

Roger Cadiergues

L'EAU LA VAPEUR D'EAU ET L'HYDRONIQUE



(Guide RefCad : nR51.a)



La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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 courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration «toute reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite».

TABLE DES MATIÈRES DU GUIDE

<i>Contenu</i>	<i>page</i>
1. L'eau et l'hydraulique	3
1.1. L'hydraulique	3
1.2. Les domaines hydrauliques	3
1.3. Les pressions	4
1.4. La pression de vapeur saturante	4
1.5. La saturation : formules simplifiées	6
1.6. La saturation : formules de référence	7
2. Les propriétés de l'eau et de la glace	8
2.1. Les propriétés fournies dans ce chapitre	8
2.2. Les propriétés de la glace	8

<i>Contenu</i>	<i>page</i>
2.3. Les propriétés de l'eau froide ou glacée	8
2.4. Les propriétés de l'eau chaude	9
2.4. Les propriétés de l'eau surchauffée	9
3. Les propriétés de la vapeur d'eau	11
3.1. Le classement de la vapeur d'eau	11
3.2. Les propriétés de la vapeur d'eau	11
3.3. La saturation de la vapeur d'eau	12
3.4. Les autres propriétés de la vapeur d'eau	12
3.5. Applications thermiques de la vapeur d'eau	13
3.6. La compressibilité de la vapeur d'eau	14

Chapitre 1

1. L'EAU ET L'HYDRONIQUE

1.1. L'HYDRONIQUE

DÉFINITION

L'**eau** est un fluide de transfert thermique très utilisé en génie climatique, surtout en phase liquide mais aussi bien en phase gazeuse (la vapeur d'eau) que - plus exceptionnellement - en phase solide (la glace). Lorsque le fluide est utilisé sans consommation ni rejet (voir le sanitaire) nous parlons ici d'**hydraulique**, le terme *hydraulique* étant réservé aux applications où l'eau n'est pas utilisée en circuit fermé.

DOMAINES D'UTILISATION

La **glace** est surtout utilisée pour le stockage de froid, grâce à sa chaleur de fusion relativement élevée : 3335 [J/kg]. Ses propriétés sont examinées plus en détail dans le guide :

nR61. L'air humide, la glace et l'eau glacée.

La **vapeur d'eau**, généralement saturée, est aujourd'hui utilisée :

- soit, sous la forme «vapeur basse pression» en chauffage d'ambiance, système devenu rare,
 - soit sous la forme «vapeur haute pression» dans les applications de type industriel ou chauffage urbain.
- Pour toutes ces applications, et certaines formes connexes, voir pour plus de détails :

nR60. Les bases du chauffage.

L'**eau** à l'état liquide reste l'un des fluides de transfert de chaleur ou de froid les plus utilisés. Les domaines de température pratiqués sont très variés, ainsi que l'indique le paragraphe suivant.

1.2. LES DOMAINES HYDRONIQUES

LES TEMPÉRATURES D'ALIMENTATION

L'encadré suivant indique, à titre informatif, les applications les plus couramment envisagées selon la température d'alimentation en eau.

DOMAINES HYDRONIQUES TYPES		
Catégorie	Applications types	Températures
		[°C]
saumure (eau + sel ou glycol)	saumure de stockage froid	-20 à 0
eau glacée	à partir de générateur d'eau glacée	4 à 10
eau de refroidissement (circuit ouvert)	tour de ruissellement, eau de mer ou source	12 à 40
eau de refroidissement (circuit fermé)	circuits d'évaporation	25 à 60
eau de très basse température	chauffage solaire, PAC, récupération de chaleur	35 à 40
eau d'assez basse température	chauffage par panneaux, condensation	40 à 60
eau chaude (chauffage) type	chauffage direct à eau chaude	60 à 90
eau modérément surchauffée	chauffage à eau surchauffée	120 à 160
eau fortement surchauffée	réseaux spéciaux	160 à 210

LES CHUTES DE TEMPÉRATURE

Les températures types (aujourd'hui préférées) sont les suivantes.

- . en eau glacée : 11-7 [°C] (chute de 10 K), éventuellement (si possible) 14-6 [°C] (écart de 8 K) ;
- . en eau chaude basse température (panneaux) : 50-42 [°C] (chute de 8 K) ;
- . en chauffage à chaude courant (radiateurs) : 80-65 [°C] (chute de 15 K) ;

1.3. LES PRESSIONS

MISE EN GARDE IMPORTANTE

En génie climatique faisant intervenir l'eau et la vapeur d'eau il est fait référence à des unités de pression très variées, malheureusement exprimées avec des **unités disparates**. Les formules adoptées par la suite utilisant l'unité «légale» de pression, le **pascal** [Pa], il faut souvent faire des conversions.

Les différentes unités de pression que vous pouvez trouver sont les suivantes.

1. Le **pascal** [Pa] est l'unité **S.I. de référence** : c'est celle que nous adoptons sauf précision contraire. C'est malheureusement une unité très petite, qui est assez souvent remplacée par d'autres.
2. On utilise, parfois, les unités dérivées du bar, avec les équivalences suivantes :
 - . 1 **bar** (abréviation : [bar]) vaut 100 000 pascals,
 - . 1 **millibar** [mbar] vaut 100 pascals.
3. Certains textes utilisent encore l'**atmosphère** [atm], qui vaut 101300 [Pa].
4. Vous pouvez également trouver des pressions exprimées en *hauteur de mercure* : le «mètre de mercure», et le «millimètre de mercure» ou le «centimètre de mercure». Le **mètre de mercure** [m_{Hg}] vaut 133300 [Pa].
5. Dans notre domaine vous trouverez également des pressions exprimées en *hauteur d'eau* :
 - . le **mètre d'eau**, noté souvent m_{eau} ou m_{CE} (pour «*mètre de colonne d'eau*»), qui vaut 9807 [Pa],
 - . le **centimètre d'eau** [cm_{eau}], dit souvent «centimètre de colonne d'eau» (cm_{CE}), valant 98,07 [Pa]
 - . le **millimètre d'eau** [mm_{eau}], dit souvent «millimètre de colonne d'eau» (mm_{CE}), valant 9,807 ≈ 10 [Pa].

LA CONVERSION DES UNITÉS

La conversion des unités de pression fait intervenir les coefficients fournis à l'encadré **1.A**,

Encadré 1.A. CONVERSIONS DES UNITÉS DE PRESSION

- . **atmosphère** : 1 [atm] = 101 300 [Pa]
- . **bar** : 1 [bar] = 100 000 [Pa]
- . **millibar** : 1 [mbar] = 100 [Pa]
- . **pound par square inch** : 1 [psi] = 6894,8 [Pa]
- . **inch of water** : 1 [in of water] = 248,84 [Pa]
- . **inch of mercury** : 1 [in Hg] = 3386,4 [Pa]

- . **hauteur d'eau** :
 - 1 [m eau] = 9807 [Pa]
 - 1 [cm eau] = 98,07 [Pa]
 - 1 [mm eau] = 9,807 [Pa]
- . **hauteur de mercure** :
 - 1 [m Hg] = 133 300 [Pa]
 - 1 [cm Hg] = 1333 [Pa]
 - 1 [mm Hg] = 133,3 [Pa]

LES «DEUX» PRESSIONS

Outre la variété des unités l'expression des pressions peut se heurter à une deuxième difficulté, qui est susceptible de créer des confusions supplémentaires, il s'agit de la distinction à faire entre :

- . les **pressions absolues**, les vraies pressions,
- . et les **pressions effectives**, égales à l'écart entre la *pression absolue* et la *pression atmosphérique*.

Pour faire les conversions utilisez les formules de l'encadré **1.B** qui reposent sur les bases suivantes :

- . la pression atmosphérique est la pression atmosphérique normale selon l'altitude (voir guide **nR41**).
- . dans le cas où vous ne fournissez pas l'altitude celle-ci est prise égale à zéro.

Encadré 1.B. CONVERSION DES PRESSIONS ABSOLUES/RELATIVES

$pabs$ [Pa] = pression absolue ; $prel$ [Pa] = pression relative ; alt [m] = altitude

$$\langle \mathbf{1.B1} \rangle \odot \quad pabs = prel + \{ 101325 * (1 - 0.0000 225577 * alt) ^ 5.2554876 \}$$

$$\langle \mathbf{1.B2} \rangle \odot \quad prel = pabs - \{ 101325 * (1 - 0.0000 225577 * alt) ^ 5.2554876 \}$$

1.4. LA PRESSION DE SATURATION (DE VAPEUR SATURANTE)

LES TABLES «CLASSIQUES»

Pour fixer les propriétés de l'eau et de la vapeur d'eau, on a longtemps utilisé les **tables de l'eau et de la vapeur d'eau**. Ces tables existent toujours : en voici, à la page suivante, deux exemples.

PRESSION DE SATURATION (EAU) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE (10 À 90 °C)

Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]	Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]	Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]	Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]
11	1313	31	4496	51	12976	71	32572
12	1403	32	4758	52	13629	72	33997
13	1498	33	5034	53	14310	73	35475
14	1599	34	5324	54	15020	74	37006
15	1706	35	5628	55	15760	75	38592
16	1818	36	5947	56	16530	76	40236
17	1938	37	6281	57	17333	77	41938
18	2064	38	6632	58	18169	78	43700
19	2198	39	6999	59	19039	79	45524
20	2339	40	7384	60	19944	80	47412
21	2488	41	7786	61	20885	81	49364
22	2645	42	8208	62	21864	82	51384
23	2810	43	8649	63	22882	83	53473
24	2985	44	9111	64	23940	84	55633
25	3169	45	9593	65	25040	85	57865
26	3363	46	10098	66	26180	86	60171
27	3567	47	10625	67	27366	87	62554
28	3782	48	11175	68	28596	88	65015
29	4008	49	11750	69	29873	89	67556
30	4246	50	12350	70	31198	90	70180

PRESSION DE SATURATION (EAU) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE (80 À 200°C)

Température [°C]	Pression de saturation [kPa]						
80	47,36	110	143,3	140	361,4	170	792,0
82	51,33	112	153,2	142	382,3	172	831,1
84	55,57	114	163,6	144	404,2	174	871,5
86	60,11	116	174,6	146	427,1	176	913,7
88	64,95	118	186,3	148	451,0	178	957,4
90	69,91	120	198,5	150	476,0	180	1002,7
92	75,61	122	211,4	152	502,1	182	1049,7
94	81,46	124	225,0	154	529,3	184	1098,4
96	87,69	126	239,3	156	557,6	186	1148,8
98	94,30	128	254,3	158	587,2	188	1201,1
100	101,32	130	270,1	160	618,0	190	1255,2
102	108,8	132	286,7	162	650,1	192	1311,2
104	116,7	134	304,1	164	683,6	194	1369,2
106	125,0	136	322,3	166	718,3	196	1429,1
108	133,9	138	341,4	168	754,5	198	1491,0
110	143,3	140	361,4	170	792,0	200	1555,0

DES TABLES AUX FORMULES

Pour fixer les propriétés de l'eau et de la vapeur d'eau, les spécialistes traditionnels de l'énergétique ont utilisé les **tables de l'eau et de la vapeur d'eau**, qui ont été publiées dans tous les pays développés. Ces tables existent toujours, mais il est de plus en plus fréquent de recourir à des calculs sur ordinateur. Ce qui fait qu'actuellement la présentation peut exister sous trois formes.

1. La *première forme* - la plus ancienne - consiste à utiliser des **tables** (*plus ou moins détaillées*), dont vous trouverez deux exemples à la page précédente.
2. La *deuxième forme* concerne les *formules* que nous appellerons «**formules de référence**» au paragraphe **1.6**. *Nous en déconseillons l'emploi courant*, ces formules - très complexes, et d'ailleurs récemment révisées - servant uniquement à établir les **tables** de vapeur d'eau précitées.
3. La *troisième forme*, celle que nous appellerons des «**formules simplifiées**», est celle que nous recommandons pour les calculs techniques courants. Ces formules sont présentées au paragraphe **1.5**, les calculs pouvant avoir lieu dans les deux sens : *température* < > *pression*.

SUR LE PLAN PRATIQUE

Pour évaluer correctement les propriétés de l'eau il est nécessaire de fixer l'état : *solide (glace)*, *liquide (eau)* ou *gazeux (vapeur d'eau)*. Pour ce faire il faut disposer, selon le problème à résoudre :

- . soit de la **pression de vapeur saturante** à chaque **température**,
- . soit de la **température de condensation** en fonction de la **pression**.

Dans tous les cas choisissez l'une des méthodes suivantes, si vous n'utilisez pas les tables précédentes :

- Adoptez (*solution recommandée*) les **formules simplifiées** indiquées ci-après (§ **1.5**),
- Ou adoptez les formules «de **référence**» fournies au paragraphe **1.6**.

1.5. LA SATURATION : LES FORMULES SIMPLIFIÉES

A PARTIR DE LA TEMPÉRATURE

Si vous connaissez la température et souhaitez calculer la pression de vapeur saturante utilisez les formules de l'encadré **1.C** ci-dessous.

Encadré 1.C. PRESSION DE SATURATION DE LA VAPEUR D'EAU (formules recommandées)

$psat$ [Pa] = pression de vapeur saturante (de la vapeur d'eau) ; TC [°C] = température Celsius

<1.C>©

$$psat = 10^u$$

$$TC \text{ compris entre } -30 \text{ et } 0 \text{ °C} : u = 2.7862 + \{ (9.7561 * TC) / (272.67 + TC) \}$$

$$TC \text{ compris entre } 0 \text{ et } 50 \text{ °C} : u = 2.7862 + \{ (7.5526 * TC) / (239.21 + TC) \}$$

$$TC \text{ compris entre } 50 \text{ et } 100 \text{ °C} : u = 2.7702 + \{ (7.2847 * TC) / (225.81 + TC) \}$$

$$TC \text{ compris entre } 100 \text{ et } 200 \text{ °C} : u = 2.76823 + \{ (7.27887 * TC) / (225.255 + TC) \}$$

A PARTIR DE LA PRESSION

Si vous connaissez la pression et souhaitez calculer la température de vapeur saturante utilisez les formules de l'encadré **1.D** ci-dessous.

Encadré 1.D. TEMPÉRATURES DE CONDENSATION DE LA VAPEUR D'EAU

p [kPa] = pression ; Tcd [°C] = température de condensation ; $\log()$ = logarithme décimal

<1.D>© (y = intermédiaire) ;

. p inférieur à 611 [Pa] : domaine non concerné

$$. p \text{ compris entre } 0.612 \text{ et } 12.35 \text{ [kPa]} : y = \log(p/611.22) ; Tcd = 239.21 * y / (7.2566 - y)$$

$$. p \text{ compris entre } 12.35 \text{ et } 101.42 \text{ [kPa]} : y = \log(p/589.11) ; Tcd = 225.81 * y / (7.2847 - y)$$

$$. p \text{ compris entre } 101.42 \text{ et } 15\,555 \text{ [kPa]} : y = \log(p/586.45) ; Tcd = 225.255 * y / (7.27887 - y)$$

1.6. LA SATURATION : LES FORMULES DE RÉFÉRENCE

Les propriétés de l'eau et de la vapeur d'eau sont souvent présentées sous la forme de **tables de l'eau et de la vapeur d'eau**. Elles varient légèrement selon les auteurs et les institutions. Nous avons choisi celles proposées par E.W. Hyland et A. Wexler en 1989 (encadré **1.E**). Il se peut que vous constatiez de légères divergences entre différentes tables. Par exemple, à 100 °C, la pression de saturation que nous avons adoptée est de 101419 [Pa], alors que les utilisateurs de manuels européens (tables d'origine allemande) adoptent souvent 101330 [Pa], une valeur différente de 9 dix-millièmes de la nôtre.

Encadré 1.E. PRESSION DE SATURATION DE LA VAPEUR D'EAU (formules de référence : R.W. Hyland / A. Wexler, ASHRAE Trans 89.2)

$psat$ [Pa] = pression de vapeur saturante ; TK [K] = température «absolue» ; $\ln()$ = logarithme népérien

<1.E1> TC compris entre -100 et 0 °C :

$$\ln(psat) = C1 / TK + C2 + C3 * TK + C4 * (TK^2) + C5 * (TK^3) + C6 * (TK^4) + C7 * \ln(TK)$$

$$\text{avec : } C1 = -5.674\ 5359\ 10^{+3}; C2 = 6.392\ 5247 ; C3 = -9.677\ 8430\ 10^{-3} ;$$

$$C4 = 6.221\ 5701\ 10^{-7}; C5 = 2.074\ 7825\ 10^{-9} ; C6 = -9.484\ 0240\ 10^{-13} ; C7 = 4.163\ 5019$$

<1.E2> TC compris entre 0 et 200 °C :

$$\ln(psat) = C8 / TK + C9 + C10 * TK + C11 * (TK^2) + C12 * (TK^3) + C13 * \ln(TK)$$

$$\text{avec : } C8 = -5.800\ 2206\ 10^{+3}; C9 = 1.391\ 4993 ; C10 = -4.864\ 0239\ 10^{-2} ;$$

$$C11 = 4.176\ 4768\ 10^{-5}; C12 = -1.445\ 2093\ 10^{-8} ; C13 = 6.545\ 9673$$

Chapitre 2

2. LES PROPRIÉTÉS DE L'EAU ET DE LA GLACE

2.1. LES PROPRIÉTÉS FOURNIES DANS CE CHAPITRE

Les trois propriétés retenues par la suite sont les suivantes :

- . le **volume massique** [m^3/kg]
- . la **masse volumique** [kg/m^3]
- . l'**enthalpie massique** [J/kg].

Pour les évaluer vous trouverez aux paragraphes suivants :

- au paragraphe **2.2** les propriétés de la **glace**,
- au paragraphe **2.3** les propriétés de l'**eau froide** ou **glacée**,
- au paragraphe **2.4** les propriétés de l'**eau chaude**,
- au paragraphe **2.5** les propriétés de l'**eau surchauffée**.

2.2. LES PROPRIÉTÉS DE LA GLACE

Aux températures négatives les propriétés retenues sont les suivantes :

- . le **volume massique** [m^3/kg]
- . la **masse volumique** [kg/m^3]
- . l'**enthalpie massique** [J/kg].

Pour les évaluer vous pouvez utiliser les **formules** indiquées à l'**encadré 2.A** ci-dessous.

Encadré 2.A. PROPRIÉTÉS DE LA GLACE

TC [$^{\circ}\text{C}$] = température ; V^* [m^3/kg] = volume massique ; $mVol$ [kg/m^3] = masse volumique ;

H^* [J/kg] = enthalpie massique

1. VOLUME MASSIQUE

$$\langle 2.A1 \rangle \odot \quad V^* = 0.001091 - 0.000\ 002 * TC$$

2. MASSE VOLUMIQUE

$$\langle 2.A2 \rangle \odot \quad mVol = 1 / (0.001091 - 0.000\ 002 * TC)$$

3. ENTHALPIE MASSIQUE

$$\langle 2.A3 \rangle \odot \quad H^* = - 333\ 430 + TC * (2106.5 + 3.75 * TC)$$

2.3. LES PROPRIÉTÉS DE L'EAU FROIDE OU GLACÉE

Les trois propriétés retenues par la suite sont les suivantes :

- . le **volume massique** [m^3/kg]
- . la **masse volumique** [kg/m^3]
- . l'**enthalpie massique** [J/kg].

Pour les évaluer vous pouvez utiliser les **formules** indiquées à l'**encadré 2.B** de la page suivante.

Encadré 2.B. PROPRIÉTÉS DE L'EAU FROIDE (OU GLACÉE) (température de 0 à 25 °C)

TC [°C] = température ; V^* [m³/kg] = volume massique ; $mVol$ [kg/m³] = masse volumique ;
Abs() = valeur absolue ; H^* [J/kg] = enthalpie massique

1. VOLUME MASSIQUE

$$\begin{aligned} <2.B1>^{\circledast} \quad 0 < TC \leq 8 \text{ °C} : & \quad V^* = 0.001\,000 + 1E8 * \{ 3 + \text{Abs}(TC) - 4 \} \\ & \quad 8 < TC < 25 \text{ °C} : & \quad V^* = 0.001\,000 + 1E8 * \{ 8 + TC * (-3.125 + 0.59375 * TC) \} \end{aligned}$$

2. MASSE VOLUMIQUE

$$<2.B2> \quad mVol = 1 / V^*$$

3. ENTHALPIE MASSIQUE

$$<2.B3>^{\circledast} \quad H^* = -40 + TC * \{ 4221.33 + TC * (-1.8 + 0.0267 * TC) \}$$

2.4. LES PROPRIÉTÉS DE L'EAU CHAUDE

Les propriétés retenues sont les suivantes :

- . le **volume massique** [m³/kg]
- . la **masse volumique** [kg/m³]
- . l'**enthalpie massique** [J/kg].

Pour les évaluer vous pouvez utiliser les **formules** indiquées à l'**encadré 2.C** ci-dessous.

Encadré 2.C. PROPRIÉTÉS DE L'EAU CHAUDE (température de 25 à 95 °C)

TC [°C] = température ; V^* [m³/kg] = volume massique ; $mVol$ [kg/m³] = masse volumique ;
 H^* [J/kg] = enthalpie massique

1. VOLUME MASSIQUE

$$<2.C1>^{\circledast} \quad V^* = 0.000\,998 + TC * (1.09E-7 + 7.47E-9 * TC)$$

2. MASSE VOLUMIQUE

$$<2.C2> \quad mVol = 1 / V^*$$

3. ENTHALPIE MASSIQUE

$$<2.C3>^{\circledast} \quad H^* = -40 + TC * \{ 4205.00 + TC * (-0.5825 + 0.00466 * TC) \}$$

2.5. LES PROPRIÉTÉS DE L'EAU SURCHAUFFÉE

Les propriétés retenues sont les suivantes :

- . le **volume massique** [m³/kg]
- . la **masse volumique** [kg/m³]
- . l'**enthalpie massique** [J/kg].

Pour les évaluer vous pouvez utiliser les **formules** indiquées à l'**encadré 2.D** de la page suivante.

Encadré 2.D. PROPRIÉTÉS DE L'EAU SURCHAUFFÉE (température de 100 à 200 °C)

TC [°C] = température ; p [Pa] = pression de l'eau ;

$psat$ [Pa] = pression de vapeur saturante à TC (2.a) ; V^* [m³/kg] = volume massique ; $mVol$ [kg/m³] =
masse volumique ; H^* [J/kg] = enthalpie massique

0. CALCULS PRÉLIMINAIRES (Dp , $Vsat$, DH = variables intermédiaires)

<2.D0>
$$Vsat = 1 / \{ 1008.358 + TC * (-0.69327 - 0.002 1428 * TC) \}$$

$$CorH = (0.00107 - 0.000 003 * TC) * (p - psat)$$

1. VOLUME MASSIQUE

<2.D1>©
$$V^* = Vsat - 6.5 \cdot 10^{-13} * Dp$$

2. MASSE VOLUMIQUE

<2.D2>©
$$mVol = 1 / V^*$$

3. ENTHALPIE MASSIQUE

<2.D3>©
$$H^* = -2040.7 + TC * (4257.434 + TC * (- 0.975515 - 0.005 20875 * TC)) + CorH$$

Chapitre 3

3. LES PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR D'EAU

3.1. LE CLASSEMENT DE LA VAPEUR D'EAU

La plupart du temps la **vapeur d'eau** était utilisée dans les applications thermiques, mais son importance s'est beaucoup réduite. Les concepts qui y sont adoptés sont les suivants.

LES PRESSIONS

- Les pressions y sont normalement exprimées en **pression effective**, cette pression étant exprimée :
 - . en France en **bar** [bar] (1 bar = 100 000 [Pa],
 - . dans certains pays en **mégapascal** [MPa].

LE CLASSEMENT RÉGLEMENTAIRE

- On distingue deux catégories d'installations, selon la pression effective maximale :
 - . celles dites à «vapeur basse pression» lorsque la *pression effective* **ne dépasse pas 0,5** [bar], limite conventionnelle qui a pu être différente dans le passé, et qui peut être différente dans certains pays,
 - . Celles dites à «vapeur haute pression» lorsque la *pression effective maximale* **dépasse 0,5** [bar].

LE SOUS-CLASSEMENT DE LA BASSE PRESSION

- On distinguait, il y a plusieurs décennies, deux catégories d'installations utilisant la vapeur basse pression :
 - . les plus courantes, dites «à vapeur basse pression» utilisant des températures de 105 à 120 [°C],
 - . les plus spécifiques dites «sous vide», utilisant des pressions (absolues) de vapeur inférieure à la pression atmosphérique (températures de 80 à 95 °C).

LES APPLICATIONS ACTUELLES

La *vapeur basse pression*, tous systèmes confondus, jadis utilisée pour des applications d'importance modérée, n'est plus guère utilisée en Europe. Cette disparition est encore plus nette pour les installations dites «*sous vide*» que pour les autres.

La *vapeur haute pression*, surtout utilisée pour les applications professionnelles ou de chauffage à distance, est de plus en plus souvent remplacée par l'*eau surchauffée* (voir chapitre 2).

3.2. LES PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR D'EAU

Aux températures de 80 à 200 [°C]. les propriétés retenues ici sont :

- d'abord (§ 3.3) l'ensemble :
 - . **pression de vapeur saturante** en fonction de la température,
 - . **température de condensation** en fonction de la pression de vapeur.
- ensuite les *propriétés suivantes* (§ 3.4) :
 - . le **volume massique** [m³/kg]
 - . la **masse volumique** [kg/m³]
 - . l'**enthalpie massique** [J/kg].

La différence essentielle avec les indications du chapitre précédent tient à ce que, dans ce chapitre 3, nous examinons les valeurs dans le domaine 80-200 [°C].

3.3. LA SATURATION DE LA VAPEUR D'EAU

LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE

La **pression de vapeur saturante**, en fonction de la température, peut être évaluée comme suit. Vous pouvez utiliser :

1. Ou bien la **table 2.I** fournie au paragraphe **1.4** ;
2. Ou bien les **formules** indiquées ci-dessous à l'**encadré 3.A** ci-dessous.

LA TEMPÉRATURE DE CONDENSATION

La **température de condensation**, fonction de la pression de vapeur, peut être évaluée grâce aux **formules** indiquées à l'**encadré 3.A** ci-dessous.

Encadré 3.A. LA SATURATION DE LA VAPEUR D'EAU (température de 80 à 200 °C)

TC [°C] = température ; T_{sat} [°C] = température de condensation
 p [Pa] = pression de vapeur ; $psat$ [Pa] = pression de vapeur saturante à TC
 u = variable intermédiaire ; $\log()$ = logarithme décimal

0. VARIABLE INTERMÉDIAIRE

$$\langle 3.A0 \rangle \textcircled{c} \quad u = 2.76823 + \{ (7.27887 * TC) / (225.255 + TC) \}$$

1. PRESSION DE VAPEUR SATURANTE

$$\langle 3.A1 \rangle \textcircled{c} \quad psat = 10 ^ u$$

2. TEMPÉRATURE DE CONDENSATION

$$\langle 3.A2 \rangle \textcircled{c} \quad T_{sat} = \{ 225.255 * \log(p / 586.45) \} / \{ 7.27887 - \log(p / 586.45) \}$$

3.4. LES AUTRES PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR D'EAU

Il s'agit des *propriétés suivantes* :

- . le **volume massique** [m³/kg]
- . la **masse volumique** [kg/m³]
- . l'**enthalpie massique** [J/kg].

Pour les évaluer ces propriétés vous pouvez utiliser les **formules** indiquées à l'**encadré 3.B** de la page suivante.

REMARQUE IMPORTANTZ

Les formules indiquées aux encadrés précédents prennent en compte les caractéristiques «précises» de la vapeur (pression et température). Il est souvent inutile, ou disproportionné, de tenir compte de ces nuances : il suffit, au plan pratique, d'utiliser les valeurs simplifiées du paragraphe suivant. (§ **3.5**).

Suite page suivante

Encadré 3.B. PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR D'EAU (température de 80 à 200 °C)

TC [°C] = température

p [Pa] = pression de vapeur ; $psat$ [Pa] = pression de vapeur saturante à TC (voir 4.a)

V^* [m³/kg] = volume massique ; $mVol$ [kg/m³] = masse volumique ; H^* [J/kg] = enthalpie massique

$beta$, DH = variables auxiliaires ; $\log()$ = logarithme décimal

0. CALCULS PRÉLIMINAIRES ($beta$, DH = variables intermédiaires)

$$\langle 3.B0 \rangle \quad beta = 2.87E-7 + TC * (-1.8E-9 + 3.12510-12 * TC)$$

$$CorH = (1.05E-3 - 2.8E-6 * TC) * (psat - p)$$

1. VOLUME MASSIQUE

$$\langle 3.B1 \rangle \textcircled{C} \quad V^* = 461.520 * (273.15 + TC) \{ (1 / p) - beta \}$$

2. MASSE VOLUMIQUE

$$\langle 3.B2 \rangle \textcircled{C} \quad mVol = 1 / V^*$$

3. ENTHALPIE MASSIQUE

$$\langle 3.B3 \rangle \textcircled{C} \quad H^* = 2505\,590 + TC * (1685.184 + TC * (1.48698 + 0.01354 * TC)) + CorH$$

3.5. APPLICATIONS THERMIQUES DE LA VAPEUR D'EAU

LES DEUX CADRES PRINCIPAUX D'APPLICATION

La plupart des applications énergétiques de la vapeur d'eau opèrent dans l'un des deux cadres suivants.

1. Ou bien on utilise la vapeur comme fluide gazeux (turbines) : dans ce cas les propriétés classiques du gaz suffisent généralement : voir plus loin.

2. Ou bien on utilise la vapeur comme intermédiaire thermique, en provoquant (généralement au niveau des échangeurs) la condensation du fluide. Pour cette dernière application on peut utiliser les formules développées de la vapeur (formules précédentes adaptées), soit des formules «accélérées» présentées plus loin.

Vous pouvez, dans tous les cas, utiliser les **formules** indiquées à l'**encadré 3.C** (ci-dessous).

Encadré 3.C. UTILISATION THERMIQUE DE LA VAPEUR D'EAU (température de 80 à 200 °C)

TC [°C] = température ; $Tsat$ [°C] = température de condensation

p [Pa] = pression de vapeur ; $psat$ [Pa] = pression de vapeur saturante à TC

u = variable intermédiaire ; $\log()$ = logarithme décimal

0. VARIABLE INTERMÉDIAIRE

$$\langle 3.C0 \rangle \textcircled{C} \quad u = 2.76823 + \{ (7.27887 * TC) / (225.255 + TC) \}$$

1. PRESSION DE VAPEUR SATURANTE

$$\langle 3.C1 \rangle \textcircled{C} \quad psat = 10 \wedge u$$

2. TEMPÉRATURE DE CONDENSATION

$$\langle 3.C2 \rangle \textcircled{C} \quad Tsat = \{ 225.255 * \log(p / 586.45) \} / \{ 7.27887 - \log(p / 586.45) \}$$

UTILISATION DE LA MÉTHODE SIMPLIFIÉE

La méthode simplifiée repose sur deux formules simples (encadré **3.D** ci-dessous) fournissant, en fonction de la température :

- la **capacité thermique** [J/kg K] de la vapeur d'eau,
- l'**enthalpie massique de condensation** [KJ/kg] qui correspond à la saturation de la vapeur en cause.

Encadré 3.D. UTILISATION THERMIQUE DE LA VAPEUR D'EAU (formules simplifiées)

TC [°C] = température ; T_s [°C] = température de condensation
 p [Pa] = pression de vapeur ; Q [J/kg] = enthalpie massique récupérée
 $\log()$ = logarithme décimal

0. VARIABLE INTERMÉDIAIRE (TEMPÉRATURE DE CONDENSATION)

$$\langle 3.D0 \rangle \quad T_s = \{ 225.255 * \log(p / 586.45) \} / \{ 7.27887 - \log(p / 586.45) \}$$

1. ENTHALPIE MASSIQUE RÉCUPÉRÉE À LA CONDENSATION

$$\langle 3.D1 \rangle \quad Q = 2507\,630 + T_s * (-2572.25 + T_s * (2.4625 - 0.01875 * T_s))$$

3.6. LA COMPRESSIBILITÉ DE LA VAPEUR D'EAU

La **vapeur d'eau** ne se comporte pas comme un gaz parfait et, dans le cas général, suit la loi :

$$p V^* = 461,520 \chi (\theta + 273,15)$$

- p [Pa] étant la pression de vapeur,
- V^* son volume massique [m³/kg],
- θ sa température [°C],
- χ (chi) la **compressibilité** [sans dimension].

La vapeur d'eau ne fonctionnant pas comme un gaz parfait la valeur de la compressibilité χ est inférieure à 1, ainsi que l'indique le schéma ci-dessous.

