

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



UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION  
DÉPARTEMENT DU GÉNIE MÉCANIQUE

# *Mémoire de Fin d'Études*

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME  
DE MASTER PROFESSIONNEL EN GÉNIE MÉCANIQUE  
SPÉCIALITÉ : ÉNERGÉTIQUE  
OPTION : FROID, CHAUFFAGE ET CLIMATISATION

## **Thème**

**CONCEPTION D'UN OUTIL DE CALCUL DES  
PROPRIÉTÉS PSYCHROMÉTRIQUES DE L'AIR  
HUMIDE**

*Proposé et dirigé par :*

*M<sup>r</sup> M. AMOKRANE*

*Réalisé par :*

*M<sup>elle</sup> Samia BAZIZ*

*Promotion : 2019/2020*

# Remerciements

*Ce travail est le fruit de la combinaison d'efforts de plusieurs personnes. Je remercie tout d'abord le tout puissant qui, par sa grâce m'a permis d'arriver au bout de mes efforts en me donnant la santé, la force, le courage et en me faisant entourer des merveilleuses personnes dont je tiens à remercier ;*

*Mon Directeur de mémoire, Dr Mounir AMOKRANE pour son encadrement sans faille, son soutien moral, sa rigueur au travail, ses multiples conseils, ses orientations et sa disponibilité malgré ses multiples occupations ;*

*Je tiens à remercier sincèrement les membres du jury qui me font le grand honneur d'évaluer ce travail ;*

*Tous les enseignants de l'**Aéronautique** (Université Saad DAHLEB –Blida-) et de **Génie Mécanique** (Université de Mouloud MAMMERI –Tizi-Ouzou-), en particulier ceux de **Propulsion Avion** et **FCC**, pour leurs enseignements de qualité et leurs conseils qui m'ont permis de poursuivre mon itinéraire académique jusqu'à présent ;*

*Mes Parents et mes deux sœurs pour leurs aides et encouragement durant tout mon parcours ;*

*Mes camarades, ami(e)s et connaissances ;*

*Tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'accomplissement de ce travail.*



# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes très chers **Parents***

*Je vous dois ce que je suis aujourd'hui grâce à votre amour, à votre patience et vos innombrables sacrifices.*

*Que ce travail, soit pour vous une petite compensation et reconnaissance envers ce que vous avez fait d'incroyable pour moi.*

*Que dieu, le tout puissant, vous préserve et vous procure santé et longue vie afin que je puisse à mon tour vous combler.*

*À mes très chères sœurs **Roza, Amina** et mon neveu **Wassim***

*Aucune dédicace ne serait exprimer assez profondément ce que je ressens envers vous. Je vous dirais tout simplement, un grand merci, je vous aime autant.*

*À mes très chers **ami(e)s***

*En témoignage de l'amitié sincère qui nous a liée et des bons moments passés ensemble. Je vous dédie ce travail en vous souhaitant un avenir radieux et plein de bonnes promesses.*

*À tous **les assoiffés du savoir***

*Où l'encre des savants est bien meilleur auprès de dieu que le sang des martyrs.*

**Samia BAZIZ**

# *Table des matières*

Table des matières -----	i
Liste des tableaux -----	iii
Liste des figures -----	iv
Nomenclature -----	vi
Symboles Grecs -----	vii
Introduction générale -----	1
<b>CHAPITRE I. PSYCHROMETRIE -----</b>	<b>2</b>
I.1. AIR HUMIDE -----	2
I.2. DEFINITIONS -----	3
<i>I.2.1. Air sec</i> -----	3
<i>I.2.2. Air humide</i> -----	3
<i>I.2.3. Air saturé</i> -----	3
I.3. PRESSION -----	3
<i>I.3.1. Pression partielle de la vapeur d'eau (<math>P_v</math>) et de l'air sec (<math>P_{as}</math>)</i> -----	3
<i>I.3.2. Pression totale (<math>P</math>)</i> -----	4
<i>I.3.3. Pression partielle de vapeur saturée (<math>P_{vs}</math>)</i> -----	4
<i>I.3.4. Influence de l'altitude sur la pression</i> -----	5
I.4. PROPRIETES DE L' AIR SEC -----	5
<i>I.4.1. Masse molaire (<math>M_{as}</math>)</i> -----	5
<i>I.4.2. Masse volumique (<math>\rho_{as}</math>)</i> -----	5
<i>I.4.3. Volume massique (<math>V^*_{as}</math>)</i> -----	6
<i>I.4.4. Capacité thermique massique (<math>C^*_{as}</math>)</i> -----	6
<i>I.4.5. Enthalpie massique (<math>h^*_{as}</math>)</i> -----	6
I.5. PROPRIETES DE LA VAPEUR D'EAU -----	6
<i>I.5.1. Masse volumique (<math>\rho_v</math>)</i> -----	6
<i>I.5.2. Enthalpie massique (<math>h^*_v</math>)</i> -----	6
I.6. PROPRIETES DE L' AIR HUMIDE -----	7
<i>I.6.1. Température</i> -----	7
<i>I.6.2. Humidité relative, ou hygrométrie relative (<math>\psi</math>, <math>H_r</math>)</i> -----	10
<i>I.6.3. Humidité spécifique (<math>r^s</math>)</i> -----	10
<i>I.6.4. Enthalpie spécifique (<math>h^s</math>)</i> -----	11
<i>I.6.5. Volume spécifique (<math>v^s</math>)</i> -----	11
<i>I.6.6. Volume massique (<math>v^*</math>)</i> -----	11
<i>I.6.7. Masse volumique (<math>\rho</math>)</i> -----	11

I.7. DIAGRAMMES DE L' AIR HUMIDE -----	11
I.8. ÉVOLUTIONS ELEMENTAIRES DE TRAITEMENT DE L' AIR HUMIDE -----	12
I.8.1. Chauffage sensible -----	12
I.8.2. Refroidissement sensible -----	14
I.8.3. Chauffage avec humidification -----	15
I.8.4. Refroidissement avec déshumidification-----	16
I.8.5. Refroidissement avec humidification -----	17
<b>CHAPITRE II. DESCRIPTION DE L'OUTIL DE CALCUL-----</b>	<b>20</b>
II.1. TRAVAIL ENVISAGE-----	20
II.2. DESCRIPTION DE LOGICIEL UTILISE-----	20
II.2.1. Qu'est-ce que Excel ?-----	20
II.2.2. Les fonctions utilisées dans l'outil de calcul-----	23
II.2.3. Visual Basic Application (VBA) -----	24
II.3. DESCRIPTION DE L' APPLICATION-----	28
II.3.1. Feuille 'Home'-----	28
II.3.2. Feuille 'BASMA' -----	29
II.3.3. Feuille 'Processes'-----	31
II.3.4. Feuille 'Diagram'-----	34
II.3.5. Feuille 'Help'-----	34
II.4. CONCLUSION -----	35
<b>CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSIONS -----</b>	<b>37</b>
III.1. VALIDATION DE L'OUTIL DE CALCUL 'BASMA CALCULATION'-----	37
III.1.1. Validation de l'outil de calcul avec une application web -----	37
III.1.2. Validation de l'outil de calcul avec un digramme psychrométrique -----	39
III.2. EXEMPLES DE CALCULS DES PROPRIETES PSYCHROMETRIQUES DE L' AIR HUMIDE -----	43
III.2.1. Variation de l'humidité spécifique -----	43
III.2.2. Variation de l'altitude -----	44
III.3. EXEMPLES DE CALCULS DES OPERATIONS ELEMENTAIRES DE TRAITEMENT DE L' AIR HUMIDE	46
III.3.1. Refroidissement sensible -----	46
III.3.2. Chauffage sensible -----	48
III.3.3. Refroidissement avec déshumidification-----	49
III.3.4. Chauffage avec humidification -----	51
III.3.5. Refroidissement avec humidification-----	52
Conclusion générale -----	55
Références -----	56

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1.</b> Composition actuelle de l'atmosphère près de la surface de la terre.....	2
<b>Tableau III.1.</b> Propriétés psychrométriques de l'air humide obtenues par notre outil de calcul. ....	37
<b>Tableau III.2.</b> Propriétés psychrométriques de l'air humide obtenues par l'application web. ....	38
<b>Tableau III.3.</b> Propriétés psychrométriques de l'air humide obtenues par notre outil de calcul pour une température sèche constante.....	43
<b>Tableau III.4.</b> Propriétés psychrométriques de l'air humide obtenues par notre outil de calcul pour une gamme d'altitude.....	45
<b>Tableau III.5.</b> Valeurs obtenues de l'état final des propriétés psychrométriques de l'air humide pour le refroidissement sensible.....	47
<b>Tableau III.6.</b> Valeurs obtenues de l'état final des propriétés psychrométriques de l'air humide pour le chauffage sensible.....	48
<b>Tableau III.7.</b> Valeurs obtenues de l'état final des propriétés psychrométriques de l'air humide pour le refroidissement avec déshumidification.....	50
<b>Tableau III.8.</b> Valeurs obtenues de l'état final des propriétés psychrométriques de l'air humide pour le chauffage avec humidification.....	51
<b>Tableau III.9.</b> Valeurs obtenues de l'état final des propriétés psychrométriques de l'air humide pour le refroidissement avec humidification.....	52

## *Liste des figures*

<b>Figure I.1.</b> Vue d'ensemble de l'environnement terrestre .....	3
<b>Figure I.2.</b> Température sèche dans un diagramme d'air humide .....	7
<b>Figure I.3.</b> Psychromètre de mesure des températures. ....	8
<b>Figure I.4.</b> Principe de la mesure de la température humide .....	8
<b>Figure I.5.</b> Obtention de la température humide à partir d'un diagramme d'air humide .....	9
<b>Figure I.6.</b> Schéma de principe d'un thermomètre à point de rosée .....	9
<b>Figure I.7.</b> Obtention de la température de rosée à partir d'un diagramme d'air humide .....	10
<b>Figure I.8.</b> Batterie chaude .....	12
<b>Figure I.9.</b> Schéma du dispositif de chauffage sensible .....	13
<b>Figure I.10.</b> Évolution de chauffage sensible sur le diagramme de l'air. ....	14
<b>Figure I.11.</b> Schéma du dispositif de refroidissement sensible .....	14
<b>Figure I.12.</b> Évolution de refroidissement sensible sur le diagramme de l'air. ....	15
<b>Figure I.13.</b> Schéma du dispositif de chauffage de l'air avec humidification .....	15
<b>Figure I.14.</b> Évolution de chauffage de l'air avec humidification sur le diagramme de l'air .....	16
<b>Figure I.15.</b> Schéma du dispositif de refroidissement de l'air avec déshumidification. ....	16
<b>Figure I.16.</b> Évolution de refroidissement de l'air avec déshumidification .....	17
<b>Figure I.17.</b> Schéma du dispositif de refroidissement de l'air avec humidification .....	18
<b>Figure I.18.</b> Évolution de refroidissement de l'air avec humidification .....	18
<b>Figure II.1.</b> Feuille de calcul sur Excel. ....	21
<b>Figure II.2.</b> Onglets d'une feuille Excel. ....	21
<b>Figure II.3.</b> Première étape d'enregistrer une macro. ....	25
<b>Figure II.4.</b> Deuxième étape d'enregistrer une macro. ....	25
<b>Figure II.5.</b> Troisième étape d'enregistrer une macro. ....	26
<b>Figure II.6.</b> Dernière étape d'enregistrer une macro. ....	26
<b>Figure II.7.</b> Étapes d'insertion un bouton. ....	27
<b>Figure II.8.</b> Fonctionnement d'un bouton affecter une macro. ....	27
<b>Figure II.9.</b> Modification d'une macro. ....	27
<b>Figure II.10.</b> Fenêtre Visual Basic pour Application. ....	28
<b>Figure II.11.</b> Feuille 'Home' .....	29
<b>Figure II.12.</b> Espace de valeurs à introduire. ....	29
<b>Figure II.13.</b> Rôle de chaque bouton de l'outil de calcul. ....	30
<b>Figure II.14.</b> Parties principales de l'outil de calcul. ....	30
<b>Figure II.15.</b> Interface de l'évolution de refroidissement sensible. ....	31
<b>Figure II.16.</b> Interface de l'évolution de chauffage sensible. ....	32
<b>Figure II.17.</b> Interface de l'évolution de chauffage avec humidification. ....	32
<b>Figure II.18.</b> Interface de l'évolution de refroidissement avec déshumidification. ....	33
<b>Figure II.19.</b> Interface de l'évolution de refroidissement avec déshumidification. ....	33
<b>Figure II.20.</b> Feuille 'Diagram' .....	34
<b>Figure II.21.</b> Feuille 'Help' .....	35
<b>Figure III.1.</b> a) Enthalpie spécifique, b) Pression de vapeur, c) Volume spécifique et d) l'Humidité spécifique en fonction de la température sèche. ....	39
<b>Figure III.2.</b> Position du point (20 °C, 30%) sur un diagramme psychrométrique ' <i>BASMA calculation</i> ' .....	40
<b>Figure III.3.</b> Position de point (20 °C, 30%) sur le diagramme de l'application web 'Psychrometric Chart' .....	41

<b>Figure III.4.</b> Position du point (20 °C, 30%) sur le diagramme psychrométrique ASHRAE. ....	42
<b>Figure III.5.</b> a) Pression de vapeur, b) Humidité relative, c) Volume spécifique et d) l'Enthalpie spécifique en fonction de l'humidité spécifique. ....	44
<b>Figure III.6.</b> a) Pression atmosphérique, b) Humidité spécifique, c) Volume spécifique et d) l'Enthalpie spécifique en fonction de l'altitude. ....	46
<b>Figure III.7.</b> a) Température sèche, b) Humidité relative, c) Volume spécifique et d) l'Enthalpie spécifique de l'état final en fonction de la quantité de chaleur de refroidissement. ....	47
<b>Figure III.8.</b> a) Température sèche, b) Humidité relative, c) Volume spécifique et d) l'Enthalpie spécifique de l'état final en fonction de la quantité de chaleur de chauffage. ....	49
<b>Figure III.9.</b> a) Température sèche, b) Humidité relative, c) Volume spécifique et d) l'Enthalpie spécifique de l'état final en fonction de la quantité de chaleur de refroidissement. ....	50
<b>Figure III.10.</b> a) Température sèche, b) Humidité relative, c) Volume spécifique et d) l'Enthalpie spécifique de l'état final en fonction de la quantité de chaleur fournie par la source chaude et l'injecteur de vapeur. ....	52
<b>Figure III.11.</b> a) Humidité relative, b) Humidité spécifique, c) Volume spécifique et l'Enthalpie spécifique de l'état final en fonction de la quantité de chaleur de refroidissement. ....	53
<b>Figure III.12.</b> Évolutions élémentaires de traitements de l'air humide sur le diagramme de l'air humide ' <i>BASMA calculation</i> '. ....	54

## Nomenclature

$C_p^s$	<i>Chaleur spécifique de l'air humide</i>	$[kJ / K. kg_{as}]$
$C_{as}^*$	<i>Capacité thermique massique de l'air sec</i>	$[J/kg_{as}. ^\circ C]$
$H_r$	<i>Humidité relative</i>	$[\%]$
$h_{as}^*$	<i>Enthalpie massique de l'air sec</i>	$[kJ/kg_{as}]$
$h_e^*$	<i>Enthalpie massique de l'eau</i>	$[kJ/kg_e]$
$h_v^*$	<i>Enthalpie massique de la vapeur d'eau</i>	$[kJ/kg_e]$
$h^s$	<i>Enthalpie spécifique</i>	$[kJ/kg_{as}]$
$M_{as}$	<i>Masse molaire de l'air sec</i>	$[kg_{as}/mol]$
$M_v$	<i>Masse molaire de la vapeur d'eau</i>	$[kg/mol]$
$m_{as}$	<i>Masse d'air sec</i>	$[kg_{as}]$
$m_e$	<i>Masse de l'eau</i>	$[kg_e]$
$m_v$	<i>Masse de la vapeur d'eau contenant dans l'air humide</i>	$[kg]$
$P$	<i>Pression atmosphérique</i>	$[Pa]$
$P_{as}$	<i>Pression partielle de l'air sec</i>	$[Pa]$
$P_v$	<i>Pression partielle de la vapeur d'eau</i>	$[Pa]$
$P_{vs}$	<i>Pression partielle de la vapeur d'eau saturée</i>	$[Pa]$
$Q_c$	<i>Quantité de chaleur de source chaude</i>	$[kJ]$
$Q_{cf}$	<i>Quantité de chaleur de source chaude et de l'injecteur de vapeur</i>	$[kJ]$
$Q_f$	<i>Quantité de chaleur de source froide</i>	$[kJ]$
$R$	<i>Constante universelle des gaz parfaits</i>	$[J/mol. K]$
$R_{as}$	<i>Constante massique de l'air sec</i>	$[J/kg_{as}. K]$
$R_v$	<i>Constante massique de la vapeur d'eau</i>	$[J/kg. K]$
$r^s$	<i>Humidité spécifique</i>	$[kg/kg_{as}]$
$T$	<i>Température</i>	$[K]$
$V$	<i>Volume occupé par l'air humide</i>	$[m^3]$
$V_{as}^*$	<i>Volume massique de l'air sec</i>	$[m^3/kg_{as}]$
$v^s$	<i>Volume spécifique</i>	$[m^3/kg_{as}]$
$v^*$	<i>Volume massique de l'air humide</i>	$[m^3/kg_{ah}]$
$z$	<i>Altitude</i>	$[m]$

## *Symboles Grecs*

$\theta$	<i>Température sèche</i>	$[^{\circ}\text{C}]$
$\theta_e$	<i>Température de l'eau</i>	$[^{\circ}\text{C}]$
$\theta_h$	<i>Température humide</i>	$[^{\circ}\text{C}]$
$\theta_r$	<i>Température de rosée</i>	$[^{\circ}\text{C}]$
$\theta_v$	<i>Température de la vapeur d'eau</i>	$[^{\circ}\text{C}]$
$\rho$	<i>Masse volumique de l'air humide</i>	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
$\rho_{as}$	<i>Masse volumique de l'air sec</i>	$[\text{kg}_{as}/\text{m}^3]$
$\rho_v$	<i>Masse volumique de la vapeur d'eau</i>	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
$\psi$	<i>Humidité relative</i>	$[\%]$



**INTRODUCTION**

**GÉNÉRALE**

## *Introduction générale*

Au cours de ces dernières années, l'informatique s'est imposée de manière très impressionnante dans les entreprises, ceci est dû à son apport extraordinaire dans le domaine de l'ingénierie. En effet, l'informatique désigne l'automatisation du traitement de l'information par une machine concrète ou un système abstrait. On entend également par informatique l'ensemble des sciences et techniques liées au traitement de l'information. L'informatique est de plus en plus utilisée dans tous les domaines d'activités y compris celui de la climatisation auquel nous allons d'ailleurs attacher notre étude, et ce pour un meilleur calcul des différentes propriétés requises par cette activité.

Dans ce projet de fin d'études, on est attelés à réaliser un outil permettant de calculer les propriétés psychrométriques de l'air humide pour une large gamme d'opérations. Il est à rappeler que la psychrométrie est l'étude des propriétés thermodynamiques de l'air, qui est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. En effet, l'étude de ces propriétés est d'une importance capitale pour la conception des systèmes de conditionnement d'air.

Pour la réalisation de cet outil, le choix s'est porté sur le logiciel tableur 'Excel' développé par l'éditeur Microsoft. En effet, Excel est une solution de développement logiciel adaptée pour ce type de projets. Aussi, il a été question d'utiliser un langage de programmation, à savoir, le Visual Basic pour Application.

Le présent manuscrit est scindé en trois grands chapitres, en plus d'une introduction et conclusion générales. Dans le premier chapitre, quelques définitions sur les propriétés psychrométriques de l'air humide seront présentées ainsi que les évolutions élémentaires de traitement de l'air humide. Dans le deuxième chapitre, l'outil de calcul sera décrit en expliquant les étapes de sa conception et son principe de fonctionnement. Enfin, au cours du dernier chapitre, il sera question de s'assurer du bon fonctionnement de l'outil conçu. Pour cela, les résultats obtenus avec cet outil de calcul seront confrontés à ceux de la bibliographie. De même, plusieurs exemples de calcul seront présentés et les résultats seront interprétés.



**CHAPITRE I.**

**PSYCHROMETRIE**

## **Chapitre I. Psychrométrie**

Ce chapitre est consacré à définir les notions de bases de la psychrométrie, ou les formules utilisées seront décrites en détails. Il sera aussi question de parler des diverses évolutions élémentaires de traitement de l'air humide et de ses diagrammes.

### **I.1. Air humide**

L'atmosphère est un mélange de gaz et de particules qui entourent notre planète (Figure I.1). Elle est si mince qu'on peut présenter son épaisseur relativement à la Terre comme la pelure d'une pomme comparativement à l'ensemble du fruit.

L'air constituant l'atmosphère qui entoure la planète terre est généralement un mélange de gaz et de particules qui sont répartis comme suit, Tableau I.1.

**Tableau I.1.** Composition actuelle de l'atmosphère près de la surface de la terre [1].

<b>Nom du gaz</b>	<b>Présent</b>
<b>Azote (N<sub>2</sub>)</b>	78 %
<b>Oxygène (O<sub>2</sub>)</b>	21 %
<b>Argon (A)</b>	0.93 %
<b>Vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O)</b>	0-4 %
<b>Gaz carbonique (CO<sub>2</sub>)</b>	0.033 %
<b>Néon (Ne)</b>	0.0018 %
<b>Krypton (Kr)</b>	0.000114 %
<b>Hydrogène (H)</b>	0.00005 %
<b>Oxyde d'azote (N<sub>2</sub>O)</b>	0.00005 %
<b>Xénon (Xe)</b>	0.0000087 %
<b>Ozone (O<sub>3</sub>)</b>	0-0.000001 %

On constate que l'air est essentiellement constitué d'azote et de dioxygène ; les autres gaz, qui représentent 1 % du volume, sont appelés 'gaz rares'.

À l'état naturel, l'air n'est pas dépourvu de vapeur d'eau même si cette dernière est parfois invisible. Il contient toujours une quantité variable d'humidité, on parle donc d'air humide. Il s'agit donc tout simplement d'un mélange d'air sec et de la vapeur d'eau.

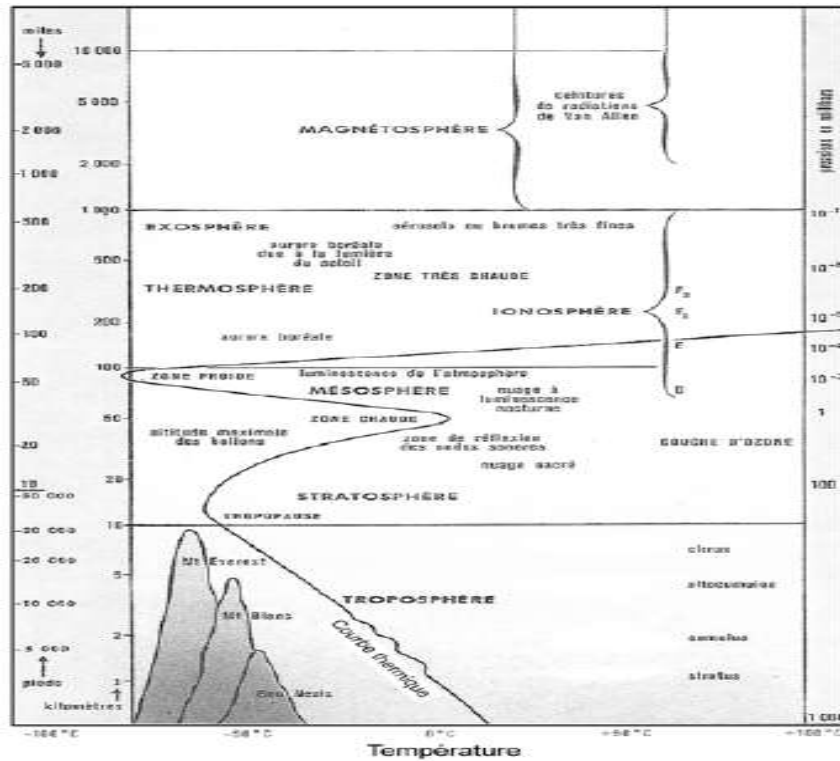


Figure I.1. Vue d'ensemble de l'environnement terrestre [1].

## I.2. Définitions

### I.2.1. Air sec

L'air sec est un mélange de gaz contenant principalement de l'azote (78.09 %), de l'oxygène (20.95 %), de l'argon (0.93 %), du gaz carbonique (inférieur à 1 %) et en faible quantité, un certain nombre d'autres gaz (néon, hélium, krypton, hydrogène, etc...) [2].

### I.2.2. Air humide

L'air humide est défini comme un mélange en proportion variable d'air sec et de vapeur d'eau [2].

### I.2.3. Air saturé

L'air saturé représente l'air humide à une température et à une pression donnée dont la quantité de vapeur d'eau est maximale. Toute quantité d'eau ajoutée à de l'air saturé apparaît sous forme condensée (liquide ou glace) [2].

## I.3. Pression

### I.3.1. Pression partielle de la vapeur d'eau ( $P_v$ ) et de l'air sec ( $P_{as}$ )

D'après l'équation d'état des gaz parfaits, on écrit la pression partielle de la vapeur d'eau comme suit [3] :

$$P_v = \frac{m_v R_v T}{V} [Pa] \quad (I.1)$$

Et celle de l'air sec :

$$P_{as} = \frac{m_{as} R_{as} T}{V} [Pa] \quad (I.2)$$

Avec :

$m_v$  : La masse de vapeur d'eau contenue dans l'air humide [Kg] ;

$m_{as}$  : La masse de l'air sec [Kg<sub>as</sub>] ;

$T$  : La température [K] ;

$V$  : Le volume occupé par l'air [ $m^3$ ].

$R_v$  et  $R_{as}$  : Les constantes massiques de la vapeur d'eau et de l'air sec, respectivement [ $J / kg.K$ ], définies comme suit :

$$R_v = \frac{R}{M_v} \quad \text{et} \quad R_{as} = \frac{R}{M_{as}} [J / kg.K] \quad (I.3)$$

Où :

$M_v$  et  $M_{as}$  représentent les masses molaires de la vapeur d'eau et de l'air sec, respectivement [ $kg/mol$ ] ;

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

### **I.3.2. Pression totale (P)**

La pression totale du mélange gazeux est constituée des pressions partielles de l'air et de la vapeur d'eau. Elle peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P = \frac{(m_v R_v + m_{as} R_{as}) T}{V} [Pa] \quad (I.4)$$

### **I.3.3. Pression partielle de vapeur saturée ( $P_{vs}$ )**

La pression partielle de vapeur saturée représente 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 [3]. La pression de vapeur saturée, notée ( $P_{vs}$ ) s'exprime comme suit :

(I. 5)

Où :

$\theta$  représente la température [ $^{\circ}C$ ].

Pour une température inférieure de  $0^{\circ}C$ , elle est déterminée à partir de l'équation suivante :

$$P_{vs} = 10^{(2.7878 + \frac{9.756 \theta}{272.7 + \theta})} [Pa] \quad (I. 6)$$

### **I.3.4. Influence de l'altitude sur la pression**

Certaines grandeurs physiques sont influencées par l'altitude, il s'agit en l'occurrence de l'humidité relative et du volume spécifique. Il existe des diagrammes psychrométriques donnant toutes les grandeurs physiques aux différentes altitudes (par exemple : niveau de la mer, 500 m, 1000 m, etc...) [1].

La pression varie en fonction de l'altitude suivant l'expression suivante [4] :

$$P(z) = 1,19745 * 10^{-8} (288,15 - 0,0065 * z)^{5,25588} [Pa] \quad (I.7)$$

Dans la précédente expression,  $z$  est l'altitude [ $m$ ].

### **I.4. Propriétés de l'air Sec**

L'air sec peut être considéré comme un gaz parfait. Par conséquent, on peut utiliser l'équation d'état du gaz parfait pour déterminer ses caractéristiques.

#### **I.4.1. Masse molaire ( $M_{as}$ )**

La masse molaire d'un gaz est la masse de 22.04 litres de ce gaz considéré à  $0^{\circ}C$  et à la pression atmosphérique normale 1.013 bar sur le nombre de mole. Elle vaut 29 g/mol pour l'air sec.

#### **I.4.2. Masse volumique ( $\rho_{as}$ )**

La masse volumique de l'air sec est définie comme la masse rapportée au volume occupé par l'air [5]. Elle est déterminée à partir de l'équation suivante :

$$\rho_{as} = \frac{m_{as}}{V} [kg_{as}/m^3] \quad (I.8)$$

En appliquant la loi des gaz parfaits, on obtient :

$$P_{as} V = nRT \Rightarrow P_{as} V = \frac{m_{as}}{M_{as}} RT \Rightarrow P_{as} = \rho_{as} \frac{R}{M_{as}} T$$

$$\rho_{as} = \frac{P_{as}}{287 T} \quad [kg_{as}/m^3] \quad (I.9)$$

#### **I.4.3. Volume massique ( $V^*_{as}$ )**

Le volume massique de l'air sec est le volume occupé par l'unité de masse d'air sec [5]. Il s'exprime comme suit :

$$V^*_{as} = \frac{287 T}{P_{as}} \quad [m^3/kg] \quad (I.10)$$

#### **I.4.4. Capacité thermique massique ( $C^*_{as}$ )**

La capacité thermique massique est la quantité de chaleur qu'il faut fournir (ou soustraire) à l'unité de masse d'air sec pour augmenter (ou réduire) sa température de 1 °K [6]. Elle est définie par la relation suivante :

$$C^*_{as} = \frac{\Delta H}{m_{as} \Delta\theta} \quad [J/kg \text{ } ^\circ C] \quad (I.11)$$

Dans la précédente équation,  $\Delta H$  et  $\Delta\theta$  représentent la différence de l'enthalpie et de la température entre l'état initial et l'état final, respectivement.

#### **I.4.5. Enthalpie massique ( $h^*_{as}$ )**

La quantité d'énergie thermique contenue dans 1 kg d'air sec est appelée l'enthalpie massique de l'air sec et est noté ( $h^*_{as}$ ) [7]. Elle est donnée par la relation suivante :

$$h^*_{as} = 1.006 \theta \quad [kJ/kg_{as}] \quad (I.12)$$

### **I.5. Propriétés de la vapeur d'eau**

#### **I.5.1. Masse volumique ( $\rho_v$ )**

La masse volumique de la vapeur d'eau est un rapport entre la pression de vapeur et la température ambiante, on peut l'écrire comme suit :

$$\rho_v = \frac{P_v}{461.51 T} \quad [kg/m^3] \quad [8] \quad (I.13)$$

Avec :

$P_v$  La pression partielle de la vapeur d'eau [Pa].

#### **I.5.2. Enthalpie massique ( $h^*_v$ )**

L'enthalpie massique de la vapeur d'eau est donnée par la relation suivante :

$$h^*_v = 2500.8 + 1.8266 \theta \quad [kJ/kg_v] \quad [8] \quad (I.14)$$

## I.6. Propriétés de l'air humide

L'air de l'environnement est considéré comme un mélange de gaz parfaits. Nous utilisons donc la loi de Dalton qui stipule que la pression, l'énergie interne, l'enthalpie et l'entropie d'un mélange d'un gaz parfait sont respectivement égales à la somme des pressions partielles, des énergies internes partielles, des enthalpies partielles et des entropies partielles qu'auraient les gaz constituants s'ils occupaient seuls le volume total à la température du mélange [9].

### I.6.1. Température

#### I.6.1.a. Température sèche ( $\theta$ )

C'est la température mesurée par un thermomètre dit « sec », elle s'exprime en degré Celsius [ $^{\circ}\text{C}$ ] et peut être assimilée à un niveau d'énergie [1].

Sur un diagramme d'air humide, la température sèche de l'air est indiquée sur l'axe horizontal, gradué en [ $^{\circ}\text{C}$ ], comme le montre la Figure I.2.

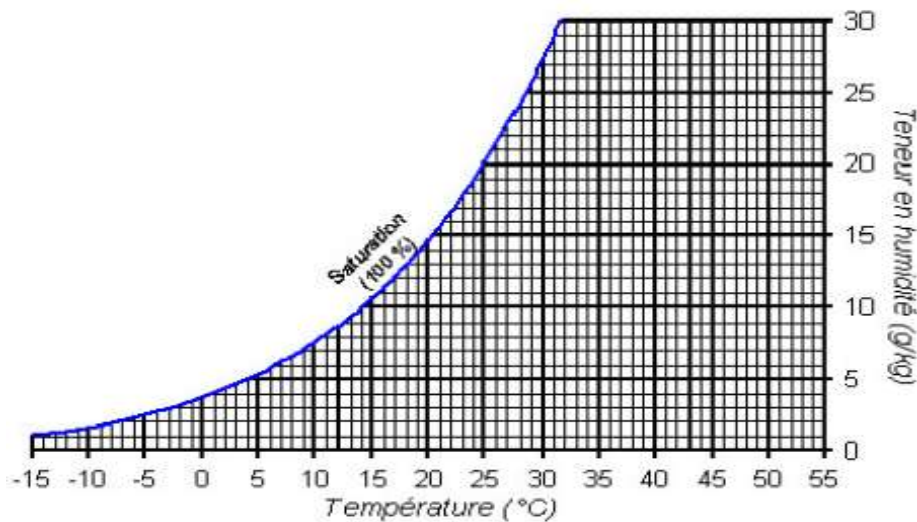


Figure I.2. Température sèche dans un diagramme d'air humide [6].

#### I.6.1.b. Température humide ( $\theta_h$ )

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. 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 [6] est appelé Psychromètre (figure I.3), noté  $\theta_h$  en [ $^{\circ}\text{C}$ ] ou  $T_h$  en [K].

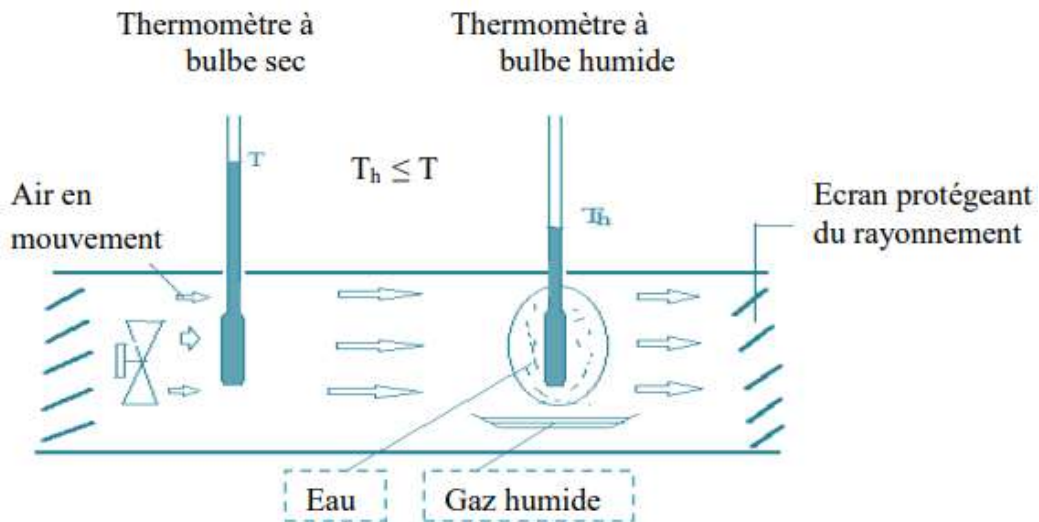


Figure I.3. Psychromètre de mesure des températures.

Sur la Figure I.4, la température sèche est de 26 °C et la température humide est de 15 °C. Cet air est relativement sec : son hygrométrie relative est de 30 %.

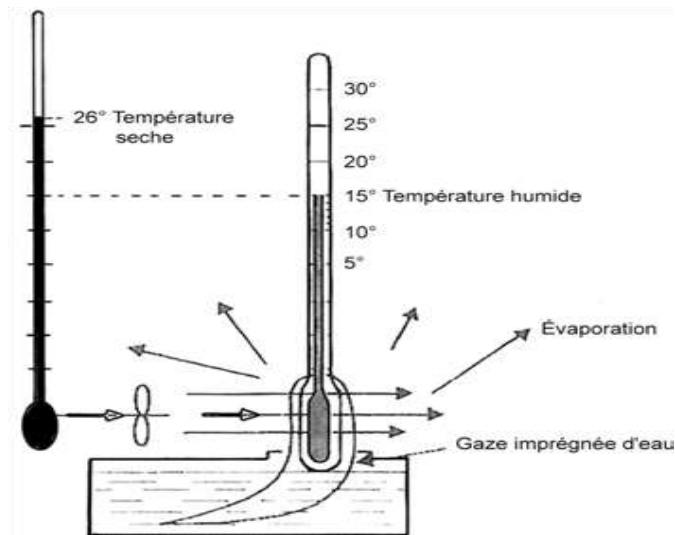


Figure I.4. Principe de la mesure de la température humide [1].

L'exemple illustré sur le digramme d'air humide (Figure I.5) montre un air dont la température sèche est 30 °C et l'hygrométrie 30 %. Par conséquent, la température humide est de l'ordre de 18 °C (point A).

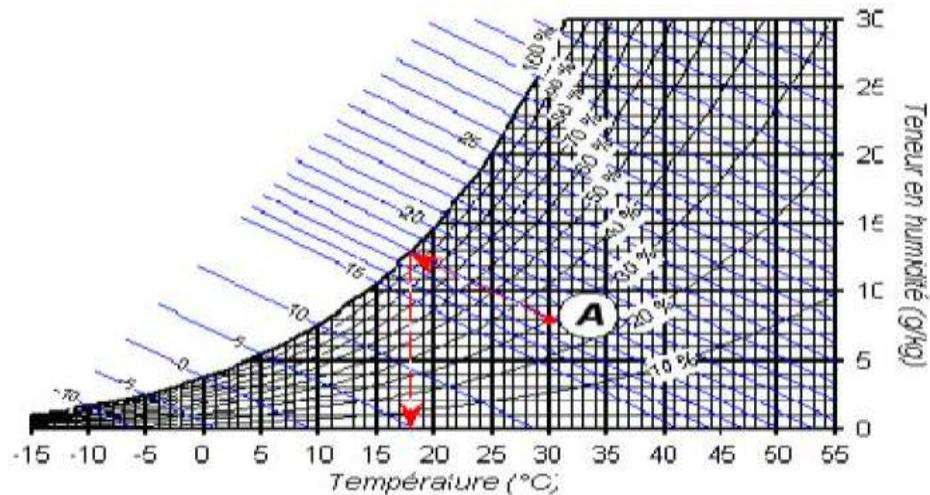


Figure I.5. Obtention de la température humide à partir d'un diagramme d'air humide [9].

I.6.1.c. Température de rosée ( $\theta_r$ )

La température de rosée s'obtient en saturant l'air en le refroidissant à poids d'eau constant. Son unité de mesure est le [°C].

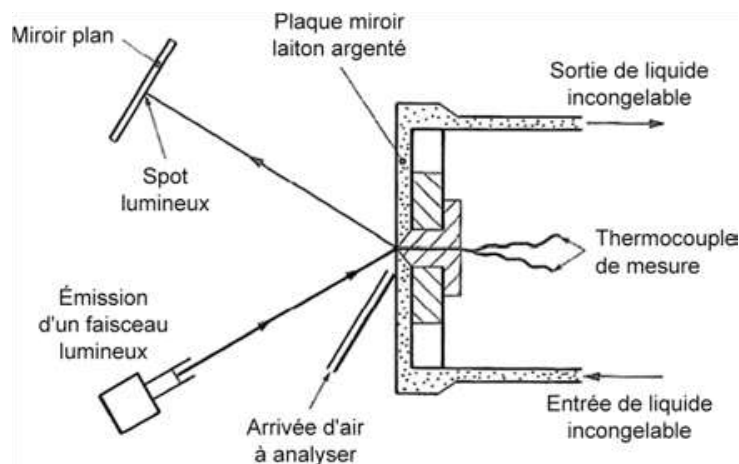


Figure I.6. Schéma de principe d'un thermomètre à point de rosée [1].

La Figure I.6 montre un schéma de principe d'un thermomètre à point de rosée, ou un faisceau lumineux est réfléchi sur un miroir plan par une plaque en laiton argenté. La plaque de laiton est progressivement refroidie. A l'instant où se produit un début de condensation sur la plaque de laiton, le faisceau n'est plus réfléchi, la température mesurée par le thermocouple donne alors la température de rosée de l'air analysé [1].

La Figure I.7 illustre la manière de lire la température de rosée d'un air (point A) dont la température sèche est 30 °C et l'hygrométrie 30 %. Dans ce cas, la température de rosée de l'air

est équivalente à 11 °C. Si cet air est refroidi à moins de 11 °C, on y verra apparaître du brouillard constitué de fines gouttelettes d'eau en suspension.

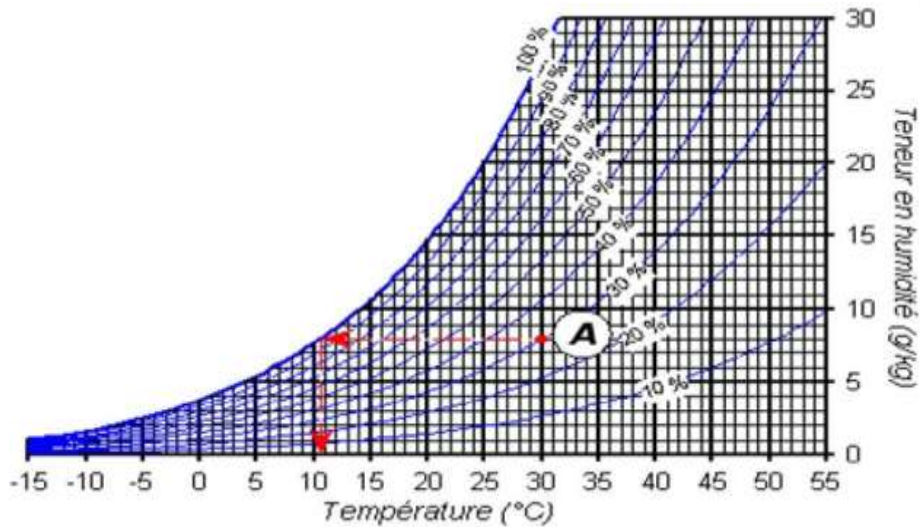


Figure I.7. Obtention de la température de rosée à partir d'un diagramme d'air humide [9].

### I.6.2. Humidité relative, ou hygrométrie relative ( $\psi$ , $H_r$ )

L'humidité relative est le rapport de la masse de la vapeur d'eau contenue dans un kilogramme d'air sec à la masse de la vapeur d'eau contenue dans ce même kilogramme d'air saturé à la même température [1]. L'humidité relative s'exprime en pourcentage [%] et est définie comme suit :

$$\psi = \frac{P_v}{P_{vs}} [\%] \quad (\text{I.15})$$

Une hygrométrie de 100 % correspond à la saturation, par contre, une hygrométrie de 0 % correspond à un air totalement sec.

### I.6.3. Humidité spécifique ( $r^s$ )

C'est la quantité d'eau que contient un kilogramme 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 [6]. Ce rapport est aussi appelé teneur en humidité et peut s'exprimer comme suit :

$$r^s = \frac{m_v}{m_{as}} [kg/kg_{as}] \quad (\text{I.16})$$

On peut également écrire :

$$r^s = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} [kg/kg_{as}] \quad (\text{I.17})$$

#### I.6.4. Enthalpie spécifique ( $h^s$ )

L'enthalpie spécifique représente la quantité de chaleur sensible et latente contenue dans un air humide dont la masse d'air sec est de 1 kg. Elle peut s'écrire comme suit :

$$h^s = 1.006\theta + r^s(2500.8 + 1.8266\theta) [kJ/kg_{as}] [8] \quad (I.18)$$

#### I.6.5. Volume spécifique ( $v^s$ )

C'est le volume occupé par le poids d'un kilogramme d'air dans un ensemble de conditions spécifiques. [11]. Il s'exprime en  $[m^3/kg \text{ d'air sec}]$  et est défini comme suit :

$$v^s = 461.24 (0.622 + r^s) \frac{T}{P} [m^3/Kg_{as}] \quad (I.19)$$

#### I.6.6. Volume massique ( $v^*$ )

Le volume massique est l'inverse de la masse volumique. Il s'exprime comme suit :

$$v^* = 461.24 (0.622 + r^s) \frac{T}{(1 + r^s) P} [m^3/kg_{ah}][8] \quad (I.20)$$

#### I.6.7. Masse volumique ( $\rho$ )

La masse volumique de l'air humide est la somme des masses volumiques d'air sec et de vapeur d'eau composant cet air humide [11]. Son expression est la suivante :

$$\rho = \frac{m_{as} + m_v}{V} \Rightarrow \rho = \frac{P_{as}}{287 T} + \frac{P_v}{462 T} [kg/m^3] \quad (I.21)$$

On peut aussi l'écrire :

$$\rho = \frac{P}{287 T} - 1.32 * 10^{-3} \frac{\psi P_{vs}}{T} [kg/m^3] \quad (I.22)$$

### I.7. Diagrammes 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. Ces diagrammes psychrométriques regroupent toutes les grandeurs physiques décrites ci-dessus. La plupart des diagrammes donnent les grandeurs physiques pour une pression atmosphérique de 101 325 Pa (pression au niveau de la mer).

Ce diagramme est construit par rapport à deux axes principaux. On distingue principalement deux types de diagrammes, dont les représentations sont sensiblement équivalentes :

- **Diagramme de Mollier** à axes obliques, qui donne le rapport de mélange en fonction de l'enthalpie massique et permet de représenter les autres caractéristiques de l'air humide (température de rosée, température humide, température sèche, etc.) ;
- **Diagramme de Carrier** ; c'est le plus couramment utilisé. Il se présente de la façon suivante : en abscisse l'axe des différentes températures mesurées dans le domaine de l'air humide (température de rosée, température humide, température sèche), et en ordonnée l'axe du rapport de mélange.

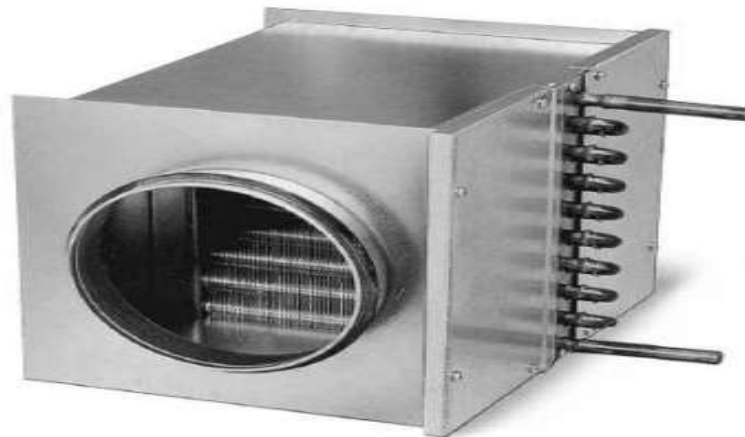
## **I.8. Évolutions élémentaires de traitement de l'air humide**

Avant de concevoir un système de conditionnement d'air, il est nécessaire de déterminer les différents processus qui font changer les propriétés psychrométriques d'un air humide. Dans ce qui suit, les principales évolutions élémentaires de l'air humide seront présentées.

### **I.8.1. Chauffage sensible**

Dans cette transformation, l'air humide subit une augmentation de sa température et de son enthalpie, mais son humidité spécifique reste constante ( $r^s = C^{ste}$ ). Le chauffage se fait en utilisant une batterie chaude qui peut être :

- Un échangeur alimenté par de l'eau chaude ;
- Une résistance électrique (pour les faibles puissances) [12].



**Figure I.8.** Batterie chaude [13].

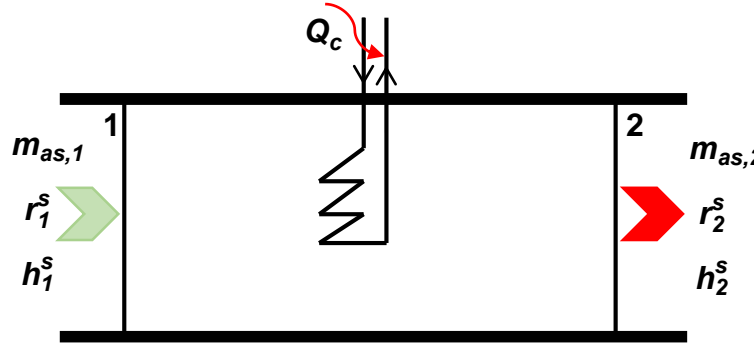


Figure I.9. Schéma du dispositif de chauffage sensible [8].

La Figure I.9 schématise un dispositif utilisé pour le chauffage de l'air humide à humidité spécifique constante. Les bilans, massique, vapeur et énergie s'écrivent comme suit :

⇨ Bilan massique :

Air sec,

$$m_{as1} = m_{as2} = m_{as} \quad (I.23)$$

Eau,

$$m_{as1} r_1^s - m_{as2} r_2^s = 0 [kg_e] \quad (I.24)$$

Donc,

$$r_1^s = r_2^s = r^s \quad (I.25)$$

⇨ Bilan énergétique (Enthalpique) :

$$m_{as} * h_1^s + Q_c = m_{as} * h_2^s \quad (I.26)$$

À partir des bilans écrits plus haut, on obtient l'expression taux de transfert de chaleur ( $Q_c$ ) :

$$Q_c = m_{as} * C_p^s * (\theta_2 - \theta_1) [kJ] \quad (I.27)$$

Où,

$m_{as}$  est la masse de l'air sec en  $[kg_{as}]$  .

$\theta_1$  et  $\theta_2$  sont les températures sèches de l'état initiale et l'état final respectivement en  $[^\circ C]$ .

$C_p^s$  Chaleur spécifique de l'air humide ( $1,0216 [kJ / K. kg_{as}]$ ).

L'évolution de l'air au cours de ce processus élémentaire est illustrée sur un digramme d'air humide (Figure I.10).

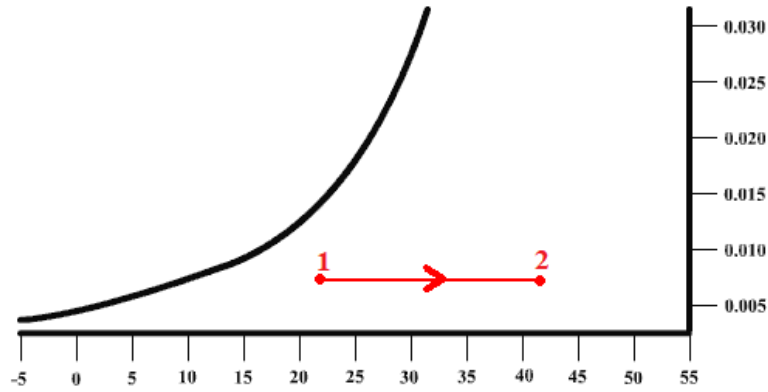


Figure I.10. Évolution de chauffage sensible sur le diagramme de l'air.

### I.8.2. Refroidissement sensible

Le principe est le même que le précédent ( $r^s = C^{ste}$ ), sauf que dans ce cas, la température et l'enthalpie sont réduites et il n'y a pas de condensation [12]. Autrement dit, cette opération consiste à faire passer l'air par un conduit muni d'une batterie froide dont la température de surface est supérieure à la température de rosée de l'air humide (Figure I.11).

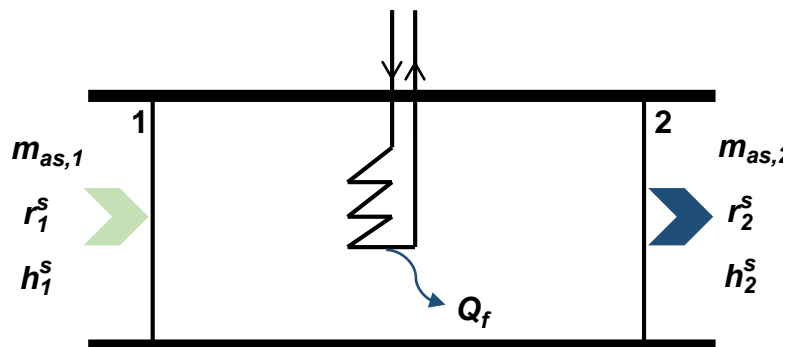


Figure I.11. Schéma du dispositif de refroidissement sensible [8].

En suivant la même démarche que précédemment (équations du bilan), il est possible d'obtenir l'expression du taux de transfert de chaleur à extraire de l'air humide ( $Q_f$ ), équation (I.28).

$$Q_f = m_{as} * C_p^s * (\theta_1 - \theta_2) [kJ] \quad (I.28)$$

Le processus de refroidissement sensible est illustré sur le diagramme psychrométrique de la Figure I.12.

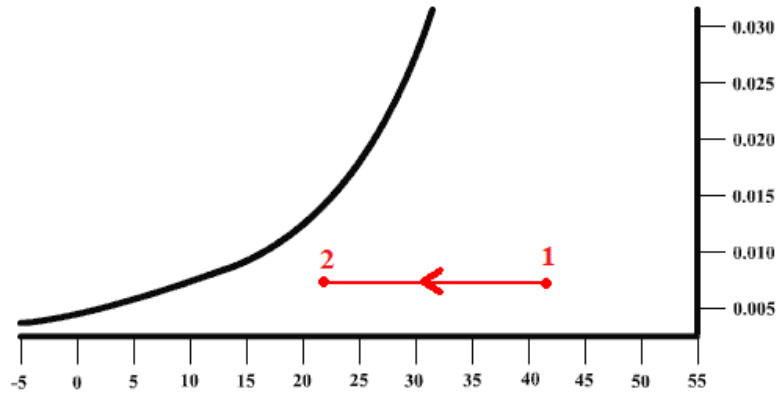


Figure I.12. Évolution de refroidissement sensible sur le diagramme de l'air.

### I.8.3. Chauffage avec humidification

Dans cette transformation, on chauffe l'air humide puis on lui injecte en pulvérisant de très fines gouttelettes d'eau, ce qui entraîne une augmentation de sa température, de son humidité spécifique et de son enthalpie spécifique (Figure I.13) [12].

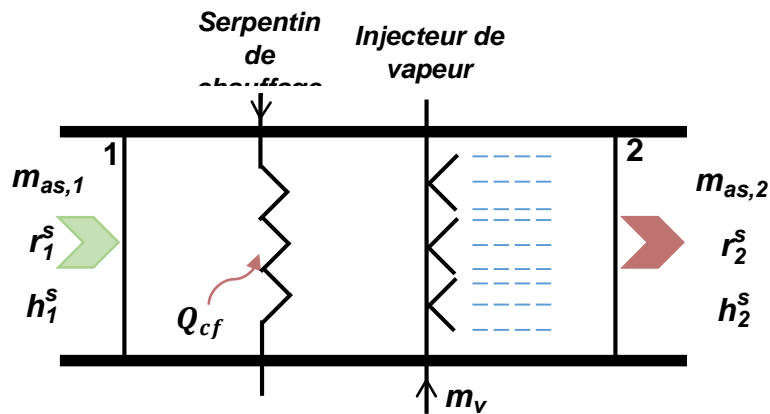


Figure I.13. Schéma du dispositif de chauffage de l'air avec humidification [8].

Les bilans du système s'écrivent comme suit :

Bilan d'air sec,

$$m_{as1} = m_{as2} = m_{as} \quad (I.29)$$

Bilan massique de la vapeur d'eau,

$$\begin{aligned} m_{as1} * r_1^s + m_v &= m_{as2} * r_2^s \\ \frac{m_v}{m_{as}} &= r_2^s - r_1^s \text{ [kg}_v\text{/kg}_{as}] \end{aligned} \quad (I.30)$$

Bilan énergétique,

$$m_{as} * h_1^s + Q_{cf} + m_v * h_v^* = m_{as} * h_2^s$$

$$\frac{Q_{cf}}{m_{as}} = (h_2^s - h_1^s) - h_v^* (r_2^s - r_1^s) [kJ/kg_{as}] \quad (I.31)$$

Ou,

$h_v^* = 2500.8 + 1.8266\theta [kg/kg_e]$ , valable jusqu'à une température de l'eau injectée 50 °C.

La Figure I.14 montre le processus de chauffage avec humidification sur un diagramme de l'air humide.

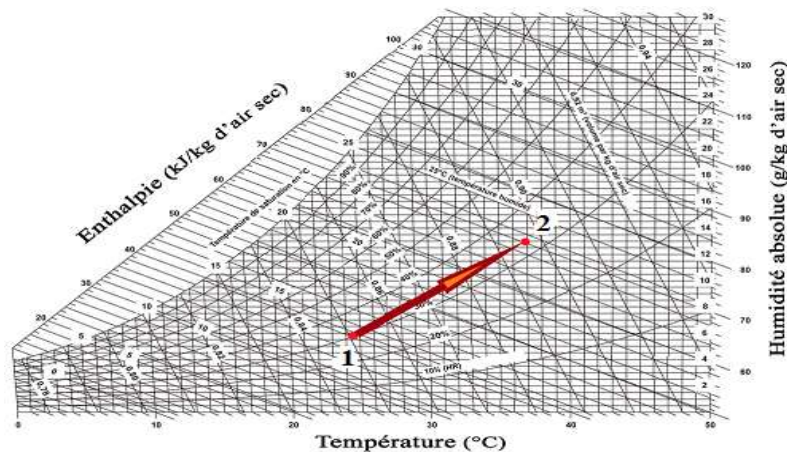


Figure I.14. Évolution de chauffage de l'air avec humidification sur le diagramme de l'air [14].

#### I.8.4. Refroidissement avec déshumidification

C'est une des transformations les plus importantes en climatisation puisqu'il s'agit généralement de refroidir de l'air mais également d'abaisser sa richesse en eau. Pour l'effectuer, on met l'air en contact avec une surface solide ou liquide (Figure I.15), dont la température est inférieure à sa température de rosée [4].

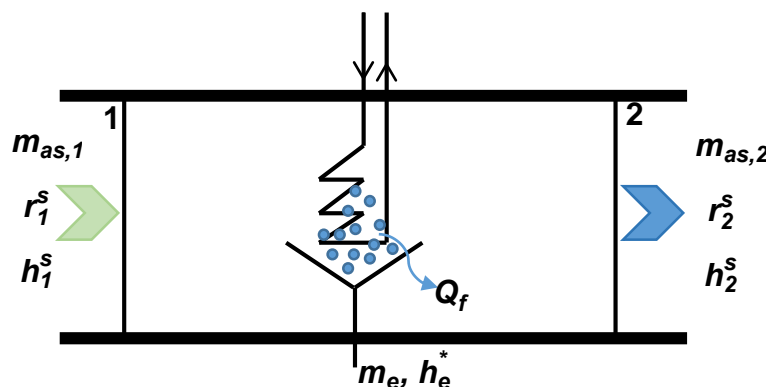


Figure I.15. Schéma du dispositif de refroidissement de l'air avec déshumidification [8].

Les bilans du système s'écrivent comme suit :

Bilan d'air sec,

$$m_{as1} = m_{as2} = m_{as} \quad (I.32)$$

Bilan massique de la vapeur d'eau,

$$\begin{aligned} m_{as1} * r_1^s - m_e &= m_{as2} * r_2^s \\ \frac{m_e}{m_{as}} &= r_1^s - r_2^s \end{aligned} \quad (I.33)$$

Bilan énergétique,

$$\begin{aligned} m_{as} * h_1^s - Q_f - m_e * h_e^* &= m_{as} * h_2^s \\ \frac{Q_f}{m_{as}} &= (h_1^s - h_2^s) - h_e^* (r_1^s - r_2^s) \end{aligned} \quad (I.34)$$

En négligeant le second terme de l'équation (I.34), on obtient l'équation (I.35) qui est généralement utilisée en pratique.

$$\frac{Q_f}{m_{as}} = (h_1^s - h_2^s) [kJ/kg_{as}] \quad (I.35)$$

L'évolution de l'air humide durant un processus de refroidissement et de déshumidification est représentée sur la Figure I.16.

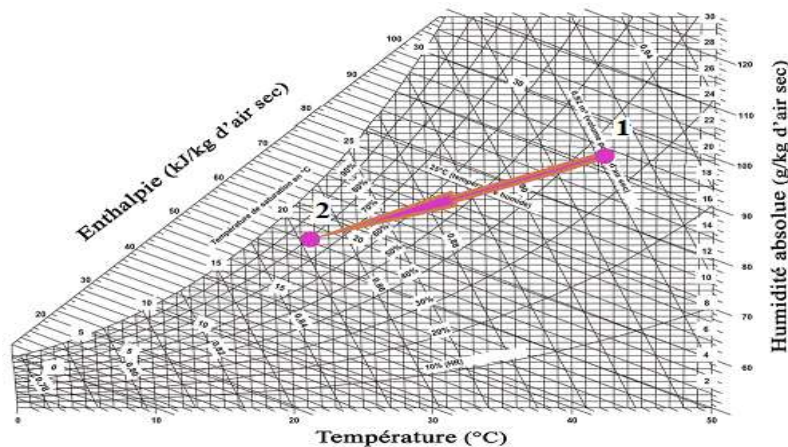


Figure I.16. Évolution de refroidissement de l'air avec déshumidification [14].

### I.8.5. Refroidissement avec humidification

Au cours de ce processus, la température de l'air baisse et son humidité augmente. Ce procédé consiste à pulvériser de l'eau froide dans le flux d'air (Figure I.17). La température de l'eau doit être inférieure à la température de l'air sec mais supérieure à son point de rosée pour éviter la condensation ( $\theta_r < \theta_e < \theta_l$ ) [8].

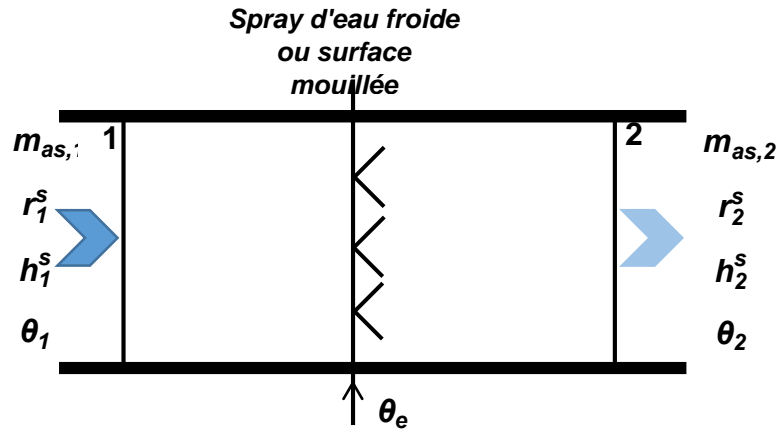


Figure I.17. Schéma du dispositif de refroidissement de l'air avec humidification [8].

La Figure I.18 montre le processus de refroidissement et d'humidification sur un diagramme de l'air humide.

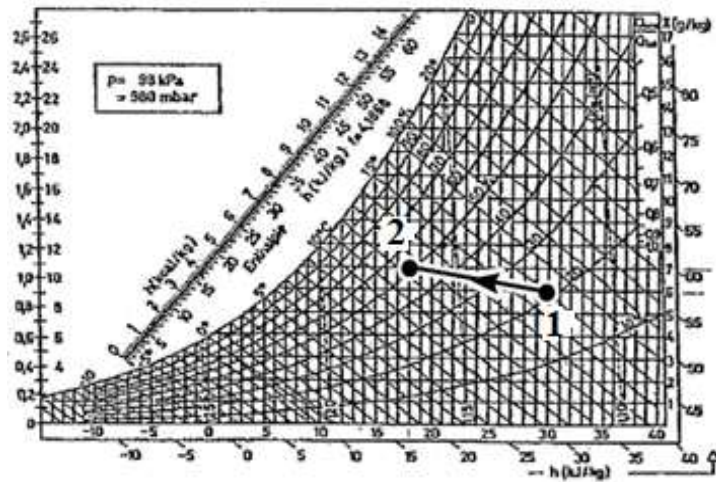
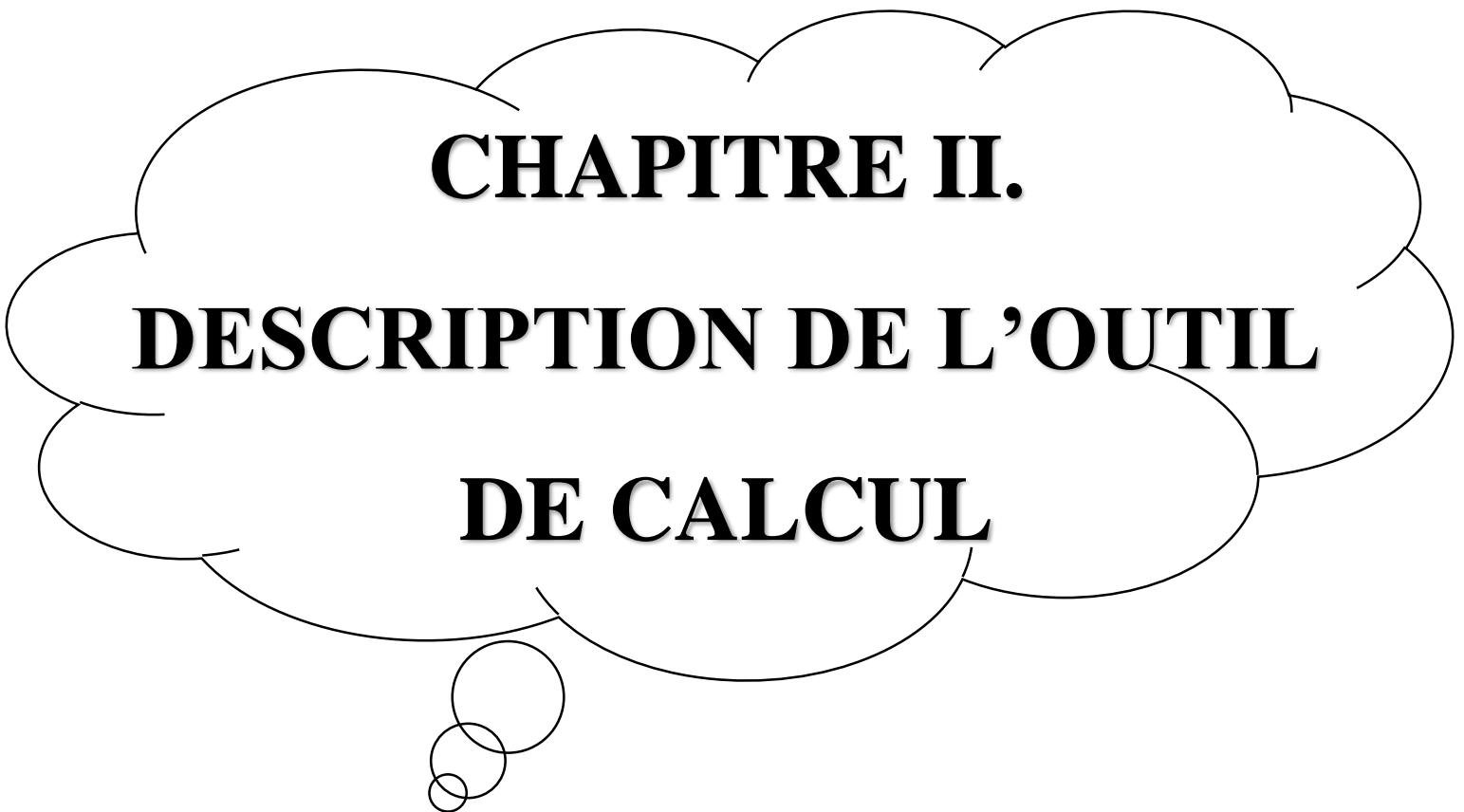


Figure I.18. Évolution de refroidissement de l'air avec humidification [1].



**CHAPITRE II.**  
**DESCRIPTION DE L'OUTIL**  
**DE CALCUL**

## Chapitre II. Description de l'outil de calcul

Ce chapitre est dédié à la présentation du travail à réaliser ainsi que les différentes étapes suivies pour sa conception et sa réalisation.

### II.1. Travail envisagé

Dans le chapitre précédent, on a présenté les grandeurs caractéristiques de l'air humide. 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 Pa et pour une plage de température allant de -20 à 50 °C. Vu le manque de généralité sur ces diagrammes et le mode de consultation de ces derniers, l'utilisation de l'ordinateur pour le calcul des propriétés psychrométriques est alors très recommandée.

À cet effet, l'idée générale du projet consiste à concevoir un outil qui pourra de façon concrète de calculer les propriétés psychrométriques de l'air humide ainsi que ses évolutions élémentaires avec une schématisation sur le diagramme de l'air humide à l'aide du logiciel bureautique Excel édité par Microsoft office.

### II.2. Description de logiciel utilisé

En premier temps, on donne un aperçu sur le logiciel bureautique Excel qui est le principal outil pour l'implémentation de l'outil de calcul '*BASMA calculation*'. Les informations présentées ci-dessous ont été essentiellement prises de la référence [15].

#### II.2.1. Qu'est-ce que Excel ?

Le logiciel Microsoft Excel est un tableur électronique qui a pour but d'effectuer des calculs de manière rapide et précise. La feuille électronique de nombres produite par Excel est appelée 'feuille de calcul' (Figure II.1).

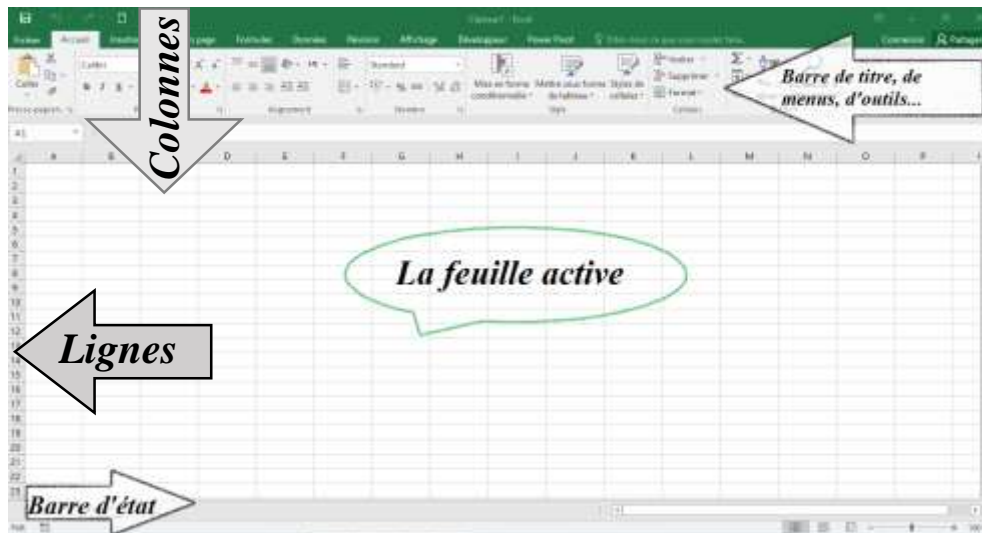


Figure II.1. Feuille de calcul sur Excel.

### II.2.1.a. Classeur

Lorsqu'on travaille avec Excel, un « classeur » est ce que l'on appelle habituellement un « fichier ». Chaque classeur contient par défaut trois feuilles, mais peut en comprendre jusqu'à 255. Chaque feuille est identifiée par un « onglet » qui est situé en bas de l'écran. Pour ajouter une feuille, on doit faire « insertion », « feuille ».

### II.2.1.b. Onglets

Les onglets de feuilles au bas de la feuille de calcul permettent de regrouper notre travail dans des ensembles de feuilles appelés classeurs. On peut donner des noms évocateurs aux onglets de feuille. Pour changer le nom de l'onglet, on clique le bouton de droit sur l'onglet et ensuite on clique sur « renommer ». Des boutons de défilement d'onglets permettent de se déplacer d'une feuille à l'autre lorsqu'il y a trop d'onglets pour les afficher tous (Figure II.2).



Figure II.2. Onglets d'une feuille Excel.

### II.2.1.c. Feuille de calcul

La fenêtre de feuille de calcul contient un quadrillage de colonnes et de lignes. Les colonnes sont étiquetées alphabétiquement (A, B, C, etc.) et les lignes le sont numériquement (1, 2, 3, etc.). Seule une petite fraction de la feuille de calcul est visible à la fois (Figure II.1).

#### **II.2.1.d. Cellule**

L'intersection d'une colonne et d'une ligne s'appelle une cellule. Une cellule peut contenir du texte, des nombres, des formules ou une combinaison de ces trois éléments.

#### **II.2.1.e. Adresse**

Chaque cellule possède un emplacement unique (adresse de cellule) qui est identifié par les coordonnées de la colonne et de la ligne. Par exemple, l'adresse de la cellule du coin supérieur gauche est A1.

#### **II.2.1.f. Plage**

Regroupement de plusieurs cellules. Par exemple, la plage de A1 à A10.

#### **II.2.1.g. Étiquettes**

Une étiquette est une cellule qui contient du texte ou des informations numériques inutilisées dans les calculs, comme une date, une heure ou une adresse. Par défaut, les étiquettes sont alignées à gauche dans la cellule.

#### **II.2.1.h. Valeur**

Les valeurs, qui peuvent être des nombres, des formules et des fonctions, sont utilisées dans les calculs. Excel interprète une donnée comme une valeur lorsqu'il s'agit d'un nombre ou que la donnée commence par un des symboles spéciaux +, -, =, @, # ou \$. Par défaut, toutes les valeurs sont alignées à droite dans la cellule. Quand une cellule contient à la fois du texte et des nombres, il ne s'agit pas d'une formule valide et Excel traite l'entrée comme une étiquette.

#### **II.2.1.i. Formules**

Les formules permettent d'effectuer des calculs numériques comme l'addition, la multiplication et la moyenne. Une formule commence habituellement par l'indicateur de formule, le signe égal (=), et contient des adresses de cellules et des noms de plages. Les formules arithmétiques utilisent un ou plusieurs opérateurs arithmétiques pour effectuer les calculs. On appelle référence de cellule l'adresse d'une cellule ou le nom d'une plage dans une formule. Si vous modifiez la valeur d'une cellule, toute formule contenant une référence à cette cellule sera automatiquement recalculée. Lorsqu'une formule comprend plusieurs opérateurs arithmétiques, Excel détermine l'ordre d'exécution des opérations selon les règles de préséance.

- Les parenthèses.
- Les exposants.

- Les multiplications et divisions.
- Les additions et soustractions.

**Exemple** = A1 \* (B5+B6) - A2

### II.2.1.j. Fonctions

Les fonctions sont des formules prédéfinies permettant d'effectuer facilement des calculs complexes. Les fonctions débutent comme les formules par le signe égal (=). Les fonctions sont toujours utilisées avec une plage de données.

### II.2.2. Les fonctions utilisées dans l'outil de calcul

Pour l'élaboration de notre outil de calcul, il a fallu utiliser des formules logiques implémentées au sein d'Excel. Ces dernières sont expliquées en détail ci-dessous.

#### II.2.2.a. Fonction 'SI'

Elle permet de renvoyer une valeur ou une autre selon une condition. La fonction renvoie VRAI si la condition est respectée et FAUX si elle ne l'est pas.

La fonction SI se décompose en trois parties :

- Un test logique.
- Ce que vous voulez afficher quand le test est VRAI.
- Ce que vous voulez afficher quand le test est FAUX.

=SI (TEST ; Si test est VRAI ; Si test est FAUX)

Par exemple,

= SI (E10 = '0 [°C]' ; F10 ; "" )

= SI (E10= 'Hr [%]' ; F10 ; "" )

- "" veut dire rien

= SI (E10 = '0 [°C]' ; F10 ; SI (H10='0 [°C]' ; I10 ; "" ))

#### II.2.2.b. Fonctions 'ET' et 'OU'

Ces deux fonctions permettent de faciliter l'écriture des fonctions SI lorsque vous avez plusieurs conditions à respecter. La fonction ET permet de dire que deux ou plusieurs conditions soient respectées pour que la fonction renvoie VRAI et la fonction OU permet de dire que

seulement une des deux ou plusieurs conditions doivent être respectées pour que la fonction renvoie VRAI.

Ces deux fonctions prennent un paramètre obligatoire et peuvent en prendre plusieurs si on veut plusieurs conditions dans ces fonctions. Voici la syntaxe :

=ET (condition1 ; condition2 ; ...)

=OU (condition1 ; condition2 ; ...)

Les conditions sont en fait des tests logiques vu lors de la fonction précédente et fonctionne exactement de la même façon. On va plutôt se pencher sur la différence entre ET et OU.

La fonction ET exige que toutes les conditions soient vraies pour renvoyer VRAI, si une seule des conditions est fausse, alors la fonction renvoi FAUX. La fonction OU exige qu'une seule des conditions soit vraie pour renvoyer VRAI.

### II.2.2.c. Fonction 'SIERREUR'

Elle permet d'afficher une valeur "par défaut" dans une cellule si le calcul initialement prévu provoque une erreur. Par exemple, une division par 0 va afficher #DIV/0!, on va alors utiliser cette fonction pour afficher le message que l'on veut.

Cette fonction ne prend que deux paramètres, mais les deux sont obligatoires. Le premier est la valeur à afficher normalement et la seconde, la valeur à afficher en cas d'erreur de la première.

=SIERREUR (valeur ; valeur\_si\_erreur)

Cette fonction est très simple à comprendre et permet de ne plus afficher les vilains messages d'erreur d'Excel et d'expliquer plus explicitement les erreurs.

Par exemple,

= SIERREUR (SI (E10 = '0 [°C]' ; F10 ; "" ) ; "" )

### II.2.3. Visual Basic Application (VBA)

Pour l'implémentation de notre outil de calcul sur Excel, il est primordial de passer par un langage de programmation qui est dans notre cas 'Microsoft Visual Basic'. Ce dernier utilise des macros pour automatiser les tâches répétitives, ajouter certaines caractéristiques et fonctions

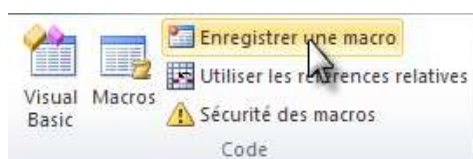
personnalisées répondant à des besoins spécifiques et même de créer des applications complètes.

### II.2.3.a. Description des macros

Une macro est une suite d'instructions qu'on exécute quand on veut. Pour exécuter ces instructions, il faut appeler la macro par son nom et dernier ne doit contenir ni accent ni espace.

Par exemple, une macro qui a pour nom 'gras\_rouge'. Les instructions qu'elle doit exécuter sont : mise en gras du texte, puis mise en rouge de celui-ci. Lorsqu'on appellera la macro 'gras\_rouge' sur une cellule qui contient du texte, ce dernier sera mis en gras et en rouge. Les macros sont pratiques si on a régulièrement une longue suite d'actions à effectuer. Mais tout ceci ne se limite pas qu'à une exécution d'instructions.

Pour la gestion des macros, il faut activer l'onglet 'Développeur'. Pour cela, on clique sur le menu 'Fichier', puis sur 'Option Excel'. Dans la fenêtre qui s'ouvre, alors dans l'onglet 'Personnaliser le ruban'. Dans la liste de droite des onglets du ruban, on coche la case devant l'onglet nommé 'Développeur'. On clique enfin sur 'OK'. L'onglet 'Développeur' vient d'alors d'apparaître. Dans le groupe 'Code', on clique sur 'Enregistrer une macro'.



**Figure II.3.** Première étape d'enregistrer une macro.

Une fenêtre s'ouvre, nous demandant de renseigner le nom de la macro. La macro mettra le texte en gras et en rouge, on a donc nommé 'gras\_rouge'. On clique sur 'OK'.



**Figure II.4.** Deuxième étape d'enregistrer une macro.

Maintenant, on ouvre la fenêtre Format de cellule, on met le texte en gras et en rouge. On appuie sur 'OK', puis on revient au tableau.

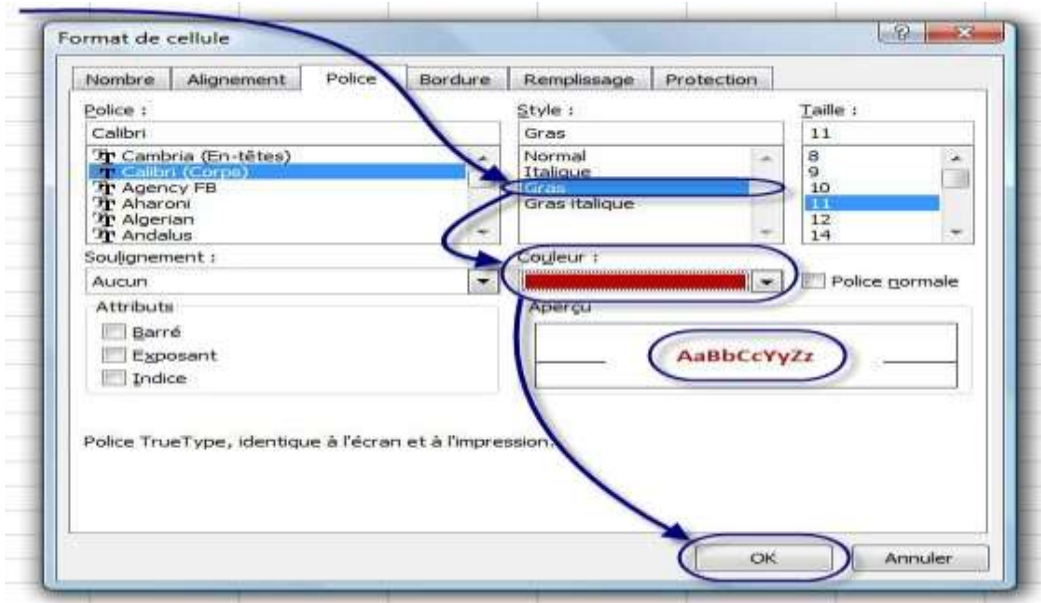


Figure II.5. Troisième étape d'enregistrer une macro.

On va maintenant arrêter l'enregistrement de notre macro. On retourne dans le groupe 'Code' de l'onglet 'Développeur' puis on clique sur 'Arrêter l'enregistrement'.

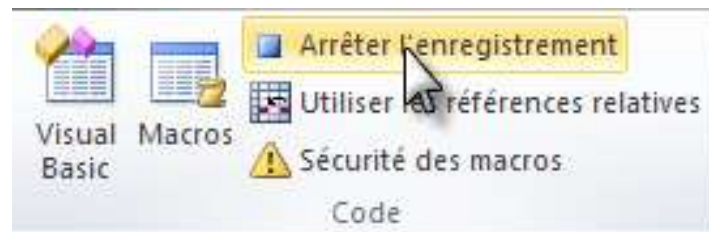


Figure II.6. Dernière étape d'enregistrer une macro.

L'enregistrement est maintenant coupé.

Pour l'exécution de la macro, on va faire un bouton ou un objet qui permettra d'exécuter la macro. Dans une feuille de calcul, on sélectionne une cellule et on tape un texte quelconque. Ensuite de quoi on doit aller dans l'onglet 'Développeur', dans le groupe 'Contrôles' puis on clique sur 'Insérer'. Dans le menu, on clique sur 'Bouton de contrôle' :

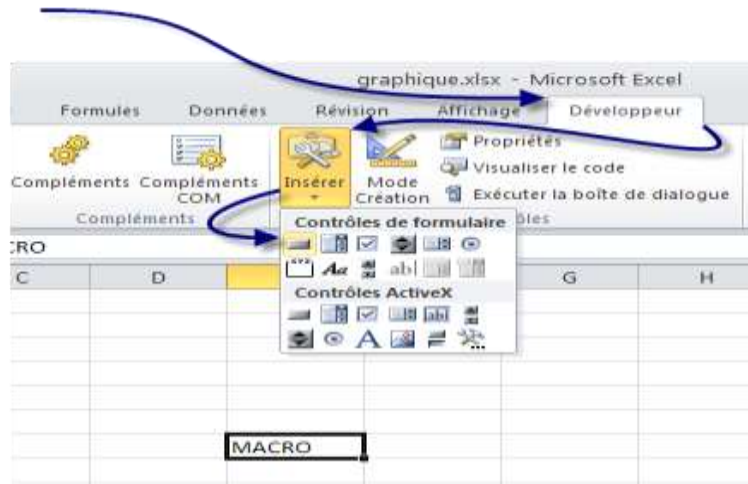


Figure II.7. Étapes d'insertion un bouton.

On dessine le rectangle correspondant au bouton de la macro. Suite à quoi Excel nous demande quelle macro on souhaite y assigner. On sélectionne notre nouvelle macro. Le bouton est mis en forme. On sélectionne la cellule qui contient du texte et on appuie sur le rectangle.

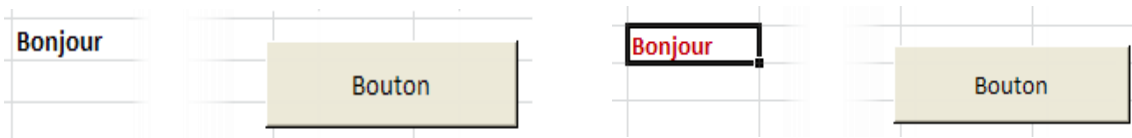


Figure II.8. Fonctionnement d'un bouton affecter une macro.

Pour modifier une macro, on clique sur le bouton 'Macros', puis on sélectionne notre macro et on clique sur 'Modifier'.

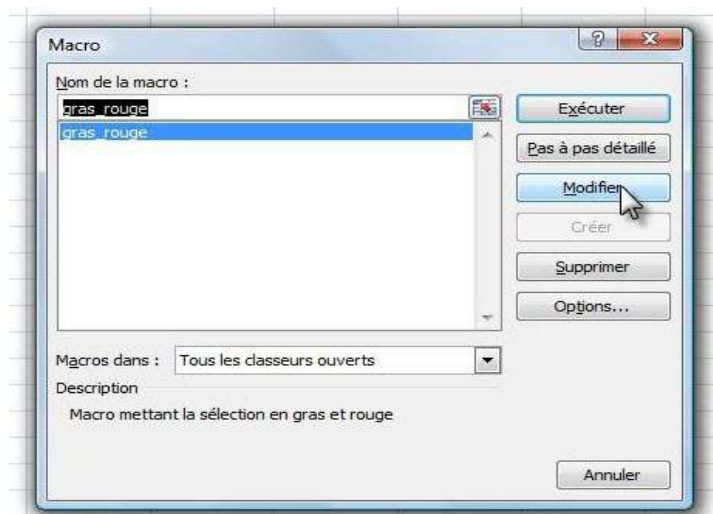


Figure II.9. Modification d'une macro.

On peut aussi directement cliquer sur le bouton 'Visual Basic'. La fenêtre Visual Basic s'ouvre alors. Une fenêtre s'ouvre à l'intérieur, elle contient notre macro.

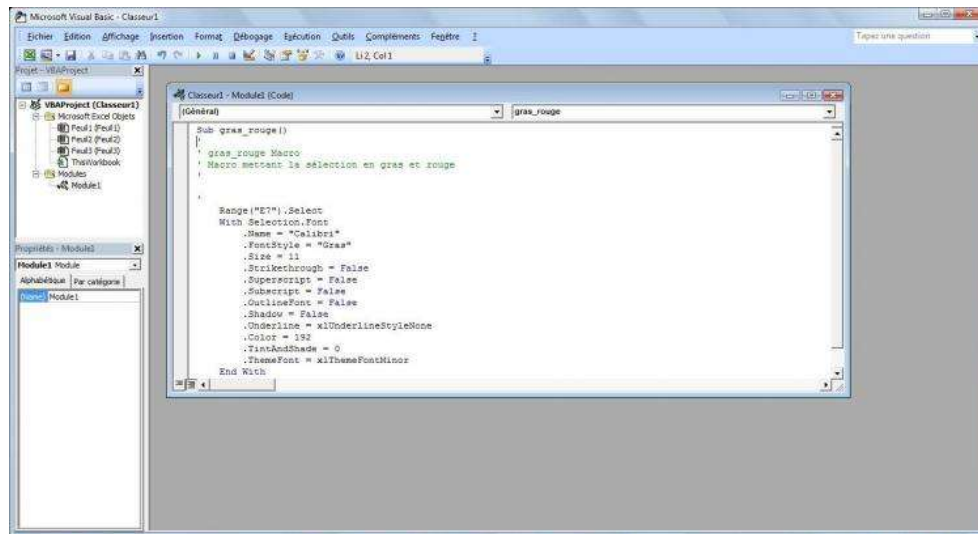


Figure II.10. Fenêtre Visual Basic pour Application.

Il est à noter que lorsqu'on enregistre une macro, sans qu'on ne le sache, Excel génère du code qui est en fait la source de notre macro.

### II.3. Description de l'application

La maîtrise du logiciel Excel est essentielle pour pouvoir créer des applications adaptées à nos besoins. C'est le cas si on veut développer un outil pour le calcul des propriétés psychométriques de l'air humide. En utilisant les macros présentées précédemment et les formules psychrométriques citées dans le précédent chapitre, on a élaboré l'outil de calcul nommé '**BASMA calculation**' qui est composé de cinq feuilles Excel (interface utilisateur) et deux autres cachées (les données), ou chacune de ces feuilles à un rôle bien précis. Ces dernières seront décrites en détails ci-dessous.

#### II.3.1. Feuille 'Home'

C'est la première feuille de l'application, autrement dit la page d'accueil de l'application. On y trouve un petit résumé de l'outil de calcul et deux boutons contenant des macros qui nous permettent de nous déplacer vers d'autres feuilles. Le premier bouton est le logo de l'application, avec un simple clic on verra l'interface de l'application '**BASMA calculation**', tandis que le second nous dirige vers la feuille 'Help'.

La figure ci-dessous montre l'interface de la feuille 'Home'.

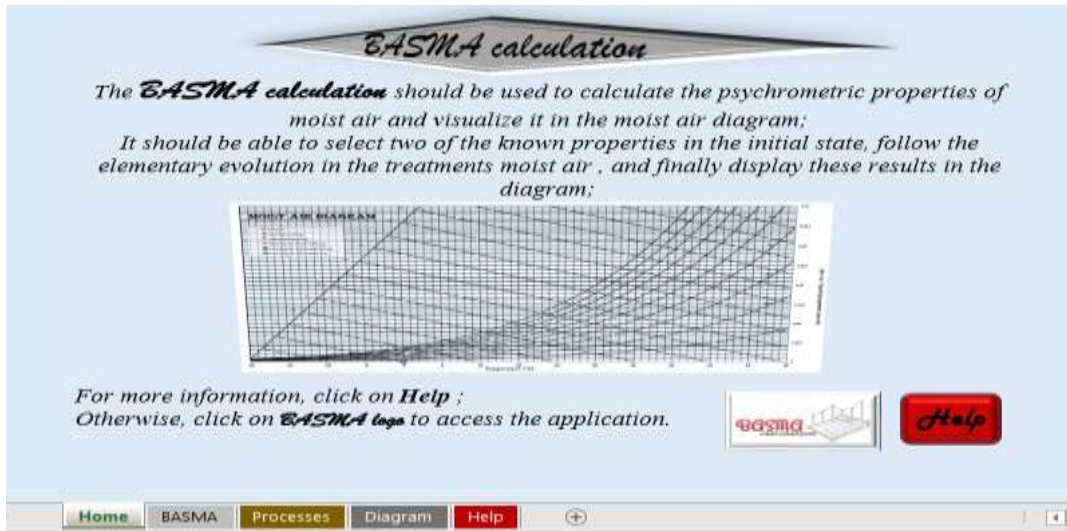


Figure II.11. Feuille 'Home'.

### II.3.2. Feuille 'BASMA'

Après avoir cliqué sur le bouton avec le logo BASMA sur la page d'accueil, l'interface de l'application s'affiche avec la date actuelle à laquelle nous l'avons exécutée. Cette feuille contient des cases dans lesquelles l'utilisateur pourra introduire les valeurs initiales de l'air humide. Les cases 'property 1' et 'property 2' sont munies de listes déroulantes et permettent de choisir les propriétés psychrométriques initiales de l'air humide à l'instar de la température sèche ( $\theta$ ), l'humidité spécifique ( $r^s$ ), l'humidité relative ( $H_r$ ), le volume spécifique ( $v^s$ ), et l'enthalpie spécifiques ( $h^s$ ). En plus, l'utilisateur devra aussi introduire la valeur de l'altitude ou se trouve l'air humide et cela en l'introduisant dans la case 'Altitude' (Figure III.12). Une fois ces paramètres introduits, il suffit de cliquer sur le bouton 'Results' afin d'obtenir les autres paramètres psychrométriques de l'air humide.

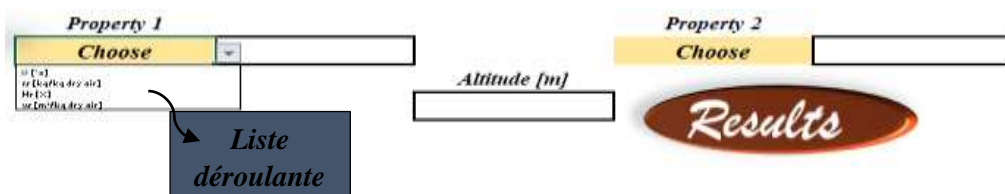


Figure II.12. Espace de valeurs à introduire.

Dans la même feuille, on y trouve aussi les boutons 'Diagram' et 'New operation'. Le premier nous dirige vers une autre feuille Excel munie d'un digramme psychrométrique. Cette dernière sera décrite plus tard. Quant au second bouton, il permet de réinitialiser le calcul, c'est-à-dire, effacer les valeurs introduites précédemment pour en choisir de nouvelles.

À droite de l'interface de l'application, on y trouve aussi cinq boutons et chacun d'eux représente une des opérations élémentaires citées dans le chapitre précédent. Ces opérations seront présentées dans la section suivante. Au-dessous de ces boutons, on y trouve le bouton 'Exit' qui nous permet de réinitialiser le calcul et de quitter la feuille 'BASMA' pour revenir à la feuille 'Home'. Enfin le bouton 'Help' dirige l'utilisateur vers une autre feuille qui sera décrite plus bas. Les détails de la feuille 'BASMA' sont présentés sur les Figures II.13 et II.14.

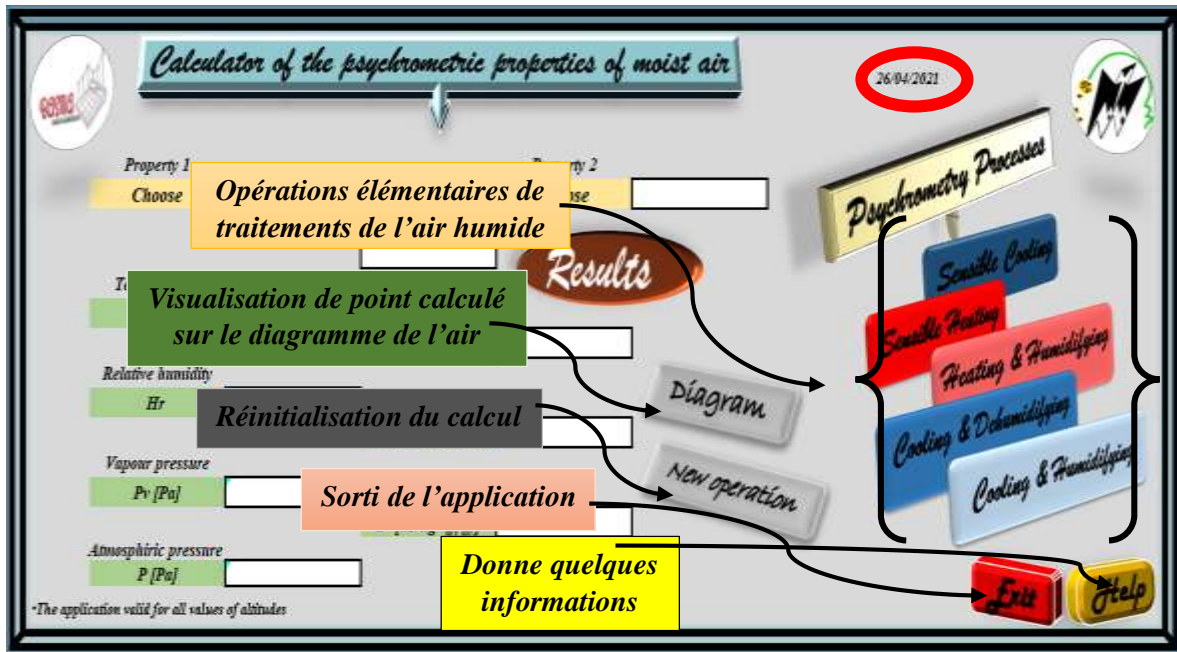


Figure II.13. Rôle de chaque bouton de l'outil de calcul.

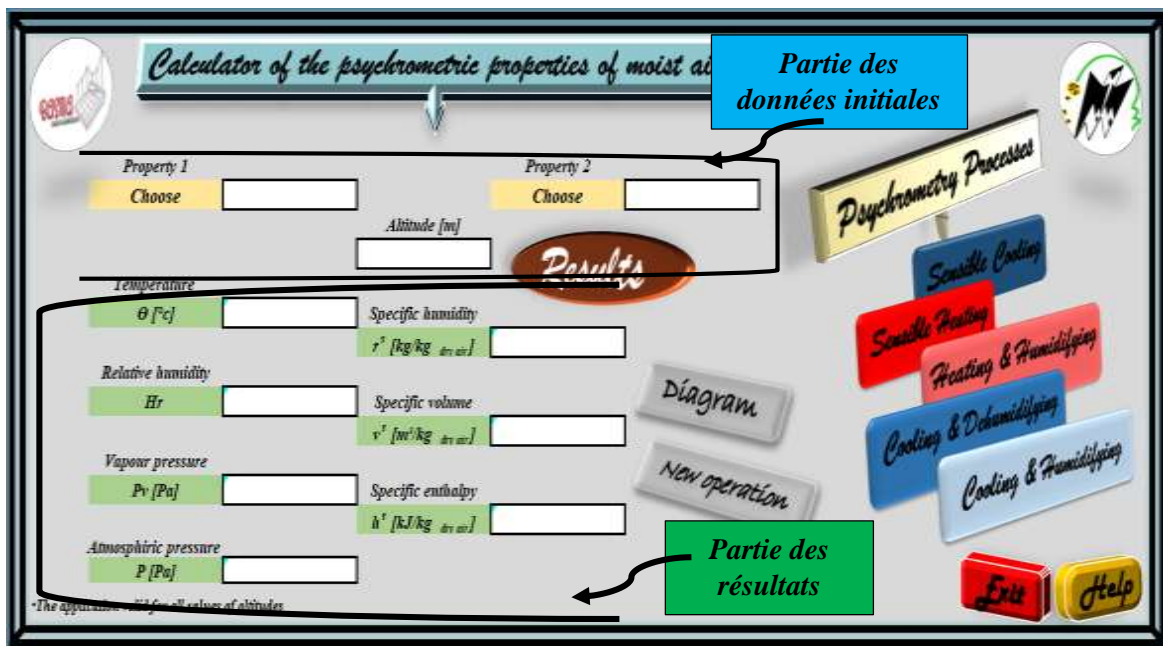


Figure II.14. Parties principales de l'outil de calcul.

### II.3.3. Feuille 'Processes'

Cette feuille est composée de cinq parties et chacune de ces parties correspond à une évolution élémentaire de traitement de l'air humide. L'accès à l'une de ces parties est effectué en cliquant sur le bouton correspondant au type de l'opération élémentaire souhaitée. Ces dernières se trouvent au-dessous du titre 'Psychrometry Processes', en page 'BASMA' comme le montre la Figure II.13. Ci-dessous sont présentées chacune de ces opérations.

#### II.3.3.a. Refroidissement sensible 'Sensible cooling'

La Figure II.15 montre la partie consacrée au refroidissement sensible. Elle est constituée de deux tableaux. Celui de gauche donne les propriétés psychométriques de l'air humide calculés dans la page 'BASMA' (point 1, ou état initial). L'utilisateur devra ensuite saisir les valeurs de la quantité de chaleur de la source froide ( $Q_f$ ) et de la masse d'air sec ( $m_{as}$ ) dans les cases correspondantes afin que l'outil puisse calculer les propriétés psychométriques de l'état final et les afficher sur le tableau de droite (point 2).

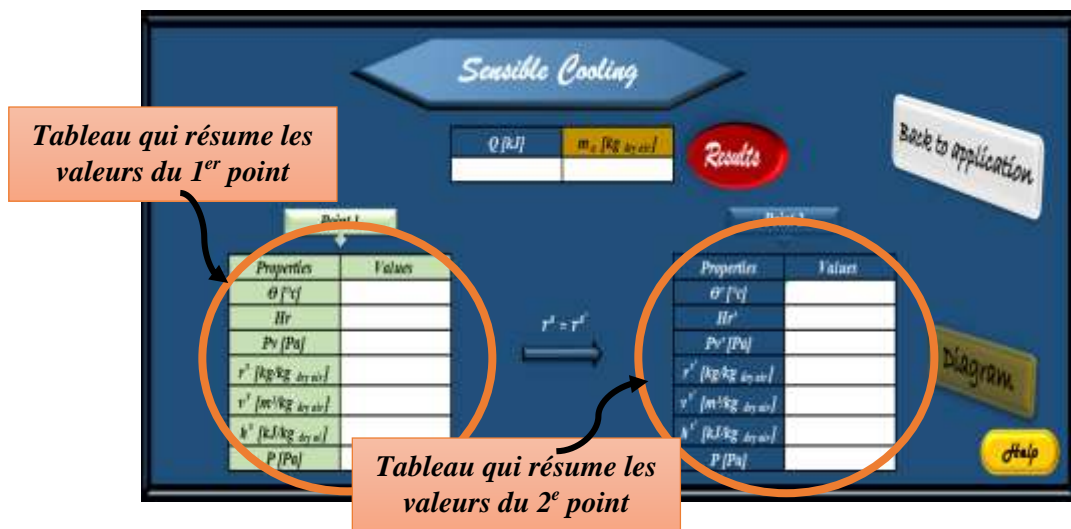


Figure II.15. Interface de l'évolution de refroidissement sensible.

#### II.3.3.b. Chauffage sensible 'Sensible heating'

La Figure II.16 montre la partie consacrée au chauffage sensible, ou l'utilisateur devra saisir les valeurs de la quantité de chaleur de la source chaude ( $Q_c$ ) et de la masse d'air sec ( $m_{as}$ ) dans les cases correspondantes afin que l'outil puisse calculer les propriétés psychométriques de l'état final et les afficher sur le tableau de droite (point 2).

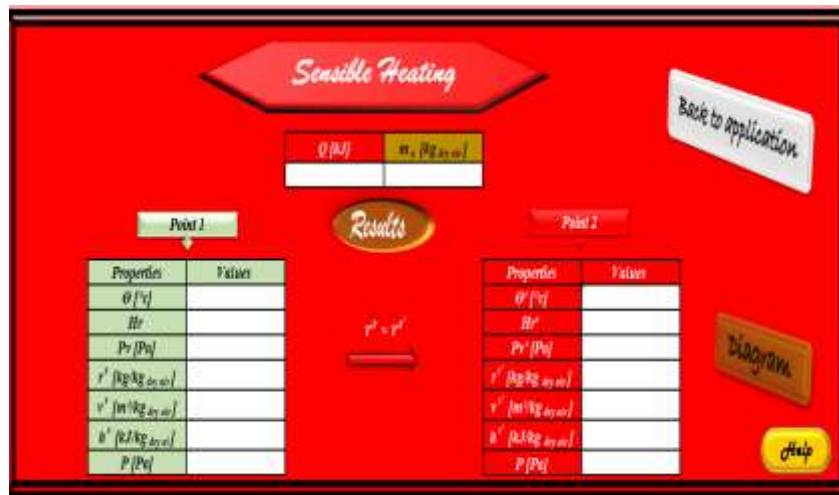


Figure II.16. Interface de l'évolution de chauffage sensible.

II.3.3.c. Chauffage avec humidification 'Heating and humidifying'

La Figure II.17 montre la partie consacrée au chauffage avec humidification, ou l'utilisateur devra saisir les valeurs de la quantité de chaleur de fluide de source chaude ( $Q_{cf}$ ), de la masse d'air sec ( $m_{as}$ ), la masse de la vapeur d'eau ( $m_v$ ) et la température de vapeur ( $\theta_v$ ) dans les cases correspondantes afin que l'outil puisse calculer les propriétés psychométriques de l'état final et les afficher sur le tableau de droite (point 2).

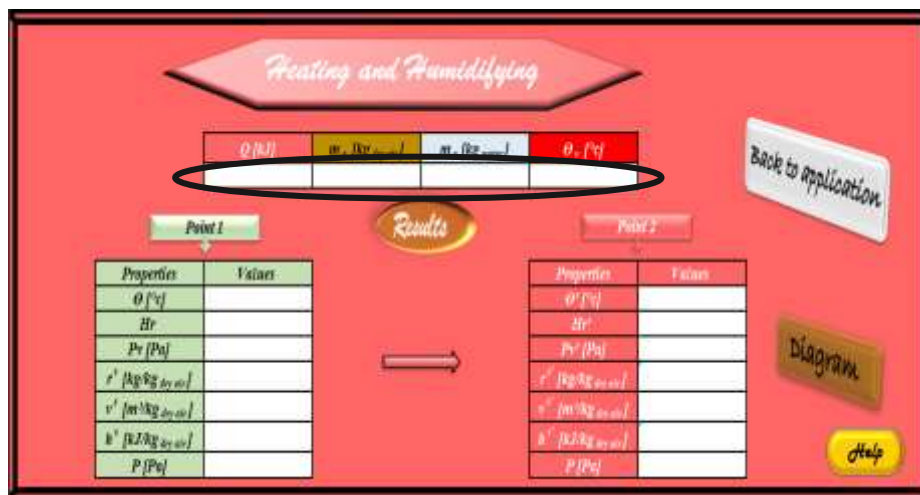


Figure II.17. Interface de l'évolution de chauffage avec humidification.

II.3.3.d. Refroidissement avec déshumidification 'Cooling and dehumidifying'

La Figure II.18 montre la partie consacrée au refroidissement avec déshumidification, ou l'utilisateur devra saisir les valeurs de la quantité de chaleur de la source froide ( $Q_f$ ), de la masse d'air sec ( $m_{as}$ ) et la masse de vapeur ( $m_v$ ) dans les cases correspondantes afin que l'outil

puisse calculer les propriétés psychométriques de l'état final et les afficher sur le tableau de droite (point 2).

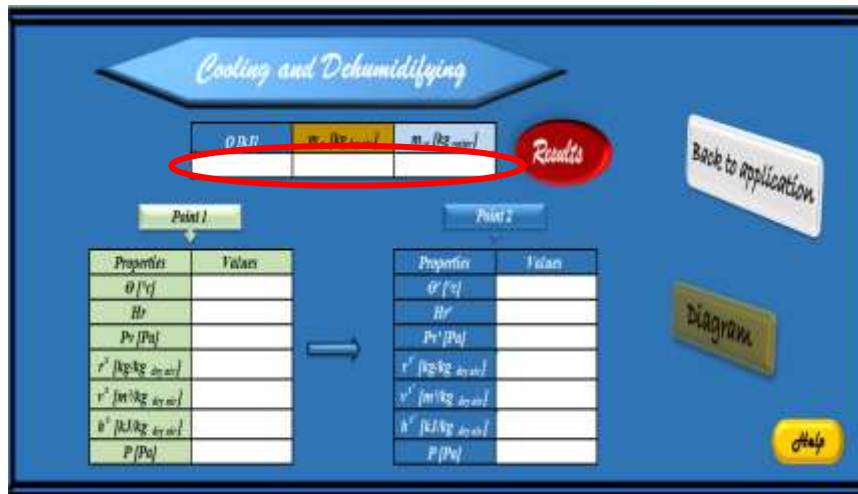


Figure II.18. Interface de l'évolution de refroidissement avec déshumidification.

### II.3.3.e. Refroidissement avec humidification 'Cooling and humidifying'

La Figure II.19 montre la partie consacrée au refroidissement avec humidification, ou l'utilisateur devra saisir les valeurs de la quantité de chaleur de la source froide ( $Q_f$ ), de la masse d'air sec ( $m_{as}$ ) et la température de l'eau ( $\theta_e$ ) dans les cases correspondantes afin que l'outil puisse calculer les propriétés psychométriques de l'état final et les afficher sur le tableau de droite (point 2).

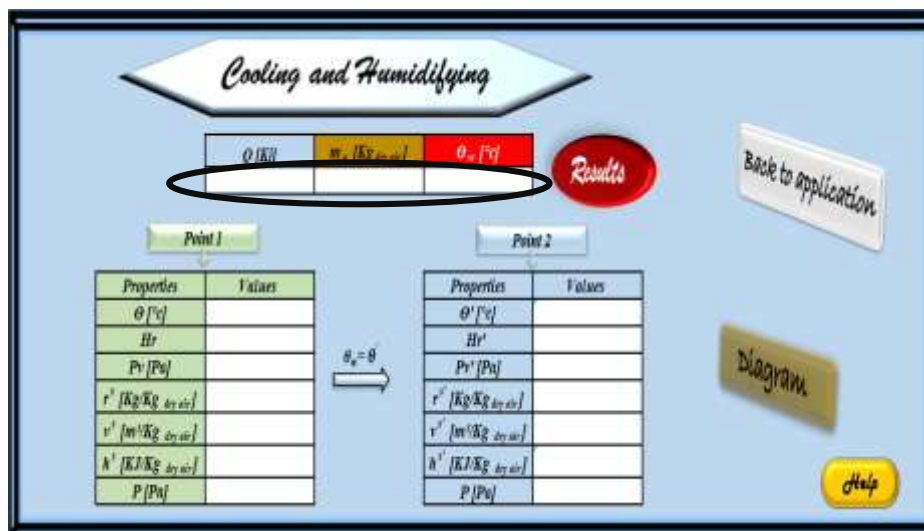


Figure II.19. Interface de l'évolution de refroidissement avec déshumidification.

### II.3.4. Feuille 'Diagram'

Une fois que le calcul a été effectué sur la feuille 'BASMA', il est possible de visualiser l'emplacement de cet air sur un diagramme de l'air humide et cela en cliquant sur le bouton 'Diagram' de la même feuille. Il est aussi possible de visualiser les états 'initial' et 'final' d'une opération élémentaire sur ce même diagramme. Cependant, il est intéressant de noter que ce diagramme est uniquement valable pour les calculs effectués à une altitude nulle, c'est à dire au niveau de la mer (Figure II.20).

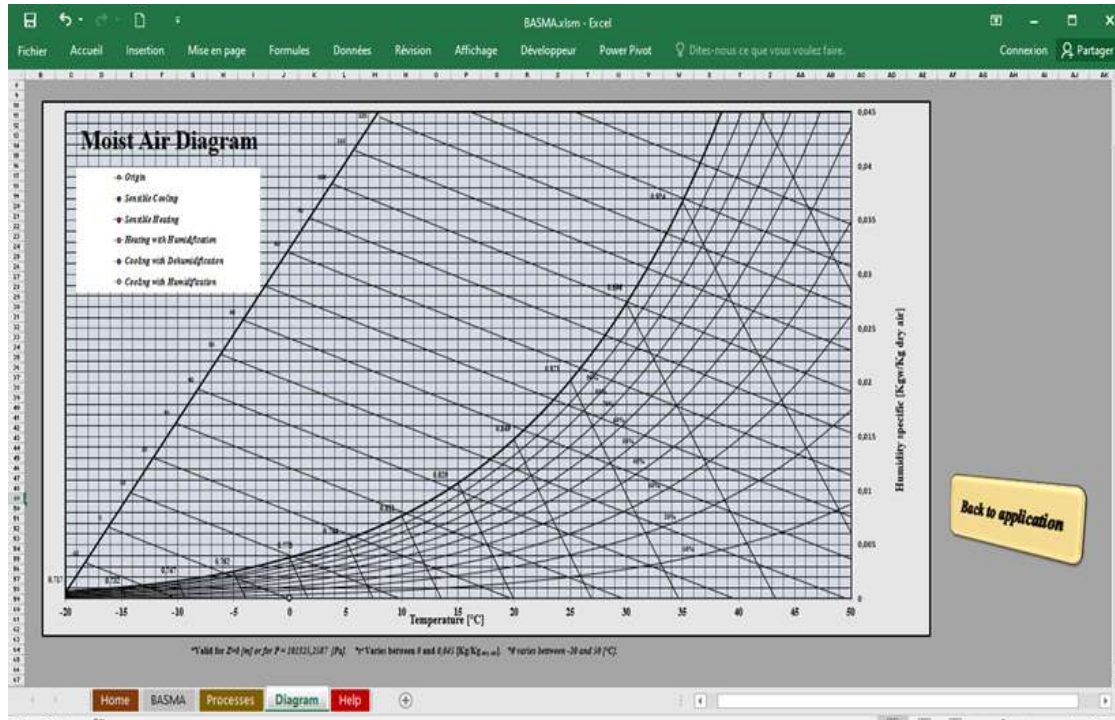


Figure II.20. Feuille 'Diagram'.

### II.3.5. Feuille 'Help'

La feuille 'Help' est la dernière feuille de l'application et est consacrée à donner des informations utiles sur l'outil de calcul. La Figure II.21 montre la feuille 'Help' qui est constituée de plusieurs boutons, comme 'Button functions' qui donne un aperçu sur l'application, et les fonctions des différents boutons. On y trouve aussi les définitions et les schémas explicatifs des différentes opérations élémentaires du traitement de l'air humide.

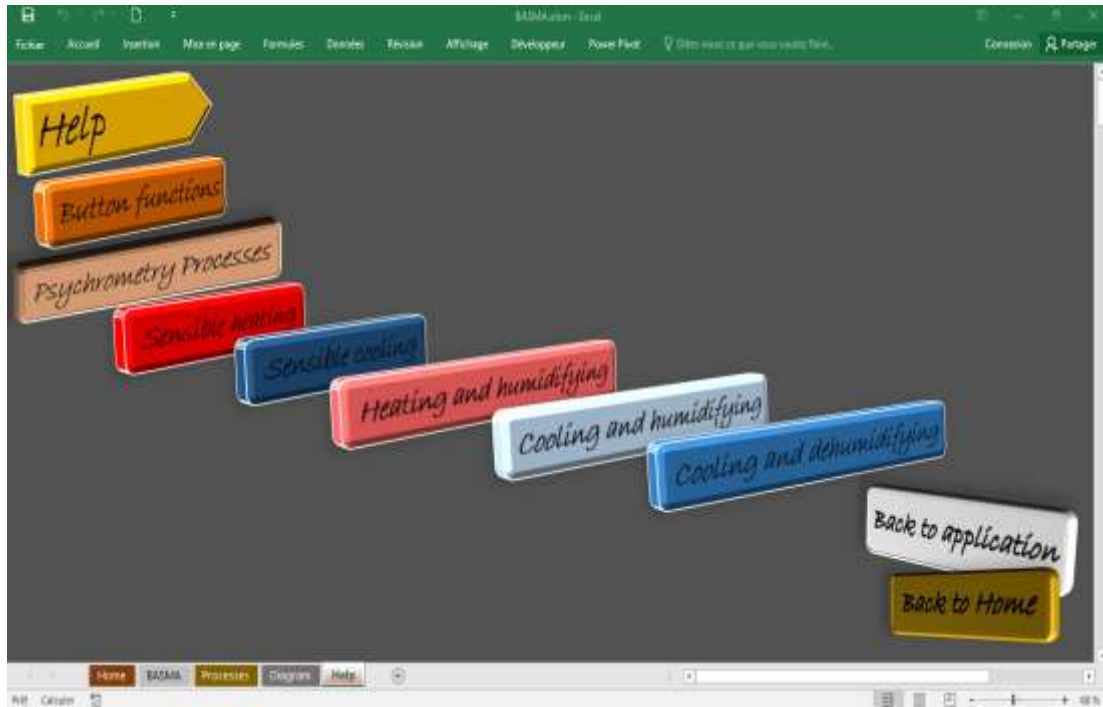


Figure II.21. Feuille 'Help'.

#### II.4. Conclusion

L'étude préalable et la spécification des besoins, constitue une phase capitale dans le cas où toute la suite du projet dépend d'elle, elle doit être faite avec beaucoup de rigueur et plus d'attention pour que le projet réussisse avec un grand succès.

Dans ce chapitre, on a exposé le logiciel Excel, ses différentes notions et fonctions qui consistent à concevoir et à développer une application qui facilitera les tâches du calcul des propriétés psychrométriques de l'air humide. Ainsi dans la deuxième partie, on l'a consacrée à décrire cet outil de calcul '*BASMA calculation*' et le principe de son fonctionnement, également le fonctionnement de ses buttons.



**CHAPITRE III.**

**RÉSULTAT ET DISCUSSIONS**

## Chapitre III. Résultats et discussions

Ce chapitre est consacré à la validation de l'outil de calcul '*BASMA calculation*' et à la présentation de quelques exemples effectués avec cette application. En effet, il sera question de s'assurer du bon fonctionnement de l'application, puis on effectuera des tests en variant certains paramètres.

### III.1. Validation de l'outil de calcul '*BASMA calculation*'

En premier temps, on doit valider l'application '*BASMA calculation*' et cela en comparant les résultats obtenus avec cet outil de calcul à ceux de la référence [16] et aussi en utilisant un digramme psychrométrique.

#### III.1.1. Validation de l'outil de calcul avec une application web

Pour cette première validation, on compare les résultats obtenus avec cette application à ceux obtenus par l'application web 'Psychrometric Chart' [16]. Pour cela, on fixe comme données initiales : un air humide ayant une humidité relative ( $\psi$ ) de 30 % et se trouvant au niveau de la mer. On varie la température sèche ( $\theta$ ) de -20 °C jusqu'à 50 °C et on calcul les autres propriétés de cet air.

Les valeurs obtenues avec cet outil de calcul sont présentées sur les tableaux III.1, tandis que celles de la référence [16] sont présentées sur le tableau III.2.

**Tableau III.1.** Propriétés psychrométriques de l'air humide obtenues par notre outil de calcul.

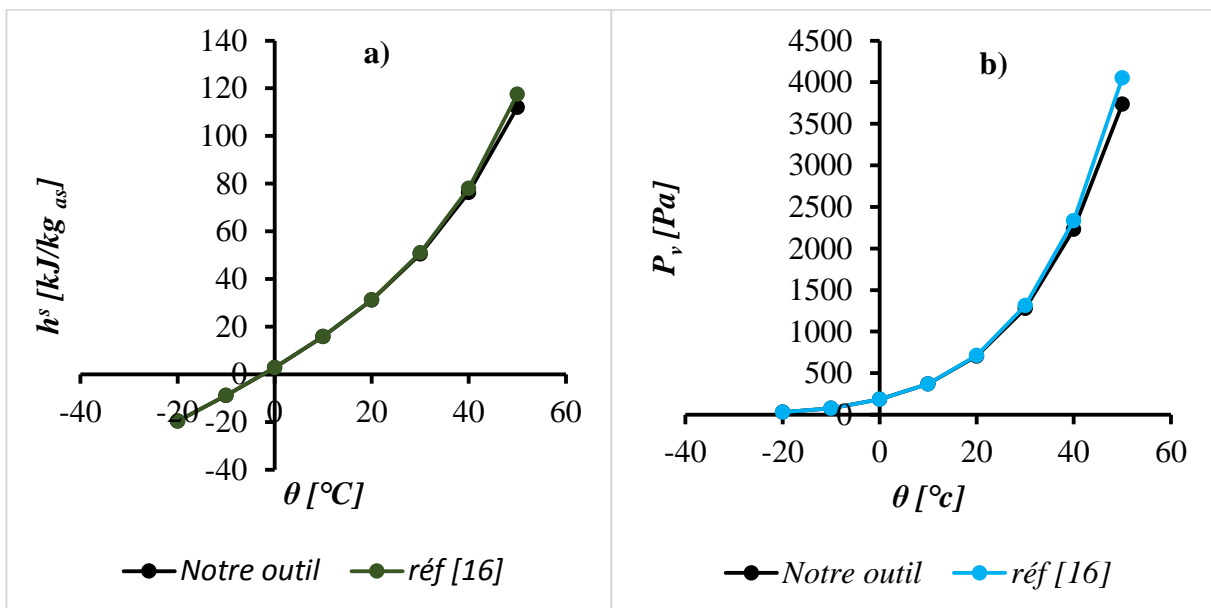
$\theta$ [°C]	$P_v$ [Pa]	$r^s$ [kg/kg <i>as</i> ]	$v^s$ [m <sup>3</sup> /kg <i>as</i> ]	$h^s$ [kJ/kg <i>as</i> ]
-20	31,1014	0,0002	0,717	-19,6494
-10	78,2613	0,0005	0,7457	-8,8664
0	184,0438	0,0011	0,7748	2,8305
10	369,8126	0,0023	0,8046	15,7996
20	704,4859	0,0044	0,8358	31,1698
30	1279,8306	0,008	0,8693	50,5147
40	2228,5262	0,014	0,9066	76,2427
50	3735,6223	0,0238	0,95	112,0172

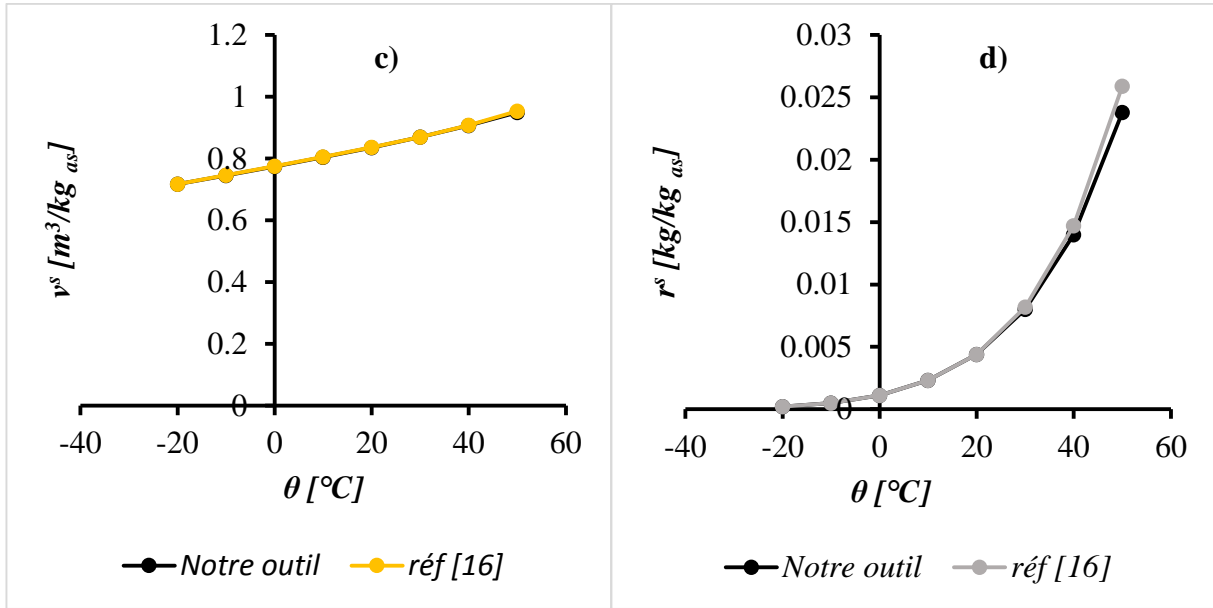
Tableau III.2. Propriétés psychrométriques de l'air humide obtenues par l'application web.

$\theta$ [°C]	$P_v$ [Pa]	$r^s$ [kg/kg <sub>as</sub> ]	$v^s$ [m <sup>3</sup> /kg <sub>as</sub> ]	$h^s$ [kJ/kg <sub>as</sub> ]
-20	31,0002	0,0002	0,7174	-19,6510
-10	78,1111	0,0005	0,7461	-8,8689
0	184,1235	0,0011	0,7752	2,8317
10	371,5507	0,0023	0,8051	15,8274
20	713,1641	0,0044	0,8363	31,3097
30	1312,3035	0,0082	0,8701	51,0454
40	2334,0961	0,0147	0,9080	78,0076
50	4050,5424	0,0259	0,9536	117,4793

D'après les tableaux III.1 et III.2, on remarque que le présent outil de calcul donne des résultats très proches de ceux fournis par la référence [16]. En effet, la différence en pourcentage ne dépasse pas les 8 %, ce qui prouve que cet outil de calcul est valide pour le calcul des propriétés psychrométriques de l'air humide. La légère différence des résultats peut s'expliquer par le fait que les formules utilisées dans cet outil de calculs sont différentes de celles utilisées par la référence [16].

La Figure III.1 compare les évolutions de l'enthalpie spécifique, la pression de vapeur, le volume spécifique et l'humidité spécifique en fonction de la température sèche, obtenues avec 'BASMA calculation' et avec la référence [16].





**Figure III.1.** a) Enthalpie spécifique, b) Pression de vapeur, c) Volume spécifique et d) l'Humidité spécifique en fonction de la température sèche.

Les graphiques obtenus avec notre outil de calcul semblent avoir des évolutions similaires à celles de la référence [16], avec une légère disparité qui est probablement due à l'utilisation de formules alternatives et/ou à l'approximation des calculs.

### III.1.2. Validation de l'outil de calcul avec un digramme psychrométrique

Pour cette seconde validation, il est question de situer l'emplacement d'un air humide (conditions de base :  $\theta = 20$  °C, Hr = 30 %, z = 0 m) sur un digramme psychrométrique, et cela en utilisant notre outil, la référence [14] et un digramme psychrométrique de type ASHRAE.

La Figure III.2 montre l'emplacement de l'air ( $\theta = 20$  °C, Hr = 30 %) comme affiché par notre outil de calcul, tandis que les Figures III.3 et III.4 montrent respectivement l'emplacement de cet air sur le diagramme de la référence [16] et sur un diagramme psychrométrique ASHRAE.

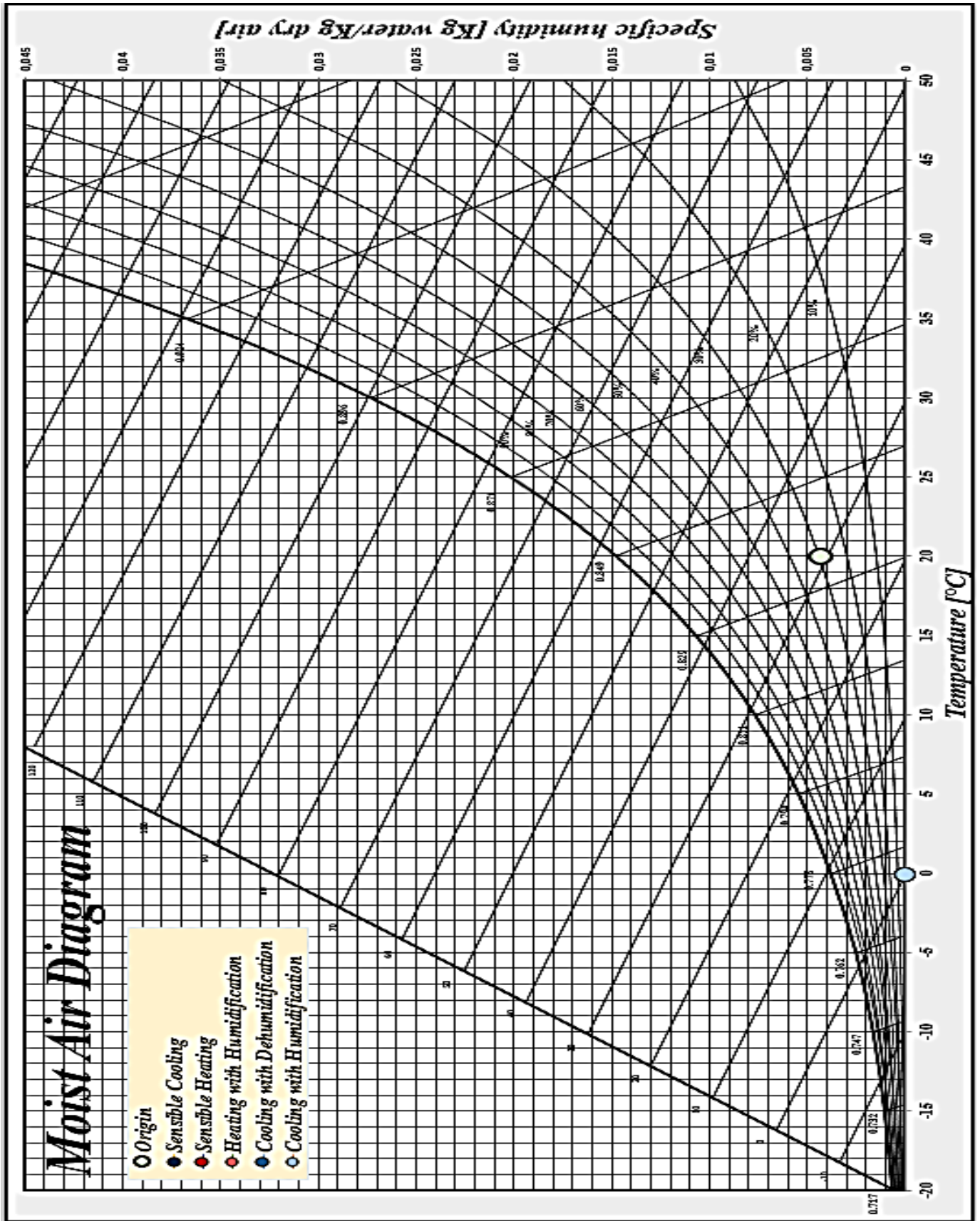


Figure III.2. Position du point (20 °C, 30%) sur un diagramme psychrométrique 'BASMA calculation'

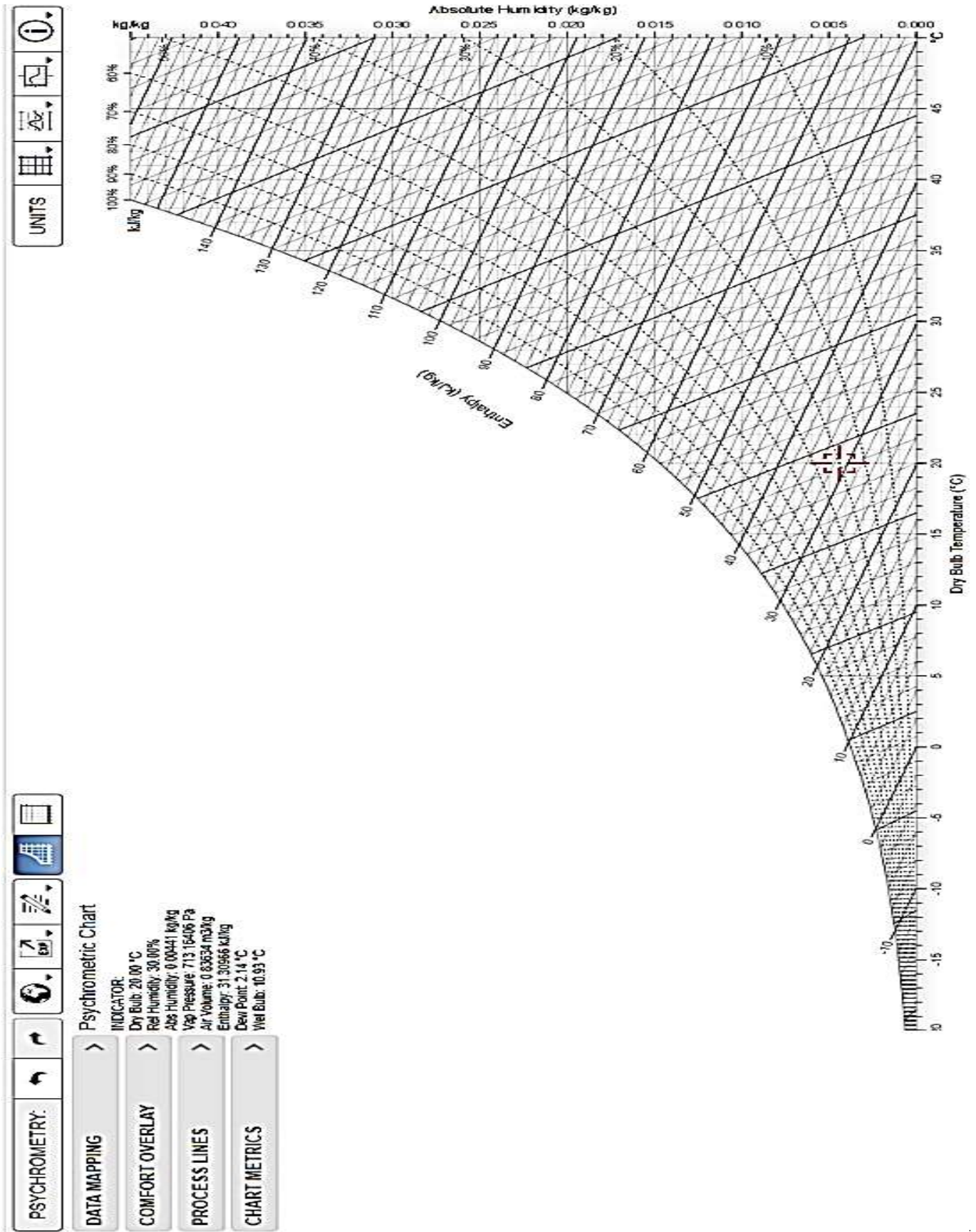


Figure III.3. Position de point (20 °C, 30%) sur le diagramme de l'application web 'Psychrometric Chart'.

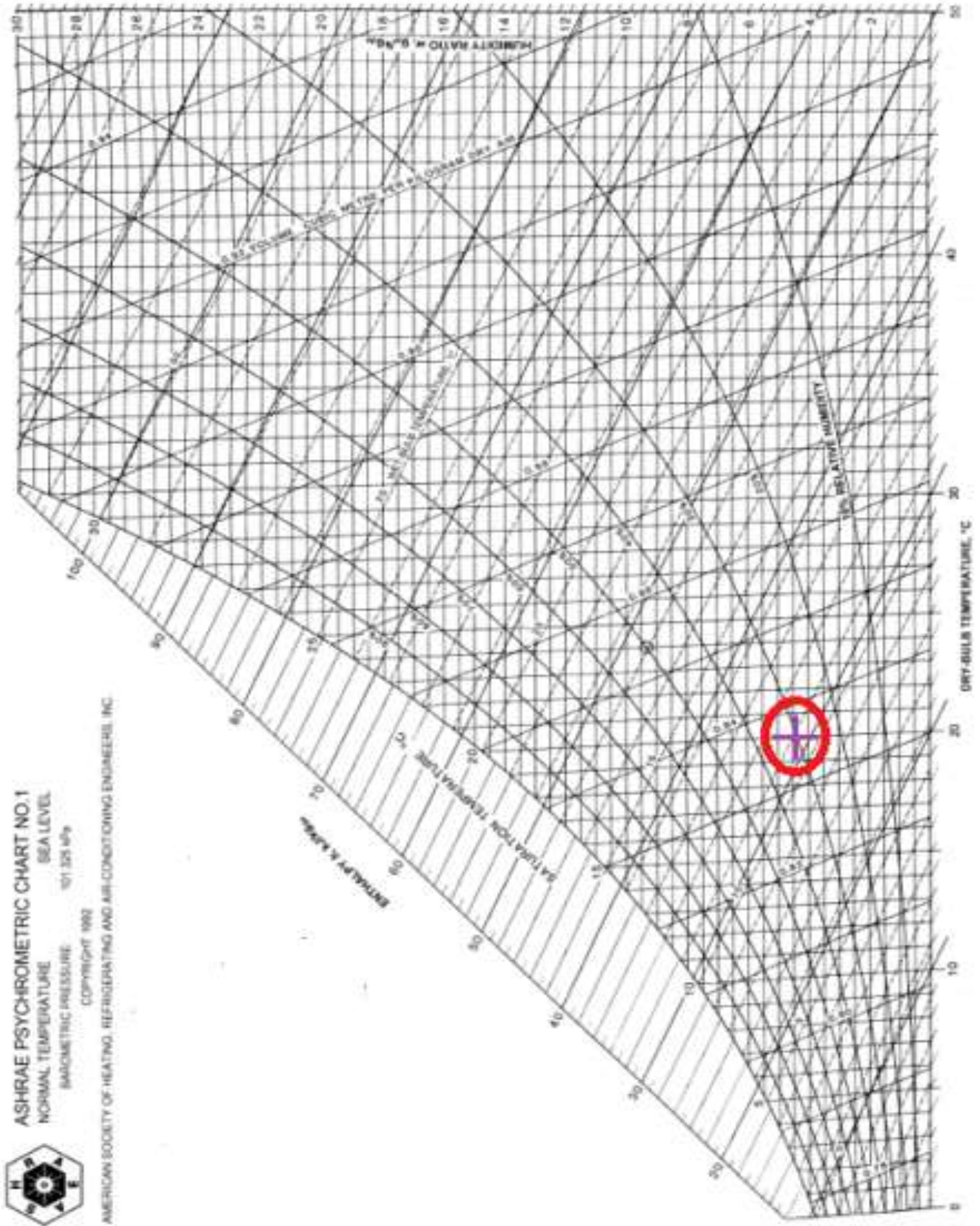


Figure III.4. Position du point (20 °C, 30%) sur le diagramme psychrométrique ASHRAE.

D'après les figures précédentes, on constate que sur les trois diagrammes, la position du point (20 °C, 30%) est quasi identique. Cependant, l'humidité spécifique qu'on peut lire sur les diagrammes peut différer, par exemple :

- Notre outil,  $r^s = 0,00435 \text{ kg/kg}_{\text{as}}$ .
- Référence [16],  $r^s = 0,00441 \text{ kg/kg}_{\text{as}}$ .
- Diagramme psychrométrique ASHRAE,  $r^s = 0,0045 \text{ kg/kg}_{\text{as}}$ .

Les résultats présentés ci-dessus indiquent clairement que l'outil de calcul '**BASMA calculation**' est parfaitement valide pour le calcul des propriétés psychrométriques de l'air humide. De plus, cet outil donne des résultats plus précis que ceux d'une lecture sur un diagramme psychrométrique.

### III.2. Exemples de calculs des propriétés psychrométriques de l'air humide

Dans cette partie, on présente quelques exemples de l'influence de certains paramètres psychrométriques sur les autres propriétés psychrométriques de l'air humide.

#### III.2.1. Variation de l'humidité spécifique

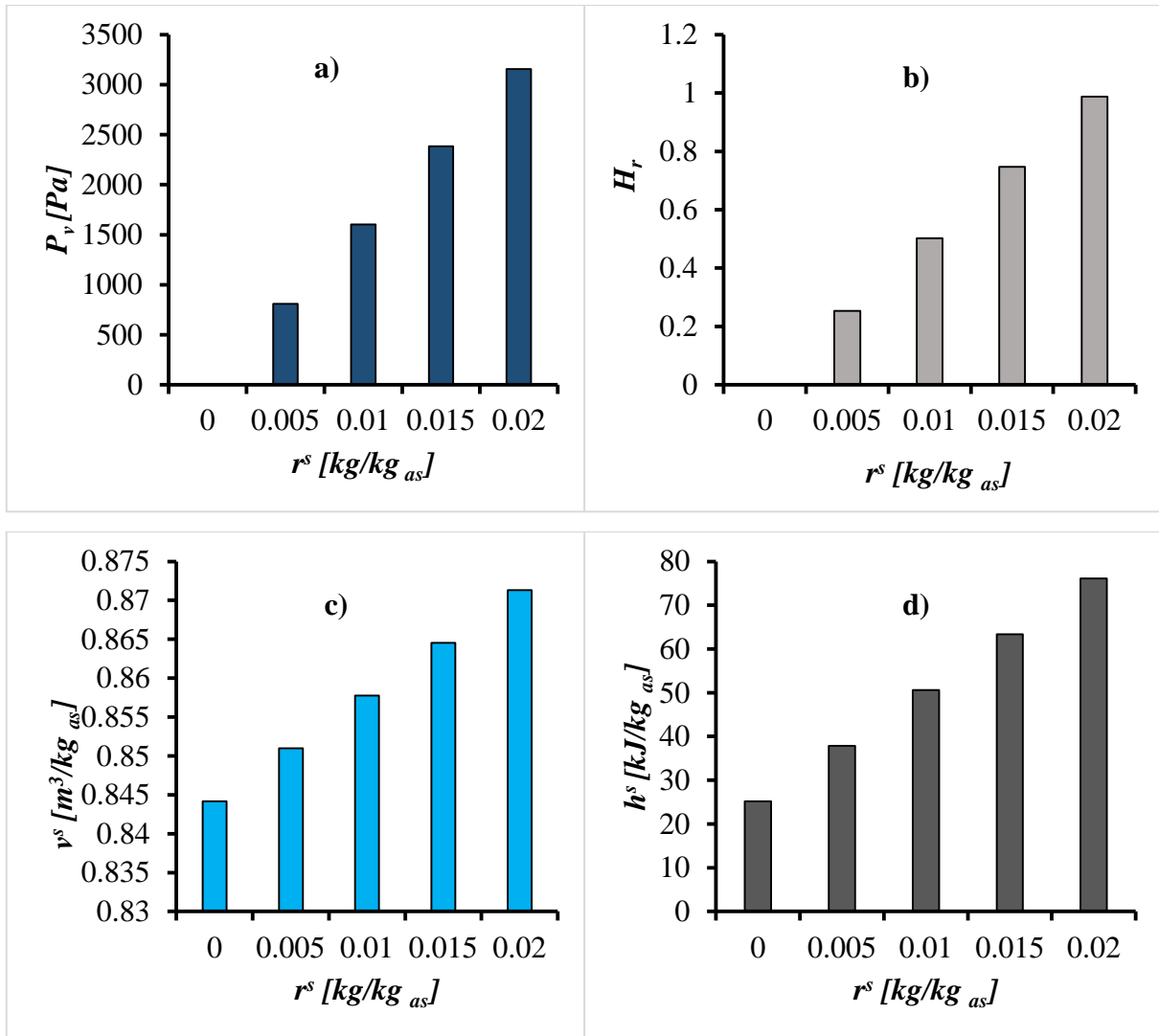
Pour ce premier exemple, on s'intéresse à l'impact de la variation de l'humidité spécifique sur les autres paramètres psychrométriques de l'air humide. Pour cela, on fait varier  $r^s$  de 0 à 0.04 kg/kg<sub>as</sub> tout en supposant la température sèche à 25 °C et la pression à 101325 Pa (niveau de la mer).

Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus des propriétés psychrométriques de l'air humide pour une altitude nulle, lorsqu'on varie l'humidité spécifique.

**Tableau III.3.** Propriétés psychrométriques de l'air humide obtenues par notre outil de calcul pour une température sèche constante.

$\theta = 25 \text{ °C et } z = 0 \text{ m}$				
$r^s \text{ [kg/kg}_{\text{as}}]$	$P_v \text{ [Pa]}$	$Hr$	$v^s \text{ [m}^3\text{/kg}_{\text{as}}]$	$h^s \text{ [kJ/kg}_{\text{as}}]$
0	0	0	0,8442	25,15
0,005	808,0164	0,2529	0,851	37,8823
0,01	1603,2478	0,5018	0,8578	50,6147
0,015	2385,9951	0,7469	0,8645	63,347
0,02	3156,5501	0,9881	0,8713	76,0793

La Figure III.5 montre des histogrammes qui représentent l'évolution des propriétés psychrométriques de l'air humide en fonction de l'humidité spécifiques. D'après ces histogrammes, on remarque bien que les propriétés psychrométriques de l'air humide augmentent lorsqu'on augmente la teneur en eau de cet air.



**Figure III.5.** a) Pression de vapeur, b) Humidité relative, c) Volume spécifique et d) l'Enthalpie spécifique en fonction de l'humidité spécifique.

### III.2.2. Variation de l'altitude

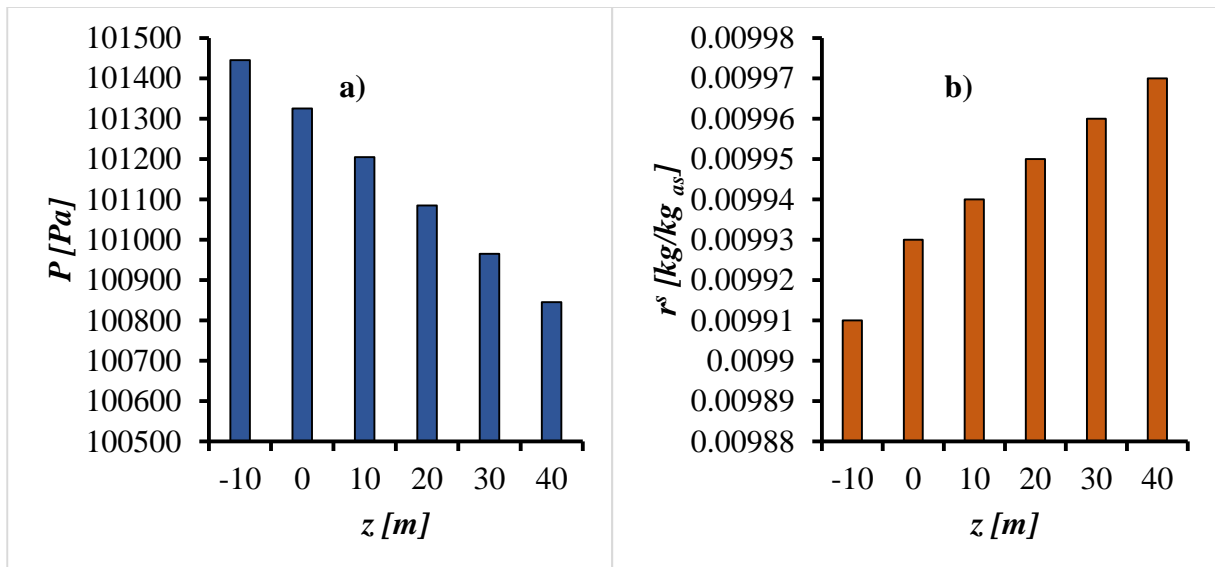
Pour ce deuxième exemple, on étudie l'impact de la variation de l'altitude sur les paramètres psychrométriques de l'air humide. Pour cela, on fait varier l'altitude de -10 m à +10 m tout en supposant la température sèche à 25 °C et l'humidité relative à 50 %.

Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus des propriétés psychrométriques de l'air humide pour une humidité relative constante égale à 50 % et une température sèche constante à 25 °C, en fonction de l'altitude.

**Tableau III.4.** Propriétés psychrométriques de l'air humide obtenues par notre outil de calcul pour une gamme d'altitude.

$\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}, \psi = 50 \%$				
$z \text{ [m]}$	$P \text{ [Pa]}$	$r^s \text{ [kg/kg}_{as}]$	$v^s \text{ [m}^3\text{/kg}_{as}]$	$h^s \text{ [kJ/kg}_{as}]$
-10	101445,4482	0,00991	0,8566	50,3938
0	101325,2587	0,00993	0,8577	50,4243
10	101205,1846	0,00994	0,8587	50,4547
20	101085,2257	0,00995	0,8597	50,4852
30	100965,382	0,00996	0,8608	50,5158
40	100845,6534	0,00997	0,8618	50,5464

La Figure III.6 montre les évolutions de la pression atmosphérique, l'humidité spécifique volume spécifique et l'enthalpie spécifique, en fonction de l'altitude. Ces histogrammes mettent en évidence que  $r^s$ ,  $v^s$  et  $h^s$  augmentent en augmentant l'altitude, ce qui n'est pas le cas avec  $P$  qui diminue, ce qui est tout à fait logique.



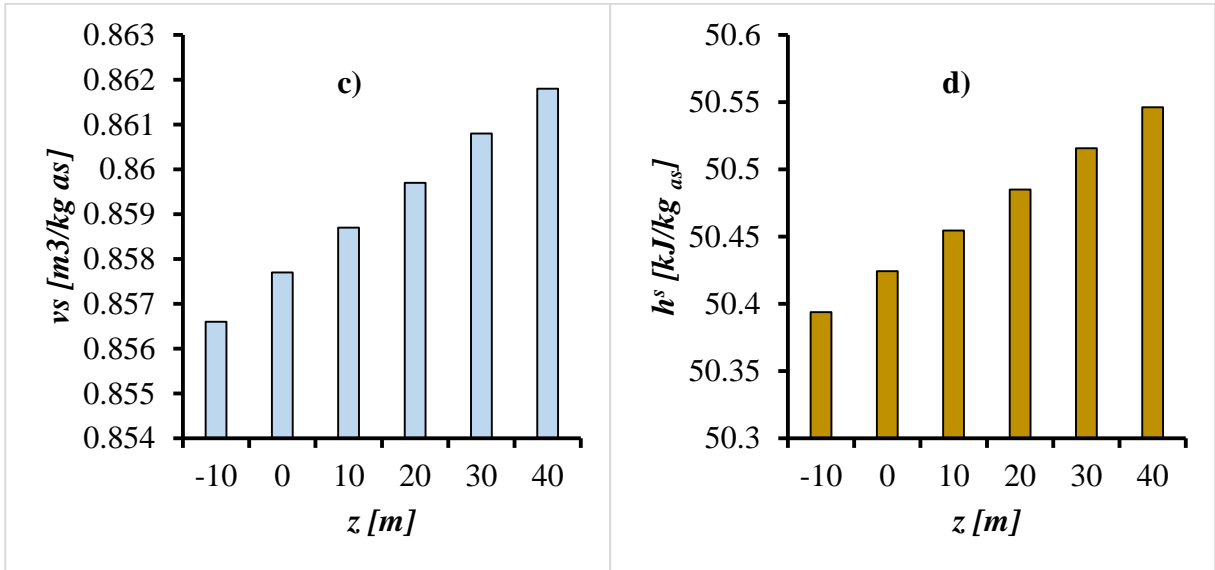


Figure III.6. a) Pression atmosphérique, b) Humidité spécifique, c) Volume spécifique et d) l'Enthalpie spécifique en fonction de l'altitude.

### III.3. Exemples de calculs des opérations élémentaires de traitement de l'air humide

Dans ce qui suit, on présente des exemples de calculs des opérations élémentaires de traitement de l'air humide effectués avec '*BASMA calculation*'. Pour ces exemples, on suppose la température sèche ( $\theta_1$ ) à 22 °C et l'humidité relative ( $\psi_1$ ) à 35% de l'état initial, tandis que  $z$  est nul.

Il est à noter que pour les cinq exemples, on fait varier la quantité de chaleur jusqu'à obtenir une humidité relative saturée ou une température sèche ( $\theta_2$ ) de 50°C.

#### III.3.1. Refroidissement sensible

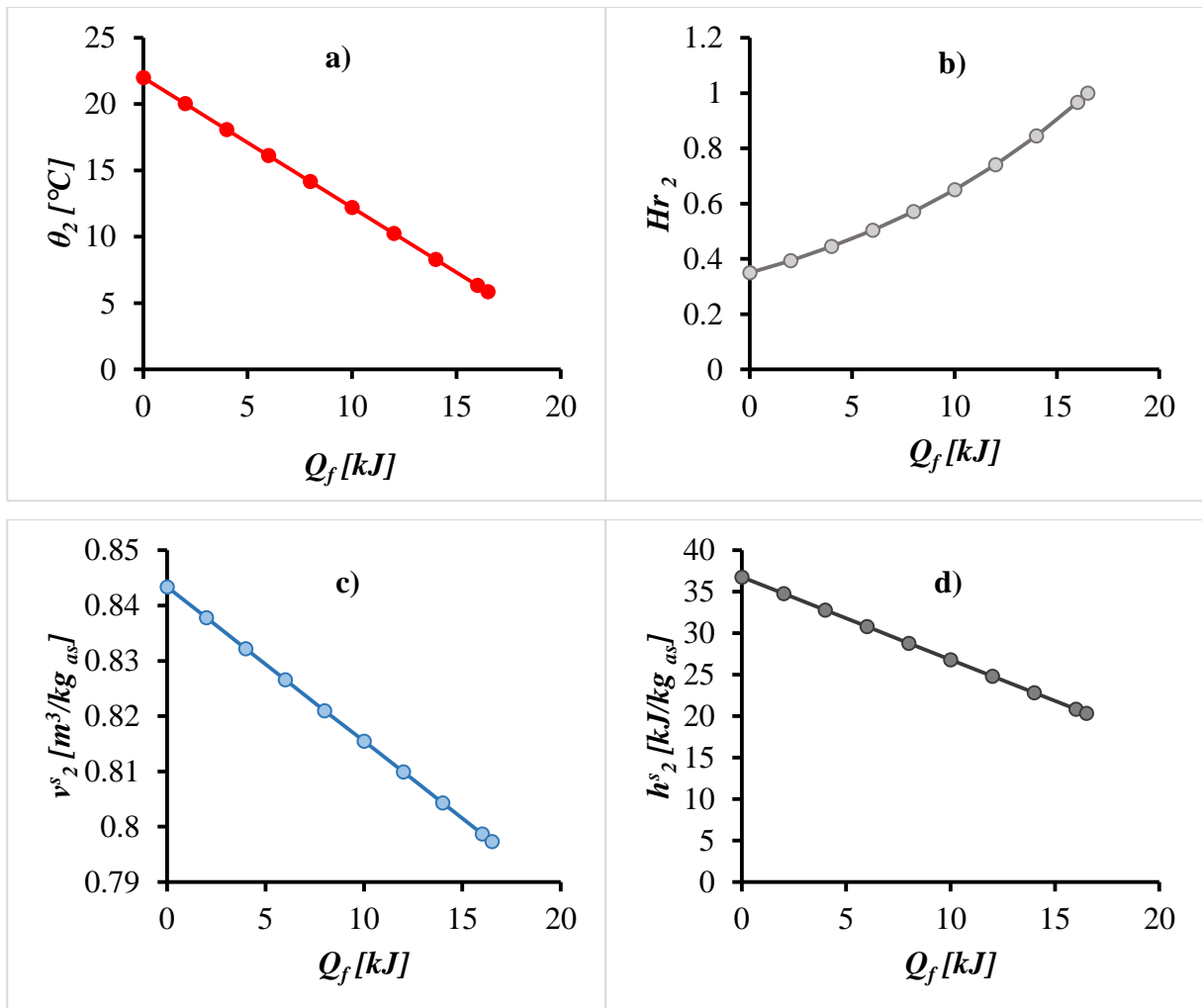
Pour ce premier exemple, on fait varier la quantité de chaleur de refroidissement, tout en supposant la masse d'air sec à 1 kg<sub>as</sub>.

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus de l'état final des propriétés psychrométriques de l'air humide pour le refroidissement sensible, en fonction de la quantité de chaleur produite par la source froide.

**Tableau III.5.** Valeurs obtenues de l'état final des propriétés psychrométriques de l'air humide pour le refroidissement sensible.

$Q_f$ [kJ]	$\theta_2$ [°C]	$Hr_2$	$v^s_2$ [m <sup>3</sup> /kg <sub>as</sub> ]	$h^s_2$ [kJ/kg <sub>as</sub> ]
0	22	0,35	0,8434	36,7647
4	18,0846	0,4449	0,8322	32,7847
8	14,1692	0,5715	0,821	28,8045
12	10,2537	0,7401	0,8099	24,8244
16	6,3383	0,9662	0,7987	20,8443
16,5	5,8489	0,9995	0,7973	20,3468

La Figure III.7 montre l'évolution de propriétés psychrométriques de l'air humide en fonction de la quantité de chaleur produite par la source froide.



**Figure III.7.** a) Température sèche, b) Humidité relative, c) Volume spécifique et d) l'Enthalpie spécifique de l'état final en fonction de la quantité de chaleur de refroidissement.

Les graphiques présentés ci-dessus permettent de constater que les valeurs de la température sèche, du volume spécifique et de l'enthalpie spécifique diminuent lorsqu'on augmente la valeur de la quantité de chaleur de refroidissement, tandis que la valeur de l'humidité relative augmente en augmentant cette quantité de chaleur.

### III.3.2. Chauffage sensible

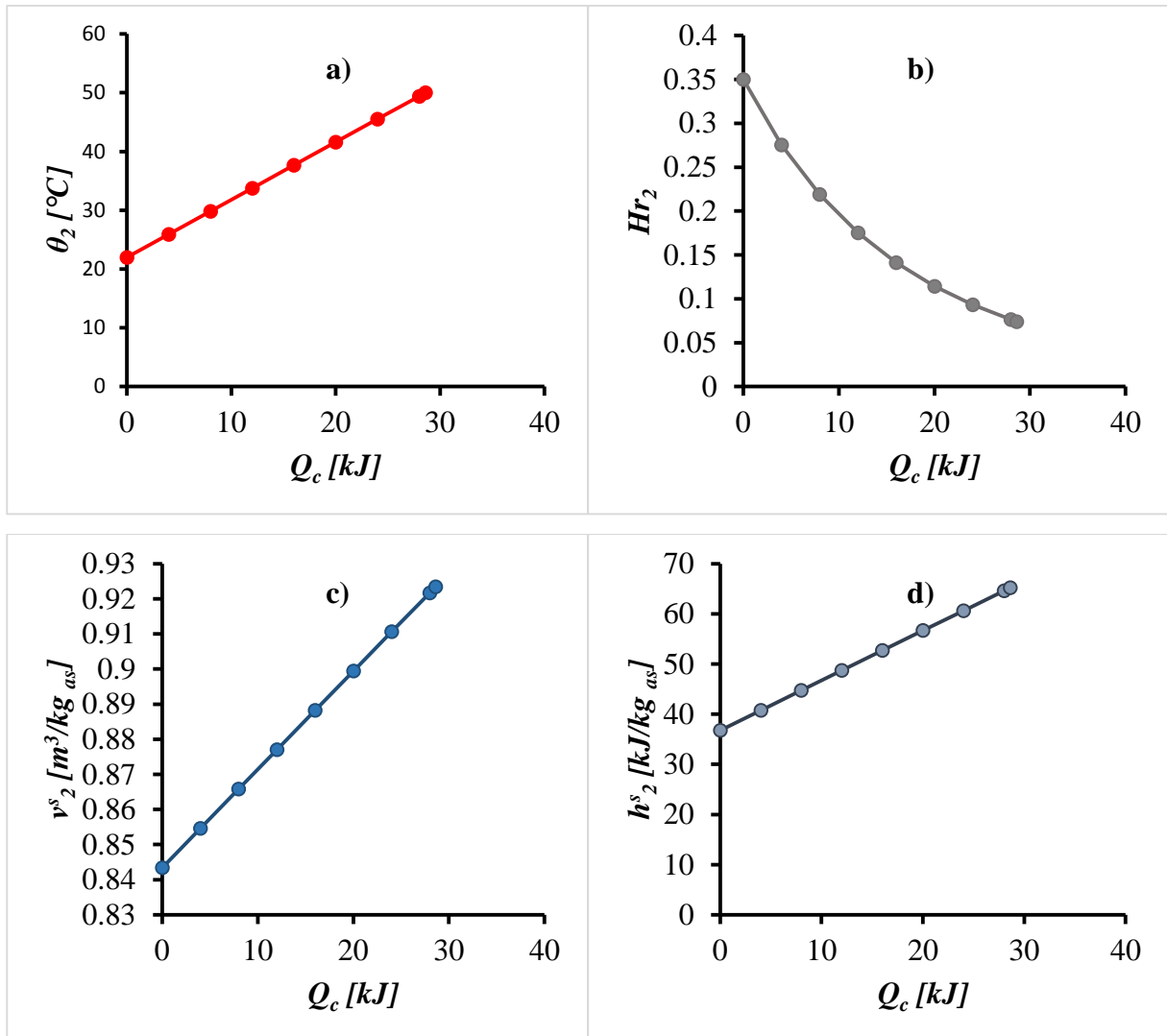
Pour ce deuxième exemple, on fait varier la quantité de chaleur fournie par la source chaude, tout en fixant la masse d'air sec à 1 kg<sub>as</sub>.

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus de l'état final des propriétés psychrométriques de l'air humide pour le chauffage sensible, en fonction de la quantité de chaleur de chauffage.

**Tableau III.6.** Valeurs obtenues de l'état final des propriétés psychrométriques de l'air humide pour le chauffage sensible.

$Q_c$ [kJ]	$\theta_2$ [°C]	$Hr_2$	$v^s_2$ [m <sup>3</sup> /kg <sub>as</sub> ]	$h^s_2$ [kJ/kg <sub>as</sub> ]
0	22	0,35	0,8434	36,7648
4	25,9154	0,2755	0,8546	40,7449
8	29,8309	0,2191	0,8658	44,725
12	33,7463	0,1754	0,877	48,7051
16	37,6617	0,1412	0,8882	52,6852
20	41,5771	0,1144	0,8994	56,6653
24	45,4927	0,0933	0,9106	60,6454
28	49,408	0,0764	0,9217	64,6255
28,6	49,9953	0,0742	0,9234	65,2225

La Figure III.8 montre l'évolution de propriétés psychrométriques de l'air humide en variant la quantité de chaleur de chauffage.



**Figure III.8.** a) Température sèche, b) Humidité relative, c) Volume spécifique et d) l'Enthalpie spécifique de l'état final en fonction de la quantité de chaleur de chauffage.

Les graphiques présentés ci-dessus nous montrent que lorsqu'on varie la quantité de chaleur fournie par le serpentin de chauffage ( $Q_c$ ), les valeurs de la température sèche, le volume spécifique et l'enthalpie spécifique augmentent. Ce n'est pas le cas avec l'humidité relative dont les valeurs diminuant en augmentant cette quantité de chaleur.

### III.3.3. Refroidissement avec déshumidification

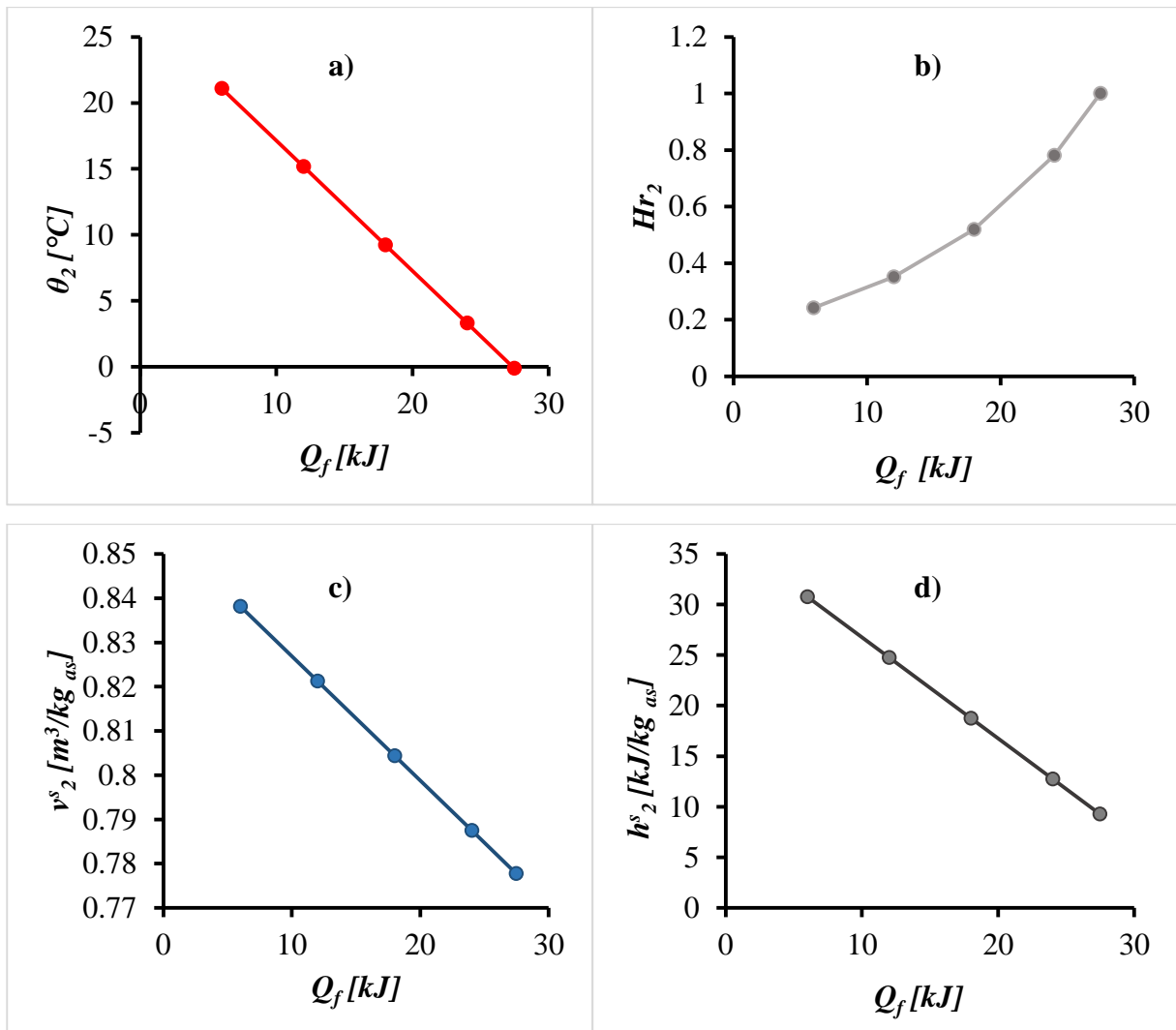
Pour ce troisième exemple, on fait varier la quantité de chaleur de refroidissement, tout en supposant la masse d'air sec à 1  $kg_{as}$  et la masse d'eau à 2 g.

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus de l'état final pour le refroidissement avec déshumidification.

**Tableau III.7.** Valeurs obtenues de l'état final des propriétés psychrométriques de l'air humide pour le refroidissement avec déshumidification.

$Q_f$ [kJ]	$\theta_2$ [°C]	$Hr_2$	$v^s_2$ [m <sup>3</sup> /kg <sub>as</sub> ]	$h^s_2$ [kJ/kg <sub>as</sub> ]
6	21,0936	0,2415	0,8382	30,7648
12	15,1699	0,3508	0,8213	24,7648
18	9,2461	0,5186	0,8044	18,7648
24	3,3223	0,7814	0,7875	12,7648
27,47	-0,1037	0,9996	0,7778	9,2948

La Figure III.9 montre l'évolution de propriétés psychrométriques de l'air humide en fonction de la chaleur de refroidissement.



**Figure III.9.** a) Température sèche, b) Humidité relative, c) Volume spécifique et d) l'Enthalpie spécifique de l'état final en fonction de la quantité de chaleur de refroidissement.

Les évolutions ci-dessus montrent que lorsqu'on fait augmenter la quantité de chaleur produite par la source froide ( $Q_f$ ), les valeurs de la température sèche, le volume spécifique et l'enthalpie spécifique diminuent, tandis que l'humidité relative tend à augmenter en augmentant  $Q_f$ .

### III.3.4. Chauffage avec humidification

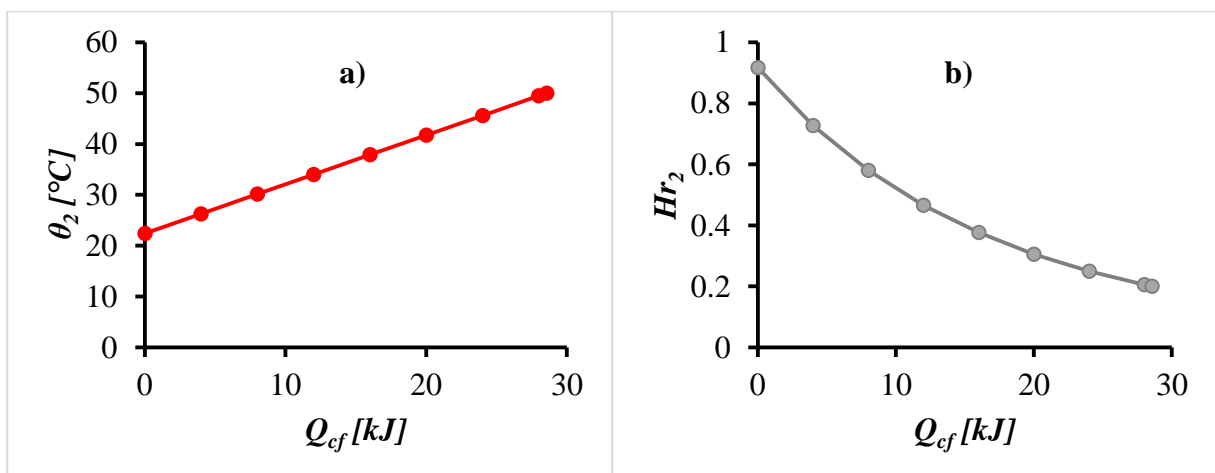
Pour ce quatrième exemple, on fait varier la quantité de chaleur fournie par le serpentin de chauffage et l'injecteur de vapeur ( $Q_{cf}$ ), tout en supposant la masse d'air sec à 1 kg<sub>as</sub>, la masse d'eau à 10 g, et la température de vapeur d'eau à 45 °C.

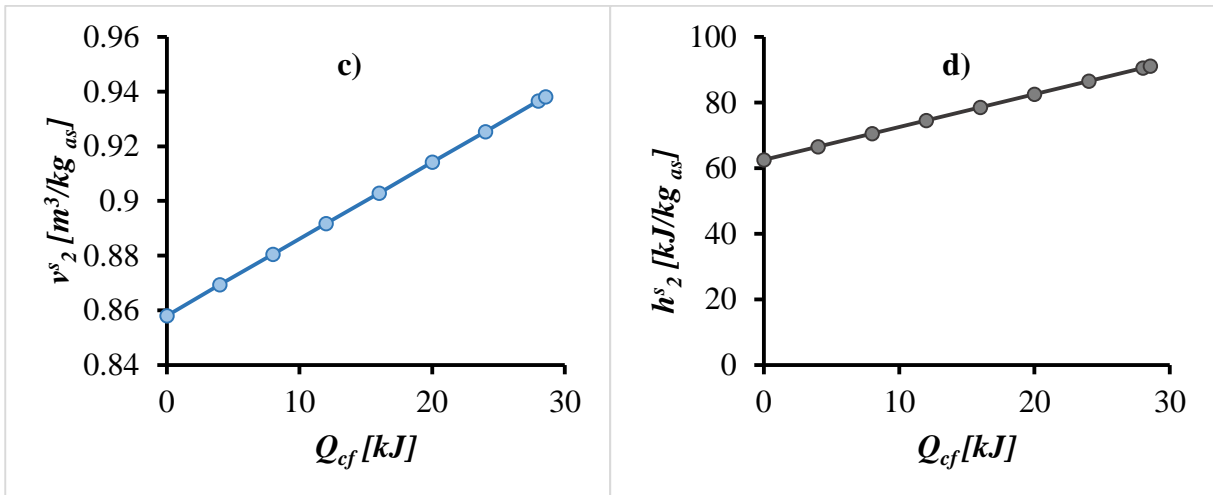
Le tableau ci-dessous montre les résultats obtenus de l'état final pour le cas d'un chauffage avec humidification.

**Tableau III.8.** Valeurs obtenues de l'état final des propriétés psychrométriques de l'air humide pour le chauffage avec humidification.

$Q_{cf}$ [kJ]	$\theta_2$ [°C]	$Hr_2$	$v^{s_2}$ [m <sup>3</sup> /kg <sub>as</sub> ]	$h^{s_2}$ [kJ/kg <sub>as</sub> ]
0	22,406	0,9166	0,858	62,5947
4	26,2715	0,7266	0,8693	66,5947
8	30,1371	0,5798	0,8805	70,5947
12	34,0026	0,4656	0,8917	74,5947
16	37,8682	0,3762	0,9029	78,5947
20	41,7337	0,3057	0,9142	82,5947
24	45,5992	0,2498	0,9254	86,5947
28	49,4648	0,2053	0,9366	90,5947
28,55	49,9963	0,1999	0,9381	91,1447

La Figure III.10 montre l'évolution de propriétés psychrométriques de l'air humide en fonction de la quantité de chaleur fournie par le serpentin de chauffage et l'injecteur de vapeur ( $Q_{cf}$ ).





**Figure III.10.** a) Température sèche, b) Humidité relative, c) Volume spécifique et d) l'Enthalpie spécifique de l'état final en fonction de la quantité de chaleur fournie par la source chaude et l'injecteur de vapeur.

On remarque que l'augmentation de la quantité de chaleur fournie par le serpentin de chauffage et l'injecteur de vapeur ( $Q_{cf}$ ) fait augmenter les valeurs de la température sèche, du volume spécifique et de l'enthalpie spécifique. Ce n'est pas le cas de l'humidité relative qui décroît en augmentant  $Q_{cf}$ .

### III.3.5. Refroidissement avec humidification

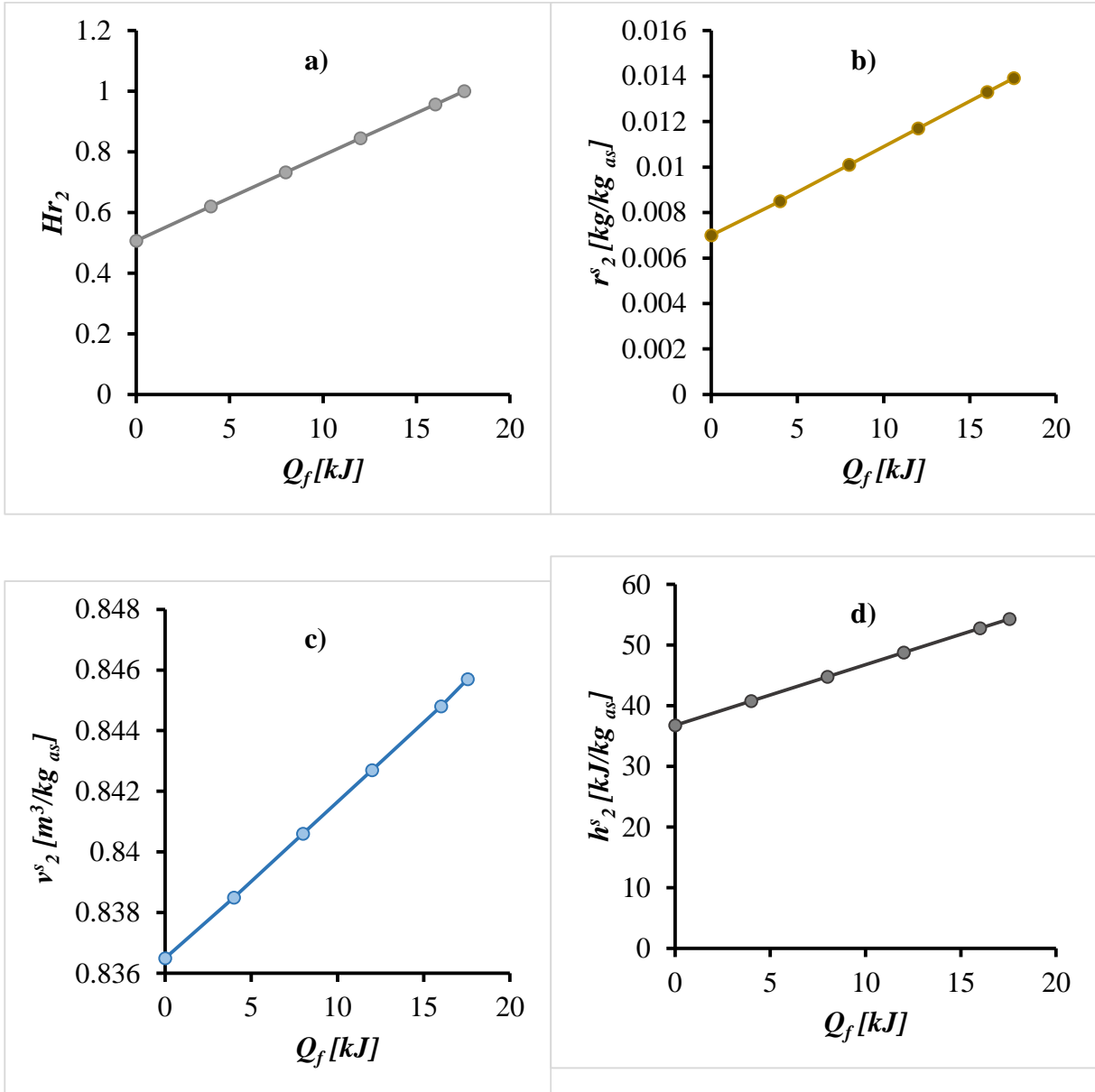
Pour ce dernier exemple, la quantité de chaleur de refroidissement est variée, tandis qu'on suppose la masse d'air sec et la température de l'eau égale à 1 kg<sub>as</sub> et 19 °C, respectivement.

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus de l'état final pour le refroidissement avec humidification.

**Tableau III.9.** Valeurs obtenues de l'état final des propriétés psychrométriques de l'air humide pour le refroidissement avec humidification.

$Q_f$ [kJ]	$Hr_2$	$r_s^s$ [kg/kg <sub>as</sub> ]	$v_s^s$ [ $m^3/kg_{as}$ ]	$h_s^s$ [kJ/kg <sub>as</sub> ]
0	0,5067	0,007	0,8365	36,7675
4	0,62	0,0085	0,8385	40,7648
8	0,7327	0,0101	0,8406	44,7648
12	0,8449	0,0117	0,8427	48,7648
16	0,9565	0,0133	0,8448	52,7648
17,55	0,9996	0,0139	0,8457	54,3148

La Figure III.11 montre l'évolution de propriétés psychrométriques de l'air humide en fonction de la quantité de chaleur de refroidissement.



**Figure III.11.** a) Humidité relative, b) Humidité spécifique, c) Volume spécifique et l'Enthalpie spécifique de l'état final en fonction de la quantité de chaleur de refroidissement.

On constate que lorsqu'on fait accroître la quantité de chaleur de refroidissement ( $Q_f$ ), les propriétés psychrométriques augmentent.

La figure III.12 représente les évolutions élémentaires de traitement de l'air humide pour une quantité de chaleur de 10 kJ.

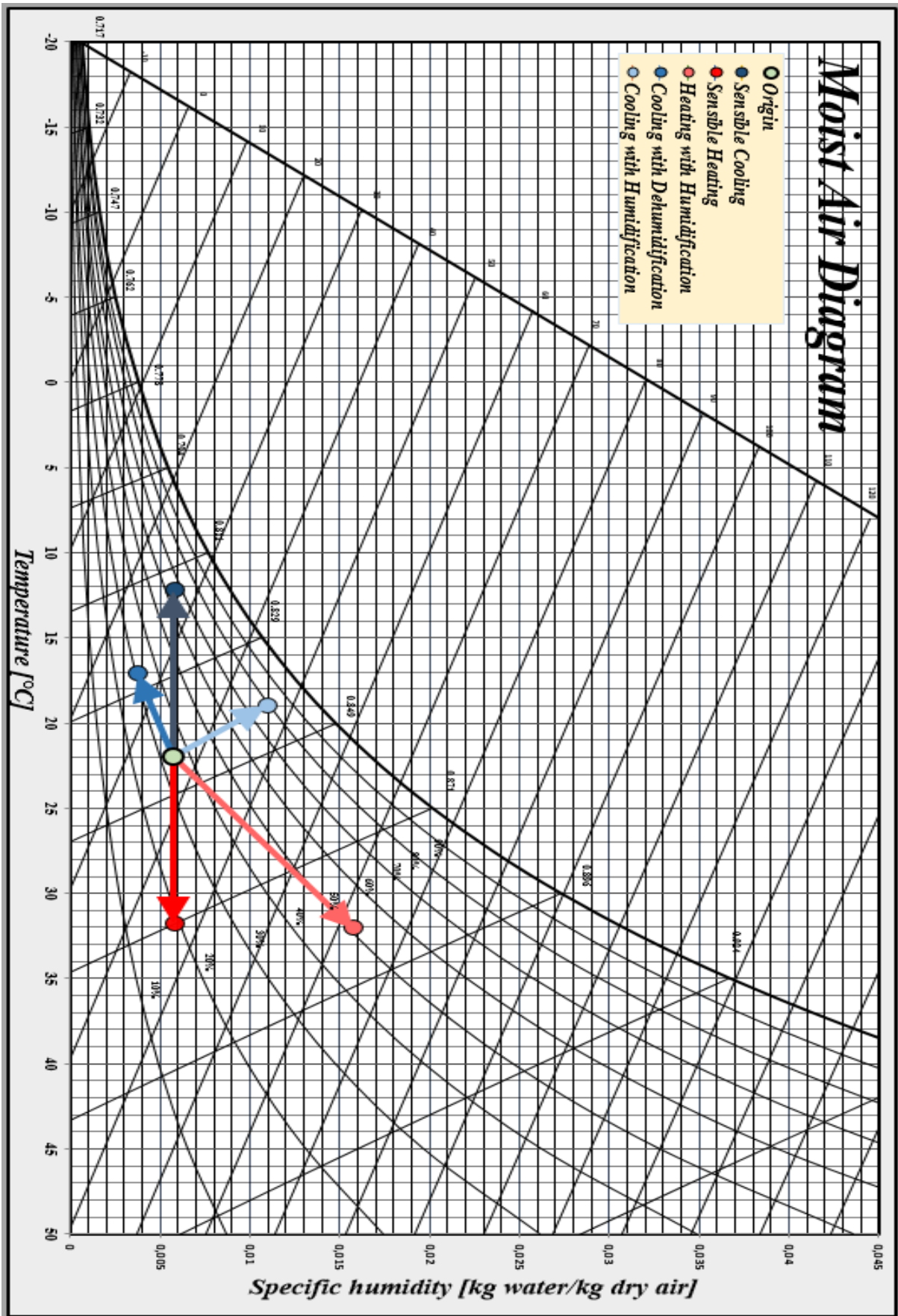
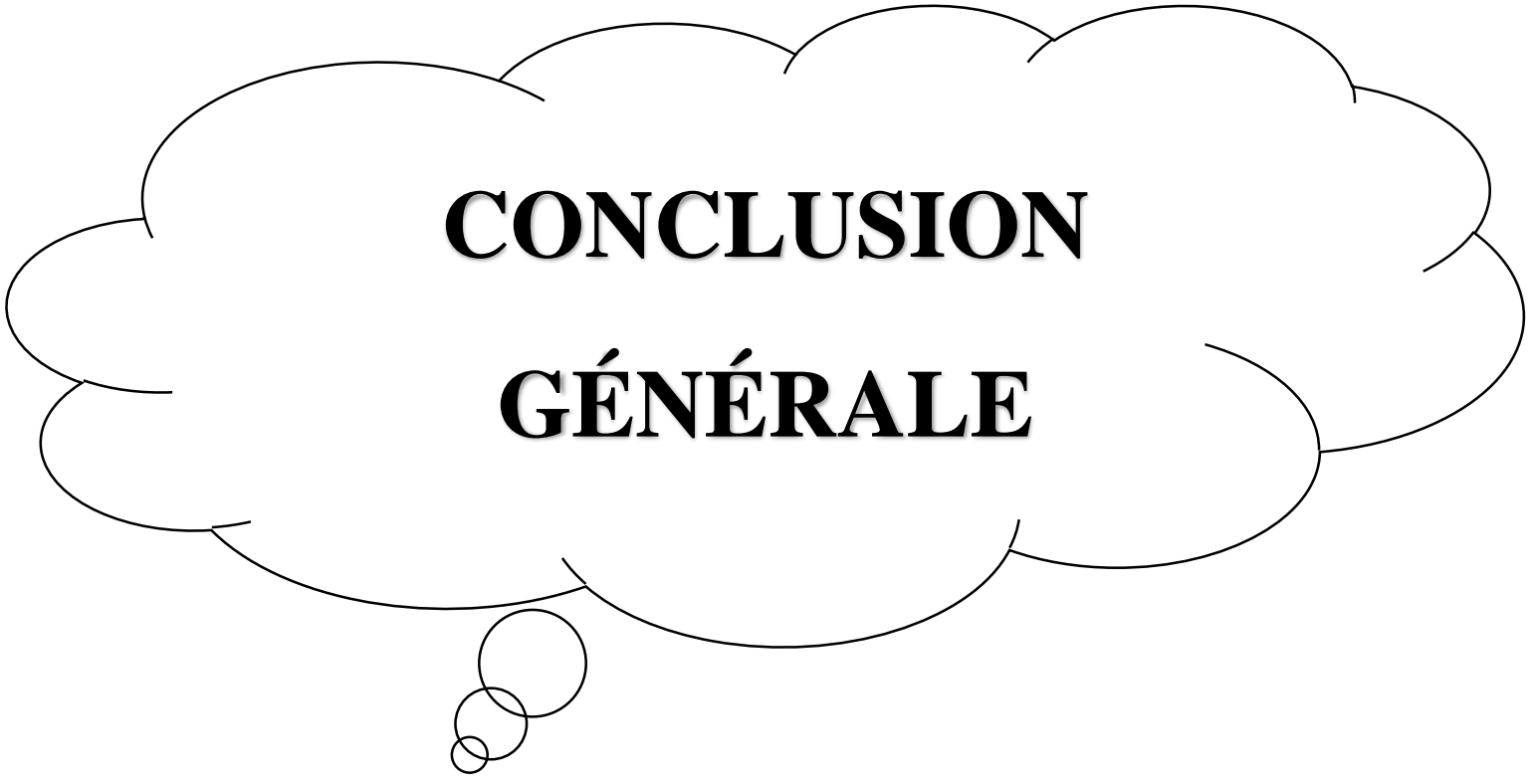


Figure III.12. Évolutions élémentaires de traitements de l'air humide sur le diagramme de l'air humide 'BASMA calculation'.



**CONCLUSION**  
**GÉNÉRALE**

## *Conclusion générale*

Dans le cadre du présent projet de fin d'études, il a été question de développer une application sous le logiciel MS Excel afin de calculer les propriétés psychrométriques de l'air humide et les évolutions élémentaires de traitement de l'air humide. La double motivation derrière ce projet réside dans le fait de l'inexistence d'une telle application conçue localement et le fait que la majeure partie des applications qu'on trouve sur internet sont des boîtes noires dépourvues de détails. Par conséquent, le challenge était de développer un outil de calcul qui soit fiable, simple d'utilisation et accessible pour la communauté universitaire et les experts du domaine.

Afin de mener à bien ce projet, on a eu recours au logiciel de tabulation Excel pour implémenter l'outil de calcul des propriétés psychrométriques de l'air humide et des opérations élémentaires de traitement d'air humide. En effet, ce logiciel offre l'avantage d'être un excellent outil pour le développement d'applications qui peuvent être utilisées par les ingénieurs climatiques. Pour ce faire, il a fallu implémenter les formules psychrométriques dans ce logiciel et les automatiser en utilisant une série d'instructions, dites macros. De plus, l'outil de calcul nommé '*BASMA calculation*' a été validé en confrontant les résultats obtenus avec ceux de la référence [16]. Une fois l'outil validé, une campagne d'exemples a été effectuée afin d'évaluer, vérifier et de confirmer le bon fonctionnement de l'outil de calcul.

Ce projet a été une expérience intéressante et très bénéfique pour moi, car ça m'a permis d'enrichir mes connaissances théoriques et mes compétences dans le domaine de la conception d'outils de calcul et de programmation. À cela s'ajoute l'application des connaissances acquises tout au long de mes études.

Enfin le développement de cette application ne s'arrête pas à ce niveau, car on pense à ajouter plusieurs fonctionnalités à cet outil de calcul, comme la possibilité de suivre l'évolution complète d'un air humide lors d'une opération de chauffage ou rafraîchissement, ... etc.



**RÉFÉRENCES**

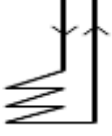


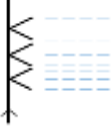

## Références

- [1] J. Desmons, Aide-Mémoire « Génie Climatique », 2<sup>e</sup> Edition, Dunod, 2009.
- [2] Mesure de l'Humidité de l'Air-Paramètres Hygrométriques, Norme NF X 15-110, AFNOR, Juillet 1994.
- [3] J. Gosse, Guide « Technique de Thermique », Dunod, 1981.
- [4] M. Duminil, « Air Humide [B 2 230] », Techniques De L'ingénieur.
- [5] B. Diop, Mémoire de Fin d'Études « Étude d'Implantation d'une Climatisation Centralisée à la Gouvernance de Saint Louis », Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2004.
- [6] J. Bouteloup, M. Le Guay, J. Ligen, « Traitement de l'air », Éditions Parisienne 1996.
- [7] J. Castaing-Lasvignottes, Polycopié de Cours, « Air Humide : Propriétés Thermodynamiques, Opérations Unitaires et Technologie Associés à son Emploi », Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2003.
- [8] M. Amokrane, Polycopié de Cours, « Systèmes de Conditionnement D'air », Département de Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2020.
- [9] P. Iselt, U. Arndt, J.L. Cauchepin, « Manuel de l'Humidification de l'Air », Pyc Livres, 1997.
- [10] S. Morreale, « Notions de Base : Technique de Chauffage Structure et Fonctions d'Installation », Tome I, 2001.
- [11] T. Company, « Trane Air Conditioning Manual », The Trane Company, 1987.
- [12] N. Nabeche, F. Bounsiar, Mémoire de Fin d'Études « Étude de Refroidissement du l'Air par Brumisation », Département de Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2015.
- [13] Batterie eau chaude, <https://www.fiabishop.com/chauffage-ventilation/124-batterie-eau-chaude-26-a-72kw.html>.
- [14] Systèmes énergétiques, <http://tonepi.com/category/systemes-energetiques>.
- [15] Open Classrooms, <https://openclassrooms.com/fr/courses/825502-analysez-des-donnees-avec-excel>.
- [16] Psychometric Chart, <https://drajmarsh.bitbucket.io/psychro-chart2d.html>.



**ANNEXES**

**Annexe A**

<i>Schéma</i>	<i>Nom</i>
	<i>Source chaude ou froide.</i>
	<i>Serpentin de chauffage.</i>
	<i>Source froide avec une surface liquide.</i>
	<i>Injecteur de vapeur.</i>
	<i>Surface mouillée.</i>