

PAS SI SIMPLE...



HUMIDIFIER L'AIR INTÉRIEUR D'UN LOCAL OUI! MAIS...

En plein hiver et pour peu que le local considéré soit un peu surchauffé, le degré hygrométrique peut y être très faible, ce qui présente des inconvénients tant sur le plan du confort thermique que sur celui de la santé, en particulier pour les jeunes enfants et les nourrissons. Le médecin

conseille alors souvent d'humidifier l'air mais, et c'est là où le bât blesse, les moyens pour y arriver ne sont pas bien connus et comme nous le verrons plus loin le fait par exemple de placer un récipient rempli d'eau dans un local ne change pas grand chose au degré hygrométrique de l'air...

Dans ces conditions il est nécessaire de connaître plus précisément les quantités d'eau à évaporer pour obtenir un résultat satisfaisant et d'examiner en parallèle les quantités d'eau qui s'évaporent naturellement à la surface libre des récipients remplis d'eau en fonction, entre autres, de la température de l'eau. Les conclusions apparaîtront d'elles-mêmes...

t_e = température extérieure.

ϵ = degré hygrométrique.

W = masse d'humidité par kg d'air sec.

Cet air extérieur réchauffé selon les cas à + 19°C, + 23°C ou + 25°C conduit en l'absence d'apports d'humidité (2) aux degrés hygrométriques donnés dans le tableau de la figure 1.

1 Calcul des quantités d'eau à évaporer

Considérons le cas d'un local de 30m³ et admettons trois taux de renouvellement d'air: 0,5 - 1 et 2 volumes/heure. Admettons également que ce local puisse être chauffé à trois températures différentes: 19°C - 23°C et 25°C et fixons-nous 50% comme degré hygrométrique souhaité (1).

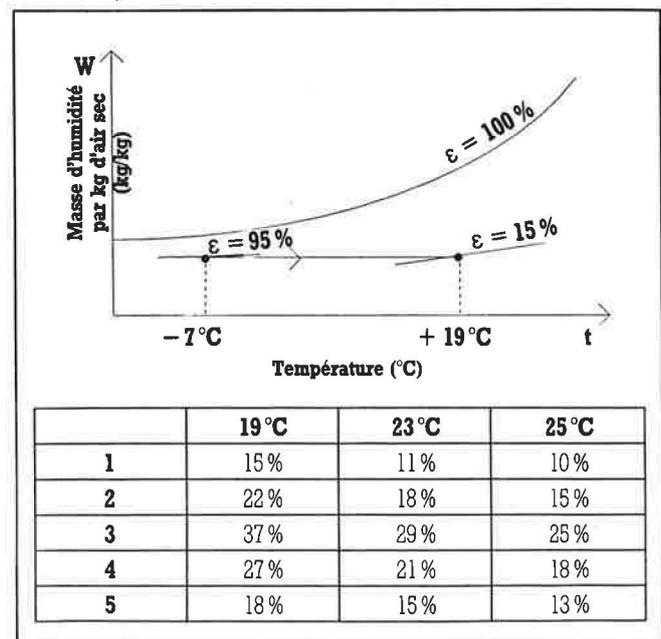
Par ailleurs on adopte les caractéristiques suivantes pour l'air extérieur:

- 1) $t_e = -7^\circ\text{C}$; $\epsilon = 95\%$; $W = 0,002 \text{ kg/kg}$;
- 2) $t_e = 0^\circ\text{C}$; $\epsilon = 80\%$; $W = 0,003 \text{ kg/kg}$;
- 3) $t_e = +7^\circ\text{C}$; $\epsilon = 80\%$; $W = 0,005 \text{ kg/kg}$;
- 4) $t_e = +7^\circ\text{C}$; $\epsilon = 60\%$; $W = 0,0037 \text{ kg/kg}$;
- 5) $t_e = +7^\circ\text{C}$; $\epsilon = 40\%$; $W = 0,0025 \text{ kg/kg}$.

(1) Bien que l'on puisse se contenter en ce qui concerne le confort thermique d'un degré hygrométrique au moins égal à 30% dans les conditions habituelles de température intérieure.

(2) Ce qui pratiquement n'est jamais le cas dans les locaux habités puisque le métabolisme des occupants entraîne un apport d'humidité (de l'ordre de 50 grammes/h et par occupant adulte) sans oublier l'humidité stockée dans les parois et le mobilier qui peut être temporairement restituée (aspect dynamique du transfert d'humidité analogue à celui de la chaleur).

Figure 1. Réchauffage de l'air sans apport d'humidité (diagramme de Carrier)



Avec 50 % de degré hygrométrique, la mesure d'humidité par kg d'air sec W prend les valeurs suivantes :

A = 19 °C	W = 0,0068 kg/kg
B = 23 °C	W = 0,0087 kg/kg
C = 25 °C	W = 0,0099 kg/kg

Ce qui permet de déterminer l'augmentation nécessaire de la masse d'humidité par kg d'air sec, ΔW , en fonction des caractéristiques de l'air extérieur et de l'air intérieur (figure 2).

Avec une valeur moyenne de 0,8 m³/kg pour le volume d'air humide contenant la masse unité d'air sec, on établit aisément le **tableau 1** qui donne les quantités d'eau à évaporer en gramme/heure pour les différentes combinaisons des caractéristiques de l'air extérieur et intérieur.

Approximativement il faut une quantité d'eau égale à 0,7 gramme par kg d'air sec pour augmenter l'humidité relative de l'air de 5% lorsque la température intérieure est égale à +19°C, à 0,85 gramme et 1 gramme lorsque la température intérieure est respectivement égale à 23 et 25°C.

Première conclusion

Un taux de renouvellement d'air excessif associé à une surchauffe du local conduit à des quantités d'eau à évaporer relativement importantes : **de l'ordre du demi-litre d'eau par heure.**

Deuxième conclusion

Selon le taux de renouvellement d'air, la température intérieure du local et la température extérieure du moment, les quantités d'eau à évaporer sont dans un rapport de 1 à 15 pour obtenir le même degré hygrométrique intérieur.

Troisième conclusion

En plein hiver (conditions 2) avec un taux de renouvellement d'air égal à 1 volume/heure, il faut évaporer entre 142 et 258 grammes d'eau par heure selon la température intérieure pour maintenir un degré hygrométrique égal à 50 %, **ce qui correspond environ à 1 litre d'eau toutes les 4 à 7 heures.**

L'expérience est facile à faire! Chacun pourra s'assurer qu'il n'est pas si facile d'évaporer une telle quantité d'eau sans moyens appropriés.

2 Calcul de l'évaporation à la surface d'un plan d'eau

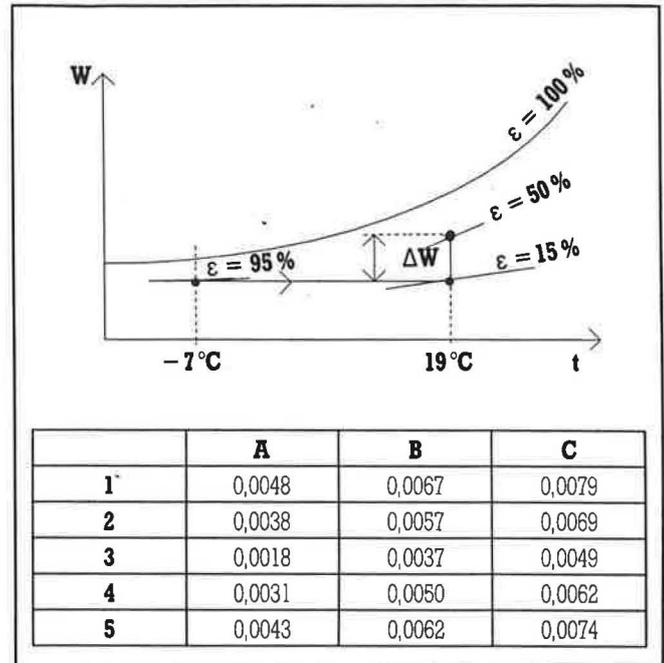
On peut approcher par la théorie la quantité d'eau qui s'évapore à la surface libre d'un plan d'eau. La relation la plus simple à utiliser est la formule de DALTON dont nous allons rappeler brièvement l'origine.

Tableau 1

Taux de renouvellement d'air	Volume horaire d'air neuf	Masse d'air sec correspondante	Reperage des caractéristiques air extérieur - air intérieur														
			1A	2A	3A	4A	5A	1B	2B	3B	4B	5B	1C	2C	3C	4C	5C
0,5	15 m ³ /h	18,75 kg/kg	90	71	34	58	81	126	107	69	94	116	148	129	92	116	139
1	30 m ³ /h	37,50 kg/kg	180	142	68	116	162	252	214	138	188	232	296	258	184	232	278
2	60 m ³ /h	75 kg/kg	360	284	136	232	324	504	428	276	376	464	592	516	368	464	556

Humidifier l'air intérieur d'un local

Figure 2. Détermination de l'augmentation de la masse d'humidité ΔW après réchauffage



2.1 ORIGINE DE LA FORMULE DE DALTON

La formule de **Stéfan** construite à partir de la théorie de la diffusion moléculaire se présente sous la forme suivante :

$$D = A \cdot \text{Log} \frac{P - p_v(t)}{P - p_{vs}(T)}$$

D = quantité d'eau évaporée.

P = pression atmosphérique.

p_v(t) = pression partielle de la vapeur d'eau, loin du plan d'eau, à la température **t** de l'air.

p_{vs}(T) = pression partielle de saturation de la vapeur d'eau près du plan d'eau à la température **T** de l'eau.

A = coefficient d'évaporation groupant plusieurs facteurs :

- ▷ constante des gaz parfaits,
- ▷ épaisseur de la couche diffusante,
- ▷ constante de diffusion de la vapeur dans l'air,
- ▷ température et pression.

Humidifier l'air intérieur d'un local

Transformons le terme logarithmique :

$$\text{Log} \frac{P - p_v(t)}{P - p_{vs}(T)} = \text{Log} \left(1 + \frac{p_{vs}(T) - p_v(t)}{P - p_{vs}(T)} \right)$$

et développons en série :

$$\text{Log} \left(1 + \frac{p_{vs}(T) - p_v(t)}{P - p_{vs}(T)} \right) = \frac{p_{vs}(T) - p_v(t)}{P - p_{vs}(T)} - \frac{1}{2} \left(\frac{p_{vs}(T) - p_v(t)}{P - p_{vs}(T)} \right)^2 + \dots$$

Lorsque

$$p_{vs}(T) - p_v(t) \ll P - p_{vs}(T)$$

et c'est bien le cas pour le problème qui nous préoccupe, **on ne peut ne conserver que le premier terme du développement** sans introduire d'erreur appréciable.

$$D = A \frac{p_{vs}(T) - p_v(t)}{P - p_{vs}(T)}$$

ce qui nous donne la formule pratique de Dalton.

ou encore :

$$D = 2,54 \cdot k \frac{t_{vs}(T) - \varepsilon p_{vs}(t)}{P - p_{vs}(T)}$$

D s'exprime en kg/hm²

k en kcal/hm²°C

P et p_{vs} en kg/cm²

ε est le degré hygrométrique de l'air loin du plan d'eau.

Remarques

1) Le dernier terme de cette dernière relation se calcule aisément à l'aide d'une table des valeurs de la pression de la vapeur d'eau saturée. Nous donnons, **tableau 2**, quelques valeurs pour des températures comprises entre 10 et 90°C :

2) La valeur du coefficient de convection k dépend de la vitesse de l'air. Malheureusement la documentation numérique sur ce sujet n'est pas très riche et nous avons pratiquement

$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta k}{k}$ ce qui implique que nous ne soyons pas trop exigeants quant à la précision finale. D'ailleurs la vitesse de l'air elle-même est rarement bien connue!

Les valeurs du coefficient k sont données dans les traités de thermique (3), elles peuvent varier selon les cas entre 5 et 30 kcal/hm²°C.

2.2 RELATION ENTRE LE COEFFICIENT D'ÉVAPORATION ET LE COEFFICIENT DE CONVECTION

Sans entrer dans le détail de la théorie on établit une relation entre le coefficient d'évaporation A et le coefficient de convection k (mieux connu) en étudiant les groupements sans dimension

$$\frac{A}{\sigma \delta} \quad \text{et} \quad \frac{k}{\sigma C_p}$$

σ = coefficient de transfert de masse.

δ = rapport $\frac{\text{masse volumique de la vapeur d'eau}}{\text{masse volumique de l'air}}$ # 0,622

C_p = chaleur massique de l'air humide ≈ 0,245 kcal/kg °C.

Le groupement $\frac{k}{\sigma C_p}$ est le nombre de LEWIS.

En admettant que ces groupements soient tous deux égaux à 1, ce qui n'est pas très éloigné de la réalité, on peut écrire :

$$k = \sigma C_p = 0,245 \sigma$$

$$A = \sigma \delta = 0,622 \sigma$$

$$\text{d'où} \quad A = \frac{0,622}{0,245} k \# 2,54 k$$

$$\text{et} \quad D = 2,54 \cdot k \cdot \frac{t_{vs}(T) - p_v(t)}{P - p_{vs}(T)}$$

2.3 APPLICATIONS NUMÉRIQUES

p_{vs}(T) varie entre 0,0125 kg/cm² (T = 10°C) et 0,7144 kg/cm² (T = 90°C) selon la température de l'eau

P est fixé à 1,033 kg/cm²

ε est fixé à 50 %.

	19°C	23°C	25°C
p _{vs} (t)	0,0222	0,0284	0,0320
ε p _{vs} (t)	0,0111	0,0142	0,0160

(3) VERON, McADAMS...

Tableau 2

Température (°C)	p _{vs} (kg/cm ²)
10	0,0125
12	0,0142
14	0,0162
16	0,0184
18	0,0209
20	0,0236
25	0,0320
30	0,0429
35	0,0569
40	0,0747
45	0,0971
50	0,1251
60	0,2023
70	0,3169
80	0,4822
90	0,7144

Avec un coefficient **k** égal à 10 kcal/hm²°C on obtient, en appliquant la formule de Dalton, les quantités d'eau évaporées données dans le **tableau 3** (en kg/hm²).

Nota : La relation de Dalton n'est applicable que dans la mesure où la température de l'eau est supérieure à la température de rosée de l'air intérieur, soit :

8°5 pour le couple **t** = 19°C
ε = 50 %

12° pour le couple **t** = 23°C
ε = 50 %

13°8 pour le couple **t** = 25°C
ε = 50 %

Dans le cas où la température de l'eau est inférieure à la température de rosée de l'air intérieur, l'air se déshumidifie au contact du plan d'eau (phénomène de condensation) (**figure 3**).

Remarques

1) Pour un même degré hygrométrique de l'air intérieur, plus la température intérieure est élevée plus la quantité d'eau évaporée diminue.

2) Lorsque la température de l'eau augmente, l'incidence de la température intérieure sur la quantité d'eau évaporée diminue pour devenir pratiquement négligeable à partir de 40°C.

3) Lorsque l'on place un récipient rempli d'eau dans un local à **t** (°C) on peut considérer après un certain laps de temps que l'eau est également à **t** (°C) (en l'absence d'un quelconque système de chauffage de l'eau).

Dans ces conditions **T** = **t** et l'on obtient, toujours pour ε = 50 %, les quantités d'eau évaporées suivantes :

t = T	Quantité d'eau évaporée (kg/hm²)
19°C	0,279
23°C	0,359
25°C	0,406

4) Tous les calculs précédents ont été réalisés en **régime permanent**, ce qui implique que la quantité d'eau évaporée compense précisément la quantité d'eau perdue avec l'air extrait afin de maintenir le degré hygrométrique intérieur à une valeur **constante**.

Cette situation est généralement précédée par un régime **transitoire** plus ou moins long selon les cas et dont l'origine temporelle est le moment où l'on met en fonctionnement le procédé d'humidification pour augmenter le degré hygrométrique jugé trop faible.

Ce régime particulier et temporaire, plus difficile à décrire et à formaliser que le régime permanent, n'entre pas dans le cadre de cette courte étude.

5) Si l'on admet une surface libre du plan d'eau égale à 0,04 m², ce qui correspond par exemple :

▷ à une surface rectangulaire de 80 cm × 5 cm,

▷ ou à une surface circulaire de 22 cm de diamètre, les quantités d'eau évaporées en gramme/heure sont données dans le **tableau 4**.

Si l'on compare ces valeurs aux besoins calculés au § 1 par exemple pour un local dont l'air est renouvelé une fois par heure et dont la température intérieure est voisine de 23°C (4), lorsque la température

(4) Température intérieure fréquemment constatée, au moins temporairement, dans les logements dont l'installation est déséquilibrée sur le plan thermique et dont la régulation ne prend pas en compte les apports solaires.

Humidifier l'air intérieur d'un local

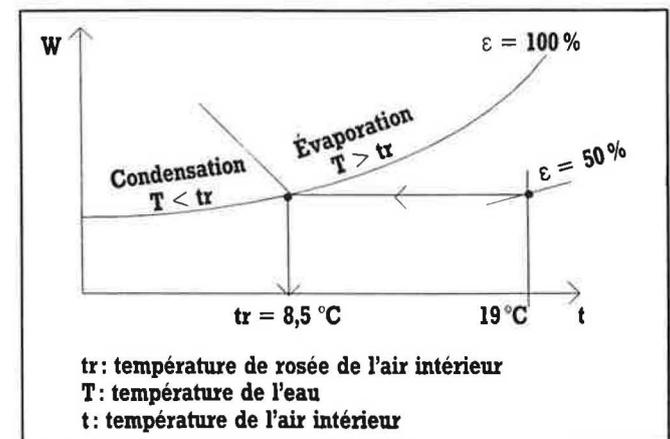
Tableau 3

Température de l'eau (°C)	Température de l'air intérieur (°C)		
	19°C	23°C	25°C
10	0,035		
20	0,314	0,236	0,191
30	0,816	0,736	0,690
40	1,686	1,604	1,556
50	3,189	3,103	3,052
60	5,846	5,751	5,696
70	10,847	10,737	10,673
80	21,725	21,582	21,499
90	56,07	55,823	55,679

Tableau 4

T (°C) \ t (°C)	19	23	25
20	12,6	9,4	7,6
30	32,6	29,4	27,6
40	67,4	64,2	62,2
50	127,6	124,1	122,1
60	233,9	230	227,8
70	433,9	429,5	426,9
80	869	863,3	860
90	2 243	2 233	2 227

Figure 3. Incidence de la température de rosée de l'air intérieur



extérieure est proche de 0°C (Conditions 2 B) soit **214 grammes par heure**, l'on se rend immédiatement compte qu'il faut (avec une surface libre de 0,04 m²) **chauffer l'eau à environ 60°C pour obtenir une production de vapeur d'eau convenable**.

3 Conclusion

Humidifier l'air d'un local n'est pas si simple qu'il y paraît à première vue. Dans bon nombre de cas, en particulier dans l'habitat

Humidifier l'air intérieur d'un local

existant, il faut évaporer une quantité d'eau importante, ce qui implique :

- ▷ soit de disposer d'une grande surface d'échange ou d'augmenter artificiellement cette surface par exemple à l'aide d'éléments fibreux capables de « pomper » l'eau par capillarité (5) ;
- ▷ soit d'augmenter le coefficient de convection k en augmentant la vitesse de l'air à proximité de la surface d'échange à l'aide d'un ventilateur ;
- ▷ soit de disposer d'un moyen de chauffage permettant de maintenir l'eau à une température suffisamment élevée ;
- ▷ soit encore de produire directement de la vapeur d'eau à l'aide d'un appareil approprié.

Toutes dispositions qui ne s'improvisent pas !

De nombreux matériels commercialisés sur le marché français utilisent ces différents procédés... qui ne sont forcément pas tous sans inconvénient (attention en particulier au niveau de bruit des matériels équipés d'un ventilateur) mais qui répondent dans leur ensemble aux besoins précédemment explicités.

L'acheteur éventuel devra se renseigner très précisément sur les caractéristiques des appareils (consommation électrique, capacité en eau, niveau de bruit, etc.) qui lui sont proposés ainsi que sur la nature et la fréquence des interventions d'entretien.

Dans tous les cas il est nécessaire **d'approvisionner régulièrement en eau le dispositif choisi** (il n'y a généralement que les installations

centralisées associées à un chauffage à air chaud qui soient équipées d'une alimentation automatique en eau de ville).

Avec l'hypothèse d'une température intérieure de 23°C et d'un taux de renouvellement d'air égal à 1 volume par heure, la consommation en plein hiver est **de l'ordre d'un litre d'eau toutes les 4 heures.**

Ce qui est, répétons-le, sans rapport avec la quantité d'eau évaporée à l'aide d'un quelconque récipient rempli d'eau...

Il convient également de remarquer que l'humidification se paye... et assez cher puisque l'évaporation d'un kilogramme d'eau nécessite approximativement 600 kilocalories (6).

Dans l'exemple précédent cela fait 3 600 kcal par jour, **soit plus de 4 kWh/Jour** (pour un seul local de 30m³) et ceci quel que soit la solution adoptée pour réaliser cette humidification (7). ■

(5) L'eau s'évapore alors selon une loi différente de celle traduite par la formule simplifiée de Dalton qui ne doit être utilisée que pour les plans d'eau à surface libre.

(6) Dans le cas d'évaporation naturelle à la surface d'un plan d'eau, la chaleur nécessaire au changement d'état de l'eau (transformation de chaleur sensible en chaleur latente) est prise à l'ambiance intérieure.

(7) En toute rigueur, la chaleur de vaporisation dépend de la température de l'eau, d'où l'intérêt, surtout pour les installations centralisées, de mettre en fonctionnement le système d'humidification uniquement lorsque le degré hygrométrique intérieur tend à s'abaisser au-dessous de la **valeur minimale compatible avec les exigences**, en particulier celles liées à la santé et au confort thermique des occupants.

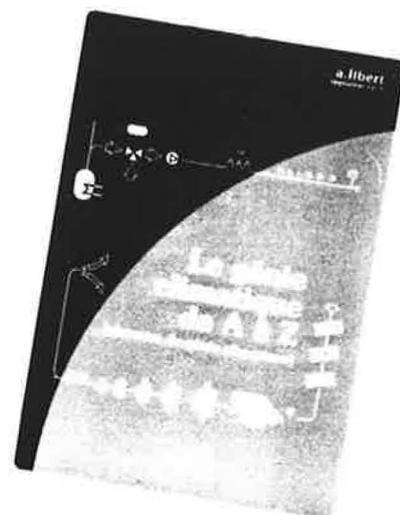
le génie climatique de A à Z

par **A. LIBERT**

En passant du chauffage dynamique à air pulsé, par l'humidification et le filtrage, le chauffage traditionnel à eau chaude, la pompe à chaleur et la régulation automatique qu'elle soit centralisée, terminale ou avec optimiseur, toutes les techniques du génie climatique sont examinées en étudiant les termes utilisés à ce propos. Ils sont plus de 500 répertoriés avec en regard leur définition et justifications techniques ; formules de calcul pour certains, méthode rapide de détermination pour d'autres.

Chaque définition est prétexte à rappeler des données de base : constantes de calcul, coefficients divers, etc.

Des mots-clés ou expressions-clés facilitent la recherche des termes.



240 pages. Prix : 175 F Franco

Les Éditions Parisiennes, 4, rue Charles-Divry, 75014 PARIS.