$q = 2\,000 \text{ kg/m}^3$	$q = 1\,000 \text{ kg/m}^3$	$q = 2\,000 \text{ kg/m}^3$
10	0,3	0,6	10,8	21,6
1	0,03	0,06	0,108	0,216
0,1	0,00003	0,00006	0,00108	0,00216

Autres définitions

Suie : substance carbonée, composée essentiellement de fines particules de carbone pur cristallisées, générée par une combustion incomplète. Gênante du fait de la formation de poussières. Suie corrosive, dont les particules ont une grosseur d'environ 1 µm et plus.

Fumée : substance étrangère à l'air provenant de la combustion et contenant des cendres, de la suie, des goudrons, des alliages métalliques, de l'eau, des gaz. Diamètre des particules entre 0,01 et 1,0 µm (caractéristique : recondensation puis agglomération à partir de la phase gazeuse).

1. Pour la France, voir le code du Travail et tous les textes sur les métaux lourds, les VLE et les polluants dans certains bâtiments.

2. BIA-Report 2/2003 : liste des valeurs limite 2003/L'équivalent en France est l'INRS.

Association générale des coopératives professionnelles (avril 2003). Autres informations détaillées.

3. Première prescription générale administrative de la loi fédérale relative à la protection contre les nuisances (instruction technique pour le maintien de l'air propre – TA Luft) Décision du cabinet 12.12.2001.

Aérosols : substances solides ou liquides très finement dispersées dans un gaz, granulométrie allant de 10^{-4} à 10^3 μm (depuis de petits ions jusqu'au pollen végétal).

Vapeur : accumulation à peine perceptible de particules extrêmement fines dans l'air. Visibilité < 1 km. Taille des particules le plus souvent < 1 μm .

Cendres volantes : composants solides rejetés par des cheminées (ne devraient apparaître qu'occasionnellement dans certains foyers avec des combustibles solides).

Brouillard : gouttelettes d'eau finement réparties dans l'air, d'une grosseur allant de 1 à 50 μm . Visibilité < 1 km.

Émissions : rejets d'impuretés dans l'air (provenant par exemple des cheminées, des conduits d'aération, etc.) ; peuvent être solides, liquides ou gazeuses ; indiquées en g/m^3 , en g/Nm^3 ou en $\text{g/m}^2\cdot\text{h}$ notamment.

Retombées : retour des substances polluantes émises dans l'air à proximité du sol.

La **valeur MAK**¹ correspond à la valeur maximale autorisée de concentration des substances étrangères à l'air se trouvant à proximité du sol par retombée de poussières. La concentration moyenne maximale limite s'obtient en moins d'une demi-heure. Concentration autorisée sur une courte période : elle est par exemple de 0,40 mg/m^3 pour le SO_2 , sa concentration pendant une longue durée ne devant pas dépasser 0,14 mg/m^3 selon la loi sur la protection contre les nuisances. Concernant le NO_2 , sa concentration sur une courte période peut atteindre 0,30 mg/m^3 , et ne peut dépasser 0,10 mg/m^3 . Quant au formaldéhyde, on admet une concentration de 0,07 mg/m^3 sur une courte durée et 0,03 mg/m^3 sur une longue période.

Composition de la poussière :

- **composants inorganiques** tels que sable, suie, charbon, cendres, chaux, métaux, noir minéral, ciment, etc. ;
- **composants organiques** comme particules végétales, graines, pollen, spores, mais aussi cheveux, fibres textiles, farine, etc. ;

Apparition de la poussière : la poussière est générée naturellement par l'érosion et la désintégration de matière, les météores, les vents et tempêtes, les incendies, les éruptions volcaniques, la décomposition, etc. La poussière résulte également de l'activité humaine, comme le chauffage, mais provient aussi des combustions, des travaux mécaniques et chimiques, de la circulation routière et du trafic ferroviaire, de l'usure des vêtements et des outils, etc. C'est surtout dans des processus industriels bien déterminés que l'on trouve de grandes quantités de poussière. Tel est le cas dans les cimenteries, les usines textiles, les fonderies, les salles de nettoyage, les machines à sabler, etc. (poussière industrielle).

Concentration

La teneur en particules de poussière de l'air libre dans l'atmosphère est extrêmement variable et dépend fortement du temps, notamment du vent et de la pluie, ainsi que de l'heure du jour et de la saison. Elle est comprise entre 0 et 0,2 mg/m^3 en moyenne annuelle, et est plus élevée dans les villes qu'à la campagne.

Tableau 1.1.1-4 – Teneur moyenne de l'air en poussière^{*)}

Lieu	Concentration moyenne en mg/m^3	Dimension la plus fréquente du grain de poussière en μm	Plus gros grain de poussière, dimension approximative en μm
Région rurale			
Par temps de pluie	0,05	0,8	4
Par temps sec	0,10	2,0	25
Agglomération	0,10	7,0	–
Zone d'habitation	0,30...0,5	20	100
Zone industrielle	1,0...3,0	60	1 000
Régions industrielles			
Habitations	1...2	–	–
Grands magasins	2...5	–	–
Ateliers	1...10	–	–
Cimenteries	100...200	–	–
Air dans les mines	100...300	–	–
Gaz d'échappement des chaudières de coke			
Manuellement	10...50	–	–
Mécaniquement	100...200	–	–
Gaz d'échappement des foyers de combustion	1 000...15 000	–	–

^{*)} Voir aussi le manuel VDI : *Pour maintenir un air plus propre*, 6 volumes avec plus de 500 directives générales, de 1959 à 2008.

Nombreuses sont les méthodes pour mesurer les quantités de poussière. Les mesures entre elles ne sont pourtant pas comparables. Vous trouverez des indications sur la teneur en poussière de l'air dans le tableau 1.1.1-4. Pour donner un ordre de grandeur, il existe près de 10 millions de particules de poussière inférieures à 1 μm . La concentration moyenne de l'air en poussière par m^3 ($10^7/\text{m}^3$) est environ dix fois plus élevée en ville. Dans des espaces fumeurs, on a enregistré environ 1 000 millions de particules par m^3 ($10^9/\text{m}^3$). L'hiver, avec les chauffages, la teneur en poussière de l'air est en général plus élevée qu'en été, où la poussière résultant de la circulation (usure du revêtement des routes) prédomine. C'est après la pluie que l'air est le plus propre. Dans les villes, on a trouvé en examinant la répartition de la poussière à la verticale qu'une première couche de poussière s'étend environ jusqu'à 3 ou 4 m au-dessus de la surface du globe (poussière provenant de la circulation), une deuxième couche s'étend au-dessus des toits (poussière de chauffage). La concentration en poussières est à peu près proportionnelle au nombre d'habitants.

Limite supérieure présumée raisonnable pour des précipitations de poussières, en particulier de suie¹ :

- en général 10 à 15 g/m^2 par mois ;
- dans les zones industrielles 20 à 30 g/m^2 par mois ;
- dans les régions thermales 2 à 10 g/m^2 par mois.

Dimension et nombre des particules de poussière

Selon les figures 1.1.1-1 et 1.1.1-2, des particules de taille inférieure à 1 μm constituent environ :

- 30 % de la masse de toutes les particules ;
- 70 % de la surface de toutes les particules ;
- 99,9 du nombre de toutes les particules.

Répartition moyenne par taille des particules de poussière dans l'air des grandes villes, voir tableau 1.1.1-5. *Explication*

La quantité normale de poussière contenue dans l'air entraîne une certaine altération de la respiration, mais n'est pas dangereuse pour la santé, car le corps est muni de défenses dans les voies respiratoires (muqueuses). Par contre, la poussière industrielle s'avère, dans certaines conditions, très préjudiciable, voire dangereuse pour les poumons ; elle provoque des maladies telles que la silicose dans les mines, la byssinose contractée dans l'industrie textile en travaillant le coton, l'asbestose au contact de l'amiante.

D'où contrôle réglementaire. Combattre la poussière est indispensable, afin d'éviter :

1. l'altération de la respiration ;

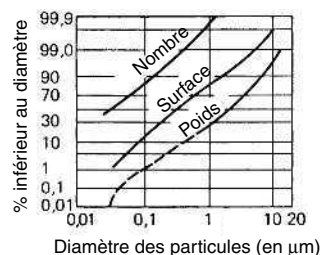


Fig. 1.1.1-1 : Répartition par taille de la poussière présente dans l'atmosphère (source : Camfil).

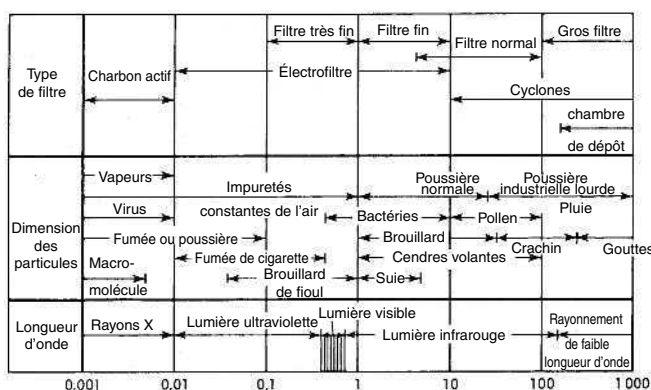


Fig. 1.1.1-2 : Dimension des particules de divers types de poussières présentes dans l'air [Dimension des particules de poussière en μm (1 micromètre = 1/1 000 mm)].

1. Lahmann E. et W. Fett : Ges.-Ing. 5/80, page 149/55
Valeurs MAK: voir tableau 1.2.3-12.

2. l'altération de l'hygiène et de la santé (par la poussière industrielle) ;
3. la formation de brouillard dans des zones de condensation (voiles de vapeur au-dessus des villes) et, de ce fait, diminution de l'ensoleillement, notamment en hiver ;
4. l'endommagement des machines-outils ;
5. les réactions allergiques chez certaines personnes (par exemple rhume des foins, causé par le pollen).

Tableau 1.1.1-5 – Répartition moyenne par taille des particules de poussière dans l'air des grandes villes pour une masse volumique de $0,75 \text{ mg/m}^3$ ($\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$)

Dimensions en μm	Taille moyenne en μm	Nombre de particules par m^3 ($\times 1\,000$)	Volumes (%) = Masse (%) $\approx$
10... 30	20	50	28
5... 10	7,5	1 750	52
3... 5	4	2 500	11
1... 3	2	10 700	6
0,5... 1	0,75	67 000	2
0... 0,5	0,25	910 000	1
			100

La *poussière fine*, qui pénètre jusque dans les poumons et qui s'y dépose, est nuisible à la santé. La fig. 1.1.1-3 décrit la courbe de dépôt dans les alvéoles pulmonaires. Les *appareils de mesure de la poussière fine* devraient avoir une réponse correspondant à la courbe de dépôt dans les alvéoles. En 1959, lors de la convention internationale de Johannesburg, une loi de réponse pour les appareils de mesure de la poussière a été créée, qui se rapproche de celle pour les poumons : les plus petites particules doivent être saisies à 100 %, celles de $5 \mu\text{m}$ à 50 % et celles $> 7 \mu\text{m}$ n'être jamais enregistrées.

Dans l'industrie textile aux États-Unis, notamment dans le secteur du coton, des limitations drastiques ont été imposées par les services de santé (OSHA) concernant la quantité de poussière pénétrant dans les poumons sur le lieu de travail : elle ne doit pas dépasser $0,2 \text{ mg/m}^3$ dans l'air pour de la poussière fine inférieure à $15 \mu\text{m}$. Forte répercussion sur les installations d'aération. En Allemagne, dans les usines textiles, la teneur globale en poussière est limitée à $1,5 \text{ mg/m}^3$ (valeur MAK). Mais seule la poussière fine nuit à la santé (fig. 1.1.1-3). Nouvelle concentration recommandée de $0,05 \text{ mg/m}^3$.¹

Une directive européenne² a récemment permis une prise de conscience générale quant à l'importance des poussières fines, avec l'établissement de valeurs limites qui, si elles ne sont à l'heure actuelle généralement pas tenables, constituent un signal d'alarme.

Outre les poussières fines contenues dans l'air extérieur faisant l'objet de la directive européenne, l'attention est portée également de plus en plus sur les concentrations de poussières fines dans l'air intérieur des locaux, notamment sur le rôle des différents revêtements de sol, les moquettes ayant un effet tampon sensible³.

-2.3 Germes⁴

Les germes sont de *petits êtres vivants* (micro-organismes, microbes, bactéries) d'origine végétale ou animale. Ils se présentent sous la forme de sphère, de cylindre, de spirale, de fil ou autres, et se multiplient extrêmement vite par division cellulaire. Épaisseur de $0,5$ à $1,0 \mu\text{m}$, longueur de 1 à $5 \mu\text{m}$. Présence dans l'air extrêmement variable. La plupart d'entre eux adhèrent aux particules de poussière $> 2 \mu\text{m}$, si bien que leur nombre croît lorsqu'il y a augmentation de la poussière dans l'air. À titre indi-

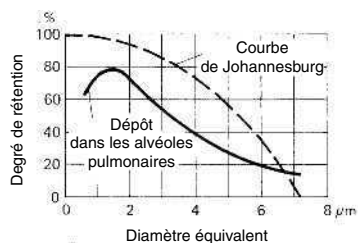


Fig. 1.1.1-3 – Dépôt de la poussière fine dans les poumons.

1. BIA-Report, Liste des valeurs limites 2003, page 189.

2. Directive européenne « Poussières », en vigueur depuis le 01/01/2005.

3. Winkens, A. et Praetorius, F. : Concentration des poussières fines dans l'air intérieur des locaux, VDI Berichte 1921, 2006, page 111-119.

4. Schütz, H. : Génie climatique. 1970. Cahier 4 page 12/29.

Wanner, H. U. : CCI N° 9. 1971.

Indoor Air. An Integrated Approach. Elsevier London (1995).

catif, la teneur en germes/particules peut avoir une valeur de 1 : 100. À la campagne, on trouve en moyenne à l'air libre 100 à 300 germes par m³, contre 1 000 à 5 000 dans les rues des villes. La teneur en germes est généralement plus élevée dans les lieux fermés, surtout en cas de forte densité d'occupation.

Seule une très faible quantité de germes est porteuse de maladies, et ceux-ci sont la plupart du temps détruits rapidement par temps sec. Maladies transmises assez rarement par l'air, cependant, les gouttelettes produites en toussant ou en éternuant constituent un danger. Les bactéries *pathogènes* (porteuses de maladie) transmettent beaucoup de maladies infectieuses comme la peste, le choléra, la diphtérie, la tuberculose et autres. Les virus sont des germes pathogènes de très petite taille (environ 0,01 à 0,1 µm). Ils provoquent dans le corps des maladies comme la grippe, la rougeole, et autres.

La poussière de floraison, le pollen, provoque des allergies chez certaines personnes. On les protège et on les soigne en les mettant dans des pièces climatisées où l'air provenant de l'extérieur est filtré. D'autre part, il est possible que des moisissures apparaissent dans les filtres en contact avec un air très humide mais aussi dans la terre des plantes vertes. Ces moisissures peuvent provoquer des allergies¹. C'est pourquoi on ne peut pas déterminer la durée de vie des filtres en se basant uniquement sur le dépôt de poussière, mais ils devraient en principe être changés dans les 2 ans.

Tableau 1.1.1-6 – Aperçu de la quantité de germes par ml d'eau

Nombre de germes par ml d'eau	Classification	Remarques
< 100	Stérile, pauvre en germes	Qualité de l'eau qu'on boit, qualité à atteindre dans les épurateurs, tours de réfrigération
1 000... 10 000	Croissance normale	Purification ou désinfection exigée
> 100 000	Forte contamination	Gros risque d'infection

Des poussières domestiques et des moisissures, dont la croissance est favorisée ou freinée selon le taux d'humidité, peuvent également apparaître dans les pièces².

Dans les pièces peuvent également apparaître des moisissures et des poussières domestiques dont la croissance est favorisée ou freinée par l'humidité.

Les agents bactériens de la légionellose peuvent être transmis dans l'air par l'intermédiaire de systèmes de climatisation³. Cette maladie peut être mortelle. Les bactéries (*Legionella*) connaissent une croissance optimale dans de l'eau entre 32 et 42 °C. À 65 °C elles sont inactives. Elles sont par exemple transportées par l'eau diffusée en aérosols des tours de refroidissement, traversent les filtres à air, et peuvent donc être aspirées et parvenir dans les pièces utilisées par le biais des installations d'aération. Elles se multiplient aussi dans les installations d'eau usées à basses températures (voir le paragraphe 4.3.7 page 1326). Solution : précautions dans le choix du lieu où l'air extérieur est aspiré, nettoyage et désinfection des filtres à air voire de la tour de refroidissement (désinfection UV), éviter les bacs de récupération d'eau dans le système d'humidification. La filtration de l'air uniquement avec des filtres pour matières en suspension est efficace. Nettoyage régulier des épurateurs d'air, des conduites en aval des humidificateurs d'air, des échangeurs et des tours de refroidissement avec de la vapeur ou des désinfectants. Ceux-ci peuvent aussi constamment être dosés suivant les besoins comme agents microbicides dans les épurateurs et les tours de refroidissement. Avec des épurateurs, limiter alors la formation de dépôt boueux lors des vidanges, afin qu'une concentration suffisante d'agents puisse faire effet. Des émetteurs UV-C (longueur d'onde 253,7 nm) tuent efficacement les germes, si l'eau n'est pas trop opaque (profondeur de pénétration suffisante pour le rayonnement). Même avec un nombre élevé de germes au départ (10⁴ à 5.10⁴ germes par ml) on peut, aussi bien avec de l'eau chaude (34 à 47 °C) qu'avec de l'eau froide, atteindre des facteurs de réduction supérieurs à 10⁶ avec des doses d'UV de 13 à 16 mJ/m².⁴

1. GB-Report 11/87. Page 7/8.

Elixmann, J. H. : CCI 4/89. page 18/25.

2. N.N. : HLH 11/88 page 525/6.

3. Schulze-Röbecke entre autres: CCI 12/86 page 4/5.

N.N. : CCI 10/85 page 17/8 et 3/88 page 31.

Scharmann, R. : Utilisation rationnelle de l'énergie 4/87 page 14/15.

Bahmann : GB-Report 3/88 page 14.

Seidel, K., entre autres : Légionellose. Série d'écrits de l'association préposée à l'hygiène de l'eau, de la terre et de l'air. Édition Gustav

Fischer, Stuttgart, 1987.

Prise de position FLT 1989 (FLT, Ffm.).

4. Martiny, H., entre autres. : Feuillet central relatif à l'hygiène 188 (1989). Page 35/46. Édition G. Fischer, Stuttgart.

Kryschi, R. : Ges.-Ing. 4. 88. page 190/195.

Lutte contre les germes véhiculés par la poussière :

1. Émetteur de rayons UV, p. ex. appareils de ventilation avec émetteurs de rayonnements incorporés, ou disposition directe des émetteurs dans la pièce ; dégâts possibles dus au rayonnement, donc solution à éviter et à n'utiliser qu'en dernier recours.
2. Atomisation ou évaporation de produits chimiques comme des Triéthylenglycol (TAG).
3. Utilisation de filtres à matières en suspension très efficaces dans les conduites d'aération, éventuellement avec des électrofiltres. À n'utiliser que dans certains cas, comme dans les salles d'opération ou les laboratoires stériles.

-2.4 Noyaux de condensation

Par noyaux de condensation, on désigne des fines particules contenues dans l'air ayant un diamètre d'environ 0,01 à 0,1 μm , sur lesquelles la vapeur d'eau se dépose en cas de saturation de l'air. Ces noyaux n'obéissent plus à la loi de Stokes, du fait de leur petite taille. On les restreint aux corps suspendus dispersés dans l'air, ce que l'on nomme *système colloïdal*. La naissance des noyaux de condensation ne résulte pas d'une fragmentation mécanique, mais de processus chimiques ou physiques : condensation et sublimation. La fumée et le brouillard sont de tels systèmes colloïdaux. On définit la *fumée* comme une distribution de type colloïdal de corps solides et le *brouillard* comme une distribution identique de corps liquides dans l'air. Parfois même, l'air contient des noyaux de sel provenant de l'eau de mer, notamment le sel de cuisine.

Le nombre de noyaux est particulièrement élevé et variable, et est de l'ordre d'environ 100 millions par m^3 ($10^8/\text{m}^3$) dans l'air pur, et plus dans l'air urbain.

Les noyaux de condensation sont fréquemment chargés en électricité, positive ou négative. On parle alors d'ions, que l'on classe suivant leur grosseur en ions petits, moyens et grands. Les ions petits correspondent par leurs dimensions aux molécules (environ 0,1 nm = 10^{-8} cm), tandis que les ions grands. intègrent déjà la notion de poussière (environ 1 μm = 10^{-4} cm), dont ils se différencient toutefois par leur charge électrique.

-3 Prévention des polluants

La pureté de l'air – comme le montre le paragraphe 1.1.1-2 sur les polluants – est déterminée par une multitude de processus (processus de combustion dans les bâtiments, dans la circulation, pour la production d'électricité et diverses autres émissions). Le dioxyde de carbone étant apparu comme une cause majeure du changement climatique actuellement observé, on assiste désormais à un effort mondial de réduction des émissions, en couvrant une part croissante de la consommation énergétique au moyen d'énergies renouvelables (vent, eau, biomasse, géothermie, énergie solaire).

Les résultats de l'Allemagne sont à cet égard encourageants. D'une étude de l'office fédéral allemand de l'Environnement¹, il ressort qu'en 2007, de 7 à 10 % de l'énergie totale a déjà pu être produite sans émissions. La législation continue de renforcer les mesures y afférant, et si en 2009, la conférence sur le climat de Copenhague n'a pas encore donné lieu à une percée internationale, le ton est donné au développement des énergies renouvelables.

Pour de plus amples informations, voir la partie 1.9.

1.1.2 Température de l'air

Le « temps » naît de la concomitance de différents éléments climatiques comme la température de l'air, les précipitations, le rayonnement solaire, le vent, etc. Considéré sur une période assez longue, on l'appelle « climat ».

-1 Valeurs moyennes de la température

Pour un temps donné, la température régnant sur un lieu varie par cycles selon les jours et les années en fonction de la variation de la position du soleil². DIN 4710 donne une vue d'ensemble très précise des évolutions de la température compte tenu des calculs effectués sur les besoins en énergie. La première édition de 1982 fut entre-temps remplacée par la deuxième édition de janvier 2003 ; toutes les explications de cette version font référence à la nouvelle norme. *Indication* : la station de Potsdam citée ici en exemple est représentative de Berlin.

1. Memmler, M. ; Mohrbach, E. ; Schneider, S. ; Dreher, M. ; Herbener, R. : Bilan des émissions des sources d'énergies renouvelables. Réduction des émissions en 2007 par la mise en œuvre d'énergies renouvelables. Office fédéral de l'environnement, Dessau, oct. 2009.

2. Jurksch, G. : HLH 1/76 page 5/9. Christoffer, J., Dehne, K. et Masuch, J. : Explications relatives à DIN 4710, HLH volume 54 (2003) cahier 12, volume 55 (2004) cahier 1/2.

DIN 4710:2003-0. Statistiques des données météorologiques pour calculer le besoin en énergie des installations de chauffage et de traitement de l'air en Allemagne.

Afin de comparer les températures entre elles, on effectue des mesures de température et l'on distingue ainsi :

1. *La température journalière moyenne*, que l'on détermine en procédant à des relevés horaires de celle-ci. Dans la pratique, on définit souvent la température moyenne t_m à partir de 3 relevés effectués à 7, 14 et 21 heures selon la formule suivante :

$$t_m = \frac{t_7 + t_{14} + 2 \cdot t_{21}}{4}$$

La variation de la température quotidienne dépend essentiellement de la présence de nuages : la figure 1.1.2-1 montre la variation constatée par temps clair, nuageux, et couvert (désignation précédente : temps sombre)¹, de même que la température moyenne des jours où le temps oscille entre couvert et nuageux. Par temps clair, la température est plus élevée en été, et plus basse en hiver. Les valeurs fig. 1.1.2-4 se réfèrent à tous les jours de l'année indépendamment de la nébulosité. DIN 4710:2003-01 indique les données se rapportant aux valeurs moyennes de température entre 1961 et 1990. Les maxima de températures sont semblables pour les périodes allant de mai à septembre et d'avril à octobre, les pics de températures étant moins importants en septembre et en octobre.

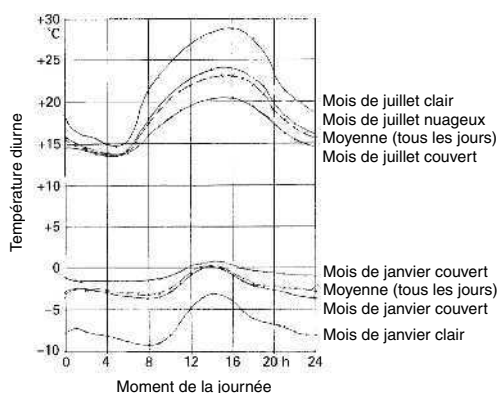


Fig. 1.1.2-1 : Évolution de la température de l'air à Potsdam au cours d'une journée en janvier et en juillet par temps couverts, nuageux et clairs. Pour d'autres mois et localités en Allemagne, voir DIN 4710:2003-01.

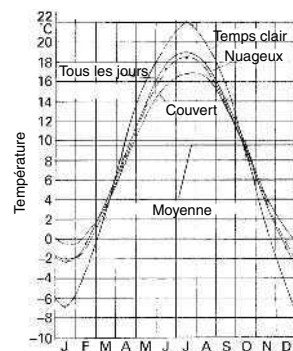


Fig. 1.1.2-2 : Évolution de la température moyenne mensuelle à Potsdam mesurée au cours d'une année (DIN 4710).

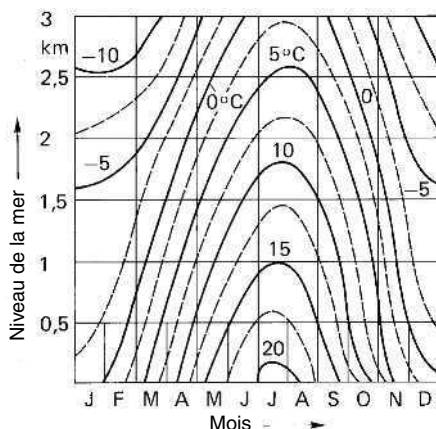


Fig. 1.1.2-3 : Température moyenne mesurée à différents niveaux d'altitude. Mesures effectuées sur 100 ans en Autriche (source : H. Felkel et H. Herbsthöfer).

On constate selon l'altitude une baisse de la température d'environ 6,5 K tous les 1 000 m (voir paragraphe 1.1.1-1). Pour des valeurs plus précises concernant l'Autriche, se référer à la fig. 1.1.2-3. Pour des données concernant la France, consulter les stations météorologiques locales.

1. Nouvelle appellation « couvert » pour un degré de couverture quotidien moyen du ciel > 7/8 d'après DIN 4710:2003-01.

Par exemple, fin août, la température est de 15 °C à 500 m au-dessus du niveau de la mer, et de 10 °C à une altitude de 1 500 m.

2. La *température mensuelle moyenne*, qui se calcule comme valeur moyenne pour tous les jours de l'année en fonction de la nébulosité (fig. 1.1.2-2 avec l'exemple de Potsdam) de même que la température mensuelle moyenne pour différentes villes (fig. 1.1.2-5 et tableau 1.1.2-1).

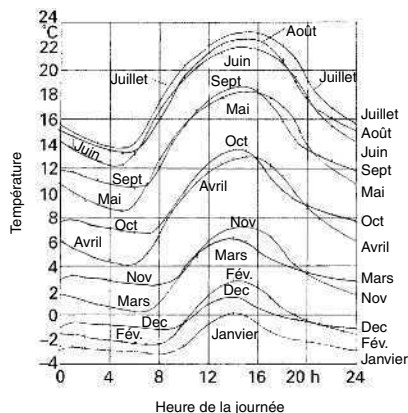


Fig. 1.1.2-4 : Évolution moyenne de la température journalière à Potsdam (DIN 4710).

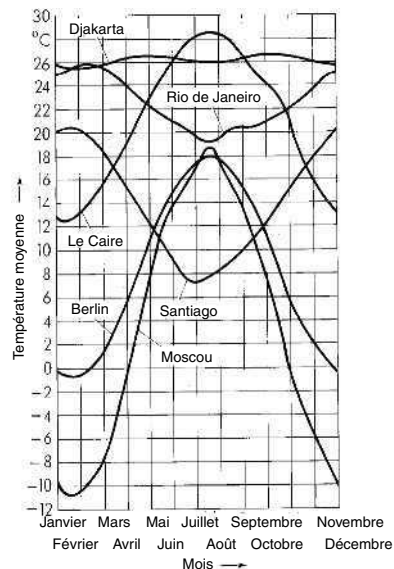


Fig. 1.1.2-5 : Évolution sur une année de la température mensuelle moyenne dans différentes villes.

3. La *température annuelle* prise comme valeur moyenne des douze températures mensuelles (tableau 1.1.2-1).

4. Pour certains calculs, la question est de savoir combien de temps (nombre de jours ou d'heures) par an la température journalière se situe au-dessus ou en dessous d'une certaine valeur. À ceci s'ajoute que l'on utilise la totalité des *courbes de fréquence* (ou courbes de durée annuelles)¹, ainsi que le montre la figure 1.1.2-6.

Cette figure présente également la fréquence se rapportant à une journée entre 6 et 18 heures, ce qui est important en cas de fonctionnement limité dans le temps d'installation de chauffage et de climatisation. DIN 4710 indique sur le tableau 3 relatif aux 15 stations allemandes, les relations entre t et x , mesurées aussi bien sur 24 h que sur 12 h, et ce entre 6 et 18 heures.

Par exemple : le nombre d'heures au-dessous de 15 °C sur une durée de 24 h est de 6 400 h, alors qu'il est de 2 990 h si on se rapporte à la tranche horaire 6-18 h (soit 12 heures par jour).

1. DIN 4710:2003-01. Statistiques des données météorologiques pour calculer le besoin en énergie des installations de chauffage et de traitement de l'air en Allemagne.

Voir aussi : H. Felkel et H. Herbsthofer ; données climatiques pour l'Autriche, publication voir paragraphe 6.5.1 page 1961.

Tableau 1.1.2-1 – Valeurs moyennes de la température enregistrée au cours d'un mois et d'une année dans différentes villes ainsi que de l'hygrométrie, teneur en eau en g/kg d'air sec

	Lieu	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Année	
1	Bremerhaven	1,0 3,8	1,5 3,8	4,0 4,3	7,4 5,0	12,1 6,6	15,2 8,3	16,7 9,4	16,8 9,3	14,2 8,3	10,3 6,8	5,6 5,1	2,4 4,2	9,0 6,2	°C g/kg
2	Rostock- Warnemünde	0,2 3,6	0,7 3,6	3,1 4,0	6,3 4,8	11,3 6,4	14,9 8,3	16,7 9,4	16,7 9,4	13,9 8,1	9,9 6,6	5,2 4,9	1,9 4,0	8,4 6,1	°C g/kg
3	Hambourg- Fühlsbüttel	0,3 3,6	0,9 3,6	3,6 4,0	7,1 4,7	11,9 6,2	15,2 7,8	16,5 8,9	16,5 8,9	13,5 7,9	9,6 6,4	5,0 4,8	1,7 4,0	8,5 5,9	°C g/kg
4	Potsdam	-2,0 3,0	-0,4 3,2	3,3 3,6	8,4 4,6	13,6 6,3	17,3 8,2	18,5 8,9	17,7 8,8	14,1 7,8	9,4 6,2	3,8 4,4	-0,3 3,4	9,5 6,0	°C g/kg
5	Aix-la- Chapelle	2,7 3,9	2,8 3,8	5,2 4,3	7,3 5,0	11,1 6,5	13,9 8,2	15,3 9,1	15,6 9,1	13,6 8,2	10,5 6,7	5,8 5,0	3,6 4,2	8,1 6,2	°C g/kg
6	Bad Marienberg	-1,6 3,5	-0,9 3,4	2,2 4,0	5,8 4,6	10,5 6,3	13,4 7,9	15,2 8,8	15,0 8,8	12,0 7,8	7,9 6,3	2,6 4,6	-0,3 3,8	6,8 5,8	°C g/kg
7	Kassel	0,1 3,5	1,1 3,5	4,2 4,0	5,8 4,6	10,5 6,3	13,4 7,9	15,2 8,8	15,0 8,8	12,0 7,8	7,9 6,3	2,6 4,6	-0,3 3,8	8,8 5,9	°C g/kg
8	Braunlage	-2,3 3,2	-1,8 3,1	0,8 3,6	4,6 4,4	9,5 5,9	12,7 7,5	14,2 8,2	14,2 8,3	11,1 7,4	7,3 5,9	2,0 4,3	-1,1 3,5	6,0 5,4	°C g/kg
9	Chemnitz	-1,2 3,1	-0,6 3,1	3,5 4,0	6,5 4,6	12,0 6,3	14,6 7,9	16,3 8,6	16,5 8,7	13,1 7,6	9,4 6,0	3,6 4,4	1,0 3,7	7,9 5,7	°C g/kg
10	Hof	-3,0 3,1	-2,0 3,2	1,4 3,8	5,5 4,6	10,4 6,2	13,6 7,8	15,3 8,5	14,9 8,5	11,8 7,5	7,3 5,9	1,8 4,2	-1,6 3,4	6,3 5,6	°C g/kg
11	Fichtelberg	-5,1 2,8	-4,8 2,8	-2,4 3,4	1,3 4,1	6,3 5,6	9,5 7,0	11,2 7,7	11,2 7,8	8,2 6,8	4,5 5,1	-0,9 3,7	-3,9 3,0	3,0 5,0	°C g/kg
12	Mannheim	1,1 3,7	2,5 3,7	6,0 4,3	9,9 5,1	14,3 6,8	17,4 8,5	19,3 9,3	18,8 9,4	15,4 8,3	10,4 6,6	5,2 4,8	2,2 3,9	10,2 6,2	°C g/kg
13	Passau	-2,5 3,1	-0,5 3,3	3,4 4,0	8,0 5,0	12,7 6,8	15,6 8,6	17,3 9,5	16,8 9,6	13,5 8,3	8,4 6,2	2,7 4,4	-1,1 3,4	7,9 6,0	°C g/kg
14	Stötten	-2,2 3,3	-1,1 3,4	2,1 3,9	5,9 4,7	10,3 6,3	13,4 8,0	15,6 8,8	15,3 8,9	12,5 7,8	7,9 6,1	2,3 4,3	-1,0 3,5	6,8 5,8	°C g/kg
15	Garmisch	-2,9 3,0	-1,1 3,2	2,3 3,7	6,4 4,7	10,9 6,4	13,9 8,1	15,9 9,3	15,4 9,3	12,7 8,0	8,0 6,0	2,0 4,1	-2,4 3,2	6,8 5,8	°C g/kg
<i>Europe</i>															
	Athènes	8,6 5,2	9,4 6,3	11,9 6,1	15,3 7,3	20,0 9,3	24,4 10,9	27,3 11,1	26,9 10,6	23,5 10,4	19,4 9,3	14,1 8,0	10,5 6,0	17,6 10,0	°C g/kg
	Londres	3,4 4,5	4,3 4,2	5,6 4,7	8,9 5,1	12,1 6,3	15,7 7,5	17,3 8,3	16,7 8,5	14,2 7,8	9,9 6,8	6,1 5,2	4,0 4,5	9,9 6,2	°C g/kg
	Madrid	4,5 4,7	6,3 4,5	8,5 4,6	11,7 5,8	15,9 6,8	20,4 7,7	24,7 8,3	24,2 8,6	19,1 8,2	13,2 7,0	8,2 5,5	4,3 4,6	13,4 6,3	°C g/kg
	Moscou	-11,0 1,0	-9,6 1,4	-4,8 2,0	3,4 2,0	12,0 5,8	15,2 7,5	18,6 9,3	15,7 8,5	10,4 6,2	3,6 4,1	-2,4 2,7	-8,2 1,7	3,6 4,5	°C g/kg
	Paris	2,5 3,8	3,9 3,8	6,2 4,5	10,3 5,0	13,4 6,8	16,9 7,8	18,6 9,3	18,0 9,1	15,0 8,2	10,3 6,8	6,0 4,8	2,9 4,2	10,3 4,7	°C g/kg
	Rome	7,0 5,0	8,2 5,3	10,4 5,6	13,7 7,0	17,9 8,5	21,8 11,6	24,5 11,6	24,1 11,8	20,8 10,8	16,6 8,7	11,6 6,5	8,1 5,3	15,4 7,7	°C g/kg
	Varsovie	-4,2 2,7	-2,8 2,7	0,8 3,0	7,0 6,3	12,9 6,3	16,9 8,8	18,4 9,7	17,5 9,8	13,4 7,5	7,9 6,2	-1,6 4,5	-2,3 3,7	7,3 5,8	°C g/kg
	Vienne	-1,0 2,8	1,0 3,1	5,1 3,8	9,9 4,8	14,5 6,8	18,0 8,5	19,6 9,3	18,9 9,3	15,4 7,8	9,9 6,0	4,9 4,1	1,1 3,3	9,8 5,8	°C g/kg
<i>Reste du monde</i>															
	Buenos Aires	23,1 13,2	22,5 12,6	20,4 12,1	16,3 9,6	12,8 8,0	9,8 6,8	9,4 6,8	10,6 7,1	12,8 7,6	15,5 8,8	18,8 10,5	21,6 12,2	16,1 9,6	°C g/kg
	Djakarta	25,4 17,6	25,4 17,8	25,8 18,1	26,2 18,5	26,4 18,1	26,0 17,7	25,8 17,1	25,9 16,3	26,2 16,8	26,3 17,2	26,0 17,3	25,7 17,3	25,9 17,6	°C g/kg
	La Havane	22,0 12,3	22,5 12,3	23,5 12,7	24,9 14,2	26,0 15,8	27,5 17,6	28,0 18,3	27,9 18,5	27,3 18,1	26,1 16,5	24,2 14,2	22,5 12,5	25,2 15,2	°C g/kg
	New York	-0,8 2,2	-0,5 3,0	2,9 4,3	9,4 4,5	15,5 6,8	20,1 9,9	22,8 11,9	22,5 11,4	19,1 9,8	13,3 6,8	6,7 4,6	1,5 3,0	11,1 6,5	°C g/kg
	Rio de Janeiro	25,2 15,5	25,7 15,7	24,9 15,5	23,2 14,0	21,8 12,7	20,4 11,8	19,2 11,3	20,4 11,3	20,5 11,9	21,5 12,5	22,8 13,6	24,8 14,6	22,7 13,4	°C g/kg
	San Francisco	9,7 6,0	10,8 6,2	11,8 6,6	12,2 7,2	13,3 7,3	14,1 8,3	14,0 9,0	14,4 9,2	15,3 9,3	15,1 8,3	13,0 7,3	10,5 5,8	12,8 7,6	°C g/kg
	Santiago	20,4 8,2	19,5 8,0	16,9 7,5	13,7 6,7	10,6 6,1	7,6 5,2	7,9 5,2	9,2 5,5	11,0 5,5	13,8 6,7	16,8 7,0	19,2 7,5	13,9 6,6	°C g/kg
	Sidney	22,0 11,3	21,8 11,4	20,7 11,1	18,2 10,0	14,8 8,1	12,6 7,0	11,5 5,8	12,8 6,7	15,1 7,2	17,6 8,0	19,4 9,0	21,1 10,3	17,3 8,8	°C g/kg
	Tokyo	3,0 3,0	3,8 3,1	6,9 4,0	12,5 6,5	16,6 8,8	20,5 12,0	24,2 15,3	25,4 16,3	21,9 13,5	16,8 9,0	10,3 5,8	5,2 3,7	13,8 8,3	°C g/kg

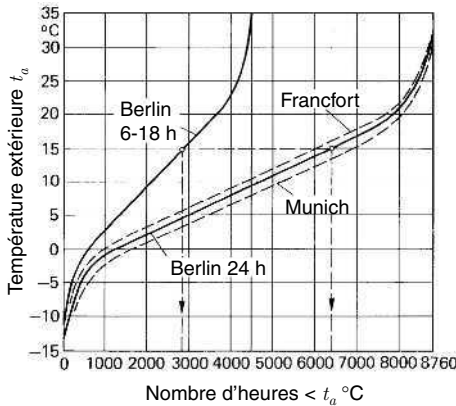


Fig. 1.1.2-6 : Fréquence des températures extérieures relevées à Berlin.

-2 Valeurs extrêmes de la température

On distingue deux types de valeurs extrêmes de température : les maxima et minima absolus ou moyens. La *température maximale absolue* et la *température minimale absolue* constituent respectivement la température la plus haute et la plus basse mesurée en un lieu donné. Les températures maximale et minimale moyennes correspondent aux valeurs moyennes des maxima et minima calculées sur un certain nombre d'années. En raison d'une chape de brouillard, les *valeurs extrêmes* mesurées en centre-ville sont plus élevées de 2 à 4 K qu'en périphérie l'hivers, et plus élevées de 1 à 2 K en été ; les valeurs moyennes sont environ deux fois moins élevées. Il existe, en outre, des *différences de température* considérables en fonction de l'infrastructure. Au-dessus des routes, par temps ensoleillé, la température de l'air à 2,5 m de hauteur est d'environ 8 à 10 K plus élevée que sur des prés (*microclimat*)¹. On doit tenir compte de l'altitude des stations météorologiques lorsqu'elles nous donnent des indications.

Aux USA, c'est l'ASHRAE² qui indique les *fréquences*. Des points de mesures sont implantés sur la courbe de fréquence et sont dépassés à respectivement 99 %, 97,5 %, ou 95 % du temps en hiver, et 5 %, 2,5 % ou 1 % du temps en été.

Alors que les températures moyennes sont nécessaires pour le calcul de la consommation de chauffage et de climatisation, les valeurs extrêmes moyennes jouent un rôle déterminant pour le dimensionnement d'appareils tels que les radiateurs, climatiseurs, etc. (tableau 1.1.2-4). Il est souhaitable, à certaines fins, de disposer d'indications sur le nombre de jours chauds et froids (dépassement en plus et en moins de valeurs limites) (tableaux 1.1.2-5 et 1.1.2-6).

-3 Degrés-jours de chauffage (nombre de degrés-jours DJ)³

Afin de déterminer, contrôler et comparer la quantité de chaleur consommée lors d'une saison de chauffe, on a introduit la notion de nombre de degrés-jours, qui est le produit du nombre de jours de chauffage par la différence entre la température moyenne ambiante et la température moyenne extérieure, donc :

$$G_i = \sum_1^z (t_i - t_{am})$$

où

G_i est le nombre de degrés-jours produit pendant la période de chauffage en Kj/a

z est le nombre de jours de chauffage pendant cette période, allant du 01/09 au 31/05

t_i est la température moyenne ambiante, égale à 20 °C

t_{am} la température extérieure moyenne d'une journée de chauffage

Les jours de chauffage sont les jours où en milieu de journée la température extérieure est inférieure à 15 °C.

La période de chauffage d'une année est représentée sur une surface hachurée sur la fig. 1.1.2-7, où $t_i = 20$ °C (autrefois 19 °C) représente la température moyenne ambiante, et $t_{am} = 15$ °C (autrefois 12 °C) représente la température limite de non-chauffage de début et de fin de chauffage. La tendance s'inverse

1. Gertis, K. et U. Wolfseher : Ges.-Ing. 1/2-1977 page 1/10.

2. ASHRAE-Fundamentals 2001.

3. Jurksch, G.: HLH 2/75 page 63/5 et 1/76 page 5/9.

dans les nouveaux bâtiments bien isolés. La température de non-chauffage peut diminuer jusqu'à 12 voire 10 °C lorsqu'il n'y a pas spécialement besoin de chauffage.

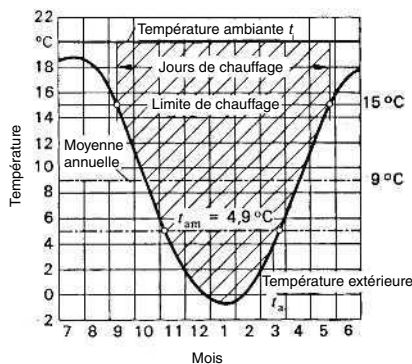


Fig. 1.1.2-7 : Présentation de la saison de chauffe pour Berlin-Dahlem.

Le nombre de jours de chauffage figure sur le tableau 1.1.2-2. Ils sont utilisés pour calculer la consommation de chaleur des installations de chauffage. On trouve le nombre de degrés-jours le moins élevé (en dessous de 3 400) dans le Bas Rhin et le Haut Rhin, et le plus élevé (> 4 500) à la montagne.

Tableau 1.1.2-2 – Jours de chauffage et nombre de degrés-jours pour les villes allemandes

Lieu	De septembre à mai			De juin à août		Minimum annuel *)	
	Nombre de jours de chauffage z	T° moyenne °C	Degrés-jours G_t	Nombre de jours de chauffage z	Degrés-jours G_t	t_{20} °C	t_{10} °C
Berlin-Dahlem	252	4,9	3 809	23	155	- 12	- 12
Aéroport de Brême	256	5,6	3 703	30	205	- 10	- 12
Düsseldorf	245	6,5	3 300	22	139	- 8	- 10
Aix-la-Chapelle	249	6,1	3 470	32	216	- 9	- 10
Francfort (ville)	242	6,0	3 387	14	91	- 10	- 10
Aéroport de Hambourg	259	5,2	3 837	35	241	- 10	- 12
Aéroport de Hanovre	257	5,3	3 782	32	216	- 11	- 14
Karlsruhe	242	5,9	3 409	14	88	- 10	- 12
Stuttgart (ville)	244	6,0	3 434	18	121	- 11	- 12
Kiel	262	5,5	3 813	36	234	- 8	- 10
Aéroport de Munich	255	4,1	4 046	30	219	- 15	- 16

*) t_{20} = 20 fois en 20 ans, t_{10} = 10 fois en 20 ans.

Tableau 1.1.2-3 – Nombre de jours de chauffage et nombre de degrés-jours pour l'Autriche, température de non-chauffage et température ambiante 16/22 °C

Lieu	D'octobre à avril			De mai à septembre		Minimum annuel °C
	Jours de chauffage	Température moyenne °C	Degrés-jours	Jours de chauffage	Degrés-jours	
Innsbruck	212	3,2	4 010	69	540	– 18
Salzburg	212	3,1	3 985	75	565	– 18
Vienne	212	3,4	3 720	51	415	– 15

Tableau 1.1.2-4 – Température moyenne annuelle t_m , maxima ($t_{\max}$) et minima ($t_{\min}$) annuels pour les villes non allemandes

Lieu	t_m °C	$t_{\max}$ °C	$t_{\min}$ °C	Lieu	t_m °C	$t_{\max}$ °C	$t_{\min}$ °C
Djakarta	25,9	33,7	20	Paris	10,3	34	– 11
La Havane	25,2	35,3	12,8	Rio de Janeiro	22,7	36	+13
Le Caire	21,1	43	2	Rome	15,4	35	– 3
Londres	9,9	31	– 8	Santiago	13,9	34,8	– 2,7
Los Angeles	16,7	38	1,0	San Francisco	12,8	32,6	2,8
Madrid	13,4	40	– 8	Sidney	17,3	38	4
Moscou	3,6	31	– 31	Varsovie	7,3	32	– 18
New York	11,1	35	– 17	Vienne	9,5	33	– 15

Tableau 1.1.2-5 – Nombre de jours chauds et froids dans l'année

Lieu	Nombre moyen de jours avec $t_{\max}$			
	≥ 30 °C	≥ 25 °C	≤ 0 °C	≤ -10 °C
Berlin – Dahlem	5,7	30,5	23,2	0,3
Brême	1,9	17,1	17,9	0,4
Dresde	6,5	35,8	19,1	0,5
Aix-la-chapelle – Mülheim	3,1	21,9	10,3	0,1
Francfort a. M	7,2	38,7	16,5	0,2
Halle a. d. S	5,9	33,9	20,6	0,5
Hambourg	1,4	13,3	20,3	0,1
Hanovre	2,6	21,9	19,6	0,3
Karlsruhe	8,1	40,7	17,1	0,4
Kiel-Holtenau	0,0	5,0	22,8	0,0
Cologne – Leverkusen	3,8	27,0	7,9	0,1
Magdeburg	8,4	37,9	21,3	0,6
Munich	2,5	20,5	38,8	2,2

Tableau 1.1.2-6 – Nombre d'heures dans l'année où la température est supérieure à t en °C*)

	Lieu	t	22	24	26	28	30	32	34	°C
1	Bremerhaven		207	106	48	18,8	5,5	0,8	–	h/a
2	Rostock-Warnemünde		148	73	33	14,4	4,8	0,8	–	h/a
3	Hambourg-Fulhsbüttel		279	152	73	30,1	9,7	1,6	0,1	h/a
4	Potsdam		490	291	158	75,0	30,2	8,0	1,2	h/a
5	Aix-la-chapelle		345	185	87	35,5	10,7	1,8	0,1	h/a
6	Bad Marienberg		179	80	30	8,7	1,0	–	–	h/a
7	Kassel		403	227	111	48,8	16,8	3,9	0,6	h/a
8	Braunlage		142	61	19	3,4	0,1	–	–	h/a
9	Chemnitz		298	150	62	20,4	4,1	1,0	0,1	h/a
10	Hof		238	119	49	14,2	2,6	0,1	–	h/a
11	Fichtelberg		26	8	2	1,6	–	–	–	h/a
12	Mannheim		682	413	228	111,9	46,8	13,8	2,8	h/a
13	Passau		473	276	137	52,4	14,5	2,4	0,3	h/a
14	Stötten		191	81	25	6,8	1,3	0,3	–	h/a
15	Garmisch-Partenkirchen		350	184	76	22,9	5,9	1,3	0,4	h/a

*) Calculé d'après DIN 4710:2003-01.

-4 Degrés-heures de ventilation G_L

Pour déterminer les besoins en chaleur des systèmes de ventilation, on peut également utiliser la notion de degrés-jours. Par contre, pour faire correctement le lien entre la période de fonctionnement d'un système de ventilation (par exemple la ventilation d'un théâtre le soir) et une température extérieure donnée, il vaut mieux introduire des degrés-heures de ventilation.

Les degrés-heures de ventilation (G_L) sont le produit du nombre d'heures de ventilation et de la différence entre la température de soufflage d'air et la température extérieure moyenne :

$$G_L = \sum_1^{z_{hH}} (t_{zu} - t_a) \approx z_{hH} \cdot (t_{zu} - t_{am})$$

où

G_L représente les degrés-heures de ventilation par an en Kh/a

Z_{hH} le nombre d'heures de ventilation en cas de chauffage

t_{zu} la température d'arrivée d'air

t_a la température extérieure *instantanée* pour toutes les heures de ventilation avec $t_{zu} > t_a$

et t_{am} la température extérieure moyenne pendant le chauffage

La température de non-chauffage (par exemple 15 °C) n'entre pas en compte ici, car un réchauffement de l'air est constamment nécessaire pour atteindre la température de soufflage d'air souhaitée (ou température ambiante).

Sur le tableau 1.1.2-7 figurent les degrés-heures de ventilation annuels pour Berlin en fonction de la durée journalière de fonctionnement.

Les valeurs sont établies à partir de la définition donnée dans DIN 4710 sur une période de 3 jours. De l'évaluation des valeurs moyennes établies dans DIN 4710 résultent de petites erreurs, notamment au niveau des basses températures de soufflage d'air.

Pour un fonctionnement sur une période de 6 à 18 h (12 h) ou continu, les degrés-heures de ventilation peuvent également être établis directement en adoptant dans DIN 4710 les fréquences des températures. En cas de fonctionnement continu sur 24 heures, il est possible d'effectuer des analyses mensuelles à l'aide de l'annexe de DIN 4710¹.

Si l'on multiplie les degrés-heures G_L par la chaleur massique de l'air, $c_p = 1,0$ kJ/kg.K, on obtient les *besoins annuels de chaleur* Q requis pour réchauffer 1 kg/h d'air :

$$Q = G_L \cdot c_p \text{ en kJ/a} = G_L \cdot c_p / 3\,600 \text{ en kWh/a}$$

Pour 1 kg/s, la formule est :

$$Q_s = G_L \cdot c_p \approx G_L \text{ en kWh/a}$$

1. Annexe 1 de DIN 4710:2003-01. (Corrélation température de l'air – humidité de l'air d'après les chiffres mensuels.)

Tableau 1.1.2-7 – Degrés-heures de ventilation G_L en Kh/a pour Potsdam en fonction du temps de fonctionnement et de la température de soufflage d'air*)

Fonctionnement de 0.00 à...	Température de soufflage d'air en °C					
	18	19	20	21	22	23
1.00	4 136	4 502	4 867	5 232	5 597	5 963
2.00	8 379	9 110	9 840	10 571	11 301	12 032
3.00	12 731	13 826	14 922	16 018	17 114	18 209
4.00	17 172	18 633	20 094	21 555	23 016	24 477
5.00	21 664	23 491	25 317	27 143	28 969	30 796
6.00	26 114	28 305	30 497	32 688	34 880	37 071
7.00	30 262	32 818	35 375	37 932	40 489	43 045
8.00	34 158	37 076	39 996	42 917	45 839	48 761
9.00	37 708	40 945	44 223	47 504	50 789	54 076
10.00	40 910	44 443	48 024	51 705	55 348	58 996
11.00	43 932	47 744	51 621	55 545	59 525	63 531
12.00	46 640	50 728	54 894	59 115	63 400	67 749
13.00	49 205	53 547	57 990	62 505	67 087	71 757
14.00	51 703	56 282	61 000	65 806	70 683	75 654
15.00	54 224	59 038	64 032	69 127	74 299	79 568
16.00	56 842	61 896	67 166	72 522	78 020	83 591
17.00	59 626	64 940	70 489	76 171	81 937	87 840
18.00	62 618	68 211	74 053	80 033	86 119	92 365
19.00	65 824	71 709	77 859	84 171	90 601	97 208
20.00	69 212	75 425	81 918	88 591	95 384	102 354
21.00	72 830	79 398	86 253	93 289	100 445	107 781
22.00	76 614	83 544	90 762	98 163	105 684	113 385
23.00	80 528	87 821	95 404	103 169	111 056	119 122
24.00	84 586	92 243	100 191	108 321	116 573	125 004

*) Calculé d'après DIN 4710:2003-01.

Exemple

Le nombre de degrés-heures de ventilation annuels pour une installation de ventilation fonctionnant de 8 h à 18 h avec une température de soufflage d'air de 22 °C est, d'après le tableau 1.1.2-7 :

$$G_L = 86\,119 - 45\,839 = 40\,280 \text{ Kh/a}$$

Le besoin annuel de chaleur par kg/s est :

$$Q_s = 40\,280 \text{ kWh/a.}$$

-5 Degrés-heures de refroidissement G_K

Les degrés-heures de ventilation pour des températures extérieures plus élevées que la température de soufflage (en cas de refroidissement) sont appelés degrés-heures de refroidissement. On entend par degré-heures de refroidissement G_K le produit du nombre d'heures de refroidissement par l'écart entre la température extérieure moyenne et une température donnée de soufflage d'air.

Aussi est-il ici nécessaire de calculer des degrés-heures de refroidissement à différents moments de la journée. On obtient alors les valeurs du tableau 1.1.2-8. Il ne s'agit que du refroidissement sensible de l'air.

Si l'on tient compte de l'évaluation des températures moyennes par heure sur 30 ans établie dans DIN 4710, on trouve une erreur au niveau de la journée, qui présente une température de soufflage d'air plus élevée figurant sur le tableau 1.1.2-8.

Cette erreur pour G_K est, pour une température ≤ 16 °C, inférieure à 10 %, et pour une température égale à 18 °C d'environ 20 %. Les valeurs réelles sont par conséquent plus élevées. À noter qu'ici aussi, l'annexe 1 de DIN 4710 contient les données mensuelles pour les installations fonctionnant 24 h sur 24, et pour un fonctionnement entre 6 et 18 h, les valeurs annuelles pour différentes fréquences de température DIN 4710 figurent sur les tableaux 3.x.1 et 3.x.2.

La chaleur latente résulte des grammes heures de déshumidification et d'humidification. Il est toutefois préférable, ce qui est courant, d'utiliser les différences d'enthalpie pour les calculs d'énergie. Sur demande, les stations météorologiques mettent à disposition les estimations correspondantes. Celles-ci sont en principe calculées pour 24 heures ou sur une période de 6 à 18 h à partir des différentes fréquences de DIN 4710.

Tableau 1.1.2-8 – Degrés-heures de refroidissement G_K en Kh/a pour Potsdam en fonction de la durée de fonctionnement et de la température de soufflage d'air*)

Fonctionnement de 0.00 à...	Température de soufflage d'air en °C		
	14	16	18
1.00	52	1	0
2.00	76	1	0
3.00	83	1	0
4.00	85	1	0
5.00	86	1	0
6.00	95	1	0
7.00	189	2	0
8.00	453	92	7
9.00	883	615	80
10.00	1 507	671	251
11.00	2 294	1 166	518
12.00	3 203	1 772	861
13.00	4 205	2 463	1 276
14.00	5 273	3 215	1 750
15.00	6 352	3 982	2 238
16.00	7 407	4 727	2 708
17.00	8 373	5 390	3 111
18.00	9 195	5 931	3 413
19.00	9 818	6 316	3 611
20.00	10 237	6 534	3 681
21.00	10 521	6 641	3 698
22.00	10 725	6 689	3 703
23.00	10 871	6 713	3 706
24.00	10 972	6 722	3 708

*) Calculé d'après DIN 4710:2003-01.

1.1.3 Humidité de l'air

Tandis que la vapeur d'eau contenue dans l'air joue un rôle minime dans le système de chauffage, celle-ci est primordiale en génie climatique.

-1 Appellation

La quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air peut être évaluée de 4 façons différentes, notamment :

- a) par l'*humidité relative* φ (%) de l'air ;
- b) par la *température au thermomètre à bulbe humide* t_f (°C) ;
- c) par la *pression partielle* p_p de la vapeur d'eau dans l'air (mbar) ;
- d) par la *teneur en eau* (ou la masse d'eau) x contenue dans 1 kg d'air sec (kg/kg d'air sec ou g/kg d'air sec).

Les indications sur la teneur en vapeur d'eau d'après a) ou b) sont insuffisantes dans de nombreuses applications. En effet sans l'indication de la température de l'air correspondante, les chiffres n'ont pas de signification.

φ et t_f varient avec la température de l'air, même si la valeur absolue de la teneur en eau de l'air reste la même.

Il est préférable d'exprimer l'humidité à partir de c) ou d). Toutefois, il y a une toute série de cas (par ex. traitement des matériaux organiques comme les textiles, le bois, le papier, le tabac), dans lesquels le maintien d'une certaine humidité *relative* est requise. Au mieux, c'est la plupart du temps la *pression partielle de la vapeur* d'eau qui est indiquée sur les tables de la météorologie, tandis que dans les calculs en génie climatique on devra utiliser les valeurs de x (rapport de mélange en météorologie). D'après les données figurant dans le paragraphe 1.1.3-4 page 23, ces deux valeurs peuvent facilement se déduire l'une de l'autre.

Entre 0 et 40 °C, la teneur en vapeur d'eau est environ $x \approx 0,62 p_p$.

-2 Humidité moyenne

Tout comme la température extérieure, l'*humidité absolue* de l'air à l'extérieur est aussi soumise à une variation annuelle, voire aussi à une variation quotidienne. L'oscillation quotidienne moyenne est si faible qu'on peut considérer comme pratiquement constante la pression partielle de la vapeur, si le temps ne change pas (la pression atmosphérique). Dépendante de la température de l'air, l'humidité relative est naturellement déterminée sur une période donnée (voir fig. 1.1.3-1). Sur une année, la pression partielle de la vapeur, la teneur en eau de l'air, tout comme l'*humidité relative*, présentent des oscillations importantes, similaires à celles de la température.

À partir de là, il apparaît que la valeur maximale de la pression partielle moyenne de vapeur est en juillet de 14 à 16 mbar maximum ($x = 8,7$ à $9,9$ g/kg d'air sec) et en janvier varie entre 4 et 5 mbar minimum ($2,5$ à $3,1$ g/kg), et ce, dans toute l'Allemagne (voir fig. 1.1.3-1, fig. 1.1.3-2 et tableau 1.1.2-1).

Dans la fig. 1.1.3-3, on constate que la teneur moyenne en eau de l'air est de $x_m = 5,8$ g/kg d'air sec. Cette valeur est valable pratiquement pour toute l'Allemagne. La norme DIN 4710 présente les valeurs correspondant à 15 stations. La marge d'oscillation, compte tenu des stations en altitude, va de 5,0 (Fichtelberg) à 6,2 g/kg d'air sec (Bremerhaven, Essen, Mannheim).

En supposant qu'une teneur en eau de 8 g/kg, correspondant à environ 22 °C/50 % d'humidité relative, donne le meilleur confort, alors, dans la mesure où les pièces elles-mêmes ne présentent pas de sources d'humidité, il faut donc déshumidifier l'air à l'aide de climatiseurs durant 71 jours courants et l'humidifier pendant 294 jours. Toutefois, dans la pratique, on réduit cette dépense en utilisant un seuil de tolérance relativement large, entre 5 et 10 g/kg d'air sec.

-3 Heures-grammes d'humidification et de déshumidification

De même que dans le domaine du chauffage et du refroidissement, on utilise les notions de degrés-jours, voire de degrés-heures, on peut utiliser les notions suivantes pour la teneur en eau de l'air :

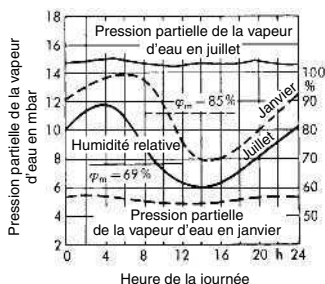


Fig. 1.1.3-1 : Évolution de l'humidité moyenne au cours d'une journée de janvier et d'une journée de juillet à Berlin Dahlem.

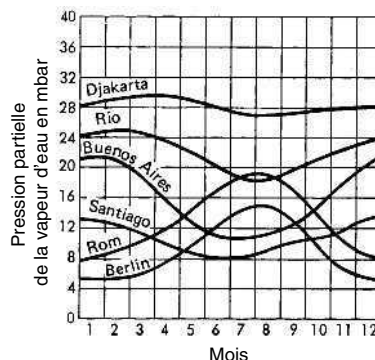


Fig. 1.1.3-2 : Évolution annuelle de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air dans différentes villes.

Les *jours-grammes d'humidification* sont le produit du nombre de jours d'humidification et de la différence entre une teneur en eau de l'air intérieur de $x = 8$ g/kg et une teneur en eau moyenne de l'air extérieur. Les *heures-grammes d'humidification* sont définies de façon similaire.

La fig. 1.1.3-4 planimètre les heures-grammes d'humidification, sur un an, à raison de $G_f = 22\,039$ g.h/kg d'air sec/a = $22\,039/24 = 918$, soit 918 *jours-grammes d'humidification* par an.

Les *jours-grammes de déshumidification* sont de même le produit des jours de déshumidification et la différence entre la teneur en eau de l'air intérieur, qui est de $x = 8$ g/kg, et la teneur moyenne en eau de l'air extérieur. Les heures-grammes de déshumidification sont schématisées sur la fig. 1.1.3-4 :

$G_{\text{sec}} = 3\,310$ g.h/kg d'air sec/a = $3\,310/24 = 138$ jours-grammes de déshumidification par an.

Ce calcul peut s'effectuer sans difficulté pour les 15 stations de DIN 4710, où l'on constate toutefois des différences notoires. Potsdam présente par rapport à l'ancien relevé de Berlin des heures de déshumidification plus élevées.

Exemple

Pour un fonctionnement de 10 h par jour sur 250 jours par an,

$G_{\text{sec}} = 3\,310 \cdot 10/24 \cdot 250/365 = 3\,310 \cdot 0,285 = 943$ g.h/kg d'air sec/a

$G_{\text{humide}} = 22\,039 \cdot 10/24 \cdot 250/365 = 22\,039 \cdot 0,285 = 6\,281$ g.h/kg d'air sec/a

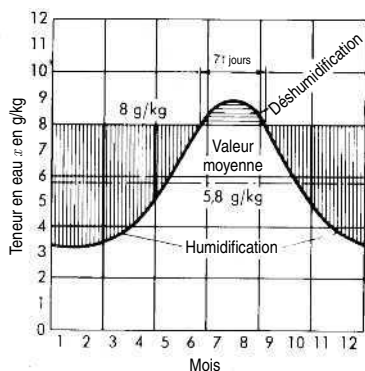


Fig. 1.1.3-3 : Teneur en eau de l'air à Berlin. La valeur 8 g/kg correspond à de l'air à 22 °C et 50 % d'humidité relative.

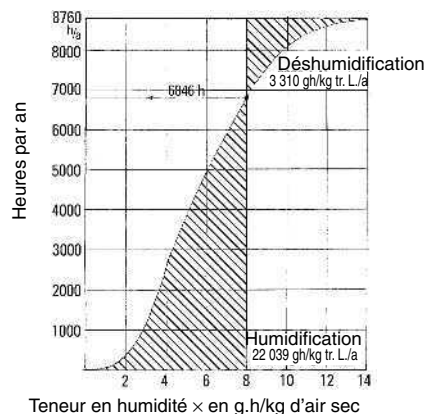


Fig. 1.1.3-4 : Courbe de fréquence cumulée de la teneur en eau de l'air à Potsdam (DIN 4710:2003-01).

Avec la chaleur d'évaporation de $h_d = 2\,500 \text{ kJ/kg eau} = 2\,500/3\,600 = 0,7 \text{ kWh/kg}$, chaque kg/h d'air sera annuellement :

– taux de dés humidification (refroidissement latent)

$$Q = 943 \cdot 0,7/1\,000 = 0,660 \text{ kWh/kg/a}$$

– taux d'humidification (chauffage latent)

$$Q = 6\,281 \cdot 0,7/1\,000 = 4,397 \text{ kWh/kg/a}$$

Pour d'autres teneurs en humidité, on peut utiliser le tableau 1.1.3-1a (données 1961-1990), qui indique les valeurs G_{sec} et G_{humide} , le tableau 1.1.3-1b prenant pour base les nouvelles données légèrement modifiées de 1991-2005.

Tableau 1.1.3-1a – Heures-grammes de dés humidification G_{sec} et heures-grammes d'humidification G_{humide} , en g.h/kg d'air sec/a pour Potsdam en fonction de la teneur en humidité de l'air soufflé sur une période de 24 h d'après DIN 4710:2003-01 (données météorologiques 1961-1990)

24 h	Teneur en humidité de l'air soufflé x en g/kg d'air sec							
	5	6	7	8	9	10	11	12
G_{sec}	–	9 045	5 693	3 310	1 755	835	353	132
G_{humide}	5 862	10 242	15 657	22 039	29 251	37 097	–	–

Le tableau 1.1.3-1b tient compte des nouvelles données météorologiques disponibles depuis pour la période 1991-2005 (voir tableau 1.1.3-4), sur le même modèle que le tableau -1a.

Tableau 1.1.3-1b – Heures-grammes de dés humidification G_{sec} et heures-grammes d'humidification G_{humide} , en g.h/kg d'air sec/a pour Potsdam en fonction de la teneur en humidité de l'air soufflé sur une période de 24 h d'après DIN 4710.3 E:2009-08 (données météorologiques 1991-2005)

24 h	Teneur en humidité de l'air soufflé x en g/kg d'air sec							
	5	6	7	8	9	10	11	12
G_{sec}	–	10 740	7 042	4 272	2 396	1 231	561	220
G_{humide}	5 106	9 190	14 258	20 254	27 144	34 746	–	–

On observe que le changement climatique s'accompagne également d'une augmentation de l'humidité, ce qui réduit légèrement les valeurs d'humidification et accroît celles de déshumidification.

-4 Valeurs extrêmes de l'humidité

On observe les *valeurs minimales* de la pression partielle de vapeur d'eau lors de journées particulièrement froides. Par une température extérieure de -20°C , la pression partielle de la vapeur d'eau est seulement de 0,6 mbar, même lorsque l'air est complètement saturé.

En revanche, on observe les *valeurs maximales* de teneur en humidité lors de journées estivales pluvieuses, notamment lors de pluies orageuses. La pression partielle de la vapeur atteint en Allemagne des valeurs allant jusqu'à 23 mbar.

Dans les régions tropicales, les valeurs atteignent environ 35 voire 40 mbar.

-5 Température et humidité¹

L'humidité associée à la température correspondante est déterminante pour la qualité de l'air en génie climatique (voir tableau 1.1.3-2 pages 24–25). DIN 4710:2003-01 indique des corrélations précises entre l'humidité de l'air et la température pour 15 villes allemandes (voir tableau 1.1.3-3 pages 26–27). On a besoin de ces indications lorsque l'air doit être déshumidifié suite à une humidité trop élevée ou pour calculer le refroidissement dû à l'évaporation. Si par la suite on vérifie les valeurs de la température et de l'humidité mesurées simultanément, il s'avère que : les jours de température maximale, l'humidité reste la plupart du temps normale ; tandis que les jours où la température reste normale, des maxima d'humidité sont enregistrés. La quantité maximale de chaleur contenue dans l'air (*enthalpie*), c'est-à-dire la somme des quantités correspondantes à l'air sec et à la vapeur d'eau, est dans les deux cas pratiquement la même. Il n'est donc pas vraiment sûr par des journées particulièrement chaudes que l'air présente une teneur en humidité particulièrement élevée.

À l'exception des régions côtières, l'Allemagne présente une situation largement homogène, décrite dans VDI 2078² par l'humidité absolue constante $x = 12 \text{ g/kg}$ d'air sec. Si l'on analyse les diagrammes t, x (tableau 3 de la norme DIN 4710:2003), on remarque alors la faible occurrence des dépassements en ce qui concerne l'enthalpie (6–7 h/a), tant pour les zones enclavées que pour les zones de vallée fluviale, de sorte que dans un premier temps, il est possible de conserver la proposition de référence concernée :

Zone (VDI 2078)	t_{max}	t_{max}	t_{fmax}	x	φ
	$^{\circ}\text{C}$	kJ/kg	$^{\circ}\text{C}$	g/kg d'air sec	$\%$
2 enclave 1	31	62	21,4	12	43
3 enclave 2	32	63	21,7	12	40
4 vallées fluviales SW	33	64	22,0	12	38

Il va de soi que lors de la conception de l'unité de refroidissement, il faut vérifier en fonction de la construction si cet état « sec » représente l'état critique pour le refroidisseur, car selon l'écartement des ailettes, l'écoulement des condensats peut être empêché et occasionner une perte d'efficacité. Il est alors nécessaire de choisir un point de référence plus humide, de préférence sur la ligne $h = \text{const.}$ Pour $\varphi = 75 \%$, on obtient alors les valeurs de référence suivantes :

Zone	t_{max}	h_{max}	x	φ
	$^{\circ}\text{C}$	kJ/kg	g/kg d'air sec	$\%$
2	24,8	62	14,6	75
3	25,0	63	14,8	75
4	25,2	64	15,1	75

Des travaux³ plus récents tiennent compte du réchauffement de l'atmosphère observé ces dernières années et se fondent sur les 10 dernières pour recommander des valeurs de référence encore plus élevées. Entre-temps, une initiative de VDI et VBI a amené le DWD à réévaluer les corrélations t, x pour les 15 stations de la norme DIN 4710/2003, ce pour les 15 années allant de 1991 à 2005. Elles ont depuis

1. Jüttemann, H., et G. Schaal : HLH 10/82 page 355/60. Masuch, J. : HLH 11/82 page 387/93.

2. VDI 2078 : 1996-07, p. 25.

3. Albers, K.-J. et Eyrych, N : TAB 3 : 2006.

Tableau 1.1.3-2 – Valeurs de la température et de l'humidité pour différentes villes du globe*) (t_r = température sèche de l'air, t_h = température humide)

Ville	Niveau de la mer en m	Hiver t_u en °C	Été	
			t_u en °C	t_h en °C
Europe				
Athènes	107	− 2	36	22
Berlin	40	− 15	32	21
Bruxelles	100	− 10	30	21
Budapest	150	− 12	33	21
Bucarest	80	− 20	32	22
Hambourg	30	− 15	28	19
Helsinki	10	− 24	27	19
Istanbul	70	− 4	34	23
Copenhague	10	− 13	28	20
Lisbonne	100	+ 3	34	22
Londres	40	− 1	28	19
Madrid	650	− 4	26	22
Marseille	70	− 6	33	22
Moscou	140	− 30	31	21
Naples	60	− 2	35	24
Nice	12	0	30	23
Oslo	30	− 17	27	19
Paris	50	− 10	32	21
Prague	200	− 16	32	19
Rome	50	− 1	36	23
Séville	30	−	40	27
Sébastopol	20	− 12	34	−
Stockholm	50	− 19	27	19
Valence	25	− 1	33	24
Viennes	200	− 15	33	21
Zurich	490	− 16	29	20
Afrique				
Accra (Ghana)	27	19	33	27
Addis-Abeba	2 450	− 3	27	19
Alexandrie	30	5	38	24
Alger	60	+ 3	37	26
Casablanca	230	+ 2	33	25
Dakar	20	15	36	23
Darussalam	15	17	33	28
Durban	5	10	35	24
Elisabethville	1 230	2	35	21
Freetown	10	18	33	27
Johannesburg	1 750	− 3	30	21
Le Caire	110	4	40	22
Kapstadt	10	4	34	22
Lagos (Nigéria)	3	20	33	28
Léopoldville	320	16	35	28
Marrakech	470	3	41	−
Mombassa	15	−	33	26
Nairobi	1 800	7	28	18
Oran	100	−	35	26
Tanger	70	−	33	24
Teneriffa	60	10	31	−
Tombouctou	250	8	47	−
Tunis	65	+ 2	39	25
Tripoli	20	4	39	27
Windhuk	1 700	0	33	19
Asie				
Aden	7	17	39	29
Ankara	850	− 14	35	20
Bagdad	60	4	45	23

*) ASHRAE Fundamentals 2005.

Köppen : ébauche des connaissances climatiques, Berlin 1931. Guide IHVE 1970/72.

Feuillelet technique DKV 0-20 et 0-21 (association allemande de la technique du froid).

Quenzel : données météorologiques. 1969.

Diverses autres sources.

Ville	Niveau de la mer en m	Hiver t_w en °C	Été	
			t_w en °C	t_h en °C
Bangkok	10	16	36	28
Basra		4	33	28
Djakarta	10	20	33	26
Beyrouth	30	4	33	26
Bombay	10	16	34	28
Chungching	230	3	36	27
Delhi	220	4	40	24
Hanoi	15	8	36	30
Hong Kong	30	6	33	28
Jerusalem	750	- 2	35	21
Calcutta	10	10	38	28
Canton	-	15	35	28
Koweït	5	4	45	31
Manilla	10	17	35	28
Mukden	70	-	35	26
Saigon	10	20	33	28
Seoul	87	- 14	32	26
Shanghai	10	- 1	36	28
Singapour	0	18	32	28
Téhéran	1 200	- 5	35	22
Tokyo	20	- 3	33	26
Vladivostok	20	- 25	30	22
<i>Australie</i>				
Brisbane	40	+ 4	32	25
Melbourne	30	0	35	21
Sidney	40	5	35	23
<i>Amérique du nord</i>				
Bermudes	10	15	31	24
Boston	15	- 18	33	24
Cleveland	205	- 20	35	24
Chicago	190	- 23	35	24
Dallas	225	- 12	38	26
Detroit	195	- 23	35	24
Honolulu	5	15	28	23
Houston	60	- 7	35	26
Los Angeles	165	2	32	21
Miami	5	2	33	26
Montréal	55	- 23	30	23
Nouvelle Orléans	5	- 7	35	26
New York	130	- 18	35	24
Ottawa	105	- 23	31	23
Pittsburg	280	- 20	35	24
Québec	90	- 26	30	23
San Francisco	50	2	29	18
Toronto	100	- 23	31	26
Washington	40	- 18	35	26
<i>Amérique centrale et Amérique du Sud</i>				
Bogota	2 650	- 1	21	18
Buenos Aires	20	- 1	35	24
Guatemala	1 500	7	31	23
Havane (Cuba)	25	15	32	26
La Paz	3 600	- 2	23	14
Lima	120	15	31	24
Manaus	40	20	35	27
Maracaibo	5	21	35	28
Mexico City	2 300	2	26	16
Montevideo	10	2	33	23
Nassau	5	13	32	27
Panama	5	21	31	26
Rio de Janeiro	60	13	32	26
Santiago de Chile	520	2	32	20
San Juan, P. R.	10	20	32	26
Sao Paulo	780	4	31	24
Valparaiso	40	8	27	20

Tableau 1.1.3-3 – Corrélation entre la température de l'air, t , et la teneur en vapeur d'eau, x , pour l'année ; Potsdam ; valeurs mesurées ; 24 h/jour. Nombre annuel moyen des cas (en dixièmes) ; mesures horaires de la période 1961-1990 (tableau 341 de DIN 4710:2003-01)

t/x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
35									3	1
34									1	3
33					1	1	1	1	4	2
32					1	0	2	5	7	8
31			0	1	1	2	4	6	15	20
30				1	1	3	8	11	19	29
29				0	2	7	10	19	32	33
28				1	2	10	16	33	40	46
27				2	3	8	19	45	65	66
26				1	3	14	30	63	81	77
25		1		3	7	23	42	72	96	105
24		1		2	16	31	69	101	119	124
23			0	4	15	51	86	139	157	149
22			0	5	19	55	101	167	178	197
21			1	8	29	71	143	209	218	210
20			1	11	33	98	173	238	268	248
19			2	17	56	121	214	302	323	303
18			5	23	69	153	271	367	362	340
17			3	37	100	166	295	413	456	390
16			5	51	107	214	376	485	525	495
15			10	59	136	239	421	574	630	643
14			11	63	170	269	485	698	702	945
13		0	16	74	189	330	577	810	946	839
12		0	27	85	222	416	716	936	1 338	109
11		3	28	112	244	470	818	1 277	686	
10		4	36	139	323	603	1 027	1 486	42	
9		3	53	161	364	710	1 391	749		
8		4	66	229	515	979	1 602	62		
7		7	76	276	700	1 347	1 044			
6		7	93	360	961	1 908	134			
5		6	103	513	1 476	1 559				
4		12	133	664	2 164	753				
3		10	174	947	2 522	20				
2	1	19	207	1 375	1 910					
1	0	28	270	2 073	990					
0		36	392	3 091	24					
-0	0	42	515	1 996						
-1		62	848	1 350						
-2	1	79	1 308	451						
-3	1	101	1 230							
-4		139	894							
-5	0	175	620							
-6		272	427							
-7	0	395	152							
-8	2	446	8							
-9	2	302								
-10	3	181								
-11	2	219								
-12	3	156								
-13	6	117								
-14	11	76								
-15	23	38								
-16	34	4								
-17	26									
-18	24									
-19	7									
-20	6									
-21	1									
-22	0									
-23	2									
-24	1									
Total	156	3 045	7 715	14 195	13 373	10 629	10 074	9 270	7 311	5 381

Exemple : $t = 6\text{ °C}$; $x = 5\text{ g}$ vapeur d'eau (WD)/kg d'air secL'état où la température de l'air $t = 6$ à $6,9\text{ °C}$, et $x = 5$ à $5,9\text{ g}$ WD/kg d'air sec, se produit en moyenne 1 908 dixièmes d'heures par an, soit 190,8 heures par an.

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Total
1										5
1	1	1	0							7
5	3	3	2							21
9	6	3	4	2		0				47
17	6	7	8	3	0					90
19	14	12	9	3	2					132
33	21	16	9	2	1	1	0			186
44	29	18	12	7	2	2	0			262
61	42	26	16	12	2	1	1			369
87	58	28	15	5	1	1	0			464
92	64	41	21	8	3	1		0		578
116	86	45	24	9	5	1				748
129	94	54	26	9	4	1				916
147	110	58	28	10	3					1 079
185	120	72	29	13	3					1 311
202	131	76	42	19	2					1 542
257	163	94	56	4						1 909
263	195	170	25							2 244
357	315	113								2 647
454	313	8								3 033
641	38									3 391
264										3 606
1										3 781
										3 849
										3 638
										3 663
										3 431
										3 457
										3 450
										3 462
										3 658
										3 726
										3 672
										3 513
										3 361
										3 543
										2 553
										2 260
										1 839
										1 339
										1 033
										795
										699
										547
										456
										304
										283
										221
										159
										122
										87
										61
										38
										26
										24
										7
										6
										1
										0
										2
										1
3 385	1 808	845	326	106	27	8	2	0		87 656

été publiées sous l'intitulé VDI 4710.3 E¹. Elles ne montrent pas de profonds changements, mais toutefois des changements perceptibles. Le tableau 1.1.3-4 illustre cela par l'exemple de Potsdam. En comparant les tableaux 1.1.3-3 et -4, on constate d'abord que :

- la température maximale passe de 35 à 38 °C ;
- la température minimale passe de –24 à –18 °C ;
- l'humidité maximale passe de 18 à 19 g/kg d'air sec.

Une analyse de l'ensemble des stations excluant les valeurs extrêmes particulières, mais intégrant un léger dépassement toléré d'environ 10 à 15 h/a (environ 1 à 1,5 % de toutes les heures) conduit à des valeurs présentant des différences seulement marginales par rapport à celles admises jusqu'ici. Des groupes de travail DIN ou VDI les définiront prochainement.

La description des corrélations t_x selon VDI 4710.3 projette d'intégrer dans les pages de tableau des informations supplémentaires telles que les degrés-jours pour différentes températures limites, fréquences cumulées d'enthalpie estivale, heures-grammes d'humidification et de déshumidification, comme le montre ici l'exemple de Potsdam (tableau 1.1.3-4).

Les différences par rapport au tableau 1.1.3-1a sont perceptibles, mais restent mineures. Les nouvelles valeurs sont directement comparées dans le tableau 1.1.3-1b.

Le tableau 1.1.3-5 indique l'ordre de grandeur des points de référence en période estivale et hivernale d'après la définition ci-dessus pour la température, la teneur en vapeur d'eau et l'enthalpie. Le tableau 1.1.3-5 a été précisé pour le livre blanc VDI 4710.3, de sorte que les dépassements des seuils maximal et minimal soient compris entre 0,09 et 0,15 % environ. Le niveau d'enthalpie convient. Seule Mannheim s'écarte vers une valeur supérieure ($h = 67$ kJ/kg), les stations de montagne tendant vers le bas (Fichtelgebirge avec $h = 54$ kJ/kg).

Pour définir les caractéristiques des matériaux et des équipements dans différentes régions du globe, on distingue 4 climats :

Climat froid.....	moyenne mensuelle la plus faible inférieure à – 15 °C	Groenland, Sibérie
Climat tempéré.....	moyenne mensuelle entre – 15 °C et + 25 °C	Europe du Nord, Europe centrale, États du nord de l'Amérique.
Climat sec.....	moyenne mensuelle la plus haute supérieure à + 25 °C	Afrique du Nord, Arabie, États du sud de l'Amérique.
Climat tropical.....	au moins une moyenne mensuelle supérieure à + 20 °C et 80 % d'humidité relative	Inde, Afrique équatoriale, Amazonie

Exemple de climat à l'étranger, voir fig. 1.1.3-5, cf. infra les informations VDI 4710.1.

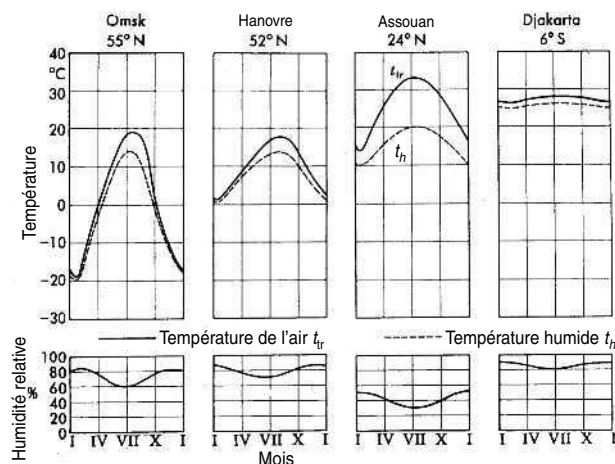


Fig. 1.1.3-5 : Exemples de climats.

1. VDI 4710.3 E : 2009-08.

Tableau 1.1.3-4 – Corrélation entre température de l'air t en °C et teneur en eau x en g WD/kg d'air sec pour l'année. Postdam, période de 1991 à 2005

t/x	Nombre annuel moyen des cas (en dixièmes d'heures), 24 mesures horaires par jour										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
38								1	1		
37					1		1			1	
36						1	1	1	2	1	
35							1	3	2	1	1
34							3	1	5	7	1
33							2	7	2	5	7
32						2	11	9	9	15	13
31						1	13	13	25	16	15
30					2	11	15	22	32	35	23
29						11	27	43	37	42	40
28					3	22	35	50	63	62	46
27				1	11	21	41	67	73	65	73
26					13	29	58	79	102	81	81
25				1	14	35	67	88	113	130	107
24				5	27	38	91	99	129	141	127
23				3	15	45	91	143	159	173	157
22				3	19	53	94	173	186	201	153
21			3	13	32	63	107	239	251	223	213
20			5	14	41	73	148	245	325	273	248
19			3	17	58	86	187	281	355	329	273
18		1	4	25	53	109	217	341	443	398	331
17			2	33	77	143	267	410	522	433	351
16			13	42	69	181	303	460	581	478	438
15		1	13	55	89	204	332	564	707	530	725
14		1	7	55	99	226	366	669	758	718	643
13		1	15	68	129	281	491	769	853	1056	25
12		1	24	87	166	314	612	927	1321	361	
11		3	29	99	197	399	739	1047	1157		
10	1	3	29	123	260	539	828	1506	214		
9		1	43	169	365	737	1035	1021			
8		6	50	208	465	965	1441	171			
7		10	71	221	697	1281	1170				
6		8	88	268	954	1859	333				
5		11	105	403	1316	1789					
4		8	143	587	1827	1004					
3		14	166	825	2561	17					
2		17	175	1154	2223						
1		19	225	1872	1243						
0		23	301	3271	86						
-0		21	454	2204							
-1		36	700	1377							
-2		39	1025	547							
-3	3	72	1089	15							
-4	2	99	798								
-5	1	122	600								
-6	2	175	363								
-7	1	295	109								
-8	3	281									
-9	1	250									
-10	5	156									
-11	6	125									
-12	2	72									
-13	4	58									
-14	1	35									
-15	10	12									
-16	10										
-17	13										
-18	2										
-19											
Total	67	1926	6654	13765	13112	10539	9127	9449	8427	5795	4091
FREQc	67	2043	8697	22462	35574	46113	55240	64689	73116	78911	83002

FREQc = fréquence cumulée

Fréquence cumulée des enthalpies estivales (en dixièmes d'heures)

Enthalpie (kJ/kg d'air sec)													
>=80	>=78	>=76	>=74	>=72	>=70	>=68	>=66	>=64	>=62	>=60	>=58	>=56	>=54
>=52	>=50	>=48	>=46	>=44	>=42								
Fréquence cumulée													
1	1	1	1	3	6	18	50	116	228	434	750	1231	1840
													</

Nombre annuel moyen des cas (en dixièmes d'heures), 24 mesures horaires par jour										Total	FREQc
11	12	13	14	15	16	17	18	19		2	2
										3	5
										6	11
1	1	1								11	22
4	2	2	1					1		27	49
4	2	1	1							31	80
14	5	3	1	1						83	163
22	4	10	5	1						125	288
23	15	9	6							193	481
30	21	17	3	1						272	753
33	28	18	7	1						368	1121
53	37	20	11	5						478	1599
59	40	32	17	1						592	2191
66	49	35	11	3	1					720	2911
100	61	43	16	5		1				883	3794
106	76	45	11	2	1					1027	4821
145	87	59	22	4	1					1200	6021
163	104	39	16	7	1					1474	7495
189	132	68	34	7						1802	9297
219	135	92	25							2060	11357
257	194	105								2478	13835
289	303									2830	16665
501	37									3103	19768
219										3459	23227
										3542	26769
										3688	30457
										3813	34270
										3670	37940
										3503	41443
										3371	44814
										3306	48120
										3450	51570
										3510	55080
										3624	58704
										3569	62273
										3583	65856
										3569	66425
										3359	72784
										3681	76465
										2679	79144
										2113	81257
										1613	82870
										1179	84049
										899	84948
										723	85671
										540	86211
										405	86616
										284	86900
										251	87151
										161	87313
										131	87443
										74	87517
										62	87579
										36	87615
										22	87637
										10	87647
										13	87660
										2	87662
										0	87662
2497	1333	599	187	38	4	1			1		
85499	86832	87431	87618	87656	87660	87661	87661	87662			

FREQc = fréquence cumulée

Seuil d'humidité (g/kg d'air sec)								Températures limites (°C)	Journées seuils (KD)
5	6	7		9	10	11		19	3696
Heures-grammes d'humidification (gh/kg d'air sec)	5106	9190	14258					17	3081
Heures-grammes de déshumidification (gh/kg d'air sec)					2396	1231	561	15	2516

Tableau 1.1.3-5 – Proposition de définition des points de référence pour la température et l'humidité extérieures ainsi que l'enthalpie en fonction d'un risque précis 0,1 % = 8,8 ≈ 9 h/a, émanant du livre blanc VDI 4710.3

Station représentante DIN 4710	Été		Hiver
	t (°C)	h (kJ/kg)	t (°C)
Bremerhaven	30	63	- 10
Rostock-Warnemünde	30	61	- 10
Hamburg-Fuhlsbüttel	31	62	- 12
Potsdam	33	64	- 14
Essen	31	64	- 10
Bad Marienberg	29	59	- 12
Kassel	32	63	- 12
Braunlage	28	58	- 15
Chemnitz	31	62	- 14
Hof	30	60	- 16
Fichtelberg	24	54	- 17
Mannheim	34	67	- 12
Mühlendorf/Inn	32	65	- 19
Stötten	29	61	- 14
Garmisch-Partenkirchen	31	62	- 17

En génie climatique, la fréquence des valeurs d'enthalpie sur l'année est importante pour *calculer la rentabilité*. La fig. 1.1.3-6 montre la courbe de fréquence globale en Allemagne, la fig. 1.1.3-7 donne la variation annuelle de l'enthalpie *mensuelle moyenne*.

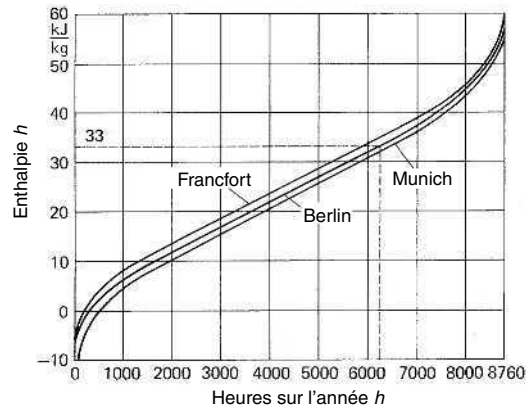


Fig. 1.1.3-6 : Fréquence globale annuelle de l'enthalpie en Allemagne.

La fig. 1.1.3-8 présente des données détaillées temporaires, telles qu'elles sont utilisées pour calculer la consommation d'énergie consacrée au traitement de l'air.

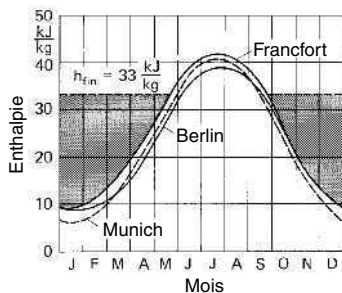


Fig. 1.1.3-7 : Variation annuelle de l'enthalpie moyenne mensuelle en Allemagne*).

*) Selon VDI 2071-2:1983-03.

Indication : la nouvelle édition de la VDI 2071:1997-12 contient les méthodes graphiques d'approximation.

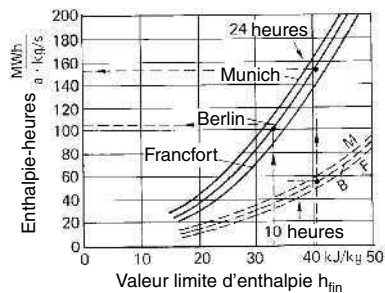


Fig. 1.1.3-8 : Enthalpie-heures sur l'année pour le chauffage et l'humidification sur une durée de 24 h, et un fonctionnement de 10 h (de 7 à 17 h) en fonction de la valeur limite d'enthalpie h_{fin} .*).

*) Selon VDI 2071-2:1983-03.

Exemple

L'enthalpie $h = 33$ kJ/kg correspondant à un point de rosée de $11,5$ °C de l'air ambiant à 22 °C avec une humidité relative de 50 %. Elle est plus faible pour $6\,300$ heures par an avec 24 h/24 de fonctionnement de l'installation. Elle est supérieure pour un fonctionnement durant $2\,460$ heures (fig. 1.1.3-6).

Tout comme la température et l'humidité, le concept d'heures est également utilisé pour l'enthalpie. Les enthalpie-heures sont le produit du nombre des heures annuelles et de la différence d'enthalpie entre l'air extérieur et une valeur limite admise pour l'air soufflé h_{fin} (fig. 1.1.3-8).

Exemple

Pour un air soufflé avec $h_{fin} = 33$ kJ/kg et une période de 24 h, les enthalpie-heures à Berlin (fig. 1.1.3-8) sont de :

$$105\,000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{\text{h}}{\text{a}} = 105 \frac{\text{MWh}}{\text{a} \cdot \text{kg/s}}$$

Avec un débit massique d'air de 1 kg/s, l'énergie annuelle pour réchauffer et humidifier l'air extérieur avec $h_{fin} = 33$ kJ/kg est par conséquent :

$$Q = 105 \text{ MWh/a.}$$

La figure 1.1.3-8 peut également s'obtenir en planimétrant la surface entre la courbe de la figure 1.1.3-7 et h_{fin} . Application également pour la récupération de la chaleur (fig. 4.3.8-8).

La VDI (Verein Deutscher Ingenieure : Association des ingénieurs allemands) rassemble les méthodes permettant de calculer les *coûts d'énergie annuels* pour traiter l'air dans les installations de conditionnement d'air¹. Tout comme sur le feuillet 3, entre-temps retiré de la VDI 2067, on a également défini des zones dans le feuillet 21 où sont respectivement figurés des processus à chaque fois définis dans le climatiseur (p. ex. la zone I pour chauffer, humidifier, la zone II pour refroidir, la zone III pour déshumidifier, refroidir, réchauffer, zone IV pour simplement réchauffer) (voir fig. 1.1.3-9).

Pour chaque zone, l'air extérieur, l'enthalpie moyenne et les différences d'enthalpie nécessaires pour le traitement de l'air sont donnés.

1. VDI 2067-21:2003-05 remplace VDI 2067-3:1983-12. Cette directive appartient à un ensemble de directives décrivant les calculs des besoins en énergie valables pour tous les domaines de la technique appliquée au bâtiment : Bases feuillet 10, méthode de calcul feuillet 11 (remplacé par noyau de calcul dans VDI 6007), besoin en énergie pour le chauffage de l'eau potable feuillet 12, chauffage à eau chaude feuillet 20, traitement de l'air feuillet 21 etc., répartition des dépenses en énergie (feuillet 30), installations solaires (feuillet 40), pompes à chaleur (feuillet 42), centrale de cogénération (feuillet 44), chauffage à distance (feuillet 46). Une grande partie des derniers feuillets sont encore en préparation.

On trouve, pour 15 stations allemandes, les fréquences sous forme d'un total annuel pour 12 et 24 heures, et aussi sur 24 heures mensuellement. De cette façon, les degrés-jours pour le chauffage ou le refroidissement de l'air peuvent être indiqués en fonction des points de référence souhaités, tout comme les grammes-heures pour l'humidification ou la déshumidification de l'air.

Suivant les phases de traitement de l'air d'une installation, il est possible de modifier et/ou de subdiviser les zones indiquées (p. ex. suivant les lignes d'enthalpie constantes avec un saturateur d'eau).

Dans VDI 2067-21 sont indiqués les algorithmes pour les différents types d'installation. Les calculs manuels, plus laborieux, devraient toutefois être remplacés par des programmes appropriés au moyen d'une évaluation des différentes données de la DIN 4710.

Actuellement, les firmes spécialisées dans les logiciels préfèrent pour leurs installations les tests de référence qui sont établis de façon analogue aux zones climatiques de la DIN 4710, à partir du même ensemble de données, et disponibles depuis auprès du DWD (service allemand de météorologie). Toutefois, ceux-ci ne constituent qu'un ensemble partiel, alors que les tableaux 3 de la DIN 4710 décrivent de façon exhaustive toutes les données des années 1961-1990.

Note : l'évolution accélérée de la technique de calcul fait que peu d'analyses énergétiques annuelles sont faites manuellement.

On renonce donc ici aux évaluations partielles alors habituelles, comme le VDI 2067-3, maintenant supprimé. La *DIN 4710:2003-01*, entre-temps publiée permet, au moyen du tableau 3 (cf. tableau 1.1.3-3) et des algorithmes indiqués dans le VDI 2067-21:2003-05, d'appliquer les calculs correspondants aux différents systèmes de climatisation, voire au degré de confort spécialement souhaité, auquel cas une telle évaluation spécifique ne pose pas de problème, puisque la DIN 4710 sert aussi de DWG-CD.

Les firmes spécialisées dans les logiciels préfèrent toutefois (cf. *supra*) les tests de référence, fidèles au plan énergétique, et qui sont aussi valables¹ pour les 15 postes de la DIN 4710 et permettent de présenter les installations pour un laps de temps précis. Sans doute toutes les conditions reconnues comme possibles ne sont-elles pas incluses dans la DIN 4710, mais en référence à la stratégie d'installation correcte au plan temporel, de tels résultats sont très fiables pour des données énergétiques.

Cela ne vaut pas pour des données de valeurs extrêmes. Pour obtenir ici un niveau de sécurité équivalent, les données sont combinées de façon à correspondre aux tests de référence pour 3 mois d'un hiver extrême et pour 3 mois d'un été extrême, et permettre par exemple de déterminer la fréquence de dépassement d'une température limite dans une pièce lors d'un été extrême par rapport à un été moyen.

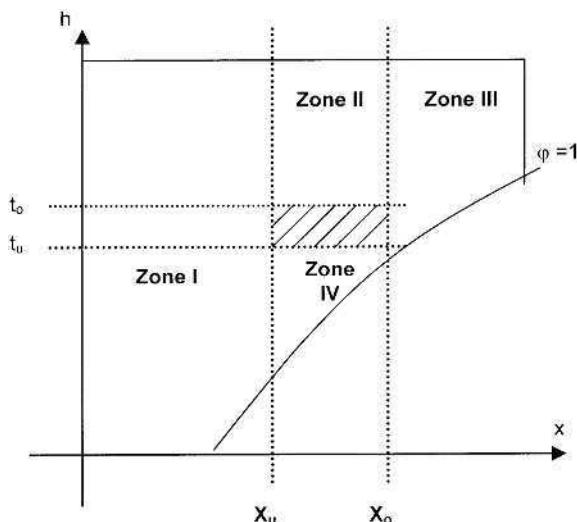


Fig. 1.1.3-9 : Répartition des zones permettant de distinguer les différents processus de traitement de l'air pour une installation RTL, sur un graphique h, x .

Cependant, les procédés classiques en donnent une bonne idée et peuvent être utilisés pour procéder à une évaluation de base.

1. Christoffer, J. ; Deutschländer, Th. ; Webs, M. : Tests de référence pour conditions météorologiques moyennes et extrêmes TRY (2004) Offenbach, autoédition du service météorologique allemand.

Les corrélations t, x de DIN 4710 permettent une interprétation beaucoup plus fiable que les valeurs limites t_p et t_f ; par exemple, selon le tableau 1.1.3-2, on peut d'après *tous* les critères (température, humidité, enthalpie) déterminer avec précision un risque de dépassement défini.

Comme cette précision est particulièrement importante pour les applications industrielles (par exemple dans le textile), les services météorologiques allemands de Hambourg et de la VDI ont décidé d'établir des statistiques analogues pour 20 sites hors d'Europe, qui doivent ensuite fournir une précision quasi comparable lors de l'interprétation. Le projet VDI 4710,1 est paru en décembre 2006, le livre blanc en décembre 2008¹. VDI 4710,1 comprend les données météorologiques de 20 stations hors Europe situées dans des zones climatiques très diverses, allant de l'Alaska à l'Australie. Bien entendu, il ne saurait être question d'universalité, mais le format des données ayant été également choisi pour DIN 4710, il est désormais possible et aisé d'effectuer aussi des calculs pour les stations hors Europe au moyen des programmes classiques.

De par ses activités liées aux prévisions météorologiques et ses accords avec la WMO (*World Meteorological Organization*), le DWD (service météorologique allemand) reçoit toutes les trois heures une importante quantité de données pertinentes provenant de 5 000 stations à travers le monde ; il peut donc mettre à disposition sur demande des statistiques concernant de nombreux autres endroits (service alors payant).

À titre d'exemple seulement, voici un tableau extrait de VDI 4710,1 : le tableau 1.1.3-6 indique la corrélation t, x pour Abu Dhabi.

Pour de plus amples explications sur VDI 4710,1, se reporter à ².

Concernant les fréquences cumulées marginales, de nombreux calculs peuvent être rapidement effectués – par exemple pour déterminer la quantité de condensats dans le cas d'une déshumidification. L'avantage de présenter toutes les caractéristiques dans une vue d'ensemble est manifeste.

-6 Hygrométrie

Une grande partie des matériaux de notre environnement contiennent de l'eau en plus ou moins grande quantité. La teneur en eau dépend de l'humidité relative de l'air. Ces matières sont dites *hygroscopiques*. Lorsque l'humidité de l'air ambiant persiste assez longtemps, s'installe un état d'équilibre, au cours duquel la matière concernée ni ne capte l'eau ni ne l'élimine. Exemple fig. 1.1.3-10 qui présente les isothermes de sorption de différentes matières.

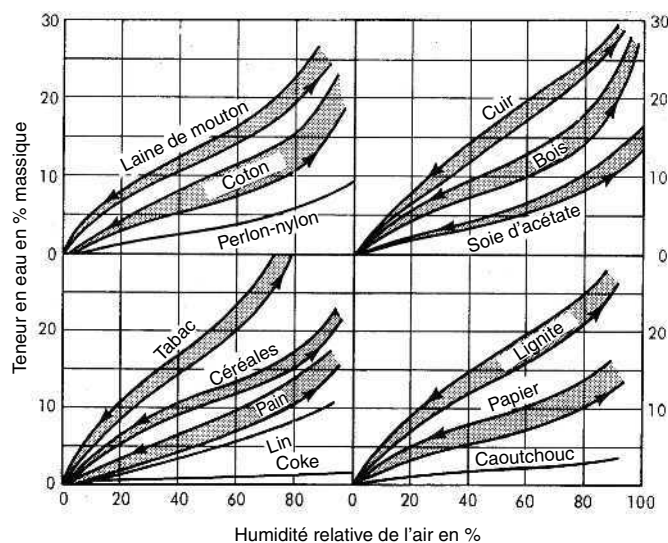


Fig. 1.1.3-10 : Teneur en eau d'équilibre de différentes matières à 20-30 °C.
(Courbe d'adsorption et de désorption*)

*) Cahier de référence 6 de la communauté spécialisée des installations de séchage et de traitement de l'air de la VDMA. 1964.

1. VDI 4710-1 : Statistiques météorologiques de stations hors d'Europe, 2013.

2. Masuch, J. ; Rosenhagen, G. ; Dehne, K. ; Riecke, W. ; Hollenbach, K. : Présentation de données climatiques hors Europe pour la technique du bâtiment HLH 58 (2007), H. 4-7.