

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 de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**En Vue de l'Obtention du Diplôme de Master Académique
en Génie Mécanique
Option: Energétique.**

Intitulé :

Etude de refroidissement du l'air par brumisation

Proposé et dirigé par : M^r NEBBALI. R

Présenté par : M^{elle} NABECHE Nadia

M^r BOUNSIAR Farid

Promotion 2014-2015

Remerciements

Tout d'abord on tient à remercier infiniment le bon Dieu le tout Puissant pour la bonne santé, la volonté et la patience qu'il nous accordés tout au long de nos études.

Nos premiers remerciements vont à nos chères parents que Dieu les protège et leurs procure une longue vie.

On présente nos sincères remerciements avec profonds respects à notre promoteur, Mr NEBBALI. R pour son suivi, sa patience, ses conseils et son aide, tout au long de la réalisation de ce modeste travail.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à Mr Farouk. F, Mr Hamdad. A et Mr Abdédou. A, sans oublier tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation pendant toute la durée de nos études.

On remercie aussi les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce modeste travail.

On n'oublie pas Mme Kaci Karima pour ses efforts et ses conseils avec lesquels elle nous a accompagnés, surtout pendant la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents ;

Mes chers frères : Hamid, Baaziz et Djamel et leurs petites familles.

Mes tres chers sœurs : Ouardia, Taoues, Samira, Tatma, Sonia, Sadia et Kamilia sans oublier leurs petites familles

Ma grande mère Aini que dieu la préserve ;

A ma grande famille, oncles, tantes, cousins et cousines ;

A tous mes amies : Aziza, Feroudja, Karima, Safia, Cylia

Et amis : Abderrahman, Hamide, Yazid

A toute la promotion 2014- 2015 ;

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Nabeche. N

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents ;

*Mes chers frères : Hocine, Ahmed, Mouloud, Kamel et
Madjid.*

Ma tres cher sœur : Nadia

Mes grands parents que dieu les préserve ;

A ma grande famille, oncles, tantes, cousins et cousines ;

A mes amis : Abderrahman, Hamide

A toute la promotion 2014- 2015 ;

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Bounsiar. F

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : L'AIR HUMIDE

1. Introduction :.....	3
2. Définition et compositions chimiques de l'air humide:.....	3
3. Les lois des gaz parfaits :.....	4
3.1. La loi de dalton :	4
3.2. Loi de Boyle-Mariotte :	4
4. Les diagrammes de l'air humide :	5
4.1. Définition :.....	5
4.2. But :.....	5
4.3. Les différents types des diagrammes humides :.....	5
4.3.1. Diagramme de Mollier (h, ω) :.....	6
4.3.2. Diagramme de Carrier (T, ω):.....	6
5. Caractéristiques de l'air humide :.....	7
5.1. Caractéristique thermodynamiques :	7
5.1.1. L'humidité absolue (ou teneur en humidité):.....	7
5.1.2. Humidité relative ou (degré hygrométrique) ϕ :.....	9
5.1.3. Degré de saturation W :.....	9
5.1.4. Températures caractéristiques de l'air humide :.....	10
5.1.4.1. Température sèche (T_s) :	10
5.1.4.2. Température humide (T_h) :.....	10
5.1.4.3. Température de rosée (T_r) :.....	11
5.1.5. Capacité thermique massique(C) :.....	13
5.1.6. Chaleur latente de vaporisation de l'eau $L_v(T)$:.....	13
5.1.7. Enthalpie spécifique de l'air humide :.....	13
5.2. Caractéristiques physiques de l'air humide :.....	14
5.2.1. La viscosité :	14
5.2.2. Le volume spécifique :	15
6. Les évolutions de l'air humide en brumisation :.....	16
6.1. Humidification et réchauffement (de point A vers le point B) :.....	17
6.2. Humidification seule (de point A vers le point C) :.....	17
6.3. Humidification et refroidissement (de point A vers le point D) :	17
6.4. Refroidissement à humidité constante (de point A vers le point F) :	17
6.5. Déshumidification et refroidissement (de point A vers le point G) :	18
7. Les transformations possibles de l'air humide dans une centrale de traitement d'air (CTA) :.....	18
7.1. Composition d'une CTA :.....	18
7.2. Les transformations assurées par la CTA :.....	18
7.2.1 Chauffage simple :.....	18

7.2.2 Refroidissement simple :	21
7.2.3 Chauffage avec humidification :	21
7.2.4 Refroidissement avec humidification :	22
7.2.5 Déshumidification par condensation de vapeur :	24
8. Conclusion :	25

CHAPITRE II : LES TYPES D'HUMIDIFICATEURS D'AIR

1. Introduction :	26
2. Types d'humidificateurs :	26
2.1. Humidificateurs à pulvérisation d'eau atomisée :	26
2.1.1. Humidificateurs-laveurs à pulvérisation d'eau atomisée par buses fixes :	26
2.1.2. Humidificateurs à pulvérisation d'eau atomisée par centrifugation :	28
2.1.3. Humidificateurs à pulvérisation d'eau atomisée par buse rotative :	30
2.1.4. Humidificateur à pulvérisation d'eau atomisée par buses fixes à eau pressurisée :	31
2.1.5. Humidificateur à pulvérisation d'eau atomisée par buses fixes alimentées en eau et air comprimé (ou humidificateur bi fluides) :	34
2.1.6. Humidificateur à pulvérisation d'eau atomisée par ultrasons :	35
2.1.7. Humidificateur à pulvérisation d'eau atomisée par infrasons :	37
2.2. Humidification à évaporation d'eau :	38
2.2.1. Le modèle à eau recyclée :	38
2.2.2. Le modèle à eau perdue :	39
2.3. Humidificateurs à vapeur :	40
2.3.1. Humidificateur à vapeur non autonome à raccorder sur un réseau de vapeur existant :	40
2.3.2. Humidificateur à vapeur autonome du type humidificateur-générateur à électrodes :	42
2.3.3. Humidificateur à vapeur autonome du type humidificateur générateur à résistances :	43
3. Conclusion :	44

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE.

1. Introduction :	45
2. Calcul de la température de la gouttelette (T_g) d'eau :	45
3. Approche numérique :	48
3.1. Gambit :	49
3.2. Fluent :	49
4. Positions du problème :	49
5. Etapes à suivre :	49
5.1. Création de la géométrie :	50
5.1.1. Création des points :	50

5.1.2. Création des droites :	51
5.1.3. Création des faces :	51
5.2. Maillage de la géométrie :	51
5.2.1. Maillage des droites :	51
5.2.2. Maillage des faces :	51
5.3. Les conditions aux limites intérieures et extérieures :	51
5.4. La sauvegarde :	52
5.5. Démarrage de version 2ddp :	52
5.6. Lecture des fichiers :	52
5.7. Vérification du fichier lu :	52
5.8. Vérification d'unités :	53
5.9. Taille de maillage :	53
5.10. Définition des paramètres de calcul :	53
5.11. Activation des équations associées au problème :	53
5.12. Initialisation des calculs :	55
5.13. Choix de la solution :	55
5.14. Critères de la convergence :	55
5.15. Lancement des calculs itératifs :	55
5.16. Visualisation des différents résultats de simulation :	55
6. Résultats et interprétations :	55
6.1. Influence de débit d'eau :	56
6.2. Influence de vitesse des gouttelettes d'eau :	69
6.3. Influence de diamètre des gouttelettes :	74
7. Conclusion :	87
CONCLUSION GENERALE :	88

Liste des figures

- Figure (I.1) : La pression du mélange (air sec et la vapeur d'eau).
- Figure (I.2) : Diagramme de Mollier (h.w).
- Figure (I.3) : Diagramme de Carrier(T.W).
- Figure (I.4) : Humidité absolue.
- Figure (I.5) : Diagramme de l'air humide.
- Figure (I.6) : Température sèche dans le diagramme de l'air humide.
- Figure (I.7) : Température humide.
- Figure (I.8): Température humide dans le diagramme de l'air humide.
- Figure (I.9) : Schéma de principe d'un thermomètre à point de rosée.
- Figure (I.10) : Température de rosée dans le diagramme de l'air.
- Figure (I.11) : Les évolutions dans le diagramme de l'air humide en pulvérisation.
- Figure (I.12) : Chauffage simple.
- Figure (I.13) : L'évolution de chauffage simple dans le diagramme de l'air.
- Figure (I.14) : L'évolution de chauffage avec humidification dans le diagramme de l'air.
- Figure (I.15) : L'évolution de refroidissement avec humidification dans le diagramme de l'air.
- Figure (I.16) : L'évolution dans le diagramme de l'air.
- Figure (II.1) : Schéma de principe d'un humidificateur- laveur à pulvérisation d'eau atomisée.
- Figure (II.2) : Séparateur de gouttelettes à profils spéciaux pour humidificateur-laveur.
- Figure (II.3) : humidificateur à pulvérisation d'eau atomisée par centrifugation.
- Figure (II.4) : Schéma de principe de l'humidificateur à pulvérisation par centrifugation.
- Figure (II.5): Buse rotative et son moteur électrique d'entraînement d'un système humidification par pulvérisation d'eau atomisée.
- Figure (II.6) : Caisson humidificateur d'une centrale de traitement d'air équipé de trois atomiseurs à buse rotative.
- Figure (II.7) : Schéma de principe d'un humidificateur à pulvérisation d'eau atomisée par buses fixes à eau pressurisée.
- Figure (II.8) : détail d'un diffuseur de l'humidificateur de la figure (I.6).
- Figure (II.9) : Exemples d'applications d'un humidificateur à eau pressurisée.
- Figure (II.10) : Principe de fonctionnement de l'humidificateur à eau et air comprimé.
- Figure (II.11) : Détail de la buse de l'humidificateur de pulvérisation
- Figure (II.12): Schéma de fonctionnement du convertisseur piézo-électrique d'un humidificateur par ultrasons.
- Figure (II.13) : schéma de principe d'un humidificateur à pulvérisation par infrasons.
- Figure (II.14) : Détail de l'humidificateur à évaporation à eau recyclée.
- Figure (II.15) : Humidificateur à eau perdue.
- Figure (II.16) : Humidificateur de pièce déplaçable installé dans une salle de musée.
- Figure (II.17) : Détails constructifs de la rampe d'humidification de l'humidificateur à vapeur sèche non autonome.
- Figure (II.18) : Humidificateur de type générateur à électrodes

Figure (II.19) : Principe de fonctionnement de générateur à électrode.

Figure (II.20) : Générateur à résistances.

Figure (III.1) : L'interface GAMBIT.

Figure (III.2) : Onglets du menu principal de GAMBIT.

Figure (III.3) : Icones représentant les étapes pour construire une géométrie sous Gambit.

Figure (III.4-15) : L'évolution des paramètres de l'air au cours de temps à la sortie pour des différents débits d'injection.

Figure (III.16-31) : La distribution de la température et l'humidité absolue de l'air le long de la conduite pour $t=1$ et 5 (s) pour des différents débits d'eau.

Figure (III.32-37) : L'évolution des paramètres de l'air au cours de temps à la sortie pour des différentes vitesses d'injection.

Figure (III.38-41) : La distribution de la température de l'air le long de la conduite à $t=1$ et 6 (s) pour différentes vitesses d'injection.

Figure (III.42-53) : L'évolution des paramètres de l'air au cours de temps à la sortie pour des différents diamètres des gouttelettes d'eau.

Figure (III.54-69) : La distribution de la température de l'air au le long de la conduite à $t=1$ et 6 (s) pour différents diamètres d'injection.

Nomenclature

symboles	Signification	Unité
C	capacité thermique massique.	KJ/kg.°k
Cp	capacité thermique massique à pression constante.	KJ/kg.°k
Dv	diffusivité massique de l'eau dans l'air.	m ² /s
dg	Diamètre de la gouttelette.	m
λ	coefficient d'échange convectif.	w/m ² .°k
h	L'enthalpie spécifique massique.	Kj/kg _{as}
k	Vitesse massique.	m/s
Lv	La chaleur latente de vaporisation.	Kj/kg
m	Masse.	kg
mvs	La masse de la vapeur d'eau à la saturation.	kg
n	nombre de moles.	mol
np	nombre de particules d'eau.	Sans dimension
nv	nombre de moles de la vapeur d'eau.	mol
P	Pression.	Pa
P ₀	pression atmosphérique.	Pa
P _{vsat}	Pression de la vapeur d'eau à la saturation	Pa
qc	Quantité de chaleur sensible.	J
R	Constante des gaz parfait.	J/mol. °K
Re	Nombre de Reynolds.	Sans dimension
ras	Constante d'air sec.	J/kg. °k
rah	Constante d'air humide.	J/kg. °k
s	Section.	m ²
Sh	nombre Sherwood.	Sans unité
T	Température.	°K
Tp	Température de la paroi.	°K
Tg	Température de la gouttelette d'eau.	°K
Ts	Température sèche.	°K
Tr	Température de rosé.	°K
V	Vitesse.	m/s
V*	volume spécifique.	m ³ /kg
X _{ve}	Pourcentage en volume de la vapeur d'eau.	%
X _{as}	Fraction volumique d'air sec.	sans dimension
X _{ve}	Fraction volumique de la vapeur d'eau.	sans dimension

Caractères grecs :

ρ_{as}	La masse volumique d'air sec	Kg /m ³
ρ_v	La masse volumique de la vapeur d'eau	Kg /m ³
ω	Humidité absolue	kg d'eau /kg d'air
φ	Hygrométrie	%
W	Le degré de saturation.	Sans dimension
μ	La viscosité dynamique	kg/m.s
ν	La viscosité cinématique	m ² /s
Φ_T	Le flux de chaleur total	W
Φ_i	Le flux de chaleur partielle	W
σ	La constante de Steffen Boltzmann	W. m ⁻² .K ⁻⁴
λ	coefficient d'échange convectif.	W/m ² .°k

Indices

Indice	Signification
ah	Air humide
as	Air sec
s	sèche
sat	saturation
r	Rosé
ve	Vapeur d'eau
1	Entrée
2	Sortie

Introduction générale

Introduction générale

INTRODUCTION

Nombreux d'entre nous qui, en hiver et en demi-saison, souffrent chez eux, au travail ou ailleurs (l'homme moderne passe 90 % de son temps en local fermé) de maux divers : sécheresses des voies nasales, saignements de nez, irritation et infection des voies respiratoires...etc. Or, ces symptômes sont à mettre sur le compte d'une trop grande sécheresses des différentes muqueuses de l'organisme, sécheresse résultant du faible taux d'humidité de l'air ambiant.

L'humidification consiste à augmenter la teneur en humidité de l'air et les procédés d'humidification utilisés sont : humidification par pulvérisation d'eau, par injection de vapeur et par évaporation à la surface d'un plan d'eau.

Tout le monde l'aura remarqué : la chaleur à plus de 40° dans un environnement sec est plus supportable qu'une température de 31° dans une région humide, Ainsi, une humidité relative de 60% signifie que l'air contient 60% du maximum de vapeur qu'il pourrait contenir à la température qu'il fait.

Il faut noter que plus l'air est chaud, plus il peut contenir de vapeur d'eau ; c'est pourquoi une humidité relative de 60% est propice au confort quand la température est de 20°, mais beaucoup moins quand la température est de 30°. L'air à 30° pouvant contenir beaucoup plus de vapeur que l'air à 20°, nous ressentons beaucoup plus l'effet de l'humidité quand il fait 30° même si l'humidité relative est la même (c'est-à-dire même si le pourcentage est le même) », de plus quand l'atmosphère est chargée en humidité, l'évaporation de la sueur devient plus difficile, jusqu'à devenir quasiment impossible avec plus de 90% d'humidité. « La sueur colle à la peau et l'organisme ne peut plus se refroidir normalement. La chaleur ressentie est alors plus importante que la chaleur réelle et peut devenir insupportable, jusqu'à provoquer des évanouissements et des coups de chaleur ».

Pour pallier les effets secondaires qu'impose l'humidification de l'air, il est impératif de maîtriser les techniques employées.

L'objectif de ce travail s'inscrit justement dans cette optique. Il s'agit de comprendre le modèle d'humidification de l'air par brumisation, développé sous Fluent.

L'effet du diamètre des gouttelettes d'eau injectées ainsi que leurs débits est alors étudié.

Pour ce faire on a considéré de l'air humide en écoulement dans une conduite pour lequel on injecte de fines gouttelettes d'eau.

Introduction générale

Ce manuscrit est structuré comme suit:

Le premier chapitre porte sur les propriétés physiques et thermodynamiques de l'air humide. Pour cela, on a dressé un diagramme (de Carrier ou de Mollier) qui permet de connaître les paramètres de l'air humide en un point donné.

Au deuxième chapitre, nous avons étudié les différents types d'humidificateurs, leurs principes de fonctionnement et leurs domaines d'applications.

L'étude de l'influence de la brumisation sur l'écoulement de l'air dans une conduite a fait l'objet du troisième chapitre.

Des simulations numériques ont permis de voir l'influence du diamètre de la gouttelette d'eau injectée et du débit d'eau sur la température de sortie de l'air.

Chapitre I

L'air humide

4.3.2. Diagramme de Carrier (T,ω):

Ce diagramme donne la température en fonction de l'humidité absolue, c'est le plus utilisé dans le monde. [3]

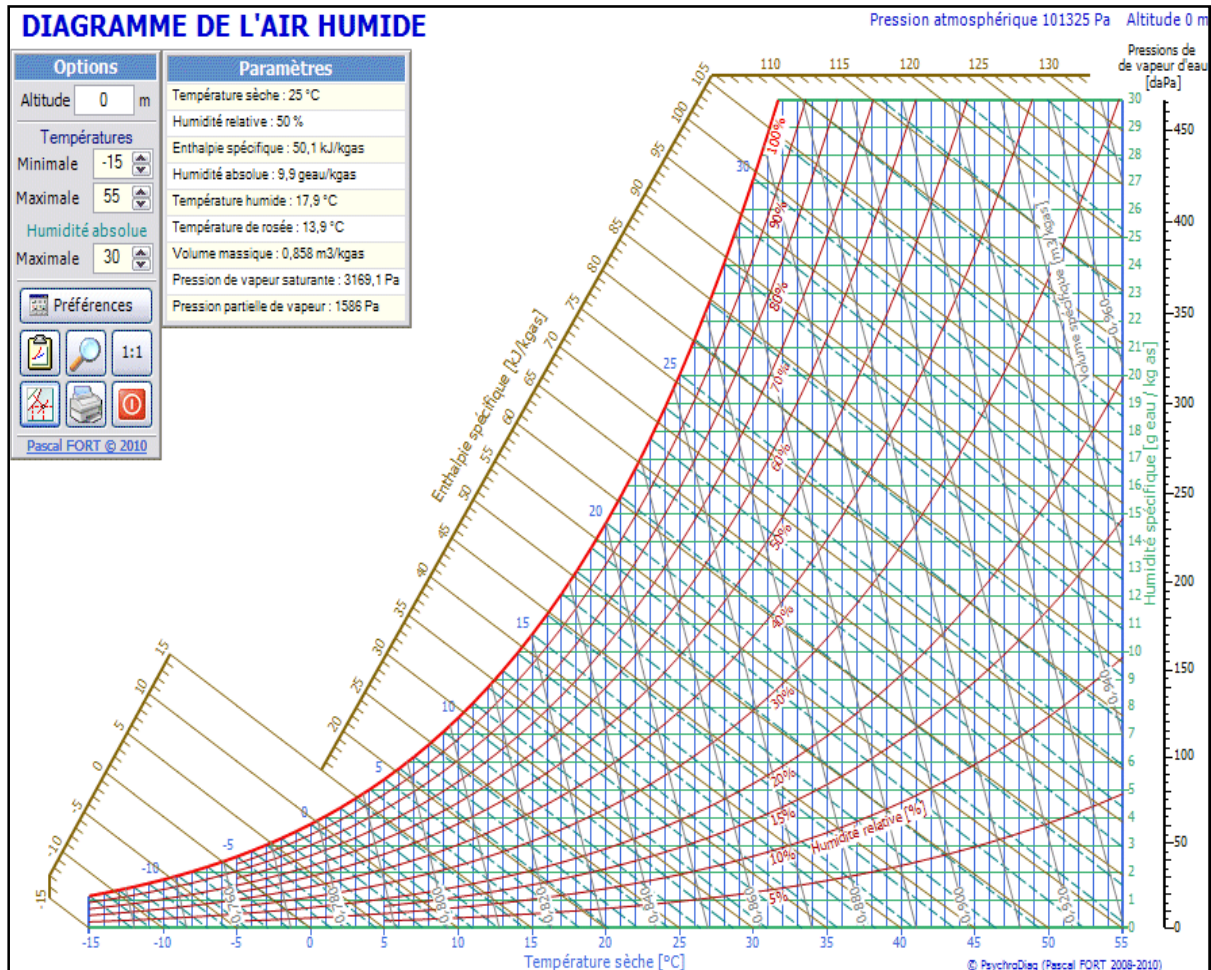


Fig. I-3 : Diagramme de Carrier (T, W).

5. Caractéristiques de l'air humide :

5.1. Caractéristique thermodynamiques :

5.1.1. L'humidité absolue (ou teneur en humidité):

Notée ω [g eau/Kg air sec]

Pour un volume V on définit l'humidité absolue comme étant le rapport entre la masse de vapeur (m_v) contenue dans ce volume sur la masse (m_a) d'air sec contenue dans ce même volume V c'est-à-dire: [3]

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (I.7)$$

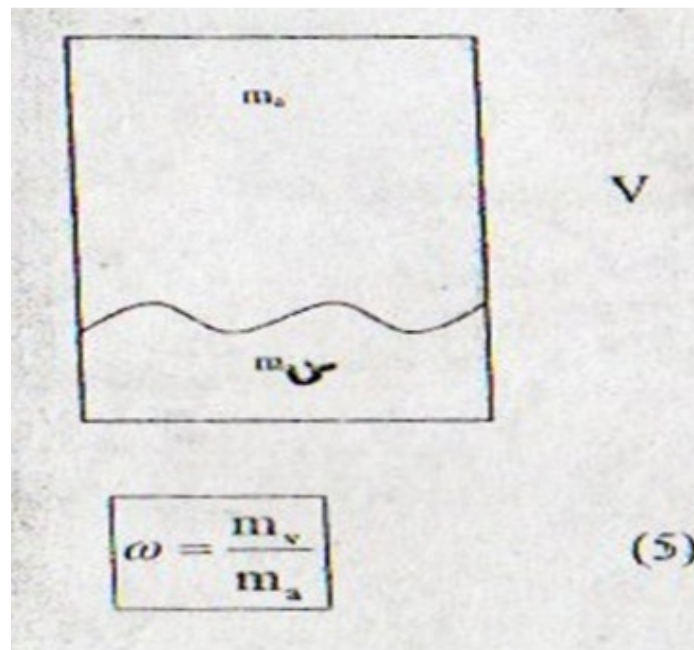


Fig. I-4 : Humidité absolue.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{(P_{ve} \cdot V / (r_v \cdot T))}{(P_a / (r_a \cdot T))} = P_{ve} \cdot V / (r_v \cdot T) \cdot (r_a \cdot T) / P_a$$

$$\omega = \frac{r_a}{r_v} \cdot \frac{P_{ve}}{P_a} = 0,622 \cdot \frac{P_{ve}}{P_a} \quad (I.8)$$

Pour un air saturé en humidité tout apport de vapeur se transforme en liquide.

La masse de vapeur dans l'air saturé à la température T sera m_{vs} et l'humidité absolue à la saturation s'écrit : [7]

$$\omega_s = \frac{m_{vs}}{m_a} = 0,622 \frac{P_{vs}}{P_0 - P_{vs}} \quad (I.9)$$

Car d'après la loi de Dalton : $P_0 = P_{vs} + P_a$

$$P_a = P_0 - P_{vs} \quad (I.10)$$

Avec : $P_0 = P$: Pression atmosphérique

P_{vs} : Pression de vapeur pour un air saturé

On peut utiliser la formule de **DUPRE** valable entre (-50°C et +200°C), pour calculer $P_{vs}(T)$:

$$P_{vs}(T) = \exp\left[46,784 - \frac{6435}{T+273,15} - 3,868 \cdot \ln(T + 273,15)\right] \quad (I.11)$$

Avec : T : température en [°C].

P_{vs} : pression de saturation en [mm Hg].

L'axe vertical du diagramme indique la teneur en humidité de l'air.

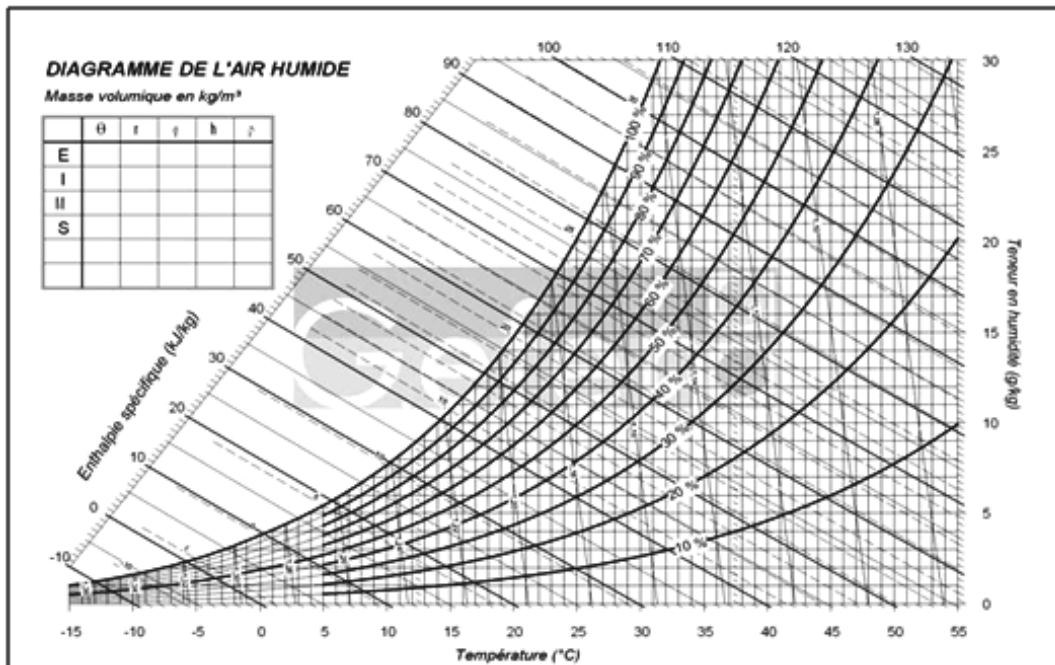


Fig. I-5 : Diagramme de l'air humide.

5.1.2. Humidité relative ou (degré hygrométrique) ϕ :

Elle traduit le contenu en vapeur d'eau d'un air humide prit à la température T sur le contenu en vapeur d'eau d'un air saturé prit à la même température c'est-à-dire : [3]

$$\phi = \frac{m_v}{m_{vs}(T)}$$

$$\phi = \frac{m_v}{m_{vs}(T)} = \frac{\frac{P_v \cdot V}{r_v \cdot T}}{\frac{P_{vs} \cdot V}{r_v \cdot T}} = \frac{P_v}{P_{vs}(T)} \tag{I.12}$$

5.1.3. Degré de saturation W :

C'est le rapport entre l'humidité absolue à la température T sur l'humidité à la saturation prise à la même température : $W = \frac{\omega}{\omega_s(T)}$

$$W = \frac{\omega}{\omega_s(T)} = \frac{0,622 \frac{P_v}{P_0 - P_v}}{0,622 \frac{P_{vs}}{P_0 - P_{vs}}} = \frac{P_v}{P_0 - P_{vs}} \cdot \frac{P_0 - P_{vs}}{P_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \cdot \frac{P_0 - P_{vs}}{P_0 - P_v}$$

$$W = \phi \left(\frac{P_0 - P_{vs}}{P_0 - P_v} \right) \tag{I.13}$$

Pour des températures $T < 30^\circ\text{C}$ la pression de vapeur et la pression de vapeur saturante sont négligeables devant P_0 (pression atmosphérique) : P_v et $P_{vs} \ll P_0$ d'où on a : $W = \varphi$.

5.1.4. Températures caractéristiques de l'air humide :

5.1.4.1. Température sèche (T_s) :

C'est la température mesurée avec un thermomètre ordinaire placé dans l'air ambiant dont le bulbe est particulièrement sec.

Sur le diagramme de l'air humide la température sèche de l'air est indiquée sur l'axe horizontal, gradué en $[\text{°C}]$. [1]

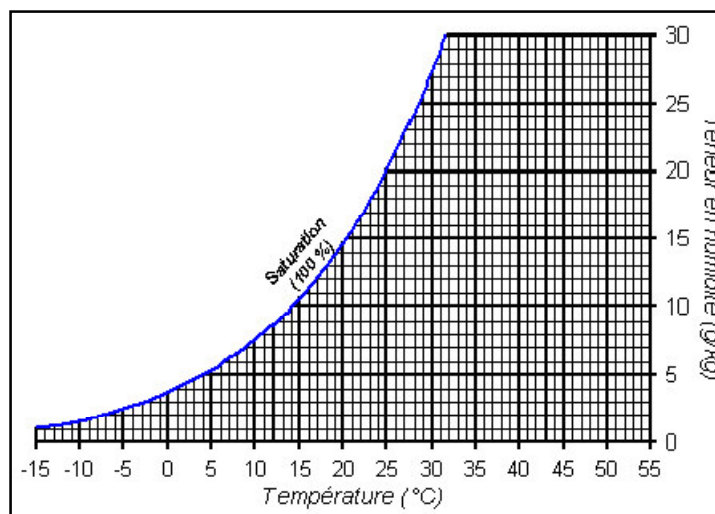


Fig. I-6 : Température sèche dans le diagramme de l'air humide.

5.1.4.2. Température humide (T_h) :

C'est la température mesurée par un thermomètre dont le bulbe est recouvert d'une mince couche d'eau (gaze constamment mouillée)

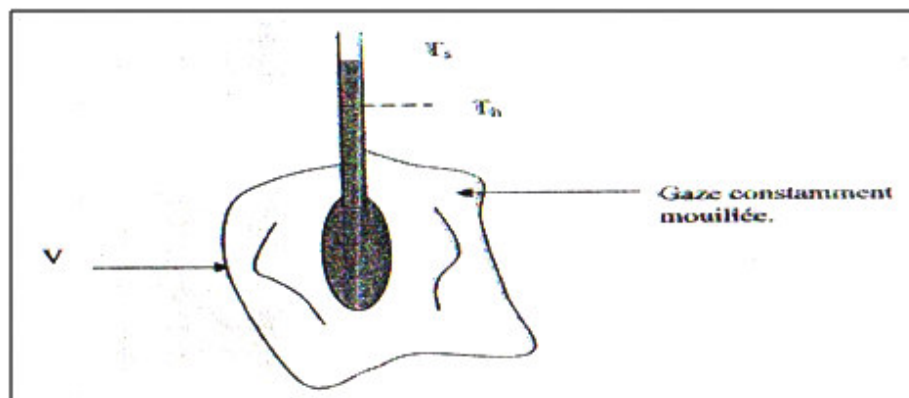


Fig. I.7 : Température humide.

Pour que le thermomètre à bulbe humide ainsi constitué fournisse une valeur de la température humide précise il faut que la vitesse du vent soit suffisamment importante (environ 2 m/s) pour que les échanges de chaleur et de masse soient intenses. Sur le diagramme, les lignes de température humide sont des obliques pratiquement parallèles aux lignes d'enthalpie. On obtient la température humide de l'air en suivant ces lignes jusqu'à la courbe de saturation, puis en effectuant une lecture de température.

Exemples :

Pour de l'air dont la température est de 30 [°C] et l'hygrométrie de 30 [%], la température humide est de l'ordre de 18 [°C] (point A). [3]

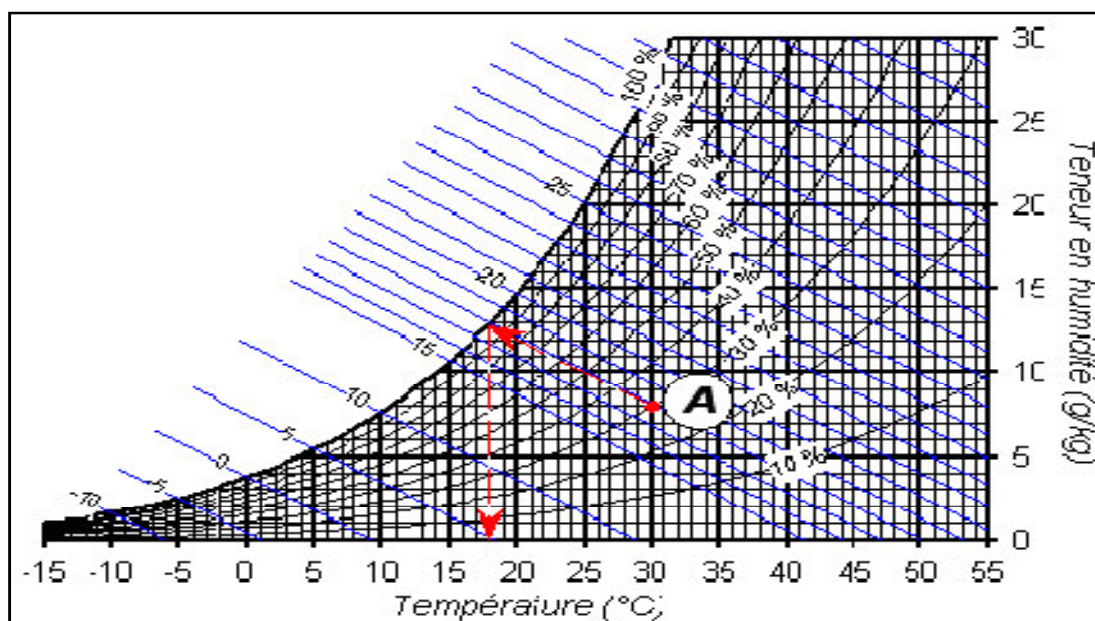


Fig. I -8 : Température humide dans le diagramme de l'air humide.

5.1.4.3. Température de rosée (T_r) :

C'est la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser quand l'air se refroidit.

Lorsque l'air se refroidit, sa température diminue et dans un premier temps, sa teneur en humidité reste constante, tandis que son hygrométrie augmente.

Si le refroidissement est suffisant, l'air peut atteindre l'état de saturation et sa vapeur d'eau commence à se condenser. On dit qu'il atteint son point de rosée. La température correspondante est la température de rosée, notée T_r .

Sur le diagramme, on obtient la température de rosée de l'air en suivant une ligne horizontale jusqu'à la courbe de saturation, puis en effectuant une lecture de température.

Pour une même teneur en humidité, la température de rosée est fixe et ne dépend pas de la température de l'air.

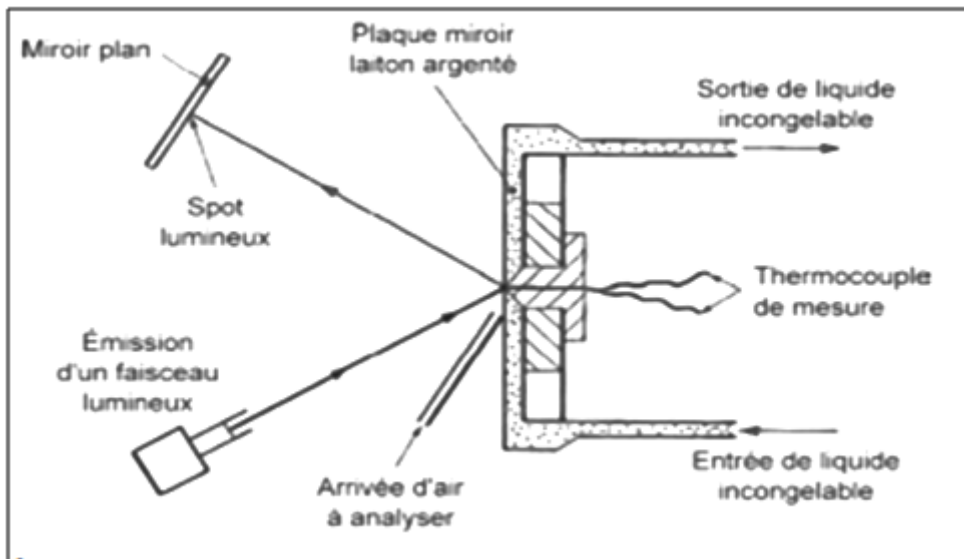


Fig. I-9 : Schéma de principe d'un thermomètre à point de rosée.

Exemple :

Pour de l'air (point A) dont la température est de 30 [°C] et l'hygrométrie de 30 [%], la température de rosée est de l'ordre de 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. [3]

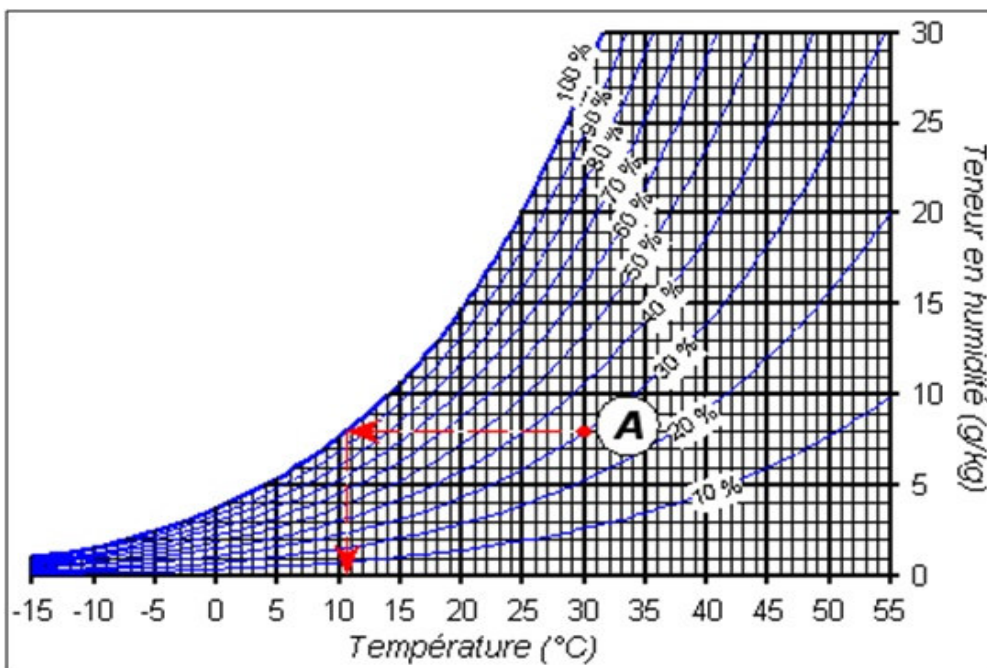


Fig. I-10 : Température de rosée dans le diagramme de l'air.

5.1.5. Capacité thermique massique(C) :

C'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir (ou soustraire) à l'unité de masse pour augmenter (ou réduire) sa température de 1°K. [1]

Dans la plupart des cas, les évolutions de l'air humide sont isobares alors c'est-à-dire à pression constante donc on peut considérer que $C = C_p$.

Les valeurs de C_p pour l'air sec et la vapeur d'eau sont respectivement :

$$C_{p_{as}} = 1,007 \text{ [kJ/ kg}_{ve} \cdot ^\circ K]$$

$$C_{p_{ve}} = 1,86 \text{ [kJ/ kg}_{ve} \cdot ^\circ K]$$

Et la capacité thermique de l'air humide (air sec + vapeur d'eau) est donnée par l'expression suivante :

$$C_{p_{ah}} = C_{p_{as}} + \omega_{ah} \cdot C_{p_{ve}} \quad (I.14)$$

5.1.6. Chaleur latente de vaporisation de l'eau $L_v(T)$:

C'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1Kg d'eau liquide à la température T [°C] pour le vaporiser.

La valeur de L_v est donnée par l'expression suivante : $L_v(T) = 4,1855(597 - 0,56T)$
 $L_v(T)$ est exprimée en [kJ/kg_{eau}].

5.1.7. Enthalpie spécifique de l'air humide :

C'est la quantité de chaleur contenu dans d'air humide dont la masse d'air sec est 1kg. L'enthalpie d'une masse m_{ah} d'air humide est :

$$H_{ah} = m_{as} \cdot h_{as} + m_{ve} \cdot h_{ve} \quad (I.15)$$

D'où :

H_{ah} : Enthalpie de l'air en [kJ]

h_{as} : Enthalpie massique de l'air sec en [kJ/kg_{as}]

h_{ve} : Enthalpie massique de la vapeur d'eau en [kJ/kg_{ve}]

$$H_{ah} = m_{as} \left[h_{as} + \frac{m_{ve}}{m_{as}} \cdot h_{ve} \right] \quad (I.16)$$

$$H_{ah} = m_{as} [h_{as} + \omega \cdot h_{ve}] \quad (I.17)$$

➤ **La viscosité dynamique ou absolue :**

$$\mu_{ah} = \mu_0 \frac{273+C}{T_{ah}+C} \left(\frac{T_{ah}}{273}\right)^{2/3} \quad (I.23)$$

Avec : μ_0 : Viscosité dynamique des gaz à 0°C,

Dans le cas d'air humide : $\mu_0=1,732 \cdot 10^{-5}$ kg/m.s

T_{ah} : Température de l'air humide en [°K]

C : Constante dépendant de la nature du gaz, entre (16°C et 825°C), on retient pour l'air humide $C=111$.

➤ **La viscosité cinématique :**

On définit aussi la viscosité cinématique ν qui est, comme son nom l'indique, une grandeur cinématique, c'est-à-dire qui ne s'exprime qu'en fonction de longueurs et de temps.

Le coefficient de viscosité cinématique

$$\nu = \mu/\rho \text{ en [m}^2\text{/s]} \quad (I.24)$$

Où : ρ est la masse volumique de fluide en kg/m³

Pour l'air humide, la viscosité est sous la forme suivante :

$$\nu = \frac{100}{\frac{X_{as}}{\nu_{as}} + \frac{X_{ve}}{\nu_{ve}}} \quad (I.25)$$

Avec :

X_{as} , X_{ve} fractions volumiques respectivement d'air sec et de vapeur d'eau.

ν_{as} , ν_{ve} : viscosités cinématiques respectivement d'air sec et de vapeur d'eau.

5.2.2. Le volume spécifique :

C'est le volume occupée par 1kg d'air sec accompagné des quelques grammes de vapeur d'eau, il est donnée par la relation suivante :

$$V^* = \frac{V}{m_{as}+m_{ve}} = 461,52(0.622 + \omega) \frac{T_{ah}}{(1+\omega) P} \quad (I.26)$$

Avec :

V^* : Volume spécifique (m³/kg).

m_{as} : Masse d'air sec en [kg].

m_{ve} : Masse de vapeur d'eau [kg].

P : Pression atmosphérique en [Pa].

T_{ah} : Température humide.

6. Les évolutions de l'air humide en brumisation :

Lors de pulvérisation de l'eau en très fines gouttelettes dans l'air humide, il y aura un échange de matière et d'énergie (chaleur) entre les deux ce qui entraîne une évolution pour l'air humide, c'est à dire un changement de certaines caractéristiques thermodynamiques de l'air humide.

Selon les caractéristiques thermodynamiques initiales de l'air humide, la température des gouttelettes d'eau et le débit d'eau pulvérisé, on distingue cinq évolutions possibles pour l'air humide représentée dans le diagramme suivant : [3]

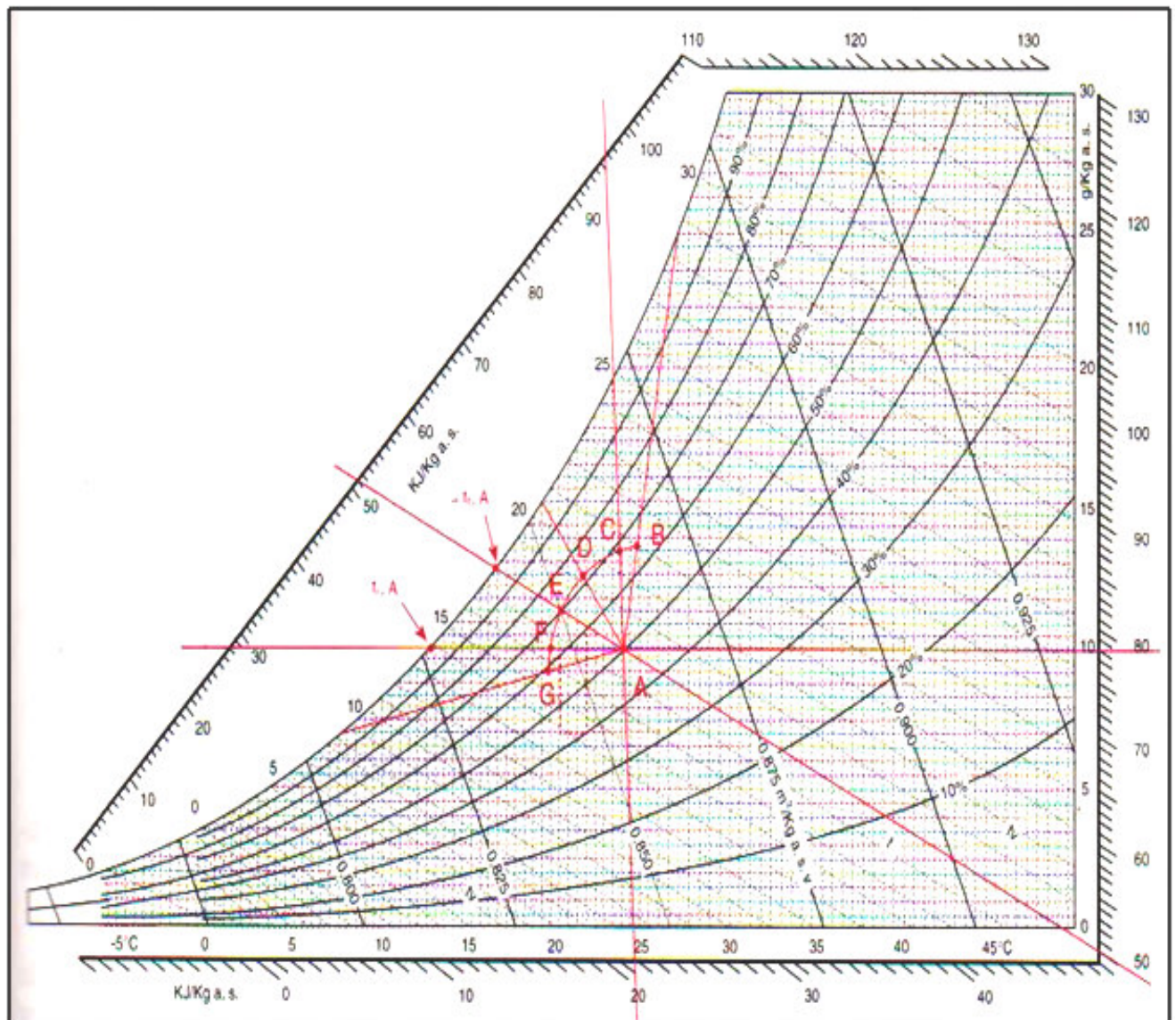


Fig. I-11 : Les évolutions dans le diagramme de l'air humide en pulvérisation.

6.1. Humidification et réchauffement (de point A vers le point B) :

Elle se déroule lorsque la température des gouttelettes (T_g) est supérieure à la température sèche (T_s) de l'air humide, alors on aura une augmentation des paramètres suivants : température sèche (T_s) et humide (T_h), enthalpie spécifique (h) et la l'humidité absolue (ω).

6.2. Humidification seule (de point A vers le point C) :

Cette évolution se déroule lorsque la température des gouttelettes est égale à la température sèche de l'air humide. La chaleur nécessaire pour la vaporisation des gouttelettes est acquise de l'air humide ce qui provoquerait une chute légère de sa température sèche (T_s) et humide (T_h), et une augmentation de son humidité absolue (ω) et relative (ϕ).

6.3. Humidification et refroidissement (de point A vers le point D) :

Dans cette évolution, la température des gouttelettes d'eau (T_g) est inférieure à la température sèche (T_s) de l'air humide, mais supérieure à sa température de rosée (T_r), ce qui provoquerait un refroidissement de l'air humide dû à la chaleur gagnée par les gouttelettes d'eau pour leur vaporisation, sans qu'il y ait condensation de certaine quantité de vapeur dans l'air humide car la température des gouttelettes (T_g) est supérieure à la température de rosée (T_r), de l'air humide (c'est à dire la température d'équilibre est comprise entre les deux : $T_r < T_g < T_f < T_s$ où T_f est la température sèche finale de l'air humide).

Donc l'évolution des caractéristiques thermodynamiques de l'air humide sont comme suit :

- Diminution de : température sèche (T_s) ; température humide (T_h) ; l'enthalpie spécifique (h)
- Augmentation de : humidité absolue (ω) ; humidité relative (ϕ)

On peut avoir également une évolution isenthalpique (de A vers le point E) dans le cas particulier où la température des gouttelettes (T_g) est égale à la température humide (T_h) de l'air humide.

6.4. Refroidissement à humidité constante (de point A vers le point F) :

Dans cette transformation la température des gouttelettes d'eau (T_g) est égale à la température de rosée de l'air humide (T_r). $T_g < T_s$ ce qui provoquerait un refroidissement de l'air humide (diminution de la température sèche et humide) sans qu'il y ait ni condensation ni humidification (humidité absolue constante $\omega = C_{ts}$, c'est à dire que les gouttelettes reste suspendue dans l'air humide comme un brouillard.

Au cours de cette transformation il y a aussi une diminution d'enthalpie spécifique (h) et une augmentation d'humidité relative (ϕ).

6.5. Déshumidification et refroidissement (de point A vers le point G) :

Lorsqu'on a la température des gouttelettes d'eau (T_g) est inférieure à la température de rosée de l'air humide, alors l'air humide se refroidit sous l'effet de l'apport de chaleur gagnée dans les gouttelettes d'eau. Ce refroidissement amène la température de l'air humide jusqu'à la température de rosée (T_r), et tout apport supplémentaire de chaleur provoquerait la condensation d'une partie ou de toute la vapeur de l'air humide selon la quantité de chaleur apportée par les gouttelettes.

Au cours de cette transformation, l'évolution des caractéristiques thermodynamiques sont comme suit :

- Diminution de : température sèche (T_s) et humide (T_h), de l'humidité absolue (ω), d'enthalpie spécifique (h).
- Augmentation de : l'humidité relative (ϕ).

7. Les transformations possibles de l'air humide dans une centrale de traitement d'air (CTA) :

Pour le confort physiologique on effectue des transformations sur l'air humide en variant sa température ou sa teneur en humidité selon la saison (chaude ou froide).

Les transformations d'air humide sont assurées par les centrales de traitements d'air (CTA).

7.1. Composition d'une CTA :

La centrale de traitement d'air (CTA) se compose de :

- Caisson de mélange : pour mélanger l'air neuf et l'air recycle.
- Filtre : retenir les particules en suspension dans l'air.
- Batterie froide : refroidir et/ou déshumidifier l'air.
- Batterie chaude : réchauffer l'air, seule la température de l'air est modifiée.
- Batterie électrique : réchauffer l'air.
- Humidificateur : augmenter la quantité d'eau (vapeur) contenue dans l'air (à traiter) selon la technologie (à vapeur ou adiabatique).
- Ventilateur : Distribuer l'air dans les réseaux.

7.2. Les transformations assurées par la CTA :

Ces transformations sont les suivantes :

7.2.1 Chauffage simple :

Dans cette transformation, l'air humide subit une augmentation de température et d'enthalpie en absorbant une quantité de chaleur Q_c lors de son écoulement dans une conduite (contact avec un échangeur), mais avec une humidité absolue constante ($\omega = \text{Constante}$), le chauffage se fait par passage de l'air sur une batterie chaude qui peut être :

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

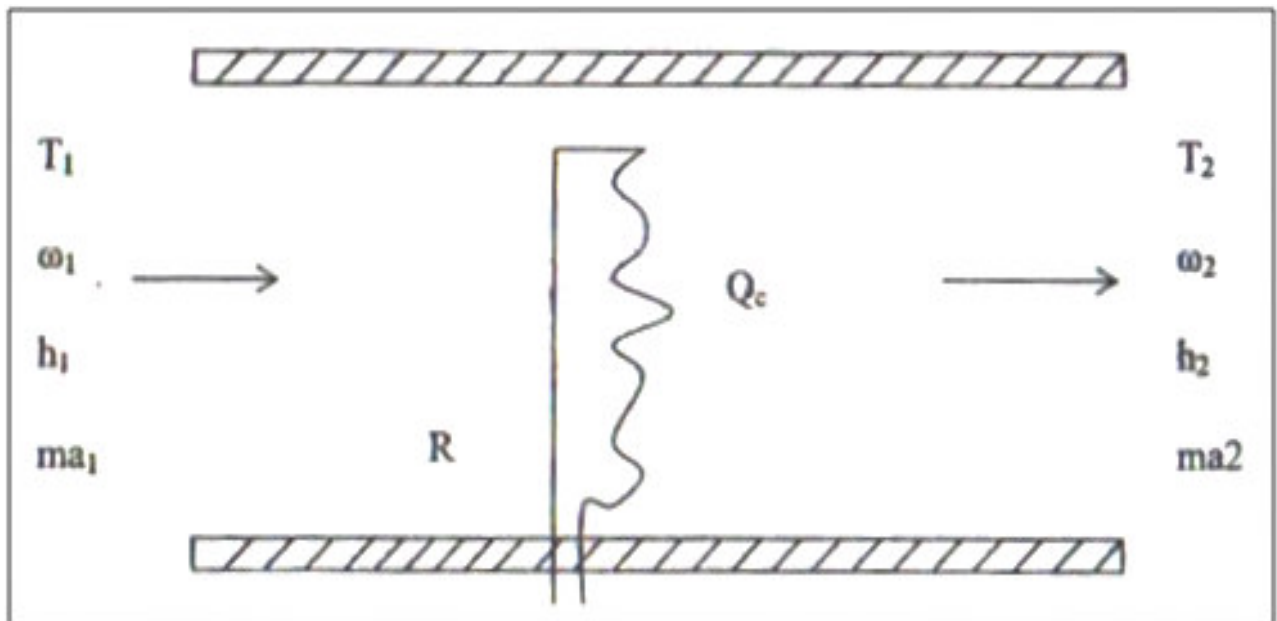


Fig. I-12 : Chauffage simple.

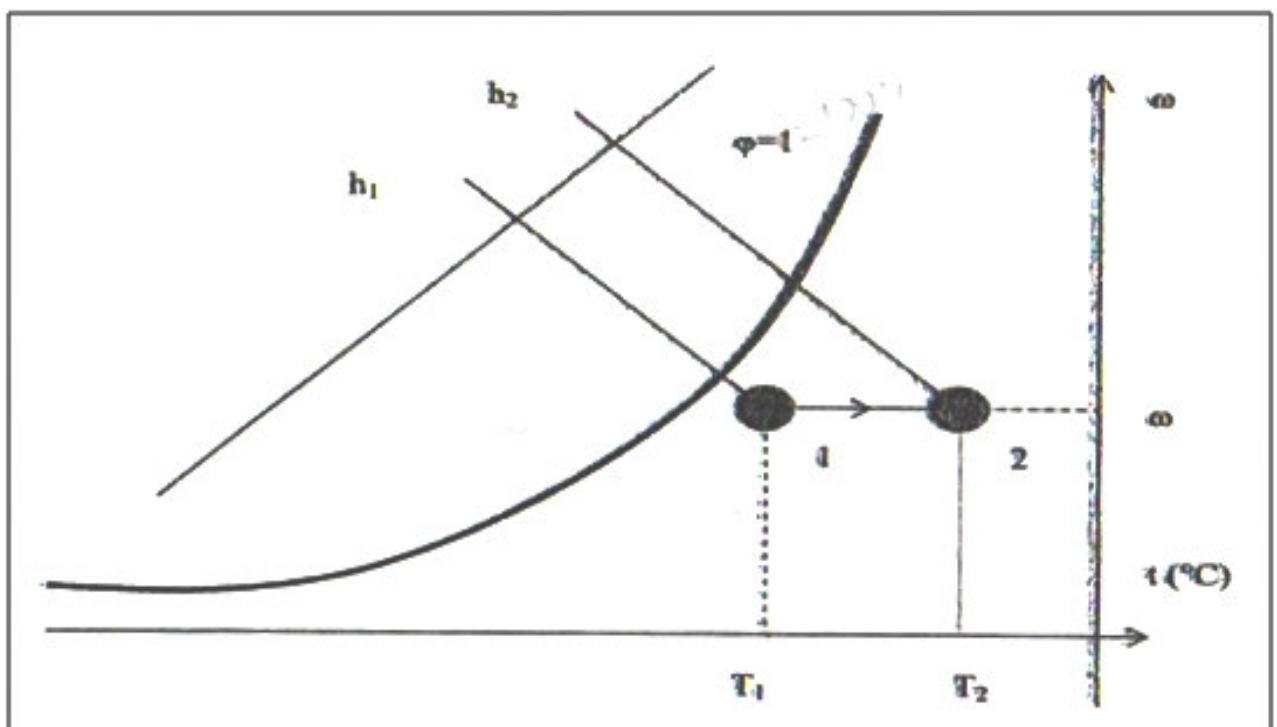


Fig. I-13 : L'évolution de chauffage simple dans le diagramme de l'air.

❖ Bilans massique et énergétique du chauffage simple :

• Bilan massique :

Air sec :

$$m_{a1} = m_{a2} = m_a \quad (I.27)$$

Vapeur d'eau :

$$m_{v1} = m_{v2} = m_v \quad (I.28)$$

Avec :

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \rightarrow m_v = \omega \cdot m_a$$

$$m_{v1} = m_{v2}$$

$$\omega_1 \cdot m_a = \omega_2 \cdot m_a$$

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega \quad (I.29)$$

• Bilan énergétique (Enthalpique) :

$$m_a \cdot h_1 + Q_c = m_a \cdot h_2 \quad (I.30)$$

Avec :

$$Q_c = m_a(h_2 - h_1) \rightarrow q_c = Q_c/m_a = h_2 - h_1$$

L'état (1) :

$$h_1 = Cp_a \cdot T_1 + \omega_1 \cdot Cp_v \cdot T_1 + \omega_1 \cdot Lv(T_1) \quad (I.31)$$

L'état (2) :

$$h_2 = Cp_a \cdot T_2 + \omega_2 \cdot Cp_v \cdot T_2 + \omega_2 \cdot Lv(T_2) \quad (I.32)$$

On a

$$Lv(T_1) \approx Lv(T_2) = Lv \quad \text{et} \quad \omega_1 = \omega_2$$

Donc :

$$h_2 - h_1 = (Cp_a + \omega \cdot Cp_v) \cdot (T_2 - T_1) = Cp_{ah} \cdot (T_2 - T_1) = q_c \quad (I.33)$$

$$q_c = Cp_{ah} \cdot (T_2 - T_1) \quad (I.34)$$

q_c : Chaleur sensible absorbé par l'air humide [kJ/kg air sec].

7.2.2 Refroidissement simple :

Le principe est le même avec le précédent, sauf dans ce cas il y a diminution de température et d'enthalpie à humidité absolue constante ($\omega = \text{Cte}$) sans condensation (sans atteindre la température de rosée). [2]

Donc :

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega$$

$$q_c = C_{p_{ah}} \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{I.35})$$

q_c : Chaleur sensible cédée par l'air humide [kJ/kg air sec]

7.2.3 Chauffage avec humidification :

Dans cette transformation on chauffe l'air humide puis on lui injecte en pulvérisant des très fines gouttelettes d'eau ce qui entraîne une augmentation de sa température, humidité absolue et de son enthalpie spécifique. [5]

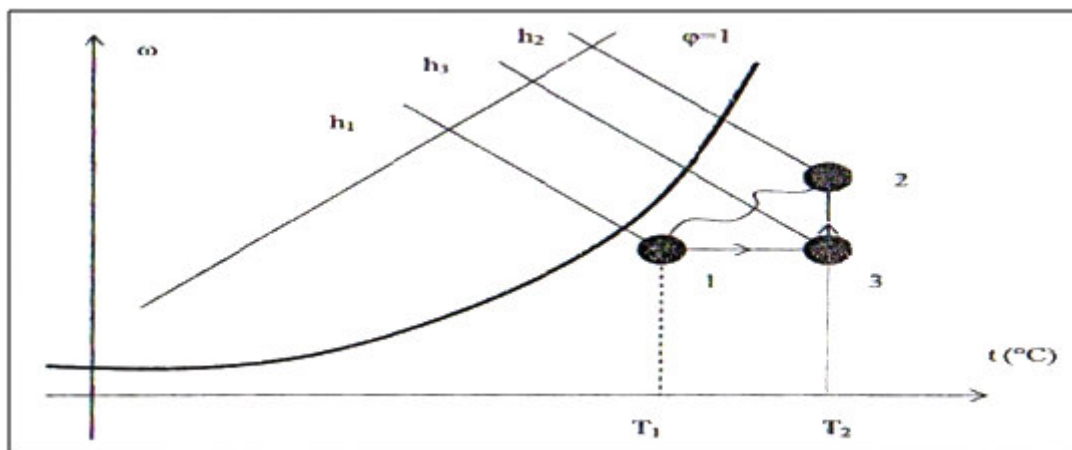


Fig. I-14 : L'évolution de chauffage avec humidification dans le diagramme de l'air.

- **Bilan massique :**

- Air sec : $m_{a1} = m_{a2} = m_a$
- Vapeur d'eau : $m_{v1} + m_e = m_{v2}$

Avec :

m_{v1} : masse de vapeur initial avant transformation.

m_{v2} : masse de vapeur final après transformation.

m_e : masse d'eau injectée.

Donc :

$$m_e = m_{v2} - m_{v1} = \omega_2 \cdot m_a - \omega_1 \cdot m_a$$

$$m_e = m_a (\omega_2 - \omega_1) \quad (I.36)$$

• **Bilan Enthalpique :**

$$h_2 - h_1 = (h_2 - h_3) + (h_3 - h_1) \quad (I.37)$$

Avec :

$h_2 - h_3$: Chaleur purement latente.

$h_3 - h_1$: Chaleur purement sensible.

Les deux phénomènes interviennent en même temps, pour simplifier le problème on dit qu'il y a chauffage de 1 à 3 puis humidification de 3 à 2.

7.2.4 Refroidissement avec humidification :

Dans ce cas on pulvérise dans l'air humide de l'eau en très fines gouttelettes dont la température est inférieure à la température humide de l'air humide. Donc la chaleur latente de vaporisation nécessaire pour les gouttelettes est puisée de l'air humide ce qui provoque son abaissement en température. [5]

Cette transformation se déroule à enthalpie spécifique constante ($h = \text{Cte}$).

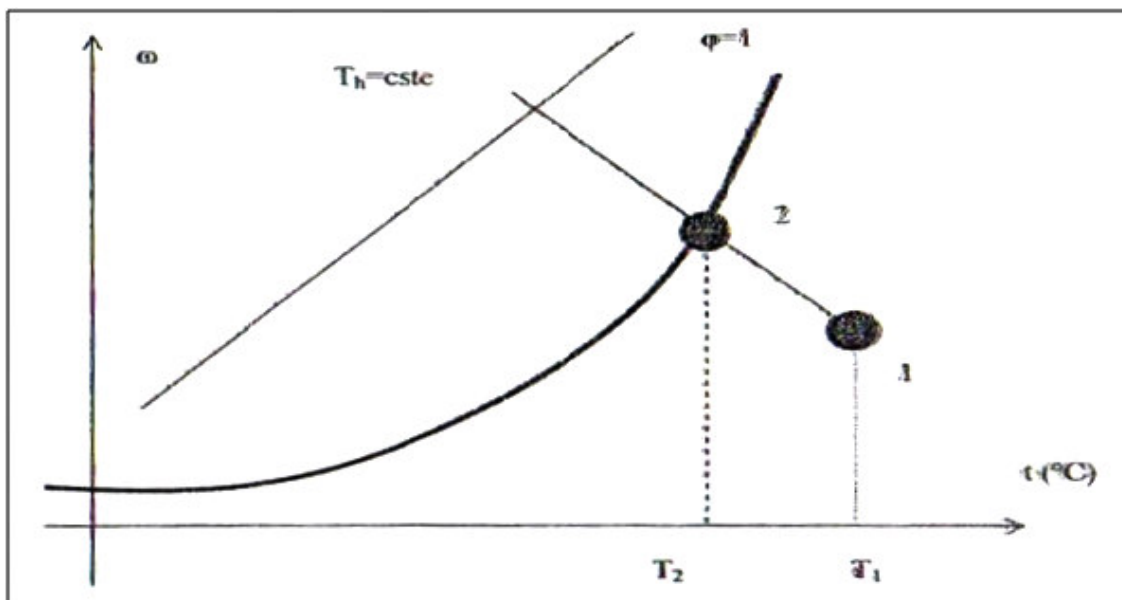


Fig. I.15 : L'évolution de refroidissement avec humidification dans le diagramme de l'air humide.

• **Bilan massique :**

$$\text{Air sec : } m_{a1} = m_{a2} = m_a$$

$$\text{Vapeur d'eau : } m_{v1} + m_e = m_{v2}$$

Avec :

m_{v1} : masse de vapeur initial avant transformation.

m_{v2} : masse de vapeur final après transformation.

m_e : masse d'eau injectée.

Donc

$$m_e = m_{v2} - m_{v1} = \omega_2 \cdot m_a - \omega_1 \cdot m_a$$

$$m_e = m_a (\omega_2 - \omega_1) \quad (I.37)$$

• **Bilan Enthalpique :**

$$h_1 = Cp_{as} \cdot T_1 + \omega_1 \cdot h_{ve} = Cp_{as} \cdot T_1 + \omega_1 \cdot [Lv + Cp_{ve} \cdot T_1] \quad (I.38)$$

$$h_2 = Cp_{as} \cdot T_2 + \omega_2 \cdot h_{ve} = Cp_{as} \cdot T_2 + \omega_2 \cdot [Lv + Cp_{ve} \cdot T_2] \quad (I.39)$$

$$h_2 - h_1 = Cp_{as}(T_2 - T_1) + (\omega_2 - \omega_1) \cdot Lv + (\omega_2 \cdot T_2 - \omega_1 \cdot T_1) \cdot Cp_{ve} \quad (I.40)$$

Comme l'évolution est isenthalpique alors :

$$h_2 - h_1 = 0$$

$$Cp_{as}(T_2 - T_1) + (\omega_2 - \omega_1) \cdot Lv + (\omega_2 \cdot T_2 - \omega_1 \cdot T_1) \cdot Cp_{ve} = 0$$

$$Cp_{as}(T_1 - T_2) = (\omega_2 - \omega_1) \cdot Lv + (\omega_2 \cdot T_2 - \omega_1 \cdot T_1) \cdot Cp_{ve} = q_c$$

Avec : $Lv = 2498,74 \text{ kJ/kg}$

$$Cp_{ve} = 1,86 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$$

q_c : Chaleur spécifique acquise par les gouttelettes [kJ/kg eau].

7.2.5 Déshumidification par condensation de vapeur :

L'évolution consiste à refroidir l'air humide jusqu'à sa température de rosée à l'aide d'un échangeur, qui en absorbant de la chaleur (latente) de l'air humide entraîne une condensation d'une partie de son humidité (vapeur). Donc il en résulte une diminution d'humidité absolue, de température et d'enthalpie spécifique. [7]

Après avoir déshumidifié l'air humide on peut le réchauffer on le faisant passer par un autre échangeur tout en gardant son humidité absolue constante.

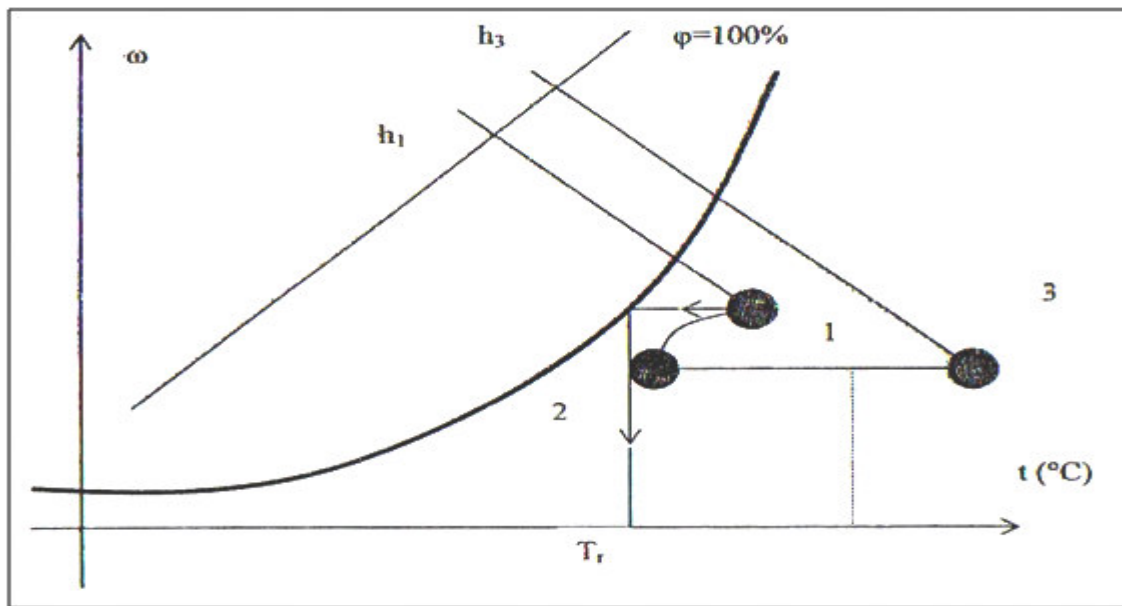


Fig. I.16 : L'évolution dans le diagramme de l'air.

- **Bilan massique :**

Air sec : $m_{a1} = m_{a2} = m_a$

Vapeur d'eau : $m_{v1} - m_e = m_{v2} \rightarrow m_e = m_{v1} - m_{v2}$

Avec :

m_{v1} : masse de vapeur initiale

m_{v2} : masse de vapeur finale

m_e : masse de vapeur condensée

$$m_e = m_{v1} - m_{v2} = \omega_1 \cdot m_a - \omega_2 \cdot m_a = m_a(\omega_1 - \omega_2) \quad (I.41)$$

- **Bilan Enthalpique :**

$$h_1 = Cp_{as} \cdot T_1 + \omega_1 \cdot h_{ve} = Cp_{as} \cdot T_1 + \omega_1 \cdot [Lv + Cp_{ve} \cdot T_1] \quad (I.42)$$

$$h_2 = Cp_{as} \cdot T_2 + \omega_2 \cdot h_{ve} = Cp_{as} \cdot T_2 + \omega_2 \cdot [Lv + Cp_{ve} \cdot T_2] \quad (I.43)$$

$$h_2 - h_1 = C_{p_{as}}(T_2 - T_1) + (\omega_2 T_2 - \omega_1 T_1) C_{p_{ve}} + (\omega_2 - \omega_1) LV \quad (I.44)$$

$C_{p_{as}}(T_2 - T_1) + (\omega_2 T_2 - \omega_1 T_1) C_{p_{ve}}$: Chaleur purement sensible.

$(\omega_2 - \omega_1) LV$: Chaleur purement latente.

8. Conclusion :

La présentation graphique des propriétés thermodynamiques de l'air humide avec simple lecture ainsi la connaissance de ses caractéristique thermodynamique et physique permet d'effectuer divers calculs.

Chapitre II

Les types

d'humidificateurs d'air

1. Introduction :

A l'intérieur comme à l'extérieur, l'air que nous respirons chaque jour contient des particules nocives, responsables de difficultés respiratoires et d'allergies.

La pollution atmosphérique et domestique englobe les différents éléments polluants intervenant au quotidien. 70% à 90% de notre temps est passé dans des espaces clos et l'homme respire plus de 15 000 L d'air par jour, faisant de la pollution intérieure un danger important pour la santé.

Les solutions de traitement de l'air permettent d'assainir l'air en utilisant des procédés et des technologies adaptés à chaque situation.

2. Types d'humidificateurs :

Un humidificateur placé directement dans le local travaille avec de l'air à 20° d'humidité relative de 50 % ; l'air à la sortie sera au mieux porté à 60 ou 65 % d'humidité relative.

Les différents humidificateurs existants sont les suivants :

2.1. Humidificateurs à pulvérisation d'eau atomisée :

2.1.1. Humidificateurs-laveurs à pulvérisation d'eau atomisée par buses fixes :

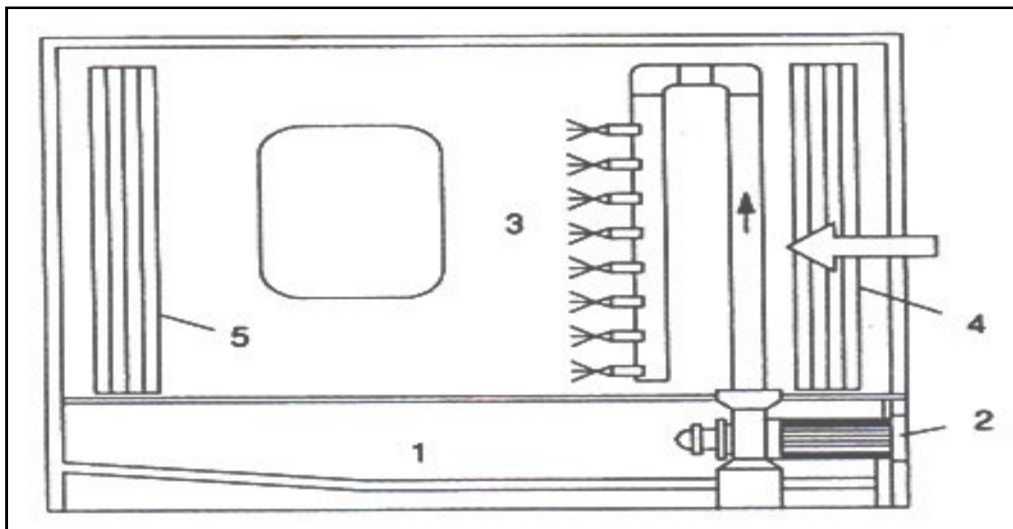


Fig. II- 1 : Schéma de principe d'un humidificateur- laveur à pulvérisation d'eau atomisée

2.1.1.1) Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement de cet humidificateur est détaillé sur le schéma de la figure (II.1) comme suit : l'eau de bac(1) est aspiré par la pompe de circulation(2) et ensuite envoyé dans la rampe à gicleurs(3) qui contient des buses de pulvérisation où l'eau est pulvérisée en très fines gouttelettes. Pour l'air, il entre par le redresseur de lignes de courant(4) qui a le rôle de rendre uniforme ce courant (sans turbulences), ensuite l'air se mêle avec les gouttelettes d'eau ce qui permet leur évaporation dans le caisson et ce qui entraîne le refroidissement et l'humidification de l'air. Ce refroidissement est dû à la chaleur acquise par les gouttelettes pour s'évaporer.

Les gouttelettes d'eau servent aussi au lavage de l'air de ses impuretés comme les poussières et certaines gazes, c'est pourquoi l'humidificateur est appelé ainsi humidificateur-laveur.

Enfin l'air humide passe par le séparateur de gouttelettes (fig.2.I) qui sert à éliminer les gouttelettes non évaporées et qui possèdent une certaine quantité d'impuretés afin de les éliminer, puis quitte le séparateur pour pénétrer dans le local à humidifier.

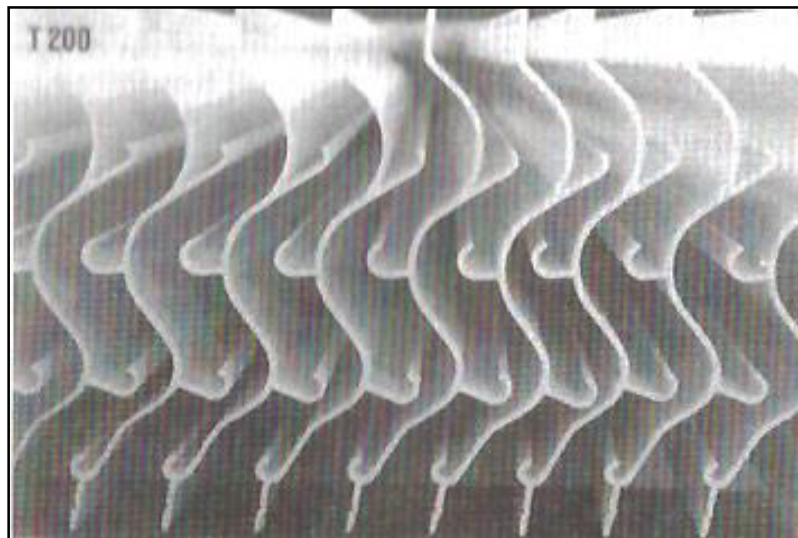


Fig. II- 2 : Séparateur de gouttelettes à profils spéciaux pour humidificateur-laveur.

2.1.1.2) Avantages et inconvénients :

❖ **Avantage :**

- La capacité de nettoyage de l'air de ses impuretés.

❖ **Inconvénient :**

- la formation des germes, champignons et l'accumulation des impuretés (sels) au niveau du bac ce qui nécessite son nettoyage régulier
- Le coût élevé de nettoyage et de maintenance.

2.1.1.3) Domaines d'application :

On trouve les humidificateur-laveur dans les centrales de traitement d'air (CTA) ainsi que dans les installations de climatisations.

2.1.2. Humidificateurs à pulvérisation d'eau atomisée par centrifugation :



Fig. II- 3 : humidificateur à pulvérisation d'eau atomisée par centrifugation.

L'eau arrive sur un disque plastique en rotation et forme à sa surface un film de faible épaisseur qui, grâce à la force centrifuge, est projeté contre une roue dentée fixe qui transforme l'eau en aérosols.

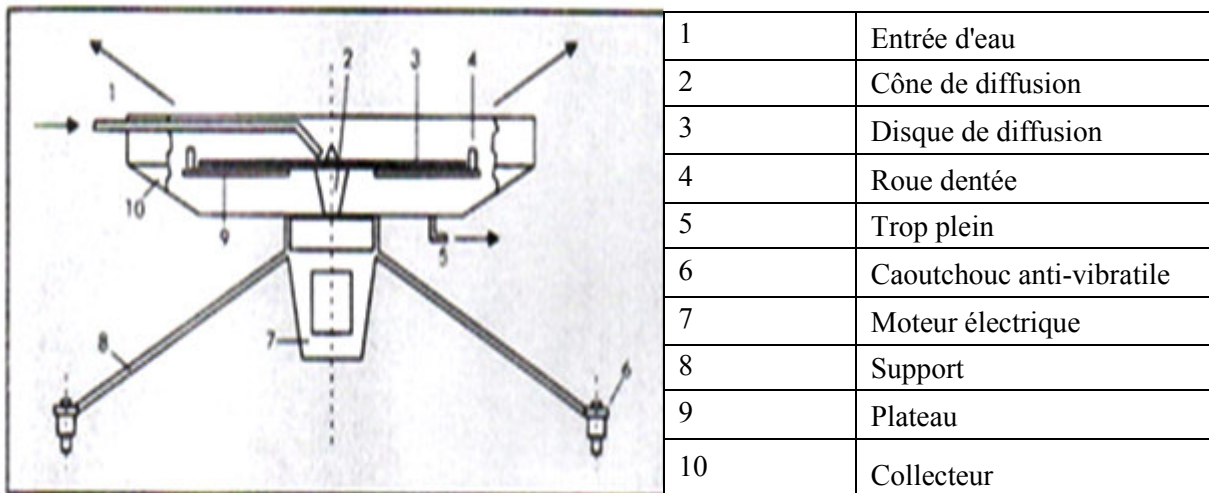


Fig. II- 4 : Schéma de principe de l'humidificateur à pulvérisation par centrifugation.

2.1.2.1) Principe de fonctionnement :

La figure (II.4) à montre un exemple de ce type d'humidificateurs dont son principe de fonctionnement est comme suit : l'eau entre par une conduite (tuyau) (1) et se met en contact avec un disque(3) qui tourne à grande vitesse (environ 3000 tr/min), entraîné grâce à un moteur électrique(7). La force centrifuge du disque permet de pulvériser le jet d'eau en petites gouttelettes lesquelles se brisent à leur tour sur les dents de la roue dentée(4) à la sortie du disque de pulvérisation qui donne naissance à de très fines gouttelettes (aérosols) d'un diamètre compris entre 0,5 et 0,20 μm . Ces aérosols entre en contact avec l'air et s'évaporent grâce à la chaleur puisée dans l'air ce qui entraîne le refroidissement de l'air ainsi que son humidification. [5]

2.1.2.2) Avantages et inconvénients :

❖ **Avantage :**

- Applicable soit en humidification directe (dans le local à traiter), ou en humidification indirecte où ils sont placés dans les conduits aérauliques.
- La facilité d'installation dans le cas d'humidification directe.
- Leur faible puissance de consommation en électricité.

❖ **Inconvénient :**

- Absence d'un processus de traitement d'eau pulvérisé d'où la nécessité d'un prétraitement de l'eau et de l'air selon les exigences hygiéniques.
- Dans le cas d'appareil qui possède un bac à eau, alors il est obligatoire de lui faire un nettoyage régulier à cause des germes qui s'y forment.
- Le coût élevé de nettoyage et d'exploitation.
- Ces humidificateurs ne doivent pas être placés dans des endroits étroits ne pas gêner l'évaporation des aérosols.

2.1.2.3) Domaines d'application :

Les humidificateurs à atomisation par centrifugation sont utilisés depuis très longtemps, soit en humidification directe, auquel cas ils sont placés dans le local même à traiter, soit en humidification indirecte et ils sont alors placés dans un conduit aéraulique.

L'humidification directe est surtout prévue dans le cas des ateliers de l'industrie textiles, du bois, du papier etc.

2.1.3. Humidificateurs à pulvérisation d'eau atomisée par buse rotative :

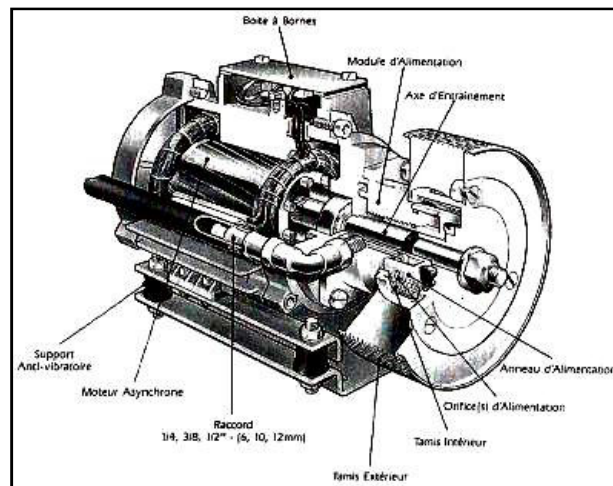


Fig. II- 5 : Buse rotative et son moteur électrique d'entraînement d'un système humidification par pulvérisation d'eau atomisée.

2.1.3.1) Principe de fonctionnement :

Dans ce système d'humidification, l'eau est pulvérisée grâce à une buse rotative. Cette buse tourne à grande vitesse (environ 11000 tr/min) entraînée grâce à un moteur synchrone d'une puissance de 300 W. La rotation de la buse à grande vitesse engendre une force centrifuge importante. L'eau entre par un raccordement d'eau dans la buse, et sous l'effet de la force centrifuge, l'eau se pulvérise en très fines gouttelettes d'un diamètre compris entre 20 et 30 μm qui sont diffusées dans toutes les directions, après avoir passé par un filtre (tamis intérieure + tamis extérieure) afin d'éliminer les impuretés susceptibles d'être dans les gouttelettes.

Les gouttelettes se mettent en contact avec l'air et s'évapore ce qui provoque leur refroidissement, dû à la chaleur acquise par les gouttelettes, ce qui permet ainsi l'humidification de l'air. [1]

2.1.3.2) Avantages et inconvénients :

❖ **Avantage :**

- La facilité de son d'installation grâce à sa petite taille.
- Son faible coût d'exploitation et de maintenance.

❖ **Inconvénient :**

- Inapplicable dans les endroits étroits car il faut toujours laisser une distance minimum pour permettre la vaporisation complète des gouttelettes.

2.1.3.3) Domaines d'application :



Fig. II- 6: Caisson humidificateur d'une centrale de traitement d'air équipé de trois atomiseurs à buse rotative.

2.1.4. Humidificateur à pulvérisation d'eau atomisée par buses fixes à eau pressurisée :

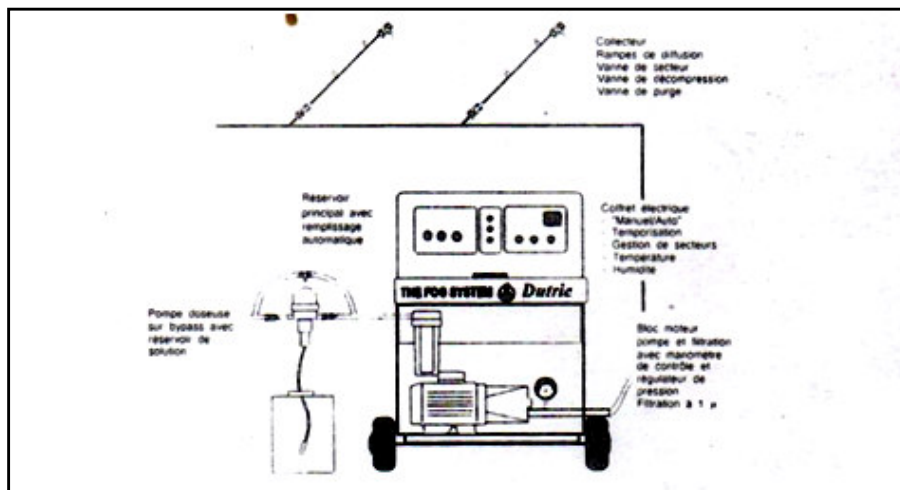


Fig. II- 7: Schéma de principe d'un humidificateur à pulvérisation d'eau atomisée par buses fixes à eau pressurisée.

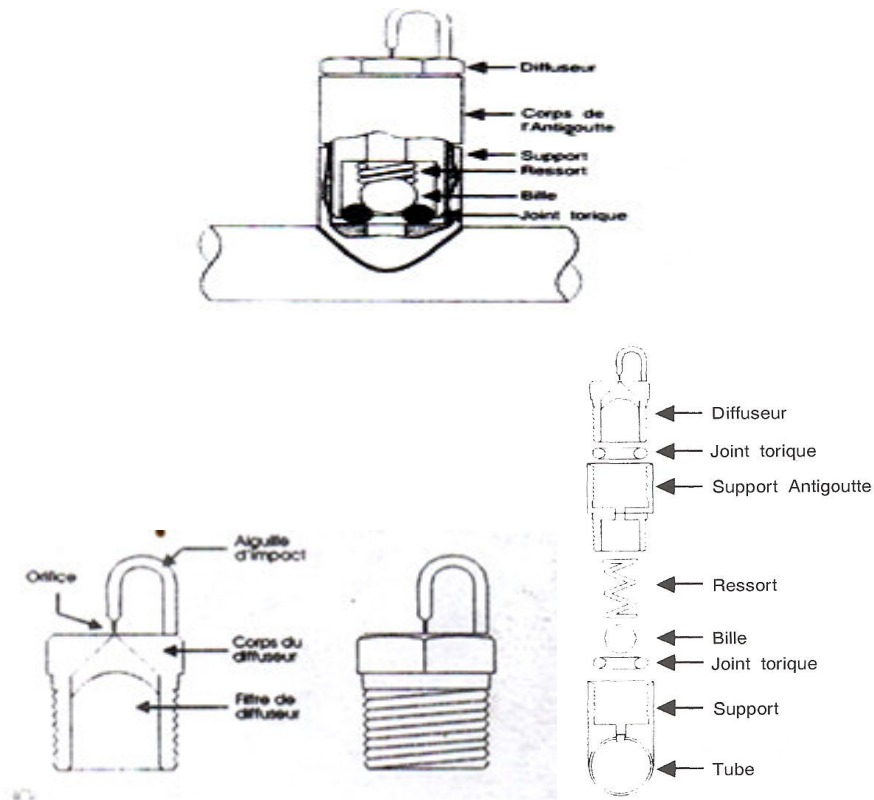


Fig. II- 8 : détail d'un diffuseur de l'humidificateur de la figure (II.7)

2.1.4.1) Principe de fonctionnement :

L'eau est pompée grâce à une pompe à une grande pression qui peut atteindre et même dépasser 100 bars, puis l'eau sous pression entre dans la rampe de diffusion où sont montées plusieurs diffuseurs (ou buses).

L'eau sous pression passe à travers le diffuseur qui se termine par un orifice de faible diamètre formant un jet à très grande vitesse. Juste en amont de diffuseur il se trouve une aiguille courbe vient de se terminer en pointe, fixée sur le bord de diffuseur, cet aiguille va briser le jet d'eau en très fines gouttelettes d'un diamètre compris entre 2 et 50 µm.

La filtration de l'eau se fait en deux étapes :

- Filtration en amont de la pompe où il est prévu un filtre à cartouche en polypropylène éliminant des impuretés d'un diamètre supérieur à 0,5µm.
- Filtration avant de pénétrer dans le diffuseur.

Les très fines gouttelettes se mettent en contact avec l'air et s'évaporent en puisant de la chaleur nécessaire à leur évaporation de l'air, ce qui provoque le refroidissement de ce dernier. [1]

2.1.4.2) Avantages et inconvénients :❖ **Avantage :**

La présence d'un système de traitement d'eau.

❖ **Inconvénient :**

Ils ne doivent pas être placés dans des endroits très étroits pour ne pas gêner la diffusion des gouttelettes d'eau.

2.1.4.3) Domaines d'application :

- Climatisation extérieur, par exemple de terrasses, patios, vérandas etc. ;
- Contrôle de l'environnement en serre, le système permet en outre d'associer un produit phytosanitaire (insecticide, engrais etc.) qui sera réparti uniformément sur l'ensemble des cultures ;
- Contrôle de l'environnement en élevage, en abaissant la température d'été grâce à une hygrométrie contrôlée, les animaux peuvent continuer à vivre dans de bonnes conditions ce qui assure une qualité de production constante tout au long de l'année ;
- Contrôle de l'atmosphère en milieu industriel, le système permet grâce au contrôle de l'humidité ambiante, le bon déroulement des processus les plus divers.

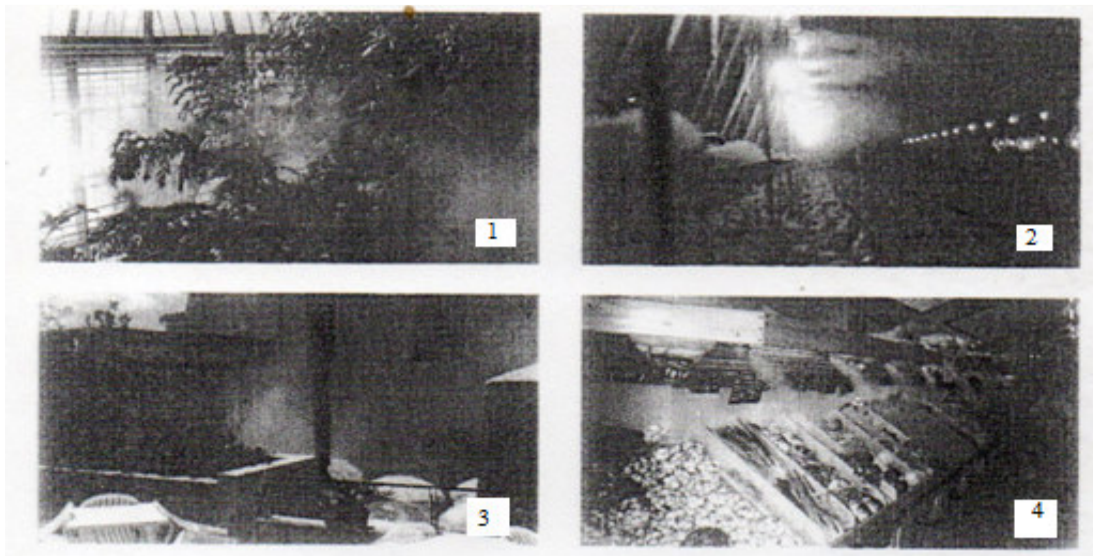


Fig. II- 9 : Exemples d'applications d'un humidificateur à eau pressurisée.

2.1.5. Humidificateur à pulvérisation d'eau atomisée par buses fixes alimentées en eau et air comprimé (ou humidificateur bi fluides) :

2.1.5.1) Principe de fonctionnement :

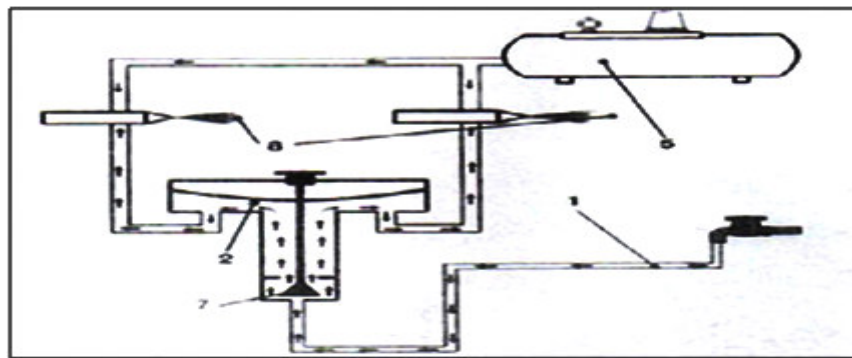


Fig. II- 10: Principe de fonctionnement de l'humidificateur à eau et air comprimé

La figure (II.10) représente un exemple d'installation de ce type d'humidificateur dont le principe de fonctionnement est le suivant :

Lorsque le processus est en marche, le compresseur (5) alimente les buses en air comprimé, il en résulte une dépression dans les tuyauteries de la circulation d'eau entre la vanne de dépression et les buses, cette dépression déforme la membrane(2) qui écarte le clapet(7) de son siège, libérant ainsi l'eau passage d'eau (1). Les buses sont alors alimentées en eau et en air comprimé, ce qui donne la formation des aérosols(8). [3]

❖ Les buses de pulvérisation :

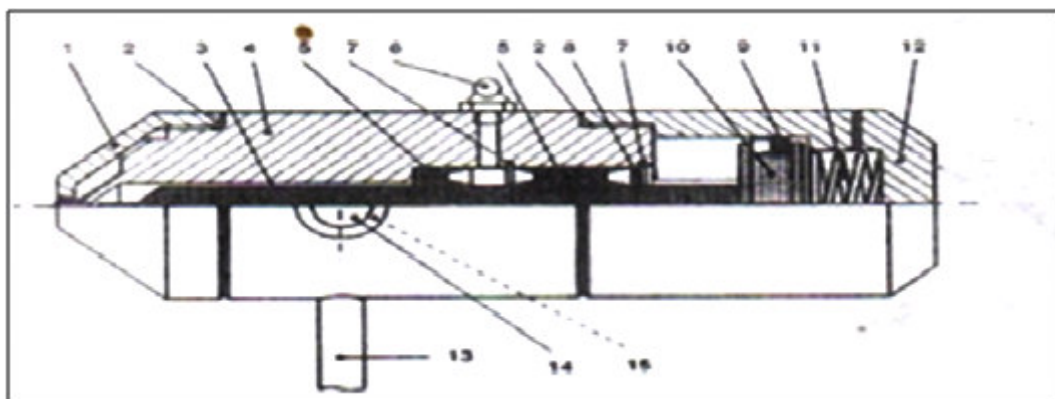


Fig. II- 11 : Détail de la buse de l'humidificateur de pulvérisation

La figure (II.11) explique bien leur principe de fonctionnement, interprété comme suit :

A l'arrêt, le ressort antagoniste(11) pousse le piston(10) lequel entraîne le déplacement de l'aiguille autonettoyante(3) ce qui assure d'une part de fermer l'arrivée d'eau(15) et de l'autre forcer l'extrémité de l'aiguille à l'intérieur de l'orifice de pulvérisation, ce qui permet d'éliminer les éventuelles dépôts d'impuretés.

Lorsque l'air comprimé arrive, il repousse l'aiguille vers l'arrière libérant ainsi à nouveau l'arrivée de l'eau. Alors l'eau se mélange avec l'air comprimé au niveau de l'orifice de pulvérisation ce qui donne naissance à des aérosols d'air et d'eau à haute pression. Le diamètre de ces gouttelettes ainsi formées varie entre 5 à 10µm.

Ces aérosols se mélangent avec l'air ambiant et s'évaporent, ce qui a pour conséquence un double effet : l'humidification et le refroidissement de l'air ambiant.

L'eau et l'air utilisés doivent être filtrés avant qu'ils pénètrent dans la buse. Cette filtration est assurée par d'autres processus dans la station de pompage, que ce soit de l'eau ou de l'air.

2.1.5.2) Avantages et inconvénients :

❖ **Avantage :**

- Ces humidificateurs sont utilisables soit en humidification directe dans le local même à traiter ou en humidification indirecte dans des caissons d'une centrale de traitement d'air.

❖ **Inconvénients :**

- Dans le cas des installations directes, on doit respecter des distances minimales avec les obstacles pour éviter la condensation de certaines gouttelettes sur ces obstacles.
- Le coût d'exploitation plus élevé de cet humidificateur que celui d'un humidificateur-laveur ou d'un humidificateur à buse rotative.

2.1.5.3) Domaines d'application :

On les utilise également dans les centrales de traitement de l'air ainsi que dans les locaux.

2.1.6. Humidificateur à pulvérisation d'eau atomisée par ultrasons :

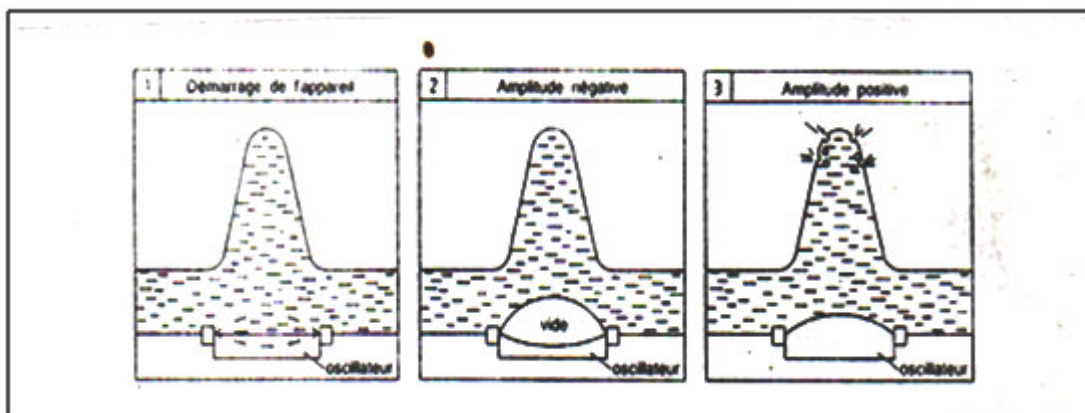


Fig. II- 12 : Schéma de fonctionnement du convertisseur piézo-électrique d'un humidificateur par ultrasons.

2.1.6.1) Principe de fonctionnement :

Dans ce système la pulvérisation de l'eau se fait à l'aide d'un appareil dit convertisseur piézo-électrique ou transducteur fixé au fond d'un réservoir d'eau. Ce réservoir est vidangeable et comprend un trop plein et une vanne solénoïdale commandée par un interrupteur à flotteur qui permet de contrôler le niveau d'eau dans le réservoir (fig.10.I).

Le convertisseur piézo-électrique est une lame métallique alimentée d'un courant électrique de 48V redressé par un transformateur. Cette lame convertit le signal électrique reçue en oscillations mécaniques de haute fréquence (en générale 1,65 MHz). Dès la mise en marche de l'appareil, il y a formation d'une colonne du liquide (eau) au dessus de transducteur(1).

Lors de l'amplitude négative (2), c'est-à-dire lorsque la lame courbe vers le bas, il y aura alors une formation de vide (cavité) au dessus de la lame, cette cavité donne naissance à des bulles de très petites dimensions. Et au cours de l'amplitude positive, ces bulles remontent au sommet de la colonne d'eau, poussées par la lame lorsqu'elle se courbe vers le haut.

Au sommet, les gouttelettes s'entrechoquent avec force ce qui donne formation de très fines particules d'eau à la surface de la colonne où elles se détachent sous l'effet des ondes croisées à la surface de l'eau. Le diamètre de ces gouttelettes varie entre 7 à 10 μ m, puis entre en contact avec l'air ambiant et s'évapore ce qui assure son refroidissement et également son humidification. [1]

2.1.6.2) Avantages et inconvénients :

❖ **Avantage :**

Le rendement en eau plus élevé de cet humidificateur par rapport aux autres (toute l'eau consommée est presque atomisée)

❖ **Inconvénients :**

Cet humidificateur ne possède pas un système de traitement d'eau d'où il est nécessaire d'utiliser de l'eau traitée.

2.1.6.3) Domaines d'application :

On utilise l'humidificateur à pulvérisation d'eau atomisée par ultrasons dans :

- Magasin de détail de viande.
- Les vitrines réfrigérées.
- Chambre froide.
- Les locaux à traiter comme un atelier, un volume de stockage ou encore un musée, d'une salle d'exposition etc.
- Industrie alimentaire (fromages, légumes, viandes ...etc.).

2.1.7. Humidificateur à pulvérisation d'eau atomisée par infrasons :

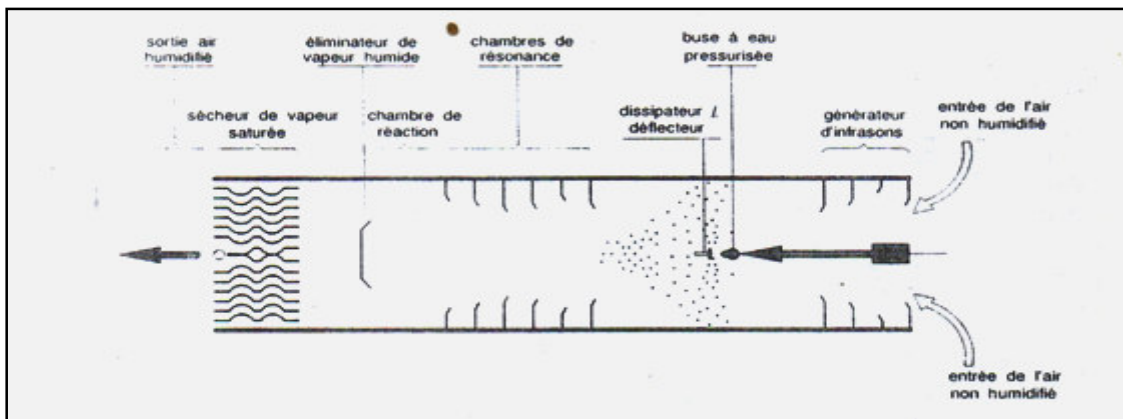


Fig. II- 13 : schéma de principe d'un humidificateur à pulvérisation par infrasons.

2.1.7.1) Principe de fonctionnement :

La figure (II.13) montre un exemple de ce principe : L'eau est pulvérisée par une buse fixe en très fines gouttelettes et la vaporisation de ces gouttelettes est assurée par des ondes infrasons dont la longueur d'onde est inférieure à 20Hz.

L'air pénètre dans l'humidificateur à travers un canal, à l'entrée de ce canal, l'air est mis en vibration sous l'action d'un générateur d'infrasons. Une buse spéciale pulvérise de l'eau à très haute pression dans l'air en vibration en très fines gouttelettes. Puis le mélange d'air et de brouillard de gouttelettes passe par 4 chambres de résonance consécutives, dont leur rôle est d'émettre des vibrations hétérodynes dans le mélange et de faire un brassage intense de l'air et des gouttelettes d'eau. Pour assurer la vaporisation à froid des gouttelettes d'eau dans l'air jusqu'à la saturation. Ensuite le mélange entre dans la chambre de réaction où la vaporisation des gouttelettes se continue, et à la sortie de cette chambre il se trouve un éliminateur de vapeur humide dont le rôle est de piéger les gouttelettes non évaporées. Enfin, le mélange d'air et de gouttelettes passe, en dernière étape par le sécheur de vapeur saturée dont le rôle est d'éliminer le surplus de vapeur saturée et sèche la vapeur froide par détente.[5]

2.1.7.2) Avantages et inconvénients :

❖ Avantage :

- La faible consommation en électricité par rapport aux autres humidificateurs (environ 6W).

❖ Inconvénients :

- Le faible rendement en eau car seulement environ 50% d'eau injectée est vaporisée, le reste est évacué.
- Ce type d'humidificateur est exempté d'un système de traitement d'eau d'où la nécessité d'utiliser de l'eau préalablement traitée.
- Les frais d'exploitations très élevés.

2.2. Humidification à évaporation d'eau :

L'air circule à contre courant ou à courant croisé avec le circuit d'eau. Le contact de l'eau avec l'air permet sa vaporisation, cette vaporisation est plus au moins intense selon l'état de l'air à son entrée c'est-à-dire selon sa température, son humidité et sa vitesse ainsi que la température de l'eau. Ce qui signifie que la meilleure vaporisation se fait lorsque :

- L'écart de température est important (il faut toujours la température de l'air est $>$ à celle de l'eau)
- La vitesse d'air est importante.
- L'humidité faible de l'air à l'entrée.

Il existe deux modèles d'humidificateurs à évaporation d'eau qui sont :

2.2.1. Le modèle à eau recyclée :

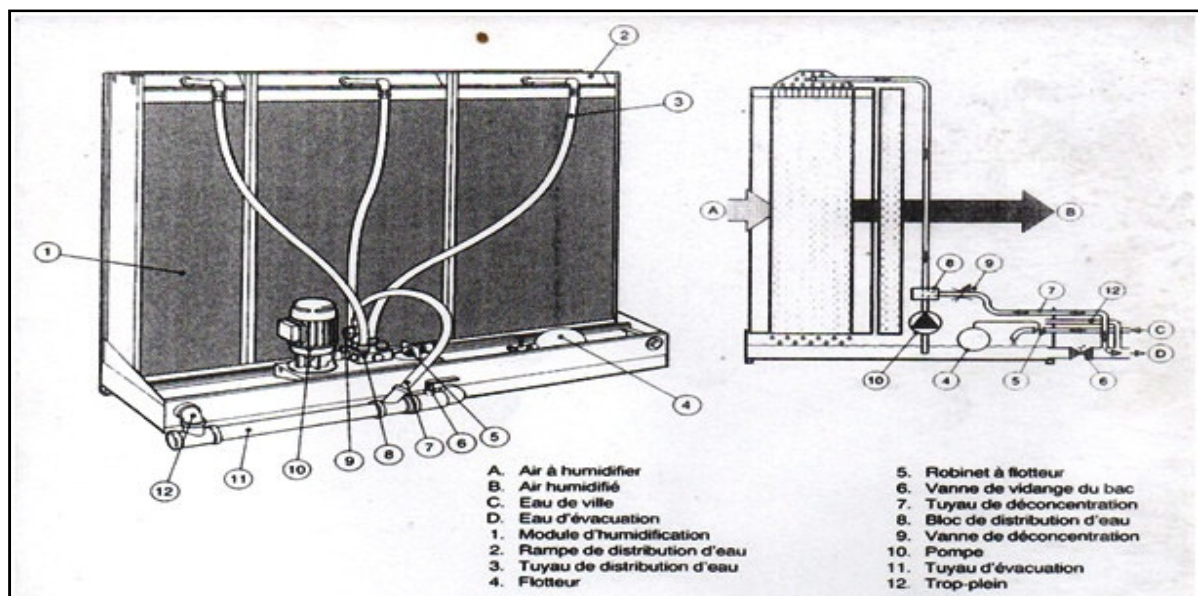


Fig. II- 14 : Détail de l'humidificateur à évaporation à eau recyclée.

2.2.1.1) Principe de fonctionnement :

L'eau est pompée à partir d'un bac grâce à une pompe(10), puis l'eau est envoyée dans une rampe de distribution d'eau(2). L'eau circule verticalement sur de surfaces formant ainsi une couche mince d'eau. L'air circule alors en courant croisé avec l'écoulement d'eau en brassant ces surfaces mouillées ce qui assure l'évaporation de ces couches d'eau. Puis l'eau restante qui n'est pas encore évaporée retombe dans le bac pour un nouveau cycle.

Le niveau de bac est assuré par l'eau de ville grâce (c) commandé par un système à flotteur.

2.2.1.2) Avantages et inconvénients :

❖ Avantage :

- Dans ce système on n'a pas besoin de filtre à air car la surface mouillée agit comme un filtre humide qui capte les impuretés de l'air.
- La vapeur produite est pure même si l'eau contient des impuretés.

❖ Inconvénients :

- Accumulation des impuretés dans le bac d'où la nécessité de purger régulièrement l'eau du bac et la remplacer par de l'eau neuve.

2.2.2. Le modèle à eau perdue :

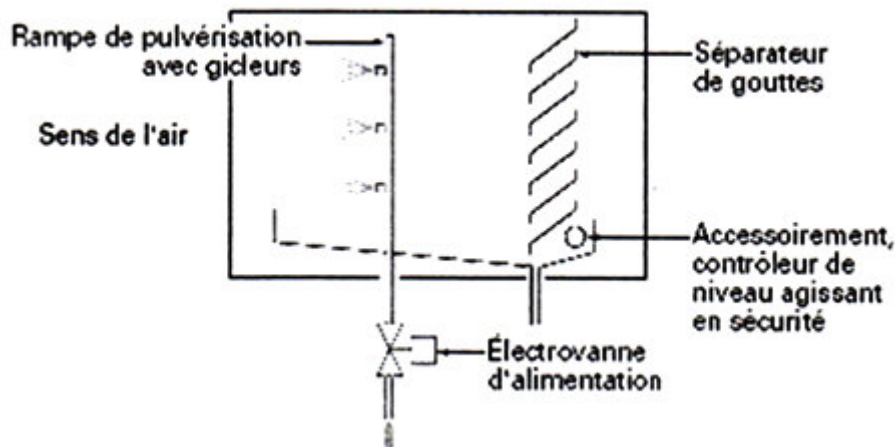


Fig II.15 : Humidificateur à eau perdue.

2.2.2.1) Principe de fonctionnement :

Dans ce modèle, l'air à humidifier circule à contre courant avec un flux de gouttelettes d'eau pulvérisées grâce à des buses fixes. Les gouttelettes se mettent en contact avec de l'air de température plus élevée ce qui assure la vaporisation. La vaporisation de certaines de ces gouttelettes jusqu'à la saturation de l'air. Et les gouttelettes restantes non évaporées vont être piégées par un séparateur de gouttes, puis retombent pour être évacuées à travers un tuyau d'évacuation.

2.2.2.2) Avantages et inconvénients :

❖ Avantage :

La filtration de l'air est assurée par le lavage des gouttelettes d'eau.

❖ Inconvénients :

Absence d'un système de traitement d'eau.

2.2.2.3) Domaines d'application :

On peut utiliser l'humidificateur à évaporation dans :

- centre de traitement de l'air
- les locaux comme une maison, une salle de musée etc.



Fig. II- 16 : Humidificateur de pièce déplaçable installé dans une salle de musée.

2.3. Humidificateurs à vapeur :

2.3.1. Humidificateur à vapeur non autonome à raccorder sur un réseau de vapeur existant :

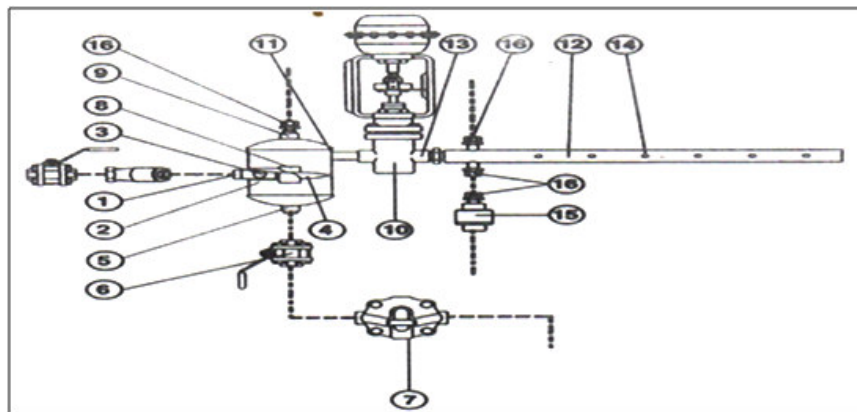


Fig. II- 17 : Détails constructifs de la rampe d'humidification de l'humidificateur à vapeur sèche non autonome.

2.3.1.1) Principe de fonctionnement :

Les détails de ce principe sont données dans le schéma de la figure (II.17) comme suit :

Dans ce type d'humidificateur, la vapeur nécessaire pour l'humidification de l'air est soutirée à partir d'une source de vapeur comme les chaudières à vapeur (cas des hôpitaux, usines etc.), puis la vapeur est injectée dans l'humidificateur par l'orifice d'entrée(1), ensuite la vapeur entre dans le séparateur(2) qui a le rôle d'éliminer d'éventuelles gouttes d'eau dans la vapeur, puis les gouttes sont purgées par l'orifice de purge(5) vers un purgeur à flotteur fermé(7) équipé d'un purgeur thermostatique qui se ferme lorsque la vapeur chaude arrive et s'ouvre lorsque les condensats (gouttes) sont refroidies.

Ensuite la vapeur sèche se divise en deux : Une partie est dirigée par l'orifice(9) vers le tube de préchauffage contenu dans la rampe d'injection(12) tandis que la plus grande partie est envoyée sur la vanne de contrôle(10) à partir de l'orifice(11). Cette vanne est équipée d'un servomoteur électrique ou pneumatique alimente la rampe d'injection(12) en vapeur en fonction des besoins, la vapeur étant injectée dans l'air par l'intermédiaire de buses profilées(14).

La partie de vapeur vers le tube de préchauffage sert à préchauffer la rampe d'injection lors de démarrage à froid pour empêcher la condensation d'une partie de la vapeur à distribuer dans la rampe d'injection. Une fois la rampe atteint la température de la vapeur à distribuer, alors la totalité de la vapeur qui vient de séparateur est dirigée vers la rampe de distribution pour être injectée dans l'air à humidifier. [1]

2.3.1.2) Avantages et inconvénients :**❖ Avantage :**

Le rendement en vapeur élevé car toute la vapeur injectée se mélange dans l'air.

❖ Inconvénients :

La dépendance de la disponibilité et de coût de la vapeur.

Ils ne doivent pas être installés dans des lieux encombrant pour assurer le bon mélange de la vapeur avec l'air.

2.3.1.3) Domaines d'application :

- On les utilise également où la vapeur est disponibles grâce à des chaudières comme :
- Centrale de traitement de l'air ou conduit aéraulique
- Industrie alimentaire
- Halls de fabrication d'emballages, de traitement de cuir
- salles d'opérations, laboratoires etc.

2.3.2. Humidificateur à vapeur autonome du type humidificateur-générateur à électrodes :

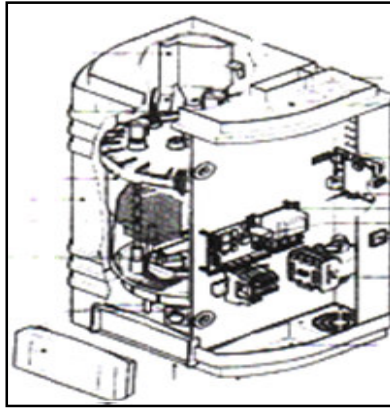


Fig. II- 18 : Humidificateur de type générateur à électrodes.

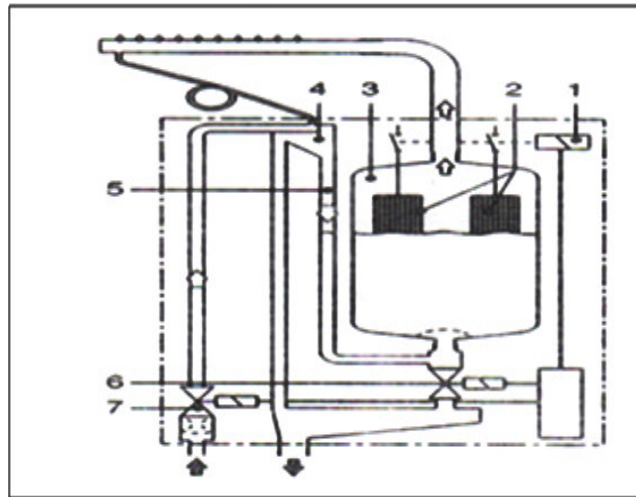


Fig. II- 19 : Principe de fonctionnement de générateur à électrode.

2.3.1.1) Principe de fonctionnement :

Dans ce cas l'air est humidifié par la vapeur sèche produite par l'humidificateur lui-même à l'aide des électrodes.

La figure (II.19) montre un exemple de cet humidificateur dont le principe de son fonctionnement est comme suit : Des électrodes(2) sont émergées dans un réservoir d'eau sous forme d'un cylindre. Lorsqu'il y a demande de vapeur, les électrodes sont mises sous tension à l'aide de contacteur principale(1) constitué d'un ensemble de pièces électroniques programmables, ensuite le courant passe entre les électrodes à travers l'eau où il joue le rôle d'une résistance chauffante, alors l'eau s'échauffe et lorsqu'il atteint la température de saturation il commence à s'évaporer, puis la vapeur remonte vers le haut où elle sera diffusée à travers la rampe de distribution.

Le niveau de réservoir est maintenu à une certaine hauteur grâce à une sonde qui contrôle ce niveau en fermant la vanne d'eau(7) dès que le niveau est atteint.

Lorsque le débit de vapeur nécessaire est atteint, la vanne d'alimentation en eau (7) se ferme, et s'ouvre à nouveau lorsqu'il y a demande de vapeur.

La vapeur produite étant pure c-à-d exempte de sels et de minéraux alors ce qui entraîne l'augmentation de la concentration de ces dernières dans l'eau restant dans le réservoir. Cette augmentation en sels et en minéraux provoque à son tour l'augmentation de la conductivité électrique de l'eau, ce qui signifie augmentation de courant consommé.

Pour remédier à ce problème, le réservoir est pourvu d'un système de purge de déconcentration automatique pour évacuer l'eau à forte concentration et la remplacer par de l'eau neuve en provenance de réseau.

Une certaine quantité de vapeur est condensée dans la rampe lors de démarrage à froid d'où l'appareil est équipé d'un système qui permet de récupérer ses condensats et les renvoyer dans le réservoir à travers un tuyau. [3]

2.3.1.2) Avantages et inconvénients :

❖ Avantage :

- Ce type d'humidificateur n'a pas besoin d'un système de traitement d'eau car (la vapeur produite est pure)
- L'efficacité élevée de cet humidificateur car toute la vapeur produite se mélange avec l'air.

❖ Inconvénients :

- Le faible rendement en eau à cause des purges de déconcentration.

2.3.1.3) Domaines d'application :

On peut trouver l'humidificateur-générateur à électrodes dans les domaines suivants : centrale de traitement d'air; conduits aérauliques ; bains de vapeur, hammams.

2.3.3. Humidificateur à vapeur autonome du type humidificateur générateur à résistances :

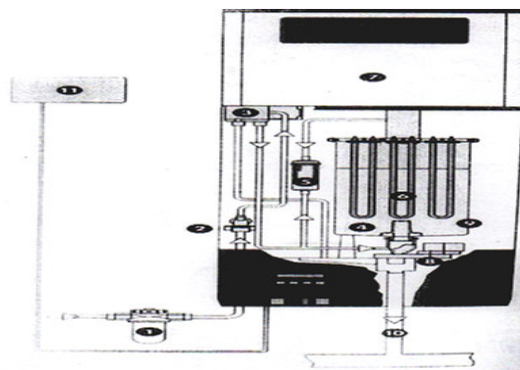


Fig. II- 20 : Générateur à résistances.

2.3.3.1) Principe de fonctionnement :

Dans ce type d'humidificateur la vapeur est produite grâce à des thermoplongeurs (6), qui sont des résistances électriques du type barre ou serpentin émergées dans une cuve (4) (où réservoir d'eau), dont le niveau est maintenu constant grâce au régulateur de niveau d'eau (5). Et la vapeur produite est diffusée dans l'air par à un ventilateur (7).

L'eau en provenance de réseau passe par le robinet principal avec son filtre(1) où elle est filtrée de ses impuretés de taille importante.

Comme dans le cas des humidificateurs à électrodes, il y a petit à petit augmentation de la concentration en minéraux dans la cuve ce qui fait qu'il est là encore prévu une purge de déconcentration contrôlées par la vanne d'écoulement (8). Ces sels minéraux purgés de la cuve sont évacués au moyen d'un sac à calcaire rigide (10).

2.3.3.2) Avantages et inconvénients :

Il représente les mêmes avantages et inconvénients qu'un humidificateur-générateur à électrodes.

2.3.3.3) Domaines d'application :

On l'applique également dans les mêmes domaines que celui de l'humidificateur-générateur à électrodes.

3. Conclusion :

Dans un projet d'installation d'humidification, il faut déterminer dans quelles conditions l'installation projetée pourra fonctionner de façon optimale. Ce qui nécessite de connaître les avantages et les inconvénients des différents humidificateurs

Chapitre III

Simulation numérique

1. Introduction :

La vaporisation d'eau au contact du courant d'air enrichit en humidité la couche d'air au voisinage de ce film d'eau.

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 (donc, la température de l'air diminue).

2. Calcul de la température de la gouttelette (T_g) d'eau :

❖ Bilan énergétique :

Considérons le système thermodynamique (la gouttelette), alors le bilan énergétique sera comme suit :

$$\Phi_T = \Sigma \Phi_i = 0 \quad (\text{III-1})$$

$$\lambda \cdot s \cdot (T_{air} - T_g) - \dot{m} \cdot Lv + \sigma \cdot s \cdot (T_p^4 - T_g^4) = 0 \quad (\text{III-2})$$

$$\lambda \cdot s \cdot (T_{air} - T_g) = \dot{m} \cdot Lv + \sigma \cdot s \cdot (T_g^4 - T_p^4) \quad (\text{III-3})$$

Avec :

$\lambda \cdot s \cdot (T_{air} - T_g)$: Flux de chaleur sensible échangé entre l'air et la gouttelette d'eau.

$\dot{m} \cdot Lv$: Flux de chaleur latente perdu par l'évaporation d'une partie de la gouttelette

$\sigma \cdot s \cdot (T_p^4 - T_g^4)$: Flux de chaleur radiatif échangé entre la gouttelette et la paroi

λ : coefficient d'échange convectif de l'air humide [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

Lv : chaleur latente d'évaporation d'eau [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$].

σ : Constante de Steffen-Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$].

Et :

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot s \cdot (m_{v,s} - m_{v,air}) \quad (\text{III-4})$$

Avec:

ρ : Masse volumique de l'air humide [kg/m^3]

v : La vitesse massique [m/s]

s : La surface d'échange air/gouttelette

$m_{v,s}$: La fraction massique de la vapeur d'eau saturée à l'interface gouttelette/air humide

$m_{v,air}$: La fraction massique de la vapeur d'eau dans l'air

Donc l'équation (III-3) devient :

$$\lambda \cdot S \cdot (T_{air} - T_g) = \rho \cdot K \cdot S \cdot (m_{v,s} - m_{v,air}) \cdot Lv + \sigma \cdot S \cdot (T_g^4 - T_p^4) \quad (III-5)$$

$$\lambda \cdot (T_{air} - T_g) = \rho \cdot K \cdot (m_{v,s} - m_{v,air}) \cdot Lv + \sigma \cdot (T_g^4 - T_p^4)$$

$$\sigma \cdot T_g^4 + \lambda \cdot T_g + \rho \cdot K \cdot (m_{v,s} - m_{v,air}) \cdot Lv - \sigma \cdot T_p^4 - \lambda \cdot T_{air} = 0 \quad (III-6)$$

On pose

$$\alpha = \rho \cdot K \cdot (m_{v,s} - m_{v,air}) \cdot Lv - \sigma \cdot T_p^4 - \lambda \cdot T_{air}$$

D'où l'équation (III.6) devient :

$$\sigma \cdot T_g^4 + \lambda \cdot T_g + \alpha = 0 \quad (III-7)$$

Donc :

$$T_g = \frac{(-\alpha - \sigma \cdot T_g^4)}{\lambda} \quad (III-8)$$

Le calcul de α revient au calcul de K , $m_{v,s}$, $m_{v,air}$ et λ .

La fraction massique de la vapeur d'eau dans l'air est donnée par :

$$m_{v,air} = 0.622 \cdot \frac{HR \cdot P_{v,sat}(T)}{P_{atm} - 0.378 \cdot HR \cdot P_{v,sat}(T)} \quad (III-9)$$

Tel que

$$P_{v,sat}(T_{air}) = 611 \cdot \exp\left(\frac{17.25 \cdot T}{237.8 \cdot T}\right) \quad (III-10)$$

$P_{v,sat}$: Pression de vapeur à la saturation pour $T=T_{sat}$.

$$\text{De même : } m_{v,s} = 0.622 \cdot \frac{HR \cdot P_{v,sat}(T_{sat})}{P_{atm} - 0.378 \cdot HR \cdot P_{v,sat}(T_{sat})} \quad (III-11)$$

Et comme $HR=100\%$ (vapeur saturée), on aboutit à :

$$m_{v,s} = 0.622 \cdot \frac{P_{v,sat}(T_{sat})}{P_{atm} - 0.378 \cdot P_{v,sat}(T_{sat})} \quad (III-12)$$

D'où :

$$P_{v,sat}(T_g) = 611 \cdot \exp\left(\frac{17.25 \cdot T_g}{237.8 \cdot T_g}\right) \quad (III-13)$$

$P_{v,sat}$: Pression de vapeur à la saturation pour $T=T_g$

P_{atm} : pression atmosphérique = C^{ste}

Pour les valeurs de k et h , elles seront déduites à partir des corrélations suivantes : [8]

$$Nu = \frac{h \cdot d_g}{\varepsilon} = 0.37 \cdot Re^{0.6} \quad (III-14)$$

$$Sh = \frac{k \cdot d_g}{D_v} = 0.37 \cdot Re^{0.6} \quad (III-15)$$

Avec Nu : Nombre de Nusselt

Sh : Nombre de Sherwood

$$Re = \frac{v \cdot d_g}{\nu} : \text{Nombre de Reynolds} \quad (III-16)$$

Et : v : vitesse d'écoulement d'air [m/s]

d_g : diamètre de la gouttelette [m]

ν : viscosité cinématique

ε : coefficient de conductivité thermique [$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$]

Ce qui donne :

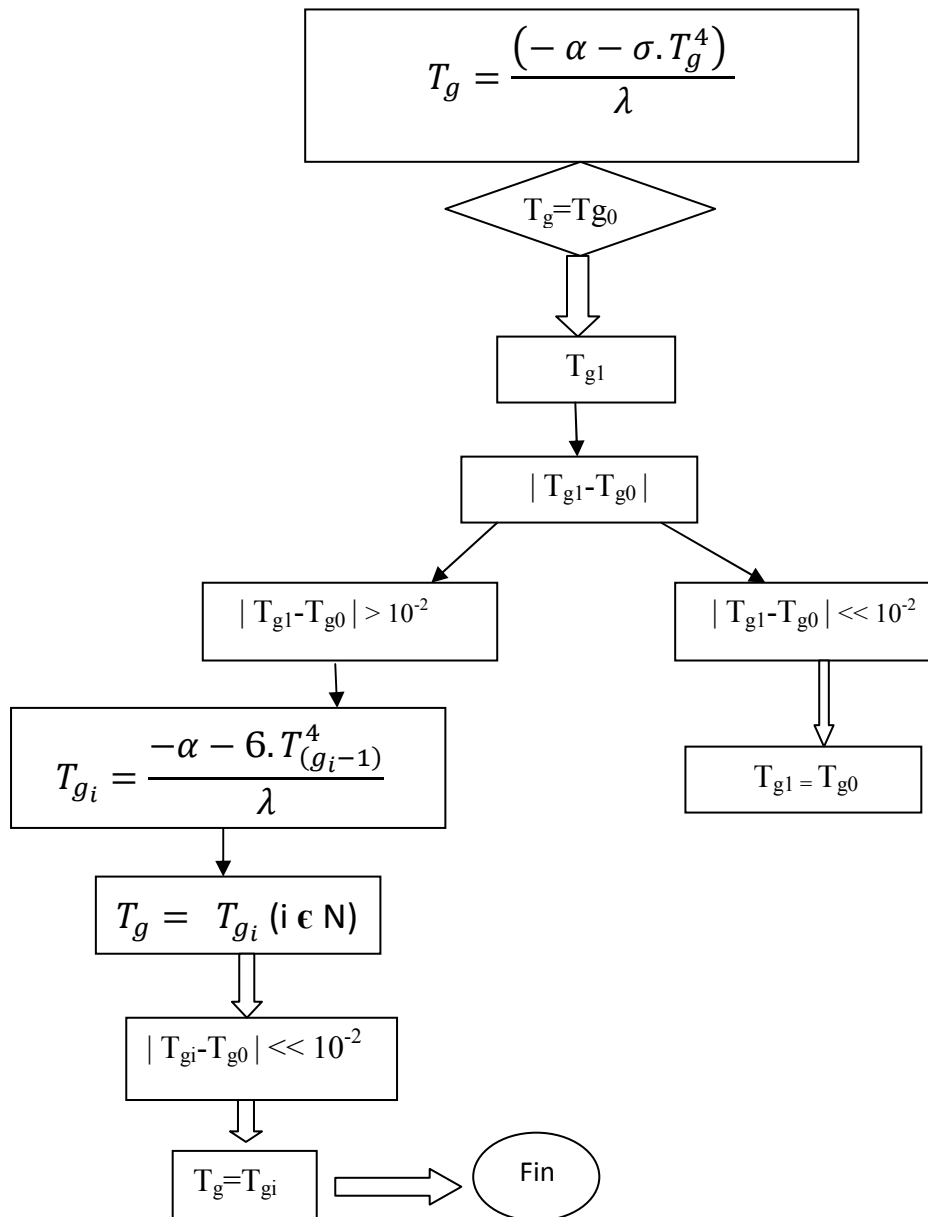
$$k = \frac{0.37 \cdot Re^{0.6} \cdot D_v}{d_g} \quad (III.a)$$

Tenant compte de l'expression (III-14) il vient que :

$$h = \frac{0.37 \cdot Re^{0.6} \cdot \varepsilon}{d_g} \quad (III.b)$$

D_v : La diffusivité moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air [m/s]

La résolution de l'équation (III.8) se fait par la méthode des itérations successives qui se résume dans l'organigramme qui suit :



3. Approche numérique

Pour réaliser nos simulations nous avons fait appel au CFD-FLUENT (Computational Fluid Dynamics).

Le domaine de calcul est d'abord défini et maillé avant de procéder aux simulations.

Pour ce faire, on fait appel à :

3.1. Gambit :

Ce logiciel assure la création de la géométrie du système à étudier, ainsi que sont maillage qui est la discrétisation des surfaces ou volume en éléments plus petits dont chaque élément possède une seule valeur d'un paramètre (Température, Pression, Vitesse...). Puis il permet aussi de définir les conditions aux limites. [5]

3.2. Fluent :

Ce logiciel résout l'ensemble des équations mises en jeu. Ce logiciel est basé sur la méthode des volumes finis (éléments de surface ou volume, selon le problème étudié), qui permet la résolution des équations qui régissent les écoulements (équations de conservation de la masse, de Navier Stokes et d'énergie...). [6]

4. Positions du problème :

Il s'agit de simuler la vaporisation de gouttelettes d'eau dans une conduite qui est le siège d'un écoulement d'air humide (Figure III.1).

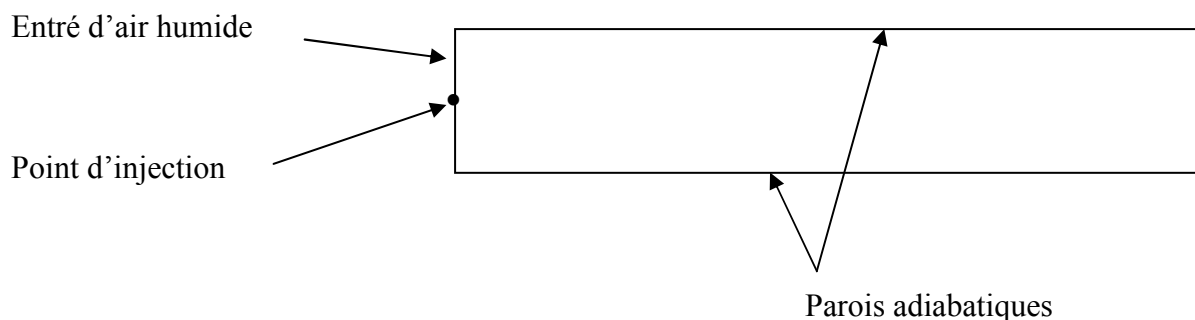


Fig. III.1 Représentation du point d'injection des gouttelettes d'eau dans la conduite.

5. Etapes à suivre :

Pour chaque étude avec Gambit et Fluent, les étapes à suivre sont :

- Créer la géométrie en GAMBIT
- Mailler la géométrie en GAMBIT
- Mettre en place les TYPES DE CONDITIONS AUX LIMITES, 'Boundary Types', en GAMBIT,
- Exporter le fichier vers Fluent.
- Résoudre les équations.
- Analyser les résultats.

Dans notre cas, les étapes à suivre pour faire les simulations sont comme suit :

Les icônes assurant les différentes fonctions dans Gambit sont affichées dans les figures suivantes :

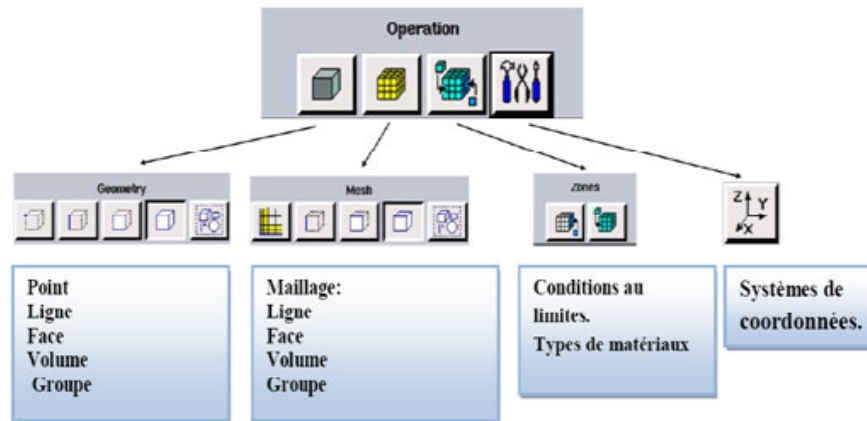


Figure III.2 : Onglets du menu principal.






Fig. III.3 : Icones représentant les étapes pour construire une géométrie sous Gambit

5.1. Création de la géométrie :

Voici les chemins à suivre pour la création de notre géométrie :

5.1.1. Création des points :




Opération → Géométrie →  →  →  → Dans le tableau qui apparait on choisit type=cartisian (coordonnées cartésiennes) → Saisir dans le tableau les coordonnées de point à créer → Apply

Les coordonnées des point qu'on va créer dans notre cas sont:

$P_1 (-100,0 ,0)$; $P_2 (+100, 0,0)$;

$P_3 (-100, 0.5, 0)$; $P_4 (100, 0.5, 0)$.




5.1.2. Création des droites :

Opération → **Géométrie** →  →  →  → sélectionner chaque deux points extrêmes de la droite (avec les boutons shift+bouton gauche de la souris) dans le schéma

→ **Label** (donner un nom pour la droite) → **Apply**




Dans notre cas, on a 4 droites (sous forme d'un rectangle)

5.1.3. Création des faces :

Opération → **Géométrie** →  →  →  → sélectionné les 4 droites (shift+bouton droit) → **Apply**




5.2. Maillage de la géométrie :

5.2.1. Maillage des droites :

Operation → **Géométrie** →  →  → 

Sélectionner les 4 droites → **interval size=1** → **Apply**.

5.2.2. Maillage des faces :

Operations → **Géométrie** →  →  → 

Sélectionner la face (shift+bouton droit) → éléments :

quad → **interval count** → $(\text{entree / Sortie})=20$
 → Paroi haut et paroi bas=100

5.3. Les conditions aux limites intérieures et extérieures :

❖ Les conditions aux limites extérieures (aux frontières) :



Operation → **zones** →  → 

Sélectionner la droites → **Label** : donner un nom pour la droite → Type : choisir le type selon la droite sélectionnée. Dans notre cas les types des droites sont :

- Entrée : « **Mass-flow-inlet** » ce qui signifie entrée de débit massique.
- Sortie : « **Out-flow** » ce qui signifie sortie de débit massique.
- Paroi haut ou bas : « **Wall** » ce qui signifie mur ou solide.

❖ Les conditions aux limites intérieures :

Ce qui signifie les phases fluides et solides dans le schéma.

Operation → zones →  → 

Sélectionner la face → **Type** : Fluid

Après avoir terminé la géométrie, nous allons le sauvegarder comme suit :

5.4. La sauvegarde :

File → **export** → **mesh**

Sélection de fichier par « **browser** »

cocher « **export 2 D(X-Y) Mesh** » → **Accept**

Après la création de la géométrie, maillage et le transfert, on peut effectuer la résolution numérique sous Fluent.

5.5. Démarrage de version 2ddp :

Dans notre cas la géométrie du domaine d'étude étant bidimensionnelle, on utilise à cet effet la version 2DDP double précision qui semble la plus appropriée pour notre étude.

5.6. Lecture des fichiers :

Cette étape sert à lire les fichiers déjà sauvegardés, Pour cette raison, on utilise la commande **File** qui permet d'ouvrir, de fermer, de sauvegarder des sessions, d'importer et d'exporter des fichiers, pour cela il suffit de suivre la procédure suivante :

File → **Read** → **Case** → **Selectionner (...msh)** → **ok**

5.7. Vérification du fichier lu

Cette étape permet la vérification des données reçues, afin de s'assurer que le maillage importé ne comporte pas d'anomalies comme des problèmes de jointure entre les différentes surfaces du maillage.

Grid → **Check**

Cette opération peut se faire aussi par la vérification de la forme de la grille sur et ensuite sur On peut de cette façon vérifier que la géométrie est bien complétée.

Display → **Grid**

5.8. Vérification d'unités :

Pour choisir l'échelle d'étude du maillage, Gambit perçes les dimensions en mètre. Cette étape permet d'adopter les dimensions réelles de notre géométrie

Grid → **Scale** → **Scale**

5.9. Taille de maillage :

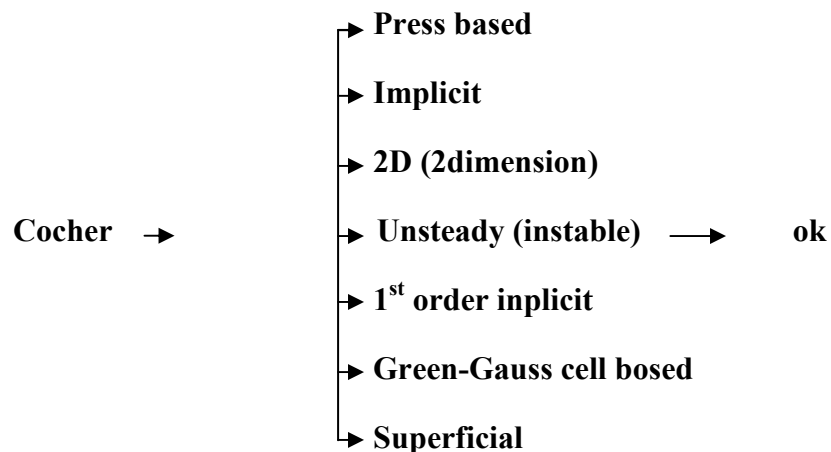
C'est le nombre des cellules, nombre de faces, de nœuds et de partitions.

Grid → **Info** → **Size**

5.10. Définition des paramètres de calcul :

Ceci nous permet de choisir la nature de l'écoulement (stationner ou transitoire), et le dimension d'écoulement 2d ou 3d. Cette étape nous donne la possibilité de choisir les équations à résoudre, les schémas de discrétisation.

Define → **Models** → **Solver**



5.11. Activation des équations associées au problème :

➤ Equation de l'énergie

Cette fonction permet de choisir si on doit ou pas prendre en considération l'équation de l'énergie dans la résolution du système, on utiliser cette équation pour faciliter la convergence.

Define → **Models** → **Energy** → **cocher Energy**

➤ Définition de régime d'écoulement

Ceci pour sélectionner le type d'écoulement du fluide.

Define → **Models** → **Viscous** → **Turbulent**

Turbulent : signifie écoulement Turbulent ($Re > 2500$).

5.12. Initialisation des calculs :

Avant tout calcul itérative on doit fixer les conditions initiales du système comme la vitesse initiale, la température, la pression

Solve → Initialize → Initialize

5.13. Choix de la solution :

Cette commande permet de définir les différents paramètres de résolution.

Solve → Controls → Solution

5.14. Critères de la convergence :

La valeur du critère de convergence peut avoir un impact sur la qualité de la solution numérique obtenue. Le logiciel fluent permet d'afficher l'évolution des résidus de chaque équation résolue en fonction du nombre d'itération exécutées et ce sous forme d'un graphe permettant ainsi de suivre le sens de variation de la solution (convergence ou divergence).

Solve → Monitors → Residual

5.15. Lancement des calculs itératifs :

Après l'initialisation, pour commencer les calculs il faut d'abord choisir les nombres d'itérations.

Solve → Iterates

5.16. Visualisation des différents résultats de simulation :

Dans notre cas, on a trois visualisations possibles pour chaque débit d'eau et chaque vitesse d'injection et pour le diamètre de la gouttelette entrant dans la conduite :

- L'évolution de la température.
- L'évolution d'hygrométrie
- L'évolution d'humidité absolue.

6. Résultats et interprétations

La quantité d'eau injectée est définie par :

$$\dot{m}_e = \rho_e \cdot v \cdot S \cdot n_p \quad (\text{III-18})$$

Où : \dot{m}_e : Débit d'eau injectée.

ρ_e : Densité de l'eau.

v : vitesse d'injection de l'eau.

$S = \frac{\pi \cdot d_g^2}{4}$: Surface de disque de diamètre d_g .

n_p : nombre des particules injectées.

On étudie alors l'influence de trois paramètres d'injections à savoir : \dot{m}_e , v et d_g sur les performances de refroidissement de l'air en sortie de la conduite.

6.1. Influence de débit d'eau :

En première lieu, on fixe :

- $V=10$ m/s : vitesse d'injection ;
- $d_g=10^{-4}$ m : diamètre de la gouttelette d'eau.

Et on fait varier le débit d'eau. On considère alors :

$$\dot{m}_e = 10^{-4}, 3 \cdot 10^{-4}, 5 \cdot 10^{-4}, 10^{-3} \text{ kg/s}$$

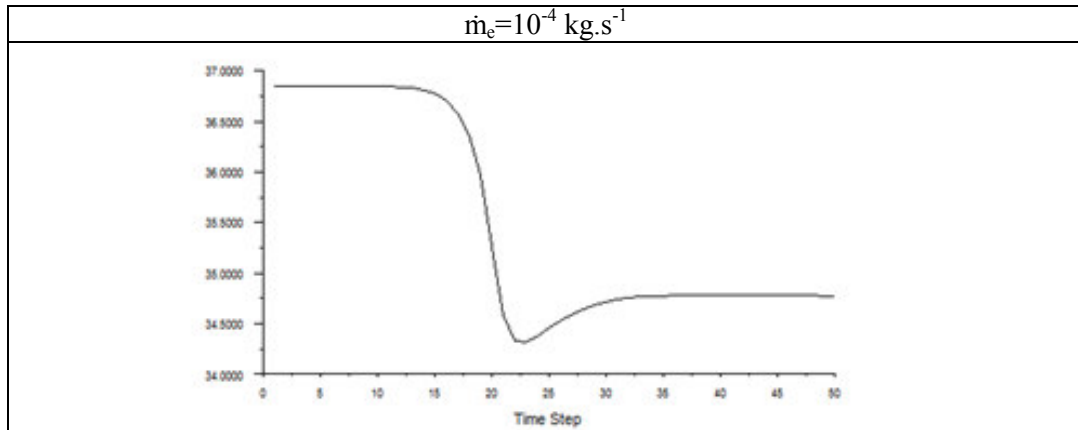


Fig.III.4 Evolution au cours du temps de la température de sortie de l'air [°C].

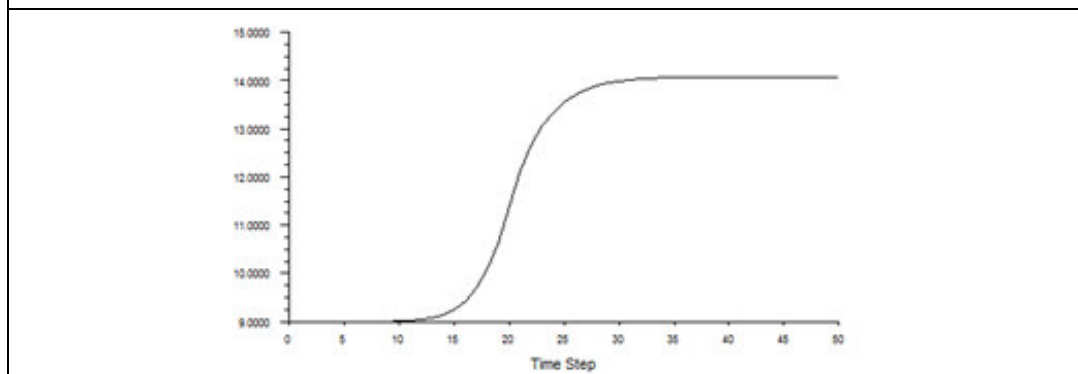


Fig.III.6 Evolution au cours du temps de l'humidité absolue de sortie de l'air [kg_eau/kg_as].

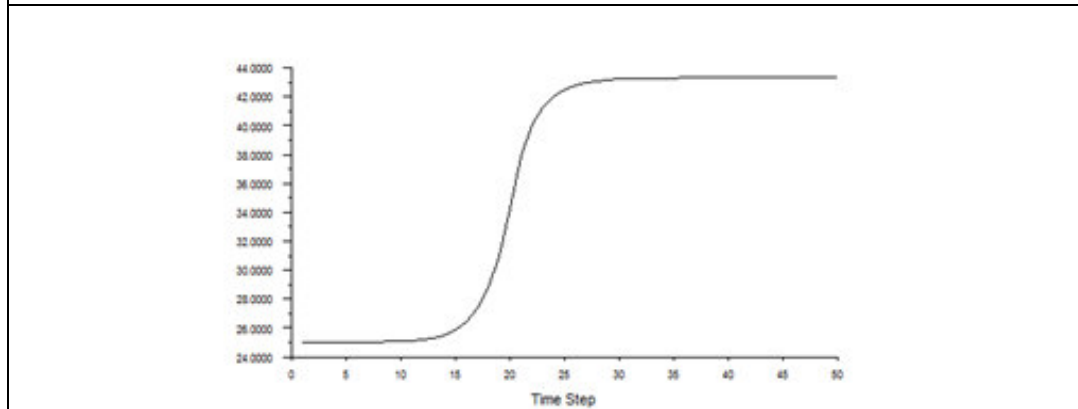
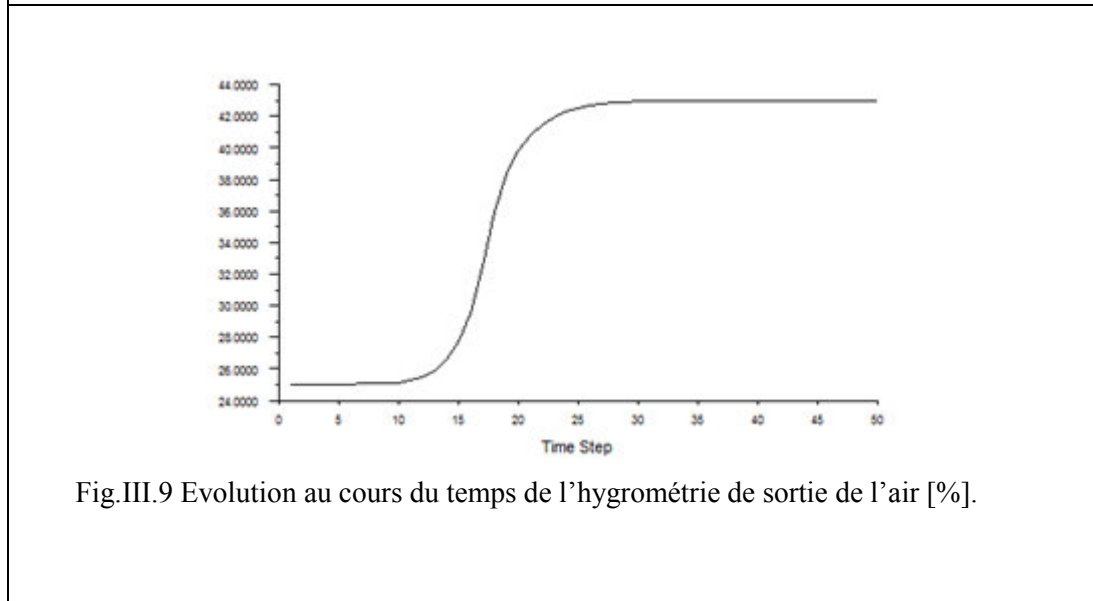
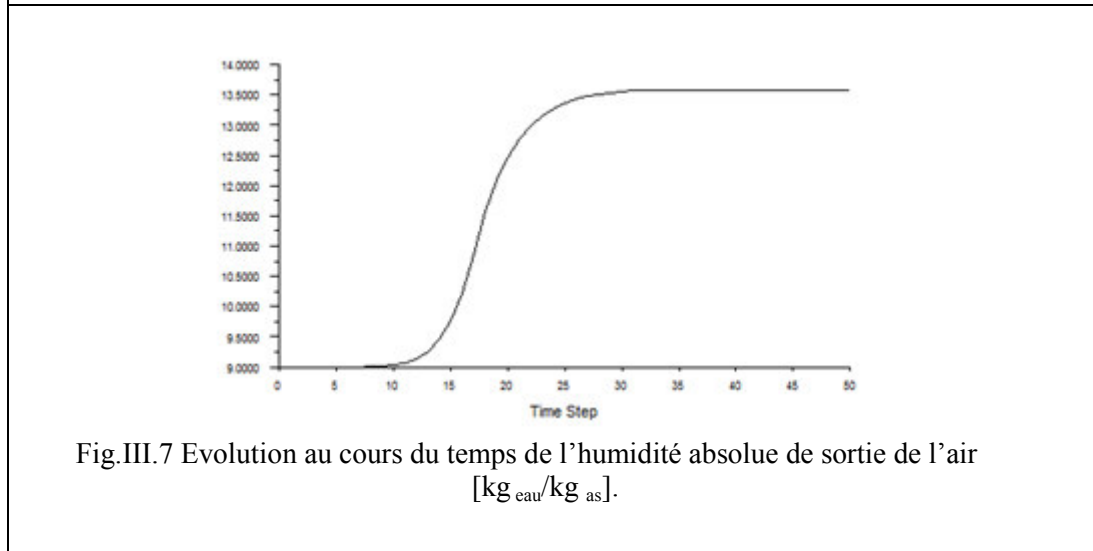
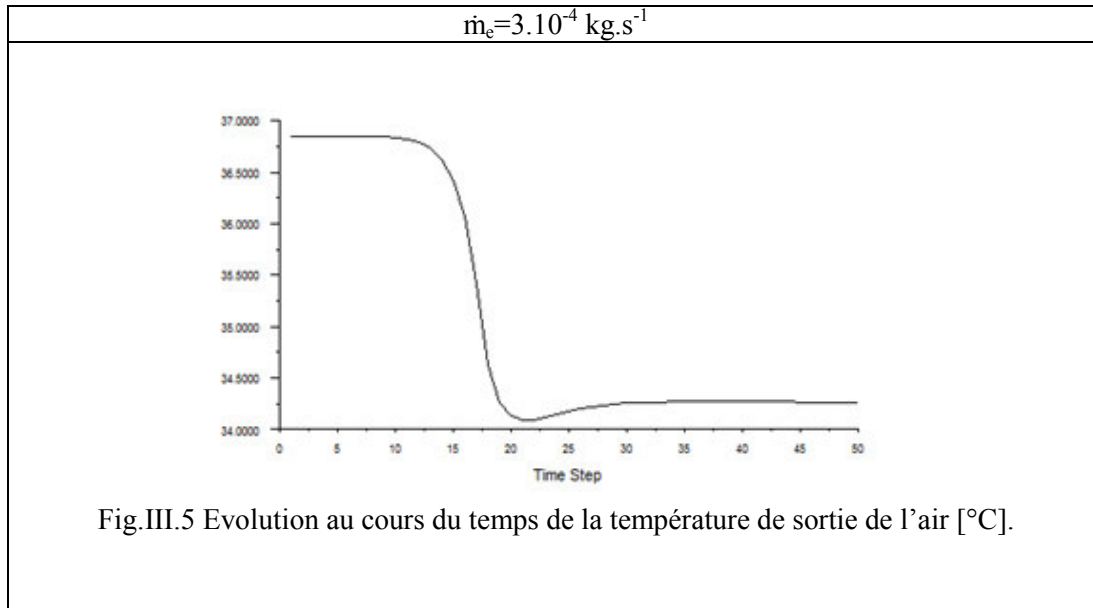


Fig.III.8 Evolution au cours du temps de l'hygrométrie de sortie de l'air [%].



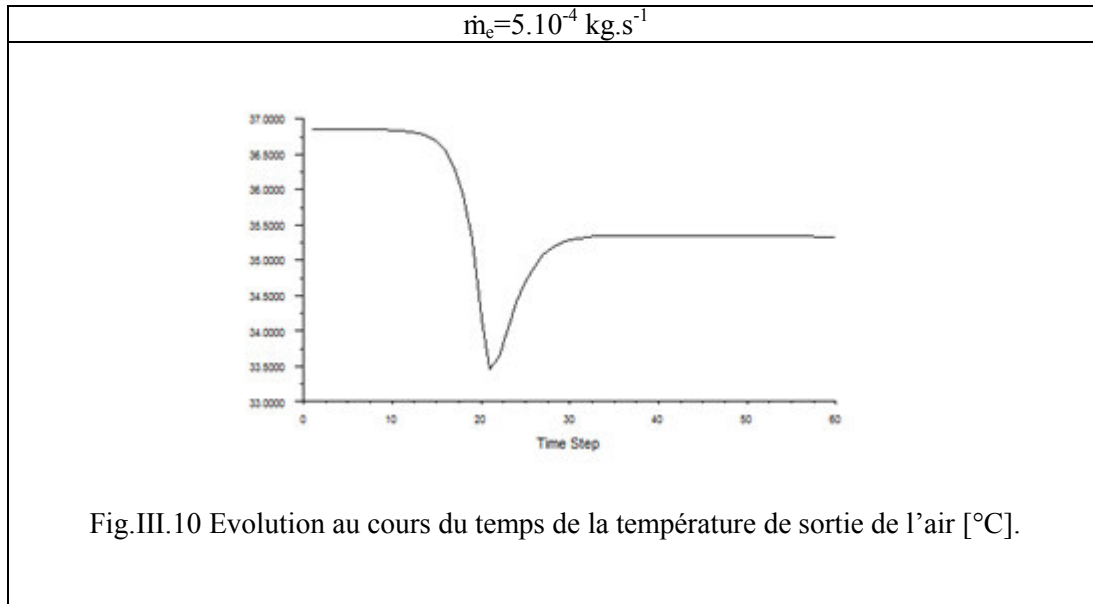


Fig.III.10 Evolution au cours du temps de la température de sortie de l'air [°C].

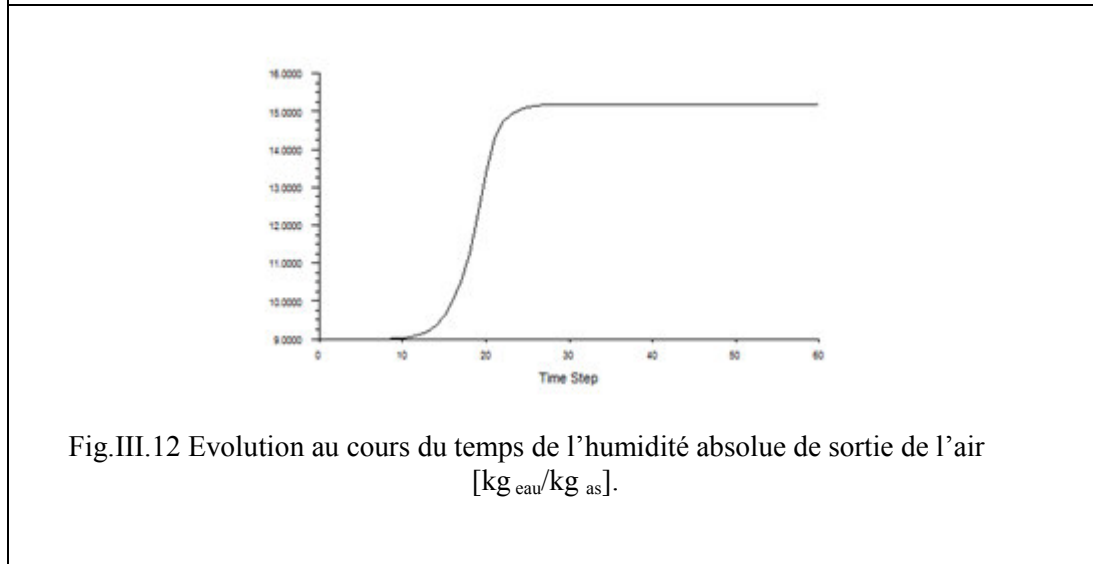


Fig.III.12 Evolution au cours du temps de l'humidité absolue de sortie de l'air [kg eau/kg as].

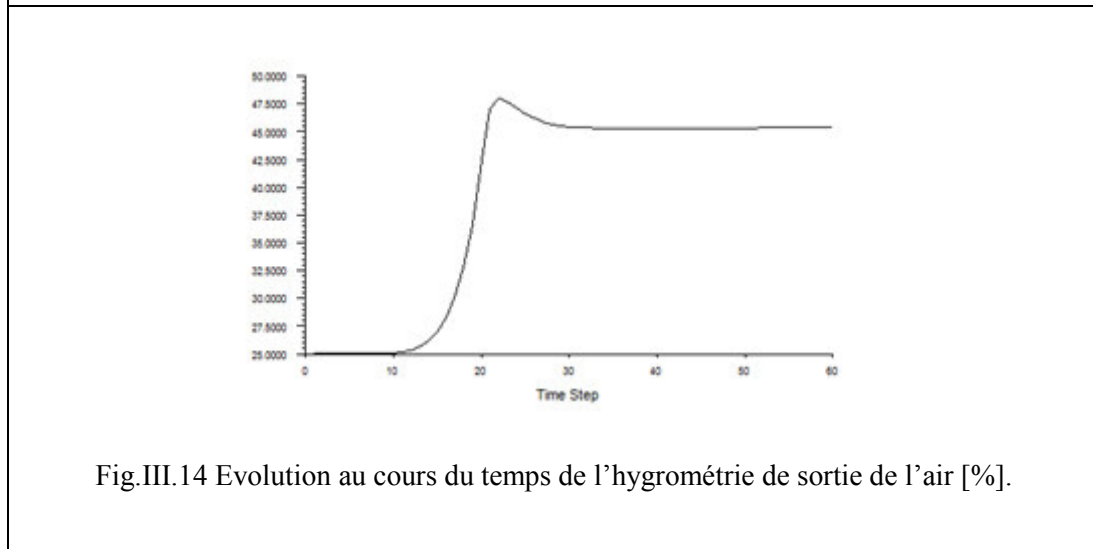
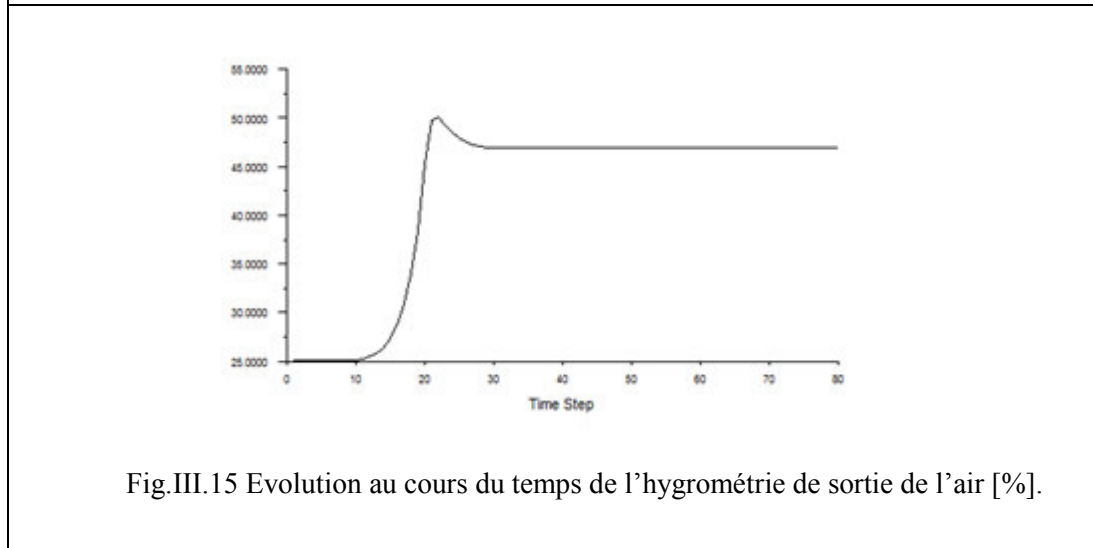
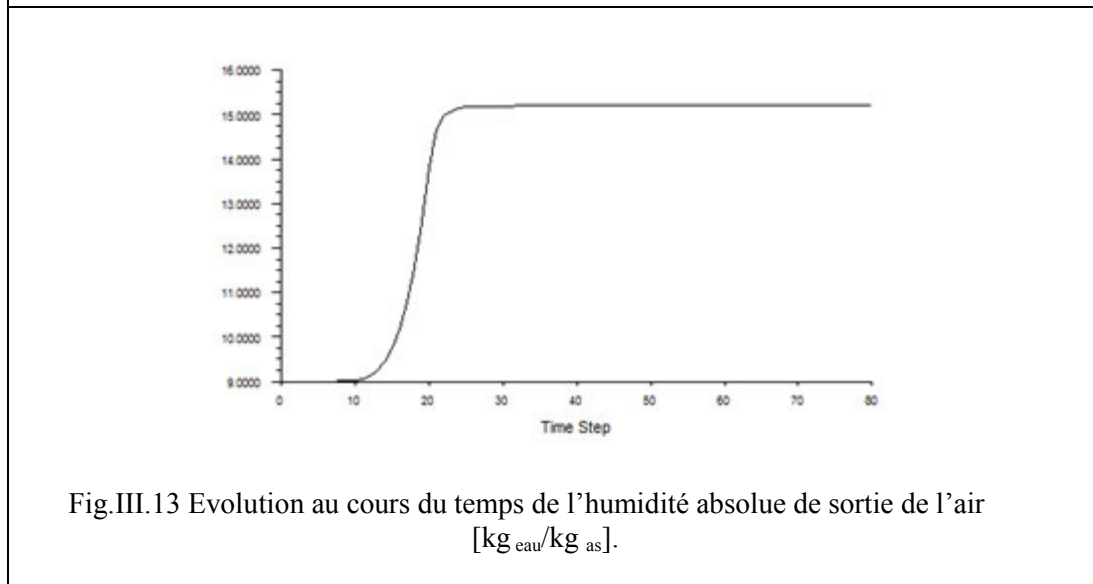
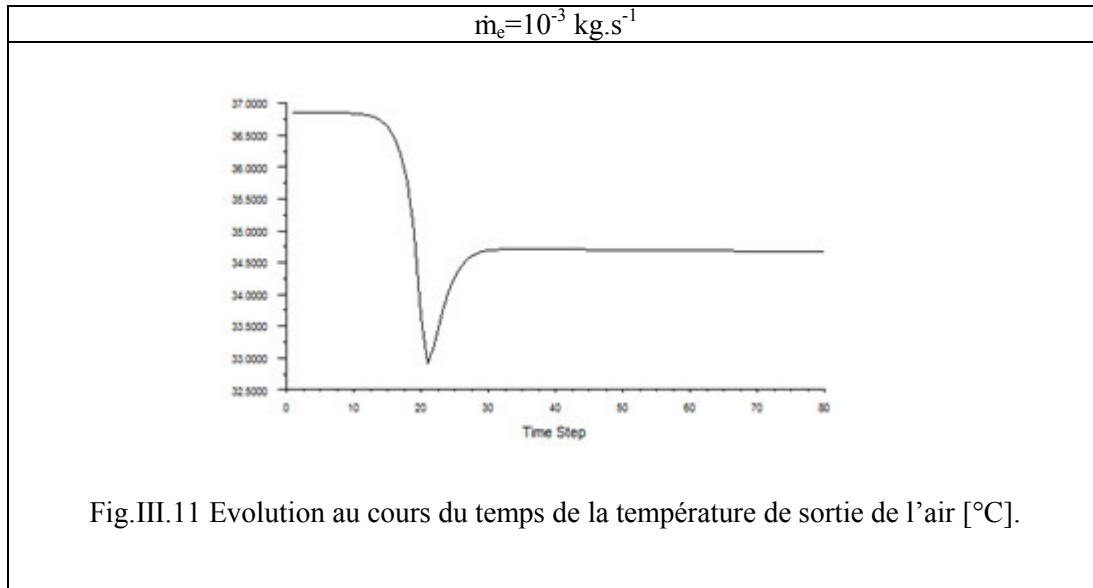


Fig.III.14 Evolution au cours du temps de l'hygrométrie de sortie de l'air [%].



Débit d'eau injecté : $\dot{m}=10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$

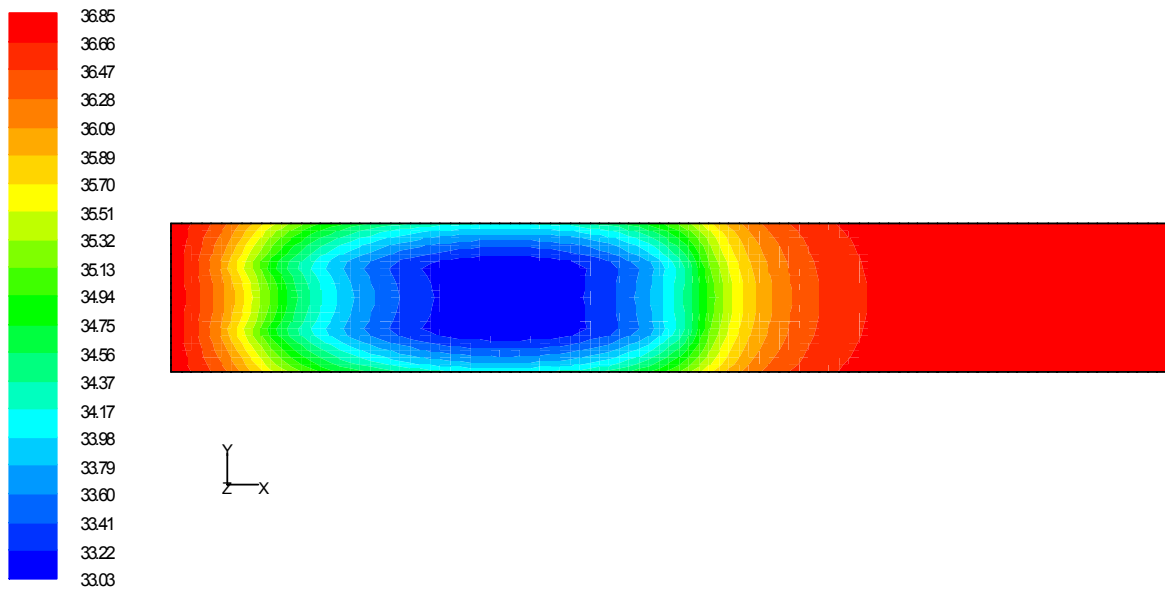


Fig.III.16 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à t=1s.

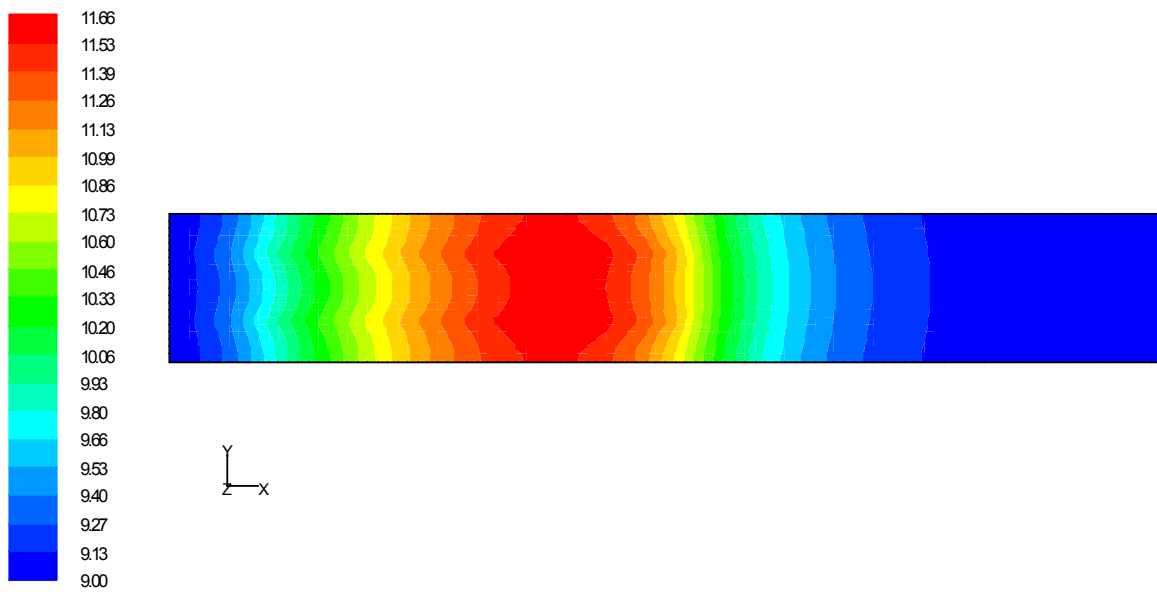


Fig.III.17 Distribution de l'humidité absolue [$\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$] le long de la conduite à t=1s.

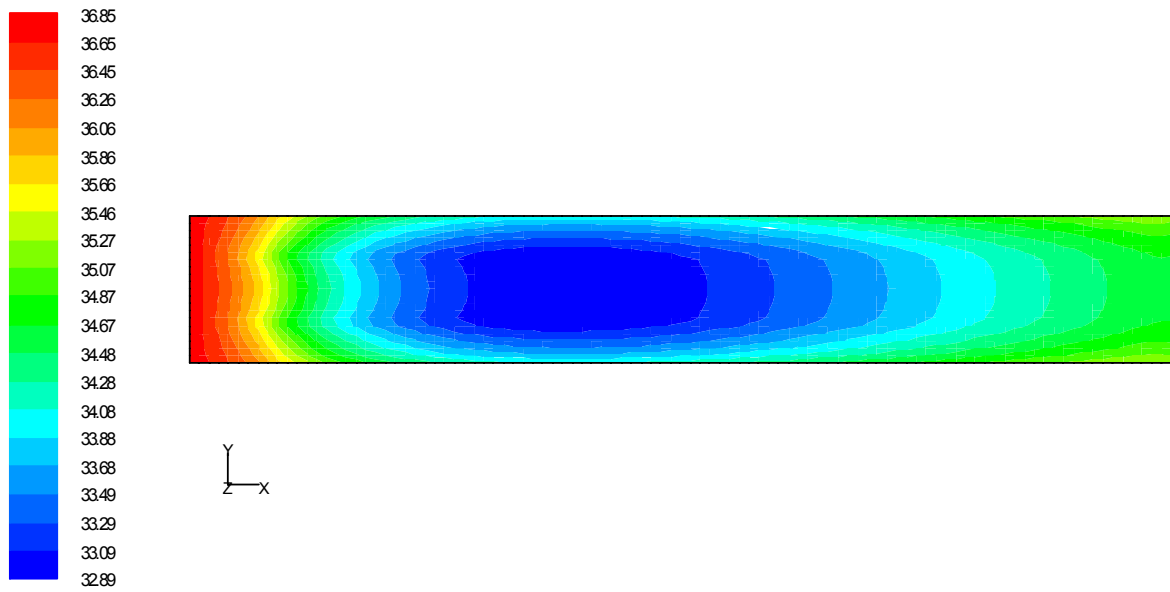


Fig.III.18 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à t=5s.

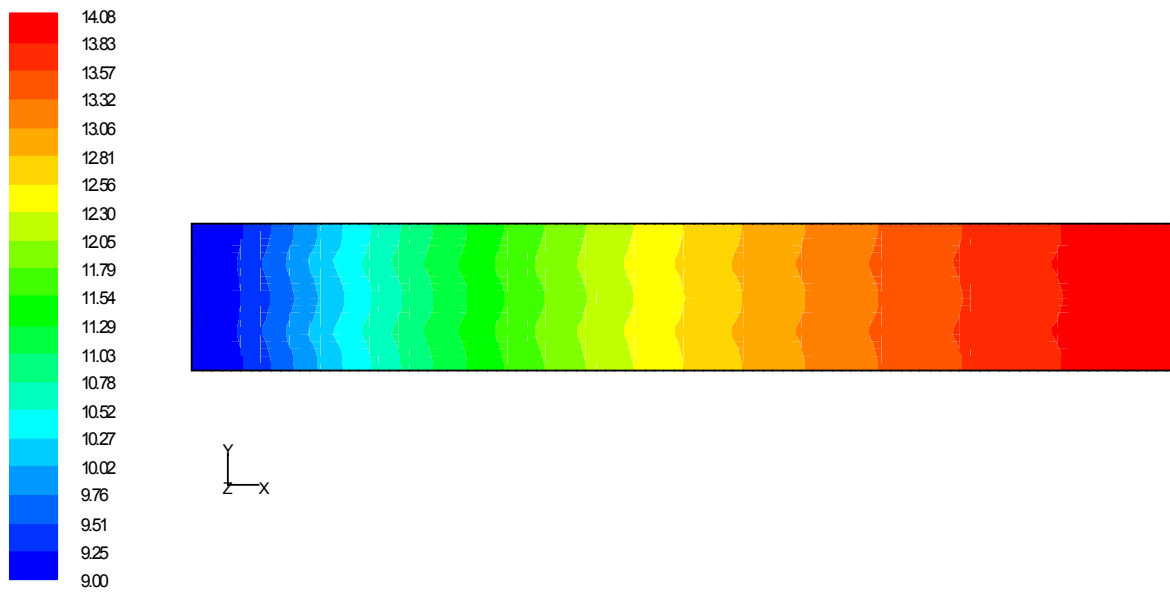


Fig.III.19 Distribution de l'humidité absolue [kg_{eau}/kg_{as}] le long de la conduite à t=5s.

Débit d'eau injecté: $\dot{m}=3.10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$

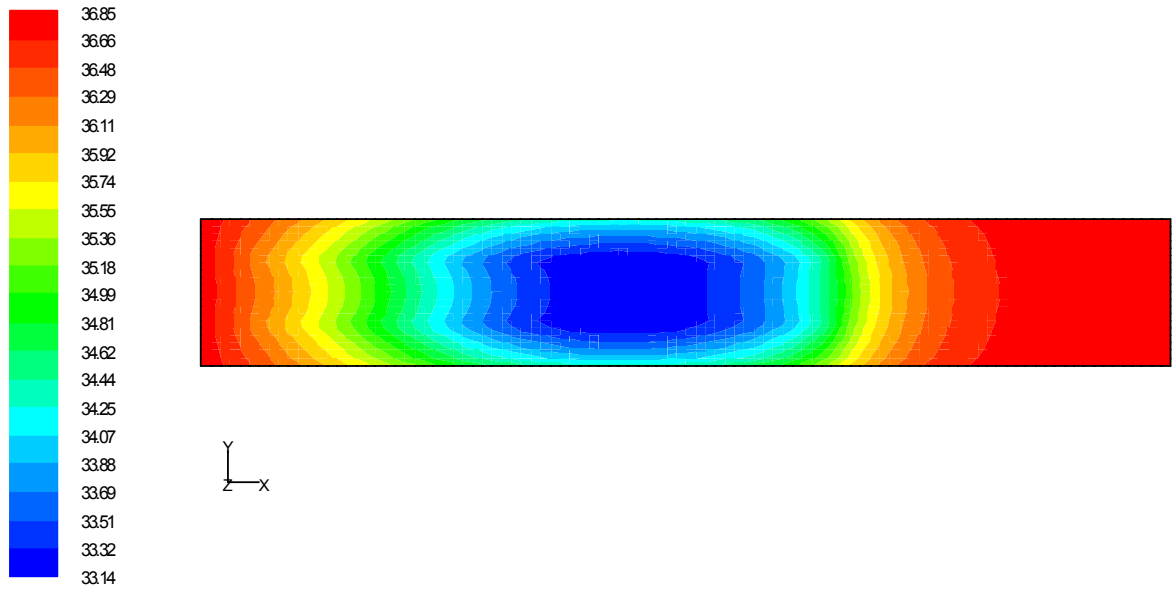


Fig.III.20 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à t=1s.

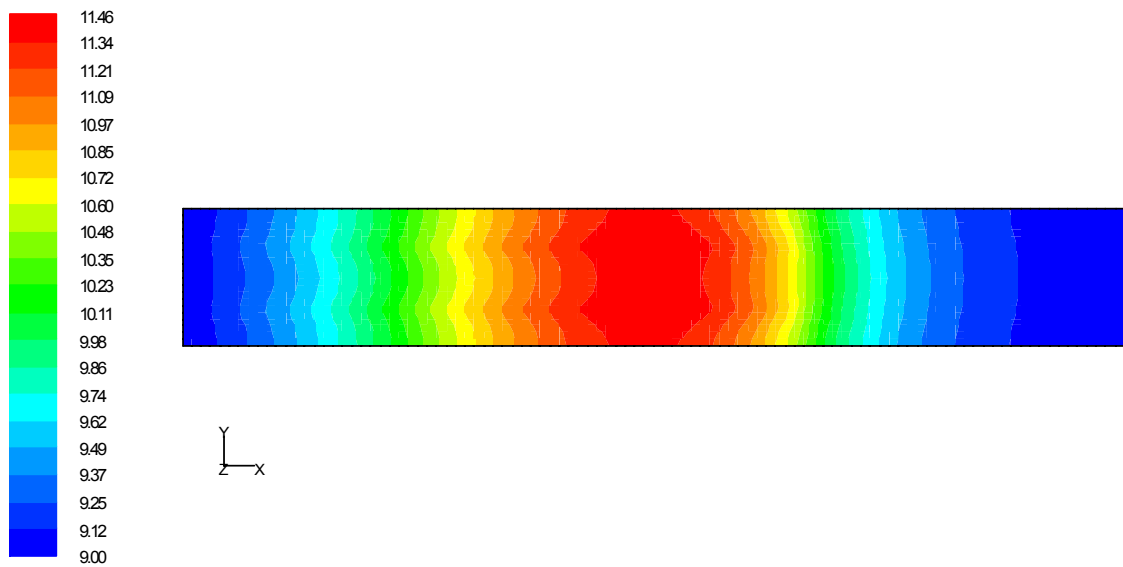


Fig.III.21 Distribution de l'humidité absolue [$\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$] le long de la conduite à t=1s.

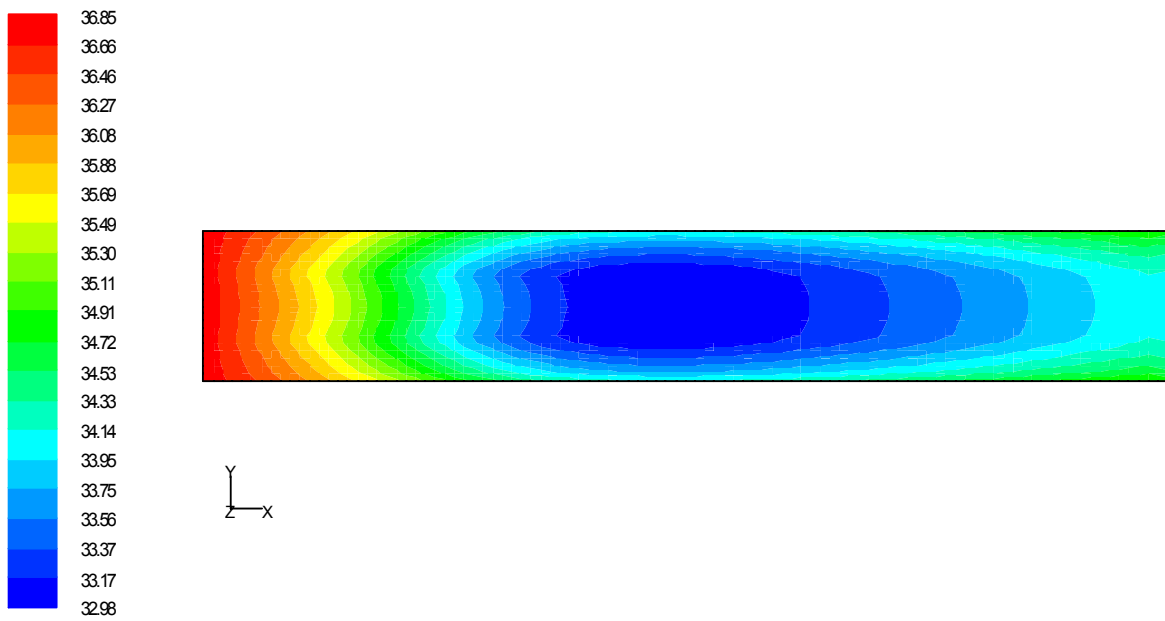


Fig.III.22 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à t=5s.

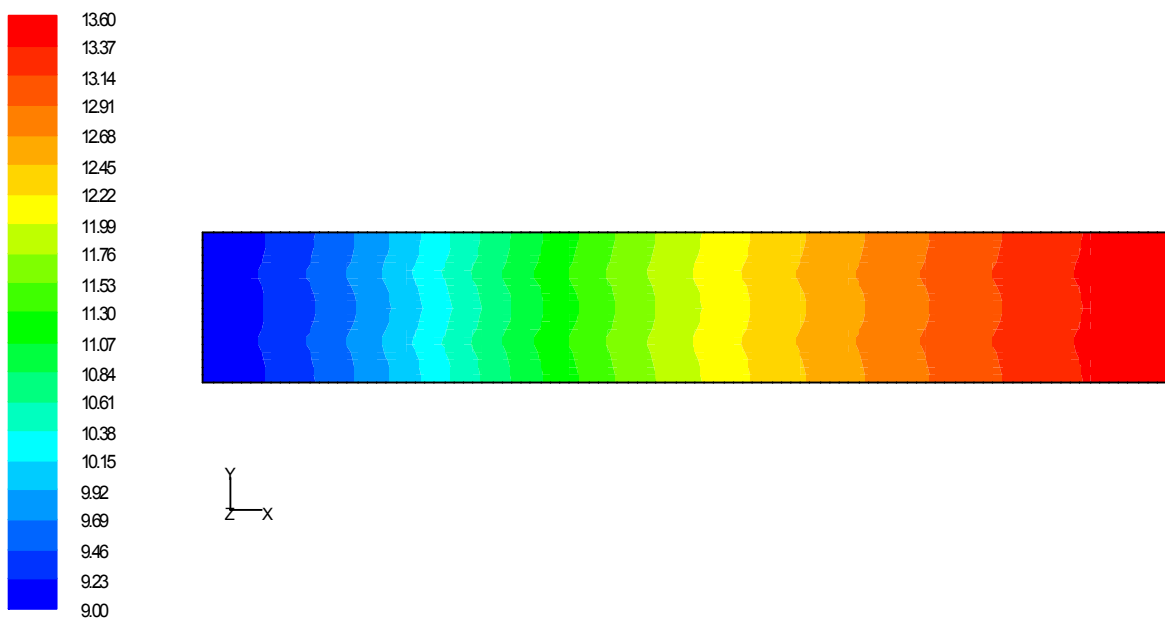


Fig.III.23 Distribution de l'humidité absolue [$\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$] le long de la conduite à t=5s.

Débit d'eau injecté: $\dot{m}=5.10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$

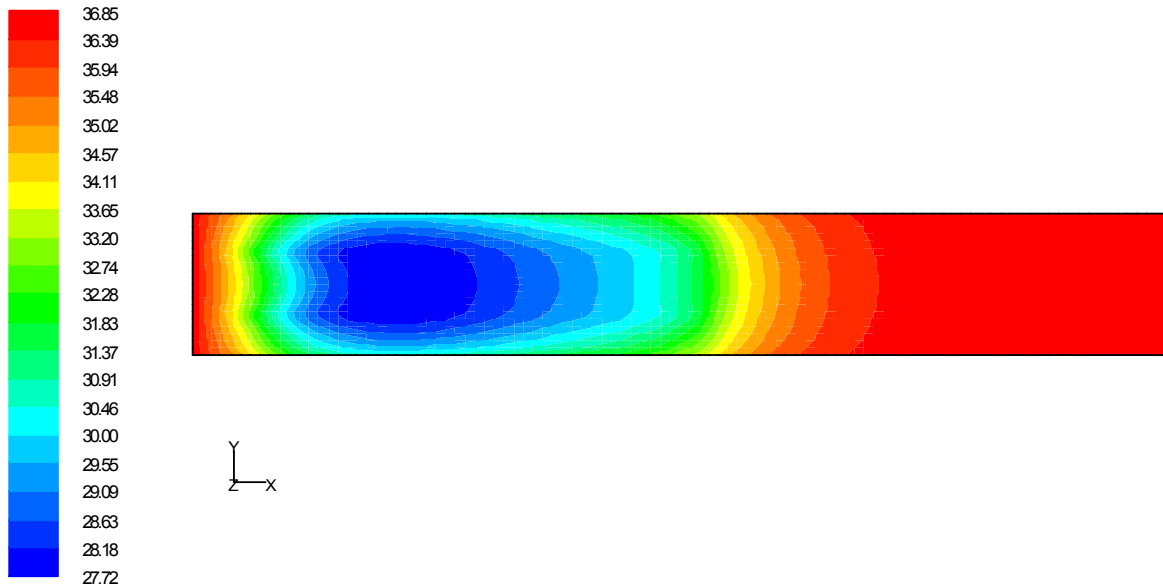


Fig.III.24 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à t1s.

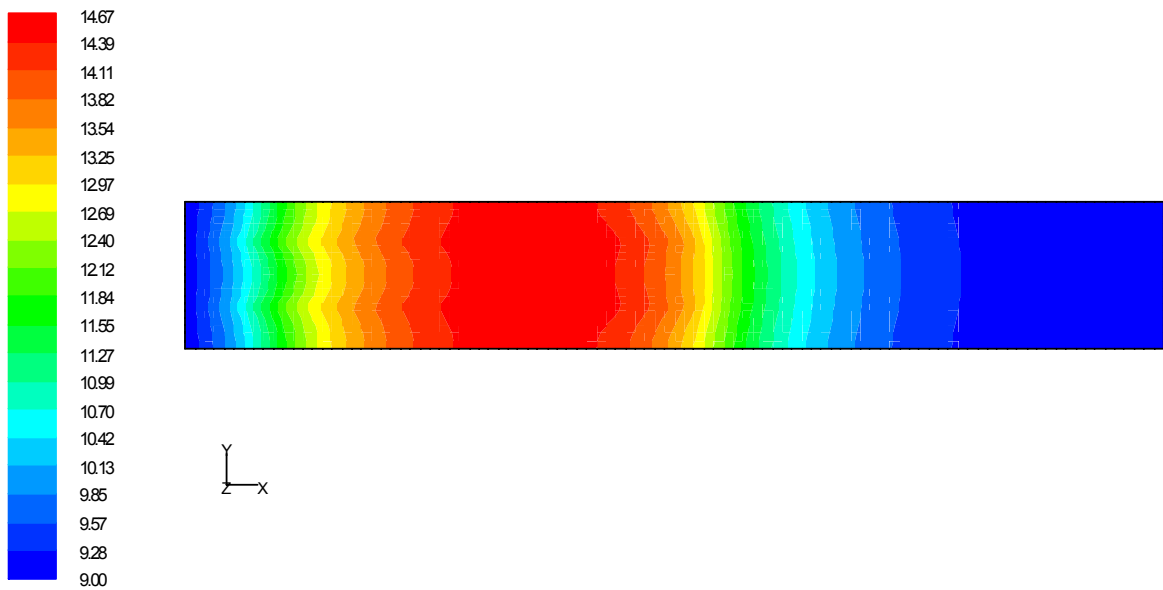


Fig.III.25 Distribution de l'humidité absolue [kg_{eau}/kg_{as}] le long de la conduite à t=1s.

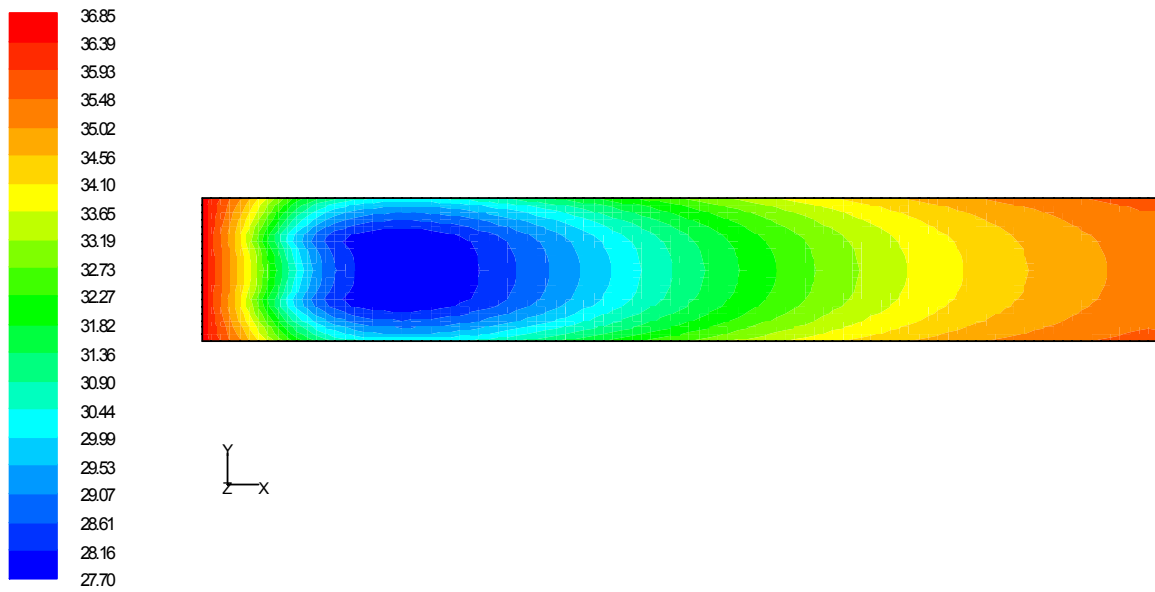


Fig.III.26 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à t=5s.

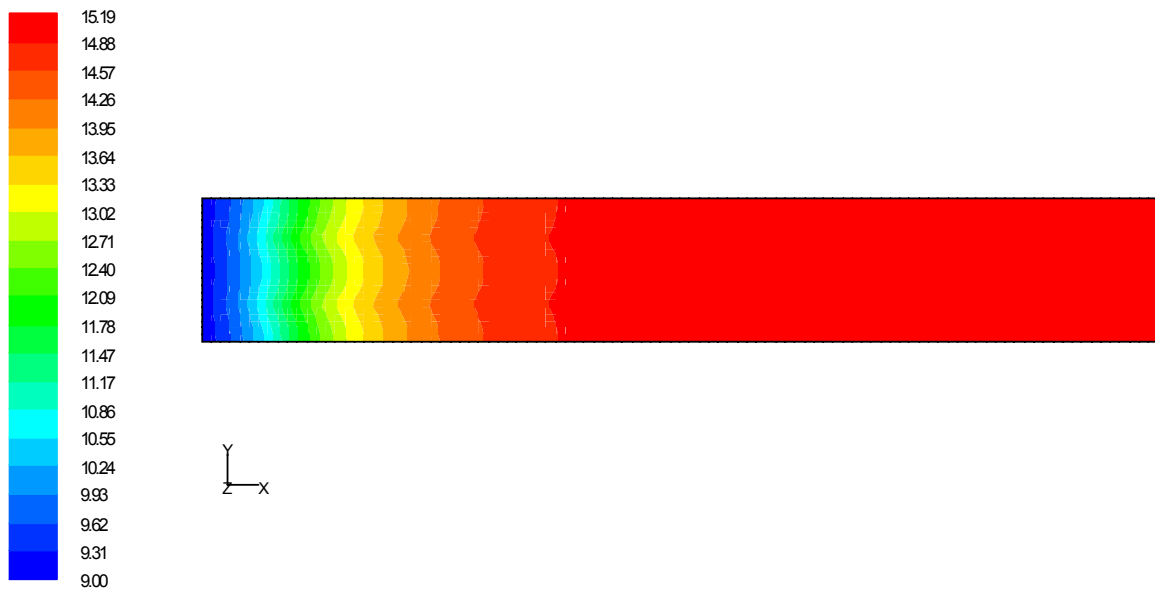


Fig.III.27 Distribution de l'humidité absolue [$\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$] le long de la conduite à t=5s.

Débit d'eau injecté: $\dot{m}_e=10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$

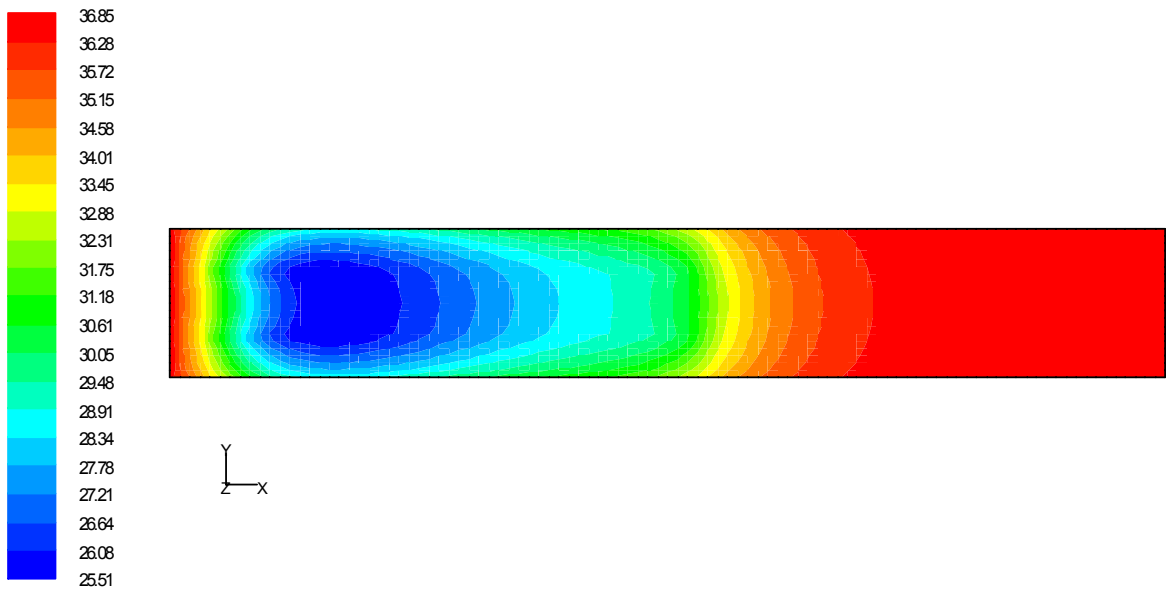


Fig.III.28 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à $t=1\text{s}$.

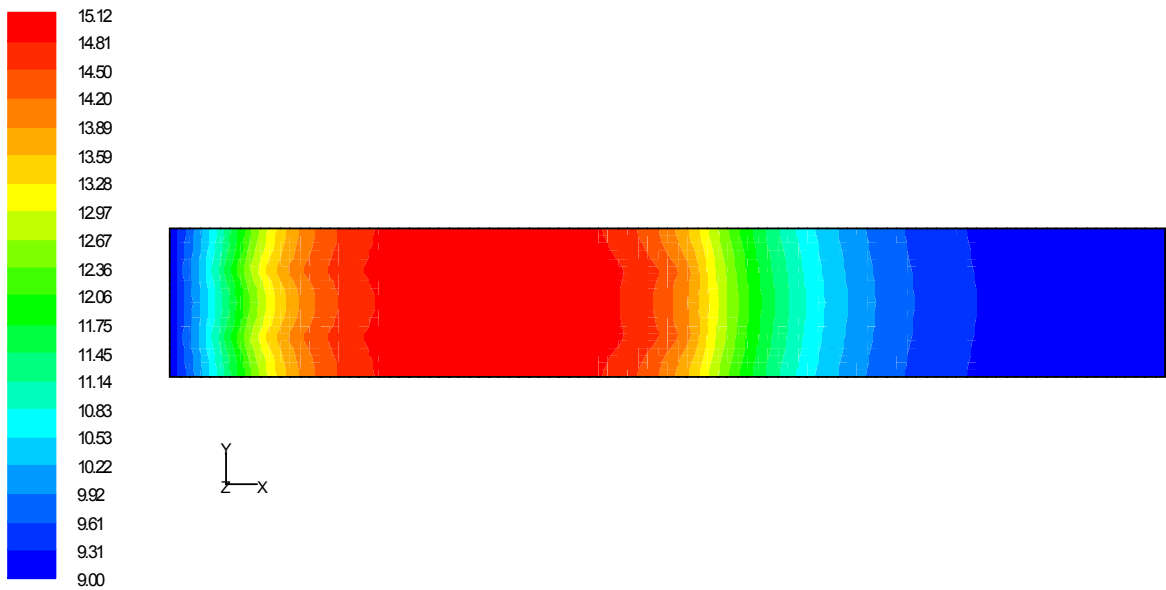


Fig.III.29 Distribution de l'humidité absolue [$\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$] le long de la conduite à $t=5\text{s}$.

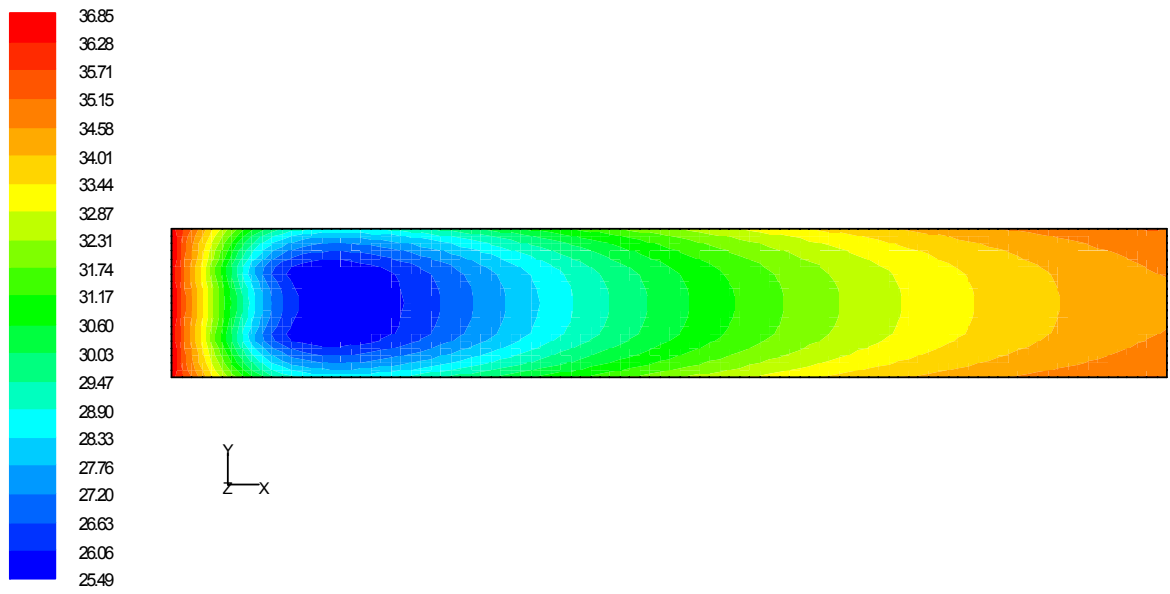


Fig.III.30 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à t=5s.



Fig.III.31 Distribution de l'humidité absolue [kg_{eau}/kg_{as}] le long de la conduite à t= 5s.

Il apparaît que l'augmentation du débit d'injection favorise le refroidissement de l'air.

En effet, comme le montre les figures (III.4), (III.5), (III.10) et (III.11) la température de l'air à la sortie diminue de 34,77 °C à 32,90 °C quand le débit \dot{m}_e évolue de 10^{-4} à 10^{-3} kg/s.

Par ailleurs, cette diminution devient moins sensible à partir de $\dot{m}_e = 10^{-3}$ kg/s.

Ceci s'explique par le nombre de particules important qui sont injectées au fur et à mesure que le débit d'eau augmente qui sature l'air et par conséquent inhibe la vaporisation de l'eau.

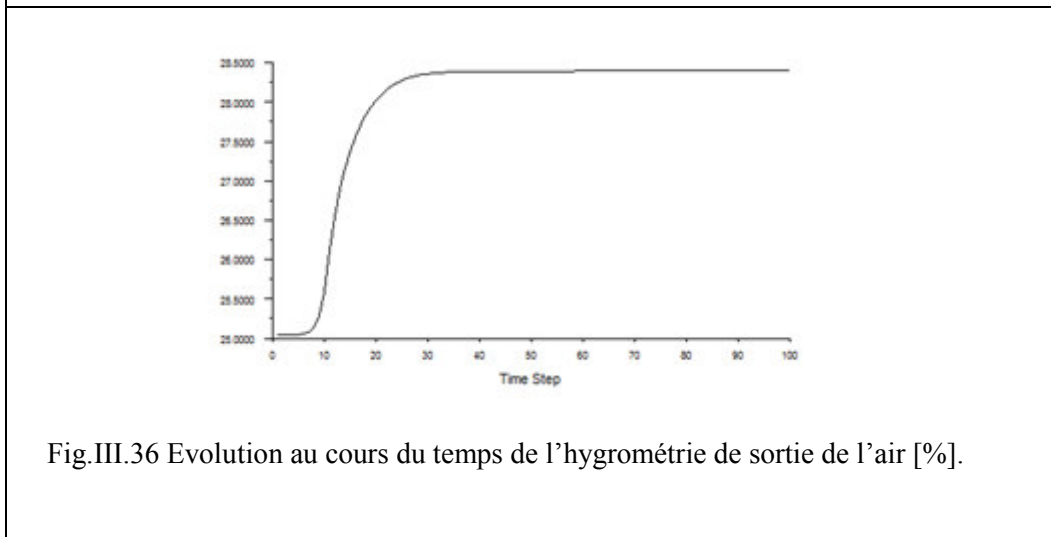
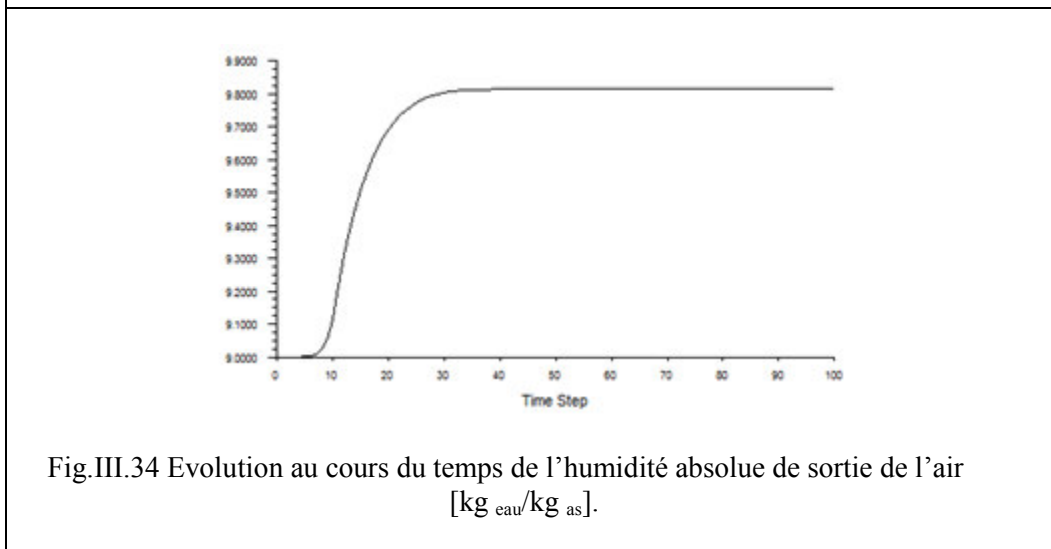
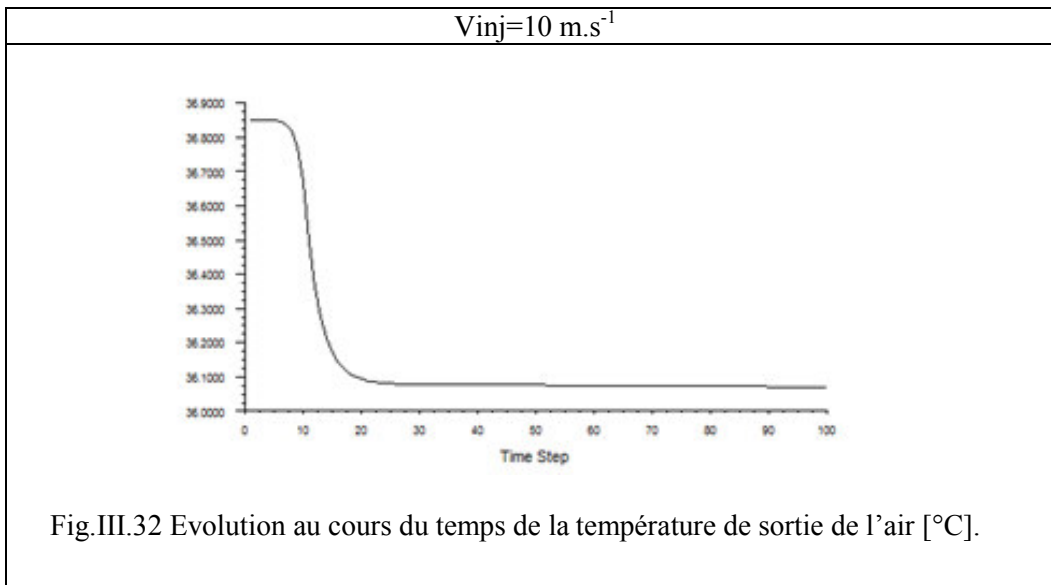
Ce qui se traduit par l'augmentation de la fraction massique et de l'hygrométrie de la vapeur d'eau dans l'air, comme le montre les figures (III.6), (III.7), (III.12), (III.13) ainsi les figures (III.8), (III.9), (III.14), (III.15).

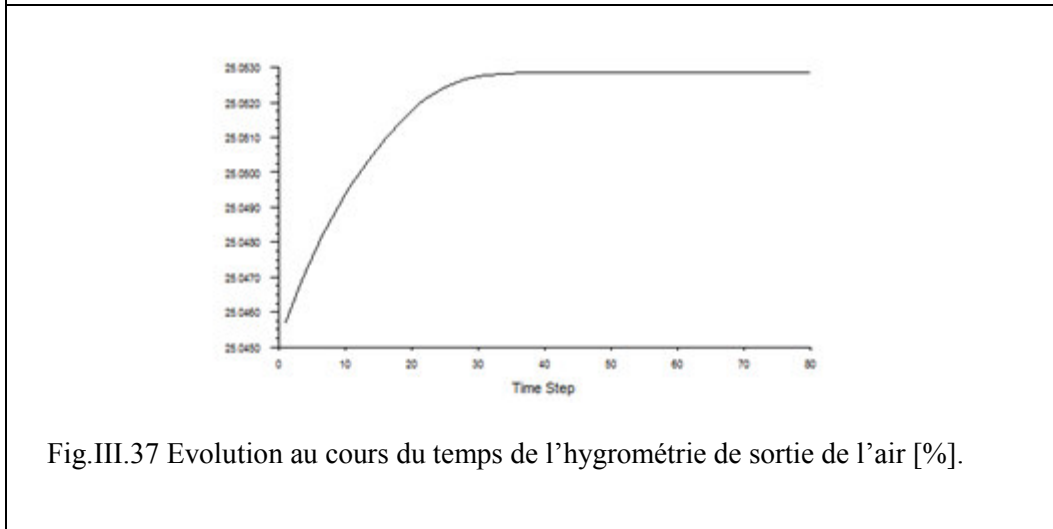
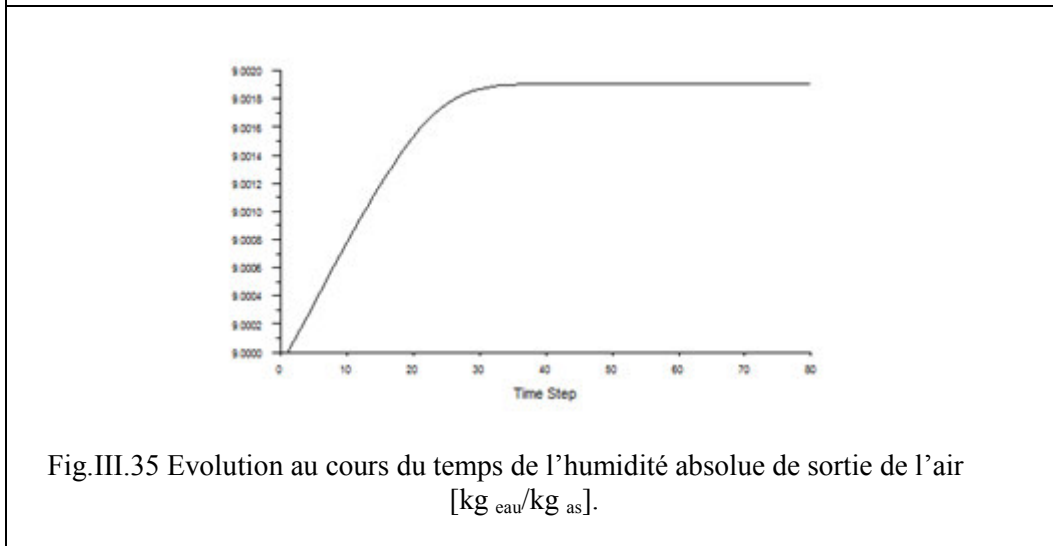
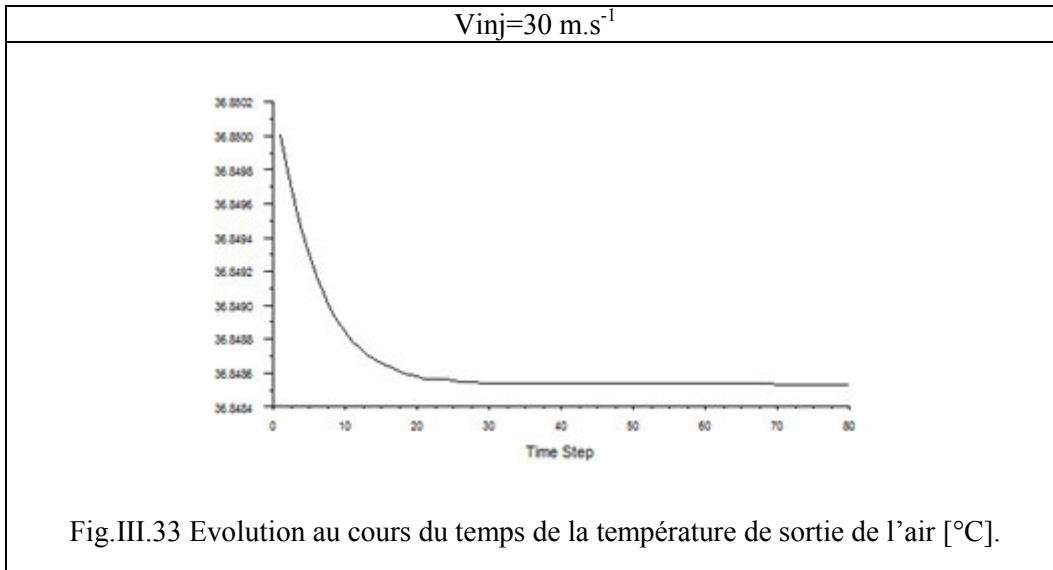
6.2. Influence de la vitesse d'injection :

On fixe :

- $\dot{m} = 10^{-3}$ kg/s : débit d'eau.
- $d = 3,57 \cdot 10^{-4}$ m : diamètre de la gouttelette.

Et on fait varier la vitesse d'injection, on considère deux vitesses 10 et 30 m/s





La vitesse des gouttelettes injectées: $V_{inj}=10 \text{ m.s}^{-1}$

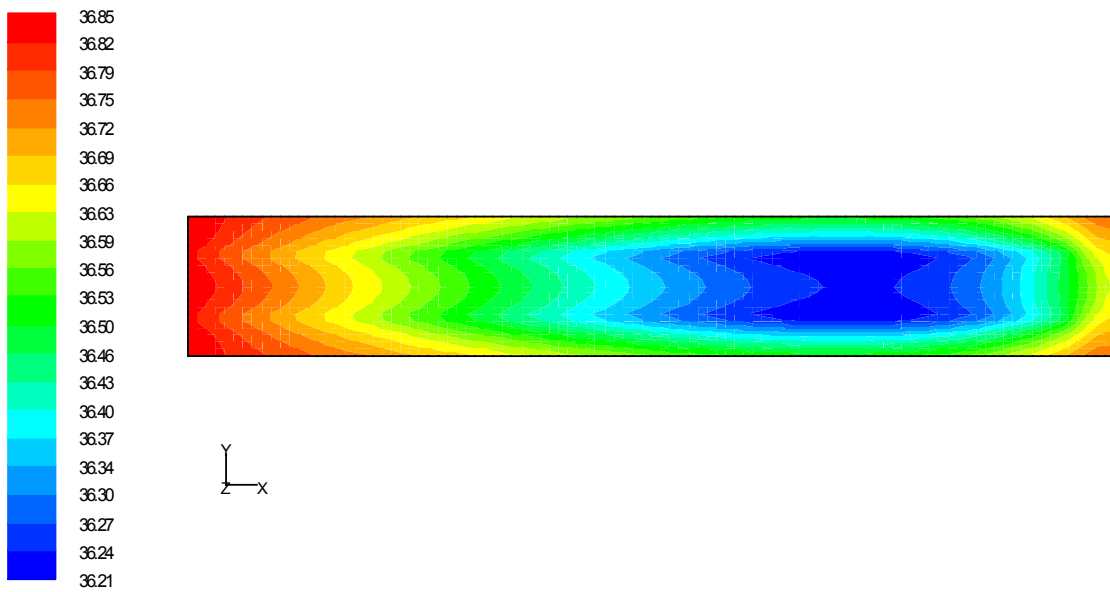


Fig.III.38 Distribution de la température [$^{\circ}\text{C}$] le long de la conduite à $t=1\text{s}$.

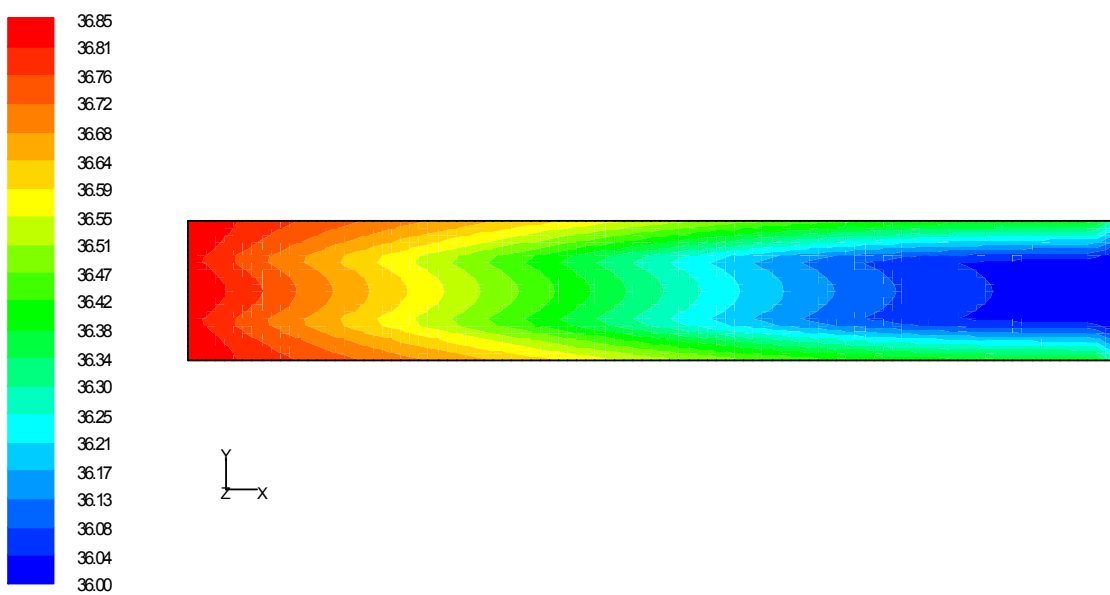


Fig.III.39 Distribution de la température [$^{\circ}\text{C}$] le long de la conduite à $t=6\text{s}$.

La vitesse des gouttelettes injectées: $V_{inj}=30 \text{ m.s}^{-1}$

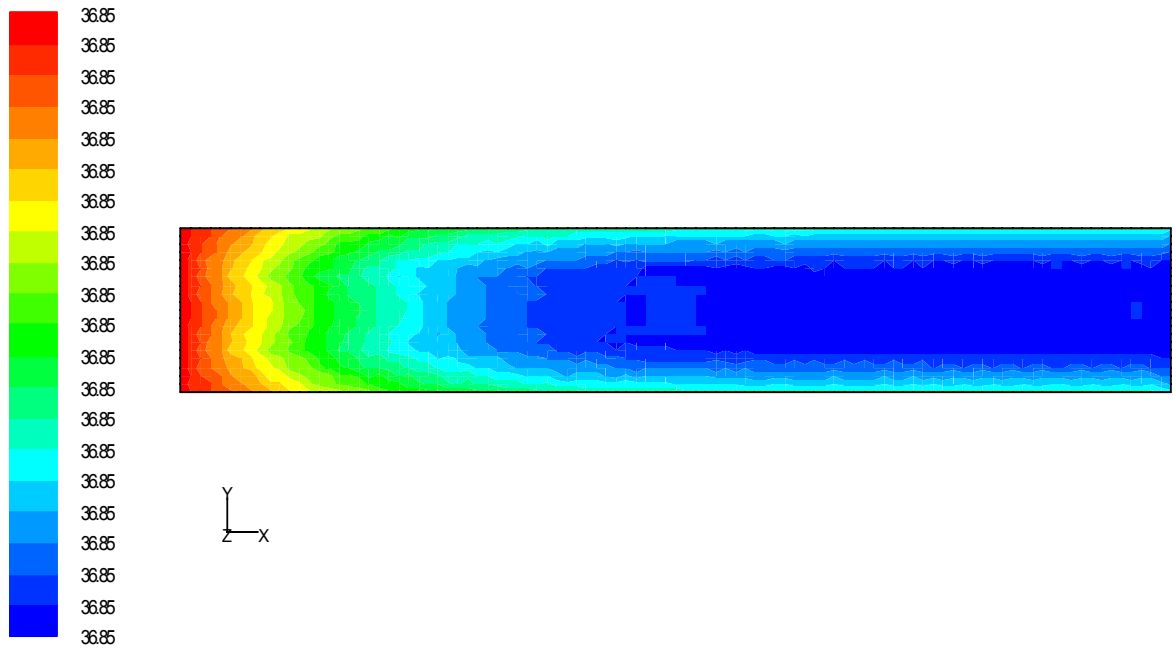


Fig.III.40 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à $t=1\text{s}$.

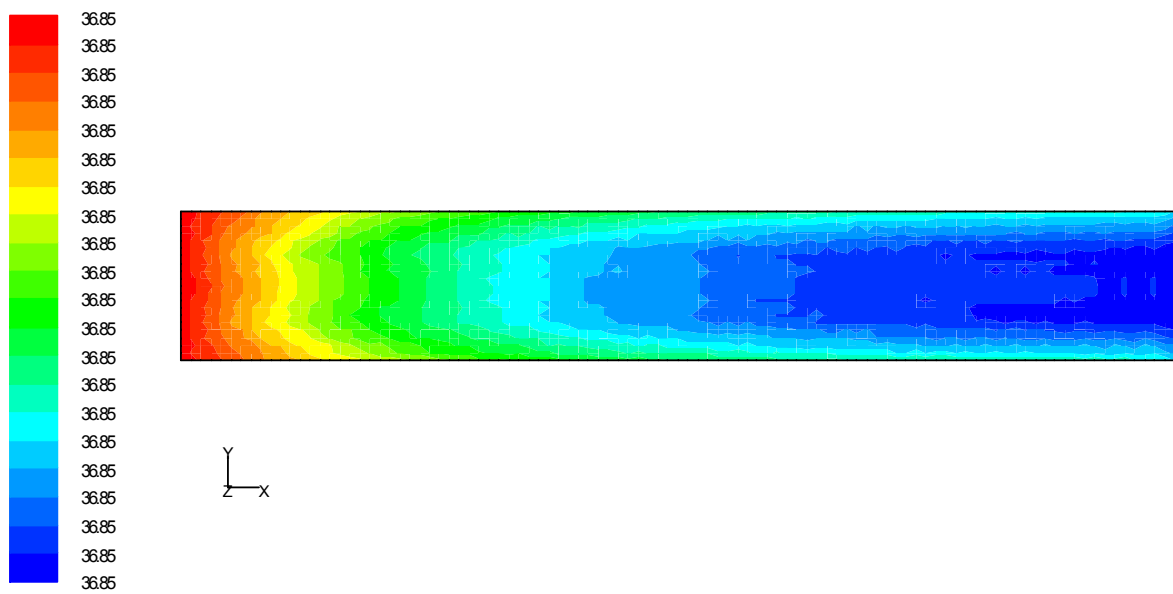


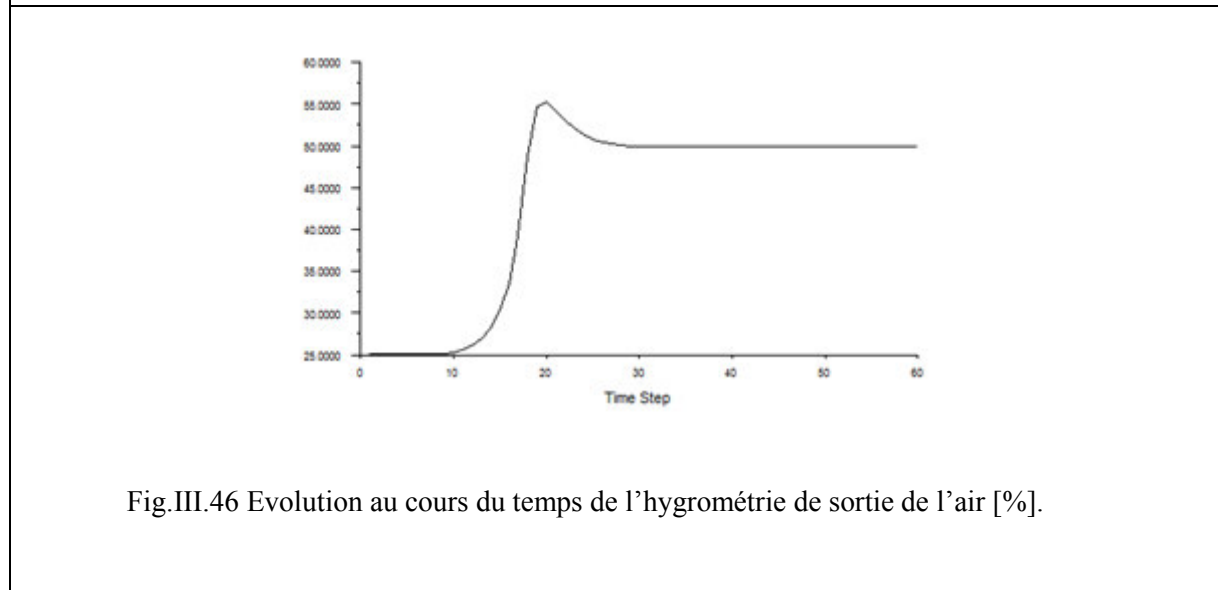
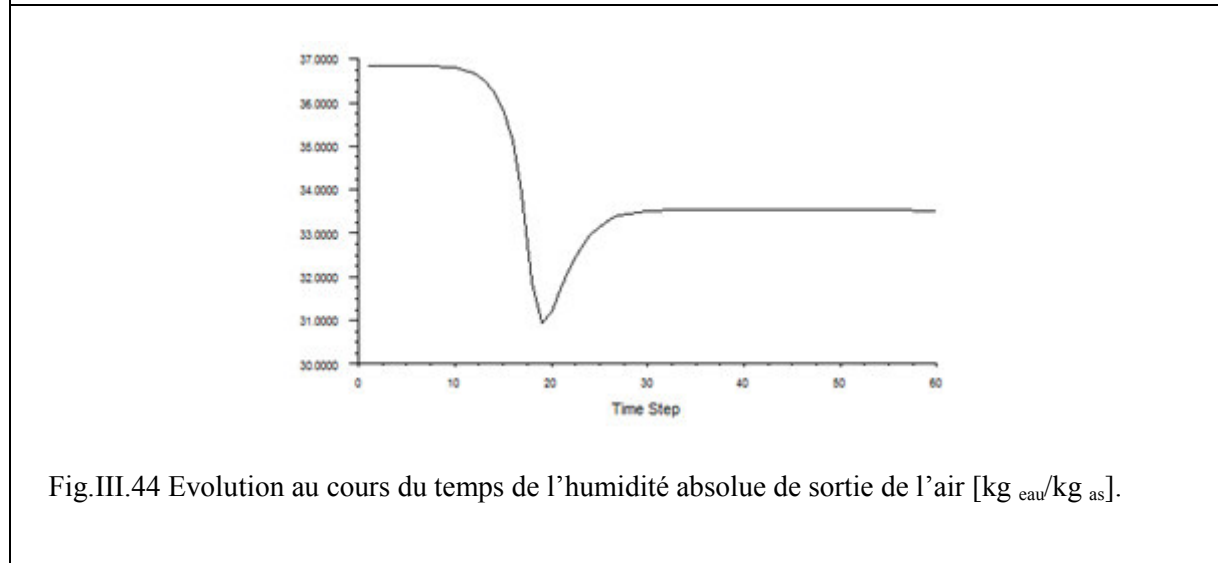
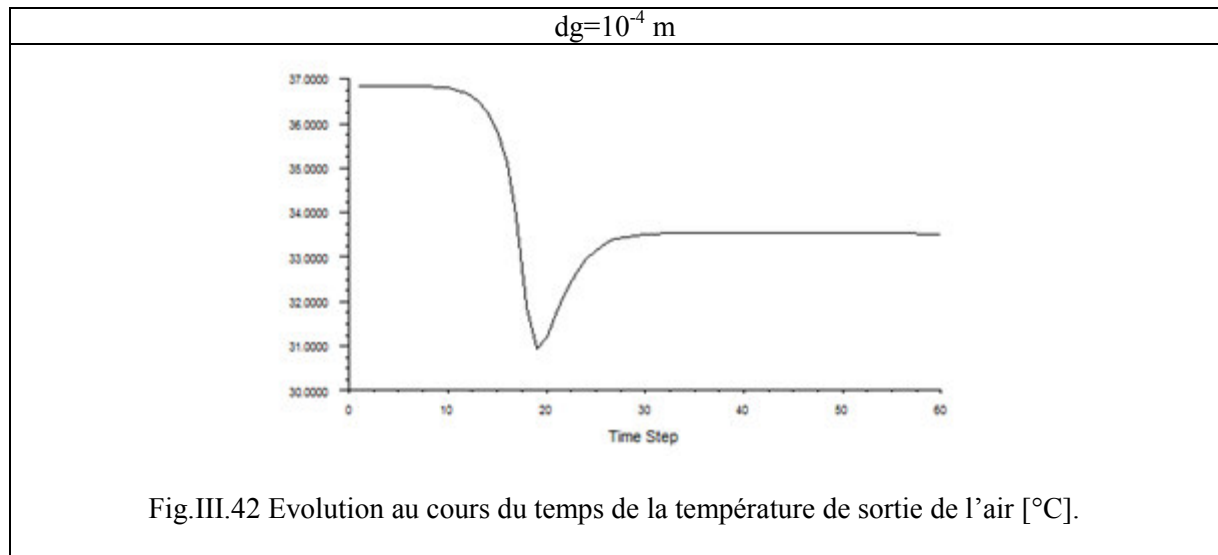
Fig.III.41 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à $t=6\text{s}$.

Il apparaît à travers les figures de (III.32) jusqu'à (III.41) que l'augmentation de la vitesse d'injection influe significativement sur la température de sortie de l'air. En effet, tel que exprimé par la relation (III-18), l'augmentation de cette vitesse impose des diamètres des gouttelettes de plus en plus faibles, d'où leurs vaporisations quasi instantanées. Par ailleurs, en augmentant cette vitesse les particules refroidies sont expulsées vers la sortie avant même qu'elles aient le temps de diffuser leur effet vers les parties chaudes de la conduite.

6.3. L'influence de diamètre de la gouttelette d'eau :

On considère constants le débit d'eau ($\dot{m}_e=10^{-3}\text{kg/s}$) et la vitesse d'injection ($v=10\text{ m/s}$).

On fait varier le diamètre des gouttelettes injectées : 10^{-4} , $1,78.10^{-4}$, $2,52.10^{-4}$, et $3,57.10^{-4}\text{ m}$.



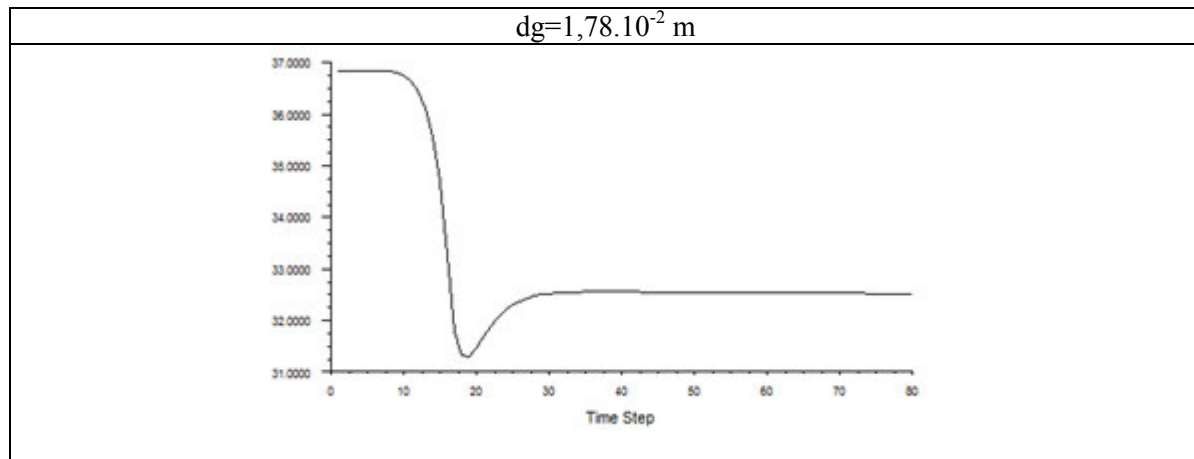


Fig.III.43 Evolution au cours du temps de la température de sortie de l'air [°C].

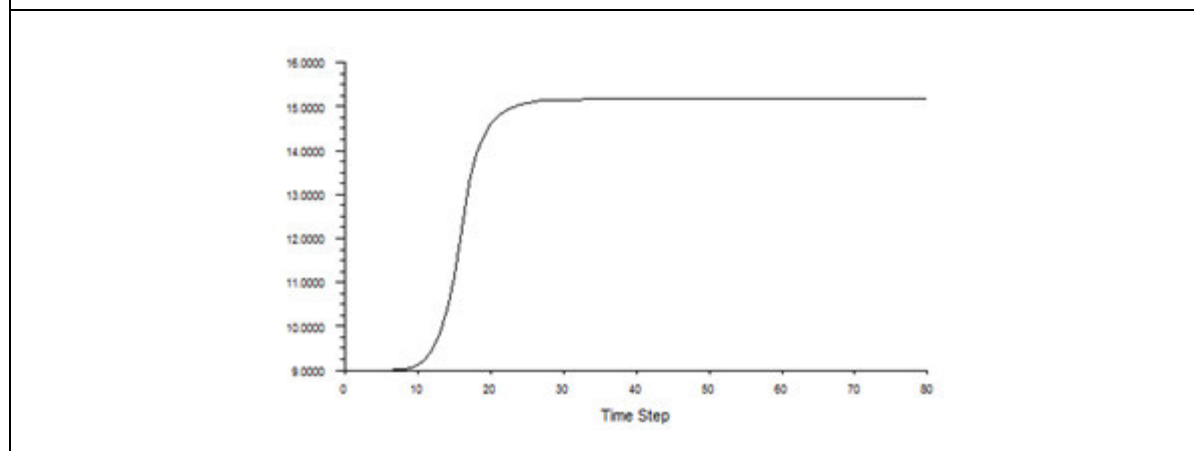


Fig.III.45 Evolution au cours du temps de l'humidité absolue de sortie de l'air [kg_eau/kg_as].

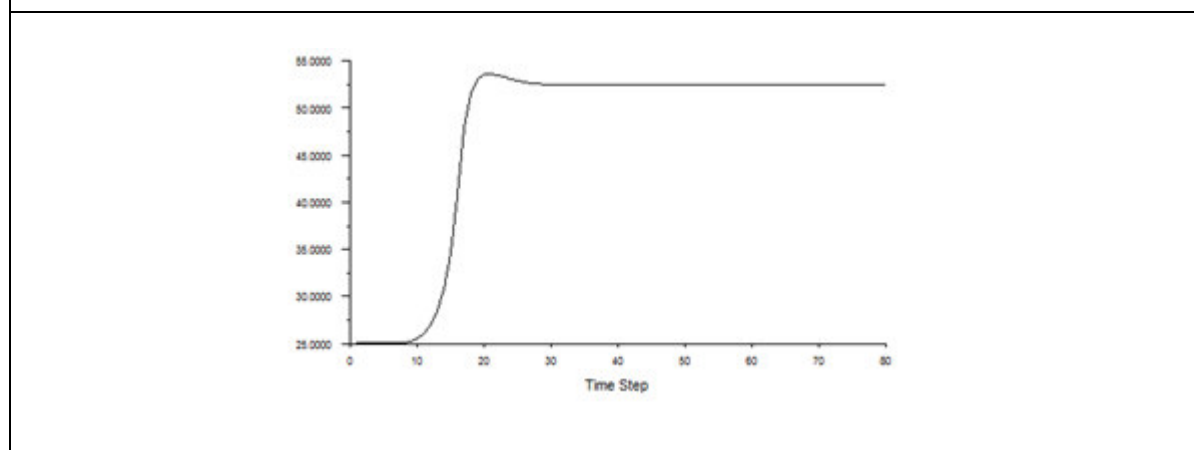
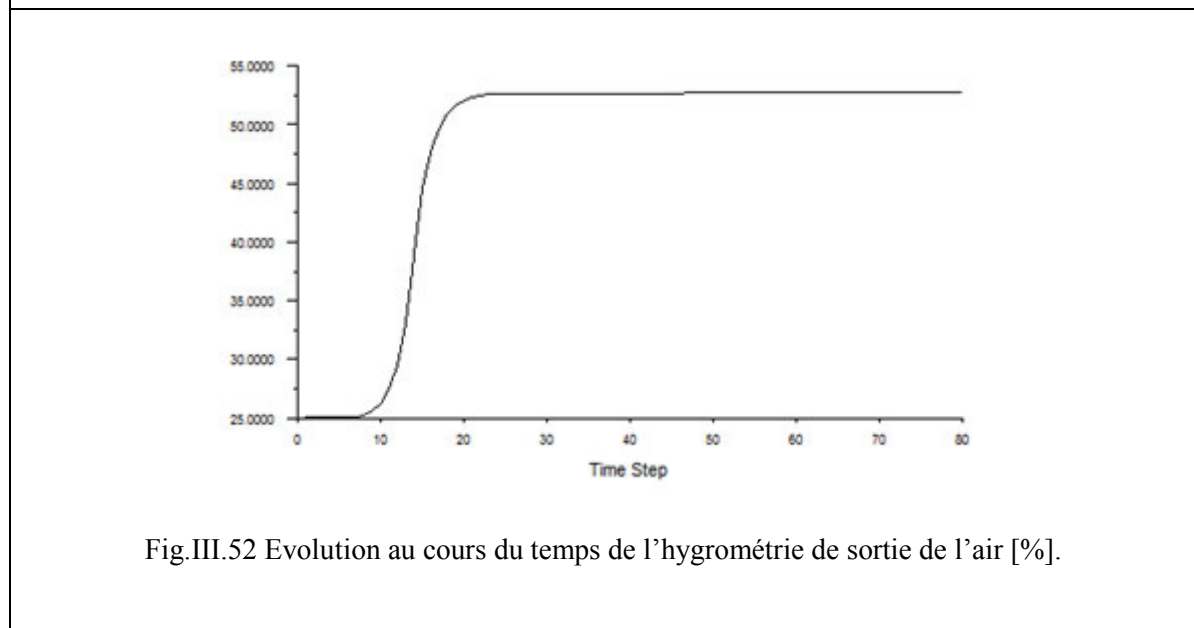
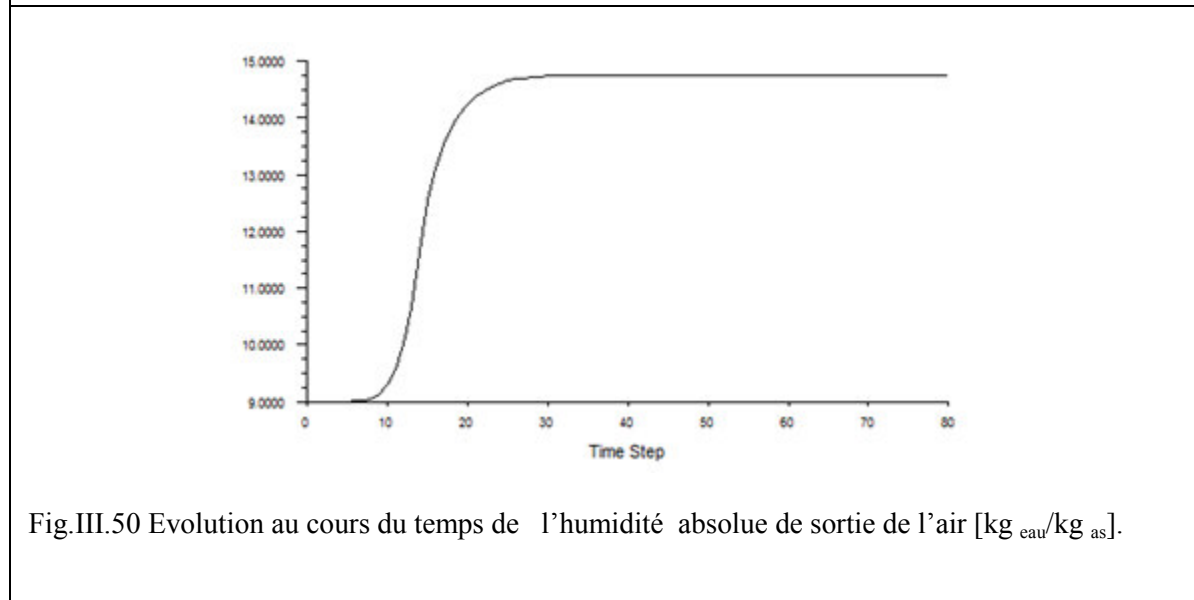
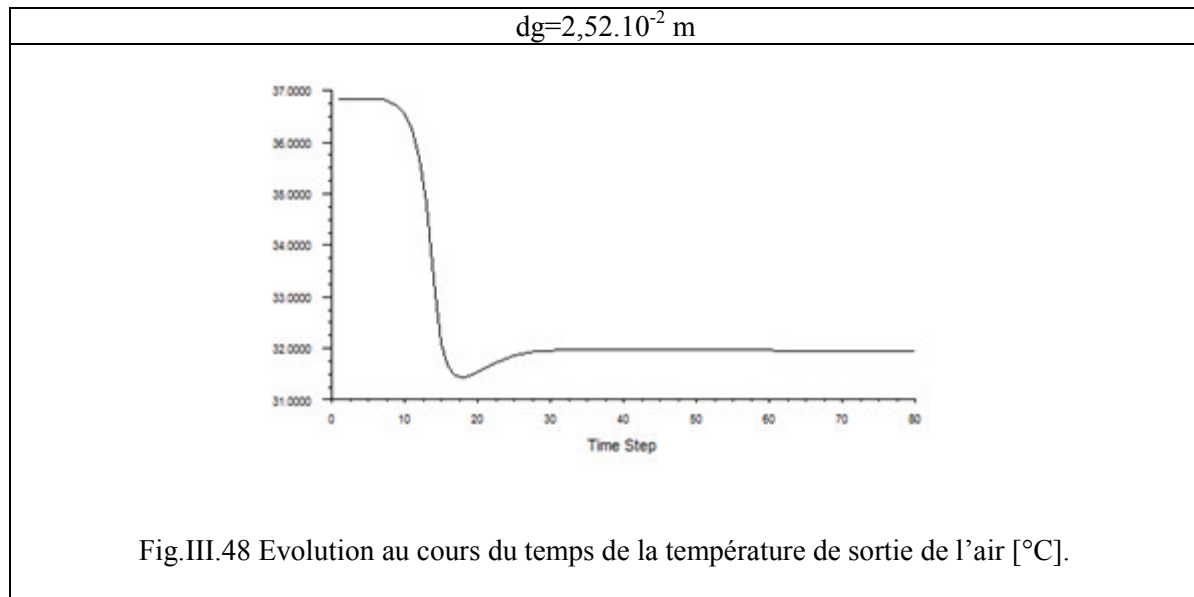


Fig.III.47 Evolution au cours du temps de l'hygrométrie de sortie de l'air [%].



$$d_g = 3,57 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

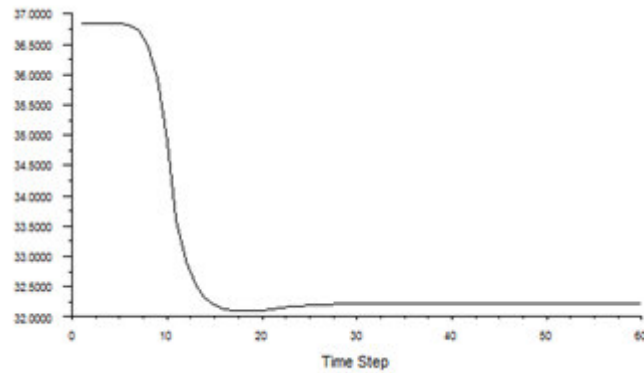


Fig.III.49 Evolution au cours du temps de la température de sortie de l'air [°C].

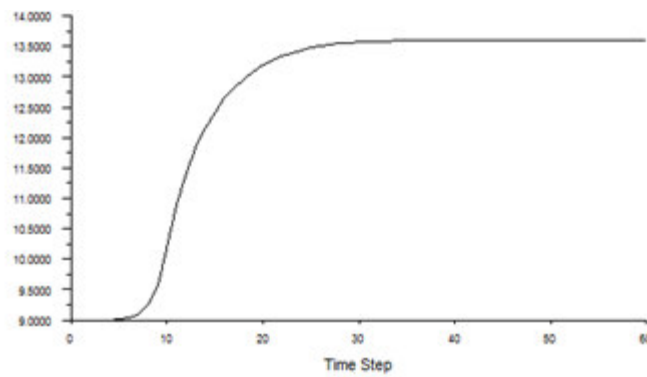


Fig.III.51 Evolution au cours du temps de l'humidité absolue de sortie de l'air [kg_eau/kg_as].

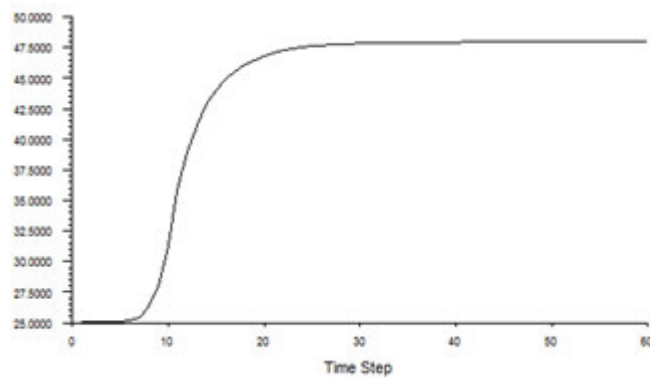


Fig.III.53 Evolution au cours du temps de l'hygrométrie de sortie de l'air [%].

Diamètre de la gouttelette injectée : $d_g=0.1\text{mm}$

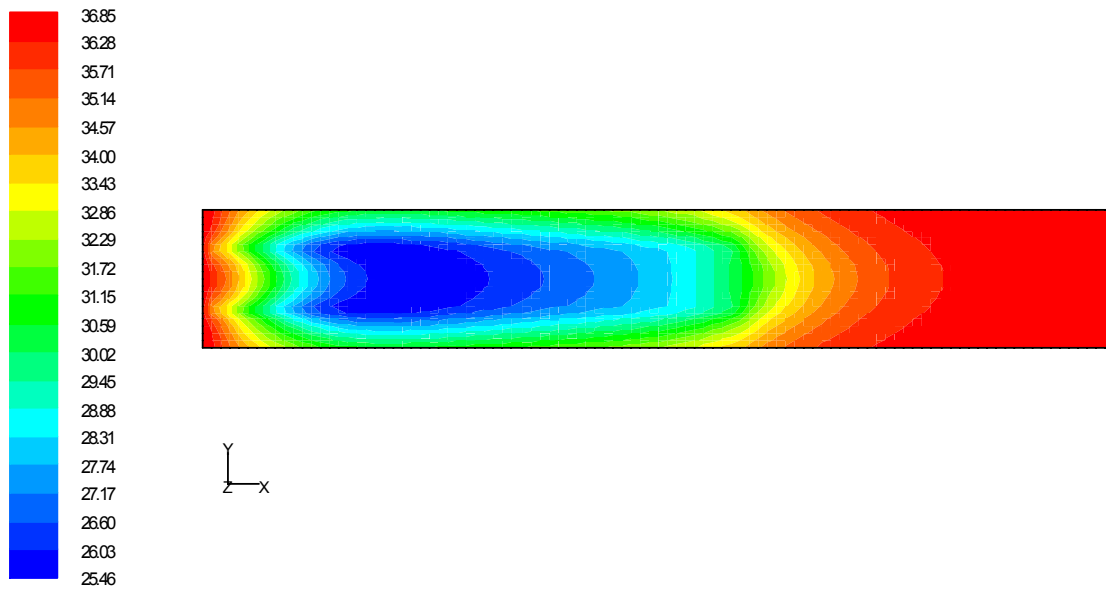


Fig.III.54 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à $t=1\text{s}$.

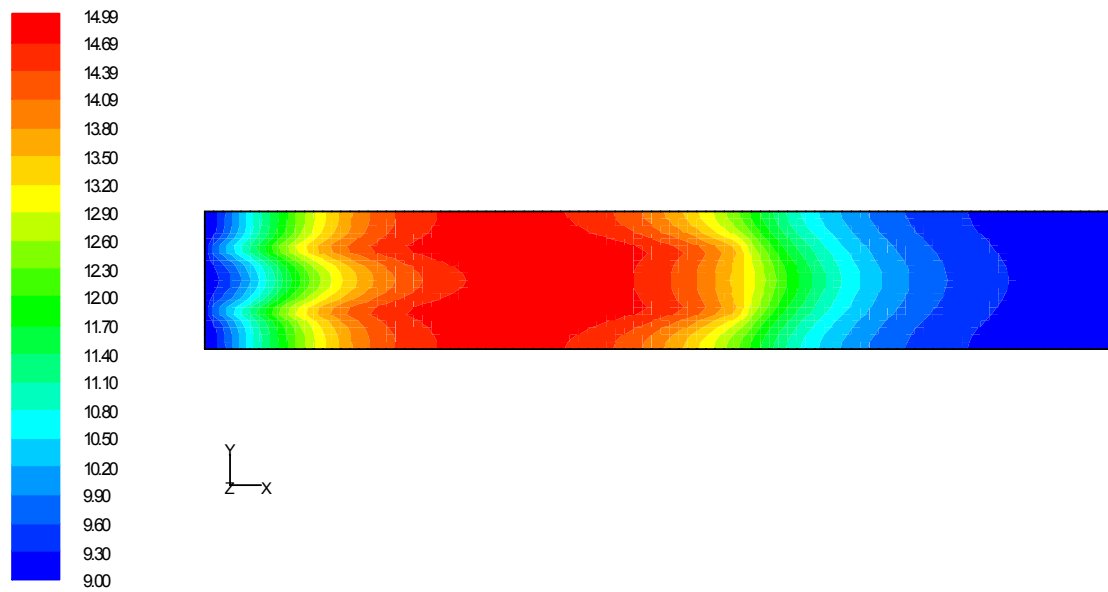


Fig.III.55 Distribution de l'humidité absolue [$\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$] le long de la conduite à $t=1\text{s}$.

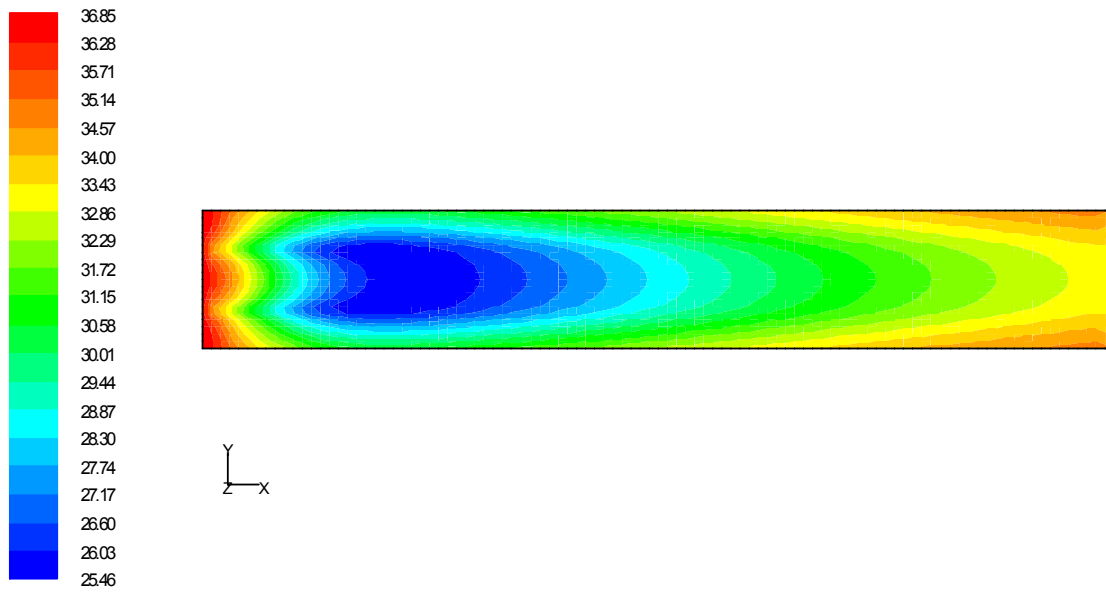


Fig.III.56 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à t=6s.

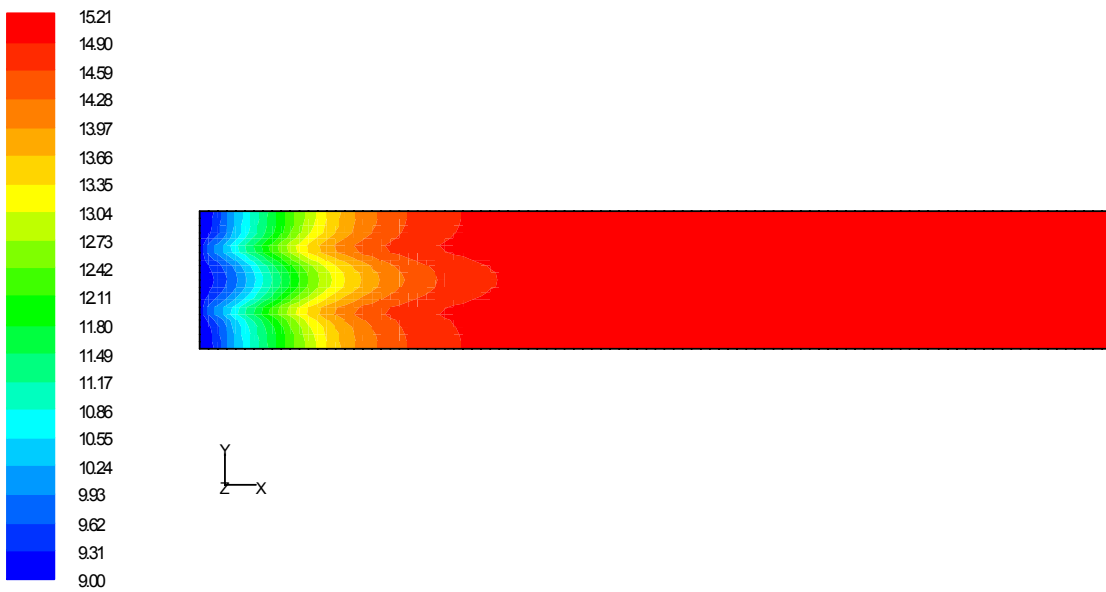


Fig.III.57 Distribution de l'humidité absolue [$\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$] le long de la conduite à t=6s.

Diamètre de la gouttelette injectée : $d_g=0.178\text{mm}$

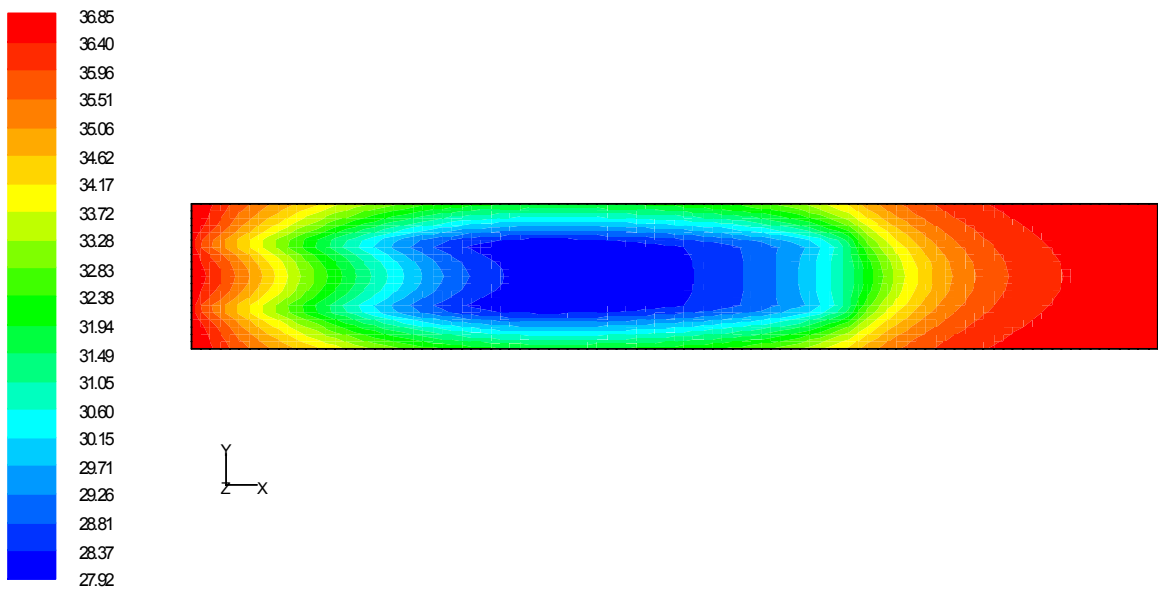


Fig.III.58 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à $t=1\text{s}$.

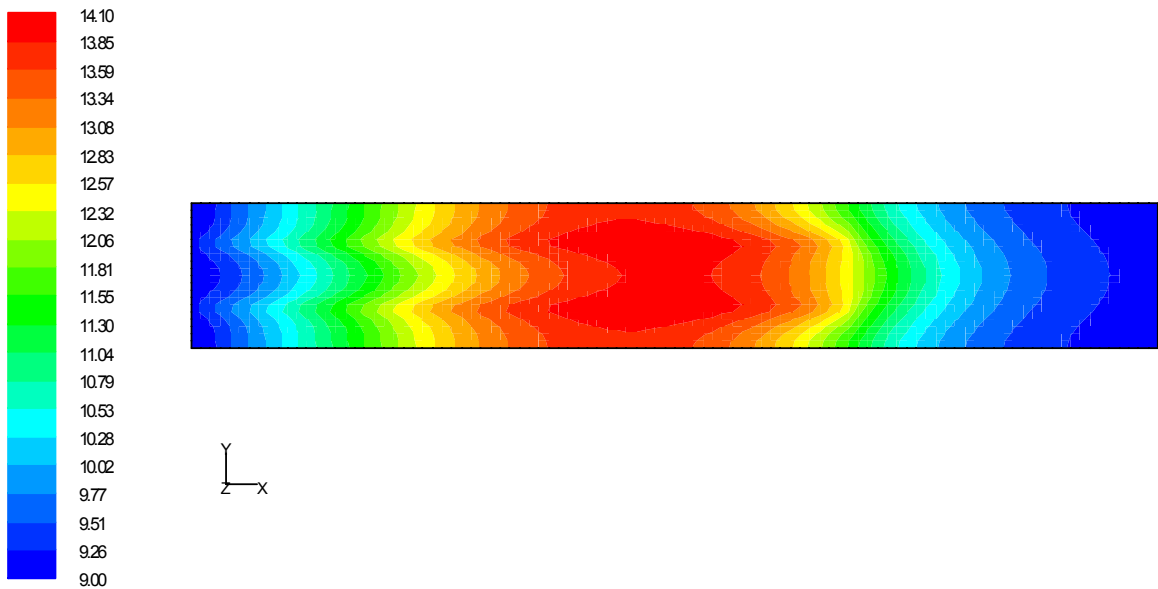


Fig.III.59 Distribution de l'humidité absolue [$\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$] le long de la conduite à $t=1\text{s}$.

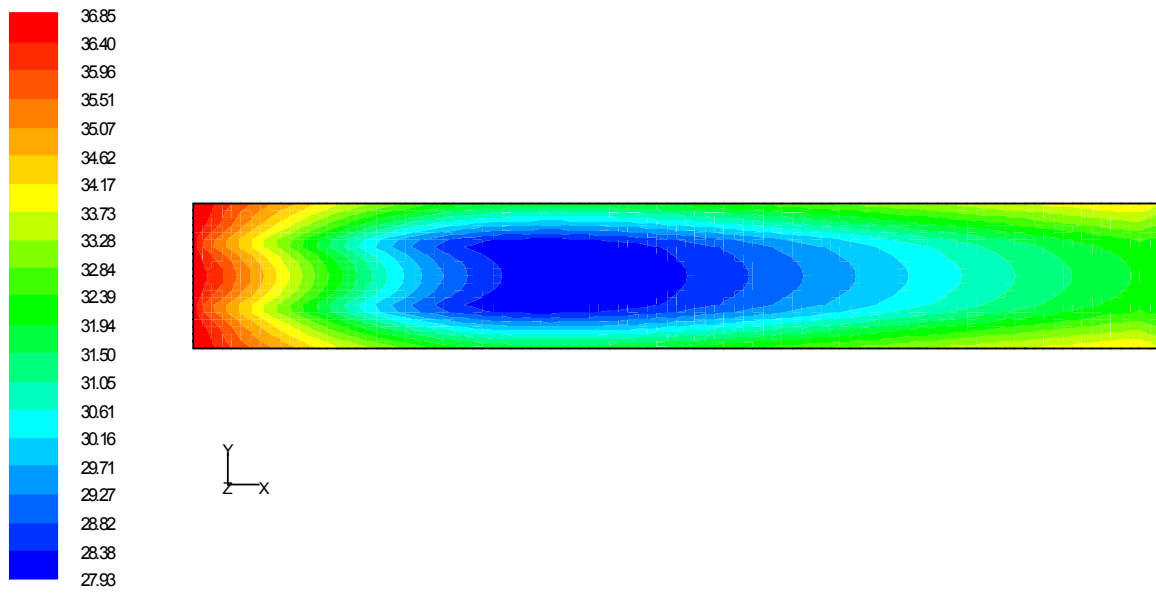


Fig.III.60 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à t=6s.

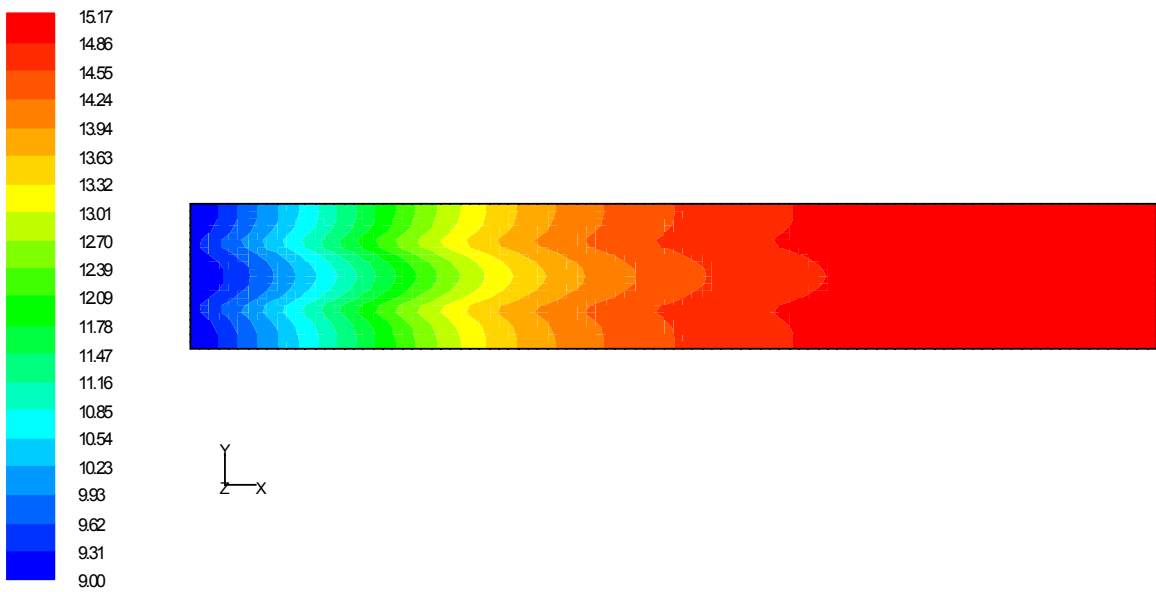


Fig.III.61 Distribution de l'humidité absolue [$\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$] le long de la conduite à t=6s.

Diamètre de la gouttelette injectée : $d_g=0.252\text{mm}$

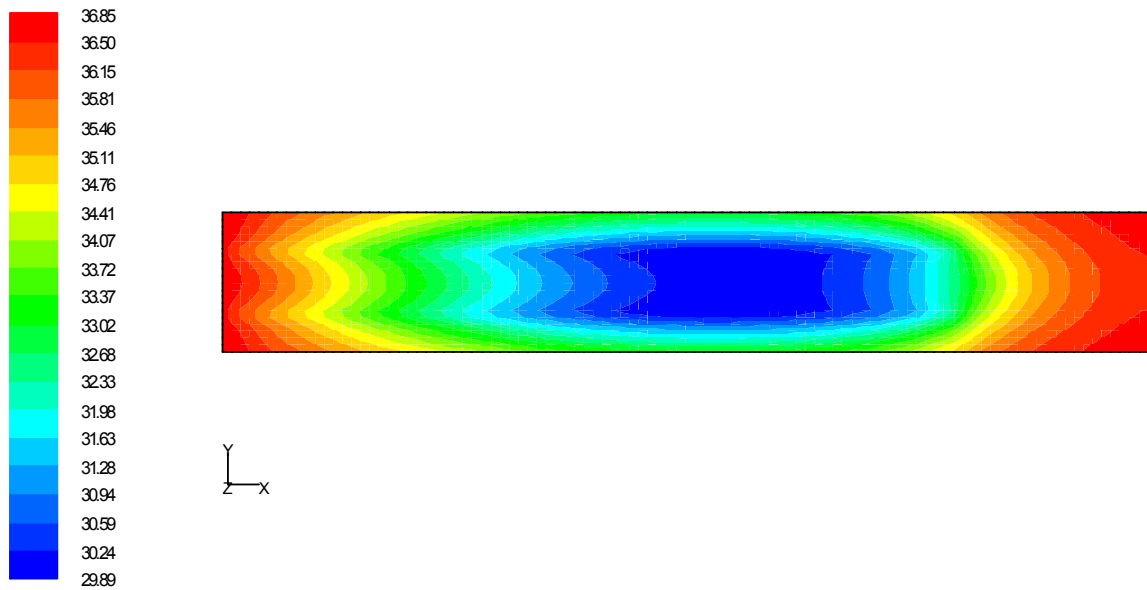


Fig.III.62 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à $t=1\text{s}$.

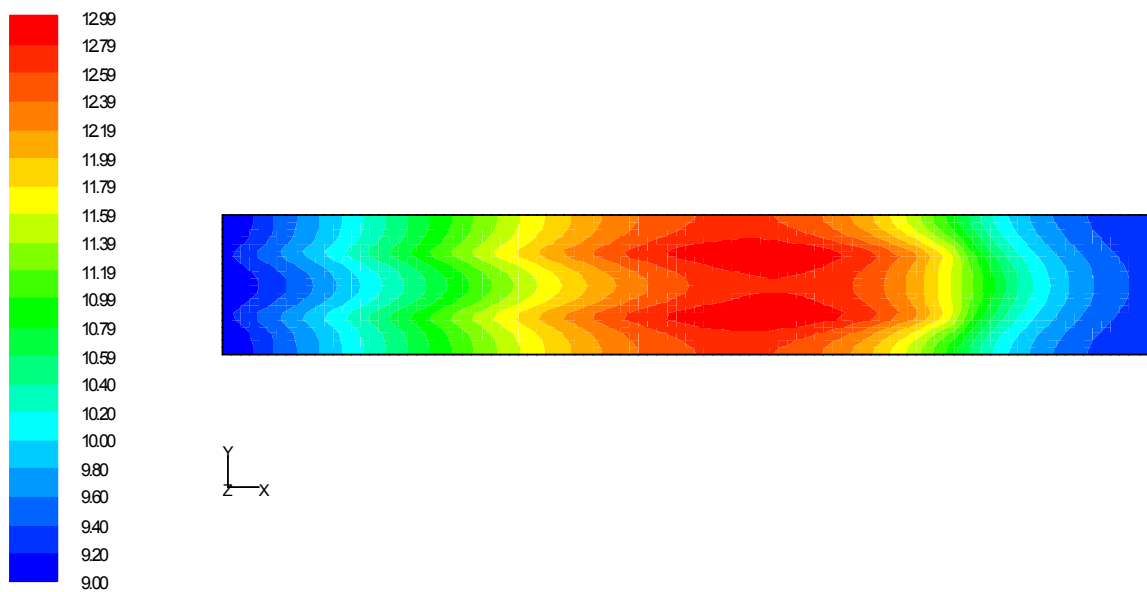


Fig.III.63 Distribution de l'humidité absolue [kg_{eau}/kg_{as}] le long de la conduite à $t=1\text{s}$.

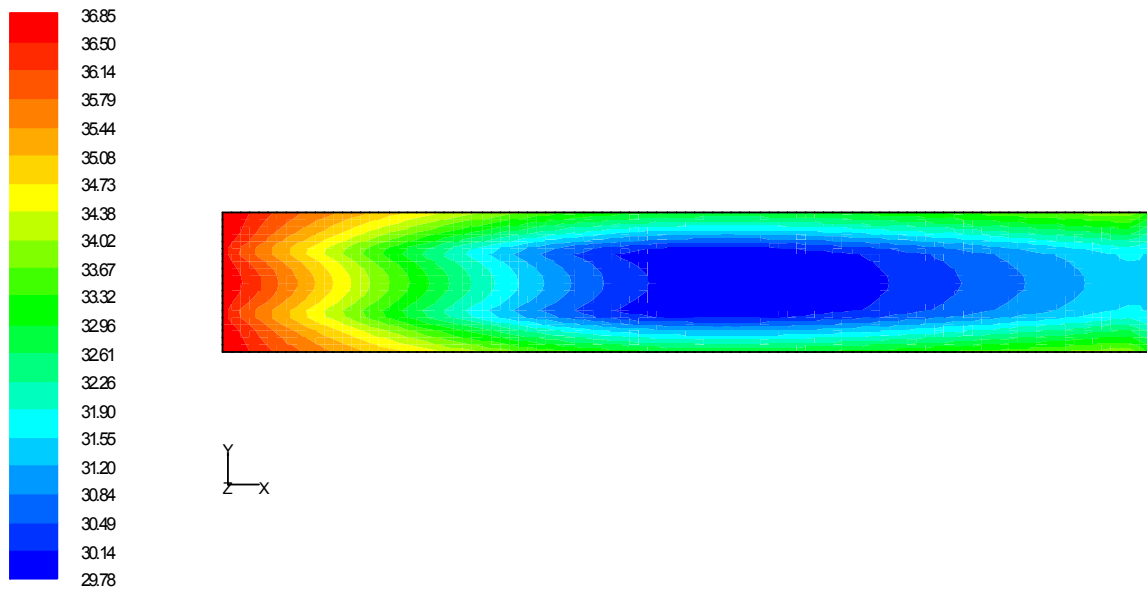


Fig.III.64 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à t=6s.

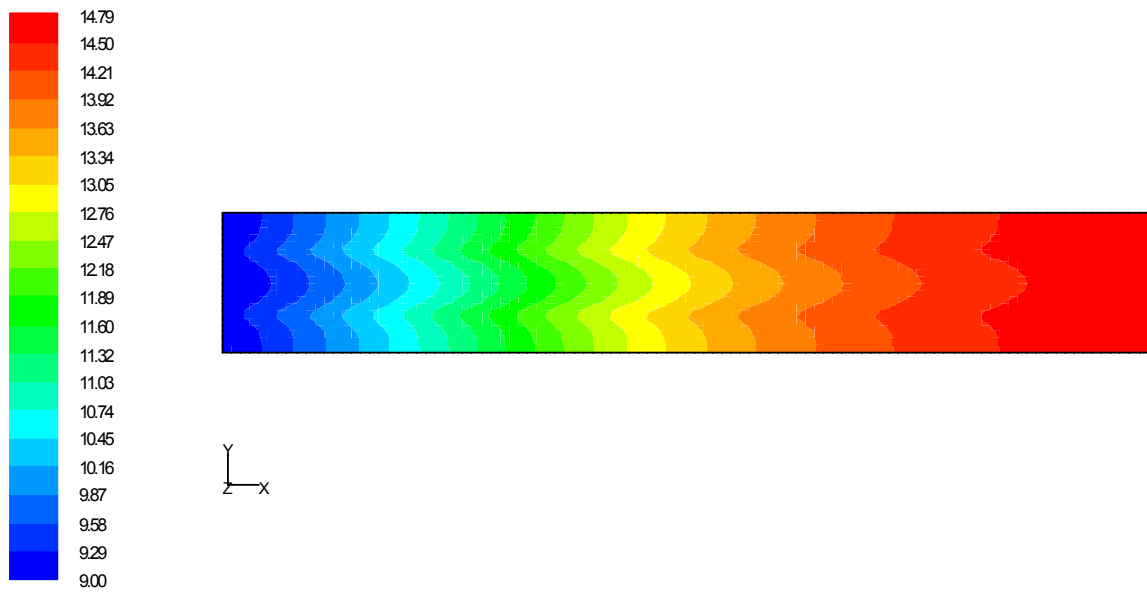


Fig.III.65 Distribution de l'humidité absolue [$\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$] le long de la conduite à t= 6s.

Diamètre de la gouttelette injectée : $d_g=0.357\text{mm}$

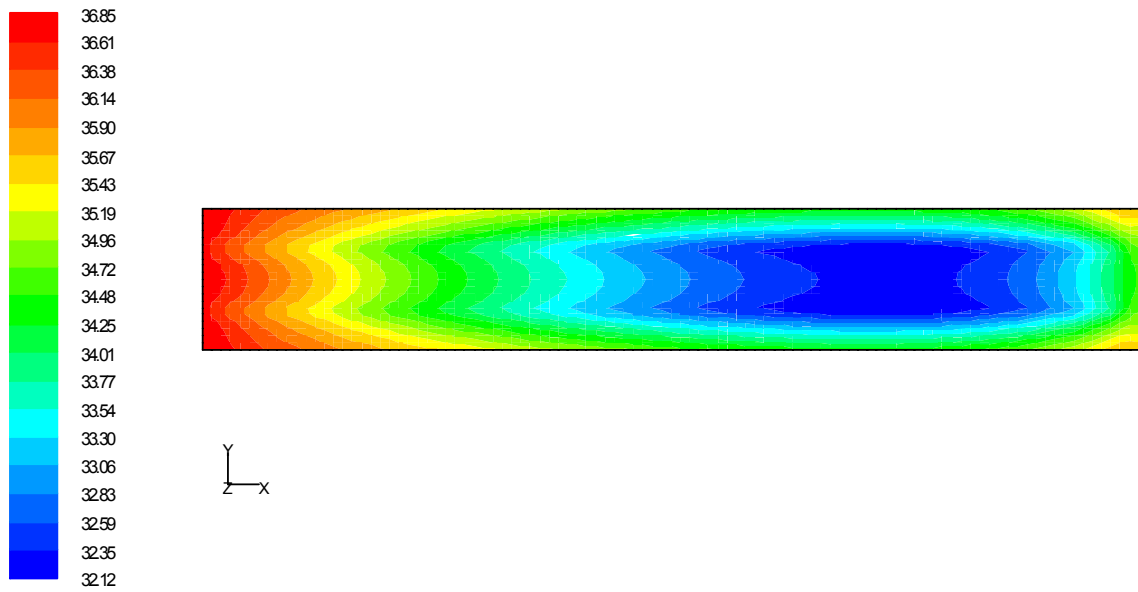


Fig.III.66 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à $t=1\text{s}$.

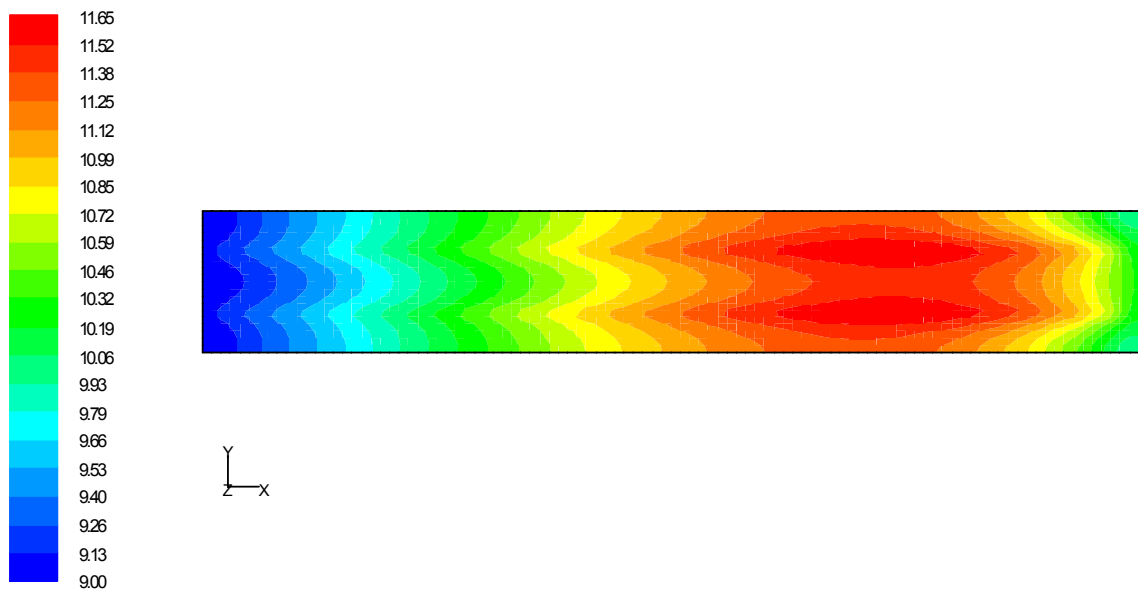


Fig.III.67 Distribution de l'humidité absolue [kg_{eau}/kg_{as}] le long de la conduite à $t=1\text{s}$.

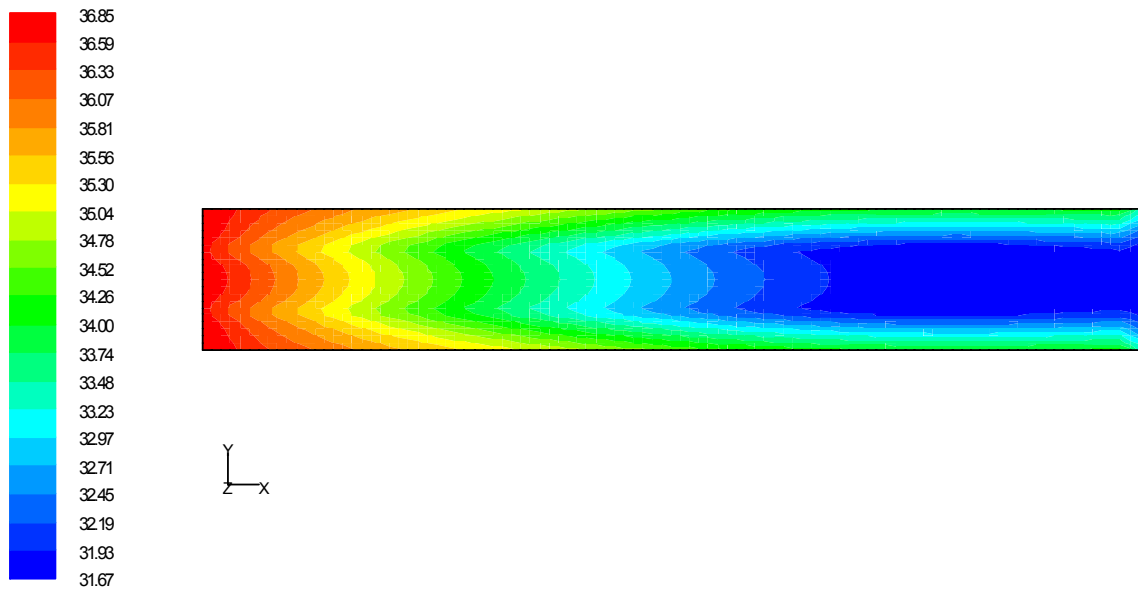


Fig.III.68 Distribution de la température [°C] le long de la conduite à t=6s.

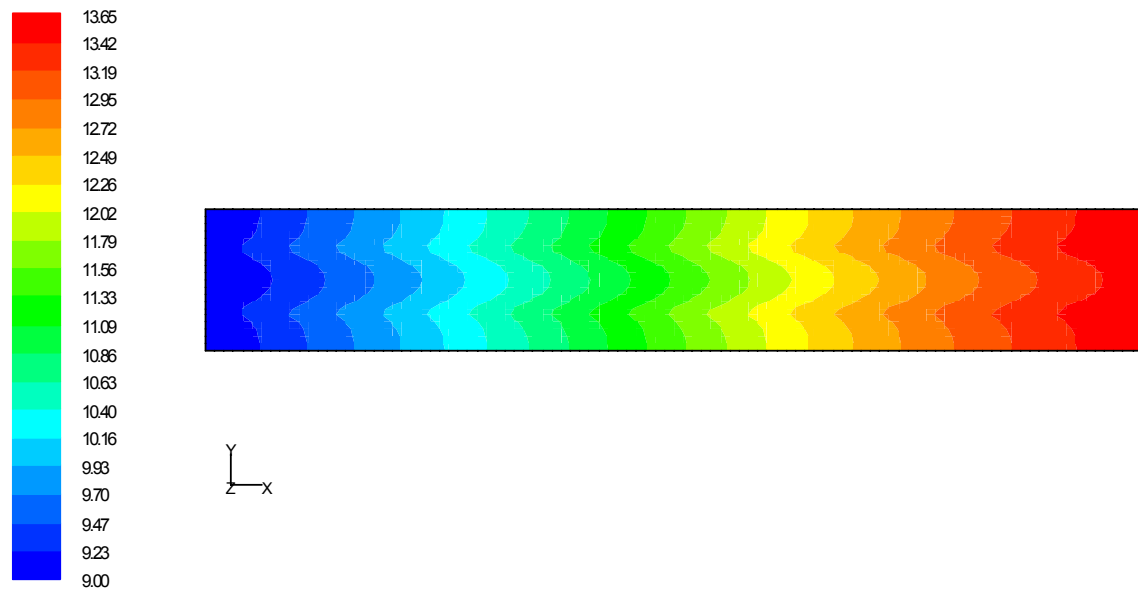


Fig.III.69 Distribution de l'humidité absolue [$\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$] le long de la conduite à t=6s.

A partir des figures (III.42), (III.43) ainsi (III.52), (III.53) on montre que la température de sortie et l'humidité absolue de l'air diminuent avec l'augmentation du diamètre de la gouttelette.

7. Conclusion :

L'augmentation de débit d'eau favorise le refroidissement de l'air. Par ailleurs, l'augmentation de la vitesse d'injection permet d'imposer des diamètres des gouttelettes d'eau de plus en plus faibles, ce qui permet une vaporisation rapide et un refroidissement d'air plus efficace.

Conclusion générale

Conclusion générale

CONCLUSION

Dans ce travail on s'est intéressée à l'effet de la brumisation sur le refroidissement de l'air humide.

Trois paramètres influent sur l'effet recherché, à savoir : Le diamètre des gouttelettes d'eau pulvérisées, leur vitesse de propagation ainsi que le débit d'eau.

On a montré que l'augmentation du débit d'eau améliore faiblement le refroidissement de l'air.

Par ailleurs, pour des diamètres de gouttelettes plus faibles et un même débit d'eau le refroidissement est plus intense.

En outre la vitesse de propagation des gouttelettes doit être optimale pour assurer une meilleure efficacité de ce mode de refroidissement.

En perspective il serait intéressant d'utiliser ce mode de refroidissement pour un cas pratique afin de confronter les résultats de calculs aux grandeurs mesurées.

ANNEXE 1

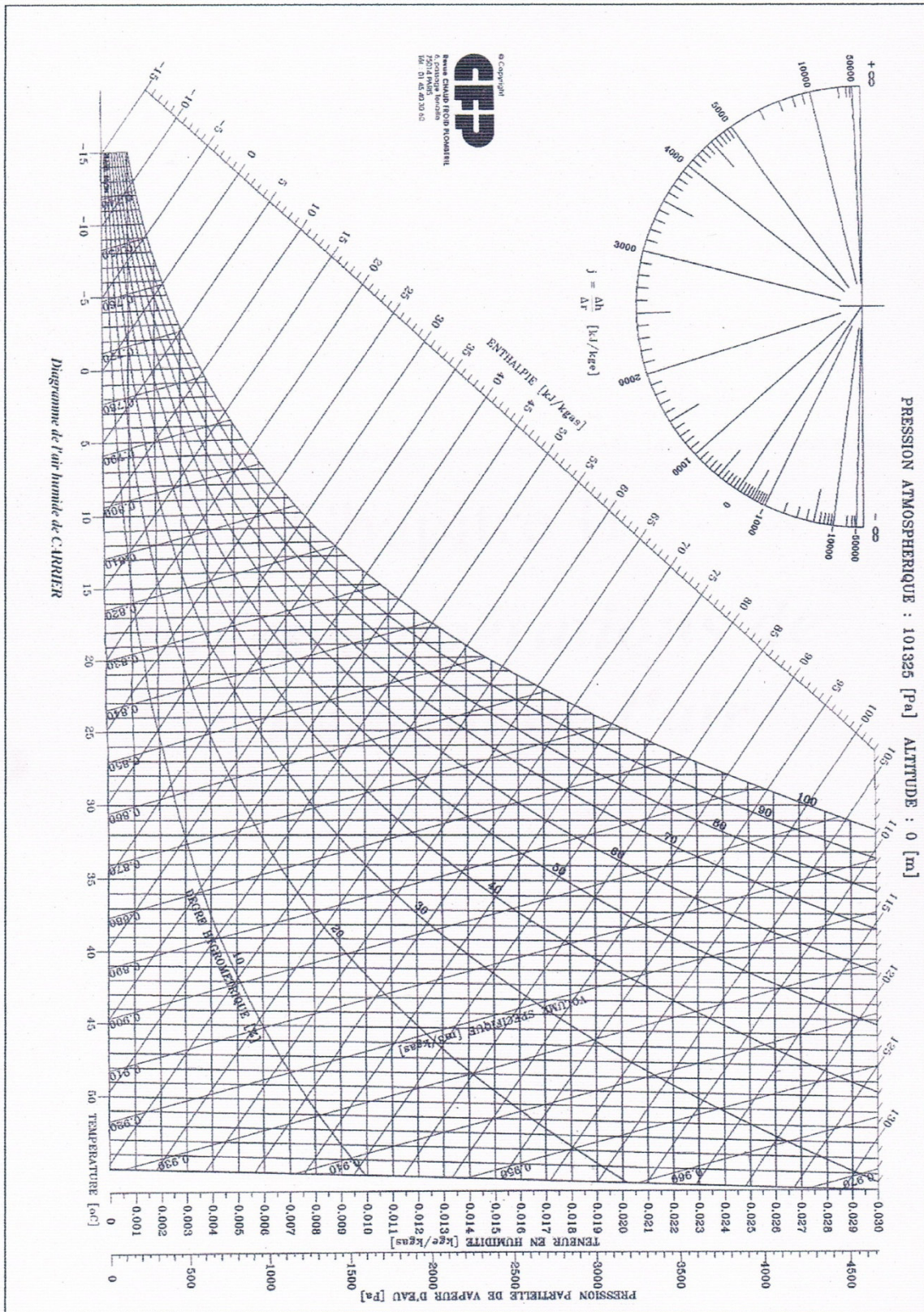


Diagramme de l'air humide de CARRIER

ANNEXE 2

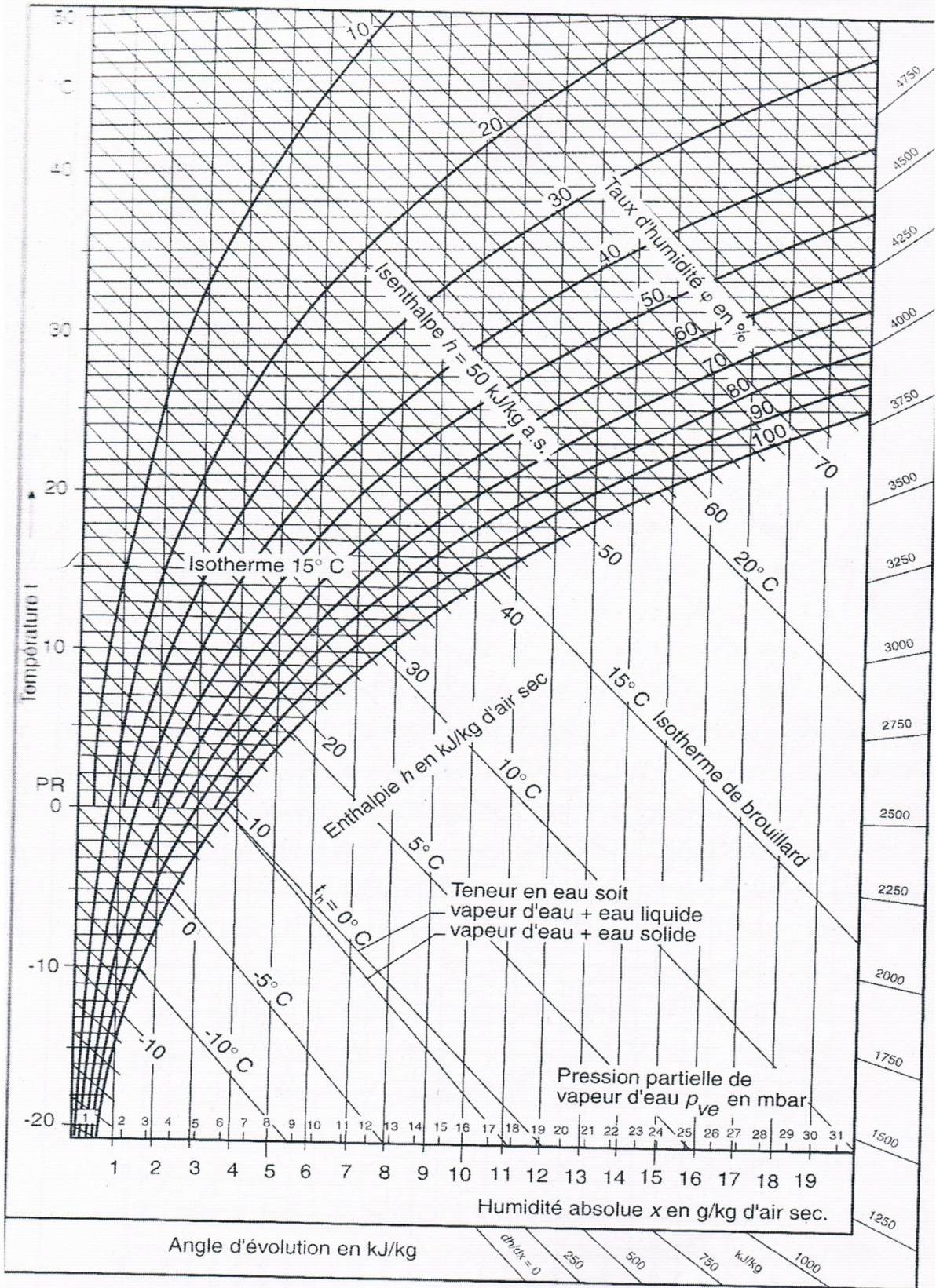


Diagramme de l'air humide de MOLLIER.

ANNEXE 3

```
clc, clear all
Tair=40;HR=0.2;
ZER=1;
V=1;d=0.001;v=1.864*10^(-5);y=0.026;Dv=2*10^(-5);Lv=2250000;
p=1.11;Tp=313.15;Re=V*d/v;Nu=0.37*Re^(0.6);Sh=0.37*Re^(0.6);
%calcul de h
h=y*Nu/d;
%calcul de k
k=Sh*Dv/d;
B=5.67*10^(-8); %constante de Boltzmann
Tg0=40;
Pvsair=611*exp((17.25*Tair)/(237.8+Tair));
Mvsair=(0.622*HR*Pvsair)/(101325-0.378*HR*Pvsair);
Pvsat=611*exp((17.25*Tg0)/(237.8+Tg0));
Mvs=(0.622*Pvsat)/(101325-0.378*Pvsat);
A=-p*k*Lv*(Mvs-Mvsair)+h*Tair+ZER*B*Tp^4;
Tg=(+A-ZER*B*(Tg0+273.15)^4)/h;
r=abs(Tg-Tg0);
while r>0.01
    Tg0=Tg;
    Tg=(-A-B*(Tg0+273.15)^4)/h;
    r=abs(Tg-Tg0);
end
disp('la température de la gouttelette est:')
disp(Tg)
Tg=Tg+273.15
```

Programme de MATLAB

Bibliographies

[1] JACQUES BOUTELOUP, MICHEL LE GUAY, JEAN LIGEN : Traitement de l'air. Livres : parisiennes. Tom1 : Numéro Spécial de CHAUD-FROID-PLOMBERIE, 1996.

[2] JACQUES BOUTELOUP, MICHEL LE GUAY, JEAN LIGEN : Traitement de l'air. Livres : parisiennes. Tom 2 : Numéro Spécial de CHAUD-FROID-PLOMBERIE, 1997.

[3] P.ISELT-U, ARNDT-J, L.CAUCHEPIN PYC : Manuel de l'humidification de l'air. Edition : Livres, 31 rue du Général Delestraint-75016 PARIS.

[4] OUALI KARIMA et IMOULA MALIKA. Caractérisation d'un humidificateur d'air. Mémoire d'ingénieur, Département de Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri – Tizi-Ouzou, Algérie, 2009.

[5] M.SADAoui. Etude d'une tour de refroidissement humide. Mémoire d'ingénieur, Département de Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri – Tizi-Ouzou, Algérie, 2001.

[6] R. NEBBALI. Cours de Transfer de masse - Master I. Département de Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri – Tizi-Ouzou, Algérie. 2014.

[7] I.BOUMRAR Cours d'Installation Thermique Industriel – Master I. Département de Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri – Tizi-Ouzou, Algérie. 2014.

[8] BARIOU Bernard : introduction au génie chimique.1, mécanique des fluides, échanges thermiques, traitement des solides. Livre - Tome 1 Paris : Dunod, 1971.