

ThermExcel

Présentation du programme PsychroSI

**Calculs psychrométriques,
adiabatiques, piscines, etc**

Jean Yves MESSE – THERMEXCEL

Copyright © 2004 - 2014 – ThermExcel - All Rights Reserved

1 GENERALITES

Le programme PsychroSI est pourvu d'une commande barre personnalisée donnant accès aux différentes procédures, boîtes de calculs et macro-commandes.

Les fichiers de travail sont créés séparément permettant d'alléger le stockage des données.

Le fichier de travail peut être constitué de différentes feuilles de calcul. Vous pouvez à partir du même fichier, insérer une nouvelle feuille de calcul ou dupliquer la feuille de calcul en cours pour une étude similaire et apporter les modifications complémentaires par la suite.

[Intégration de la barre d'outils personnalisée du programme de calcul](#)

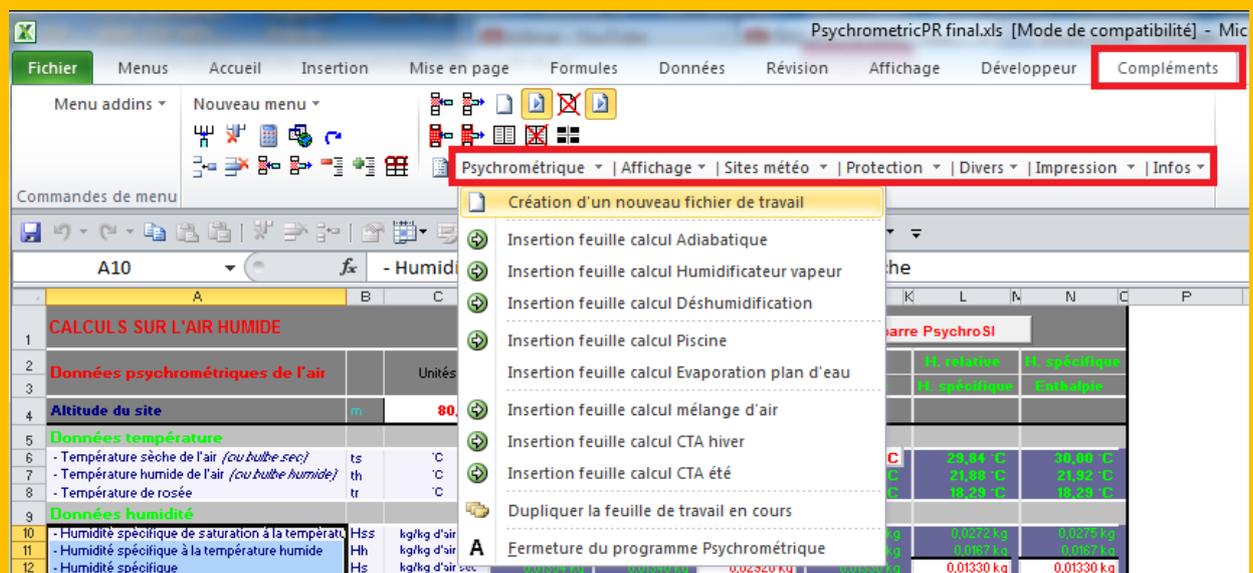
Le programme PsychroSI est pourvu d'une commande barre personnalisée donnant accès aux différentes procédures, boîtes de calculs et macro-commandes.

Les fichiers de travail sont créés séparément permettant d'alléger le stockage des données.

Les procédures et les fonctions dans un fichier add-in ajoutent des commandes optionnelles dans l'environnement de Microsoft Excel.

Par exemple sur Excel 2007 / 2010, la barre de commande est accessible en cliquant sur l'onglet « **Compléments** » qui est disponible après avoir chargé le programme de calcul et activer les macros.

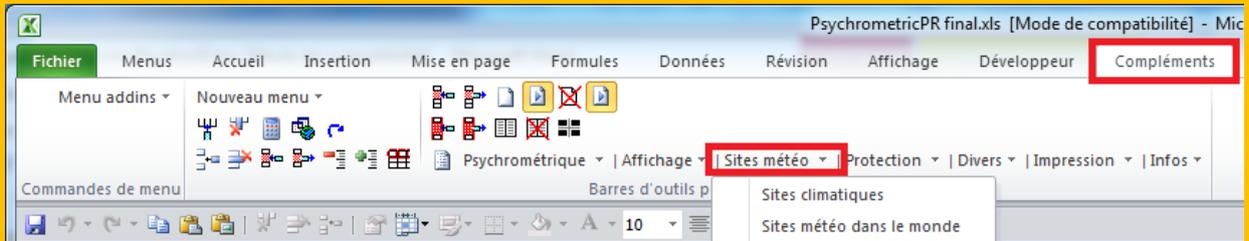
Dans le cas présent, une barre d'outils personnalisée du programme PsychroSI de ThermExcel s'est rajoutée. (Ceci est valable également pour les autres programmes)



Sur cette barre d'outils personnalisée on peut accéder à différentes fonctions du

programme.

On va en premier lieu cliquer sur «**Psychrométrie**» ou va s'afficher un menu déroulant et en cliquant sur «**Création d'un nouveau fichier de travail** » on va créer un document de travail qu'on pourra ensuite sauvegarder.



Sur cette barre d'outils personnalisée on peut afficher les sites météo pour la France ou les pays étrangers. En sélectionnant sur le site adéquat, les données seront intégrées automatiquement sur la feuille de calcul.

Codage des sites météo en France

Éléments de base pour les calculs thermiques généralement adoptés dans les calculs d'installations de climatisation.
 Ces valeurs doivent être corrigées si nécessaire dans la feuille de travail

Ts = Température sèche °C - Th = Température humide °C
 Hr = Humidité relative en % - Hs = Humidité spécifique en g / kg d'air
 Alt = Altitude du site en m - Hémis = Hémisphère au Nord ou au Sud l'équateur
 K = Ecart moyen de température entre le jour et la nuit dans une journée

N° s	Département	N° Dé	Localisation précise	Altm	Hém	Latitud	Long	Période estivale				Ts °C
								Ts °C	Th °C	K	Hr %	
1	Ain	1	Bourg	240	N	46		31	20	12	36,2	-10
2	Aisne	2	Saint-Quentin	98	N	50		30,5	20,7	12	41,2	-7
3	Aisne	2	Laon	175	N	49,5		30	20,4	12	41,7	-7
4	Allier	3	Vichy	260	N	47		31	20,8	13	40	-8
5	Alpes-basses	4	Digne	602	N	44		32	21,2	14	38,9	-8
6	Alpes-hautes	5	Gap	735	N	44,5		32	19,5	15	31,7	-10
7	Alpes-Maritimes	6	Nice	3	N	43,4	7,2	32	23,5	8,2	49	-2
8	Alpes-Maritimes	6	Grasse	260	N	43,4	7,2	32	22	8,2	42,1	-8
9	Ardèche	7	Privas	300	N	45		33	21,1	10	34,6	-6
10	Ardennes	8	Mézières-Charleville	44	N	50		30	19,3	12	36,1	-10
11	Arège	9	Foix-Romilly	430	N	45		31,5	22,3	13	45,7	-5
12	Aube	10	Romilly-sur-seine	77	N	48,5	3	31	20,5	13,4	38,3	-10
13	Aube	10	Troyes	109	N	48,5		30,5	19,6	13,5	35,8	-10

Cliquez avec la souris sur la ligne souhaitée et cliquez sur OK, les données de base seront imputées directement sur la feuille de travail

©2001-2003 Jean Yves MESSE

OK

Codage des sites météo dans le monde X

Éléments de base pour les calculs thermiques généralement adoptés dans les calculs d'installations de climatisation.
Ces valeurs doivent être corrigées si nécessaire dans la feuille de travail

Ts = Température sèche °C
Hr = Humidité relative en %
Alt = Altitude du site en m
K = Ecart moyen de température entre le jour et la nuit dans une journée

Th = Température humide °C
Hs = Humidité spécifique en g / kg d'air
Hémis = Hémisphère au Nord ou au Sud de l'équateur

		Emplacement géographique				Période estivale -----				Hiver	
N° s	PAYS	Localisation précise	Alt m	Hém	Latit	Long	Ts °C	Th °C	K	Hr %	Ts °C
1	Açores	Lajes	52	N	38,45	27,05	27	22	6	64,9	9
2	Ader	Ader	9	N	12,5	-45	38	28	6	47,1	21
3	Afganistan	Kaboul	1816	N	34,4	-69,1	36	18	18	18,6	-13
4	Algérie	Alger	58	N	36,5	-3	33	24	8	47,5	7
5	Algérie	Bisra	121	N	34,5	-10	43	24	12	20,2	5
6	Algérie	Constantine	634	N	36,2	-15	35	24	8	41,1	5
7	Algérie	Djanel	800	N	24,4	-20	40	22	18	21,1	0
8	Algérie	El Ouad	80	N	32	-15	40	22	18	19,8	6
9	Algérie	Gardaïa	526	N	32,3	-4	44	21	18	11,6	6
10	Algérie	Oran	50	N	35,4	10	33	25	8	52,5	7
11	Algérie	Ouargla	128	N	31,5	-5	45	26	18	22,1	6
12	Algérie	Tamanrassel	1390	N	22,4	-20	37	19	15	18,9	0
13	Algérie	Touggourd	67	N	33,7	-20	44	21	18	10,7	6
14	Allemagne	Berlin	57	N	52,3	-13,2	27	19	11	46,8	-11

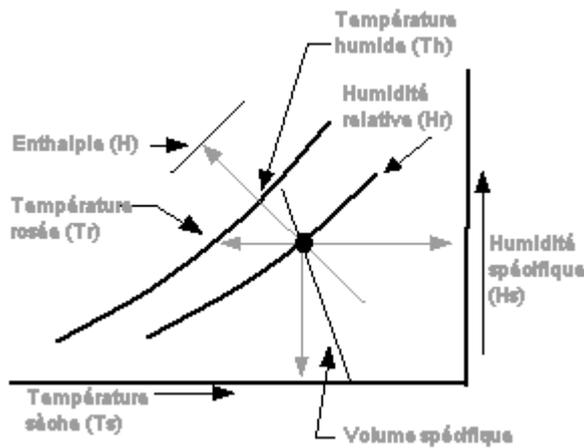
Cliquez avec la souris sur la ligne souhaitée et cliquez sur OK, les données de base seront imputées directement sur la feuille de travail

©2001-2003 Jean Yves MESSE OK

1 Programme PsychroSI – Calculs psychrométriques de l'air

Le programme permet en fonction de 2 éléments d'entrées de connaître tous les autres paramètres d'un état de l'air humide, soit en fonction :

- de la température sèche et de l'humidité relative.
- de la température sèche et de la température humide.
- de la température sèche et de l'humidité spécifique.
- de la température sèche et de l'enthalpie.
- de l'humidité relative et de l'humidité spécifique.
- de l'humidité spécifique et de l'enthalpie.



CALCULS SUR L'AIR HUMIDE			Menu barre PsychroSI					
Données psychrométriques de l'air	Unités		T sèche	T sèche	T sèche	T sèche	H relative	H spécifique
			R. relative	T humide	H spécifique	Enthalpie	H spécifique	Enthalpie
Altitude de site	m	80,0 m						
Données température								
- Température sèche de l'air (ou bulbe sec)	ts	°C	27,00 °C	30,00 °C	57,32 °C	30,00 °C	27,00 °C	27,00 °C
- Température humide de l'air (ou bulbe humide)	th	°C	24,24 °C	22,00 °C	20,96 °C	21,24 °C	21,24 °C	21,24 °C
- Température de rosée	tr	°C	16,11 °C	16,11 °C	21,44 °C	16,24 °C	16,24 °C	16,24 °C
Données humidité								
- Humidité spécifique de saturation à la température sèche	Hs	kg/kg d'air sec	0,0033 kg	0,0076 kg	0,1031 kg	0,0076 kg	0,0076 kg	0,0076 kg
- Humidité spécifique à la température humide	Hh	kg/kg d'air sec	0,0060 kg	0,0163 kg	0,0293 kg	0,0163 kg	0,0163 kg	0,0163 kg
- Humidité spécifique	Hs	kg/kg d'air sec	0,0033 kg	0,0094 kg	0,0292 kg	0,0094 kg	0,0133 kg	0,0133 kg
- Humidité relative (ou degré hygrométrique)	Hr	%	60,00%	83,28%	28,38%	83,28%	50,00%	83,28%
Données pression								
- Pression atmosphérique	Patm	kPalm2	101,325 kPa	101,325 kPa	101,325 kPa	101,325 kPa	101,325 kPa	101,325 kPa
- Pression de vapeur saturante	Pvs	kPalm2	3,593 kPa	4,243 kPa	11,983 kPa	4,243 kPa	4,243 kPa	4,243 kPa
- Pression de vapeur à la température humide	Pvth	kPalm2	2,073 kPa	2,644 kPa	3,208 kPa	2,644 kPa	2,644 kPa	2,644 kPa
- Pression partielle de la vapeur (de même tension mais de la vapeur à la température de rosée)	Pv	kPalm2	2,073 kPa	2,073 kPa	4,201 kPa	2,073 kPa	2,073 kPa	2,073 kPa
Données énergie								
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale) (Par convention, considérée comme nul à 0°C et 0% d'humidité)	H	kJ/kg d'air sec	50,979 kJ/kg	54,908 kJ/kg	131,131 kJ/kg	64,140 kJ/kg	50,979 kJ/kg	64,150 kJ/kg
- Chaleur spécifique de l'air sec	cps	kJ/kgK	1,005 kJ/kgK	1,005 kJ/kgK	1,005 kJ/kgK	1,005 kJ/kgK	1,005 kJ/kgK	1,005 kJ/kgK
- Chaleur spécifique de l'humidité	cpv	kJ/kgK	1,871 kJ/kgK	1,871 kJ/kgK	1,871 kJ/kgK	1,871 kJ/kgK	1,871 kJ/kgK	1,871 kJ/kgK
- Chaleur latente de vaporisation à saturation	Hlv	KJ/kg vapeur	2454,1 kJ/kg	2454,1 kJ/kg	2454,1 kJ/kg	2454,1 kJ/kg	2454,1 kJ/kg	2454,1 kJ/kg
Données volume								
- Volume spécifique de l'air humide	qvh	m3/kg d'air sec	0,837 m3/kg	0,836 m3/kg	0,837 m3/kg	0,836 m3/kg	0,836 m3/kg	0,836 m3/kg
- Volume de l'air	qv	m3/kg d'air humide	0,865 m3/kg	0,874 m3/kg	0,861 m3/kg	0,874 m3/kg	0,874 m3/kg	0,874 m3/kg
- Masse volumique de l'air humide	qm	kg/m3 d'air humide	1,192 kg/m3	1,144 kg/m3	1,163 kg/m3	1,144 kg/m3	1,144 kg/m3	1,144 kg/m3

1 kilo pascal (kPa) = 1000 Pa - 0.14503 Psi - 0.01 bar - 10 mbar - 7.5 mm Hg
 1 kcal/kg = 4.186 kJ/kg - 1.163 w. ----- 1 watt = 3600 J ou 3,6 KJ
 1 hPa = 100 Pa - 1 mbar

La fonction de calcul de la température de l'air humide se fait par itération, c'est à dire par approches successives. La marge d'erreur peut avoisiner tout au plus 0.1°C.

Refroidissement par humidification adiabatique ou par climatiseurs évaporatifs

Le refroidissement et l'humidification peuvent être accomplis par pulvérisation d'eau dans l'air. On appelle ce procédé "adiabatique", à condition qu'il n'y a ni apport ni retrait de chaleur. Ce phénomène est également connu sous le nom de refroidissement par évaporation. Lorsque l'air non saturé vient en contact avec l'eau pulvérisée recyclée, il y a évaporation d'eau, si le procédé est adéquat, l'air sera saturé. S'il n'y a pas apport de chaleur au cours de cette étape, la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau ne peut être fournie que par l'air, ce qui résulte à une baisse de température de l'air, et à une augmentation du degré hygrométrique. L'enthalpie totale de l'air humide reste la même.

On parle "d'humidificateurs à enthalpie constante", tels que :

- les humidificateurs à gicleurs d'eau froide (ou "laveurs d'air"),
- les humidificateurs par contact avec de l'eau froide (plaque fixe, roue, nid d'abeille),
- les humidificateurs par ultrasons,

Le programme de calcul permet d'effectuer les calculs psychrométriques de l'air avant vaporisation ainsi que l'air après refroidissement adiabatique selon le taux d'hygrométrie pré déterminé.

Il peut être utilisé notamment pour le calcul concernant le :

- Gestion du climat par la brumisation sous abris en cultures maraîchères
- Refroidissement de grands volumes.
- Traitement d'odeurs.
- Rafrâchissement extérieur - Effets Spéciaux.
- Refroidissement par process industriel comme les aérocondenseurs et les aéroréfrigérants.

Refroidissement par humidification adiabatique				Diagramme évolution air
	Sym	Unités	Données	
Données de base (Etat N°1)				
- Altitude du site		m ³	80 m	
- Débit d'air volumique (1,2 kg/m ³)	Qv	m ³	100000 m³/h	
- Température sèche de l'air (ou bulbe sec)	ts	°C	30,00 °C	
- Humidité relative (ou degré hygrométrique)	Hr	%	50,00%	
Données de base sur l'air avant brumisation (Etat N°1)				
- Température humide de l'air (ou bulbe humide)	th	°C	22,01 °C	
- Température de rosée	tr	°C	18,44 °C	
- Humidité spécifique	Hs	kg/kg d'air sec	0,0134 kg	
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale)	H	kJ/kg d'air sec	64,478 kJ/kg	
- Masse volumique de l'air humide	qm	kg/m ³ d'air humide	1,144 kg/m ³	
Données de base sur l'air après brumisation (Etat N°2)				
- Humidité relative (ou degré hygrométrique)	Hr	%	95,00%	
- Température sèche de l'air (ou bulbe sec)	ts	°C	22,61 °C	
- Température de rosée	tr	°C	21,77 °C	
- Humidité spécifique	Hs	kg/kg d'air sec	0,0166 kg	
- Masse volumique de l'air humide	qm	kg/m ³ d'air humide	1,171 kg/m ³	
Données résultantes				
- Apport d'humidité spécifique	Qm	kg/kg d'air sec	0,0032 kg/kg	
- Débit d'air massique	Qm	kg/m ³	114416,12	
- Quantité d'eau nécessaire à injecter	Qe	kg d'eau/h	360,76 kg/h	

Humidification par injection de vapeur d'eau

L'humidificateur à vapeur est soit autonome lorsqu'il est équipé d'un générateur de vapeur ou non autonome s'il doit être raccordé à un réseau vapeur existant. La vapeur est directement injectée à l'aide de rampes de dispersion perforées d'orifices calibrés. Ce procédé d'humidification isotherme entraîne localement une augmentation de la température.

Humidification par injection de vapeur d'eau				Diagramme évolution air
	Sym	Unités	Données	
Données de base (Etat N°1)				
- Altitude du site		m ³	80 m	
- Température de la vapeur	Qv	m ³	120,00 °C	
- Débit d'air volumique	Qv	m ³	100000	
- Température sèche de l'air (ou bulbe sec)	ts	°C	22,00 °C	
- Humidité relative (ou degré hygrométrique)	Hr	%	12,00%	
Données de base sur l'air avant vaporisation (Etat N°1)				
- Température humide de l'air (ou bulbe humide)	th	°C	8,15 °C	
- Température de rosée	tr	°C	-8,67 °C	
- Humidité spécifique	Hs	kg/kg d'air sec	0,0005 kg	
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale)	H	kJ/kg d'air sec	27,122 kJ/kg	
- Masse volumique de l'air humide	qm	kg/m ³ d'air humide	1,192 kg/m ³	
Données de base sur l'air après vaporisation (Etat N°2)				
- Humidité relative (ou degré hygrométrique)	Hr	%	50,00%	
- Température sèche de l'air (ou bulbe sec)	ts	°C	22,69 °C	
- Température humide de l'air (ou bulbe humide)	th	°C	18,44 °C	
- Température de rosée	tr	°C	11,66 °C	
- Humidité spécifique	Hs	kg/kg d'air sec	0,0088 kg	
- Masse volumique de l'air humide	qm	kg/m ³ d'air humide	1,175 kg/m ³	
Données résultantes				
- Apport d'humidité spécifique	Qm	kg/kg d'air sec	0,0083 kg/kg	
- Débit d'air massique	Qm	kg/m ³	117500,00	
- Humidification en débit de vapeur nécessaire	Qe	kg de vapeur	704,95 kg/h	
- Estimation puissance électrique humidificateur	Kw		800,00 Kw	

En injectant de la vapeur d'eau la température de l'air varie peu. Cependant pour déterminer avec précision les caractéristiques psychrométriques de l'air, il est nécessaire d'effectuer le calcul de cette température.

Le programme de calcul permet d'effectuer les calculs psychrométriques de l'air avant vaporisation ainsi que l'air après vaporisation de la vapeur selon le taux d'hygrométrie prédéfini et de la vapeur d'eau introduite.

Calcul psychrométrique par mélange d'air à humidité spécifique constante

Calcul psychrométrique (Mélange d'air à humidité spécifique constante)				
Données d'entrées		Air neuf (A)	Air repris (B)	Air mélangé (M)
- Altitude		80,0 m		
- Débit de base (1,2 kg/m ³)		30 m ³ /h	270 m ³ /h	300 m ³ /h
- T. sèche de base	ts	45,00 °C	40,00 °C	58,50 °C
- H. relative	Hr	80,00%		
- Débit massique	Q	32,02 kg/h	275,19 kg/h	307,21 kg/h
Valeurs résultantes psychrométriques de l'air				
Température				
- Température de mélange		-----	-----	58,44 °C
- Température humide	th	41,32 °C	43,27 °C	43,08 °C
- Température de rosée	tr	40,73 °C	40,73 °C	40,73 °C
Humidité				
- Taux d'hygrométrie	Hr	80,00%	38,46%	41,37%
- Humidité spécifique corrigée	Hs	0,0514	0,0514	0,0514
- Total humidité		1,65	14,15	15,80
Enthalpie, chaleur				
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale) (Par convention, considérée comme nul à 0°C)	H	178,12	194,64	192,92
- Total enthalpie sur l'air véhiculé		5703,11	53562,43	59265,55
- Chaleur sensible sur l'air véhiculé		1448,07	16594,44	18042,51
- Chaleur latente sur l'air véhiculé		4255,10	36968,57	41223,66
Volume de l'air à la température sèche				
- Volume spécifique de l'air humide (m ³ d'air humide / kg d'air sec)		0,985	1,032	1,027
- Volume spécifique de l'air		0,937	0,981	0,977
- Masse volumique de l'air humide		1,067	1,019	1,024 kg/m ³
- Débit volumique de l'air véhiculé		33,73	317,89	351,55

Sites météo pour les calculs thermiques

Dans le programme PSYCHROSI est intégré une bibliothèque des sites météo définissant les paramètres climatiques adoptés en général pour le dimensionnement des installations de climatisation.

Codage des sites météo en France

Éléments de base pour les calculs thermiques généralement adoptés dans les calculs d'installations de climatisation.
Ces valeurs doivent être corrigées si nécessaire dans la feuille de travail

Ts = Température sèche °C - Th = Température humide °C
Hr = Humidité relative en % - Hs = Humidité spécifique en g / kg d'air
Alt = Altitude du site en m - Hémis = Hémisphère au Nord ou au Sud l'équateur
K = Ecart moyen de température entre le jour et la nuit dans une journée

Emplacement géographique								Période estivale				Hiver
N° s	Département	N° Dé	Localisation précise	Alt m	Hém	Latitu	Long	Ts °C	Th °C	K	Hr %	Ts °C
1	Ain	1	Bourg	240	N	46		31	20	12	36,2	-10
2	Aisne	2	Saint-Quentin	98	N	50		30,5	20,7	12	41,2	-7
3	Aisne	2	Laon	175	N	49,5		30	20,4	12	41,7	-7
4	Allier	3	Wichy	260	N	47		31	20,8	13	40	-8
5	Alpes-basses	4	Digne	602	N	44		32	21,2	14	38,9	-8
6	Alpes-hautes	5	Gap	735	N	44,5		32	19,5	15	31,7	-10
7	Alpes-Maritimes	6	Nice	3	N	43,4	7,2	32	23,5	8,2	49	-2
8	Alpes-Maritimes	6	Grasse	260	N	43,4	7,2	32	22	8,2	42,1	-8
9	Ardèche	7	Privas	300	N	45		33	21,1	10	34,6	-6
10	Ardennes	8	Mézières-Charleville	44	N	50		30	19,3	12	36,1	-10
11	Ariège	9	Foix-Romilly	430	N	45		31,5	22,3	13	45,7	-5
12	Aube	10	Romilly-sur-seine	77	N	48,5	3	31	20,5	13,4	38,3	-10
13	Aube	10	Troyes	109	N	48,5		30,5	19,6	13,5	35,8	-10

Cliquez avec la souris sur la ligne souhaitée et cliquez sur OK, les données de base seront imputées directement sur la feuille de travail

©2001-2003 Jean Yves MESSE

En ce qui concerne les autres pays la bibliothèque comprend environ 265 sites répertoriés.

Codage des sites météo dans le monde

Éléments de base pour les calculs thermiques généralement adoptés dans les calculs d'installations de climatisation.
Ces valeurs doivent être corrigées si nécessaire dans la feuille de travail

Ts = Température sèche °C - Th = Température humide °C
Hr = Humidité relative en % - Hs = Humidité spécifique en g / kg d'air
Alt = Altitude du site en m - Hémis = Hémisphère au Nord ou au Sud de l'équateur
K = Ecart moyen de température entre le jour et la nuit dans une journée

Emplacement géographique								Période estivale				Hiver
N° s	PAYS		Localisation précise	Alt m	Hém	Latitu	Long	Ts °C	Th °C	K	Hr %	Ts °C
1	Açores		Lajes	52	N	38,45	27,05	27	22	6	64,9	9
2	Azer		Azer	9	N	12,5	-45	38	28	6	47,1	21
3	Afghanistan		Kaboul	1816	N	34,4	-69,1	36	18	18	18,6	-13
4	Algérie		Alger	58	N	36,5	-3	33	24	8	47,5	7
5	Algérie		Bisra	121	N	34,5	-10	43	24	12	20,2	5
6	Algérie		Constantine	634	N	36,2	-15	35	24	8	41,1	5
7	Algérie		Djanel	800	N	24,4	-20	40	22	18	21,1	0
8	Algérie		El Oued	80	N	32	-15	40	22	18	19,8	6
9	Algérie		Gardaïa	526	N	32,3	-4	44	21	18	11,6	6
10	Algérie		Oran	50	N	35,4	10	33	25	8	52,5	7
11	Algérie		Ouargla	128	N	31,5	-5	45	26	18	22,1	6
12	Algérie		Tamanrasset	1390	N	22,4	-20	37	19	15	18,9	0
13	Algérie		Touggourd	67	N	33,7	-20	44	21	18	10,7	6
14	Allemagne		Berlin	57	N	52,3	-13,2	27	19	11	46,8	-11

Cliquez avec la souris sur la ligne souhaitée et cliquez sur OK, les données de base seront imputées directement sur la feuille de travail

©2001-2003 Jean Yves MESSE

Définitions générales

En climatisation, il est d'usage de travailler avec les débits massiques q_m (en kg/s ou kg/h), parce que les débits volumiques q_v (en m³/s or m³/h) sont variables selon la température (1 kg d'air augmente en volume avec la montée en température)

TEMPÉRATURE SECHE en °C - Dry bulb temperature : Température réelle de l'air humide observé à l'aide d'un thermomètre ou d'un capteur de température. C'est la température de l'air indiquée par un thermomètre non affecté par l'humidité d'air.

TEMPÉRATURE HUMIDE en °C - Wet bulb temperature : C'est la température enregistrée par un thermomètre où le bulbe est recouvert d'une mèche imprégnée d'eau. Les températures humides sont toujours inférieures aux températures sèches et le seul cas où elles sont identiques est avec une humidité relative à 100%.

Température adiabatique de saturation - Adiabatic saturation temperature : Température auquel l'air humide peut être apporté à saturation adiabatique par l'évaporation de l'eau, c'est à dire à la température humide (aucun gain ou perte de la chaleur aux environnements)

TEMPÉRATURE de ROSEE en °C - Dew point temperature : C'est la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air humide commence à se condenser au contact d'une surface froide. Au cours d'un refroidissement, l'humidité spécifique et la pression partielle de la vapeur d'eau restent constantes.

HUMIDITE SPECIFIQUE ou humidité absolue ou teneur en eau - (Humidity ratio, moisture content, mixing ratio, or specific humidity) : C'est la masse d'eau (liquide, solide, vapeur) contenue dans un kg d'air sec. Ce poids d'eau reste constant lorsque la température ambiante varie sous réserve qu'elle ne tombe pas en dessous de la température de rosée. Si la température tombe en dessous du point de rosée, une partie de cette masse d'eau va se condenser sous forme de gouttelettes sur les parois les plus froides.

HUMIDITE RELATIVE en % - Relative humidity : C'est le rapport de la masse de la vapeur d'eau contenue dans une certaine quantité d'air humide à la masse de vapeur qu'elle pourrait contenir si elle était saturée à la même température.. À 100%, l'air est complètement saturé. A 50%, l'air contient la moitié de ce qu'il pourrait avoir s'il était saturé à la même température. Quand le taux d'humidité atteint 100% la formation de gouttelettes de liquide se produit sur les objets !

VOLUME SPÉCIFIQUE en m³/kg d'air – Specific volume : C'est le volume occupé par le poids d'un kilogramme d'air sec dans un ensemble de conditions spécifiques.

MASSE VOLUMIQUE en kg/m³ d'air humide : C'est la masse d'un m³ d'air humide La pression du mélange (air sec + vapeur d'eau) est égale à la somme des pressions qu'aurait chacun des constituants s'il était seul à occuper le volume de l'ensemble. Donc dans un m³ d'air humide, on retrouve la somme des masses de constituants, c'est la somme des masses volumiques de l'air sec et de la vapeur d'eau, aux pressions partielles et températures désignées.

ENTHALPIE - Enthalpy : Total énergie (chaleur) contenue dans le poids spécifique de l'air humide (Par convention, considéré comme nul à 0°C). L'enthalpie inclut la chaleur sensible et la chaleur latente contenues dans l'air.

CHALEUR SENSIBLE et CHALEUR LATENTE - latent heat : La chaleur sensible est la chaleur (énergie) dans l'air dû à la température d'air. La chaleur latente est la chaleur (énergie) dans l'air dû à l'humidité d'air. Après ceci, l'air avec la même quantité d'énergie peut

être de l'air chaud sec (chaleur sensible élevée) ou de l'air humide rafraîchi (la chaleur latente élevée)

Pression de vapeur - Vapor pressure (P_v) : C'est la pression vapeur partielle dans l'air. Cette pression est la même que la pression de vapeur saturante à la température de rosée.

Pression de vapeur saturante (P_{vs}) : C'est la pression de vapeur maximale que l'air peut supporter à une température donnée. La pression de vapeur saturante augmente avec la température.

Définitions complémentaires

SHF (Sensible Heat Factor) - Rapport de la chaleur sensible à la chaleur totale

By-pass Factor : Le by-pass factor est fonction des caractéristiques physiques de la batterie et des conditions de fonctionnement envisagées. On considère qu'il représente le pourcentage d'air qui passe à travers la batterie sans subir de changement.

Refroidissement adiabatique : Le refroidissement s'effectue presque parallèlement aux courbes adiabatiques, du diagramme psychrométrique. Ce refroidissement s'appelle "refroidissement adiabatique". C'est le cas lorsque de l'eau est brumisée en fines gouttelettes dans un local, sans qu'il y ait apport de chaleur en même temps, l'énergie nécessaire à l'évaporation de cette eau est retirée à l'air ambiant.

Fonctions psychrométriques

Les fonctions ci-dessous sont utilisées dans le classeur et peuvent être réutilisées sur d'autres feuilles de calcul de ce même classeur.

Ces fonctions sont écrites en Visual Basic spécialement pour Excel

Pression atmosphérique en kPa

- Z = Altitude en m
Fonction = Patm(Z)

Pression vapeur partielle en kPa

- ts = température sèche °C
- hr = humidité relative en %
Fonction = Psy_Pv(ts, Hr)

Pression vapeur partielle en kPa

- ts = température sèche °C
- th = température humide °C
- Z = Altitude en m
Fonction = Psy_Pvh(ts, th, Z)

Pression vapeur de saturation en kPa

- ts = température sèche °C
- Fonction = Psy_Pvs(ts)

Humidité spécifique à saturation en kg / m3 d'air sec

- ts = Température sèche en °C
 - Z = Altitude en m
- Fonction = Psy_Hss(ts, Z)

Humidité spécifique en kg / m3 d'air sec

- ts = Température sèche en °C
 - Hr = Humidité relative
 - Z = Altitude en m
- Fonction = Psy_Hs(ts, Hr, Z)

Humidité spécifique en kg / m3 d'air sec

- ts = Température sèche en °C
 - th = Température humide
 - Z = Altitude en m
- Fonction = Psy_HsTh(ts, th, Z)

Humidité spécifique en kg / m3 d'air sec

- ts = Température sèche en °C
 - H = Enthalpie en Kj/kg d'air sec
- Fonction = Psy_HsH(ts, H)

Humidité relative en %

- ts = Température sèche en °C
 - th = Température humide
 - Z = Altitude en m
- Fonction = Psy_HrTh(ts, th, Z)

Humidité relative en %

- ts = Température sèche en °C
 - Hs = Humidité spécifique en kg/kg d'air sec
 - Z = Altitude en m
- Fonction = Psy_Hr(ts, Hs, Z)

Température sèche (°C)

- pvs = Pression vapeur de saturation en kPa
- Fonction = Psy_Ts(Pvs)

Température sèche (°C) en fonction de H et Hs

- H = Enthalpie en Kj/kg d'air sec
 - Hs = Humidité spécifique en kg/kg d'air sec
- Fonction = Psy_TsH(H, Hs)

Température de rosée (°C)

- Pv = Pression vapeur de saturation en kPa
- Fonction = Psy_Tr(Pv)

Température de rosée (°C)

- ts = Température sèche en °C
 - hr = humidité relative en %
- Fonction = Psy_Trosée(ts , Hr)

Enthalpie en Kj/kg d'air sec

- ts = Température sèche en °C
 - hr = humidité relative en %
 - Z = Altitude en m
- Fonction = Psy_Enth(ts, Hr, Z)

Enthalpie en Kcal/kg d'air sec

- ts = Température sèche en °C
 - Hs = Humidité spécifique en kg/kg d'air sec
- Fonction = Psy_EnthKcal(ts, Hs)

Chaleur spécifique de l'air sec en kJ / kg k

- ts = Température sèche en °C
- Fonction = Psy_cpa(ts)

Chaleur spécifique de l'humidité en kJ / kg k

- ts = Température sèche en °C
- Fonction = Psy_cpv(ts)

Chaleur latente de vaporisation à saturation en kJ/kg

- ts = Température sèche en °C
- Fonction = Psy_Hlp(ts)

Masse volumique en kg/m3 d'air humide

- ts = Température sèche en °C
 - Hr = Humidité relative
 - Z = Altitude en m
- Fonction = Psy_M_vol(ts, Hr, Z)

Volumique spécifique en m3 d'air humide / kg d'air sec

- ts = Température sèche en °C
 - Hr = Humidité relative
 - Z = Altitude en m
- Fonction = Psy_V_mass(ts, Hr, Z)

Volumique spécifique en m3 d'air humide / kg d'air humide

- ts = Température sèche en °C
 - Hr = Humidité relative
 - Z = Altitude en m
- Fonction = Psy_V_ma_Humi(ts, Hr, Z)

Température humide °C

- ts = Température sèche en °C
- Hr = Humidité relative
- Z = Altitude en m

Fonction = Psy_th(ts, Hr, Z) (Calcul itératif)

Température adiabatique (Calcul en refroidissement adiabatique)

- th = Température humide en °C

- Hr = Humidité relative

- Z = Altitude en m

Fonction = Psy_th1(th, Hr, Z) (Calcul itératif)

Température sèche sortie Humidificateur (humidificateur avec injection de vapeur)

- ts = Température sèche en °C

- Hr = Humidité relative

- Hs = Humidité spécifique en kg/kg d'air sec

- MassVol = Masse volumique en kg/m³ d'air humide

- TempVap = Température d'injection de la vapeur d'eau

- Z = Altitude en m

Fonction = Psy_th2(Ts, Hr, Hs, MassVol, TempVap, Z) (Calcul itératif)

Calcul itératif = Le calcul se fait par itération, c'est à dire par approches successives. La marge d'erreur peut avoisiner tout au plus 0.1°C.

3 Programme PsychoSI - CACUL DES PISCINES

Point de rosée, évaporation d'un plan d'eau

Le point de rosée (point de saturation) une donnée importante et pratique

Le point de rosée indique à quelle température l'air devient saturé en humidité (100% Hr).

L'air chaud contient plus de vapeur d'eau que l'air froid. Quand la différence entre la température et le point de rosée est grande, l'air est sec et l'humidité relative est faible. Quand on refroidit l'air vers son point de rosée, l'humidité relative augmente, et atteint 100 % quand les deux températures (celle de l'air et celle du point de rosée) coïncident.

L'eau ne peut plus s'évaporer car l'air est déjà saturé en humidité. Lorsque le point de rosée est atteint, c'est à partir de là que les phénomènes de condensation surviennent telles que les nuages, la brume et la rosée en météorologie.

La vapeur d'eau se condense alors sur les surfaces froides. Ainsi, si la paroi d'un corps quelconque dont la température est inférieure au point de rosée de l'air qui l'entoure sera le siège naturel de condensation.

Nota : La surface d'un plan d'eau en contact avec l'air ambiant peut être assimilée à une paroi.

Le point de rosée, un indicateur du degré de confort

En général, on commence à sentir un inconfort quand le point de rosée atteint 18°C, vers 21°C, l'inconfort est important. L'humidité devient suffocante vers 24°C et la situation devient dangereuse quand le point de rosée atteint ou dépasse 26°.

Par exemple pour l'humain, la sueur évacue l'excès de chaleur dans l'air et rafraîchit donc le corps pour contrôler sa température. Or, lorsque l'air est chaud et très humide à l'extérieur, cet air ne peut absorber l'eau dont le corps désire se débarrasser et alors l'être humain se trouve donc dans l'impossibilité d'évacuer son surplus d'eau et en ressent des effets désagréables.

Une température sèche de 40°C en milieu désertique ou en pleine forêt tropicale n'est pas ressentie tout à fait de la même manière par l'humain. En effet, il sera plus facile d'endurer une telle chaleur dans une région où le climat est sec (désert) plutôt qu'humide (forêt tropicale).

Piscine

Dans une piscine, le contact de l'air et de l'eau entraîne des échanges entre les deux milieux tant que l'équilibre n'est pas atteint. Si le volume au-dessus du plan d'eau est clos, l'air se charge d'humidité jusqu'à un état d'équilibre et la saturation de l'air ambiant sera complète. Tant la pression de vapeur de l'air ambiant est inférieure à la pression de vapeur saturante de l'air à la surface de l'eau il y aura évaporation d'eau.

On peut considérer que la température de la couche d'air en contact avec la surface du plan d'eau de la piscine est proche justement de cette température d'eau. L'air chaud plus léger s'élève au-dessus de l'air rafraîchi en contact avec le bassin.

Cela signifie que si la température de l'air en contact de cette eau est supérieure au point de rosée de l'air ambiant il n'y a donc plus d'évaporation (Cet air de contact sur l'eau ayant déjà atteint 100% d'humidité)

En fait pour que l'évaporation se fasse il faut que l'humidité spécifique à saturation de l'air en contact à la température du plan d'eau soit supérieure à l'humidité spécifique de l'air ambiant.

Pour simplifier, prenons la formule empirique :

Evaporation au niveau du plan d'eau en kg/h m² (sans activité humaine, vitesse d'air au-dessus du plan d'eau pratiquement nulle)

$$W = S \cdot 16 \cdot \left(\frac{w_e}{V_{\mu}} - \frac{w_a}{V} \right)$$

- W = Taux d'évaporation du plan d'eau en kg/h m²
- We = Humidité spécifique de l'air à saturation à la température du plan d'eau (kg/kg d'air sec)
- Wa = Humidité spécifique de l'air du local (kg/kg d'air sec)
- V = Volume spécifique de l'air du local (m³/kg d'air sec)
- V_μ = Volume spécifique de l'air au niveau du plan d'eau (m³/kg d'air sec)
- 16 = C'est un coefficient pour les piscines à l'intérieur d'une construction qui intègre la faible vitesse de l'air à la surface du plan d'eau.
- S = surface du plan d'eau

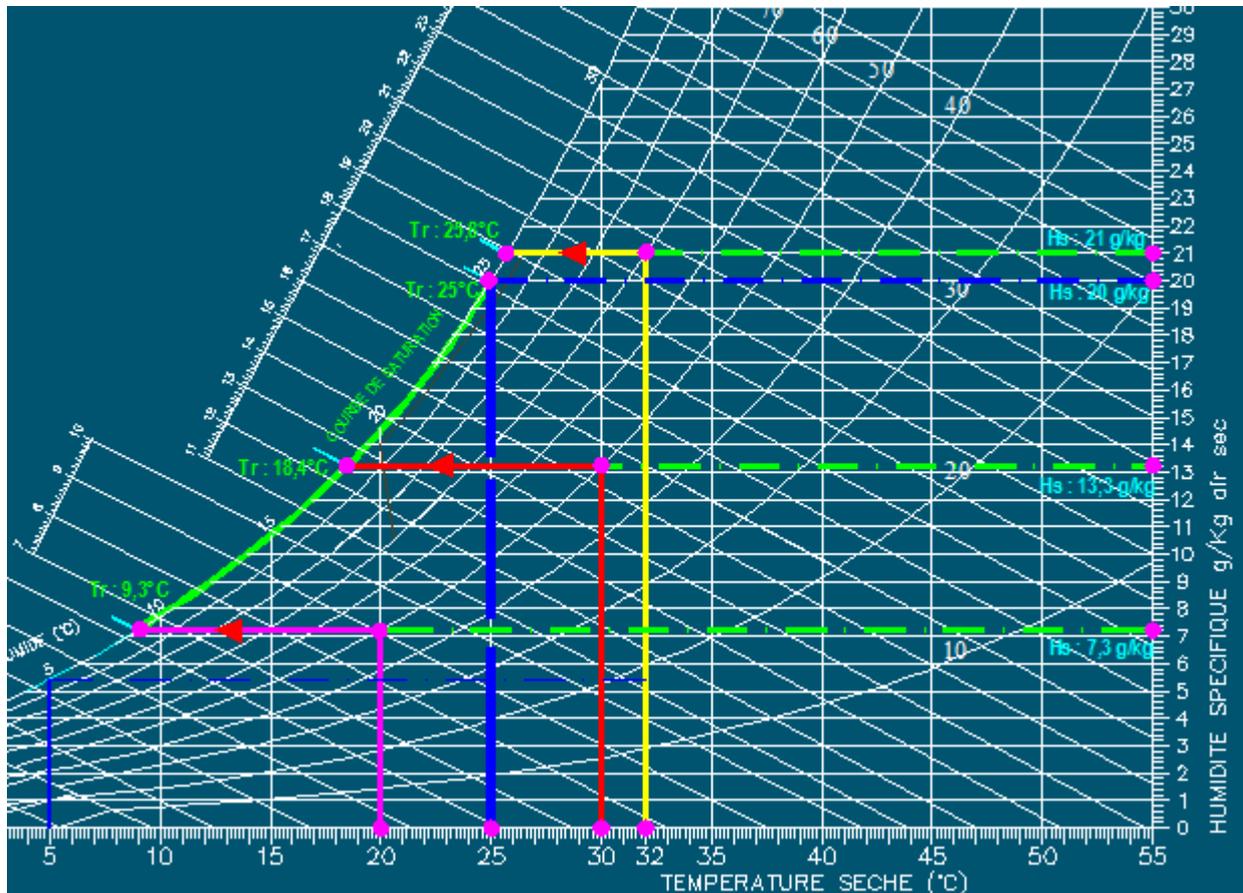
Calcul évaporation d'eau d'un plan d'eau au m2

			Formule N°1 $W = S \cdot 16 \cdot \left(\frac{w_e}{V_{\mu}} - \frac{w_a}{V} \right)$		
DESIGNATIONS	Sym	Unités	Formule N°1	Formule N°1	Formule N°1
			Plan d'eau couvert	Plan d'eau couvert	Plan d'eau couvert
Données psychrométriques de l'air ambiant					
Altitude du site (m)	m		101,325	101,325	101,325
Température					
- Température sèche de l'air (ou bulbe sec)	ts	°C	32,0 °C	30,0 °C	20,0 °C
- Température humide de l'air (ou bulbe humide)	th	°C	27,34 °C	22,03 °C	13,81 °C
- Température de rosée	tr	°C	25,84 °C	18,44 °C	9,27 °C
Humidité					
- humidité relative de l'air (60 à 80%; 70% moyenne)	Hr	%	70%	50%	50%
- Humidité spécifique à saturation à la température sèche	Hss	kg/kg d'air	0,0306	0,0272	0,0147
- Humidité spécifique de l'air	Hs	kg/kg d'air	0,0211	0,0133	0,0073
Enthalpie, chaleur					
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale)	H	kJ / kg k	86,230 kJ/kg	64,146 kJ/kg	38,521 kJ/kg
- Chaleur spécifique de l'air sec	cpa	kJ / kg k	1,005 kJ/kg	1,005 kJ/kg	1,005 kJ/kg
Pression exercée par l'air					
- Pression totale du mélange (air humide) - Pression atmosphérique	Patm	kPa/m2	101,325 kPa	101,325 kPa	101,325 kPa
- Pression de vapeur à saturation à la température sèche	Pvs	kPa/m2	4,754 kPa	4,243 kPa	2,338 kPa
- Pression partielle de vapeur dans l'air ambiant (de même tension maxi de vapeur à la température de rosée)	Pv	kPa/m2	3,328 kPa	2,121 kPa	1,169 kPa
Volume de l'air à la température sèche					
- Volume spécifique de l'air humide / Kg d'air sec	V	m3/kg d'air sec	0,894 m3/kg	0,877 m3/kg	0,840 m3/kg
- Masse volumique de l'air humide	Mv	kg/m3 d'air h	1,142 kg/m3	1,155 kg/m3	1,199 kg/m3
Données de calcul du plan d'eau					
Température de l'eau			25,0 °C	25,0 °C	25,0 °C
Données de l'air en contact avec la surface du plan d'eau					
- Pression de vapeur à saturation à la surface de l'eau	Pw	kPa/m2	3,167 kPa	3,167 kPa	3,167 kPa
- Humidité spécifique à saturation	Hs μ	kg/kg d'air	0,020	0,020	0,020
- Volume spécifique de l'air	V μ	m3/kg d'air se	0,872 m3/kg	0,872 m3/kg	0,872 m3/kg
- Chaleur latente de vaporisation à saturation	Y	KJ/kg vapeur	2442,915 kJ/kg	2442,915 kJ/kg	2442,915 kJ/kg
Quantité d'eau évaporée du bassin					
- Vitesse du vent (v) (plan d'eau à l'air libre = 4 m/s - à moitié abritée = 2 V)	V	m/s			
- Évaporation au m2 par heure	W	kg/h m2	-0,01 kg/h m2	0,13 kg/h m2	0,23 kg/h m2
- Évaporation au m2 par jour	W	kg/h m2	-0,23 kg/h m2	3,02 kg/h m2	5,52 kg/h m2
- Évaporation d'eau en mm		mm	-0,23	3,02	5,52
Apports thermique par le plan d'eau					
- Apports sensibles par rayonnement	A1	W/m2	-12,36 W	-11,05 W	-4,57 W
- Apports sensible par convection	A2	W/m2			30,82 W
- Apports latents par vaporisation	A3	W/m2	-6,64 W	85,31 W	156,12 W
Total		W/m2	-19,00 W	74,26 W	182,36 W
Nota 1 kilo pascal (kPa) = 1000 Pa - 0.14503 Psi - 0.01 bar - 10 mbar - 7.5 mm Hg 1 kcal/kg = 4.186 kJ/kg - 1.163 w. ----- 1 watt = 3600 J ou 3,6 KJ					

Sur ce tableau avec une température d'eau du bassin de 25°C nous avons trois exemples de calcul, avec :

- Air ambiant : 32°C et 70% hr, température de rosée 25,54 °C ==> Il n'y a donc pas d'évaporation car l'air en contact avec le plan d'eau est déjà saturé en humidité, la température d'eau (25°C) étant inférieure à la température de rosée (100% Hr)
- Air ambiant : 30°C et 50% hr, température de rosée 18,44 °C ==> Il y a donc évaporation

- Air ambiant : 20°C et 50% hr, température de rosée 9,27 °C ==> Il y a aussi évaporation, mais plus élevée que dans le cas précédent.



Pour résumer :

- Plus la température de l'eau de la piscine est élevée et plus l'évaporation s'accélère.
- Plus le taux d'humidité relative dans le volume ambiant est bas et plus l'évaporation de l'eau du bassin sera élevée. (à condition que le point de rosée de cet ambiant soit inférieur à la température du plan d'eau).
- Plus la température ambiante est basse avec un taux d'hygrométrie similaire (Plus précisément une baisse du point de rosée) et plus le taux d'évaporation est élevé.
- Pour les bassins situés à l'extérieur, le vent ramène de l'air plus sec au-dessus du liquide et accélère donc l'évaporation.

Lorsque le taux d'hygrométrie de l'air au-dessus du plan d'eau atteint 100% l'eau du bassin ne peut plus s'évaporer. Il y a même, si la pression de vapeur est supérieure à la pression de vapeur saturante, liquéfaction sous la forme de gouttelettes de buée ou de brouillard. Ainsi, l'hygrométrie ne peut jamais dépasser 100%. On constate qu'à température et vitesse d'air identique, une flaque d'eau sèche plus vite en climat sec qu'en climat humide.

Si l'eau du bassin est supérieure à la température de cet air, l'eau en s'évaporant augmente le point de rosées pour éventuellement atteindre la température de l'air alors il y a condensation et le brouillard naît.

Les Piscines intérieures

Les plans d'eau des piscines font office d'humidificateur, à cause du fort débit de vapeur qui se produit à la surface de l'eau chaque fois que le point de rosée de l'air ambiant est inférieur à la température de la surface d'eau.

L'évaporation de l'eau à la surface d'une piscine chauffée a tendance à augmenter le degré hygrométrique de l'air ambiant, ce qui influe sur le bien-être des occupants et peut entraîner de graves difficultés avec les matériaux de construction pendant l'hiver.

Les propriétés thermiques des fenêtres et des murs construits selon les méthodes habituelles limitent normalement à 35% l'humidité relative que l'on peut y maintenir en hiver à une température de 23°C. Dans ces conditions, le point de rosée de l'air sera de 6,73°C, ce qui entraînera la condensation de la vapeur d'eau sur toutes les surfaces dont la température est inférieure à ce point de rosée.

D'autre part, la température régnant dans une piscine est toujours bien supérieure à ce point de rosée et l'évaporation sera ininterrompue. L'humidité relative de l'air ambiant s'en trouvera donc accrue jusqu'au point où l'évaporation sera contrebalancée par la perte d'humidité par condensation et ventilation.

En conséquence, il y aura toujours, en hiver, formation de buée sur les fenêtres et les murs de construction habituelle constituant le hall d'une piscine, à moins que l'on ne prévoise une forte ventilation au moyen d'air relativement sec capable d'évacuer la vapeur d'eau à une vitesse suffisante pour contrebalancer l'évaporation.

Si cet air sec de ventilation provient de l'extérieur, il doit être réchauffé au préalable jusqu'à la température de l'air intérieur. Si l'on ne prévoit aucune ventilation, l'évaporation se poursuivra et la vapeur d'eau se condensera sur chaque surface de l'enceinte dont la température sera inférieure à la plus basse des températures, soit de l'air intérieur, ou de l'eau de la piscine. Quand la température de l'eau de la piscine est supérieure à celle de l'air ambiant, des problèmes particulièrement ardues peuvent se poser.

En général, les piscines intérieures doivent être ventilées continuellement ou déshumidifiées si l'on veut empêcher l'accumulation d'une humidité élevée et la possibilité d'une condensation excessive sur les surfaces de l'enceinte.

Programme de calcul PsychroSI

Le programme de calcul PsychroSI permet de :

- quantifier la vapeur d'eau d'évaporation du bassin (Piscine intérieure ou extérieure)
- d'évaluer la puissance thermique pour réchauffer l'eau du bassin.

- d'évaluer le débit de renouvellement d'air neuf pour déshumidifier l'air ambiant du hall de la piscine

Températures usuelles de l'eau des bassins

Les températures de l'eau sont généralement aux environs de 25-27°C pour les piscines (éventuellement plus basses pour les bassins de compétitions) et 27-32°C pour les bassins d'apprentissages

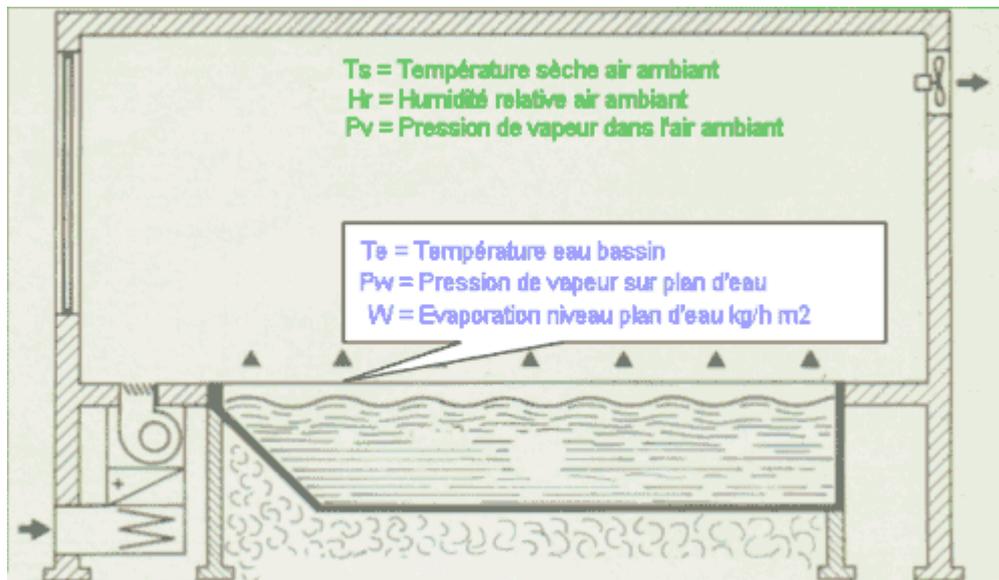
- Bassin d'apprentissage : 27°C
- Bassin de compétition : 25°C
- Pataugeoire : 30°C
- Loisirs : 24 à 29°C
- Thérapeutique : 29 à 35°C
- Plongée : 27 to 32°C
- Whirlpool/spa : 36 to 40°C

Température intérieure hall piscine

La température intérieure ne devra pas dépasser 27°C dans le hall et 23 °C dans les vestiaires

Evaporation dans les piscines en activité normale en kg/h m2

La quantité d'eau qui s'évapore dépend de la température du plan d'eau de la piscine ainsi que de la température et de l'humidité relative de l'air du hall de la piscine.



Le taux d'évaporation en kg/h m2 peut être estimé pour les piscines de niveau d'activité normale, **intégrant les éclaboussements dû aux baignades sur les abords d'une zone limitée** (Smith, et al, 1993) (ASHRAE, 1995), selon la formule suivante

Formule N°1

$$W = \left((P_w - P_a) \cdot (0,089 + 0,0782 \cdot V) / Y \right) \cdot 3600$$

- W = Taux d'évaporation du plan d'eau en kg/h m²
- P_w = Pression de vapeur à saturation prise à la température de la surface de l'eau, kPa
- P_v = Pression de vapeur au point de rosée selon la température de l'air ambiant de la salle, kPa
- V = Vitesse de l'air au-dessus de la surface de l'eau, m/s
- Y = Chaleur latente nécessaire selon le changement d'état de l'eau en vapeur à la température de surface de l'eau, kJ/kg

Selon certaines études, le taux d'évaporation pour une piscine extérieure non occupée avec une vitesse d'air pratiquement nulle est en réalité de 16% à 28% plus faible par rapport à l'équation indiquée ci-dessus.

Fonction = Pool_evap1(ts1, ts, Hr, Vit, Z)

- ts = Température sèche en °C de l'air ambiant de la piscine
- ts1 = Température en °C du plan d'eau
- Hr = Humidité relative en %
- Vit = Vitesse de l'air en m/s au niveau du plan d'eau
- Z = Altitude en m

La vitesse de l'air au niveau du bassin est à définir en fonction du type d'activité et de l'emplacement de la piscine. Pour les piscines extérieures, le calcul est déterminé selon la vitesse du vent estimé :

- piscine à l'air libre = 4 m/s
- Piscine à moitié abritée = 2 m/s
- Piscine abritée = 0,15 à 1 m/s

Formulation selon le type d'activité de la piscine selon le document ASHRAE, 1995

Pour une chaleur latente Y d'une valeur de 2330 kJ/kg et avec une vitesse d'air V de 0,15 m/s et en multipliant par un facteur d'activité Fa pour altérer le taux d'évaporation estimé en fonction du niveau d'activité correspondant, l'équation se réduit à l'expression suivante :

$$W = 4,16 \cdot 10^{-5} \cdot (P_w - P_v) \cdot 3600 \cdot Fa$$

Type de piscines	Facteur d'activité (Fa)
Piscines résidentielles	0.5
Condominium	0.65
Thermes	0.65
Hôtel	0.8
Piscines publiques ou Ecoles	1
Whirlpools, spas	1.5
Wave pools, water slides	1.5 (minimum)

Fonction = Pool_evap2(ts1, ts, Hr, I) - Evaporation au niveau du plan d'eau en kg/h m2

- ts = Température sèche en °C de l'air ambiant de la piscine
 - ts1 = Température en °C du plan d'eau
 - Hr = Humidité relative en %
- Fonction = Pool_evap2(ts1, ts, Hr, I)

Evaporation au niveau du plan d'eau en kg/h m2 (autre formule)

Evaporation au niveau du plan d'eau en kg/h m2 (sans activité humaine, vitesse d'air au dessus du plan d'eau pratiquement nulle)

Formule N°2

$$W = S \cdot 16 \cdot \left(\frac{w_e}{V_\mu} - \frac{w_a}{V} \right)$$

- W = Taux d'évaporation du plan d'eau en kg/h m2
- We = teneur en eau de l'air à la température du plan d'eau (kg/kg d'air sec)
- Wa = teneur en eau de l'air du local (kg/kg d'air sec)
- V = Volume spécifique de l'air du local (m3/kg d'air sec)
- Vμ = Volume spécifique de l'air au niveau du plan d'eau (m3/kg d'air sec)

Fonction = Pool_evap(ts1, ts, Hr, Z)

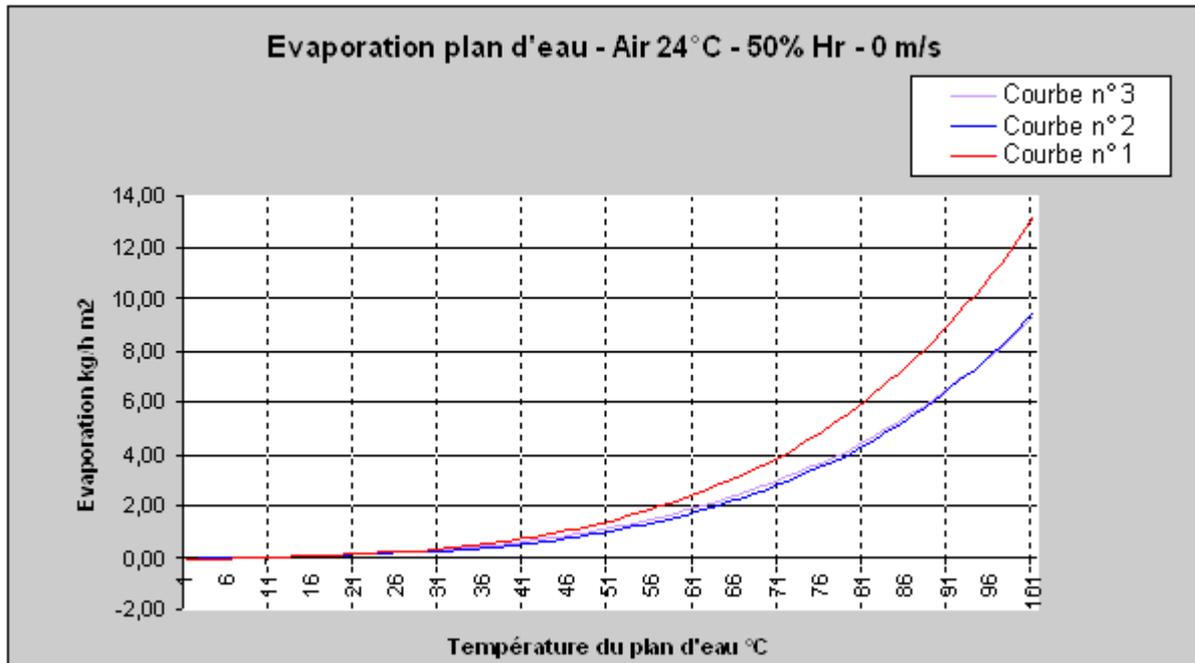
- ts = Température sèche en °C de l'air ambiant de la piscine
- ts1 = Température en °C du plan d'eau
- Hr = Humidité relative en %
- Z = Altitude en m

Avec ce type de formule, il faut en principe rajouter les projections d'eau et des apports latents occasionnés par les baigneurs.

Comparatif selon le type de formule utilisée

Selon le type de formule utilisée on peut effectuer une représentation graphique avec une vitesse d'air nulle au dessus du plan d'eau :

- Courbe 1 = Formule N° 1 - ASHRAE, 1995 intégrant les éclaboussements dû aux baignades sur les abords d'une zone limitée
- Courbe 3 = Formule N° 2 - (sans activité humaine, vitesse d'air au dessus du plan d'eau pratiquement nulle)
- Courbe 3 = Formule N° 1 - ASHRAE, 1995 minorée de 28%



Apports sensibles par rayonnement

$$A1 = 345 \cdot \left\{ \left(\frac{T_{eau} + 273.15}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s + 256}{100} \right)^4 \right\} \cdot 1.16$$

- T eau = température de l'eau du bassin
- Ts = Température ambiante de la piscine

Fonction = Pool_rayon(ts1, ts)

- ts = Température sèche en °C de l'air ambiant de la piscine
- ts1 = Température en °C du plan d'eau

Apports sensibles par convection

$$A2 = 5,5 \cdot (T_{eau} - T_s)$$

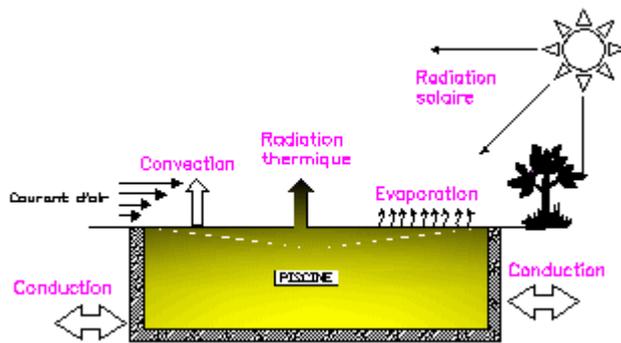
- T eau = température de l'eau du bassin
- Ts = Température ambiante de la piscine

Exemple de calcul sur fichier en format PDF, [Cliquez sur ce lien](#)

Feuille de calcul type sur Excel

DONNEES DE BASE			Piscine	
Données de base - Bassin			Intérieure	Extérieure
- Périmètre du bassin			200	200
- Surface du bassin (S)	m ²		100,0	100,0
- Volume du bassin (V)	m ³		250	250
- Temps de réchauffage du bassin (24 à 48h piscine privée, 36 à 72h piscine publique)			60,1	60,1
- Température du bassin (T)			27,0 °C	27,0 °C
Type d'activité (Cliquez sur Infos > Commentaires feuilles de calcul)			1,00	
VALEURS RESULTANTES			Intérieure	Extérieure
Données psychrométriques de l'air ambiant				
Altitude du site (m)				
Température				
- Température sèche de l'air (ou bulbe sec)	ts	°C	27,0 °C	24,0 °C
- Température humide de l'air (ou bulbe humide)	th	°C	21,23 °C	17,09 °C
- Température de rosée	tr	°C	18,57 °C	18,57 °C
Humidité				
- humidité relative de l'air (60 à 80%; 70% moyenne)	Hr	%	60%	50%
- Humidité spécifique à saturation à la température sèche	Hss	kg/kg d'air	0,0227	0,0183
- Humidité spécifique de l'air	Hs	kg/kg d'air	0,0134	0,0093
Enthalpie, chaleur				
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale)	H	kJ/kg	61,346	47,773
- Chaleur spécifique de l'air sec	cpa	kJ/kg	1,005	1,005
Pression exercée par l'air				
- Pression totale du mélange (air humide) - Pression atmosphérique	Patm	kPa/m ²	101,33	101,33
- Pression de vapeur à saturation à la température sèche	Pvs	kPa/m ²	3,57	2,38
- Pression partielle de vapeur dans l'air ambiant (de même tension maxi de vapeur à la température de rosée)	Pv	kPa/m ²	2,14	1,43
Volume de l'air à la température sèche				
- Volume spécifique de l'air humide / Kg d'air sec	V	m ³ /kg d'air sec	0,869	0,854
- Masse volumique de l'air humide	Mv	kg/m ³ d'air humide	1,167	1,181
Données de calcul du bassin de la piscine				
Données de l'air en contact avec la surface du plan d'eau				
- Pression de vapeur à saturation à la surface de l'eau	Pw	kPa/m ²	3,565	3,565
- Humidité spécifique à saturation	Hsp	kg/kg d'air	0,023	0,023
- Volume spécifique de l'air	Vp	m ³ /kg d'air sec	0,881	0,881
- Chaleur latente de vaporisation à saturation	Y	kJ/kg vapeur	2438,14	2438,14
Quantité d'eau évaporée du bassin				
- Vitesse du vent (v) (piscine à l'air libre - 4 m/s - à moitié abritée - 2 m/s - abritée)	V	m/s		2,50 m/s
- Evaporation au m ² y/c activités baigneurs	W	kg/h m ²	0,214	0,87
- Evaporation totale à la surface du plan d'eau	B1	kg/h	21,36	86,83
Total		kg/h	21,36	86,83
Apports thermique par le plan d'eau				
- Apport sensible par rayonnement	A1	Wh	6811,26 Wh	7882,55 Wh
- Apport sensible par convection	A2	Wh		33145,50 Wh
- Apports latents par vaporisation	A3	Wh	14463,46 Wh	58803,19 Wh
Total		Wh	21274,72 Wh	93837,24 Wh
Renouvellement d'eau				
- 1/20ème du volume d'eau de la piscine en 24h		m ³ /h	0,52 m ³ /h	0,52 m ³ /h
Bilan thermique				
1° En fonction de la surface du plan d'eau + renouvellement d'eau				
- Apports sensibles globaux (A1 + A2) (ratio pour piscine couverte 50 W/m ²)	A1+A2	Wh	6811,26 Wh	41028,05 Wh
- Pertes par évaporation du plan d'eau (apports latents B1)	A3	Wh	14463,46 Wh	58803,19 Wh
- Pertes par conduction en périphérie de bassin (1,4 W/m °C)		Wh	1960,00 Wh	1960,00 Wh
- Renouvellement d'eau (Alimentation eau à 10°C)		Wh	10297,40 Wh	10297,40 Wh
Total		Wh	23234,72 Wh	101737,24 Wh
2° En fonction de la capacité du bassin, phase de réchauffage				
- Réchauffage du bassin		Wh	80379,17 Wh	80379,17 Wh

Résumé des pertes thermiques au travers d'une piscine



Déshumidification de l'air du hall de la piscine

La déshumidification de l'air peut se faire par renouvellement d'air ou par pompe à chaleur.

Déshumidification par renouvellement d'air

L'air extérieur en hiver contient moins de vapeur d'eau que l'air du hall. On introduit dans le bâtiment une certaine quantité d'air extérieur, plus sec, qui se charge en eau, éliminant ainsi la vapeur d'eau en excès.

A noter que la réglementation actuelle limite l'apport en air neuf. L'installation doit être équipée d'un dispositif de récupération d'énergie sur l'air extrait.

Le remplacement d'un kg d'air intérieur par un kg d'air extérieur entraîne une perte d'eau.

Débit d'air neuf massique (Qm) en kg/h

$$Q_m = \frac{m}{W_{ext} - W_a}$$

- m = masse d'eau évaporée (g/h)
- W_{ext} = teneur en eau de l'air extérieur pour la température et le degré hygrométrique au moment et selon le lieu considéré (g/kg d'air sec) - En demi-saison, on a couramment, en climat tempéré : $W_{ext} = 9$ g/kg
- W_a = teneur en eau de l'air du local (g/kg d'air sec) - A 27°C, 60% Hr, $W_a = 13,5$ g/kg

Débit d'air neuf volumique (Qv) en m3/h

$$Q_v = \frac{m \cdot q_v}{W_{ext} - W_a}$$

- q_v = volume spécifique de l'air en m3/kg (A 27°C, 60% Hr = 0,877 m3/kg)

Dés humidification par renouvellement d'air (Piscine, etc.)					
	Sym	Unités	Données	Diagramme évolution air	
Température air extérieur					
- Altitude du site		m	80 m		
- Température sèche de l'air (ou bulbe sec)	ts	°C	-5,00 °C		
- Humidité relative (ou degré hygrométrique)	Hr	%	90,00%		
- Température humide de l'air (ou bulbe humide)	th	°C	-5,44 °C		
- Température de rosée	tr	°C	-6,38 °C		
- Humidité spécifique	Hs	kg/kg d'air sec	0,0024 kg		
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale)	H	kJ/kg d'air sec	0,848 kJ/kg		
- Masse volumique de l'air humide	qm	kg/m3 d'air humide	1,302 kg/m3		
- Volume spécifique de l'air humide	qvh	m3/kg d'air sec	0,770 kg/m3		
Température air du volume ambiant					
- Température sèche de l'air (ou bulbe sec)	ts	°C	28,00 °C		
- Humidité relative (ou degré hygrométrique)	Hr	%	60,00%		
- Température humide de l'air (ou bulbe humide)	th	°C	22,08 °C		
- Température de rosée	tr	°C	24,23 °C		
- Humidité spécifique	Hs	kg/kg d'air sec	0,0144 kg		
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale)	H	kJ/kg d'air sec	64,838 kJ/kg		
- Masse volumique de l'air humide	qm	kg/m3 d'air humide	1,151 kg/m3		
- Volume spécifique de l'air humide	qvh	m3/kg d'air sec	0,873 kg/m3		
Calcul débit de renouvellement d'air pour la déshumidification					
- Masse d'eau à évaporer	m	kg	32,40 kg/h		
- Débit d'air neuf volumique à 28°C, et 60% Hr	Qv	m3/h	2352 m3/h		
- Puissance calorifique pour réchauffer l'air à 28°C		°C	26393 Wh		

Exemple de calcul :

- Quantité d'eau à évacuer : 32,4 kg/h
- Conditions climatiques hall piscine : 28°C - 60% Hr
- Conditions climatiques extérieures :-5°C - 90% Hr

Le débit d'air neuf à introduire sera de 2352 m3/h, la puissance calorifique nécessaire pour réchauffer l'air à 28°C sera de 26393 Wh.

Evaporation journalière

Le programme PsychroSI permet d'effectuer ce type de calcul.

L'évaporation naturelle d'une piscine est variable selon différents paramètres, à savoir :

- la température de l'eau
- la température ambiante du local de la piscine
- du taux d'hygrométrie de l'air ambiant
- de la vitesse d'air au dessus du plan d'eau (ce paramètre est nettement plus élevé pour les piscines situées à l'extérieur)

Si un des 3 paramètres (températures ou vitesse d'air) croît ou en cas de réduction du taux d'hygrométrie et plus le taux d'évaporation sera important.

1°/ Exemple pour une piscine dans un local :

- Température de l'eau de la piscine = 27°C
- Température de l'air ambiant = 24°C
- Taux d'hygrométrie de l'air ambiant = 50% (HR)

- Vitesse de l'air au dessus du bassin = 0,1 m/s

Débit d'évaporation = 0,15 l/h m², soit sur 24 h = 3,6 litres/jour/m²

Chute du niveau d'eau par jour = 3,6 mm/jour

2°/ Exemple pour une piscine dans un local :

- Température de l'eau de la piscine = 20°C
- Température de l'air ambiant = 24°C
- Taux d'hygrométrie de l'air ambiant = 50% (HR)
- Vitesse de l'air au dessus du bassin = 0,1 m/s

Débit d'évaporation = 0,063 l/h m², soit sur 24 h = 1,51 litre/jour/m²

Chute du niveau d'eau par jour = 1,5 mm/m²/jour

3°/ Exemple pour une piscine extérieure :

- Température de l'eau de la piscine = 22°C
- Température de l'air ambiant = 24°C (Température moyenne dans la journalière)
- Taux d'hygrométrie de l'air ambiant = 50% (HR)
- Vitesse de l'air au dessus du bassin = 1 m/s

Débit d'évaporation = 0,28 l/h m², soit sur 24 h = 6,72 litres/jour/m²

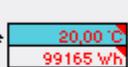
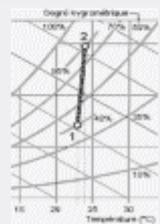
Chute du niveau d'eau par jour = 6,7 mm/jour

Solution

Pour limiter l'évaporation de l'eau d'une piscine la solution consiste à effectuer un recouvrement par une bâche ou la mise place d'une couverture isotherme du bassin pour limiter le chauffage initial pendant la fermeture nocturne.

4 Programme PsychroSI – MELANGES D'AIR

Calcul psychrométrique en mélange d'air avec réchauffage

Calcul psychrométrique (Mélange d'air)					
Données d'entrées		Air neuf (A)	Air repris (B)	Air mélangé (C)	
- Altitude - Débit de base (1,2 kg/m ³) - T. sèche de base - H.relative - Débit massique		80 m ³ /h °C % kg/h d'air humide	10000,00 m ³ /h -7,00 °C 50,00% 13128,24 kg/h	10000,00 m ³ /h 20,00 °C 40,00% 11885,19 kg/h	20000,00 m ³ /h 6,50 °C thériar 25013,43 kg/h
Valeurs résultantes psychrométriques de l'air		A	B	C	
Température					
- Température de mélange - Température humide - Température de rosée	°C th °C tr °C	----- -8,96 °C -15,64 °C	----- 12,38 °C 6,01 °C	5,89 °C 2,77 °C -51,01 °C	
Humidité					
- Taux d'hygrométrie - Humidité spécifique corrigée - Total humidité	Hr % Hs kg/kg d'air sec kg/h d'air humide	----- 0,0011 14,73	----- 0,0059 69,53	58,27% 0,0034 84,26	
Enthalpie, chaleur					
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale) (Par convention, considérée comme nul à 0°C) - Total enthalpie sur l'air véhiculé - Chaleur sensible sur l'air véhiculé - Chaleur latente sur l'air véhiculé	H k/Mkg d'air sec kJ kJ kJ	-4,25 -55736,76 -92360,38 36620,39	34,94 415319,56 238900,67 176427,21	14,38 359582,80 146540,29 213047,61	
Volume de l'air à la température sèche					
- Volume spécifique de l'air humide (m ³ d'air humide / - Volume spécifique de l'air - Masse volumique de l'air humide - Débit volumique de l'air véhiculé	m ³ /kg d'air sec m ³ /kg d'air humide kg/m ³ d'air humide m ³ /h d'air humide	0,763 0,762 1,313 9140,60	0,846 0,841 1,189 10096,60	0,802 0,800 1,250 kg m ³ 19192,49	
Réchauffage en hiver					
Introduction d'air					
1/ Soufflage d'air pour combattre les déperditions - Température ambiante des locaux - Puissance thermique - Total enthalpie sur l'air véhiculé - Enthalpie spécifique (ou chaleur totale) - Température de soufflage équivalente 2/ Soufflage d'air à température constante - Température de soufflage minimale souhaitée - Energie thermique à ajouter en fonction de ts - Total enthalpie sur l'air véhiculé - Taux d'hygrométrie	°C W/h kJ k/Mkg d'air sec °C °C W/h kJ %	T°C d'ambiance Déperditions, etc. T°C d'ambiance	 	359325,32 14,37 5,88 °C 20,00 °C 99165 W/h 716939,57 23,12%	
Humidification par vapeur d'eau					
- Taux d'hygrométrie corrigée - Apport d'humidité spécifique - Humidification - Estimation puissance électrique humidificateur	Hr % kg/kg d'air sec kg de vapeur kW	40% 0,0025 kg kg/h 62,08 kg/h 46,6 kW		9,80 °C 6,01 °C 0,0059 kg 1,189 kg/m ³ 21045,88 m ³ /h	
Avec les humidificateurs à vapeur l'air "sec" (1) suit une évolution à température constante pour se retrouver "humide" au point (2). En réalité, un très léger échauffement existe, mais négligeable dans la pratique.					

Le réchauffage simple s'applique à la plupart des générateurs de chaleur employés pour le contrôle de la température dans les locaux.

La température sèche augmente, la température de rosée et donc l'humidité spécifique restent constantes.

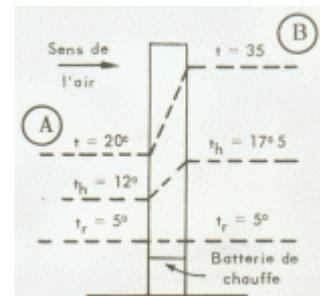
Le programme peut être utilisé pour effectuer les calculs en tout air neuf, il suffira simplement de rien imputer dans la colonne B.

Chauffage d'un local

Imputez la température du local en hiver dans le cas d'un chauffage d'ambiance. La puissance thermique de la batterie doit compenser les déperditions du local et le réchauffage de l'air neuf à la température ambiante.

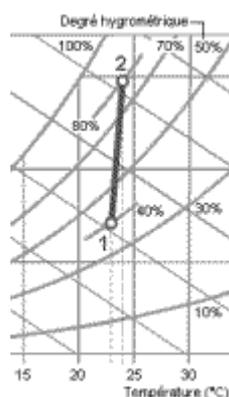
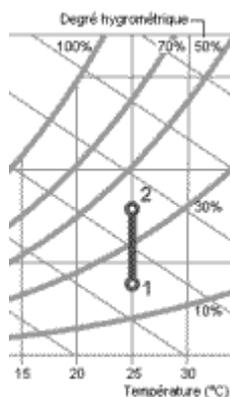
le réchauffage simple de l'air de A à B peut être représenté selon le schéma suivant :

- La température sèche (t) augmente.
- La température de rosée (t_r) et donc l'humidité spécifique restent constantes. Le taux d'hygrométrie à l'inverse diminue.
- La température humide (t_h) augmente.



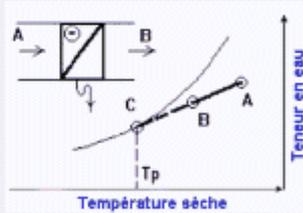
Humidificateur à vapeur : Evolution dans le diagramme de l'air humide

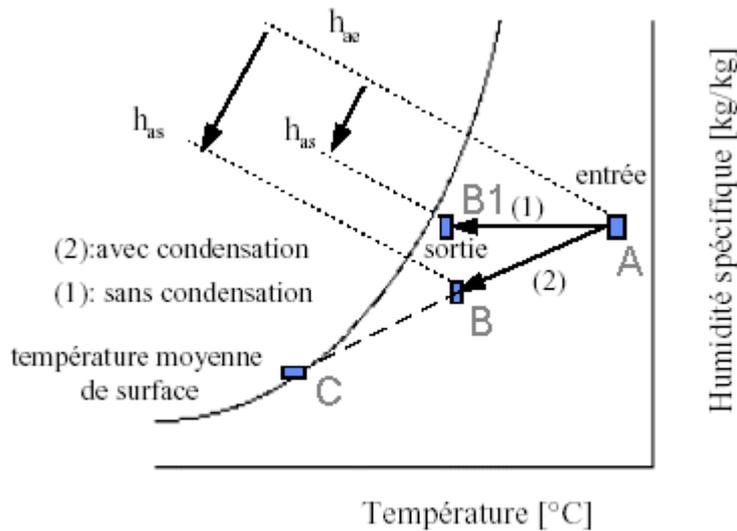
L'air sec (1) à l'entrée de l'humidificateur suit une évolution à température constante pour se retrouver à la sortie au point (2)



En réalité, un très léger échauffement existe, mais négligeable dans la pratique donc ignoré dans l'étude.

Calcul psychrométrique en mélange d'air avec refroidissement

Calcul psychrométrique (Mélange d'air)				
Données d'entrées		Air neuf	Air repris	Air mélangé
- Altitude				
- Débit de base (1,2 kg/m ³)	ts	12,00 °C	12,00 °C	20000,00 m ³ /h
- T. sèche de base	Hr	20,00 %	20,00 %	25,00 °C théor
- H.relative				
- Débit massique	Q	11441,61 kg/h	11885,19 kg/h	23326,80 kg/h
				
Valeurs résultantes psychrométriques de l'air		A	B	C
Température				
- Température de mélange	°C	-----	-----	24,94 °C
- Température humide	th °C	22,02 °C	12,38 °C	17,56 °C
- Température de rosée	tr °C	18,44 °C	6,01 °C	-41,82 °C
Humidité				
- Taux d'hygrométrie	Hr %	-----	-----	46,16%
- Humidité spécifique corrigée	Hs kg/kg d'air sec	0,0134	0,0059	0,00957
- Total humidité	kg/h d'air humide	153,657	69,531	223,188
Enthalpie, chaleur				
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale)	H kJ/kg d'air sec	64,48	34,94	49,43
- Total enthalpie sur l'air véhiculé	kJ	737727,92	415319,56	1153047,48
- Chaleur sensible sur l'air véhiculé	kJ	344976,60	238900,67	583877,27
- Chaleur latente sur l'air véhiculé	kJ	392763,33	176427,21	569190,55
Volume de l'air à la température sèche				
- Volume spécifique de l'air humide (m ³ d'air humide / kg d'air sec)	m ³ /kg d'air sec	0,886	0,846	0,866
- Volume spécifique de l'air	m ³ /kg d'air humide	0,874	0,841	0,857
- Masse volumique de l'air humide	kg/m ³ d'air humide	1,144	1,189	1,166
- Débit volumique de l'air véhiculé	m ³ /h d'air humide	10488,03	10096,60	20578,92
Traitement d'air en été (Simulation) - Vous devez impérativement consulter le constructeur				
Introduction d'air				
- Température entrée EG				12,00 °C
- Apports thermiques en Chaleur sensible	Wh			114416,10
- Apports thermiques en Chaleur latente (humidité)	Wh			118851,90
- By passfactor (pourcentage d'air qui passe à travers la batterie sans subir de changement)				0,00
Calcul psychrométrique en sortie d'air (sans bypass factor)				
- Total enthalpie de sortie d'air				703052,575
- Chaleur sensible de sortie d'air				151882,071
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale)	H kJ/kg d'air sec total			30,139
- Apport humidité	par kg			1,971
- Humidité spécifique corrigée				0,0001
- Taux d'hygrométrie	Hr %			0,0097
- Température de soufflage d'air en fonction de la chaleur sensible				165,48 °C
- Température de soufflage d'air en fonction de la chaleur totale				6,478 °C
- Température humide	th °C			5,873 °C
- Pression de vapeur à la température humide	Pvh			5,873 °C
- Humidité spécifique à 100% Hr	Hs			0,927
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale)	H			0,0058
				20,459
Calcul psychrométrique en contact de la batterie (Tp)				
- Température de paroi TP	TP °C			5,65 °C
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale)(Tp)	H kJ/kg d'air sec			20,02 kJ/kg
- Humidité spécifique sur la batterie (Tp)	Hs kg/kg d'air sec			0,0057 kg/kg
Calcul psychrométrique en sortie de batterie				
- Enthalpie spécifique (ou chaleur totale)	H kJ/kg d'air sec			21,84 kJ/kg
- Humidité spécifique corrigée	Hs kg/kg d'air sec			0,0061 kg/kg
				



Evolution de l'air humide sur une batterie froide

Dans la plupart des applications de conditionnement d'air, l'air est partiellement déshumidifié lors du refroidissement de l'air dans la batterie.

- Point A = Etat de l'air à l'entrée d'air dans la batterie (Température sèche et humidité)
- Point B = Etat de l'air à la sortie d'air dans la batterie (Refroidissement et déshumidification)
- Point B1 = Etat de l'air à la sortie d'air dans la batterie (refroidissement à humidité spécifique constante).
- Point C = température extérieure de paroi (T_p) de la batterie de refroidissement. Cette température est calculée par la formule empirique suivante en considérant que cette température n'est pas uniforme d'un point à un autre de cette surface :

$$T_p = \frac{(3 \cdot t_h) + T_{E_eau}}{4}$$

- t_h = température humide
- T_{E_eau} = température d'entrée d'eau dans la batterie