

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'études

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER 2 EN GENIE MECANIQUE
OPTION : ENERGETIQUE

Intitule du sujet :

**Elaboration d'un code de calcul des propriétés
thermodynamiques de
l'air humide en contact de l'eau de mer et de la glace**



Proposé et dirigé par:

Mr : FERROUK Mohamed

Réalisé par:

Mr : LOUNI Madjid

Promotion 2011/2012

Remerciements

Mes sincères remerciements s'adressent à mon promoteur, Monsieur FERROUK Mohamed, pour sa patience, sa gentillesse, sa disponibilité et sa rigueur d'esprit qu'il m'a transmises tout au long de ce travail dont il a assuré un suivi permanent.

Je tiens également à remercier tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, en particulier ; Mr A.HAMDAD, Mr M.BOUTOUDJ, Mr A.ABDEDOU et Mr R.NEBBALI

J'adresse aussi mes remerciements les plus sincères à tous mes amis, qui ont participé ou donné un coup de grâce avec de petits beaux mots pour m'encourager. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*À mes chers parents qui m'ont soutenu
pendant des années qu'ils trouvent ici toute ma
gratitude et mon profond respect.*

*Je dédie ce travail à mes sœurs et mes frères
et leurs enfants, à mes cousins, ainsi qu'à toute
ma famille.*

*Je dédie aussi ce travail à mes amis et
camarades.*

Sommaire

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Sommaire.....	iii
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	v
Nomenclature.....	vi
<i>Introduction générale.....</i>	1
<i>Chapitre I : Généralité sur l'air humide</i>	
1.1. Définition.....	2
1.2. Grandeurs caractéristiques de l'air humide.....	3
1.2.1. La Pression totale de l'air humide.....	3
1.2.1.1. La pression partielle de vapeur d'eau et d'air sec.....	4
1.2.1.2. La pression partielle de vapeur saturée.....	5
1.2.2. La température sèche.....	5
1.2.3. La température humide.....	5
1.2.4. La température de rosée.....	6
1.2.5. Teneur en eau.....	7
1.2.6. Le degré hygrométrique HR ou ϕ	7
1.2.7. L'enthalpie spécifique de l'air humide.....	8
1.2.8. Enthalpie spécifique de l'air sec.....	8
1.2.9. Enthalpie spécifique de la vapeur d'eau.....	8
1.2.10. Enthalpie de l'air humide.....	9
1.2.11. Le volume spécifique de l'air humide.....	9
1.3. Relations entre les grandeurs caractéristiques de l'air humide.....	10
<i>Chapitre II : Conditionnement d'air et les différents diagrammes utilisés</i>	
2.1. Diagramme de l'air humide.....	11
2.2. Présentation des caractéristiques de l'air humide sur le diagramme.....	11
2.3. Conditionnement de l'air humide.....	18
2.3.1. Mélange de deux airs.....	18
2.3.2. Chauffage de l'air.....	20
2.3.3. Refroidissement de l'air.....	22

2.3.4 Humidification de l'air.....	23
2.3.5 Déshumidification de l'air.....	27

***Chapitre III : Propriétés thermodynamiques d'air humide en contact
de l'eau de mer et de la glace, de 2010***

3.1. Equation d'état.....	29
3.2. Énergie spécifique d'Helmholtz de la vapeur d'eau.....	30
3.3. Énergie spécifique d'Helmholtz d'air sec.....	33
3.4. Énergie spécifique d'Helmholtz d'interaction eau-air.....	35
3.5. Relations des propriétés thermodynamiques d'air humide en fonction de l'énergie spécifique d'Helmholtz.....	36
3.6. Propriétés colligative.....	44
3.7. Domaine de validité.....	45

Chapitre IV : Description du programme Air Humide

4.1. Information sur le programme.....	47
4.2. Le programme principal et sous programmes.....	47
4.2. a. rôle du programme principal.....	47
4.2. b. rôle des sous programmes.....	47
4.3. Organigramme du code de calcul.....	50
4.4. Description de l'input.....	54
4.5. Description de l'output.....	54

Chapitre V : Résultats obtenus et discussion

5.1 Validation du programme de calcul	55
5.2. Représentations de quelques résultats obtenus des propriétés de l'air humide à l'état de saturation.	62
5.2.1. Fraction massique de l'air sec	62
5.2.2. Pression partielle, l'humidité absolue et l'enthalpie à la saturation.....	63
5.2.3. Influence de la température et de la pression	65
5.3. Quelques propriétés thermodynamiques de l'air humide à différentes teneur en eau	67
5.4. Quelques Propriétés thermophysiques de l'air humide	70

<i>Conclusion générale</i>	74
---	----

Références bibliographiques

Annexe

Liste des figures

Figure		Page
1.1	Psychromètre de mesure des températures	5
2.1	La température sèche	12
2.2	Humidité absolue	13
2.3	La Pression partielle de la vapeur d'eau	14
2.4	Détermination de la température de rosée	14
2.5	Humidité relative	15
2.6	Enthalpie spécifique	16
2.7	Température humide	16
2.8	Volume massique	17
2.9	Lecture des caractéristiques d'un point sur le diagramme	17
2.10	Détermination des caractéristiques d'un mélange	19
2.11	Évolution dans une batterie chaude	21
2.12	Évolution dans une batterie froide	23
2.13	Évolution d'air dans un humidificateur adiabatique	25
2.14	Évolution d'air dans un humidificateur à vapeur	26
2.15	Évolution d'air dans une batterie froide humide	28
4.1	Organigramme du code de calcul	50
5.1	Pression de vapeur saturante en fonction de la température.....	65
5.2	L'évolution de la fraction massique de l'air sec à la saturation.....	65
5.3	La teneur en eau de l'air saturé en fonction de la température.....	66
5.4	L'enthalpie de l'air saturé en fonction de la Température.....	67
5.5	L'évolution de l'enthalpie de l'air humide	69
5.6	L'évolution de l'entropie de l'air humide	69
5.7	L'évolution de la chaleur spécifique de l'air humide	69
5.8	L'évolution de l'énergie interne de l'air humide	69
5.9	Diagramme de l'air humide (r, θ)	73

Liste des tableaux

Table	page
3.1 Les valeurs des constantes utilisées dans l'éq (3.2).....	30
3.2 Les Valeurs numériques des coefficients et paramètres utilisées dans l'éq (3.3).....	31
3.3 Les coefficients et les paramètres utilisés dans l'éq (3.4).....	32
3.4 Les coefficients utilisés dans l'équation (3.6)	34
3.5 Les coefficients utilisés dans l'équation (3.7)	34
3.6 Valeurs des coefficients utilisées dans les fonctions B^{AW} , C^{AAW} et C^{AWW}	35
3.7 Relations donnant les propriétés thermodynamique de l'air humide	37
3.8 Equation d'état de l'air humide ainsi que ses dérivées [1]	38
3.9 Fonction d'Helmholtz et ses dérivées évaluées pour le cas de la vapeur d'eau (formulation d'IAPWS-95 [7])	39
3.10 Dérivées de l'équation (3.5)	40
3.11 Dérivées partielles des quantités α^{id} et α^{res} de l'air sec	41
3.12 Dérivées partielles de la fonction f^{mix}	42
3.13 Dérivées partielle des fonctions $B^{AW}(T)$, $C^{AAW}(T)$ et $C^{AWW}(T)$	43
3.14 Relations des propriétés thermodynamiques et formules de conversion de fractions molaires	44
5.1 Les valeurs de références de la fonction d' Helmholtz f^{AV} et ses dérivées ainsi les propriétés thermodynamiques de l'air humide [6].....	56
5.2 Les valeurs obtenues pour f^{AV} et quelques propriétés de l'air humide.....	57
5.3 Les valeurs d'énergie d'Helmholtz [6] de l'air sec f^A , la vapeur d'eau f^V et Ses dérivées.....	58
5.4 Valeurs obtenues de l'énergie d'Helmholtz d'air sec f^A et de la vapeur d'eau f^V et ses dérivées.....	59
5.5 Les valeurs de f^{mix} et ses coefficients de la fonction d' Helmholtz [6].....	60
5.6 Valeurs obtenues pour f^{mix} et ses dérivées ainsi que ses coefficients.....	61
5.7 La fraction massique de l'air sec à la saturation $Asat$ à la pression atmosphérique.....	62
5.8 Propriétés principales de l'air saturé à la pression atmosphérique.....	63
5.9 Valeurs obtenus pour les propriétés thermodynamiques de l'air humide (pour $r=0.1$ et $r=0.2$ kge/kgas).....	68
5.10 Propriétés thermophysiques de l'air humide pour $r=0.1$ kge/kgas.....	70
5.11 Propriétés thermophysiques de l'air humide pour $r=0.01$ kge/kgas.....	71
5.12 Quelques Propriétés thermodynamiques de l'air humide obtenus à la pression atmosphérique ($P=101325$ Pa).....	72

Nomenclature

<i>Symbole</i>	<i>Quantité physique</i>	<i>Unité</i>
A	Fraction massique d'air sec en air humide	$[\text{kg kg}^{-1}]$
A^{sat}	Fraction massique d'air sec en air humide saturé	$[\text{kg kg}^{-1}]$
A^{cond}	La fraction massique d'air au point de condensation.	$[\text{kg kg}^{-1}]$
$a_0 \dots a_4$	Coefficients de la fonction $C^{AAW}(T)$	$[-]$
$b_0 \dots b_3$	Coefficients de la fonction $C^{AWW}(T)$	$[-]$
b^*	Facteur de réduction	$[\text{m}^3 \text{mol}^{-1}]$
B^{AW}	La fonction utilisée dans le troisième terme de l'équation d'état	$[\text{m}^3 \text{mol}^{-1}]$
$c_1 \dots c_3$	Coefficients de la fonction $B^{AW}(T)$	$[-]$
c^*	Facteur de réduction	$[\text{m}^6 \text{mol}^{-2}]$
C^{AAW}, C^{AWW}	Les fonctions utilisées dans le troisième terme de l'équation d'état	$[\text{m}^6 \text{mol}^{-2}]$
C_p	Capacité de chaleur isobare spécifique d'air humide	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$
C_v	Capacité de chaleur isochore spécifique d'air humide	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$
$d_1 \dots d_3$	Coefficients de la fonction $B^{AW}(T)$	$[-]$
f^A	Énergie spécifique d'Helmholtz d'air sec	$[\text{J kg}^{-1}]$
f^{AV}	Énergie spécifique d'Helmholtz d'air humide	$[\text{J kg}^{-1}]$
$f^{IAPWS-95}$	Fonction d'IAPWS-95 d'Helmholtz d'eau/vapeur	$[\text{J kg}^{-1}]$
f^{mix}	Énergie spécifique d'Helmholtz d'interaction d'air-vapeur	$[\text{J kg}^{-1}]$
f^V	Énergie spécifique d'Helmholtz de vapeur d'eau	$[\text{J kg}^{-1}]$
g	Énergie spécifique de Gibbs d'air humide	$[\text{J kg}^{-1}]$
g^{lh}	Énergie spécifique de Gibbs de glace lh	$[\text{J kg}^{-1}]$
g^{liq}	Énergie spécifique de Gibbs de l'eau liquide	$[\text{J kg}^{-1}]$
h	Enthalpie spécifique d'air humide	$[\text{J kg}^{-1}]$
h^A	Enthalpie spécifique d'air sec	$[\text{J kg}^{-1}]$
u	Energie interne de l'air humide	$[\text{J kg}^{-1}]$
$i_1 \dots i_{19}$	Coefficients de la partie résiduelle d'air sec	$[-]$
$j_1 \dots j_{19}$	Coefficients de la partie résiduelle d'air sec	$[-]$
$l_1 \dots l_{19}$	Coefficients de la partie résiduelle d'air sec	$[-]$

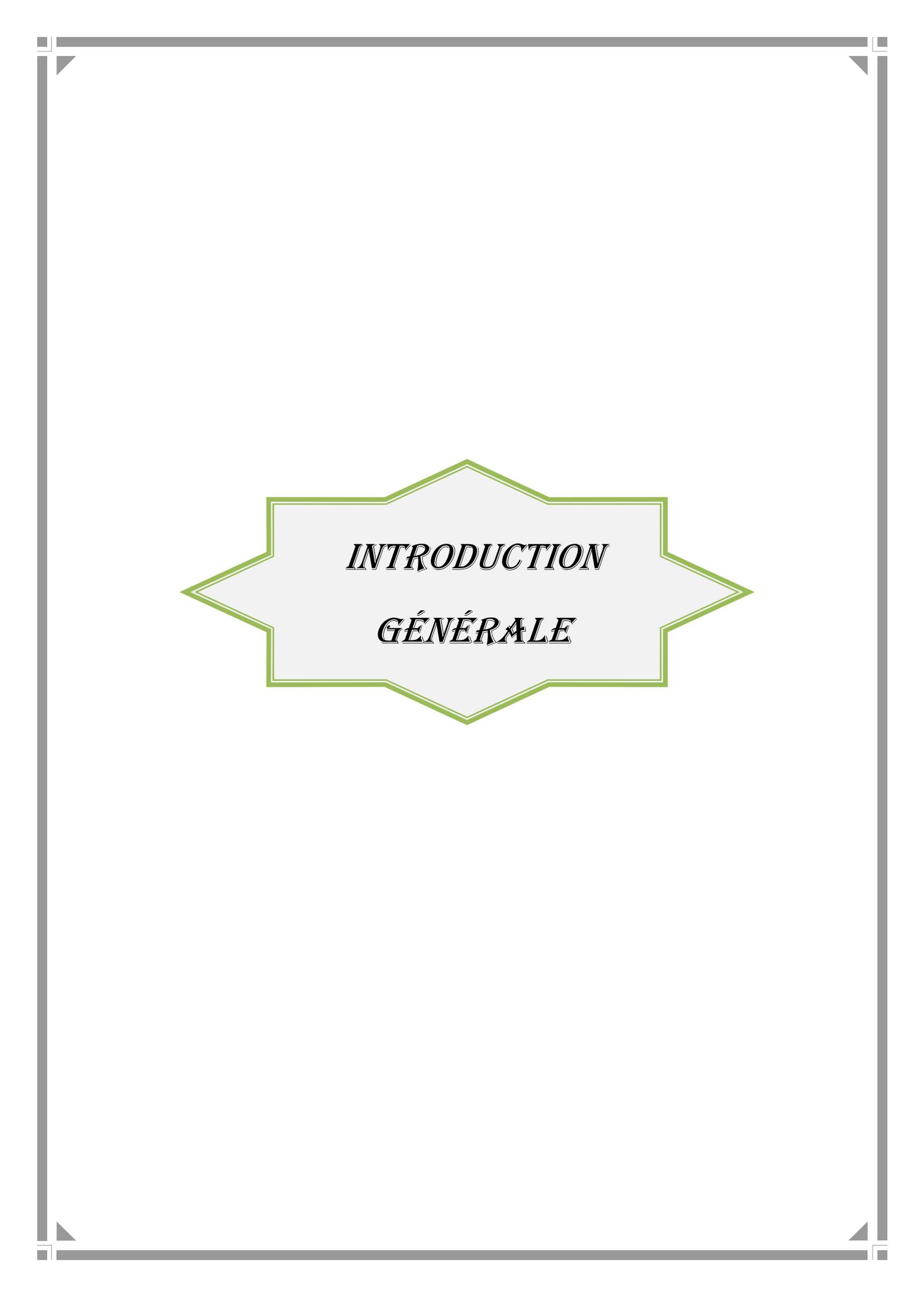
<i>Symbole</i>	<i>Quantité physique</i>	<i>Unité</i>
M_A	La masse molaire d'air sec.	[kg mol ⁻¹]
M_W	La masse molaire de l'eau pure	[kg mol ⁻¹]
$n_1 \dots n_{19}$	Coefficients de la partie résiduelle d'air sec	[-]
$n_1^0 \dots n_{13}^0$	Les coefficients de la partie du gaz-idéal d'air sec	[-]
P	Pression absolue	[Pa]
P_0	Pression normale	[Pa]
p^{sat}	Pression de saturation de l'eau liquide	[Pa]
p^{vap}	Pression partielle de la vapeur d'eau en air humide	[Pa]
$p^{vap sat}$	Pression partielle de la vapeur d'eau en air humide saturé	[Pa]
p^{subl}	Pression de sublimation.	[Pa]
R	Constante de gaz molaire	[J mol ⁻¹ K ⁻¹]
R^L	Constante de gaz molaire utilisé par Lemmon et al	[J mol ⁻¹ K ⁻¹]
HR	Humidité relative	[-]
S	Salinité absolue de l'eau de mer	[kg kg ⁻¹]
s	Entropie spécifique d'air humide	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
s^A	Entropie spécifique d'air sec	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
T	Température absolue	[K]
T_0	Point nul Celsius de la température	[K]
T_A^*	La température réduite	[K]
\bar{T}	La température réduite	[-]
w	Vitesse du son	[m s ⁻¹]
x_A	Fraction molaire d'air sec en air humide	[mol mol ⁻¹]
k_s	Compressibilité isentropique d'air humide	[Pa ⁻¹]
k_T	Compressibilité isotherme d'air humide	[Pa ⁻¹]
v	Le volume massique	[m ³ kg ⁻¹]

Lettres grecques

<i>Symbole</i>	<i>Quantité physique</i>	<i>Unité</i>
α	Coefficient de dilatation thermique d'air humide	[K]
α^{id}	Partie du gaz idéal de la fonction d'Helmholtz d'air sec	[-]
α^{res}	Partie résiduelle de la fonction d'Helmholtz d'air sec	[-]
β_s	Coefficient isentropique de température-pression d'air humide	[K Pa ⁻¹]
δ	Densité réduite	[-]
μ	Potentiel chimique relatif d'air humide	[J kg ⁻¹]
μ_w	Potentiel chimique de l'eau en air humide	[J kg ⁻¹]
μ_w^{SW}	Le potentiel chimique de l'eau de mer	[J kg ⁻¹]
ρ	La masse volumique de l'air humide	[kg m ⁻³]
ρ^A	Masse volumique d'air sec	[kg m ⁻³]
ρ_A^*	La densité réduite	[kg m ⁻³]
ρ^V	La masse volumique de la vapeur d'eau	[kg m ⁻³]
τ	La température réciproque réduite (air sec)	[-]
r	Humidité absolue	[kg kg ⁻¹]

Abréviations

IAPWS	International Association for the Properties of Water and Steam (Association internationale pour les propriétés de l'eau et de sa vapeur)
ITS	International Temperature scale (échelle internationale de la température)
éq	équation
res	résiduelle
id	idéal
liq	liquide
sat	saturation
vap	vapeur



INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction générale :

En ingénierie, la connaissance des propriétés thermophysiques du fluide de travail intervenant dans la machine où l'installation à concevoir est nécessaire. Pour celà, il est essentiel de disposer de sources fiables et de grande précision .

Dans cette présente étude, nous sommes attelés à développer un outil permet de calculer les propriétés thermodynamiques de l'air humide en contact de l'eau de mer et de la glace pour une large gamme d'opérations basées sur la formulation de 2010 de l'association internationale pour les propriétés de l'eau et de sa vapeur. Le code de calcul élaboré peut trouver des applications dans divers domaines à savoir :

- Systèmes techniques tels que le séchage et la réfrigération.*
- Installation de dessalement.*
- Applications géophysiques telles que l'océanographie et la météorologie.*
- Calcul les propriétés d'équilibre de phase entre l'air humide et l'eau liquide, la glace et l'eau de mer.*

Le plan de mémoire est scindé en cinq chapitres :

Le chapitre 1 est consacré aux définitions des caractéristiques de l'air humide.

Au chapitre 2, nous avons présenté les différentes techniques de conditionnement et l'utilisation des diagrammes de l'air humide.

Le chapitre 3 est consacré à la nouvelle formulation de 2010 de l'air humide, où y trouvent toutes les fonctions intervenant dans l'équation d'état de l'air humide.

Le chapitre 4 donne quelques informations concernant le code de calcul élaboré.

Au chapitre 5, les résultats obtenus par le code sont présentés et interprétés.

La conclusion et les développements possibles en perspective sont exposés après le chapitre 5.

Sur l'annexe sont données quelques propriétés de l'air humide.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉ SUR L'AIR HUMIDE

1.1. Définition :

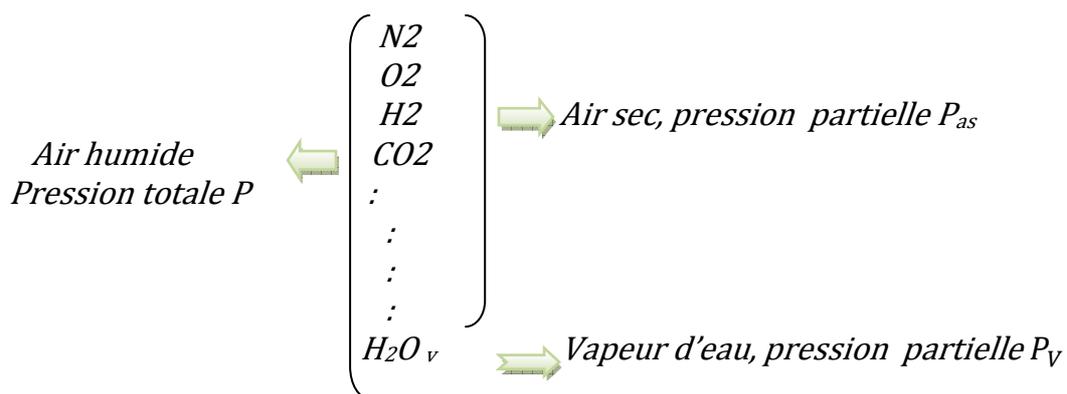
L'air qui nous entoure renferme toujours une proportion d'eau sous forme de vapeur. Pour cette raison, il est qualifié « d'air humide » par opposition au cas idéal, air sec, qui ne renfermerait pas de vapeur d'eau.

L'air humide renferme une quantité de vapeur d'eau variable, mais limitée. Lorsque cette quantité est maximale, on parle « d'air saturé ». La quantité maximale d'eau que peut renfermer un air « saturé » dépend des conditions de température et de pression dans lesquelles il se trouve.

$$\text{Air humide} = \text{Air sec} + \text{Vapeur d'eau}$$

- Composition volumique (molaire) de l'air humide :**

Les principaux constituants de l'air sont l'oxygène et l'azote, l'air n'en contient pas moins un certain nombre d'autres gaz, dont la vapeur d'eau :



1.2. Grandeurs caractéristiques de l'air humide :

1.2.1. La Pression totale de l'air humide P :

En première approche, la pression totale de l'air humide est la pression atmosphérique du lieu considéré. Elle est fonction de l'altitude et varie autour d'une valeur moyenne de $\pm 4 \%$ suivant les conditions météorologiques.

La pression atmosphérique moyenne est donnée par la formule [1] suivante :

$$P = 101\,325 - 12 \times z + 5.2 \times 10^{-4} \times z^2 \quad (1.1)$$

Z : altitude [m]

D'autre part, l'air humide est un mélange de deux gaz (d'air sec et de la vapeur d'eau) assimilés à des gaz parfaits à une température θ et occupant un même volume V . Alors d'après la loi de DALTON :

la pression du mélange est égale à la somme des pressions partielles des deux constituants [1].

On écrit :

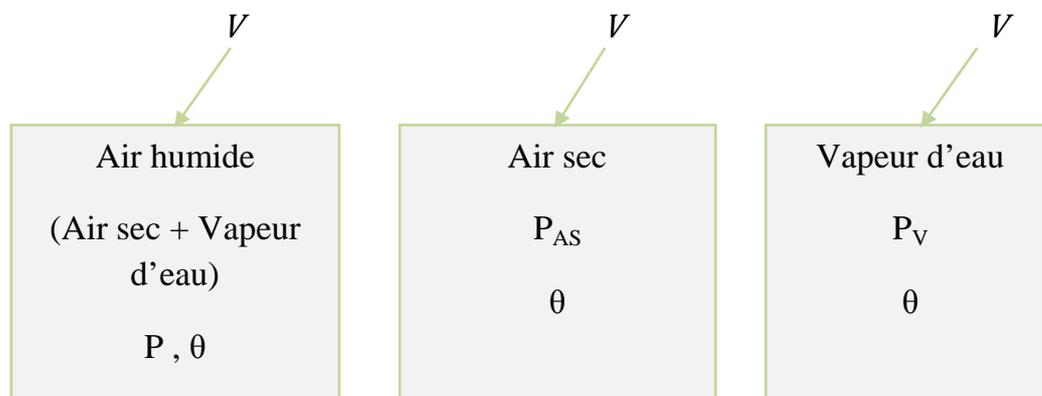
$$P = P_{AS} + P_V \quad (1.2)$$

Avec

P : La pression totale de l'air humide

P_V : La pression partielle de la vapeur d'eau

P_{AS} : La pression partielle de l'air sec



1.2.1.1. La pression partielle de vapeur d'eau et d'air sec :

La masse de vapeur d'eau dans l'air humide est directement liée à la pression partielle de la vapeur d'eau P_V . La pression partielle d'un composant d'un mélange assimilé à des gaz parfaits est la pression qu'aurait ce composant s'il occupait seul le volume total du mélange, à même température. Elle s'exprime en [Pa].

D'après l'équation d'état des gaz parfaits [1] ; on écrit :

$$P_V = \frac{m_V R_V T}{V} \quad (1.3)$$

$$P_{AS} = \frac{m_{AS} R_{AS} T}{V} \quad (1.4)$$

Avec

m_V : masse de vapeur d'eau dans l'air humide

m_{AS} : masse de l'air sec

$$R_V = \frac{R}{M_V} \quad \text{et} \quad R_{AS} = \frac{R}{M_{AS}}$$

R_V et R_{AS} : les constantes massiques de la vapeur d'eau et de l'air sec
respectivement [J / kg K]

R : la constante universelle des gaz parfaits [J / mole .K]

M_V et M_{AS} : les masses molaires de la vapeur d'eau et de l'air sec
respectivement [kg / mole]

On déduit donc ; la pression totale d'air humide :

$$P = \frac{(m_{AS} R_{AS} + m_V R_V) T}{V} \quad (1.5)$$

1.2.1.2. La pression partielle de vapeur saturée:

C'est la pression de vapeur maximale que l'air peut supporter à une température donnée. Si on désire augmenter la pression par augmentation de la quantité de vapeur, cette vapeur passe à l'état de saturation la pression de vapeur saturée est notée P_{vs} , elle s'exprime en [Pa]

1.2.2. La température sèche :

Elle est définie comme étant la température réelle de l'air humide T ou θ , observée à l'aide d'un capteur de température ou par un thermomètre non affecté par l'humidité d'air. On la mesure avec le thermomètre peut-être à mercure ou à alcool. Ces derniers, pour la mesure, utilisent le principe de dilatation sous l'effet de la température.

1.2.3. La température humide :

C'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'un gaz mouillé, balayé par de l'air en mouvement et protégée du rayonnement. À la surface du thermomètre à bulbe humide, l'eau se vaporise. La température humide dépend de la température sèche de l'air et de l'humidité comprise dans cet air. L'ensemble thermomètre sec plus thermomètre humide [2] est appelé Psychromètre (figure 1.1), noté θ_h en [°C] ou T_h en [K]

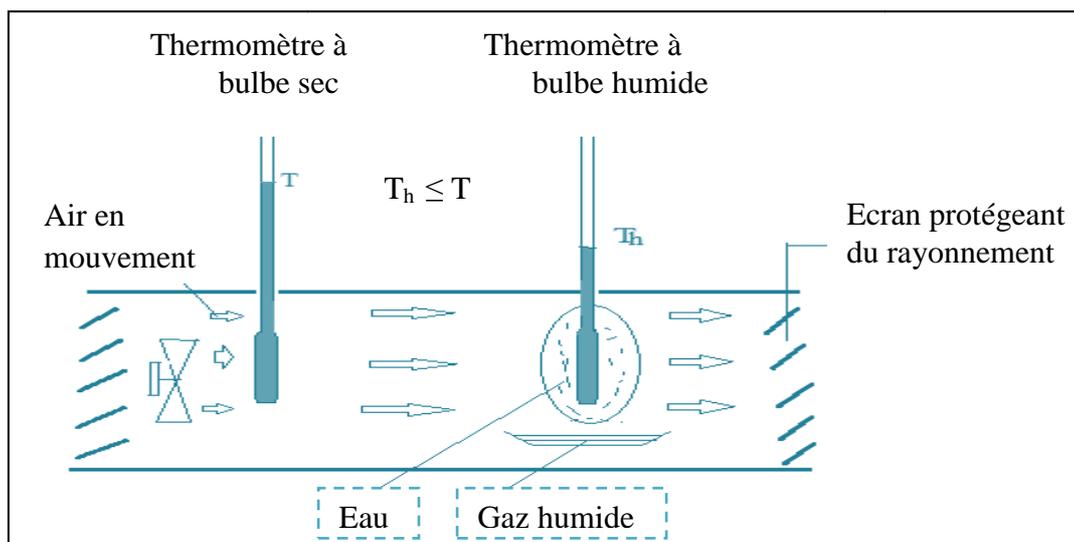


Figure.1.1. Psychromètre de mesure des températures

La différence ($T - T_h$) est représentative de l'humidité relative HR de l'air car :

- Elle est nulle si l'air est saturé en vapeur d'eau soit si $HR = 100\%$: pas

d'évaporation possible.

- Elle augmente avec la différence $[P_{VS}(T) - P_V(T)]$ qui est le terme moteur du transfert de masse donc elle diminue quand l'humidité relative augmente.

1.2.4. La température de rosée :

On définit la température de rosée "Tr", la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans un air humide que l'on refroidit à pression

constante commence à se condenser au contact d'une surface froide (apparition de gouttelettes d'eau). Exemple: condensation à la surface d'une vitre. Si la

température de surface de la vitre est inférieure à la température de rosée de l'air

humide T_r . Alors il y a condensation de la vapeur d'eau, présente dans l'air

humide sur la vitre.

Au cours d'un refroidissement, l'humidité spécifique et la pression partielle de la vapeur d'eau restent constantes.

La température de rosée peut être calculée par les relations suivantes :

- *Si la température sèche > 0 :*

$$T_r = \frac{13.761 \log\left(\frac{P_{VS}}{613.34}\right)}{1 - \left(0.0569 \log\left(\frac{P_{VS}}{613.34}\right)\right)} \quad (1.6)$$

- *Si la température sèche ≤ 0 :*

$$T_r = \frac{12.139 \log\left(\frac{P_{VS}}{613.34}\right)}{1 - \left(0.0445 \log\left(\frac{P_{VS}}{613.34}\right)\right)} \quad (1.7)$$

1.2.5. Teneur en eau r :

C'est la quantité d'eau que contient un kg d'air sec. Il s'agit du rapport de la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la masse d'air sec. Ce rapport est aussi appelé humidité spécifique de l'air humide, désigne parfois par x et exprime en kg de vapeur par kg d'air sec [1].

$$r = \frac{m_V}{m_{AS}} = \frac{R_{AS}}{R_V} \frac{P_V}{P - P_V} \quad (1.8)$$

Avec m_V, m_{AS} : la masse de vapeur d'eau et d'air sec dans l'air humide respectivement.

P, P_V : la pression de l'air humide et de la vapeur d'eau respectivement.

- *Cas particulier à la saturation : $P_V = P_{VS}$*

$$r_{SAT} = \frac{R_{AS}}{R_V} \frac{P_{VS}}{P - P_{VS}} \quad (1.9)$$

1.2.6. Le degré hygrométrique HR ou φ :

Le degré hygrométrique représente la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air humide par comparaison à la quantité maximale qu'il pourrait contenir à la même température. Pour cette raison, il également appelé humidité relative.

$$\varphi = \frac{P_V}{P_{VS}} = \frac{r}{r_{SAT}} \quad (1.10)$$

Avec

r : Teneur en humidité

r_{SAT} : Teneur en humidité à la saturation.

D'autre part, Le degré hygrométrique s'exprime comme étant le rapport, entre la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air humide et la pression de vapeur saturante correspondant à la température de cet air humide.

Lorsque la pression partielle de vapeur P_V atteint la pression partielle de vapeur saturée P_{VS} , le degré hygrométrique vaut 100 % et l'air humide est saturé, c'est-à-dire que la vapeur d'eau est en présence d'eau liquide ou solide.

Si la pression partielle de vapeur d'eau P_V dépasse la pression partielle de vapeur saturée P_{VS} , l'air est sursaturé et contient en suspension de l'eau liquide ou solide sous forme de brouillard, de pluie ou de neige.

1.2.7. L'enthalpie spécifique de l'air humide :

L'enthalpie spécifique, notée h , représente la quantité de chaleur (sensible + latente) contenue dans un air humide dont la masse d'air sec est de 1 kg.

1.2.8. Enthalpie spécifique de l'air sec h_{AS} :

Elle représente la quantité de chaleur qu'il faudrait fournir à 1 kg d'air sec pour élever sa température de 0 à θ .

$$H_{AS} = m_{AS} C_{p_{AS}} \theta$$

D'où : $h_{AS} = C_{p_{AS}} \theta$ (1.11)

$C_{p_{AS}}$: Capacité thermique massique de l'air sec.

1.2.9. Enthalpie spécifique de la vapeur d'eau h_V :

Elle représente la chaleur totale qu'il faut fournir à 1 kg d'eau pris à 0°C pour le porter à l'état de vapeur à la température θ .

$$H_V = m_V C_{p_V} \theta + m_V L_V$$

D'où : $h_V = C_{p_V} \theta + L_V$ (1.12)

C_{p_V} : Capacité thermique massique de la vapeur d'eau [J/kg °C].

L_V : Chaleur latente de vaporisation de l'eau [J/kg_v].

1.2.10. Enthalpie de l'air humide :

Un mélange d'air humide contenant m_{AS} [kg] d'air sec et m_V [kg] de vapeur d'eau présente une enthalpie totale :

$$H = H_{AS} + H_V$$

$$H = m_{AS} C_{p_{AS}} \theta + m_V (C_{p_V} \theta + L_V) \quad (1.13)$$

On déduit donc, l'enthalpie spécifique de l'air humide :

$$h = \frac{H}{m_{AS}} = C_{p_{AS}} \theta + r (C_{p_V} \theta + L_V) \quad (1.14)$$

Avec

h_{AS} et h_V : les enthalpies spécifiques de l'air sec et de la vapeur d'eau respectivement.

1.2.11. Le volume spécifique de l'air humide :

C'est le volume occupé par le poids d'un kilogramme d'air sec dans un ensemble de conditions spécifiques.

$$v = \frac{V}{m_{AS}} = \frac{1}{\rho} \quad (1.15)$$

Avec

ρ : La masse volumique de l'air humide

1.3. Relations entre les grandeurs caractéristiques de l'air humide :**1.3.1. Relation entre la teneur en humidité et l'humidité relative :**

D'après les équations (1.8) et (1.10) on abouti à la relation suivante :

$$r = \frac{R_{AS}}{R_V} \frac{\varphi P_{VS}}{(P - \varphi P_{VS})} \quad (1.16)$$

1.3.2. Relation entre la masse volumique ρ , la pression totale P , la température

T et la pression de vapeur saturante P_{VS} :

On a :

$$\rho = \rho_{AS} + \rho_V = \frac{m_{AS} + m_V}{V}$$

A partir des équations (1.3), (1.4) et (1.16) on obtient :

$$\rho = \frac{P}{R_{AS}T} - \frac{R_V - R_{AS}}{R_V R_{AS}} \frac{\varphi P_{VS}}{T} \quad (1.17)$$

Avec :

$$R_V = R/M_V \quad \text{et} \quad R_{AS} = R/M_{AS}$$

<i>Symbole</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unité</i>
M_V	0.018 015 268	Kg mol^{-1}
M_{AS}	0.028 965 46	Kg mol^{-1}
R	8.314 472	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$

CHAPITRE II

*CONDITIONNEMENT D'AIR ET LES DIFFÉRENTS
DIAGRAMMES UTILISÉS*

Avant de passer aux techniques de conditionnement d'air, il est bon de rappeler en premier lieu, les différents types de diagrammes ainsi que leurs modes d'utilisation.

2.1. Diagramme de l'air humide :

On utilise le diagramme de l'air humide, également appelé diagramme psychrométrique, pour calculer les évolutions d'un air humide plutôt que d'utiliser des calculs algébriques.

En effet, les formules permettant de calculer r, h, φ, v, T, T_r et T_h ne sont pas d'une utilisation simple et rapide.

Les diagrammes de l'air humide sont généralement établis pour une pression atmosphérique normale de $P = 101325 [Pa]$ et pour des températures allant de -15 à $55^\circ C$.

On distingue deux types de diagrammes :

- *Diagramme de Carrier : est le plus utilisé. Il se présente à partir de deux axes perpendiculaires, la température sèche en abscisse et la teneur en eau en ordonnée.*
- *Diagramme de Mollier : se présente à partir de deux axes obliques l'enthalpie spécifique en abscisse et la teneur en eau en ordonnée.*

2.2. Présentation des grandeurs caractéristiques de l'air humide sur le diagramme:

Chaque point du diagramme représente un état de l'air humide considéré, défini par deux grandeurs physiques. Dans ce qui suit, nous donnons les présentations possibles des 7 grandeurs caractéristiques suivantes:

<i>GRANDEUR</i>	<i>SYMBOLE</i>	<i>Unité</i>
<i>Température sèche</i>	θ	$[^{\circ}\text{C}]$
<i>Température humide</i>	θ_h	$[^{\circ}\text{C}]$
<i>Température de rosée</i>	θ_r	$[^{\circ}\text{C}]$
<i>Enthalpie spécifique</i>	h	$[\text{kJ}/\text{kg}]$
<i>Humidité absolue</i>	r	$[\text{Kgv}/\text{kgas}]$
<i>Le volume spécifique</i>	v	$[\text{m}^3/\text{kgas}]$
<i>Humidité relative</i>	HR	$[\%]$

2.2.1. Température de bulbe sec :

L'axe horizontal représente une grandeur fondamentale du diagramme psychrométrique que l'on appelle plus couramment: température sèche θ en $^{\circ}\text{C}$. Les lignes verticales, appelées isothermes sont des lignes où la température sèche est constante. (fig.2.1)

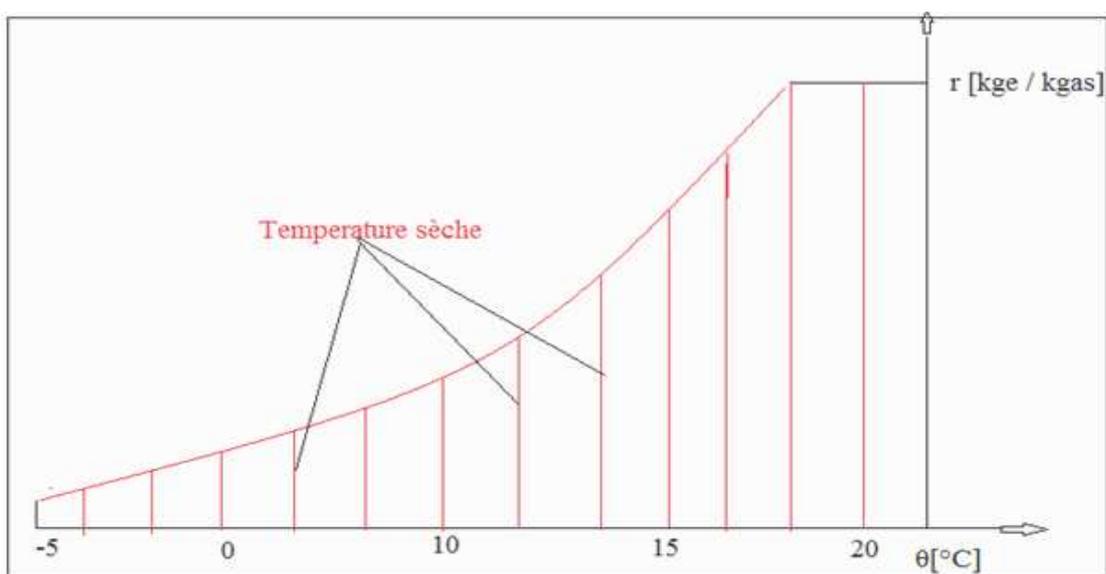


Fig. 2.1. Présentation de la température sèche sur le diagramme.

2.2.2. Humidité absolue :

L'axe vertical de droite représente cette autre grandeur fondamentale qui indique la teneur en vapeur d'eau de l'air considéré. L'humidité absolue r s'exprime en kg d'eau par kg d'air sec (figure 2.2). Les lignes horizontales sont des lignes à teneur en vapeur d'eau constante.

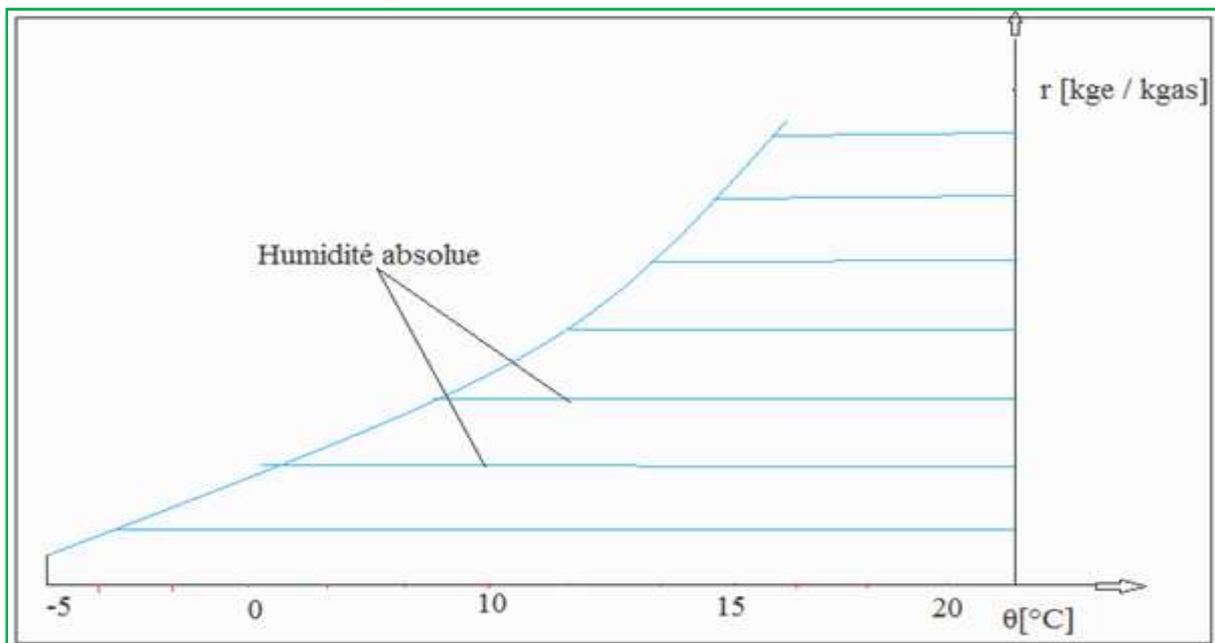


Fig. 2.2. Présentation de l'humidité absolue sur le diagramme.

2.2.3. Pression partielle de la vapeur d'eau :

L'axe vertical de gauche représente la pression partielle P_v de la vapeur d'eau contenue dans l'air considéré. Elle s'exprime en kPa ou en mbar. La concentration en vapeur d'eau peut augmenter (en suivant une isotherme) jusqu'à ce que l'air atteigne l'état de saturation ; cet état est représenté par la courbe incurvée la plus à gauche qui permet de déterminer la pression de saturation P_{vS} lue sur l'axe des pressions (figure 2.3).

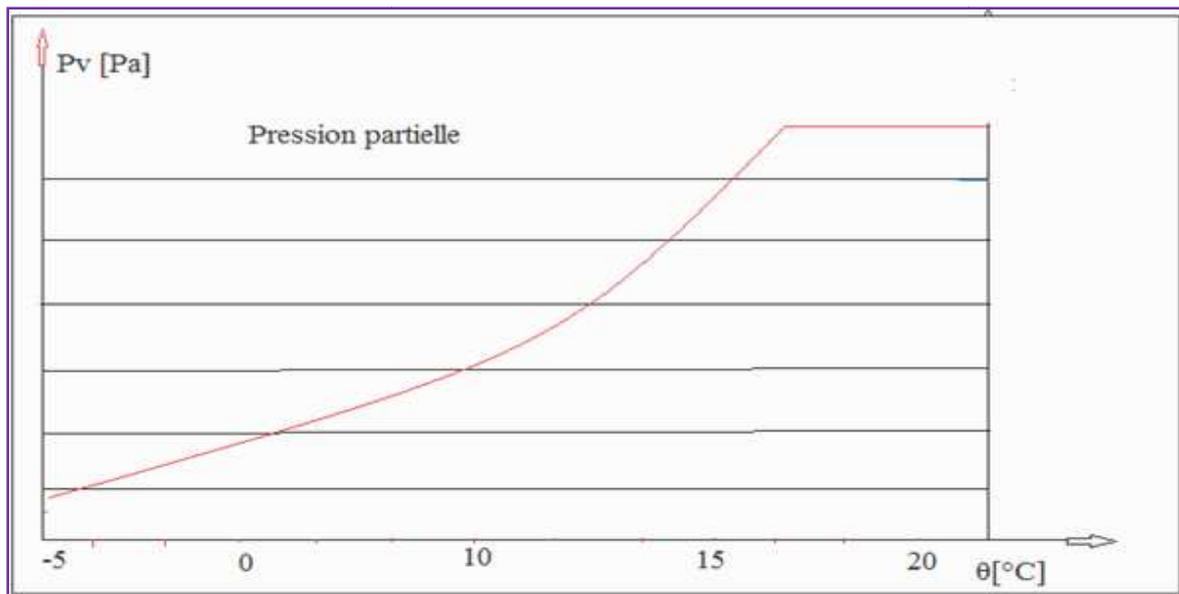


Fig. 2.3. Présentation de la pression partielle P_v sur le diagramme.

2.2.4. Température de rosée T_r :

Si on se déplace à partir d'un point A du diagramme, sur une teneur en eau constante de droite à gauche on atteint la courbe de saturation en un point appelé *point de rosée*, dont la température lue sur l'axe horizontal est *la température de rosée* de point A est θ_r (figure 2.4)

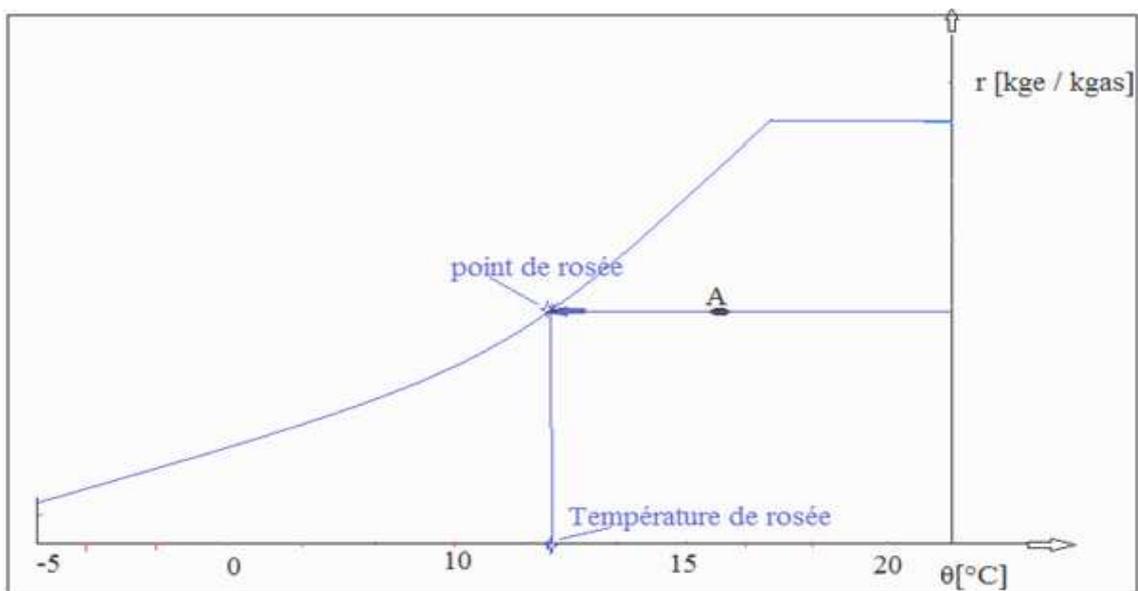


Fig. 2.4. Présentation de la température de rosée sur le diagramme.

2.2.5. Humidité relative :

L'air situé sur la ligne de saturation, citée plus haut, est saturé de vapeur d'eau. On dit que son humidité relative **HR** est de 100%. C'est une ligne à l'humidité relative constante. Si l'on divise la teneur en vapeur d'eau par deux, l'air se trouve sur une ligne saturée de moitié, c'est-à-dire à **HR = 50 %**. On peut tracer ainsi un réseau de courbes à différentes valeurs d'humidité relative constante (figure 2.5).

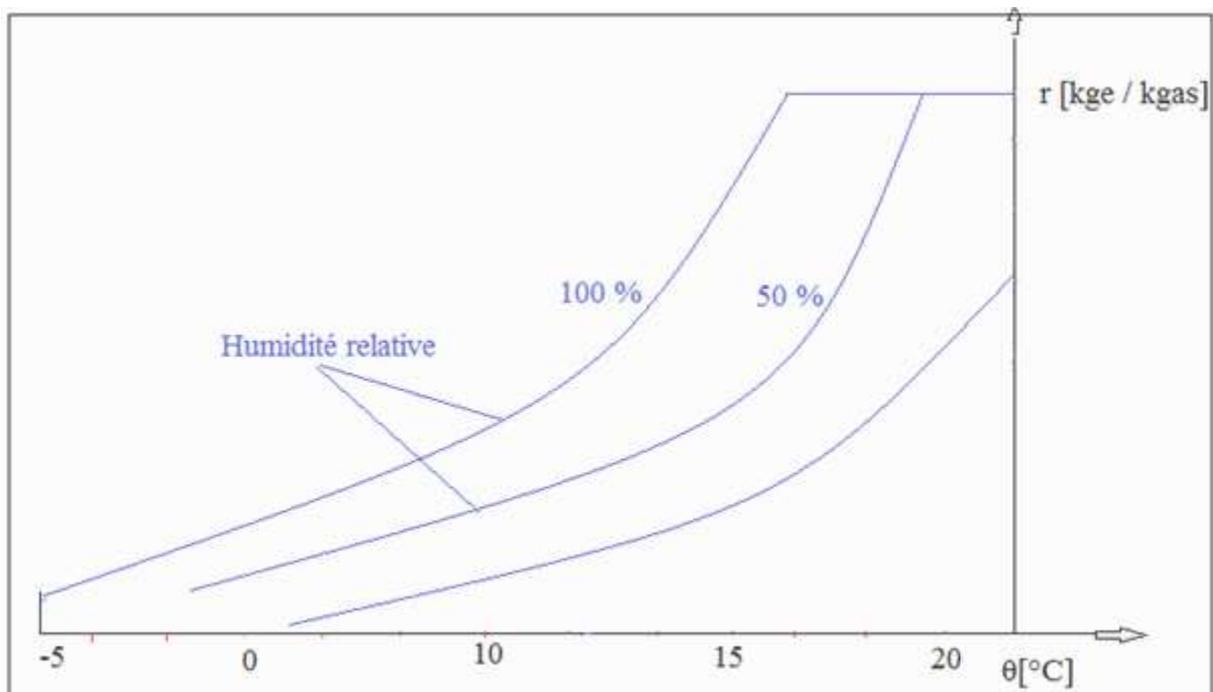


Fig. 2.5. Présentation de l'humidité relative sur le diagramme.

2.2.6. Enthalpie spécifique :

L'enthalpie h est la quantité de chaleur totale de l'air humide considéré. Elle s'exprime en kJ/kg (ou en kcal/kg , autrefois). On considère que, l'air dont sa température $\theta = 0^\circ\text{C}$ et sa teneur en vapeur d'eau $r = 0 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air sec}}$, a une enthalpie $h = 0 \text{ kJ/kg}$. Le réseau de droites obliques perpendiculaires à l'échelle des enthalpies constitue des lignes à enthalpie constante, appelées isenthalpes (figure 2.6).

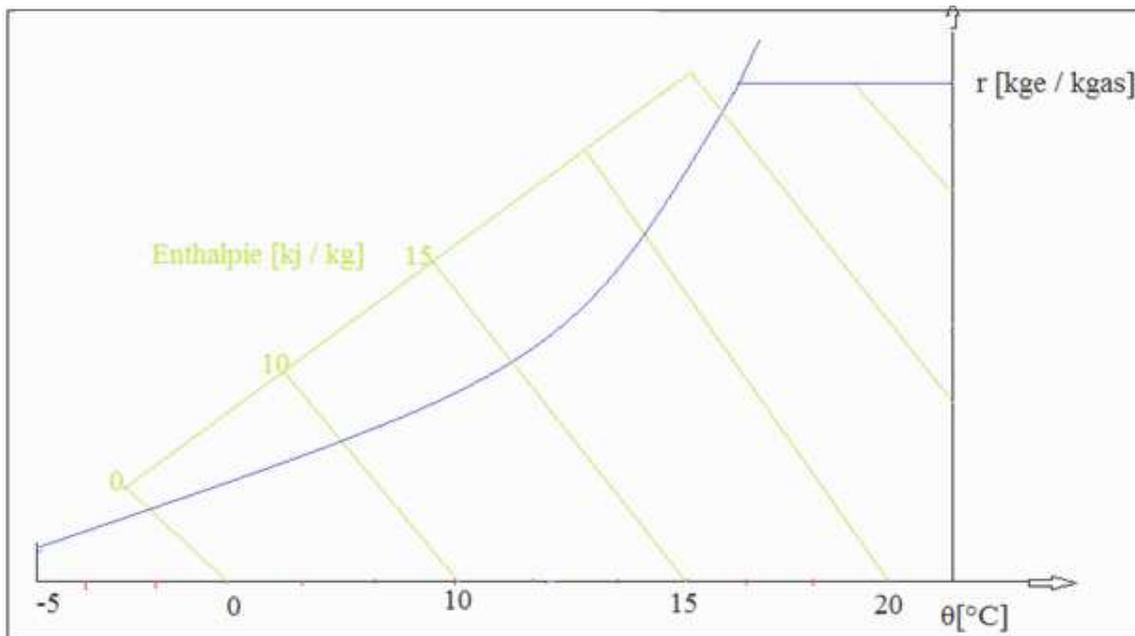


Fig. 2.6. Présentation de l'enthalpie spécifique sur le diagramme.

2.2.7. Température de bulbe humide :

Si à partir du point A du diagramme, on se déplace le long d'une isenthalpe pour atteindre la courbe de saturation en un point, alors la température lue en ce point sur l'axe horizontal est appelée température humide T_h du point initial considéré (figure 2.7).

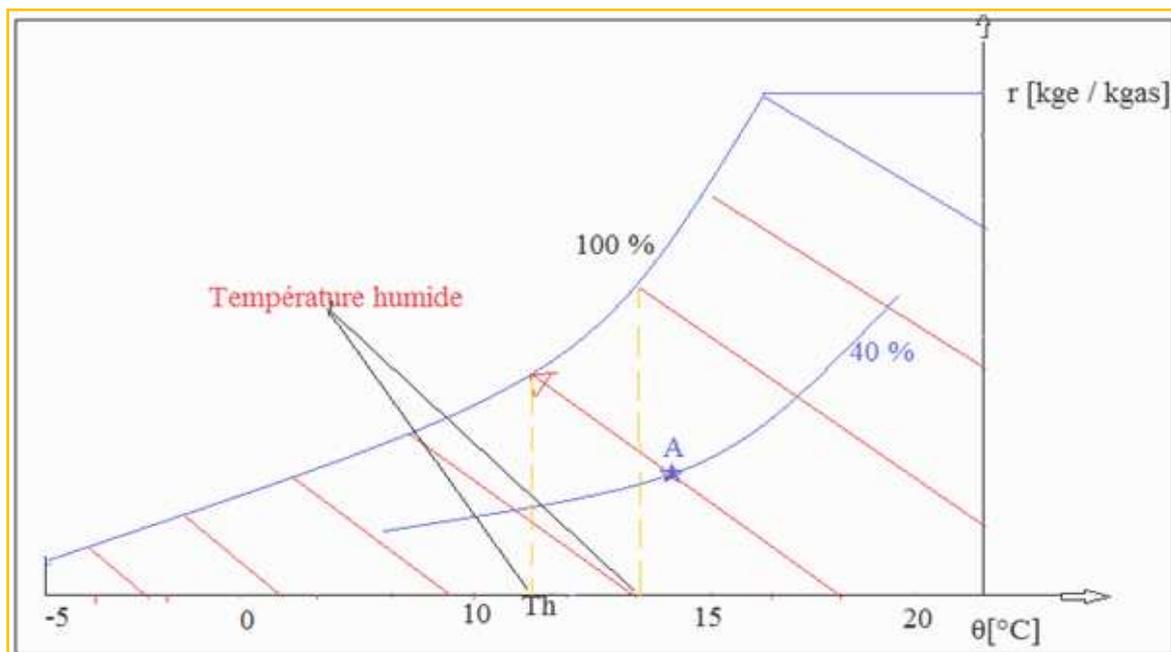


Fig. 2.7. Présentation de la température humide sur le diagramme.

2.2.8. Le volume massique :

Les lignes inclinées vers la gauche sont des droites à volume massique constant. Il s'exprime en m^3 / kg . (figure 2.8)

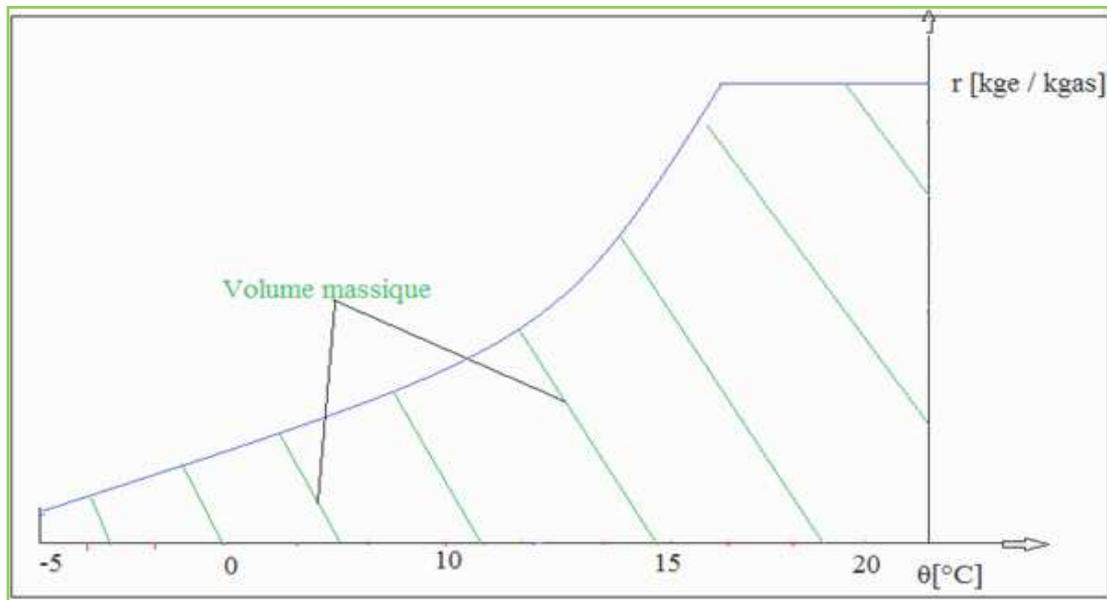


Fig. 2.8. Présentation de volume massique sur le diagramme.

○ Pour déterminer exactement l'état dans lequel se trouve un air humide considéré pris à une pression barométrique donnée, il suffit d'en connaître deux grandeurs physiques seulement (figure 2.9). Les autres peuvent être déterminées à l'aide du diagramme psychrométrique.

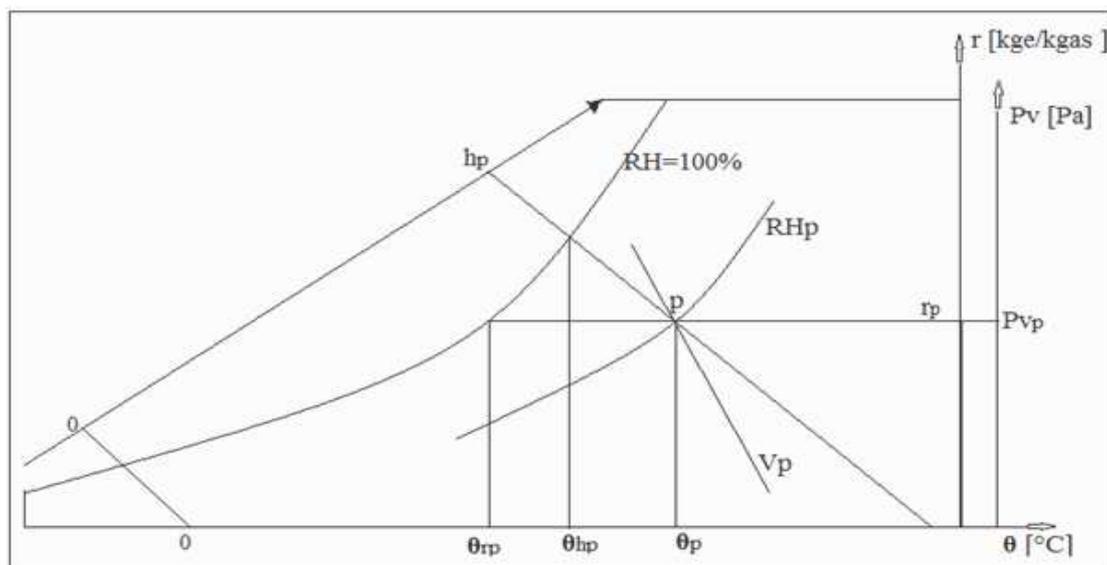


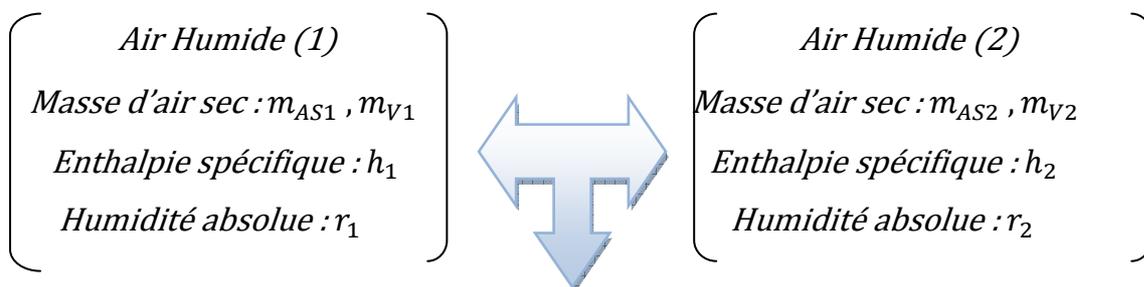
Fig. 2.9. Détermination des grandeurs caractéristiques d'un point sur le diagramme.

2.3. Conditionnement de l'air humide :

Le Conditionnement d'air est un moyen qui contribue à assurer le bon fonctionnement et l'amélioration des performances des systèmes techniques tels que la réfrigération, le séchage, etc. ... Il permet aussi de déterminer les paramètres de confort des personnes. Pour cela la connaissance des traitements, que nous rappelons ci après, est indispensable [2].

2.3.1. Mélange de deux airs :

a. Principe : Soient deux airs humides ayant les caractéristiques suivantes:



$$\left[\begin{array}{l} \text{Mélange (1) + (2)} \\ \text{Masse d'air sec mélange : } m_{AS} \\ \text{Enthalpie spécifique du mélange : } h \\ \text{Humidité absolue du mélange : } r \end{array} \right]$$

b. bilans

D'après les bilans de masse et d'énergie, on peut écrire:

$$m_{as} = m_{as1} + m_{as2} \quad \text{Ou bien} \quad qm_{as} = qm_{as1} + qm_{as2}$$

L'enthalpie totale du mélange est la somme des enthalpies totales apportées par chaque air:

$$H = H_1 + H_2$$

En effet: la quantité de chaleur (ou énergie en joule) du mélange est égale à la somme des énergies de chaque air.

$$\text{On a donc:} \quad (m_{as1} + m_{as2}) h = m_{as1} h_1 + m_{as2} h_2$$

D'où l'enthalpie spécifique du mélange :

$$h = \frac{(m_{as1} h_1 + m_{as2} h_2)}{(m_{as1} + m_{as2})} \quad (2.1)$$

- *Bilan en humidité.*

La masse d'humidité du mélange est la somme des masses d'humidité apportées par chaque air : $m_v = m_{v1} + m_{v2}$

Ainsi, l'humidité absolue du mélange est donnée par la relation suivante :

$$r = \frac{(m_{as1} r_1 + m_{as2} r_2)}{(m_{as1} + m_{as2})} \quad (2.2)$$

c. Détermination graphique des caractéristiques du mélange :

soit c est le centre de gravité des points A et B affectés respectivement des masses m_{as1} et m_{as2} .

On a alors la relation:

$$m_{as1} \times CA = m_{as2} \times CB \quad \text{ou encore:} \quad CA/m_{as2} = CB/m_{as1}$$

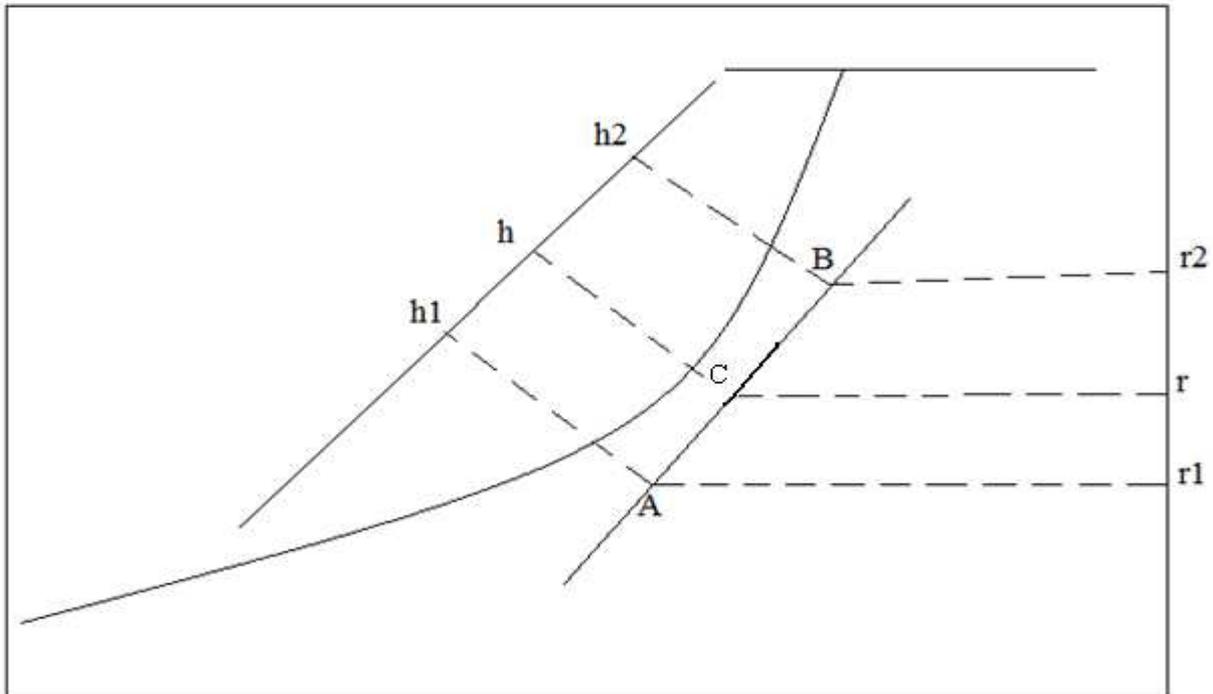


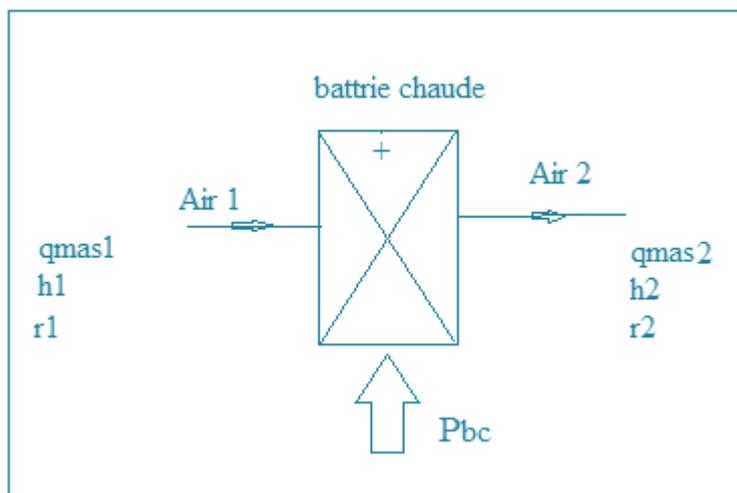
Fig. 2.10. Lecture des grandeurs caractéristiques d'un mélange.

2.3.2. Chauffage de l'air :

a. Principe :

Le chauffage de l'air est un des traitements fondamentaux en Climatisation. Il consiste uniquement à apporter une puissance P à l'air. Ce qui augmente son enthalpie sans modifier son humidité absolue (rapport de mélange ou teneur en humidité) [2].

La fonction chauffage est assurée par un échangeur thermique appelé batterie de chauffage. L'énergie thermique est fournie par un fluide primaire (eau chaude, vapeur, fluide frigorigène...) ou bien par l'électricité (effet Joule).



b. Bilans :

D'après le bilan de la masse, on peut écrire:

$$m_{as1} = m_{as2} = m_{as} \quad \text{ou} \quad qm_{as1} = qm_{as2} = qm_{as}$$

□ *Bilan en humidité*

La batterie chaude n'apporte ni n'extrait d'humidité.

En conséquence : $m_{v1} = m_{v2} = m_v$ ou $qm_{v1} = qm_{v2} = qm_v$

$$r = r_1 = r_2 \quad (2.3)$$

□ *Bilan enthalpique : La batterie chaude reçoit la puissance P_{BC} et elle occasionne des pertes thermiques.*

En régime établi, la somme, des puissances entrantes sont égales à la somme des puissances sortantes de la batterie chaude.

$$P_{air1} + P_{BC} = P_{air2} \quad \text{alors} \quad qm_{as} h_1 + P_{BC} = qm_{as} h_2$$

D'où :

$$h_2 = h_1 + \frac{P_{BC}}{qm_{as}} \quad (2.4)$$

P_{BC} : La puissance de la batterie chaude.

c. Présentation sur le diagramme de l'air humide :

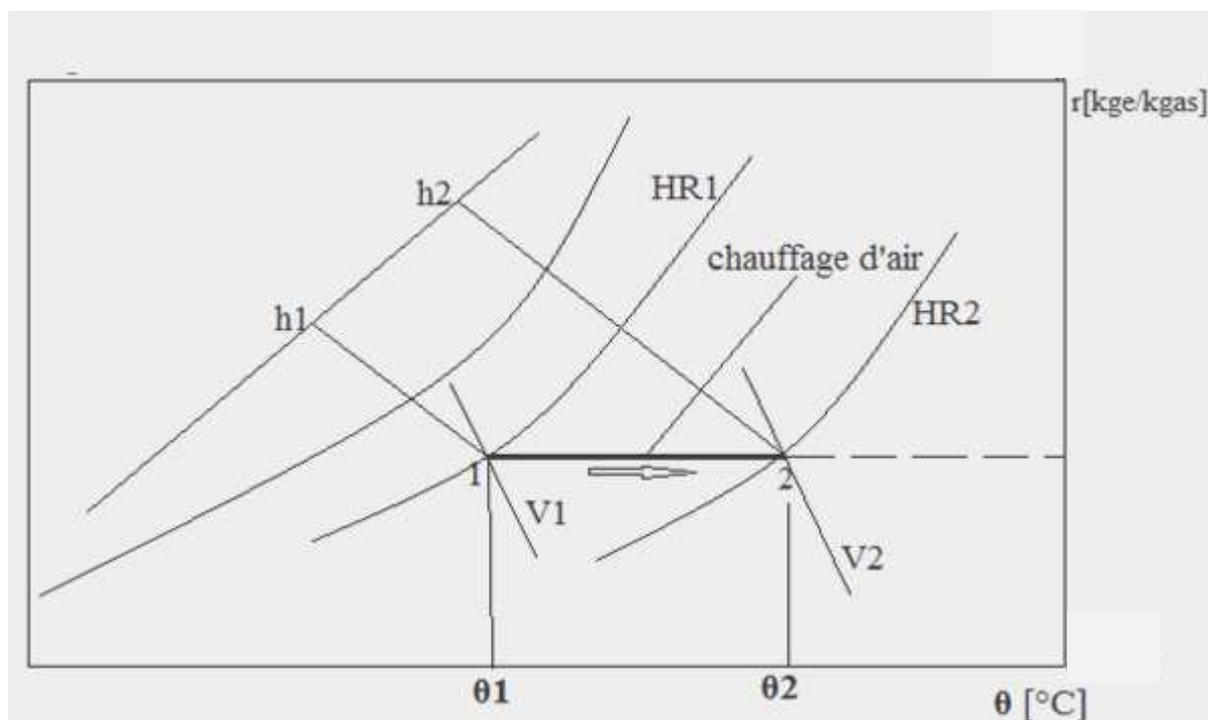


Fig.2.11. Evolution d'air dans une batterie chaude.

On constate sur la figure 2.11. Que l'augmentation de l'enthalpie ($h_2 > h_1$) et la conservation de la teneur en eau ($r_1 = r_2$) ont pour conséquence :

- *une augmentation de la température $\theta_2 > \theta_1$*
- *une diminution du degré hygrométrique $HR_2 < HR_1$*
- *une augmentation de volume spécifique $v_2 > v_1$*

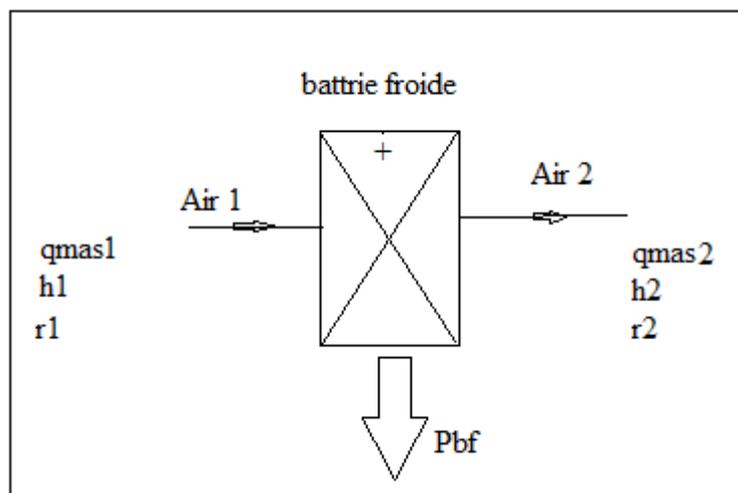
2.3.3. Refroidissement de l'air :

a. Principe :

On entend par refroidissement une diminution d'enthalpie de l'air sans variation de la teneur en humidité. La fonction refroidissement est assurée par un échangeur thermique appelé "batterie froide" [2].

b. Bilans :

D'après les bilans massique, en humidité et enthalpique, on a :



D'où:

$$r = r_1 = r_2 \quad (2.5)$$

$$h_2 = h_1 - \frac{P_{BF}}{qm_{as}} \quad (2.6)$$

P_{BF} : Puissance de la batterie froide

qm_{as} : Débit de la masse d'air sec

c. Évolutions sur le diagramme de l'air humide :

Le refroidissement se représente sur le diagramme de l'air humide par un vecteur horizontal orienté de la droite vers la gauche.

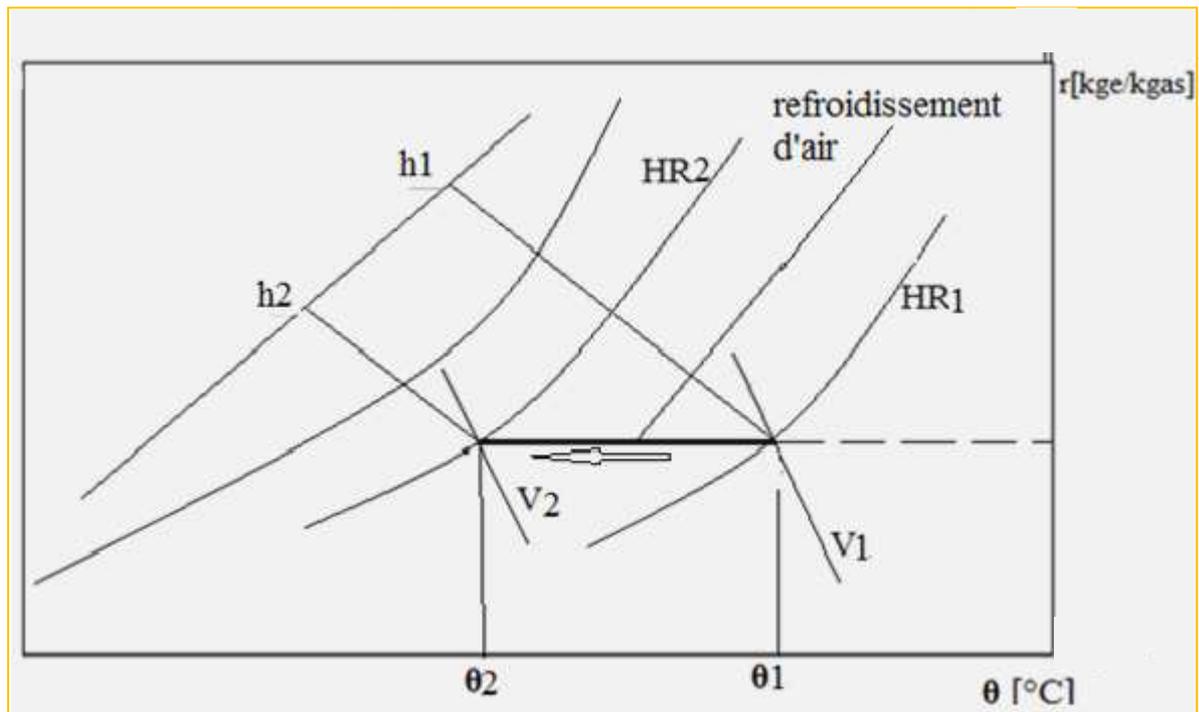


Fig. 2.12. Evolution d'air dans une batterie froide.

On constate sur la figure 2.12 que : La diminution de l'enthalpie $h_2 < h_1$ et la conservation de la teneur en eau $r_1 = r_2$ ont pour conséquences :

- une diminution de la température $\theta_2 < \theta_1$
- une augmentation du degré hygrométrique $HR_2 > HR_1$
- une diminution de volume spécifique $v_1 > v_2$

2.3.4. Humidification de l'air :

L'humidification de l'air consiste à augmenter la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air ou plus précisément, à élever sa teneur en humidité.

Deux procédés sont utilisés :

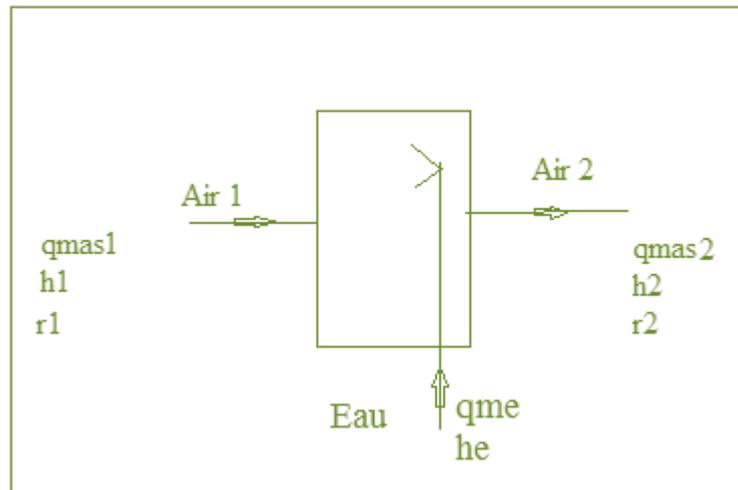
- Humidification par pulvérisation d'eau.
- Humidification par injection de vapeur.

2.3.4.1. Humidification par pulvérisation d'eau :

a. principe :

L'eau est pulvérisée sous forme de fines gouttelettes qui se vaporisent. La vapeur ainsi produite se mélange ensuite à l'air que l'on souhaite humidifier.

La chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau est prise à l'air sous forme de chaleur sensible entraînant une diminution de sa température.



b. bilans :

D'après le bilan en humidité

$$r_2 = r_1 + \frac{m_e}{m_{as}} \quad (2.7)$$

qm_e : Le débit d'eau emporté par l'air

L'air reçoit seulement la quantité de chaleur apportée par le débit d'eau qm_e

Alors on peut écrire d'après le bilan enthalpique :

$$h_2 = h_1 + \frac{m_e}{m_{as}} h_e \quad (2.8)$$

h_e : Enthalpie massique de l'eau emportée.

c. Évolutions sur le diagramme de l'air humide :

L'évolution de l'air dans un humidificateur suit l'isenthalpe de l'air à l'entrée dans le cas d'un échange complet, l'air à la sortie est saturé. Ce point désigne la fin du processus théorique.

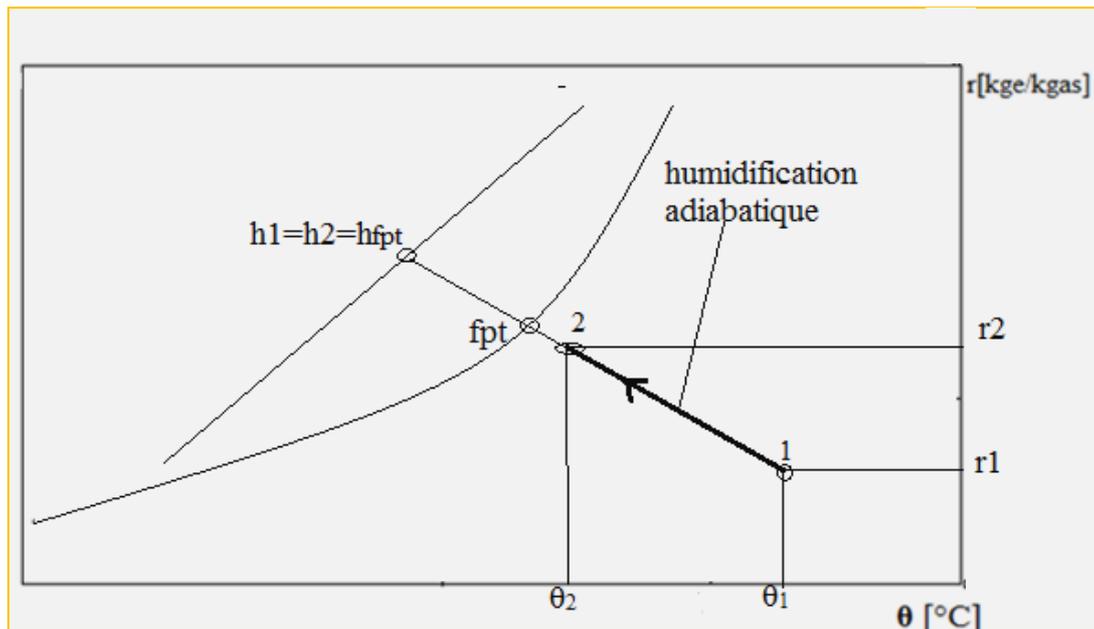


Fig. 2.13. Evolution d'air dans un humidificateur.

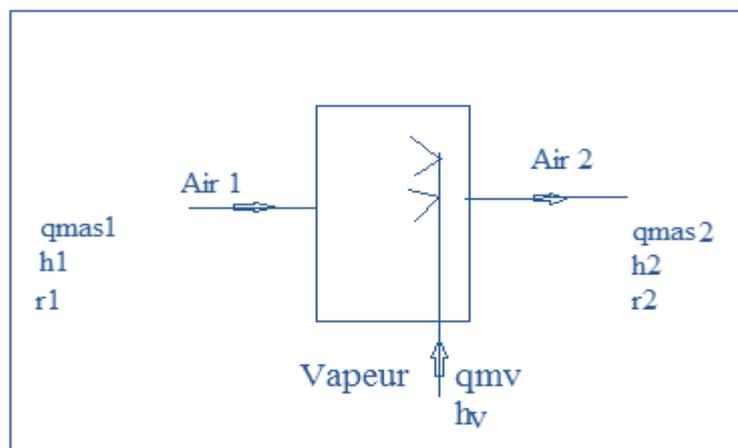
On définit l'efficacité de l'humidificateur comme étant le rapport du débit d'air saturé sur le débit d'air total :

$$E = \frac{r_2 - r_1}{r_{FPT} - r_1} \quad (2.9)$$

2.3.4.2. Humidification par injection de vapeur :

a. principe :

L'humidification à l'aide de vapeur d'eau est un mélange de deux fluides à l'état gazeux [2].



b. bilans :

D'après le bilan d'humidité :

$$r_2 = r_1 + \frac{qm_v}{qm_{as}} \quad (2.10)$$

qm_v : Le débit de vapeur emporté par l'air.

L'air reçoit seulement la quantité de chaleur apportée par le débit de vapeur qm_v .

Le bilan le bilan enthalpique s'écrit alors :

$$h_2 = h_1 + \frac{qm_v}{qm_{as}} h_v \quad (2.11)$$

h_v : Enthalpie massique de la vapeur d'eau.

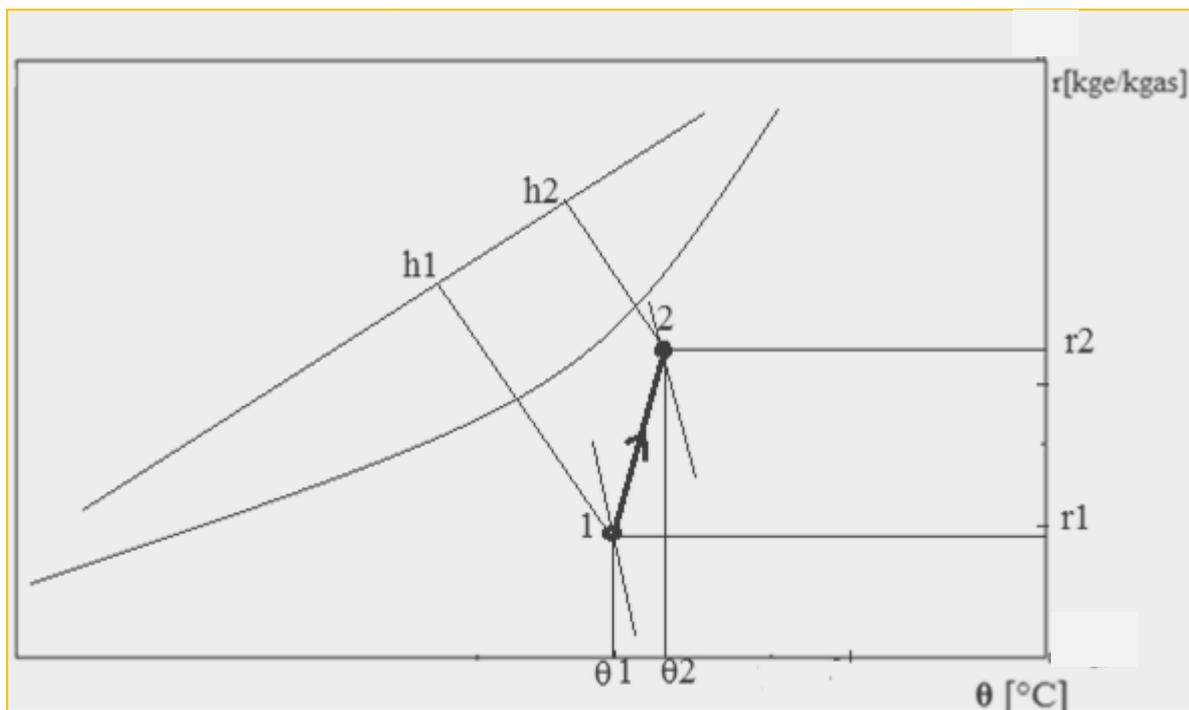
c. Évolutions sur le diagramme de l'air humide :

Fig.2.14. Evolution d'air dans un humidificateur à vapeur.

On constate sur la figure 2.14 :

- Une légère augmentation de la température sèche $\theta_2 > \theta_1$.
- Une augmentation de l'ensemble des autres caractéristiques.

2.3.5. Déshumidification de l'air :

La déshumidification de l'air consiste à diminuer la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air ou plus précisément, à abaisser sa teneur en humidité.

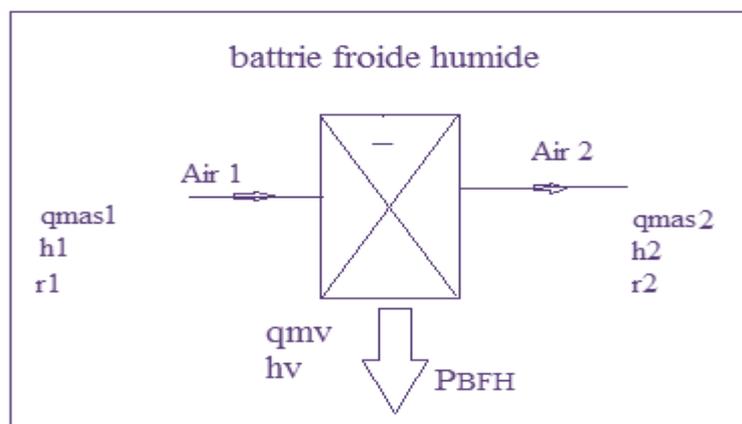
Il existe plusieurs techniques de la déshumidification.

2.3.5.1. Déshumidification par refroidissement :

a. principe :

Le principe consiste à refroidir l'air à une température inférieure à sa température de rosée en utilisant un échangeur appelé 'batterie froide'. L'air ainsi refroidi perd une partie de sa vapeur d'eau par condensation. Le fluide de refroidissement circulant dans l'échangeur est soit de l'eau glacée distribuée à partir d'une production de froid centralisée, soit par un fluide frigorigène.

b. bilans :



- D'après le bilan d'humidité :

$$r_2 = r_1 - \frac{qm_V}{qm_{as}} \quad (2.12)$$

qm_V : Le débit de vapeur d'eau condensé au contact de la surface d'échange.

- D'après le bilan enthalpique :

$$h_2 = h_1 - \left(\frac{P_{BFH} + qm_V h_V}{qm_{AS}} \right) \quad (2.13)$$

P_{BFH} : Puissance de la batterie froide humide.

h_v : Enthalpie massique de la vapeur d'eau condensée.

c. Evolutions sur le diagramme de l'air humide :

En se basant sur le diagramme de l'air, la détermination du point de sortie de la batterie nécessite la connaissance de deux paramètres:

- Le point FPT (Fin du Processus Théorique) qui est situé sur la courbe de saturation ($HR = 100\%$). La température de point FPT dépend de la nature du fluide de refroidissement : dans le cas d'un fluide frigorigène, $T_{FPT} = T_E$ (température d'évaporation); et dans le cas d'une batterie à eau, $T_{FPT} = \frac{T_E + T_S}{2}$

où T_E , T_S : représentent la température d'entrée et de sortie de l'eau dans la batterie froide.

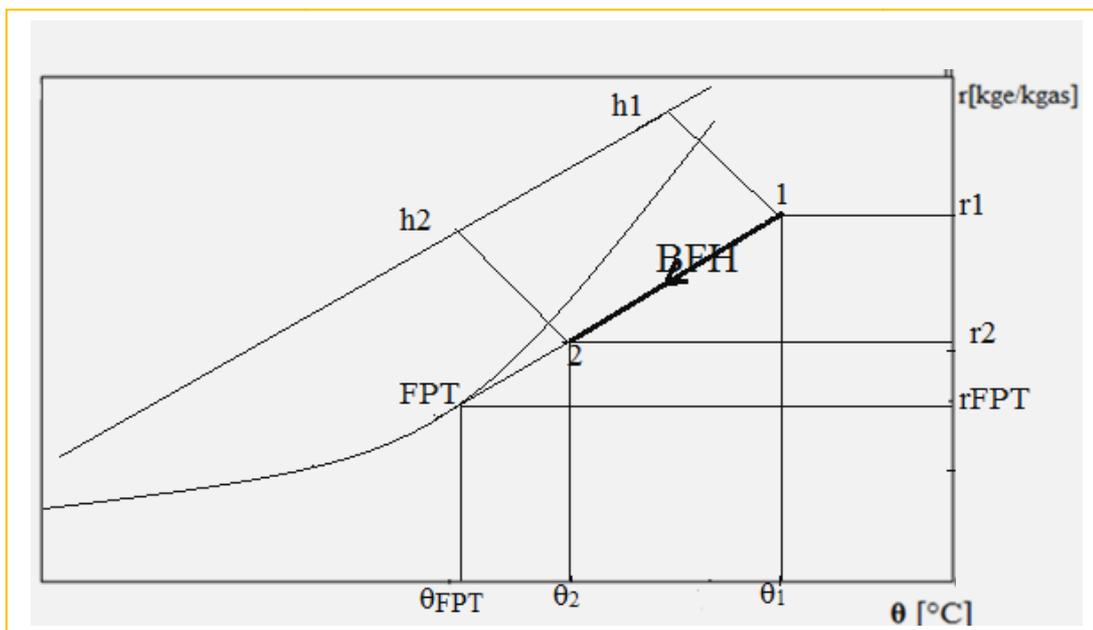


Fig.2.15. Evolution d'air dans une batterie froide humide.

CHAPITRE III

PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES D'AIR
HUMIDE EN CONTACT DE L'EAU DE MER ET DE
LA GLACE, DE 2010

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté sept grandeurs caractéristiques de l'air humide. Nous avons aussi qu'à partir de deux grandeurs sur le diagramme psychrométrique, on peut déterminer toutes les grandeurs restantes. Les diagrammes fournis dans la littérature, sont simplifiés et sont donnés pour une pression atmosphérique de $101\,325\text{ Pa}$ et pour une plage de température allant de -15 à 55°C . Vu le manque de généralité de ces diagrammes et le mode de consultation de ces derniers, l'utilisation de l'ordinateur pour le calcul des propriétés thermodynamiques est alors très recommandée.

A cet effet, un programme informatique permettant de calculer les propriétés thermodynamiques de l'air humide en contact avec l'eau de mer et de la glace selon la formulation, IAPWS de 2010 [6] qui en conformité avec la formulation IAPWS de 2008 [9] dédiée pour les propriétés thermodynamiques de l'eau de mer, a été rédigé. Le domaine de validité de cette nouvelle formulation est :

$$0 < P \leq 5\text{MPa} \quad \text{et} \quad 193\text{K} \leq T \leq 473\text{k}.$$

Les équations utilisées sont rapportées par la référence [6] sont données ci après :

3.1. Equation d'état:

L'équation d'état de l'air humide est représentée ici en termes d'énergie spécifique d'Helmholtz d'air humide, f^{AV} exprimé en fonction de la fraction A de la masse d'air sec, de la température, T et de la masse volumique de l'air humide ρ . La fonction d'Helmholtz à la forme :

$$f^{AV}(A, T, \rho) = (1 - A)f^V(T, \rho^V) + Af^A(T, \rho^A) + f^{\text{mix}}(A, T, \rho) \quad (3.1)$$

Avec :

f^V : Énergie spécifique d'Helmholtz de la vapeur d'eau, Eq(3.2)

f^A : Énergie spécifique d'Helmholtz d'air sec, Eq(3.5)

f^{mix} : Énergie spécifique d'Helmholtz d'interaction eau-air, Eq(3.10)

3.2. Énergie spécifique d'Helmholtz de la vapeur d'eau :

Cette énergie est définie dans la référence [7], et est calculé selon la formulation d'IAPWS-95 délivrée pour l'eau et sa vapeur en utilisant la masse volumique de la vapeur.

$$f^V(T, \rho^V) = f^{IAPWS-95}(T, \rho^V)$$

Avec: $\rho^V = (1 - A)\rho$

$f^{IAPWS-95}$: La fonction d'Helmholtz d'énergie libre de l'eau et de vapeur.

Elle représente la somme de deux termes se rapportant respectivement à la partie de gaz idéal, ϕ^0 , et à la partie résiduelle, ϕ^r :

$$f^{IAPWS-95}(T, \rho^V) = R_W T \phi(\delta, \tau) = R_W T [\phi^0(\delta, \tau) + \phi^r(\delta, \tau)] \quad (3.2)$$

Où $\delta = \rho/\rho_c$ et $\tau = T_c/T$

Avec ρ_c, T_c et R_W sont des constantes données dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. les valeurs des constantes utilisées dans l'eq(3.2).

symbole	valeur	Unité
ρ_c	322	kg/m ³
T_c	647.096	K
R_W	461.518 05	J/kg K

La partie adimensionnelle de l'énergie libre d'Helmholtz, ϕ^0 , est obtenue à partir de l'équation de la capacité thermique à pression constante pour l'état d'un gaz idéal, développée par Cooper [7] :

$$\phi^0 = \ln \delta + n_1^0 + n_2^0 \tau + n_3^0 \ln \tau + \sum_{i=4}^8 n_i^0 \ln[1 - e^{-\gamma_i^0 \tau}] \quad (3.3)$$

les valeurs des constantes utilisées dans l'éq(3.3) sont résumé dans Le tableau 3.2.

Tableau 3.2. Les Valeurs des coefficients et paramètres utilisées dans l'éq (3.3).

i	n_i^0	γ_i^0	i	n_i^0	γ_i^0
1	-8.320 446 483 749 7	-	5	0.973 15	3.537 342 22
2	6.683 210 527 593 2	-	6	1.279 50	7.740 737 08
3	3.006 32	-	7	0.969 56	9.244 377 96
4	0.012 436	1.287 289 67	8	0.248 73	27.507 510 5

La forme de la partie résiduelle, ϕ^r , est comme suit :

$$\phi^r = \sum_{i=1}^7 n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} + \sum_{i=8}^{51} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\delta^{c_i}} + \sum_{i=52}^{54} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\alpha_i(\delta - \varepsilon_i)^2 - \beta_i(\tau - \gamma_i)^2} + \sum_{i=55}^{56} n_i \Delta^{b_i} \delta \psi \quad (3.4)$$

Les coefficients et les paramètres intervenants dans l'éq (3.4) sont données dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3. Les coefficients et les paramètres utilisés dans l'éq (3.4)

i	c_i	d_i	t_i	n_i				
1	-	1	-0.5	$0.125\ 335\ 479\ 355\ 23 \times 10^{-1}$				
2	-	1	0.875	$0.789\ 576\ 347\ 228\ 28 \times 10^1$				
3	-	1	1	$-0.878\ 032\ 033\ 035\ 61 \times 10^1$				
4	-	2	0.5	$0.318\ 025\ 093\ 454\ 18$				
5	-	2	0.75	$-0.261\ 455\ 338\ 593\ 58$				
6	-	3	0.375	$-0.781\ 997\ 516\ 879\ 81 \times 10^{-2}$				
7	-	4	1	$0.880\ 894\ 931\ 021\ 34 \times 10^{-2}$				
8	1	1	4	$-0.668\ 565\ 723\ 079\ 65$				
9	1	1	6	$0.204\ 338\ 109\ 509\ 65$				
10	1	1	12	$-0.662\ 126\ 050\ 396\ 87 \times 10^{-4}$				
11	1	2	1	$-0.192\ 327\ 211\ 560\ 02$				
12	1	2	5	$-0.257\ 090\ 430\ 034\ 38$				
13	1	3	4	$0.160\ 748\ 684\ 862\ 51$				
14	1	4	2	$-0.400\ 928\ 289\ 258\ 07 \times 10^{-1}$				
15	1	4	13	$0.393\ 434\ 226\ 032\ 54 \times 10^{-6}$				
16	1	5	9	$-0.759\ 413\ 770\ 881\ 44 \times 10^{-5}$				
17	1	7	3	$0.562\ 509\ 793\ 518\ 88 \times 10^{-3}$				
18	1	9	4	$-0.156\ 086\ 522\ 571\ 35 \times 10^{-4}$				
19	1	10	11	$0.115\ 379\ 964\ 229\ 51 \times 10^{-8}$				
20	1	11	4	$0.365\ 821\ 651\ 442\ 04 \times 10^{-6}$				
21	1	13	13	$-0.132\ 511\ 800\ 746\ 68 \times 10^{-11}$				
22	1	15	1	$-0.626\ 395\ 869\ 124\ 54 \times 10^{-9}$				
23	2	1	7	$-0.107\ 936\ 009\ 089\ 32$				
24	2	2	1	$0.176\ 114\ 910\ 087\ 52 \times 10^{-1}$				
25	2	2	9	$0.221\ 322\ 951\ 675\ 46$				
26	2	2	10	$-0.402\ 476\ 697\ 635\ 28$				
27	2	3	10	$0.580\ 833\ 999\ 857\ 59$				
28	2	4	3	$0.499\ 691\ 469\ 908\ 06 \times 10^{-2}$				
29	2	4	7	$-0.313\ 587\ 007\ 125\ 49 \times 10^{-1}$				
30	2	4	10	$-0.743\ 159\ 297\ 103\ 41$				
31	2	5	10	$0.478\ 073\ 299\ 154\ 80$				
32	2	6	6	$0.205\ 279\ 408\ 959\ 48 \times 10^{-1}$				
33	2	6	10	$-0.136\ 364\ 351\ 103\ 43$				
34	2	7	10	$0.141\ 806\ 344\ 006\ 17 \times 10^{-1}$				
35	2	9	1	$0.833\ 265\ 048\ 807\ 13 \times 10^{-2}$				
36	2	9	2	$-0.290\ 523\ 360\ 095\ 85 \times 10^{-1}$				
37	2	9	3	$0.386\ 150\ 855\ 742\ 06 \times 10^{-1}$				
38	2	9	4	$-0.203\ 934\ 865\ 137\ 04 \times 10^{-1}$				
39	2	9	8	$-0.165\ 540\ 500\ 637\ 34 \times 10^{-2}$				
40	2	10	6	$0.199\ 555\ 719\ 795\ 41 \times 10^{-2}$				
41	2	10	9	$0.158\ 703\ 083\ 241\ 57 \times 10^{-3}$				
42	2	12	8	$-0.163\ 885\ 683\ 425\ 30 \times 10^{-4}$				
43	3	3	16	$0.436\ 136\ 157\ 238\ 11 \times 10^{-1}$				
44	3	4	22	$0.349\ 940\ 054\ 637\ 65 \times 10^{-1}$				
45	3	4	23	$-0.767\ 881\ 978\ 446\ 21 \times 10^{-1}$				
46	3	5	23	$0.224\ 462\ 773\ 320\ 06 \times 10^{-1}$				
47	4	14	10	$-0.626\ 897\ 104\ 146\ 85 \times 10^{-4}$				
48	6	3	50	$-0.557\ 111\ 185\ 656\ 45 \times 10^{-9}$				
49	6	6	44	$-0.199\ 057\ 183\ 544\ 08$				
50	6	6	46	$0.317\ 774\ 973\ 307\ 38$				
51	6	6	50	$-0.118\ 411\ 824\ 259\ 81$				
i	c_i	d_i	t_i	n_i	α_i	β_i	γ_i	ε_i
52	-	3	0	$-0.313\ 062\ 603\ 234\ 35 \times 10^{-2}$	20	150	1.21	1
53	-	3	1	$0.315\ 461\ 402\ 377\ 81 \times 10^{-2}$	20	150	1.21	1
54	-	3	4	$-0.252\ 131\ 543\ 416\ 95 \times 10^{-4}$	20	250	1.25	1
i	a_i	b_i	B_i	n_i	C_i	D_i	A_i	β_i
55	3.5	0.85	0.2	$-0.148\ 746\ 408\ 567\ 24$	28	700	0.32	0.3
56	3.5	0.95	0.2	$0.318\ 061\ 108\ 784\ 44$	32	800	0.32	0.3

3.3. Énergie spécifique d'Helmholtz d'air sec :

Le second terme intervenant dans l'équation d'état (3.1) est donné par [10] :

$$f^A(T, \rho^A) = \frac{R^L T}{M_A} [\alpha^{id}(\tau, \delta) + \alpha^{res}(\tau, \delta)] \quad (3.5)$$

Avec :

M_A : La masse molaire de l'air sec, $M_A = 0.028\ 965\ 46\ \text{kg/mol}$.

R^L : La constant du gaz molaire utilisé par Lemmon et al.

$$R^L = 8.314\ 5\ \text{J/mol K}.$$

La fonction $\alpha^{id}(\tau, \delta)$ représente la partie du gaz idéal ;

$$\alpha^{id}(\tau, \delta) = \ln \delta + \sum_{i=1}^5 n_i^0 \tau^{i-4} + n_6^0 \tau^{1.5} + n_7^0 \ln \tau + n_8^0 \ln[1 - \exp(-n_{11}^0 \tau)] + n_9^0 \ln[1 - \exp(-n_{12}^0 \tau)] + n_{10}^0 \ln\left[\frac{2}{3} + \exp(n_{13}^0 \tau)\right] \quad (3.6)$$

Et $\alpha^{res}(\tau, \delta)$ représente la partie résiduelle ;

$$\alpha^{res}(\tau, \delta) = \sum_{i=1}^5 n_k \delta^{ik} \tau^{jk} + \sum_{i=1}^5 n_k \delta^{ik} \tau^{jk} \exp(-\delta^{lk}) \quad (3.7)$$

Avec $\tau = T_A^*/T$: La température réduite.

$\delta = \rho^A/\rho_A^*$: La densité réduite.

$\rho^A = A\rho$: La masse volumique de l'air sec.

Où $T_A^* = 132.6312\ \text{K}$ et $\rho_A^* = 10447.7\ \text{mol m}^{-3} M_A$

Les coefficients des équations (3.6) et (3.7) sont donnés dans les tableaux

3.4 et 3.5

Tableau 3.4. Les coefficients utilisés dans l'équation (3.6).

i	n_i^0	i	n_i^0
1	$0.605\ 719\ 400\ 000\ 000 \times 10^{-7}$	8	$0.791\ 309\ 509\ 000\ 000$
2	$-0.210\ 274\ 769\ 000\ 000 \times 10^{-4}$	9	$0.212\ 236\ 768\ 000\ 000$
3	$-0.158\ 860\ 716\ 000\ 000 \times 10^{-3}$	10	$-0.197\ 938\ 904\ 000\ 000$
4	$0.974\ 502\ 517\ 439\ 480 \times 10$	11	$0.253\ 636\ 500\ 000\ 000 \times 10^2$
5	$0.100\ 986\ 147\ 428\ 912 \times 10^2$	12	$0.169\ 074\ 100\ 000\ 000 \times 10^2$
6	$-0.195\ 363\ 420\ 000\ 000 \times 10^{-3}$	13	$0.873\ 127\ 900\ 000\ 000 \times 10^2$
7	$0.249\ 088\ 803\ 200\ 000 \times 10$		

Tableau 3.5. Les coefficients utilisés dans l'équation (3.7).

k	i_k	j_k	l_k	n_k
1	1	0	0	$0.118\ 160\ 747\ 229$
2	1	0.33	0	$0.713\ 116\ 392\ 079$
3	1	1.01	0	$-0.161\ 824\ 192\ 067 \times 10$
4	2	0	0	$0.714\ 140\ 178\ 971 \times 10^{-1}$
5	3	0	0	$-0.865\ 421\ 396\ 646 \times 10^{-1}$
6	3	0.15	0	$0.134\ 211\ 176\ 704$
7	4	0	0	$0.112\ 626\ 704\ 218 \times 10^{-1}$
8	4	0.2	0	$-0.420\ 533\ 228\ 842 \times 10^{-1}$
9	4	0.35	0	$0.349\ 008\ 431\ 982 \times 10^{-1}$
10	6	1.35	0	$0.164\ 957\ 183\ 186 \times 10^{-3}$
11	1	1.6	1	$-0.101\ 365\ 037\ 912$
12	3	0.8	1	$-0.173\ 813\ 690\ 970$
13	5	0.95	1	$-0.472\ 103\ 183\ 731 \times 10^{-1}$
14	6	1.25	1	$-0.122\ 523\ 554\ 253 \times 10^{-1}$
15	1	3.6	2	$-0.146\ 629\ 609\ 713$
16	3	6	2	$-0.316\ 055\ 879\ 821 \times 10^{-1}$
17	11	3.25	2	$0.233\ 594\ 806\ 142 \times 10^{-3}$
18	1	3.5	3	$0.148\ 287\ 891\ 978 \times 10^{-1}$
19	3	15	3	$-0.938\ 782\ 884\ 667 \times 10^{-2}$

Les valeurs des constantes n_4^0 et n_5^0 sont arbitraires et ont été calculées pour un état de référence de l'entropie spécifique, S^A , et de l'enthalpie spécifique, h^A , de l'air sec nulle à la température T_0 et la pression normale p_0 .

$$S^A(T_0, P_0) = 0 \quad (3.8)$$

$$h^A(T_0, P_0) = 0 \quad (3.9)$$

3.4. Énergie spécifique d'Helmholtz d'interaction eau-air:

Le troisième terme intervenant dans l'équation (3.1) décrivant l'interaction eau-air est défini par :

$$f^{mix}(A, T, \rho) = \frac{2A(1-A)\rho RT}{M_A M_W} \left\{ B^{AW}(T) + \frac{3}{4}\rho \left[\frac{A}{M_A} C^{AAW}(T) + \frac{(1-A)}{M_W} C^{AWW}(T) \right] \right\} \quad (3.10)$$

Avec

R : La constante molaire du gaz, $R = 8.314\ 472\ \text{J/mol K}$

M_A : La masse molaire de l'air sec, $M_A = 0.028\ 965\ 46\ \text{kg/mol}$

M_W : La masse molaire de l'eau, $M_W = 0.018\ 015\ 268\ \text{kg/mol}$

La fonction $B^{AW}(T)$ est donnée par [11] :

$$B^{AW}(T) = b^* \sum_{i=1}^3 c_i \bar{T}^{d_i} \quad (3.11)$$

Les coefficients de l'équation (3.11) sont résumés dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6. Valeurs des coefficients utilisées dans les fonctions B^{AW} , C^{AAW} et C^{AWW} .

i	a_i	b_i	c_i	d_i
0	$0.482\ 737 \times 10^{-3}$	$-0.107\ 288\ 76 \times 10^2$		
1	$0.105\ 678 \times 10^{-2}$	$0.347\ 802\ 00 \times 10^2$	$0.665\ 687 \times 10^2$	-0.237
2	$-0.656\ 394 \times 10^{-2}$	$-0.383\ 383\ 00 \times 10^2$	$-0.238\ 834 \times 10^3$	-1.048
3	$0.294\ 442 \times 10^{-1}$	$0.334\ 060\ 00 \times 10^2$	$-0.176\ 755 \times 10^3$	-3.183
4	$-0.319\ 317 \times 10^{-1}$			

Où

b^* : Le facteur de réduction, $b^* = 10^{-6}\ \text{m}^3/\text{mol}$

\bar{T} : Température réduite, $\bar{T} = T/(100\text{K})$.

Les fonctions C^{AAW} et C^{AWW} sont données par [12] sous cette forme :

$$C^{AAW}(T) = c^* \sum_{i=0}^4 a_i \bar{T}^{-i} \quad (3.12)$$

$$C^{AWW}(T) = -c^* \exp \left\{ \sum_{i=0}^3 b_i \bar{T}^{-i} \right\} \quad (3.13)$$

Les constantes des fonctions ci-dessus sont données dans le tableau 3.6 et le facteur de réduction c^* vaut $10^{-6} \text{ m}^6/\text{mol}^2$.

3.5. Relations des propriétés thermodynamiques d'air humide en fonction de l'énergie spécifique d'Helmholtz :

Les propriétés thermodynamiques de l'air humide sont déduites en utilisant des combinaisons appropriées de l'équation (3.1) ainsi que ses dérivées.

Les relations entre les propriétés thermodynamiques et la fonction $f^{AV}(A, T, \rho)$ et ses dérivées par rapport aux variables A, T et ρ sont résumées dans le tableau 3.7 ci après.

Tableau 3.7. Relations donnant les propriétés thermodynamique de l'air humide.

Propriétés	Relations	Unité	Eq
<i>Pression</i> $P(A, T, \rho) = -(\partial f^{AV} / \partial v)_{A,T}$	$P = \rho^2 f_{\rho}^{AV}$	P_a	(3.14)
<i>Entropie spécifique</i> $s(A, T, \rho) = -(\partial f^{AV} / \partial T)_{A,\rho}$	$s = -f_T^{AV}$	$J/kg K$	(3.15)
<i>Capacité de la chaleur spécifique</i> $C_p(A, T, \rho) = T(\partial s / \partial T)_{A,P}$	$C_p = -T f_{TT}^{AV} + \frac{T \rho (f_{T\rho}^{AV})^2}{(2f_{\rho}^{AV} + \rho f_{\rho\rho}^{AV})}$	$J/kg K$	(3.16)
<i>L'enthalpie spécifique</i> $h(A, T, \rho) = f^{AV} + Ts + P/\rho$	$h = f^{AV} - T f_T^{AV} + \rho f_{\rho}^{AV}$	J/kg	(3.17)
<i>Énergie spécifique de Gibbs</i> $g(A, T, \rho) = f^{AV} + P/\rho$	$g = f^{AV} + \rho f_{\rho}^{AV}$	J/kg	(3.18)
<i>Coefficient de dilatation thermique</i> $\alpha(A, T, \rho) = v^{-1}(\partial v / \partial T)_{A,P}$	$\alpha = \frac{f_{T\rho}^{AV}}{2f_{\rho}^{AV} + \rho f_{\rho\rho}^{AV}}$	K^{-1}	(3.19)
<i>Coefficient isentropique</i> $\beta_s(A, T, \rho) = (\partial T / \partial P)_{A,s}$	$\beta_s = \frac{f_{T\rho}^{AV} / \rho}{\rho (f_{T\rho}^{AV})^2 - f_{TT}^{AV} (2f_{\rho}^{AV} + \rho f_{\rho\rho}^{AV})}$	$K P_a^{-1}$	(3.20)
<i>Coefficient de compressibilité isotherme</i> $k_T(A, T, \rho) = -v^{-1}(\partial v / \partial P)_{A,T}$	$k_T = \frac{1}{[\rho^2 (2f_{\rho}^{AV} + \rho f_{\rho\rho}^{AV})]}$	P_a^{-1}	(3.21)
<i>Coefficient de compressibilité isentropique</i> $k_s(A, T, \rho) = -v^{-1}(\partial v / \partial P)_{A,s}$	$k_s = \frac{f_{TT}^{AV} / \rho^2}{f_{TT}^{AV} (2f_{\rho}^{AV} + \rho f_{\rho\rho}^{AV}) - \rho (f_{T\rho}^{AV})^2}$	P_a^{-1}	(3.22)
<i>La vitesse du son</i> $w(A, T, \rho) = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)_{A,s}}$	$w = \sqrt{\rho^2 \frac{f_{TT}^{AV} f_{\rho\rho}^{AV} - (f_{T\rho}^{AV})^2}{f_{TT}^{AV}} + 2\rho f_{\rho}^{AV}}$	m/s	(3.23)

$$f_T^{AV} = \left(\frac{\partial f^{AV}}{\partial T} \right)_{A,\rho}, \quad f_{\rho}^{AV} = \left(\frac{\partial f^{AV}}{\partial \rho} \right)_{A,T}, \quad f_{TT}^{AV} = \left(\frac{\partial^2 f^{AV}}{\partial T^2} \right)_{A,\rho}, \quad f_{T\rho}^{AV} = \left(\frac{\partial^2 f^{AV}}{\partial T \partial \rho} \right)_A, \quad f_{\rho\rho}^{AV} = \left(\frac{\partial^2 f^{AV}}{\partial \rho^2} \right)_{A,T}$$

Toutes les dérivées massives de l'équation d'état de l'air humide eq(3.1) sont résumées dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8. Equation d'état de l'air humide ainsi que ses dérivées [1].

Equation	unité	Eq
$f^{AV} = (1 - A)f^V + Af^A + f^{mix}$	J/Kg	(3.24)
$f_A^{AV} = -f^V - \rho^V f_{\rho^V}^V + f^A + \rho^A f_{\rho^A}^A + f_A^{mix}$	J/Kg	(3.25)
$f_T^{AV} = (1 - A)f_T^V + Af_T^A + f_T^{mix}$	J/Kg	(3.26)
$f_{\rho^V}^{AV} = (1 - A)^2 f_{\rho^V}^V + A^2 f_{\rho^A}^A + f_{\rho^V}^{mix}$	J/Kg K	(3.27)
$f_{AA}^{AV} = \rho \left(2f_{\rho^V}^V + \rho^V f_{\rho^V \rho^V}^V + 2f_{\rho^A}^A + \rho^A f_{\rho^A \rho^A}^A \right) + f_{AA}^{mix}$	J m ³ kg ⁻²	(3.28)
$f_{AT}^{AV} = -f_T^V - \rho^V f_{T\rho^V}^V + f_T^A + \rho^A f_{T\rho^A}^A + f_{AT}^{mix}$	J/Kg	(3.29)
$f_{A\rho}^{AV} = -(1 - A) \left(2f_{\rho^V}^V + \rho^V f_{\rho^V \rho^V}^V \right) + A \left(2f_{\rho^A}^A + \rho^A f_{\rho^A \rho^A}^A \right) + f_{A\rho}^{mix}$	J m ³ kg ⁻²	(3.30)
$f_{TT}^{AV} = (1 - A)f_{TT}^V + Af_{TT}^A + f_{TT}^{mix}$	J kg ⁻¹ K ⁻²	(3.31)
$f_{T\rho}^{AV} = (1 - A)^2 f_{T\rho^V}^V + A^2 f_{T\rho^A}^A + f_{T\rho}^{mix}$	J m ³ kg ⁻² K ⁻¹	(3.32)
$f_{\rho\rho}^{AV} = (1 - A)^3 f_{\rho^V \rho^V}^V + A^3 f_{\rho^A \rho^A}^A + f_{\rho\rho}^{mix}$	J m ⁶ kg ⁻³	(3.33)

Avec :

$$\begin{aligned}
 f_A^{AV} &= \left(\frac{\partial f^{AV}}{\partial A} \right)_{T,\rho} & f_T^{AV} &= \left(\frac{\partial f^{AV}}{\partial T} \right)_{A,\rho} & f_{\rho}^{AV} &= \left(\frac{\partial f^{AV}}{\partial \rho} \right)_{A,T} \\
 f_{AA}^{AV} &= \left(\frac{\partial^2 f^{AV}}{\partial A^2} \right)_{T,\rho} & f_{AT}^{AV} &= \left(\frac{\partial^2 f^{AV}}{\partial A \partial T} \right)_{\rho} & f_{A\rho}^{AV} &= \left(\frac{\partial^2 f^{AV}}{\partial A \partial \rho} \right)_T \\
 f_{TT}^{AV} &= \left(\frac{\partial^2 f^{AV}}{\partial T^2} \right)_{A,\rho} & f_{T\rho}^{AV} &= \left(\frac{\partial^2 f^{AV}}{\partial T \partial \rho} \right)_A & f_{\rho\rho}^{AV} &= \left(\frac{\partial^2 f^{AV}}{\partial \rho^2} \right)_{A,T}
 \end{aligned}$$

Les dérivées de l'équation (3.2), $f^V(T, \rho^V)$ disponibles dans la référence [7] sont résumées dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9. Fonction d'Helmholtz et ses dérivées évaluées pour le cas de la vapeur d'eau (formulation d'IAPWS-IF95 [7]).

Dérivées de $f^V(T, \rho^V)$	Propriétés d'IAPWS-IF95	Unité	Eq
$f^V(T, \rho^V)$	f	J/kg	(3.34)
$f_T^V(T, \rho^V)$	$f_T^V = -s$	J/kg K	(3.35)
$f_{\rho^V}^V(T, \rho^V)$	$f_{\rho^V}^V = P_V/(\rho^V)^2$	J m ³ kg ⁻²	(3.36)
$f_{TT}^V(T, \rho^V)$	$f_{TT}^V = -C_v/T$	J/kg K ²	(3.37)
$f_{T\rho^V}^V(T, \rho^V)$	$f_{T\rho^V}^V = \frac{\alpha}{(\rho^V)^2 k_T}$	J m ³ kg ⁻² K ⁻¹	(3.38)
$f_{\rho^V\rho^V}^V(T, \rho^V)$	$f_{\rho^V\rho^V}^V = \frac{1}{(\rho^V)^3} \left(\frac{1}{k_T} - 2P_V \right)$	J m ⁶ kg ⁻³	(3.39)

Avec :

$$f_T^V = \left(\frac{\partial f^V}{\partial T} \right)_{\rho^V} \quad f_{\rho^V}^V = \left(\frac{\partial f^V}{\partial \rho^V} \right)_T \quad f_{TT}^V = \left(\frac{\partial^2 f^V}{\partial T^2} \right)_{\rho^V}$$

$$f_{T\rho^V}^V = \left(\frac{\partial^2 f^V}{\partial T \partial \rho^V} \right) \quad f_{\rho^V\rho^V}^V = \left(\frac{\partial^2 f^V}{\partial (\rho^V)^2} \right)_T$$

Les dérivées de l'équation (3.5) de l'air sec sont résumées dans le tableau 3.10.

Tableau 3.10. Dérivées de l'équation (3.5).

Dérivées de $f^A(T, \rho^A)$	Expressions en fonction des quantités réduites	Unité	Eq
$f^A(T, \rho^A)$	$f^A = \frac{R^L T}{M_A} [\alpha^{id} + \alpha^{res}]$	J/kg	(3.40)
$f_T^A(T, \rho^A)$	$\frac{R^L}{M_A} [\alpha^{id} + \alpha^{res} - (\alpha_{\tau}^{id} + \alpha_{\tau}^{res})\tau]$	J/kg K	(3.41)
$f_{\rho^A}^A(T, \rho^A)$	$\frac{R^L T}{M_A \rho_A^*} [\alpha_{\delta}^{id} + \alpha_{\delta}^{res}]$	J m ³ /kg ²	(3.42)
$f_{TT}^A(T, \rho^A)$	$\frac{R^L \tau^2}{M_A T} [\alpha_{\tau\tau}^{id} + \alpha_{\tau\tau}^{res}]$	J/kg K ²	(3.43)
$f_{T\rho^A}^A(T, \rho^A)$	$\frac{R^L}{M_A \rho_A^*} [\alpha_{\delta}^{id} + \alpha_{\delta}^{res} - \alpha_{\tau\delta}^{res}\tau]$	J m ³ /kg ² K	(3.44)
$f_{\rho^A\rho^A}^A(T, \rho^A)$	$\frac{R^L T}{M_A (\rho_A^*)^2} [\alpha_{\delta\delta}^{id} + \alpha_{\delta\delta}^{res}]$	J m ⁶ /kg ³	(3.45)

Avec :

$$f_T^A = \left(\frac{\partial f^A}{\partial T} \right)_{\rho^A} \quad f_{\rho^A}^A = \left(\frac{\partial f^A}{\partial \rho^A} \right)_T \quad f_{TT}^A = \left(\frac{\partial^2 f^A}{\partial T^2} \right)_{\rho^A}$$

$$f_{T\rho^A}^A = \left(\frac{\partial^2 f^A}{\partial T \partial \rho^A} \right) \quad f_{\rho^A\rho^A}^A = \left(\frac{\partial^2 f^A}{\partial (\rho^A)^2} \right)_T$$

Les dérivées des quantités $\alpha^{id}(\tau, \delta)$ et $\alpha^{res}(\tau, \delta)$ figurant dans le tableau ci-dessus sont données dans le tableau 3.11.

Tableau 3.11. Dérivées partielles des quantités α^{id} et α^{res} de l'air sec.

Formules de la dérivée	Eq
$\alpha^{id}(\tau, \delta) = \ln \delta + \sum_{i=1}^5 n_i^0 \tau^{i-4} + n_6^0 \tau^{1.5} + n_7^0 \ln \tau + n_8^0 \ln[1 - \exp(-n_{11}^0 \tau)] + n_9^0 \ln[1 - \exp(-n_{12}^0 \tau)] + n_{10}^0 \ln\left[\frac{2}{3} + \exp(n_{13}^0 \tau)\right]$	(3.46)
$\alpha_{\tau}^{id} = \sum_{i=1}^3 (i-4) n_i^0 \tau^{i-5} + n_5^0 + 1.5 n_6^0 \tau^{0.5} + n_7^0 \tau^{-1} + n_8^0 n_{11}^0 [\exp(n_{11}^0 \tau) - 1]^{-1} + n_9^0 n_{12}^0 [\exp(n_{12}^0 \tau) - 1]^{-1} + n_{10}^0 n_{13}^0 [2 \exp(-n_{13}^0 \tau)/3 + 1]^{-1}$	(3.47)
$\alpha_{\delta}^{id} = 1/\delta$	(3.48)
$\alpha_{\tau\tau}^{id} = \sum_{i=1}^3 (i-4)(i-5) n_i^0 \tau^{i-6} + 0.75 n_6^0 \tau^{-0.5} - n_7^0 \tau^{-2} - n_8^0 (n_{11}^0)^2 [\exp(n_{11}^0 \tau) - 1]^{-2} \exp(n_{11}^0 \tau) + 2 n_9^0 (n_{12}^0)^2 [\exp(n_{12}^0 \tau) - 1]^{-2} \exp(n_{12}^0 \tau) + 2 n_{10}^0 (n_{13}^0)^2 [2 \exp(-n_{13}^0 \tau)/3 + 1]^{-2} \exp(-n_{13}^0 \tau)/3$	(3.49)
$\alpha_{\tau\delta}^{id} = 0$	(3.50)
$\alpha_{\delta\delta}^{id} = -1/\delta^2$	(3.51)
$\alpha^{res}(\tau, \delta) = \sum_{i=1}^5 n_k \delta^{i_k} \tau^{j_k} + \sum_{i=1}^5 n_k \delta^{i_k} \tau^{j_k} \exp(-\delta^{l_k})$	(3.52)
$\alpha_{\tau}^{res} = \sum_{k=1}^{10} j_k n_k \delta^{j_k} \tau^{j_k-1} + \sum_{k=11}^{19} j_k n_k \delta^{j_k} \tau^{j_k-1} \exp(-\delta^{l_k})$	(3.53)
$\alpha_{\delta}^{res} = \sum_{k=1}^{10} i_k n_k \delta^{j_k-1} \tau^{j_k} + \sum_{k=11}^{19} n_k \delta^{i_k-1} (i_k - l_k \delta^{l_k}) \tau^{j_k} \exp(-\delta^{l_k})$	(3.54)
$\alpha_{\tau\tau}^{res} = \sum_{k=1}^{10} j_k (j_k - 1) n_k \delta^{j_k} \tau^{j_k-2} + \sum_{k=11}^{19} j_k (j_k - 1) n_k \delta^{i_k} \tau^{j_k-2} \exp(-\delta^{l_k})$	(3.56)
$\alpha_{\tau\delta}^{res} = \sum_{k=1}^{10} i_k j_k n_k \delta^{i_k-1} \tau^{j_k-1} + \sum_{k=11}^{19} j_k n_k \delta^{i_k-1} (i_k - l_k \delta^{l_k}) \tau^{j_k-1} \exp(-\delta^{l_k})$	(3.57)
$\alpha_{\delta\delta}^{res} = \sum_{k=1}^{10} i_k (i_k - 1) n_k \delta^{i_k-2} \tau^{j_k} + n_k \delta^{i_k-2} [i_k (i_k - 1) - (l_k + 2i_k - 1) l_k \delta^{l_k} + (l_k \delta^{l_k})^2] \tau^{j_k} \exp(-\delta^{l_k})$	(3.58)

Les dérivées du troisième terme de l'équation d'état de l'air humide décrivant l'interaction eau-air sont résumées dans le tableau 3.12.

Tableau 3.12. Dérivées partielles de la fonction f^{mix} .

<i>Les formules de la dérivée</i>	<i>Eq</i>
$f^{mix}(A, T, \rho) = \frac{2A(1-A)\rho RT}{M_A M_W} \left\{ B^{AW}(T) + \frac{3}{4}\rho \left[\frac{A}{M_A} C^{AAW}(T) + \frac{(1-A)}{M_W} C^{AWW}(T) \right] \right\}$	(3.59)
$f_A^{mix} = \frac{2\rho RT}{M_A M_W} \left\{ (1-2A)B^{AW} + \frac{3}{4}\rho \left[\frac{A(2-3A)}{M_A} C^{AAW} + \frac{(1-A)(1-3A)}{M_W} C^{AWW} \right] \right\}$	(3.60)
$f_T^{mix} = \frac{2A(1-A)\rho R}{M_A M_W} \left\{ B^{AW} + T B_T^{AW} + \frac{3}{4}\rho \left[\frac{A}{M_A} (C^{AAW} + T C_T^{AAW}) + \frac{(1-A)}{M_W} (C^{AWW} + T C_T^{AWW}) \right] \right\}$	(3.61)
$f_\rho^{mix} = \frac{A(1-A)RT}{M_A M_W} \left\{ 2B^{AW} + 3\rho \left[\frac{A}{M_A} C^{AAW} + \frac{(1-A)}{M_W} C^{AWW} \right] \right\}$	(3.62)
$f_{AA}^{mix} = \frac{\rho RT}{M_A M_W} \left\{ -4B^{AW} + 3\rho \left[\frac{(1-3A)}{M_A} C^{AAW} - \frac{(2-3A)}{M_W} C^{AWW} \right] \right\}$	(3.63)
$f_{AT}^{mix} = \frac{\rho RT}{M_A M_W} (1-2A)(B^{AW} + T B_T^{AW}) + \frac{3\rho^2 R}{2M_A M_W} \left[\frac{A(2-3A)}{M_A} (C^{AAW} + T C_T^{AAW}) + \frac{(1-A)(1-3A)}{M_W} (C^{AWW} + T C_T^{AWW}) \right]$	(3.64)
$f_{A\rho}^{mix} = \frac{2RT}{M_A M_W} \left\{ (1-2A)B^{AW} + \frac{3}{2}\rho \left[\frac{A(2-3A)}{M_A} C^{AAW} + \frac{(1-A)(1-3A)}{M_W} C^{AWW} \right] \right\}$	(3.65)
$f_{TT}^{mix} = \frac{2A(1-A)\rho R}{M_A M_W} \left\{ 2B_T^{AW} + T B_{TT}^{AW} + \frac{3\rho}{4} \left[\frac{A}{M_A} (2C_T^{AAW} + T C_{TT}^{AAW}) + \frac{(1-A)}{M_W} (2C_T^{AWW} + T C_{TT}^{AWW}) \right] \right\}$	(3.66)
$f_{\rho\rho}^{mix} = \frac{3A(1-A)RT}{M_A M_W} \left[\frac{A}{M_A} C^{AAW} + \frac{(1-A)}{M_W} C^{AWW} \right]$	(3.67)
$f_{T\rho}^{mix} = \frac{2A(1-A)R}{M_A M_W} \left\{ B^{AW} + T B_T^{AW} + \frac{3}{2}\rho \left[\frac{A}{M_A} (C^{AAW} + T C_T^{AAW}) + \frac{(1-A)}{M_W} (C^{AWW} + T C_T^{AWW}) \right] \right\}$	(3.68)

Les dérivées des fonctions $B^{AW}(T)$, $C^{AAW}(T)$ et $C^{AWW}(T)$ utilisées dans les équations (3.59) à (3.68) sont résumées dans le tableau 3.13.

Tableau 3.13. Dérivées partielles des fonctions $B^{AW}(T)$, $C^{AAW}(T)$ et $C^{AWW}(T)$:

Dérivées	Expression	Eq
B^{AW}	$b^* \sum_{i=1}^3 c_i \bar{T}^{d_i}$	(3.69)
$B_{\bar{T}}^{AW} = \frac{\partial B^{AW}}{\partial \bar{T}}$	$b^* \bar{T} \sum_{i=1}^3 c_i d_i \bar{T}^{d_i-1}$	(3.70)
$B_{\bar{T}\bar{T}}^{AW} = \frac{\partial^2 B^{AW}}{\partial \bar{T}^2}$	$b^* \left(\frac{\bar{T}}{\bar{T}}\right)^2 \sum_{i=1}^3 c_i d_i (d_i - 1) \bar{T}^{d_i-2}$	(3.71)
C^{AAW}	$c^* \sum_{i=0}^4 a_i \bar{T}^{-i}$	(3.72)
$C_T^{AAW} = \frac{\partial C^{AAW}}{\partial T}$	$-c^* \bar{T} \sum_{i=1}^4 i a_i \bar{T}^{-i-1}$	(3.73)
$C_{TT}^{AAW} = \frac{\partial^2 C^{AAW}}{\partial T^2}$	$c^* \left(\frac{\bar{T}}{\bar{T}}\right)^2 \sum_{i=1}^3 i(i+1) a_i \bar{T}^{-i-2}$	(3.74)
C^{AWW}	$-c^* \exp\left\{\sum_{i=0}^3 b_i \bar{T}^{-i}\right\}$	(3.75)
$C_T^{AWW} = \frac{\partial C^{AWW}}{\partial T}$	$c^* \bar{T} \left(\sum_{i=1}^3 i b_i \bar{T}^{-i-1}\right) \exp\left\{\sum_{i=0}^3 b_i \bar{T}^{-i}\right\}$	(3.78)
$C_{TT}^{AWW} = \frac{\partial^2 C^{AWW}}{\partial T^2}$	$-c^* \left(\frac{\bar{T}}{\bar{T}}\right)^2 \left\{\sum_{i=1}^3 i(i+1) b_i \bar{T}^{-i-2} + \left(\sum_{i=1}^3 i b_i \bar{T}^{-i-1}\right)\right\} \exp\left\{\sum_{i=0}^3 b_i \bar{T}^{-i}\right\}$	(3.79)

3.6. Propriétés colligative :

Pour le calcul de l'équilibre entre l'air humide et les différents phases de l'eau (H_2O) ou de l'eau de mer, l'état thermodynamique exige l'égalité du potentiel chimique μ_W de l'eau contenue dans l'air humide avec le potentiel chimique de l'eau dans la phase en question.

Dans cette étude, les potentiels chimiques sont exprimés sur la base de la masse, qui sont les potentiels chimiques habituels divisé par la masse molaire. Les formules de conversion reliant les fractions molaires aux fractions massiques, ainsi que d'autres quantités appropriées, sont données dans le tableau 3.14. Le potentiel chimique d'une phase pure est égal à son énergie spécifique de Gibbs.

Tableau 3.14. Relations des propriétés thermodynamiques et formules de conversion de fractions molaires.

Propriétés	Relation	Eq
Potentiel chimique relative		
$\mu(A, T, \rho) = (\partial f^{AV} / \partial A)_{T, \rho}$	$\mu = f_A^{AV}$	(3.80)
Potentiel chimique de H_2O		
$\mu_W(A, T, \rho) = g - A\mu$	$\mu_W = f^{AV} + \rho f_\rho^{AV} - A f_A^{AV}$	(3.81)
Humidité absolue	$r = (1/A) - 1$	(3.82)
Humidité relative	$HR = (1 - x_A) / (1 - x_A^{SAT})$	(3.83)
Pression partiel de la vapeur	$P^{VAP} = (1 - x_A)P$	(3.84)
Masse molaire de l'air humide	$M = [((1 - A)/M_W) + (A/M_A)]^{-1}$	(3.85)
Fraction massique d'air sec	$A = x_A / [1 - (1 - x_A)(1 - (M_W/M_A))]$	(3.86)
Fraction massique de la vapeur	$1 - A = (1 - x_A) / [1 - x_A(1 - (M_A/M_W))]$	(3.87)
Fraction molaire d'air sec	$x_A = A(M_W/M_A) / (1 - A[1 - (M_W/M_A)])$	(3.88)
Fraction molaire de la vapeur	$1 - x_A = (1 - A) / (1 - A[1 - (M_W/M_A)])$	(3.89)

Avec : $f_A^{AV} = \left(\frac{\partial f^{AV}}{\partial A} \right)_{T, \rho}$, $f_\rho^{AV} = \left(\frac{\partial f^{AV}}{\partial \rho} \right)_{A, T}$

Au point de saturation de l'air humide, la fraction d'air $A = A^{SAT}$, la température de condensation T , et la pression totale P obéissent à la condition d'équilibre entre l'air humide et l'eau liquide :

$$\mu_W(A^{SAT}, T, P) = g^{liq}(T, P) \quad (3.90)$$

Où ; au dessous de la température de congélation, la condition d'équilibre entre l'air humide et la glace [6] conduit à :

$$\mu_W(A^{SAT}, T, P) = g^{lh}(T, P) \quad (3.91)$$

Où g^{liq} est l'énergie spécifique de Gibbs pour l'eau liquide, donnée dans la référence [7] et g^{lh} est l'énergie spécifique de Gibbs pour la glace (lh) disponible dans la référence [8].

La solution A^{SAT} de l'équation (3.90) ou (3.91) est indispensable pour le calcul de l'humidité relative équation (3.83).

L'équilibre entre l'air humide et l'eau de mer obéit à la condition :

$$\mu_W(A^{cond}, T, P) = \mu_W^{SW}(S, T, P) \quad (3.92)$$

Où A^{cond} est la fraction d'air au point de condensation en contact avec l'eau de mer, S est la salinité absolue et μ_W^{SW} le potentiel chimique de l'eau de mer disponible dans la référence [9].

L'air humide en équilibre avec l'eau de mer ($S > 0$) est toujours sursaturé, $A^{cond} > A^{SAT}$, si aucune glace n'est présente, c'est-à-dire si la température est plus élevée que la température de congélation de l'eau de mer. Dans les équations (3.90) et (3.92), la dissolution des constituants de l'air humide est négligeable.

3.7. Domaine de validité :

L'équation d'état, eq (3.1), est valable pour l'air humide dans les gammes de température et de pression suivantes :

$$0 < P \leq 5MP_a \quad \text{et} \quad 193K \leq T \leq 473K.$$

La pression est calculée à l'aide de l'équation (3.14). Toutes les relations combinées avec l'éq (3.1) sont valide dans la gamme ci-dessus. L'éq (3.1) peut même donner des résultats satisfaisantes en dehors cette même gamme.

La fraction de l'air A peut prendre l'importe quelle valeur comprise entre 0 et 1 fournissant ainsi la valeur de pression partielle de la vapeur d'eau P^{VAP} , éq(3.84) qui ne doit pas excéder celle de son état de saturation

$$0 < A < 1 \text{ et } A^{SAT}(T, P) \leq A.$$

La valeur exacte de la fraction d'air $A^{SAT}(T, P)$ de l'air humide saturée est donnée par l'égalité des potentiels chimiques de l'eau dans l'air humide et l'eau de la phase en question selon la valeur de la température (au dessus ou au dessous de la température de congélation).

A faible densité, la pression partielle $P^{vap\ sat}$ de l'air humide saturé peut être estimé soit par une relation donnant la pression de vapeur saturante, $P^{sat}(T)$ de l'eau liquide [17] ou pour une pression de sublimation, $P^{subl}(T)$ de la glace [18], a fin d'obtenir :

$$A^{SAT}(T, P) = \frac{P - P^{vap\ sat}}{P - P^{vap\ sat}(1 - M_W/M_A)} \quad (3.93)$$

En se servant de l'équation (3.86), comme une approximation pratique et suffisante.

D'après les relations des propriétés de l'air humide données dans la formulation d'IAPWS-2010 [6], nous pouvons aussi déduire autres relations des propriétés de l'air humide comme, l'énergie interne par exemple.

$$u = f^{AV} + T s \quad (3.94)$$

Dans notre étude, nous aurons utilisé l'équation (3.93) pour l'évaluation de A^{SAT} et non pas la résolution des équations (3.90) et (3.91).

CHAPITRE IV

DESCRIPTION DU PROGRAMME

AIR HUMIDE

Dans ce chapitre, nous explicitons la structure du code de calcul élaboré en donnant l'organigramme ainsi que les rôles du programme principal et ses sous programmes.

4.1. Information sur le programme :

Le programme nommé AIR_HUMID (air humide) est écrit en langage FORTRAN 90. Il a été testé et validé sur PC.

Input : entrée manuelle.

Output : unités logiques.

4.2. Le programme principal et les sous programmes :

4.2. a. rôle du programme principal :

Le programme principal AIR_HUMID s'occupe de la lecture des données d'entrées et ordonne l'ouverture des fichiers output à créer. Il fait appel à plusieurs sous programmes.

4.2. b. rôle des sous programmes :

Les sous programmes nommés selon les paramètres à calculer ou selon la numérotation de la relation utilisée, s'occupe des données ; les constantes, des coefficients, des variables réduites et des équations utilisées.

Ces sous programmes sont :

- **Les sous programmes des grandeurs thermodynamique d'air humide :**

FRA_MAS : sous programme permettant de calculer la fraction massique d'air sec pour une humidité absolue donnée.

PRESAT_VAP : permet de calculer la pression de la vapeur d'eau à l'état de saturation de la formulation d'IAPWS-95[7], pour une température donnée.

DENSAT_VAP : sous programme permettant de calculer la masse volumique de la vapeur d'eau à l'état de saturation de la formulation d'IAPWS-95[7] pour une température donnée.

DEN_AH : sous programme permettant de calculer la masse volumique de l'air humide. Il fait appel au sous programme DENSAT_VAP.

ENTHAH: ce sous programme permettant de calculer l'enthalpie spécifique de l'air humide eq(3.52). Il fait appel aux sous programmes ENTRAH et ENSPG.

ENTRAH: sous programme permettant de calculer l'entropie spécifique de l'air humide à l'aide d'eq(3.50). Il fait appel au sous programme EQUAT_T13.

CHSP: permet de calculer la chaleur spécifique de l'air humide donnée par la relation (3.51). Il fait appel aux sous programmes EQUAT_T18, EQUAT_T19 EQUAT_T14 et EQUAT_T20.

ENSPG: ce sous programme permettant de calculer l'énergie spécifique de Gibbs à l'aide de la relation (3.53). Il fait appel aux sous programmes EQUAT_T11 et EQUAT_T14.

CODITH: sous programme permettant de calculer le coefficient de dilatation thermique pour l'air humide par l'eq (3.54). Il fait appel aux sous programmes EQUAT_T19, EQUAT_T14 et EQUAT_T20.

VITSON: ce sous programme permettant de calculer la vitesse de son dans l'air humide à partir de la relation (3.58). Il fait appel aux sous programmes EQUAT_T14, EQUAT_T18, EQUAT_T19 et EQUAT_T20.

POCHRE: ce sous programme permettant de calculer le potentiel chimique relatif d'air humide à l'aide de la relation (3.59). Il fait appel au sous programme EQUAT_T12

ENINT : sous programme permettant de calculer l'énergie interne de l'air humide par l'éq (3.94). Il fait appel aux sous programmes ENTRAH.

□ **Les sous programmes qui calcul l'énergie d'Helmholtz de la vapeur d'eau :**

sous programme permettant de calculer l'énergie d'Helmholtz de la vapeur d'eau donnée par l'équation (3.2) et ses dérivées. Il fait appel aux relations de la formulation d'IAPWS-95 [7].

□ **Les sous programmes qui calcul l'énergie d'Helmholtz de l'air sec :**

Le calcul de l'énergie d'Helmholtz de l'air sec, donnée par l'équation (3.5) et ses dérivées, est obtenu à l'aide des sous programmes suivants : EQUAT_T27, EQUAT_T28, EQUAT_T29, EQUAT_T30, EQUAT_T31 et EQUAT_T32.

□ **Les sous programmes qui calcul l'énergie d'Helmholtz d'interaction eau-air**

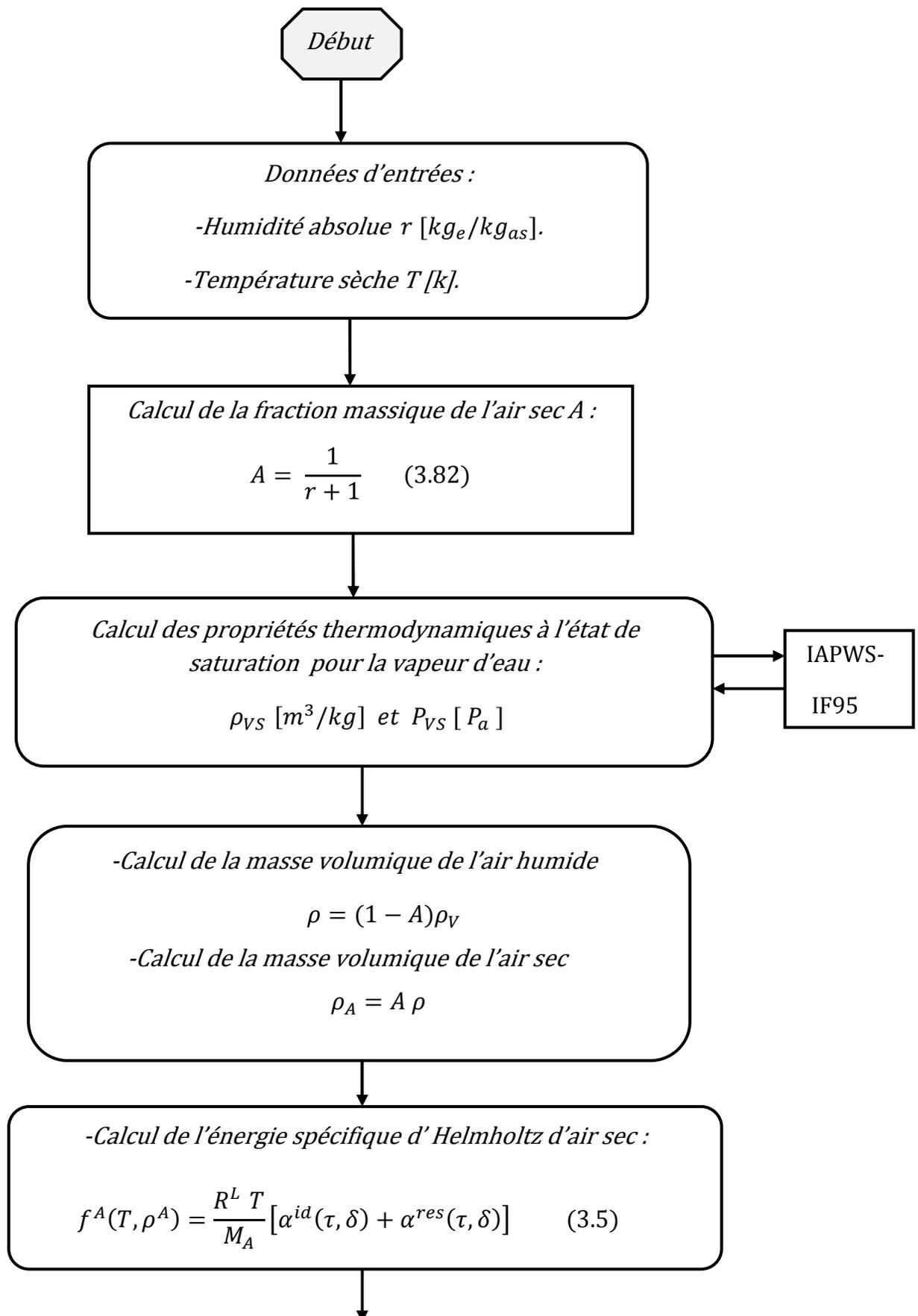
Le calcul de l'énergie d'Helmholtz d'interaction eau-air donnée par l'équation (3.10) et ses dérivées, est obtenu à laide des sous programmes suivants : EQUAT_T45, EQUAT_T46, EQUAT_T47, EQUAT_T48, EQUAT_T49 EQUAT_T50, EQUAT_T51, EQUAT_T52, EQUAT_T53 EQUAT_T54 et EQUAT_T64.

□ **Les sous programmes qui calcul l'énergie d'Helmholtz de l'air humide :**

Le calcul de l'énergie d'Helmholtz de l'air humide donnée par l'équation (3.1) et ses dérivées, est obtenu à laide des sous programmes calculant l'énergie d'Helmholtz d'air sec équation (3.2), l'énergie d'Helmholtz de la vapeur d'eau équation (3.5) et l'énergie d'Helmholtz d'interaction eau-air équation (3.10).

L'organigramme du code de calcul est décrit ci après :

4.3. Organigramme du code de calcul.



-Calcul de l'énergie spécifique d'Helmholtz de la vapeur d'eau :

$$f^V(T, \rho^V) = R_W T [\phi^0 + \phi^r] \quad (3.2)$$

-Calcul de l'énergie spécifique d'Helmholtz de l'interaction eau-air :

$$f^{mix}(A, T, \rho) = \frac{2A(1-A)\rho RT}{M_A M_W} \left\{ B^{AW}(T) + \frac{3}{4}\rho \left[\frac{A}{M_A} C^{AAW}(T) + \frac{(1-A)}{M_W} C^{AWW}(T) \right] \right\} \quad (3.10)$$

-Calcul de l'énergie spécifique d'Helmholtz d'air humide :

$$f^{AV}(A, T, \rho) = (1-A)f^V(T, \rho^V) + Af^A(T, \rho^A) + f^{mix}(A, T, \rho) \quad (3.1)$$

-Calcul des dérivées de la fonction de l'énergie d'Helmholtz d'air sec :

$$f_T^A \text{ (éq 3.41)}, f_{\rho^A}^A \text{ (éq 3.42)}, f_{TT}^A \text{ (éq 3.43)}, f_{T\rho^A}^A \text{ (éq 3.44) et } f_{\rho^A\rho^A}^A \text{ (éq 3.45)}$$

-Calcul des dérivées de la fonction de l'énergie d'Helmholtz de la vapeur d'eau :

$$f_T^V \text{ (éq 3.35)}, f_{\rho^V}^V \text{ (éq 3.36)}, f_{TT}^V \text{ (éq 3.37)}, f_{T\rho^V}^V \text{ (éq 3.38) et } f_{\rho^V\rho^V}^V \text{ (éq 3.39)}$$

-Calcul des dérivées de la fonction de l'énergie d'Helmholtz

d'interaction air-vapeur :

$$f_A^{mix} \text{ (éq 3.60)}, f_T^{mix} \text{ (éq 3.61)}, f_\rho^{mix} \text{ (éq 3.62)}, f_{AA}^{mix} \text{ (éq 3.63)}, f_{AT}^{mix} \text{ (éq 3.64)}$$

$$f_{A\rho}^{mix} \text{ (éq 3.65)}, f_{TT}^{mix} \text{ (éq 3.66)}, f_{\rho\rho}^{mix} \text{ (éq 3.67)} \text{ et } f_{T\rho}^{mix} \text{ (éq 3.68)}$$

Calcul des dérivées de la fonction de l'énergie d'Helmholtz

d'air humide :

$$f_A^{AV} \text{ (éq 3.25)}, f_T^{AV} \text{ (éq 3.26)}, f_\rho^{AV} \text{ (éq 3.27)}, f_{AA}^{AV} \text{ (éq 3.28)}, f_{AT}^{AV} \text{ (éq 3.29)}$$

$$f_{A\rho}^{AV} \text{ (éq 3.30)}, f_{TT}^{AV} \text{ (éq 3.31)}, f_{T\rho}^{AV} \text{ (éq 3.32)}, f_{\rho\rho}^{AV} \text{ (éq 3.33)}$$

Calcul des propriétés thermodynamiques de l'air humide :

-Calcul de l'entropie spécifique s :

$$s = -f_T^{AV} \quad (3.15)$$

-Calcul de l'énergie spécifique de Gibbs g :

$$g = f^{AV} + \rho f_\rho^{AV} \quad (3.18)$$

-Calcul de l'enthalpie spécifique h :

$$h = g + T s \quad (3.17)$$

-Calcul de l'énergie interne u :

$$u = f^{AV} + T s \quad (3.94)$$

-Calcul de la pression de l'air humide :

$$P = \rho^2 f_\rho^{AV} \quad (3.14)$$

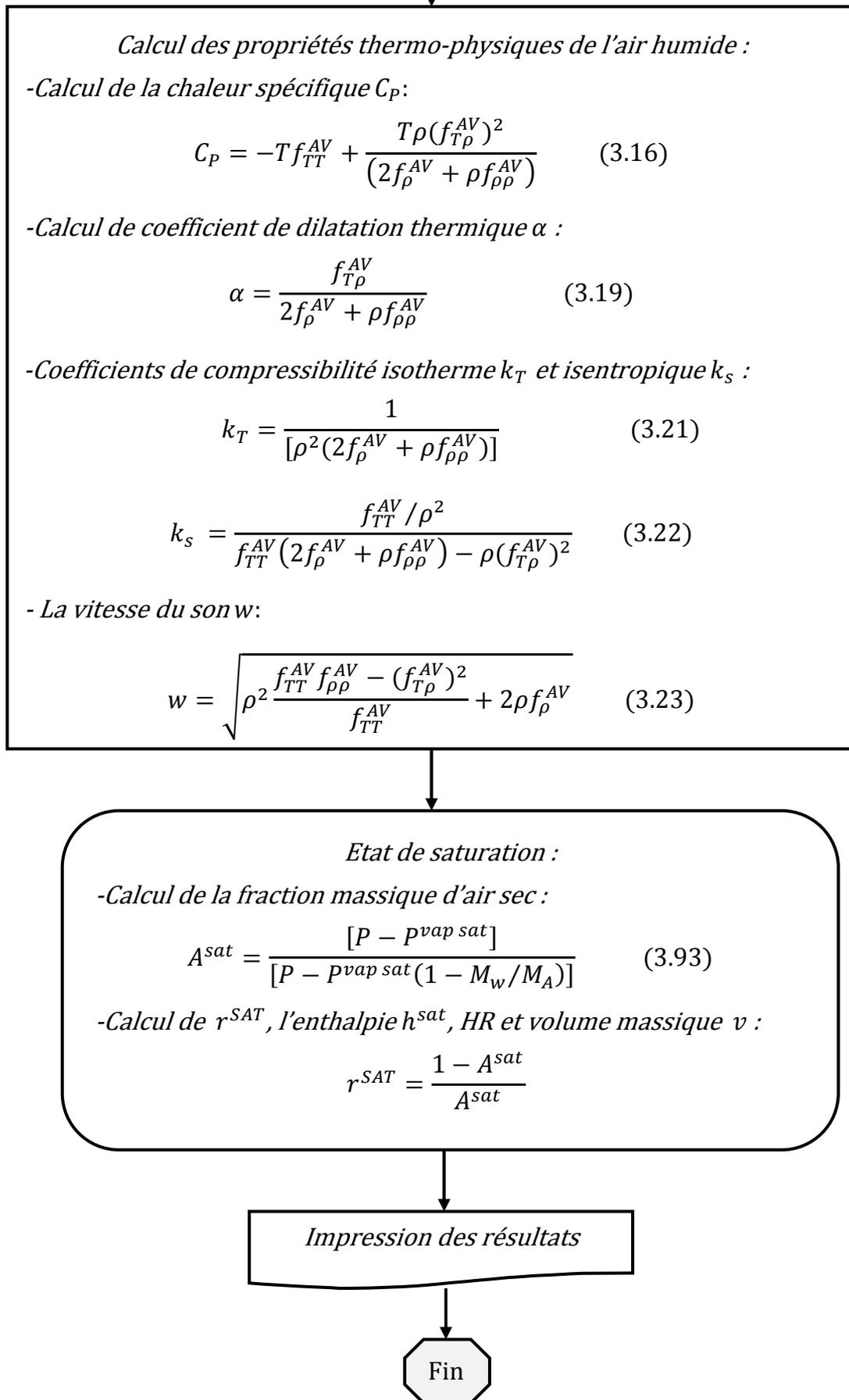


Figure 4.1. Organigramme du code de calcul.

4.4. Description de l'input :

Les entrées de programme sont :

Humidité absolue r [kge/kgas].

La température sèche T [K].

4.5. Description de l'output :

Les sorties du code sont stockées dans des fichiers .OUT. Dans ces fichiers, les premières sorties sont les données d'entrées. Ensuite vient la liste des propriétés de l'air humide et de sa vapeur d'eau. Toutes ces variables sont présentées de la manière suivante :

r : Humidité absolue [kge/kgas]

T : Température [K]

A^{sat} : La fraction massique de l'air à la saturation

P_{vs} : Pression de vapeur saturante [kPa]

r^{sat} : Humidité absolue à la saturation [kge/kgas]

HR : Humidité relative [%]

v : Le volume massique [m^3/kg]

h : Enthalpie spécifique de l'air humide [kJ/kg]

s : Entropie spécifique de l'air humide [kJ/kg K]

u : Energie interne de l'air humide [kJ/kg]

C_p : La chaleur spécifique isobare [kJ/kg K]

α : Coefficient de dilatation thermique de l'air humide [K^{-1}]

k_T : Coefficient de compressibilité isotherme [P_a^{-1}]

k_S : Coefficient de compressibilité isentropique [P_a^{-1}]

w : Vitesse du son dans l'air humide [m/s]

CHAPITRE V

RÉSULTATS OBTENUS

ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus par le programme de calcul élaboré permettant de calculer les propriétés thermophysiques de l'air humide en contact avec l'eau de mer et de la glace, pour une gamme de température allant de 193 à 473K. Les propriétés thermodynamiques de l'air humide sont calculées à partir de la fonction d'Helmholtz, f^{AV} . Cette dernière tient compte des différents constituants de l'air humide à savoir : l'énergie spécifique d'Helmholtz d'air sec, f^A , l'énergie spécifique d'Helmholtz de la vapeur d'eau, f^V et l'énergie spécifique d'Helmholtz d'interaction eau-air, f^{mix} .

Le programme de calcul a été validé en comparant les résultats fournis dans la référence [6] avec ceux du programme pour les variables A, T et ρ qui sont respectivement la fraction massique de l'air sec, la température et la masse volumique.

5.1 Validation du programme de calcul:

Pour s'assurer de la bonne mise en œuvre du programme informatique traduisant les équations ou les fonctions rapportées dans le chapitre 3, l'IAPWS a fourni des valeurs de références à retrouver par les programmeurs pour des conditions fixées de la fraction massique de l'air sec A , de température T et de masse volumique ρ .

Les valeurs à retrouver, fournies par la référence [6], sont résumées dans les tableaux 5.1, 5.3 et 5.5 pour les trois termes de l'équation d'état de l'air humide, ainsi que pour les dérivées partielles. Le tableau 5.1 fourni également des valeurs pour quelques grandeurs de l'air humide à savoir : l'enthalpie, l'énergie de Gibbs, l'entropie, potentiel chimique de l'eau, la chaleur spécifique et la vitesse de son.

La première colonne de valeurs des tableaux 5.1, 5.3 et 5.5 fourni les grandeurs de l'air humide en contact de la glace ($T=200K$) et les deux autres colonnes les grandeurs caractéristiques de l'air humide en contact de l'eau ($T=300$ et $400K$).

Tableau 5.1. Les valeurs de références de la fonction d' Helmholtz f^{AV} et ses dérivées ainsi les propriétés thermodynamiques de l'air humide [6].

Quantity	Value	Value	Value	Unit
A	0.892 247 719	0.977 605 798	0.825 565 291	kg kg^{-1}
T	200	300	400	K
ρ	$0.163\ 479\ 657 \times 10^{-4}$	$0.114\ 614\ 216 \times 10$	$0.793\ 354\ 063 \times 10$	kg m^{-3}
p	0.999 999 998	$0.100\ 000\ 000 \times 10^6$	$0.100\ 000\ 000 \times 10^7$	Pa
f^{AV}	$-0.682\ 093\ 392 \times 10^6$	$-0.927\ 718\ 178 \times 10^5$	$0.240\ 345\ 570 \times 10^5$	J kg^{-1}
$(\partial f^{AV}/\partial A)_{T,\rho}$	$-0.572\ 680\ 404 \times 10^6$	$-0.263\ 453\ 864 \times 10^3$	$0.311\ 096\ 733 \times 10^6$	J kg^{-1}
$(\partial f^{AV}/\partial T)_{A,\rho}$	$-0.405\ 317\ 966 \times 10^4$	$-0.296\ 711\ 481 \times 10^3$	$-0.106\ 891\ 931 \times 10^4$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$(\partial f^{AV}/\partial \rho)_{A,T}$	$0.374\ 173\ 101 \times 10^{10}$	$0.761\ 242\ 496 \times 10^5$	$0.158\ 878\ 781 \times 10^5$	$\text{J m}^3 \text{kg}^{-2}$
$(\partial^2 f^{AV}/\partial A^2)_{T,\rho}$	$0.920\ 967\ 684 \times 10^6$	$0.624\ 886\ 233 \times 10^7$	$0.113\ 786\ 423 \times 10^7$	J kg^{-1}
$(\partial^2 f^{AV}/\partial A \partial T)_{\rho}$	$0.915\ 653\ 743 \times 10^4$	$0.822\ 733\ 446 \times 10^4$	$0.702\ 631\ 471 \times 10^4$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$(\partial^2 f^{AV}/\partial A \partial \rho)_{T}$	$-0.213\ 442\ 099 \times 10^{10}$	$-0.450\ 004\ 399 \times 10^5$	$-0.727\ 972\ 651 \times 10^4$	$\text{J m}^3 \text{kg}^{-2}$
$(\partial^2 f^{AV}/\partial T^2)_{A,\rho}$	$-0.394\ 011\ 921 \times 10$	$-0.244\ 742\ 952 \times 10$	$-0.222\ 449\ 294 \times 10$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-2}$
$(\partial^2 f^{AV}/\partial T \partial \rho)_{A}$	$0.187\ 087\ 034 \times 10^8$	$0.254\ 456\ 302 \times 10^3$	$0.414\ 350\ 772 \times 10^2$	$\text{J m}^3 \text{kg}^{-2} \text{K}^{-1}$
$(\partial^2 f^{AV}/\partial \rho^2)_{A,T}$	$-0.228\ 880\ 603 \times 10^{15}$	$-0.664\ 465\ 525 \times 10^5$	$-0.201\ 886\ 184 \times 10^4$	$\text{J m}^6 \text{kg}^{-3}$
h	$0.189\ 712\ 231 \times 10^6$	$0.834\ 908\ 383 \times 10^5$	$0.577\ 649\ 408 \times 10^6$	J kg^{-1}
g	$-0.620\ 923\ 701 \times 10^6$	$-0.552\ 260\ 595 \times 10^4$	$0.150\ 081\ 684 \times 10^6$	J kg^{-1}
s	$0.405\ 317\ 966 \times 10^4$	$0.296\ 711\ 481 \times 10^3$	$0.106\ 891\ 931 \times 10^4$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
μ_w	$-0.109\ 950\ 917 \times 10^6$	$-0.526\ 505\ 193 \times 10^4$	$-0.106\ 748\ 981 \times 10^6$	J kg^{-1}
c_p	$0.109\ 387\ 397 \times 10^4$	$0.102\ 681\ 324 \times 10^4$	$0.123\ 552\ 454 \times 10^4$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
w	$0.291\ 394\ 959 \times 10^3$	$0.349\ 234\ 196 \times 10^3$	$0.416\ 656\ 820 \times 10^3$	m s^{-1}

Le tableau 5.2 donne et résume les résultats obtenus par le code de calcul élaboré par la fonction d'Helmholtz f^{AV} , ses dérivées ainsi que pour quelques propriétés de l'air humide dans les mêmes conditions de fraction, de température et de masse volumique fournies par la référence [6]. On remarque que notre programme donne et retrouve les mêmes résultats fourni par l'IAPWS à fin d'assister les programmeurs.

Tableau 5.2. Les valeurs obtenues pour f^{AV} et quelques propriétés de l'air humide.

Quantité	A = 0.892 247 719 kg/kg T = 200 K $\rho = 0.163\ 479\ 657\ 10^{-4}\ \text{kg/m}^3$	A = 0.977 605 798 kg/kg T = 300 K $\rho = 1.146\ 142\ 160\ \text{kg/m}^3$	A = 0.825 565 291 kg/kg T = 400 K $\rho = 7.93\ 354\ 063\ \text{kg/m}^3$
P	0.999999997996742	100000.000130524	1000000.00120351
f^{AV}	-682093.391542428	-92771.8178133197	24034.5569943072
f_A^{AV}	-572680.404393750	-263.453871500048	311096.732943111
f_T^{AV}	-4053.17966395080	-296.711480843895	-1068.91931040180
f_ρ^{AV}	3741731012.10397	76124.2495888577	15887.8781165548
f_{AA}^{AV}	920967.683890435	6248862.32874063	1137864.23100711
f_{AT}^{AV}	9156.53743007351	8227.33446095687	7026.31470962371
f_{Ap}^{AV}	-2134420985.97798	-45001.8225843474	-7293.78263643148
f_{TT}^{AV}	-3.94011921432372	-2.44742952225966	-2.22449294219778
$f_{T\rho}^{AV}$	18708703.3842040	254.456301539151	41.4350771940167
$f_{\rho\rho}^{AV}$	-228880602924996.	-66446.5524928672	-2018.86184373156
h	189712.231492233	83490.8382920013	577649.407717202
g	-620923.701297926	-5522.60596116721	150081.683556482
s	4053.17966395080	296.711480843895	1068.91931040180
μ_w	-109950.916761605	-5265.05192888322	-106748.981304847
Cp	1093.87397493724	1026.81323673479	1235.52454489401
w	291.394959407125	349.234196069615	416.656820266936

Tableau 5.3. Les valeurs d'énergie d'Helmholtz [6] de l'air sec f^A , la vapeur d'eau f^V et ses dérivées.

Quantity	Value	Value	Value	Unit
A	0.892 247 719	0.977 605 798	0.825 565 291	kg kg^{-1}
T	200	300	400	K
ρ	$0.163\,479\,657 \times 10^{-4}$	$0.114\,614\,216 \times 10^{-4}$	$0.793\,354\,063 \times 10^{-4}$	kg m^{-3}
$\rho^A = A\rho$	$0.145\,864\,351 \times 10^{-4}$	$0.112\,047\,522 \times 10^{-4}$	$0.654\,965\,578 \times 10^{-4}$	kg m^{-3}
f^A	$-0.740\,041\,144 \times 10^6$	$-0.916\,103\,453 \times 10^5$	$0.895\,561\,286 \times 10^5$	J kg^{-1}
$(\partial f^A / \partial T)_{\rho^A}$	$-0.304\,774\,177 \times 10^4$	$-0.108\,476\,220 \times 10^3$	$0.193\,271\,394 \times 10^3$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$(\partial f^A / \partial \rho^A)_T$	$0.393\,583\,654 \times 10^{10}$	$0.768\,326\,795 \times 10^5$	$0.175\,560\,114 \times 10^5$	$\text{J m}^3 \text{kg}^{-2}$
$(\partial^2 f^A / \partial T^2)_{\rho^A}$	$-0.357\,677\,878 \times 10$	$-0.239\,319\,940 \times 10$	$-0.181\,809\,877 \times 10$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-2}$
$\partial^2 f^A / \partial T \partial \rho^A$	$0.196\,791\,837 \times 10^8$	$0.256\,683\,306 \times 10^3$	$0.442\,769\,673 \times 10^2$	$\text{J m}^3 \text{kg}^{-2} \text{K}^{-1}$
$[\partial^2 f^A / \partial (\rho^A)^2]_T$	$-0.269\,828\,549 \times 10^{15}$	$-0.685\,917\,373 \times 10^5$	$-0.267\,635\,928 \times 10^4$	$\text{J m}^6 \text{kg}^{-3}$
$\rho^V = (1 - A)\rho$	$0.176\,153\,059 \times 10^{-5}$	$0.256\,669\,391 \times 10^{-1}$	$0.138\,388\,485 \times 10$	kg m^{-3}
f^V	$-0.202\,254\,351 \times 10^6$	$-0.143\,157\,426 \times 10^6$	$-0.285\,137\,534 \times 10^6$	J kg^{-1}
$(\partial f^V / \partial T)_{\rho^V}$	$-0.123\,787\,544 \times 10^5$	$-0.851\,598\,213 \times 10^4$	$-0.705\,288\,048 \times 10^4$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$(\partial f^V / \partial \rho^V)_T$	$0.523\,995\,674 \times 10^{11}$	$0.538\,480\,619 \times 10^7$	$0.129\,645\,039 \times 10^6$	$\text{J m}^3 \text{kg}^{-2}$
$(\partial^2 f^V / \partial T^2)_{\rho^V}$	$-0.694\,877\,601 \times 10$	$-0.480\,817\,011 \times 10$	$-0.411\,710\,659 \times 10$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-2}$
$\partial^2 f^V / \partial T \partial \rho^V$	$0.262\,001\,885 \times 10^9$	$0.181\,489\,502 \times 10^5$	$0.361\,784\,086 \times 10^3$	$\text{J m}^3 \text{kg}^{-2} \text{K}^{-1}$
$[\partial^2 f^V / \partial (\rho^V)^2]_T$	$-0.297\,466\,671 \times 10^{17}$	$-0.210\,184\,992 \times 10^9$	$-0.965\,539\,462 \times 10^5$	$\text{J m}^6 \text{kg}^{-3}$

Les tableaux 5.4 et 5.6 résument les résultats obtenus par notre code de calcul. Ces derniers sont en parfait concordance en les comparants respectivement aux résultats des tableaux 5.3 et 5.5. De là, nous déduisons que le code de calcul élaboré est validé et donne de bon résultats.

Tableau 5.4. Valeurs obtenues de l'énergie d'Helmholtz d'air sec f^A et de la vapeur d'eau f^V et ses dérivées.

Quantité	A = 0.892 247 719 kg/kg T = 200 K $\rho = 0.163\ 479\ 657\ 10^{-4}\ \text{kg/m}^3$	A = 0.977 605 798 kg/kg T = 300 K $\rho = 1.146\ 142\ 160\ \text{kg/m}^3$	A = 0.825 565 291 kg/kg T = 400 K $\rho = 7.93\ 354\ 063\ \text{kg/m}^3$
ρ^A	1.4586435106115E-05	1.12047522094824	6.54965577886627
f^A	-740041.144496307	-91610.3452978500	89556.1285937238
f_T^A	-3047.74176955719	-108.476220005722	193.271394378049
$f_{\rho^A}^A$	3935836536.10227	76832.6795451954	17556.0114083119
f_{TT}^A	-3.57677878411380	-2.39319939705339	-1.81809876517818
$f_{T\rho^A}^A$	19679183.6916469	256.683305489555	44.2769672874152
$f_{\rho^A\rho^A}^A$	-269828548600624.	-68591.7372520568	-2676.35928326542
ρ^V	1.76153059388476E-06	2.566693905175E-02	1.38388485113373
f^V	-202254.350543324	-143157.426078430	-285137.534331847
f_T^V	-12378.7544370105	-8515.98212864794	-7052.88048355532
$f_{\rho^V}^V$	52399567398.2841	5384806.18910109	129645.039299415
f_{TT}^V	-6.94877600728491	-4.80817011266608	-4.11710659188543
$f_{T\rho^V}^V$	262001884.949376	18148.9501517645	361.784085581635
$f_{\rho^V\rho^V}^V$	-2.9746667117539E+16	-210184992.279860	-96553.9461942474

Tableau 5.5. Les valeurs de f^{mix} et ses coefficients de la fonction d'Helmholtz [6].

Quantity	Value	Value	Value	Unit
A	0.892 247 719	0.977 605 798	0.825 565 291	kg kg^{-1}
T	200	300	400	K
ρ	$0.163\ 479\ 657 \times 10^{-4}$	$0.114\ 614\ 216 \times 10$	$0.793\ 354\ 063 \times 10$	kg m^{-3}
f^{mix}	$-0.786\ 231\ 899 \times 10^{-3}$	$-0.711\ 677\ 596 \times 10$	$-0.161\ 991\ 543 \times 10^3$	J kg^{-1}
$(\partial f^{mix}/\partial A)_{T,\rho}$	$0.641\ 550\ 398 \times 10^{-2}$	$0.311\ 844\ 020 \times 10^3$	$0.831\ 044\ 354 \times 10^3$	J kg^{-1}
$(\partial f^{mix}/\partial T)_{A,\rho}$	$0.456\ 438\ 658 \times 10^{-5}$	$0.441\ 247\ 962 \times 10^{-1}$	$0.178\ 968\ 942 \times 10$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$(\partial f^{mix}/\partial \rho)_{A,T}$	$-0.480\ 937\ 188 \times 10^2$	$-0.623\ 030\ 392 \times 10$	$-0.223\ 330\ 257 \times 10^2$	$\text{J m}^3 \text{kg}^{-2}$
$(\partial^2 f^{mix}/\partial A^2)_{T,\rho}$	$0.163\ 552\ 956 \times 10^{-1}$	$0.534\ 234\ 669 \times 10^3$	$0.135\ 814\ 949 \times 10^4$	J kg^{-1}
$(\partial^2 f^{mix}/\partial A \partial T)_{\rho}$	$-0.372\ 455\ 576 \times 10^{-4}$	$-0.195\ 073\ 372 \times 10$	$-0.916\ 854\ 756 \times 10$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$(\partial^2 f^{mix}/\partial A \partial \rho)_{T}$	$0.392\ 437\ 132 \times 10^3$	$0.274\ 155\ 508 \times 10^3$	$0.125\ 834\ 930 \times 10^3$	$\text{J m}^3 \text{kg}^{-2}$
$(\partial^2 f^{mix}/\partial T^2)_{A,\rho}$	$-0.378\ 875\ 706 \times 10^{-7}$	$-0.148\ 783\ 177 \times 10^{-3}$	$-0.536\ 741\ 578 \times 10^{-2}$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-2}$
$(\partial^2 f^{mix}/\partial T \partial \rho)_{A}$	0.279 209 778	$0.390\ 012\ 443 \times 10^{-1}$	0.249 580 143	$\text{J m}^3 \text{kg}^{-2} \text{K}^{-1}$
$(\partial^2 f^{mix}/\partial \rho^2)_{A,T}$	$-0.192\ 042\ 557 \times 10^2$	$-0.365\ 975\ 429 \times 10^{-1}$	-0.482 623 664	$\text{J m}^6 \text{kg}^{-3}$
B^{AW}	$-0.784\ 874\ 278 \times 10^{-4}$	$-0.295\ 672\ 747 \times 10^{-4}$	$-0.100\ 804\ 610 \times 10^{-4}$	$\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$
dB^{AW}/dT	$0.848\ 076\ 624 \times 10^{-6}$	$0.280\ 097\ 360 \times 10^{-6}$	$0.135\ 021\ 228 \times 10^{-6}$	$\text{m}^3 \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
$d^2 B^{AW}/dT^2$	$-0.122\ 622\ 146 \times 10^{-7}$	$-0.242\ 599\ 241 \times 10^{-8}$	$-0.839\ 901\ 729 \times 10^{-9}$	$\text{m}^3 \text{mol}^{-1} \text{K}^{-2}$
C^{AAW}	$0.105\ 493\ 575 \times 10^{-8}$	$0.801\ 977\ 741 \times 10^{-9}$	$0.672\ 018\ 172 \times 10^{-9}$	$\text{m}^6 \text{mol}^{-2}$
dC^{AAW}/dT	$-0.152\ 535\ 000 \times 10^{-11}$	$-0.196\ 103\ 457 \times 10^{-11}$	$-0.812\ 416\ 406 \times 10^{-12}$	$\text{m}^6 \text{mol}^{-2} \text{K}^{-1}$
$d^2 C^{AAW}/dT^2$	$-0.113\ 436\ 375 \times 10^{-12}$	$0.170\ 055\ 638 \times 10^{-13}$	$0.683\ 147\ 461 \times 10^{-14}$	$\text{m}^6 \text{mol}^{-2} \text{K}^{-2}$
C^{AWW}	$-0.349\ 872\ 634 \times 10^{-5}$	$-0.115\ 552\ 784 \times 10^{-6}$	$-0.200\ 806\ 021 \times 10^{-7}$	$\text{m}^6 \text{mol}^{-2}$
dC^{AWW}/dT	$0.188\ 025\ 052 \times 10^{-6}$	$0.261\ 363\ 278 \times 10^{-8}$	$0.274\ 535\ 403 \times 10^{-9}$	$\text{m}^6 \text{mol}^{-2} \text{K}^{-1}$
$d^2 C^{AWW}/dT^2$	$-0.124\ 996\ 856 \times 10^{-7}$	$-0.751\ 334\ 582 \times 10^{-10}$	$-0.491\ 763\ 910 \times 10^{-11}$	$\text{m}^6 \text{mol}^{-2} \text{K}^{-2}$

Les valeurs obtenues pour la partie f^{mix} de la fonction d'Helmholtz et ses dérivées ainsi que ses coefficients sont résumées au tableau 5.6.

Tableau 5.6. Valeurs obtenues pour f^{mix} et ses dérivées ainsi que ses coefficients.

Quantité	A = 0.892 247 719 kg/kg T = 200 K $\rho = 0.163\ 479\ 657\ 10^{-4}\ \text{kg/m}^3$	A = 0.977 605 798 kg/kg T = 300 K $\rho = 1.146\ 142\ 160\ \text{kg/m}^3$	A = 0.825 565 291 kg/kg T = 400 K $\rho = 7.93\ 354\ 063\ \text{kg/m}^3$
f^{mix}	-7.8623189887598E-04	-7.11677595911541	-161.991542850533
f_A^{mix}	6.41550397745960E-03	311.844019649569	831.044354344810
f_T^{mix}	4.5643865810168E-06	4.412479615461E-02	1.78968941726312
f_ρ^{mix}	-48.0937187861909	-6.23030391893491	-22.3330257297079
f_{AA}^{mix}	1.6355295620552E-02	534.234668594714	1358.14948503324
f_{AT}^{mix}	-3.7245557562206E-05	-1.95073371878043	-9.16854755665979
$f_{A\rho}^{mix}$	392.435305262789	272.772801899975	111.778812013177
f_{TT}^{mix}	-3.7887570602473E-08	-1.487831767539E-04	-5.36741577919E-03
$f_{T\rho}^{mix}$	0.279209777774659	3.900124432009E-02	0.249580142976397
$f_{\rho\rho}^{mix}$	-19.2042557063231	-3.65975428875E-02	-0.48262366395371
B^{AW}	-7.8487427775194E-05	-2.95672747428E-05	-1.00804610474E-05
B_T^{AW}	8.4807662422217E-07	2.800973604381E-07	1.350212284946E-07
B_{TT}^{AW}	-1.2262214610550E-08	-2.42599241306E-09	-8.39901728947E-10
C^{AAW}	1.0549357500000E-09	8.019777407407E-10	6.72018171875E-10
C_T^{AAW}	-1.5253499999999E-12	-1.96103456790E-12	-8.12416406249E-13
C_{TT}^{AAW}	-1.1343637500001E-13	1.700556378600E-14	6.831474609375E-15
C^{AWW}	-3.4987263420659E-06	-1.15552783680E-07	-2.00806020909E-08
C_T^{AWW}	1.8802505234897E-07	2.613632777541E-09	2.745354028396E-10
C_{TT}^{AWW}	-1.2499685588707E-08	-7.51334581804E-11	-4.91763909891E-12

5.2. Représentations de quelques résultats obtenus des propriétés de l'air humide à l'état de saturation.

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus comparés avec ceux obtenus dans la littérature. Dans la littérature, les grandeurs sont rapportées à la pression atmosphérique ($P=101325$ Pa).

5.2.1. Fraction massique de l'air sec

Le tableau 5.7 résume les résultats obtenus pour la fraction massique de l'air sec calculé à l'état de saturation $A=Asat$ en fonction de la température. Les résultats ont été comparé et concordent très bien avec ceux de la référence [1].

Tableau 5.7. La fraction massique de l'air sec à la saturation $Asat$ à la pression atmosphérique.

$T(^{\circ}C)$	$Asat(kg/kg)$	$T(^{\circ}C)$	$Asat(kg/kg)$	$T(^{\circ}C)$	$Asat(kg/kg)$
-80	0.9999998	-5	0.9975542	50	0.9204882
-70	0.9999974	0	0.9962730	55	0.8969805
-60	0.9999882	5	0.9946641	60	0.8671573
-50	0.9999603	10	0.9924765	65	0.8293164
-40	0.9999895	15	0.9895279	70	0.7811946
-30	0.9998752	20	0.9855974	75	0.7197086
-20	0.9993737	25	0.9804108	80	0.6405317
-15	0.9989963	30	0.9736286	85	0.5373754
-10	0.9984200	35	0.9648313	90	0.4007046
		40	0.9534994	95	0.2152876
		45	0.9389876	100	0.0536252

On remarque que la fraction massique d'air sec à la saturation diminue avec l'augmentation de la température.

5.2.2. Pression partielle, l'humidité absolue et l'enthalpie à la saturation.

Pour la même référence bibliographique citée ci-dessus, on retrouve les valeurs des grandeurs suivantes : pression partielle de la vapeur d'eau P_{VS} , humidité absolue r_s et l'enthalpie h_s en fonction de la température T .

Tableau 5.8. Propriétés principales de l'air saturé à la pression atmosphérique.

T(°C)	P_{VS} (kPa)	r_s (kg/kg)	h_s (kJ/kg)	T(°C)	P_{VS} (kPa)	r_s (kg/kg)	h_s (kJ/kg)
-80	0.000126	0.000001	-80.46190	-40	0.019139	0.000117	-39.92338
-78	0.000171	0.000001	-78.43486	-38	0.023469	0.000144	-37.84624
-76	0.000229	0.000001	-76.42409	-36	0.028673	0.000176	-35.75579
-74	0.000306	0.000002	-74.41017	-34	0.034903	0.000214	-33.64968
-72	0.000406	0.000003	-72.40094	-32	0.042338	0.000260	-31.52519
-70	0.000537	0.000003	-70.38968	-30	0.051179	0.000314	-29.37923
-68	0.000704	0.000004	-68.36878	-28	0.061657	0.000379	-27.20836
-66	0.000920	0.000006	-66.35424	-26	0.074038	0.000455	-25.00815
-64	0.001195	0.000007	-64.33889	-24	0.088618	0.000544	-22.77432
-62	0.001544	0.000009	-62.32088	-22	0.105738	0.000650	-20.50146
-60	0.001986	0.000012	-60.30053	-20	0.125778	0.000773	-18.18355
-58	0.002542	0.000016	-58.28039	-18	0.149169	0.000917	-15.81412
-56	0.003237	0.000020	-56.25868	-16	0.176393	0.001085	-13.38550
-54	0.004104	0.000025	-54.23256	-14	0.207990	0.001279	-10.88931
-52	0.005179	0.000032	-52.20506	-12	0.244561	0.001505	-8.316144
-50	0.006507	0.000040	-50.17289	-10	0.286780	0.001765	-5.655655
-48	0.008140	0.000050	-48.13655	-8	0.335390	0.002066	-2.895845
-46	0.010141	0.000062	-46.09457	-6	0.391218	0.002411	-0.023936
-44	0.012582	0.000077	-44.04567	-4	0.455177	0.002807	2.974428
-42	0.015548		-41.98939	-2	0.528274	0.003260	6.115342

Suite de tableau 5.8 (pour $T \geq 0$).

T(°C)	P _{VS} (kPa)	r _S (kg/kg)	h _S (kJ/kg)	T(°C)	P _{VS} (kPa)	r _S (kg/kg)	h _S (kJ/kg)
0	0.611616	0.003777	9.416505	44	9.117498	0.061499	191.18910
2	0.706419	0.004367	12.89699	46	10.10504	0.068898	209.83895
4	0.814019	0.005037	16.57838	48	11.18317	0.077161	230.17233
6	0.935873	0.005798	20.48406	50	12.35861	0.086398	252.34831
8	1.073571	0.006660	24.63983	52	13.63843	0.096737	276.54043
10	1.228846	0.007636	29.07375	54	15.03006	0.108327	302.93991
12	1.403580	0.008737	33.81651	56	16.54135	0.121344	331.75793
14	1.599816	0.009978	38.90199	58	18.18051	0.135998	363.22830
16	1.819766	0.011374	44.36695	60	19.95616	0.152538	397.60955
18	2.065817	0.012944	50.25135	62	21.87738	0.171268	435.19085
20	2.340557	0.014707	56.59875	64	23.95365	0.192554	476.29391
22	2.646761	0.016682	63.45687	66	26.19487	0.216852	521.27960
24	2.987417	0.018895	70.87724	68	28.61138	0.244728	570.55322
26	3.365734	0.021370	78.91611	70	31.21404	0.276901	624.57353
28	3.785151	0.024136	87.63457	72	34.01413	0.314293	683.85995
30	4.249348	0.027225	97.09923	74	37.02339	0.358109	749.00470
32	4.762257	0.030674	107.38235	76	40.25404	0.409954	820.68420
34	5.328065	0.034520	118.56205	78	43.71888	0.472020	899.68023
36	5.951262	0.038810	130.72462	80	47.43110	0.547374	986.89520
38	6.636596	0.043592	143.96240	82	51.40441	0.640444	1083.3796
40	7.389119	0.048924	158.37704	84	55.65314	0.757882	1190.3681
42	8.214192	0.054869	174.07917	86	60.19203	0.910142	1309.3149

Les valeurs obtenus par notre code de calcul sont identiques à celles de la dite référence et sont réunies dans le tableau 5.8 ci-dessus.

La figure 5.1 montre l'évolution de la pression de vapeur saturante donnée par la référence [3] et celle calculée par notre code basée sur la nouvelle formulation d'IAPWS.

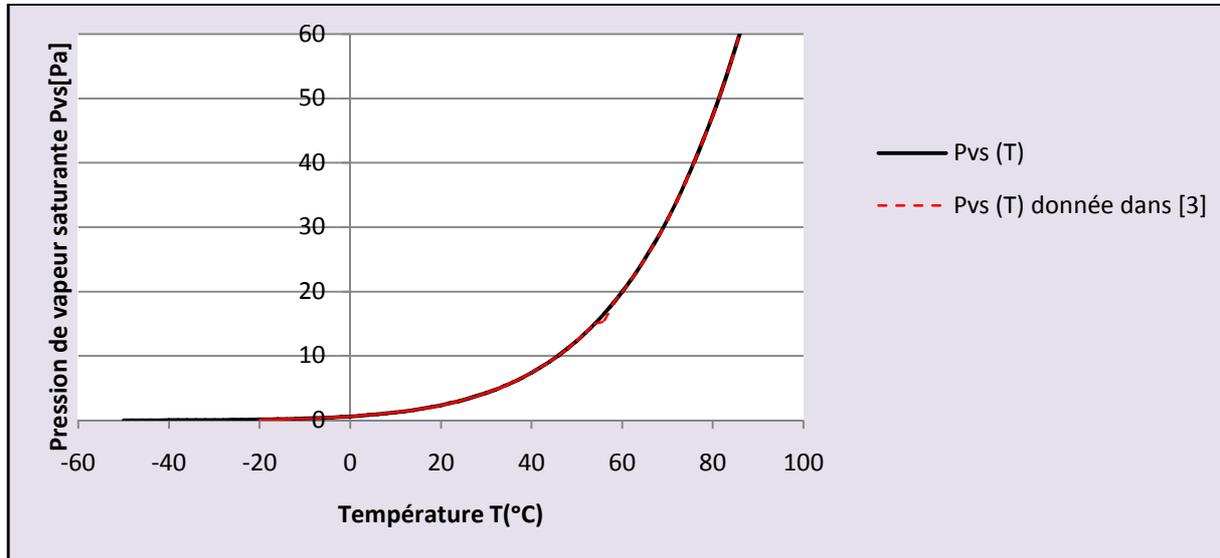


Fig. 5.1. Pression de vapeur saturante en fonction de la température.

5.2.3. Influence de la température et de la pression :

Les figures 5.2 à 5.4 montrent l'évolution de la fraction massique de l'air sec à la saturation, la teneur en eau et l'enthalpie spécifique de l'air humide saturé en fonction de la température pour différentes pressions.

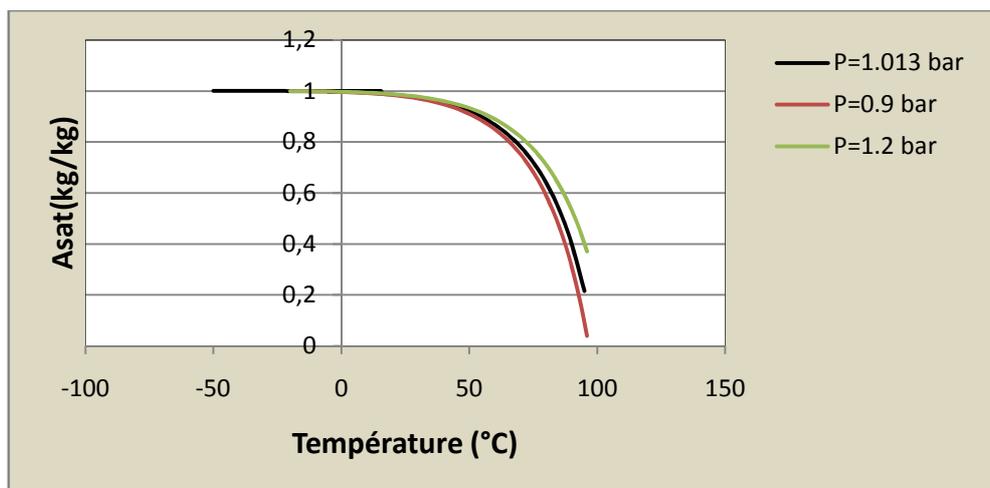


Fig 5.2. L'évolution de la fraction massique de l'air sec à la saturation.

D'après la figure 5.2, la fraction massique de l'air sec diminue avec la température. Pour une température inférieure à 50°C, l'influence de la pression est négligeable. Au delà de cette température, la fraction massique diminue avec la diminution de la pression.

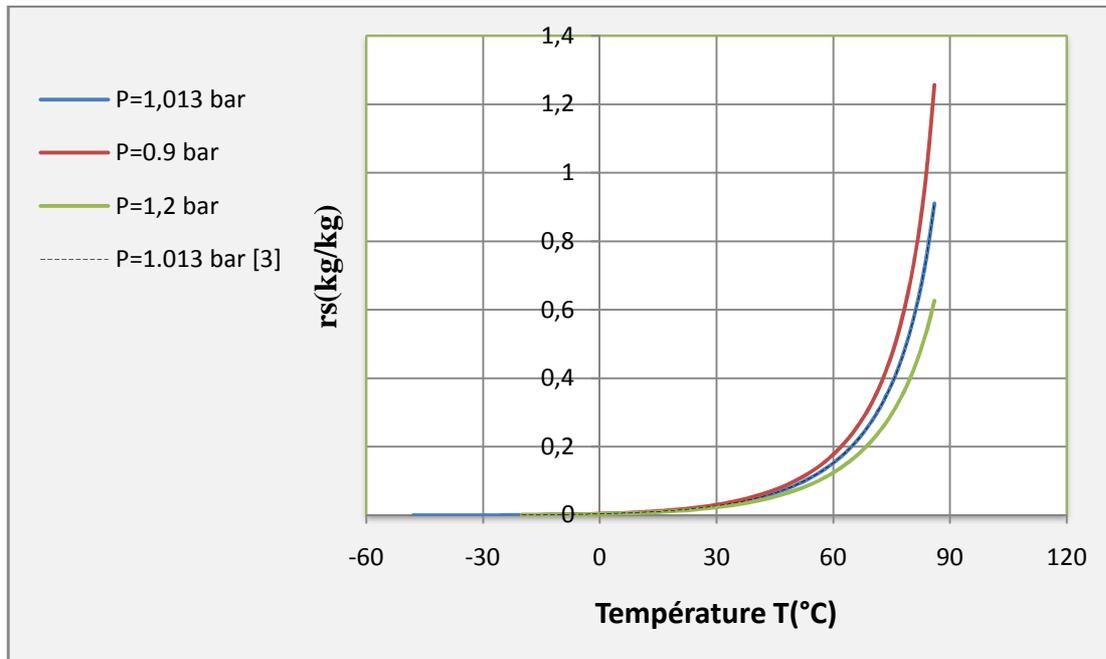


Fig.5.3. La teneur en eau de l'air saturé en fonction de la température.

La figure 5.3 représente l'évolution de la teneur en eau de l'air saturé en fonction de la température pour différentes pressions. Les résultats donnés par la référence [1] sont aussi représentés sur la figure pour comparaison.

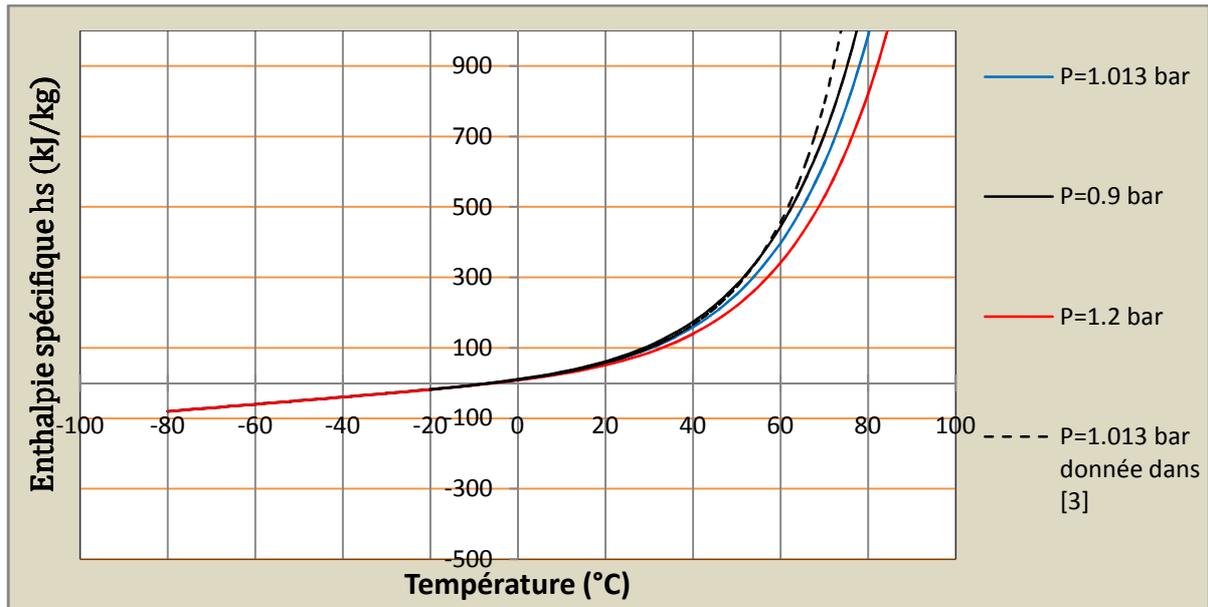


Fig. 5.4. L'enthalpie de l'air saturé en fonction de la Température.

La figure 5.4 montre l'évolution de l'enthalpie en fonction de la température pour différentes pressions.

Pour une température dépassant les 40°C, les courbes obtenues pour les différentes pressions ne sont plus confondues.

5.3. Quelques propriétés thermodynamiques de l'air humide à différentes teneur en eau:

Le tableau 5.9 résume les résultats obtenus pour l'enthalpie, l'entropie, chaleur spécifique et l'énergie interne en fonction de la température T , pour deux valeurs d'humidité absolue. Les résultats obtenus ont été présentés à la manière de la référence [4].

Tableau 5.9. Valeurs obtenues pour les propriétés thermodynamiques de l'air humide
(pour $r=0.1$ et $r=0.2\text{kg}_e/\text{kg}_{as}$).

T(°C)	Humidité absolue $r= 0.1\text{kg}_e/\text{kg}_{as}$				Humidité absolue $r= 0.2\text{kg}_e/\text{kg}_{as}$			
	h(kJ/kg)	s(kJ/kg K)	Cp(kJ/kg K)	u(kJ/kg)	h(kJ/kg)	s(kJ/kg K)	Cp(kJ/kg K)	u(kJ/kg)
-80	141.2387	3.8865	1.0795	82.7317	325.5623	4.7645	1.1438	264.5023
-70	152.0340	3.5024	1.0796	90.4979	337.0003	4.3645	1.1440	272.7791
-60	162.8299	3.1578	1.0798	98.2648	348.4390	4.0057	1.1442	281.0567
-50	173.6264	2.8478	1.0800	106.0324	359.8781	3.6829	1.1446	289.3349
-40	184.4231	2.5683	1.0804	113.8004	371.3169	3.3920	1.1451	297.6130
-30	195.2193	2.3157	1.0810	121.5683	382.7543	3.1290	1.1460	305.8904
-20	206.0141	2.0868	1.0817	129.3355	394.1885	2.8908	1.1472	314.1655
-10	216.8057	1.8789	1.0827	137.1006	405.6175	2.6745	1.1487	322.4369
0	227.5920	1.6896	1.0838	144.8618	417.0385	2.4776	1.1505	330.7025
10	238.3697	1.5170	1.0852	152.6168	428.4479	2.2980	1.1526	338.9597
20	249.1346	1.3591	1.0867	160.3620	439.8407	2.1339	1.1549	347.2047
30	259.8803	1.2144	1.0885	168.0919	451.2103	1.9834	1.1575	355.4321
40	270.5990	1.0815	1.0906	175.7997	462.5481	1.8452	1.1604	363.6354
50	281.2810	0.9591	1.0930	183.4763	473.8439	1.7180	1.1637	371.8059
60	291.9146	0.8461	1.0960	191.1105	485.0851	1.6007	1.1677	379.9333
70	302.4862	0.7416	1.0996	198.6884	496.2574	1.4922	1.1725	388.0050
80	312.9806	0.6446	1.1041	206.1940	507.3447	1.3915	1.1784	396.0068
90	323.3808	0.5543	1.1096	213.6080	518.3284	1.2980	1.1854	403.9218
100	333.6686	0.4701	1.1162	220.9084	529.1887	1.2107	1.1938	411.7308
110	343.8249	0.3912	1.1242	228.0700	539.9034	1.1292	1.2040	419.4123
120	353.8299	0.3170	1.1339	235.0644	550.4488	1.0526	1.2160	426.9419
130	363.6640	0.2470	1.1454	241.8599	560.8000	0.9806	1.2303	434.2927
140	373.3084	0.1806	1.1590	248.4211	570.9305	0.9125	1.2471	441.4351
150	382.7458	0.1173	1.1749	254.7089	580.8130	0.8479	1.2665	448.3363
160	391.9615	0.0567	1.1934	260.6799	590.4190	0.7863	1.2888	454.9605
170	400.9443	-0.0018	1.2147	266.2854	599.7189	0.7273	1.3142	461.2678
180	409.6882	-0.0585	1.2389	271.4710	608.6820	0.6705	1.3430	467.2136
190	418.1943	-0.1139	1.2665	276.1750	617.2757	0.6155	1.3753	472.7474
200	426.4744	-0.1685	1.2975	280.3270	625.4653	0.5619	1.4116	477.8117

Sur les figures 5.5 à 5.8, nous avons présenté les évolutions de l'enthalpie, l'entropie, chaleur spécifique et l'énergie interne en fonction de la température pour deux valeurs d'humidité absolue.

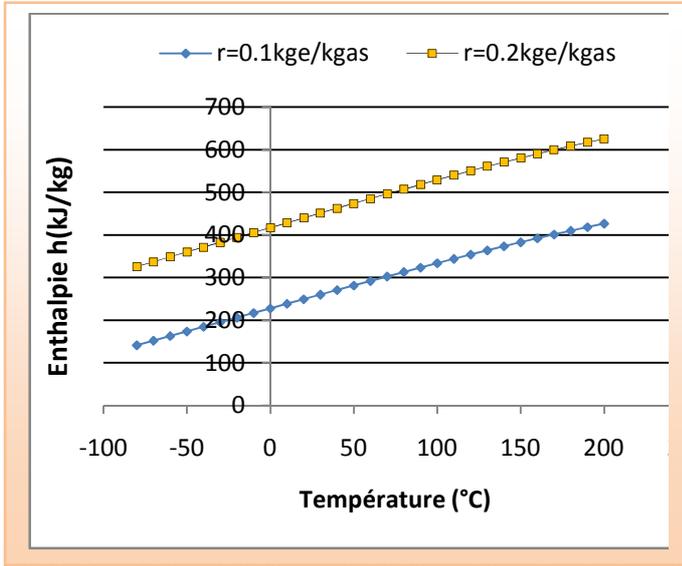


Fig.5.5. L'évolution de l'enthalpie de l'air humide

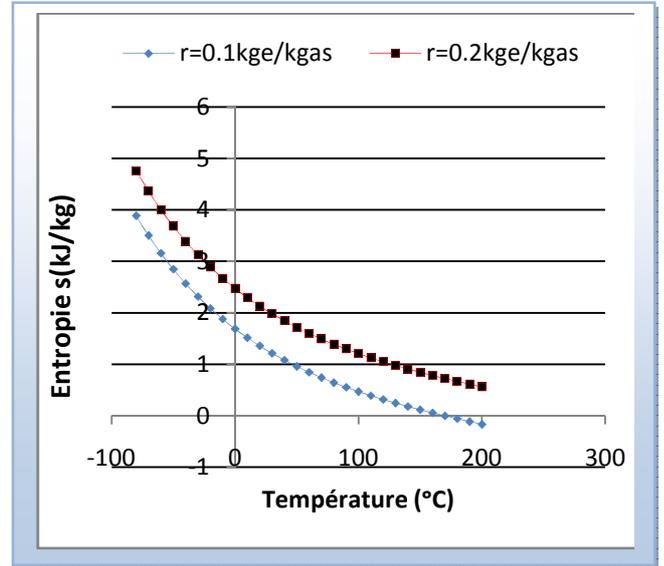


Fig.5.6. L'évolution de l'entropie de l'air humide

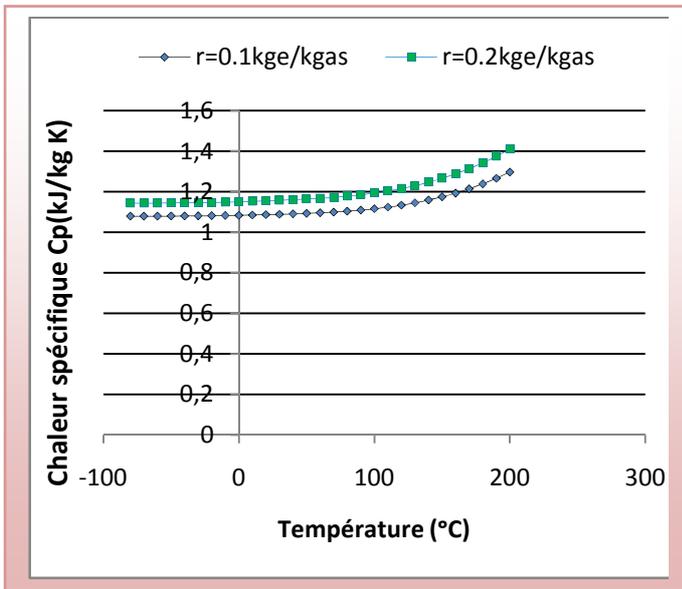


Fig.5.7. L'évolution de la chaleur spécifique de l'air humide

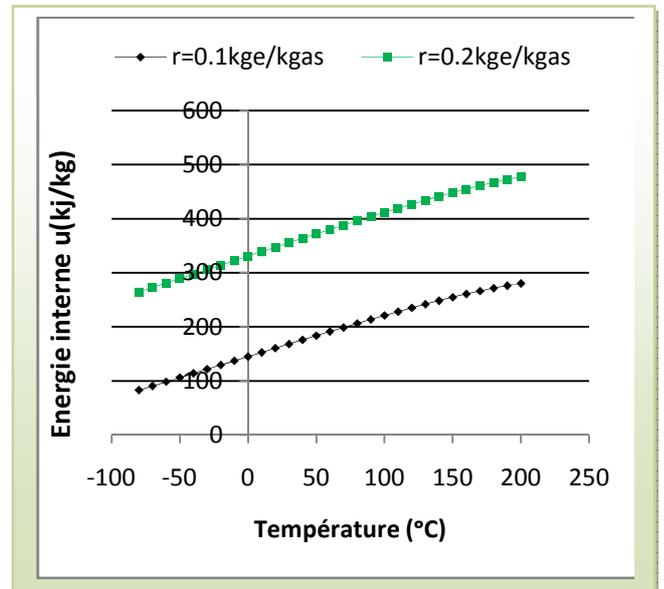


Fig.5.8. L'évolution de l'énergie interne de l'air humide

5.4. Quelques Propriétés thermophysiques de l'air humide.

Les tableaux 5.10 et 5.11 résument les valeurs obtenues pour le coefficient de dilatation thermique α , le coefficient de compressibilité isotherme K_T , le coefficient de compressibilité isentropique K_S et la vitesse de son w de l'air humide pour deux valeurs d'humidité absolue.

Tableau 5.10. Propriétés thermophysiques de l'air humide pour $r=0.1$ kge/kgas

$T(K)$	$\alpha [K^{-1}]$	$K_T \times 10^3 [Pa^{-1}]$	$K_S \times 10^3 [Pa^{-1}]$	$w [m/s]$
223.15	0.0045	21.3112	15.3337	306.5022
228.15	0.0044	12.2691	8.8282	309.9093
233.15	0.0043	7.2444	5.2130	313.2775
238.15	0.0042	4.3805	3.1524	316.6078
243.15	0.0041	2.7088	1.9494	319.9010
248.15	0.0040	1.7107	1.2312	323.1581
253.15	0.0040	1.1020	0.7932	326.3799
258.15	0.0039	0.7234	0.5207	329.5676
263.15	0.0038	0.4833	0.3479	332.7220
268.15	0.0037	0.3283	0.2364	335.8441
273.15	0.0037	0.2266	0.1631	338.9351
278.15	0.0036	0.1587	0.1143	341.9959
283.15	0.0035	0.1127	0.0812	345.0276
288.15	0.0035	0.0812	0.0585	348.0311
293.15	0.0034	0.0592	0.0426	351.0074
298.15	0.0034	0.0437	0.0314	353.9573
303.15	0.0033	0.0326	0.0235	356.8819
308.15	0.0033	0.0246	0.0177	359.7821
313.15	0.0032	0.0187	0.0135	362.6588
318.15	0.0032	0.0144	0.0104	365.5132
323.15	0.0031	0.0112	0.0081	368.3466
328.15	0.0031	0.0088	0.0063	371.1605
333.15	0.0030	0.0069	0.0050	373.9562
338.15	0.0030	0.0055	0.0040	376.7361
343.15	0.0029	0.0044	0.0032	379.5020
348.15	0.0029	0.0036	0.0026	382.2567
353.15	0.0029	0.0029	0.0021	385.0029
358.15	0.0028	0.0024	0.0017	387.7440
363.15	0.0028	0.0020	0.0014	390.4838
368.15	0.0028	0.0016	0.0012	393.2264
373.15	0.0027	0.0014	0.0010	395.9765

Tableau 5.11. Propriétés thermophysiques de l'air humide pour $r=0.01$ kge/kgas

$T(K)$	$\alpha [K^{-1}]$	$K_T \times 10^3 [Pa^{-1}]$	$K_S \times 10^3 [Pa^{-1}]$	$w [m/s]$
223.15	0.0045	2.4346	1.7392	300.3415
228.15	0.0044	1.4017	1.0013	303.6832
233.15	0.0043	0.8276	0.5913	306.9877
238.15	0.0042	0.5004	0.3575	310.2562
243.15	0.0041	0.3095	0.2211	313.4897
248.15	0.0040	0.1954	0.1396	316.6894
253.15	0.0040	0.1259	0.0900	319.8565
258.15	0.0039	0.0826	0.0590	322.9922
263.15	0.0038	0.0552	0.0394	326.0980
268.15	0.0037	0.0375	0.0268	329.1756
273.15	0.0037	0.0259	0.0185	332.2270
278.15	0.0036	0.0181	0.0130	335.2545
283.15	0.0035	0.0129	0.0092	338.2610
288.15	0.0035	0.0093	0.0066	341.2502
293.15	0.0034	0.0068	0.0048	344.2265
298.15	0.0034	0.0050	0.0036	347.1953
303.15	0.0033	0.0037	0.0027	350.1636
308.15	0.0033	0.0028	0.0020	353.1398
313.15	0.0032	0.0021	0.0015	356.1341
318.15	0.0032	0.0016	0.0012	359.1591
323.15	0.0031	0.0013	0.0009	362.2306
328.15	0.0031	0.0010	0.0007	365.3670
333.15	0.0031	0.0008	0.0006	368.5914
338.15	0.0030	0.0006	0.0004	371.9314
343.15	0.0030	0.0005	0.0004	375.4201
348.15	0.0030	0.0004	0.0003	379.0974
353.15	0.0030	0.0003	0.0002	383.0111
358.15	0.0029	0.0003	0.0002	387.2183
363.15	0.0029	0.0002	0.0002	391.7871
368.15	0.0029	0.0002	0.0001	396.7993
373.15	0.0029	0.0001	0.0001	402.3531

Après ainsi vérifié et comparé avec les données fournées dans la littérature, on va maintenant comparer avec les résultats fournis par les abaques. Comme les abaques sont pour une pression égale à la pression atmosphérique alors nous avons imposé dans notre programme de calcul, la pression à la même valeur ($P=101325$ Pa). Les résultats obtenus pour les deux valeurs d'humidité absolue sont données dans le tableau 5.12.

Tableau 5.12. Quelques Propriétés thermodynamiques de l'air humide obtenues à la pression atmosphérique ($P=101325$ Pa).

$T(^{\circ}C)$	Pour une humidité absolue de 0.005 kg/kg			Pour une humidité absolue de 0.010 kg/kg		
	h [kJ/kg]	φ [%]	v [m^3/kg]	h [kJ/kg]	φ [%]	v [m^3/kg]
-15	-2.4700	-	0.7368	9.8224	-	0.7427
-10	2.5344	-	0.7511	14.8636	-	0.7571
-5	7.5274	-	0.7653	19.8992	-	0.7714
0	12.5055	-	0.7796	24.9274	-	0.7858
5	17.4646	92.5606	0.7939	29.9462	-	0.8002
10	22.3998	65.5279	0.8082	34.9530	-	0.8146
15	27.3054	46.9551	0.8224	39.9449	93.9099	0.8290
20	32.1748	34.0200	0.8367	44.9184	68.0397	0.8434
25	37.0004	24.8942	0.8510	49.8697	49.7882	0.8578
30	41.7743	18.3764	0.8652	54.7944	36.7526	0.8721
35	46.4871	13.6668	0.8795	59.6877	27.3335	0.8865
40	51.1293	10.2259	0.8938	64.5443	20.4517	0.9009
45	55.6907	7.6852	0.9081	69.3583	15.3704	0.9153
50	60.1610	5.7905	0.9223	74.1240	11.5809	0.9297
55	64.5300	4.3638	0.9366	78.8351	8.7275	0.9441
60	68.7879	3.2798	0.9509	83.4853	6.5595	0.9584

Pour comparaison, nous avons vérifié deux points 1 et 2 du diagramme de l'air humide ce la figure 5.9 correspondant respectivement aux températures 5 et 30°C.

On remarque que les valeurs obtenues par le code correspondent parfaitement avec ceux du diagramme pour les faibles températures et pour les températures élevées, des écarts sont à noter pour l'enthalpie et l'humidité relative.

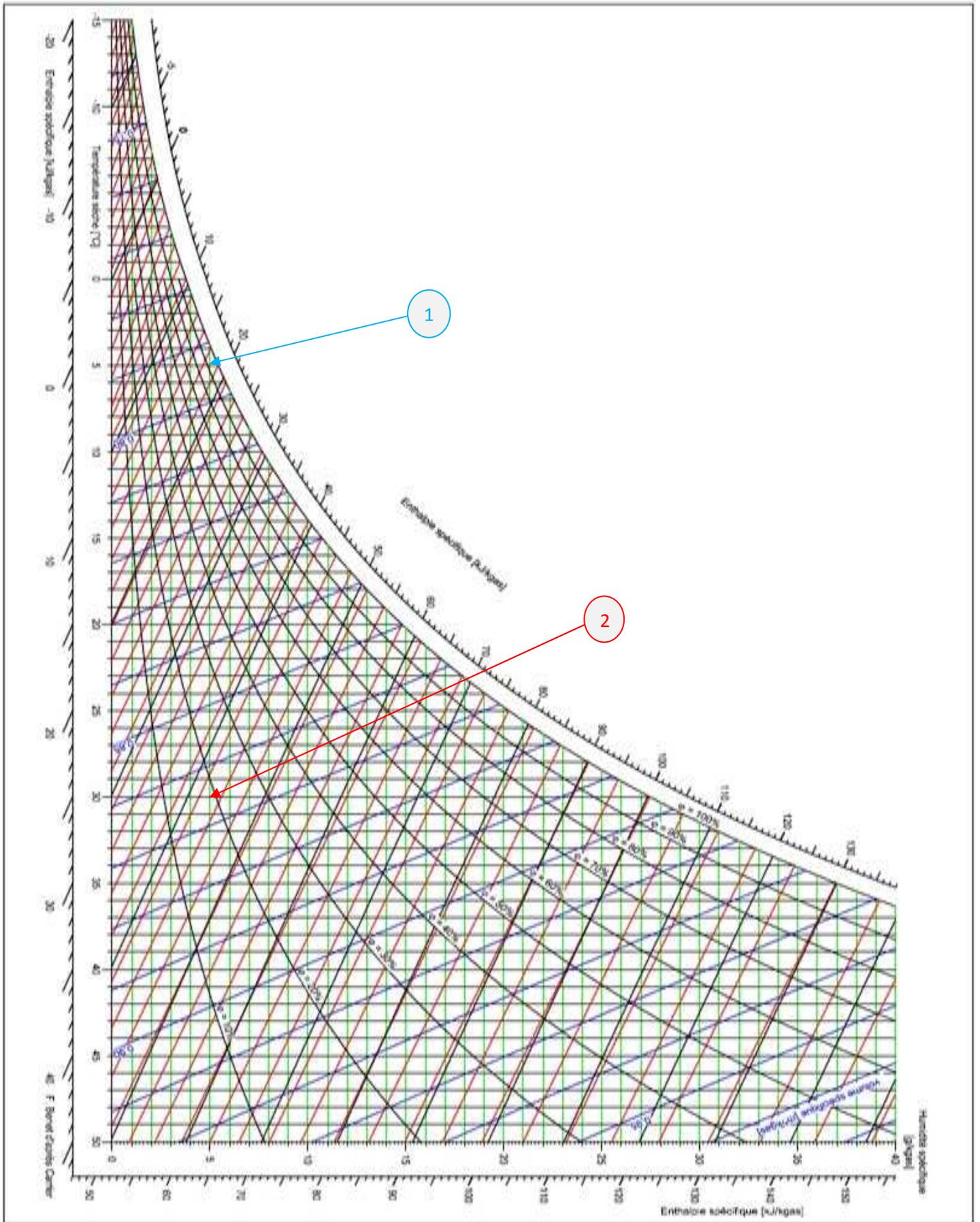


Fig.5.9. Diagramme de l'air humide (r , θ)



CONCLUSION

GÉNÉRALE

Conclusion générale :

Pour mener à bien notre travail, il a fallu en premier lieu maîtriser le langage Fortran. À l'aide de ce dernier, un programme permettant de calculer les propriétés thermophysiques de l'air humide basée sur la formulation de 2010 de l'association internationale pour les propriétés de l'eau et de sa vapeur (IAPWS) a été élaboré, testé et validé. La gamme de pression et de température du code de calcul est la suivante :

$$0 < p \leq 5\text{MPa} \text{ et } 193 < T \leq 473\text{K}$$

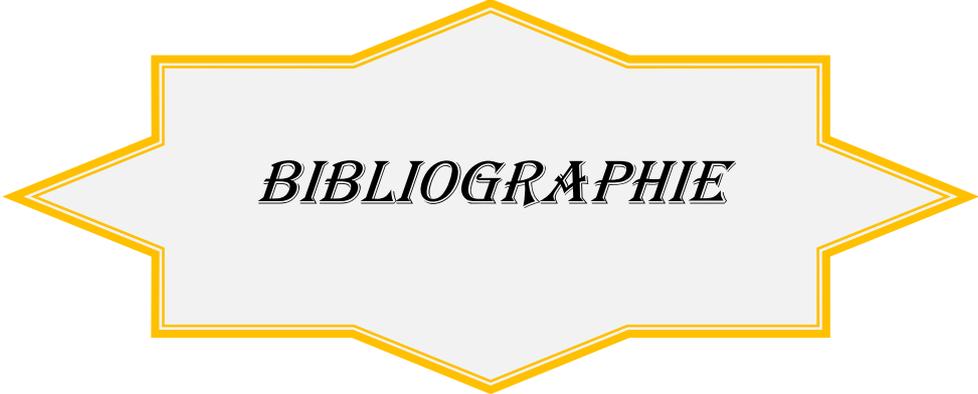
Les entrées du code sont :

-L'humidité absolue r .

-Température T .

Les valeurs fournies par l'IAPWS de la référence [6], pour but d'assister les programmeurs, ont été retrouvées. De plus, les résultats du code ont été confrontés avec d'autres sources disponibles dans la littérature. Dans notre code, pour le calcul des propriétés de l'air humide à l'état de saturation, nous avons utilisé la formule approximée donnée dans la référence [6] donnant x_A^{sat} et A^{sat} .

En perspective, pour avoir un outil complet, il est souhaitable de résoudre les équations (3.90) et (3.91) pour l'extraction de la fraction massique de l'air sec à l'état de saturation. Aussi un autre point mérite d'être approfondi, lors de calcul de la masse volumique de la vapeur d'eau à l'aide de la formulation d'IAPWS-IF95, nous avons utilisé une méthode itérative (méthode de Wegstein) pour résoudre une équation non linéaire de type $x=f(x)$. Les résultats ainsi obtenus avec cette méthode numérique ne coïncident pas parfaitement avec ceux donnés dans la référence [7].



BIBLIOGRAPHIE

Références bibliographiques

- [1] J. Gosse 'Guide technique de thermique', Dunod, 1981
- [2] Jacques, B., Michel, L. et Jean, L., 'Traitement de l'air', Parisienne 1996.
- [3] Kuzman, R. 'Handbook of thermodynamic tables and charts', McGraw-Hill Book Company (1976).
- [4] Yunns, A. C, Michel, A. B, 'Thermodynamics An Engineering Approach' Fourth Edition International 2002.
- [5] Kling, R. 'Thermodynamique générale et applications', Technip 1980.
- [6] Feistel, R., Wright, D.G., Kretzschmar, H.-J., Hagen, E., Herrmann, S., and Span, R., Ocean Sci. 6, 21 (2010).
- [7] IAPWS, Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use (2009).
- [8] IAPWS, Revised Release on the Equation of State 2006 for H₂O Ice Ih (2009).
- [9] IAPWS, Release on the IAPWS Formulation 2008 for the Thermodynamic Properties of Seawater (2008).
- [10] Lemmon, E.W., Jacobsen, R.T, Penoncello, S.G., and Friend, D.G., J. Phys. Chem.Ref. Data 29, 331 (2000).
- [11] Harvey, A.H., and Huang, P.H., Int. J. Thermophys. 28, 556 (2007).
- [12] Hyland, R.W., and Wexler, A., ASHRAE Transact. 89, 520 (1983).
- [13] IAPWS, Guideline on the Use of Fundamental Physical Constants and Basic Constants of Water (2005).
- [14] Preston-Thomas, H., Metrologia 27, 3 (1990).
- [15] Picard, A., Davis, R.S., Gläser, M., and Fujii, K., Metrologia 45, 149 (2008).
- [16] ISO Standards Handbook: Quantities and Units (International Organization for Standardization, Geneva, 1993).

- [17] IAPWS, Revised Supplementary Release on Saturation Properties of Ordinary Water Substance (1992).
- [18] IAPWS, Revised Release on the Pressure along the Melting and Sublimation Curves of Ordinary Water Substance (2008).
- [19] ISO, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (International Organization for Standardization, Geneva, 1993).



Annexe

Tableau 1 : Propriétés principale de l'air humide saturé à la pression atmosphérique.

T(°C)	P _{VS} (kPa)	r _S (kg/kg)	h _S (kJ/kg)	T(°C)	P _{VS} (kPa)	r _S (kg/kg)	h _S (kJ/kg)
0	0.610 8	0.003821	9.55	52	13.61	0.09802	306.64
2	0.705 4	0.004418	13.06	54	15.00	0.10976	339.51
4	0.812 9	0.005100	16.39	56	16.51	0.120	373.31
6	0.934 6	0.005868	20.77	58	18.15	0.1379	417.72
8	1.072 1	0.006749	25.00	60	19.92	0.1547	464.11
10	1.227 1	0.007733	29.52	62	21.84	0.1738	516.57
12	1.401 5	0.008849	34.37	64	23.91	0.1954	575.77
14	1.597 4	0.010105	39.57	66	26.14	0.2202	643.51
16	1.816 8	0.011513	45.18	68	28.55	0.2487	721.01
18	2.062	0.013108	51.29	70	31.16	0.2815	810.36
20	2.337	0.014895	57.86	72	33.96	0.3197	915.57
22	2.642	0.016892	65.02	74	36.96	0.3647	1035.6
24	2.982	0.019131	72.60	76	40.19	0.4179	1179.4
26	3.360	0.021635	81.22	78	43.65	0.4805	1348.4
28	3.778	0.024435	90.48	80	47.36	0.5593	1560.8
30	4.241	0.027558	100.57	82	51.33	0.6557	1820.5
32	4.753	0.031050	111.58	84	55.57	0.7778	2148.9
34	5.318	0.034950	123.72	86	60.50	0.9677	2578.7
36	5.940	0.039289	136.99	88	64.95	1.1524	3155.7
38	6.624	0.044136	151.60	90	70.11	1.4587	3978.4
40	7.375	0.049532	167.64	92	75.61	1.9272	5236.6
42	8.198	0.055560	185.40	94	81.46	2.7317	7395.5
44	9.010	0.062278	204.94	96	87.69	4.4267	11944.4
46	10.085	0.069778	226.55	98	94.30	-	-
48	11.16	0.078146	250.45	100	101.325	-	-
50	12.335	0.087516	277.04	-	-	-	-

Tableau 2 : Propriétés thermodynamiques de l'air humide saturé

Température		Pression P [Pa]	Masse volumique ρ [kg/m ³]	P=760 mm Hg			P=735.5 mm Hg		
T (°C)	T (K)			Masse volumique ρ [kg/m ³]	Humidité absolue r [kg/kg]	Enthalpie h [kJ/kg]	Masse volumique ρ [kg/m ³]	Humidité absolue r [kg/kg]	Enthalpie h [kJ/kg]
-20	253.15	102.970	1,396	1,395	0,00063	-18,548	1,349	0,000654	-18,485
-18	255.15	124.643	1,385	1,384	0,00077	-16,203	1,3383	0,000792	-16,136
-16	257.15	150.336	1,374	1,373	0,00093	-13,775	1,3278	0,000955	-13,716
-14	259.15	180.835	1,363	1,362	0,00111	-11,346	1,3174	0,001149	-11,225
-12	261.15	216.923	1,353	1,352	0,00134	-8,75	1,3071	0,001379	-8,642
-10	263.15	259.484	1,342	1,341	0,0016	-6,071	1,2969	0,00165	-5,954
-8	265.15	309.498	1,332	1,331	0,00191	-3,008	1,2869	0,001969	-3,144
-6	267.15	368.142	1,322	1,32	0,00277	-0,419	1,277	0,002344	-0,193
-4	269.15	436.788	1,312	1,31	0,00269	2,68	1,2672	0,002783	2,918
-2	271.15	517.203	1,303	1,301	0,00319	5,903	1,2574	0,003298	6,226
0	273.15	610.758	1,293	1,29	0,00378	9,42	1,2478	0,003898	9,747
2	275.15	705.392	1,284	1,281	0,00437	12,895	1,2382	0,004506	13,293
4	277.15	812.873	1,275	1,271	0,00503	16,58	1,2288	0,005199	17,057
6	279.15	934.574	1,265	1,261	0,00579	20,515	1,2194	0,005985	21,06
8	281.15	1072.063	1,256	1,251	0,00665	24,702	1,2101	0,006875	25,33
10	283.15	1227.106	1,248	1,242	0,00763	29,182	1,2008	0,007882	29,902
12	285.15	1401.468	1,239	1,232	0,00875	34,081	1,1916	0,009018	34,809
14	287.15	1597.405	1,23	1,223	0,00997	39,188	1,1824	0,0103	40,089
16	289.15	1816.878	1,222	1,214	0,0114	44,799	1,1732	0,011741	45,783
18	291.15	2012.238	1,213	1,204	0,0129	50,66	1,1641	0,013362	51,941
20	293.15	2336.925	1,205	1,195	0,0147	57,778	1,1549	0,015184	58,628

(Suite) Tableau 2 : Propriétés thermodynamiques de l'air humide saturé

Température		Pression P [Pa]	Masse volumique ρ [kg/m ³]	P=760 mm Hg			P=735.5 mm Hg		
T (°C)	T (K)			Masse volumique ρ [kg/m ³]	Humidité absolue r [kg/kg]	Enthalpie h [kJ/kg]	Masse volumique ρ [kg/m ³]	Humidité absolue r [kg/kg]	Enthalpie h [kJ/kg]
22	295.15	2641,912	1,197	1,185	0,0166	64,058	1,1457	0,017221	65,166
24	297.15	2982,202	1,189	1,176	0,0188	72,013	1,1365	0,019508	73,763
26	299.15	3359,758	1,181	1,166	0,0214	80,387	1,1272	0,022066	82,367
28	301.15	3778,502	1,173	1,156	0,024	89,179	1,1179	0,024926	91,758
30	303.15	4241,376	1,165	1,146	0,0272	99,646	1,1085	0,028118	102,02
32	305.15	4753,283	1,157	1,136	0,0306	110,113	1,099	0,031684	113,266
34	307.15	5318,146	1,15	1,126	0,0344	122,255	1,0895	0,035665	125,6
36	309.15	5939,888	1,142	1,116	0,0388	135,652	1,0798	0,040104	139,136
38	311.15	6624,392	1,135	1,107	0,0435	149,469	1,0699	0,04506	154,037
40	313.15	7374,601	1,128	1,097	0,0488	165,797	1,0599	0,050578	170,457
42	315.15	8198,359	1,121	1,086	0,0548	182,963	1,0498	0,056743	188,557
44	317.15	9099,591	1,114	1,076	0,0613	202,222	1,0394	0,063619	208,532
46	319.15	10085,16	1,107	1,065	0,0689	223,575	1,0288	0,071299	230,647
48	321.15	11161,93	1,1	1,054	0,077	247,021	1,018	0,079889	255,144
50	323.15	12334,8	1,093	1,043	0,0862	273,398	1,0069	0,089491	282,383
52	325.15	13612,61	1,086	1,031	0,0966	302,706	0,9956	0,100256	312,691
54	327.15	15002,21	1,08	1,019	0,108	334,944	0,9839	0,112339	346,504
56	329.15	15509,5	1,073	1,007	0,121	370,95	0,9719	0,12591	384,285
58	331.15	18146,23	1,067	0,995	0,136	412,401	0,9595	0,141227	426,723
60	333.15	19917,31	1,06	0,981	0,152	456,361	0,9467	0,158524	474,448

(Suite et fin) Tableau 2 : Propriétés thermodynamiques de l'air humide saturé

Température		Pression P [Pa]	Masse volumique ρ [kg/m ³]	P=760 mm Hg			P=735.5 mm Hg		
T (°C)	T (K)			Masse volumique ρ [kg/m ³]	Humidité absolue r [kg/kg]	Enthalpie h [kJ/kg]	Masse volumique ρ [kg/m ³]	Humidité absolue r [kg/kg]	Enthalpie h [kJ/kg]
62	335.15	21839,41	1,054	0,968	0,171	506,603	0,9335	0,17821	528,542
64	337.15	23908,61	1,048	0,954	0,192	565,218	0,9199	0,20053	589,715
66	339.15	26144,53	1,041	0,939	0,216	632,207	0,9058	0,2261	659,563
68	341.15	28556,96	1,035	0,924	0,244	707,569	0,8912	0,25554	739,757
70	343.15	31155,73	1,029	0,909	0,276	795,492	0,876	0,28962	832,432
72	345.15	33960,43	1,023	0,863	0,314	895,975	0,8602	0,32951	940,615
74	347.15	36961,26	1,017	0,877	0,357	1013,206	0,8439	0,37623	1067,161
76	349.15	40187,65	1,011	0,859	0,408	1151,37	0,8269	0,43188	1217,622
78	351.15	43649,4	1,006	0,842	0,47	1318,842	0,8092	0,49892	1398,651
80	353.15	47356,31	1	0,823	0,545	1519,808	0,7908	0,58086	1619,701
82	355.15	51328,01	0,994	0,803	0,639	1779,39	0,7716	0,68308	1895,134
84	357.15	55574,29	0,989	0,783	0,756	2093,4	0,7516	0,8135	2246,289
86	359.15	60104,96	0,983	0,762	0,908	2499,52	0,7308	0,98482	2707,281
88	361.15	64949,44	0,978	0,74	1,11	3035,43	0,7091	1,21987	3339,383
90	363.15	70107,74	0,973	0,718	1,4	3818,362	0,6865	1,55969	4252,868
92	365.15	75609,27	0,967	0,694	1,83	4961,358	0,6629	2,0942	5685,716
94	367.15	81463,84	0,962	0,669	2,546	6887,286	0,6383	3,052	8262,231
96	369.15	87691,06	0,957	0,643	3,99	10781,01	0,6126	5,257	14185,31
98	371.15	94300,75	0,951	0,616	8,35	22441,25	0,5859	-	41900,68
100	373.15	10132,231	0,947	0,589	-	-	-	-	-