



**PROCEDE DE RAFRAICHISSEMENT DE L'AIR PAR
BRUMISATION**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN
INGENIERIE DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT OPTION
ENERGIE**

Présenté et soutenu publiquement le 17/06/2010 par

BRICE EVRARD TAFO

Travaux dirigé par : **Professeur DIDIER LECOMTE**

UTER Génie Energétique et Industriel

Jury d'évaluation du stage :

Président : Joël BLIN

Membres et Correcteurs: Didier LECOMTE

Coulibaly YEZOUMA

Henri KOTTIN

Promotion 2009/2010

REMERCIEMENTS

En premier lieu je tiens à remercier Célestine Maffou et Armand Luc Sop mes parents, qui ont toujours été d'un apport indescriptible dans la formation de ma personne.

Ma reconnaissance s'adresse à Cécile Ngoukem pour ses multiples encouragements qui me maintenaient à chaque fois en éveil.

J'exprime ma profonde gratitude à Didier Lecomte, qui a accepté de m'encadrer tout au long de cette période, et pour les idées lumineuses qu'il m'a toujours apportées.

Je remercie Mme Moussa Saley pour sa précieuse contribution en ce qui concerne tous les aspects mathématique de ce travail.

Un grand merci à tous mes camarades de promotion et ainsi que tous mes amis pour leur convivialité qui a toujours contribué à mon équilibre.

Tous les enseignants qui ont contribué positivement à ma formation trouveront ici l'expression de ma gratitude.

RESUME

Les méthodes de rafraichissement sont de plusieurs sortes et le challenge aujourd'hui est de trouver un système adapté de point de vue coût que facilité de montage selon là où on se trouve.

Nous présentons dans ce mémoire un procédé de rafraichissement qui est la brumisation. Nous commencerons d'abord par des généralités relatives au traitement de l'air, et nous mettrons un accent sur la brumisation.

Ensuite nous élaborerons toute la théorie liée à cette technologie jusque là encore peu répandu. Ceci par une série de modélisation d'évaporation et de refroidissement.

Nous étudierons ensuite les conditions de mise en œuvre d'un tel procédé, ceci dans l'optique de la vulgariser dans la localité.

ABSTRACT

The refresh methods are several kinds and the challenge now is to find a suitable point of view that ease of installation cost depending on where you are.

We present in this paper a method which is the refreshing mist. We first start with generalities on the treatment of air, and we will put an emphasis on the mist.

Then we will develop all the theory related to this technology so far still not widespread. This is a series of modeling evaporation and cooling.

We then examine the status of implementation of such a process, in this view to popularize in the locality.

LISTE DES ABREVIATIONS

R_T	Résistance thermique totale	(K/Wm ²)
R_m	Résistance thermique des murs	(K/Wm ²)
R_p	Résistance thermique du plafond	(K/Wm ²)
R_V	Résistance thermique des vitres	(K/Wm ²)
\dot{m}_e	Débit massique de l'eau entrant	(kg/s)
\dot{m}_{a_e}	Débit massique d'air humide entrant	(kg/s)
\dot{m}_{a_s}	Débit massique d'air humide sortant	(kg/s)
\dot{Q}	Charge thermique reçue par la pièce	(W)
T_e	Température extérieure à la pièce	(°C)
Y_e	Humidité absolue extérieure	(kg/kg _{as})
T_i	Température intérieure à la pièce	(°C)
Y_i	Humidité absolue intérieure à la pièce	(kg/kg _{as})
h_i	Coefficient de convection thermique à l'intérieur de la pièce	(W/m ² °C)
h_e	Coefficient de convection thermique à l'extérieur de la pièce	(W/m ² °C)
λ	Conductivité thermique du matériau	(W/m°C)
C_a	Chaleur massique de l'air sec	(J/kg°C)
$L_V(0)$	Chaleur latent de vaporisation de l'eau à 0°C	(kJ/kg)
C_V	Chaleur massique de la vapeur d'eau	(J/kg°C)
T	Température de l'air	(°C)
h_a	Enthalpie de l'air sec	(kJ/kg _{as})
h_V	Chaleur de vaporisation de l'eau à la température T	(kJ/kg)
S_{Tr}	Surface totale qui transmet la chaleur	(m ²)

Sm	Surface des murs qui conduit la chaleur	(m ²)
Sp	Surface du plafond	(m ²)
Sv	Surface des vitres	(m ²)
Sm'	Surface totale des murs	(m ²)
D	Diamètre de la particule	(m)
V	Vitesse de la particule liquide	(m/s)
Vo	Vitesse initiale de la particule liquide	(m/s)

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	i
RESUME	ii
ABSTRACT	ii
LISTE DES ABREVIATIONS	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	3
LISTE DES FIGURES.....	4
INTRODUCTION.....	5
I-) CONTEXTE DE L'ETUDE.....	6
II-) OBJECTIF DE L'ETUDE.....	6
III-) GENERALITE SUR LE TRAITEMENT DE L'AIR.....	7
III-1) Chauffage.....	7
III-2) Refroidissement.....	7
III-2-1) Refroidissement sans déshumidification.....	7
III-2-2) Refroidissement avec déshumidification	8
III-2-3) Humidification par injection de vapeur (ou à vaporisation par ébullition)	8
III-2-4) Humidification adiabatique (ou à vaporisation par évaporation)	8
III-2-5) Humidification par "brumisation".....	8
III-3) Principe de la brumisation.....	13
III-4) Distribution des gouttelettes dans l'air.....	13
III-5) Présentation d'une installation de brumisation.....	15
III-6) Description du fonctionnement d'une installation de brumisation	17
IV-) MODELISATION DE L'EVAPORATION	18
IV-1) Hypothèses de travail :.....	18
IV-2) Détermination du régime d'écoulement :.....	18
IV-3) Equation de la trajectoire :	20
IV-4) Equation d'évaporation :.....	23
IV-5) Résultats.....	26
IV-6) Discussion.....	27
V-) MODELISATION DU REFROIDISSEMENT.....	28
V-1) Hypothèses	28
V-2) Equations et Résultats	29
V-3) Discussion	34
VI-) DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION.....	Erreur ! Signet non défini.

VI-1) Dimensionnement de la tuyauterie	35
VI-2) Dimensionnement de la pompe	35
VI-3) Energie consommée.....	35
VII) CONDITION DE MISE EN OUVRE	35
VII-1) Coût de l'installation	36
VII-2) Faisabilité de l'installation.....	37
CONCLUSION	40
Bibliographie.....	41
ANNEXE I: Résolution du modèle d'évaporation	42
ANNEXE II Caractéristiques physiques de l'air à la pression atmosphérique	43
ANNEXE III Guide d'installation d'un système de brumisation.....	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Données caractéristiques de la pièce à refroidir

Tableau 2: Coûts des différents éléments du système de brumisation

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Humidificateur centrifuge

Figure 2: Humidificateur à ultrason

Figure 3: Buse hydraulique

Figure 4: Buse bi-fluide

Figure 5: Diamètre moyen en nombre

Figure 6: Diamètre moyen en volume

Figure 7: Schéma d'une installation de brumisation

Figure 8: Schéma détaillé pour un système complet de brumisation

Figure 9: Particule liquide en déplacement dans un repère cartésien

Figure 10: Courbe d'évolution de la vitesse de la particule liquide dans le temps

Figure 11: Courbe d'évolution du diamètre de la particule liquide dans le temps

Figure 12: Schéma de la pièce à refroidir

INTRODUCTION

La vie de l'Homme sur terre a toujours été caractérisée par une recherche permanente du bien être ou plus encore du mieux vivre. Une maison avait pour objectif premier la prémunition contre les intempéries et les agressions de tous ordres. Entendons évidemment par là les variations très sensibles de certaines caractéristiques de son environnement tels que la température, l'ensoleillement, le vent, les précipitations etc...

L'Homme a eu très tôt la préoccupation de son confort thermique. Dans les régions froides, seule une consommation d'énergie pouvait permettre d'assurer le confort. Dans les régions chaudes, celui-ci était obtenu par des mesures constructives (protections solaires,, utilisation de matériaux isolants, inertie thermique, protection contre le vent). Mais la standardisation des constructions et surtout l'arrivée sur le marché des systèmes a remplacé les dispositifs constructifs par des appareils fortement consommateurs d'énergie électrique.

Ladite consommation d'énergie est variable d'un système à un autre. Et toujours d'un système à un autre, le confort n'est pas assuré de la même manière. Que ce soit en termes de permanence, de qualité, de sonorisation, ou même de souplesse de l'équipement mis en jeu. Donc l'équivoque aujourd'hui réside au niveau de l'adoption d'un système suffisamment confortable et peu gourmand en énergie, et en accord avec les moyens financiers de celui qui désire l'équipement.

Dans certaines conditions climatiques (faible humidité relative), la technique de brumisation permet de refroidir l'air en augmentant son humidité. C'est une méthode qui se fait à enthalpie constante, donc sans apport d'énergie.

Nous établirons d'abord les bases dimensionnelles d'une installation d'un système de brumisation, ensuite nous évaluerons la faisabilité d'un montage local (au Burkina-Faso) .

I-) CONTEXTE DE L'ETUDE

La question du rafraichissement en Afrique sub-saharienne devient de plus en plus sérieuse, surtout en ce qui concerne les pays du sahel ou de la zone désertique. Ceci dû au simple fait que ces régions du globe sont caractérisées par une température élevée sur une bonne partie de l'année.

Des efforts étant déjà fait dans ce sens pour assurer plus ou moins le confort des populations par des procédés tels que la climatisation, il n'en demeure pas moins vrai qu'il est très onéreux, car elle représente une part importante dans la facture d'électricité. Et il reste encore le moyen de rafraichissement le plus utilisé, parceque facile à installer et est plus répandu que les autres procédés. Pourtant, en dehors du facteur coût qui est exorbitant, il faut aussi noter que la climatisation a un autre inconvénient majeur qui est celui de son fluide frigorigène (élément essentiel pour son bon fonctionnement), généralement des CFC, composé de chlore fluore et carbone, néfastes pour la l'atmosphère.

La question s'est donc posée de trouver un procédé de refroidissement déjà moins coûteux à l'installation, tout aussi facile à installer, peu gourmand en énergie, et à impact très peu négatif sur l'environnement.

II-) OBJECTIF DE L'ETUDE

L'étude contextuelle précédente révèle que la brumisation est un procédé de rafraichissement qui peut cadrer avec le contexte africain, et particulièrement Burkinabè.

Le but du présent mémoire sera donc d'étudier les conditions de développement d'un procédé de rafraichissement de l'air par brumisation.

Les objectifs spécifiques de ce travail sont :

- donner les bases du dimensionnement de ce type d'installation pour un débit de brumisation donné, en :
 - modélisant l'évaporation des gouttes dans des conditions réalistes de vitesse initiales
 - modélisant le refroidissement d'un espace donné
 - calculant la pompe
 - calculant l'énergie dépensée

- dimensionnant la tuyauterie
- chercher les conditions de mise en œuvre technique, du procédé dans un cas de figure bien choisi à l'avance (par exemple la climatisation d'une chambre d'étudiant au 2iE), en :
 - vérifiant la disponibilité des équipements (pompes, tuyaux, buses, connectiques, consommables)
 - évaluant des coûts (investissement et consommables : eau, produits chimiques et énergie)

III-) GENERALITE SUR LE TRAITEMENT DE L'AIR

Comme déjà mentionné, le confort thermique est l'une des préoccupations majeures de l'heure. Et son aboutissement ne saurait être en contournant le traitement de l'air. Ce dernier pouvant se faire soit par chauffage, refroidissement et/ou déshumidification, humidification.

III-1) Chauffage

Au cours de ce procédé, il y a augmentation de la température de l'air par apport de chaleur sensible uniquement. Cela suppose qu'il n'y a ni condensation ni évaporation d'humidité.

De façon pratique on procède au 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)

III-2) Refroidissement

Le refroidissement est caractérisé par un abaissement de température. Et c'est qui est l'objet de notre étude.

III-2-1) Refroidissement sans déshumidification

Ici il y a diminution de la température de l'air avec uniquement échange de chaleur sensible.

Pratiquement, on peut faire passer l'air sur une batterie froide qui peut être :

- Un échangeur alimenté par de l'eau glacée
- Un échangeur alimenté par du fluide frigorigène

Noter que la température de surface de la batterie est supérieure à la température de rosée de façon à ce qu'il n'y ait pas de condensation. La chaleur échangée est donc de la chaleur sensible (diminution de la température).

III-2-2) Refroidissement avec déshumidification

Dans ce cas de figure, la diminution de température de l'air s'accompagne d'un échange de chaleur décomposée en :

- Chaleur sensible (diminution de la température)
- Chaleur latente (diminution de l'humidité)

Dans la pratique, on procède par circulation de l'air sur une batterie *froide humide* qui peut être :

- Un échangeur alimenté par de l'eau glacée
- Un échangeur alimenté par du fluide frigorigène

Dans ce cas la température de surface de la batterie est inférieure à la température de rosée.

III-2-3) Humidification par injection de vapeur (ou à vaporisation par ébullition)

Ce procédé est basé sur une injection de vapeur produite par un générateur de vapeur (à une température de 100°C sous une pression de 1bar).

A préciser que dans ces conditions l'évolution de l'air se fait à température constante. Car la chaleur sensible apportée est négligeable devant la chaleur latente. Cette technique ne permet pas un refroidissement.

III-2-4) Humidification adiabatique (ou à vaporisation par évaporation)

Ici on procède par pulvérisation de fine gouttelette d'eau dans l'air à humidifier. Une partie de ces gouttelettes va s'évaporer en empruntant de la chaleur à l'air, l'air va se refroidir et son humidité va augmenter.

Notons que la chaleur sensible que l'air perd en se refroidissant est compensée par la chaleur latente qu'il gagne en s'humidifiant, si bien que la quantité de chaleur totale contenue dans l'air ne varie pas. Car dans un système ouvert le débit d'enthalpie reste constant.

L'humidification par brumisation entre dans cette catégorie.

III-2-5) Technique d'humidification par évaporation

Sous cette appellation sont regroupés tous les systèmes d'humidification qui utilisent la pulvérisation d'eau; humidificateurs centrifuges, humidificateurs laveurs, humidificateurs rotatifs, humidificateurs à ultrasons, humidificateurs à buses hydrauliques ou à buses bi-fluides (eau+air).

➤ **Les humidificateurs**

✚ **Humidificateurs centrifuges :**

Un plateau équipé sur sa périphérie de dents est mis en rotation par un moteur. L'eau arrive sur ce plateau et par centrifugation est projetée sur les dents qui la brise en fines gouttelettes. Le débit unitaire de chaque appareil est limité et les sels dissous dans l'eau sont souvent entraînés dans l'air et viennent se déposer sous forme de poudre sur toutes les surfaces. Les appareils munis d'une réserve d'eau doivent être fréquemment nettoyés afin d'éviter la formation d'algues et la création d'un bouillon de culture pour les bactéries.



Figure 1: Humidificateur centrifuge

✚ **Humidificateurs laveurs :**

Ils sont généralement montés dans les centrales de traitement d'air dans un caisson indépendant. Des rampes équipées de buses de pulvérisation humidifient et lavent l'air traversant. Un séparateur de gouttelettes est monté en sortie afin d'éviter l'entraînement des gouttelettes les plus grossières. Le rendement de ces humidificateurs dépend de la qualité des buses utilisées, du dimensionnement du caisson (vitesse de l'air) et de la direction de la pulvérisation (Co-courant ou contre courant). Le bac de rétention

demande un entretien soigné si l'on souhaite éviter la prolifération de moisissures, champignons et germes. Les coûts d'entretien et de fonctionnement sont conséquents.

Humidificateurs rotatifs :

Ils sont également prévus pour être installés dans des centrales de traitement d'air. Ces humidificateurs de conception récente, utilisent une buse rotative entraînée par un moteur à plus de 10 000 t/min. L'alimentation de l'eau se fait par le centre de la buse et sous l'effet de la rotation, la veine d'eau est projetée par des orifices sur un tamis circulaire qui l'éclate en fines gouttelettes. Ces appareils doivent être placés dans l'axe du caisson. L'entretien est limité à la vérification de l'état de la buse et du tamis protecteur. La consommation électrique n'est pas négligeable mais les coûts d'entretien restent limités. (Idem qu'un humidificateur centrifuge)

Humidificateurs à ultrasons :

Ils se composent pour l'essentiel d'un convertisseur piézo-électrique qui transforme un signal électrique en une oscillation mécanique de haute fréquence (1,65MHz). Appelé aussi transducteur il est placé au fond d'un réservoir d'eau. L'inertie de l'eau ne pouvant suivre la fréquence de vibration du transducteur, il se produit un phénomène de cavitation qui engendre la formation de micro-bulles. Le débit de ces appareils est faible et leur emploi est pratiquement limité aux vitrines réfrigérées. L'eau d'alimentation doit être de très bonne qualité et si possible déminéralisée.



Figure 2: Humidificateur à ultrason

Humidificateurs à buses hydrauliques :

Ils comprennent une pompe haute pression (50 à 100 bars) et des rampes fixes sur lesquelles sont installés des atomiseurs hydrauliques. Les orifices des atomiseurs hydrauliques sont de faible section et de ce fait la filtration doit être parfaite car les risques de bouchage sont importants. L'eau d'alimentation doit également être de bonne qualité si l'on veut limiter les interventions. Ces systèmes nécessitent une certaine vitesse d'air et sont généralement utilisés pour la climatisation extérieure dans les pays chauds, l'humidification en serres, ou le refroidissement des bâtiments d'élevage.

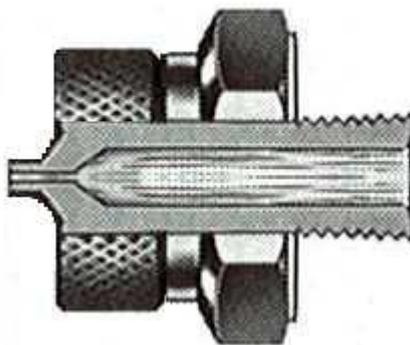


Figure 3: Buse hydraulique

Humidificateurs à buses bi-fluides :

Comme leur nom l'indique les buses d'atomisation utilisent deux fluides, l'eau et l'air comprimé. L'air comprimé permet de générer un brouillard très dense de fines gouttelettes. Les pressions d'eau et d'air réglables par une armoire de contrôle permettent d'ajuster la finesse du brouillard. Bien que les atomiseurs pneumatiques soient équipés d'une aiguille de débouchage, l'eau doit être parfaitement filtrée et de sa qualité va dépendre la fréquence des interventions. Ils sont faciles à mettre en œuvre, les coûts de fonctionnement sont faibles mais la consommation d'air n'est pas négligeable. Ils peuvent être installés soit dans des caissons de conditionnement d'air ou bien directement dans les locaux à traiter. L'absence de réserve d'eau évite toute contamination de l'eau. Au montage des précautions doivent être prises pour que le brouillard d'eau émis par les atomiseurs ne rencontre pas des obstacles, ce qui provoquerait une condensation.

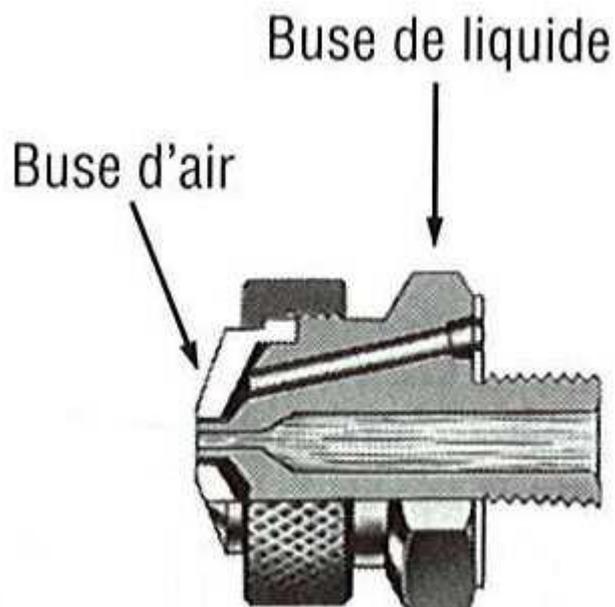


Figure 4: Buse bi-fluide

Il faut dire que les méthodes de rafraîchissement déjà connues et sur lesquelles on peut trouver beaucoup de travaux sont :

- La climatisation. Qu'elle soit conventionnelle c'est-à-dire utilisant essentiellement l'électricité pour son fonctionnement, ou solaire, des travaux énormes y existent.
- Le puits canadien
- Les tours à vents
- Le « free cooling »

La brumisation est moins développée que ces dernières et revêt un intérêt tout autant que les autres.

La brumisation peut être utilisée pour plusieurs buts [E]. Elle peut servir :

- Au refroidissement intérieur des locaux
- Au refroidissement extérieur
- A l'abattement de poussière
- Au traitement des odeurs
- A l'abattement des gaz toxiques
- A la gestion de l'hygrométrie

- Au détrempage
- Au lavage basse pression
- A la désinfection
- A la désinsectisation
- A la prévention incendie

Il y a deux principaux types de brumisation et ceci en fonction des gammes de pression. Ce qui fait qu'on distingue la brumisation basse pression et la brumisation haute pression. Et au-delà de 70 bars on parle de haute pression.

Notre étude portera sur le rafraichissement intérieur par brumisation haute pression.

➤ **Les humidificateurs par brumisation**

Le principe du procédé de rafraichissement par brumisation est basé sur l'introduction de microgouttelette d'eau dans l'air sec, avec une certaine vitesse, pour éviter leur coalescence et refroidir l'air par évaporation (l'eau prélève dans l'air ambiant la chaleur nécessaire pour son évaporation).

III-4) Distribution des gouttelettes dans l'air

Les particules liquides éjectées par le brumisateur ne sont pas toujours identiques. Leurs tailles varient et ce en fonction de plusieurs paramètres tels que :

- Le type de buse choisie
- Les débits d'eau et d'air
- Les pressions d'eau et d'air

Chaque buse (atomiseur) produit une série de gouttelettes de tailles différentes appelées spectre des gouttelettes. Un spectre large contient des gouttelettes de tailles différentes et il y a une grande différence de taille entre les gouttelettes les plus petites et les plus grosses. Un spectre étroit contient des gouttelettes ayant approximativement la même taille et il y a peu de différence de taille entre les plus petites et les plus grosses.

Les paramètres les plus souvent pris en considération dans cette étude de taille sont :

❖ **Diamètre moyen en nombre (DMN ou D10)**

C'est le diamètre de la gouttelette de part et d'autre de laquelle se trouve 50% du nombre total de gouttelette.

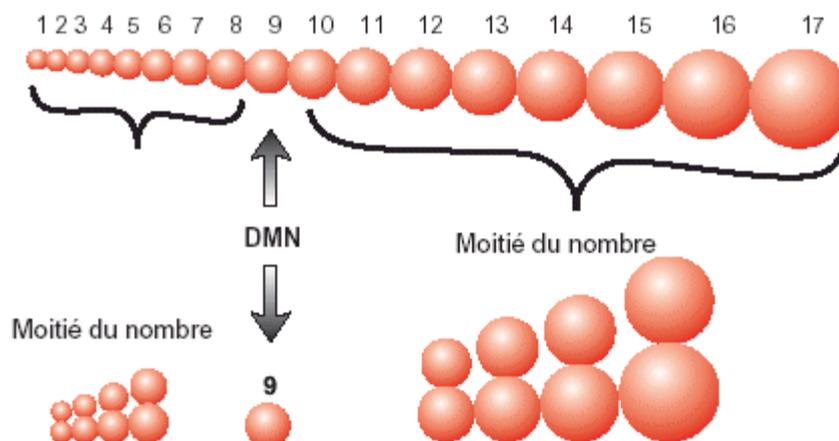


Figure 5: Diamètre moyen en nombre

❖ Diamètre moyen en volume (DMV ou D30)

C'est la valeur du diamètre de la gouttelette divisant l'ensemble des autres en deux groupes d'égal volume, l'un constitué des plus grosses gouttelettes et l'autre des plus petites. En d'autre terme c'est le diamètre de la goutte dont le volume est la moyenne entre les volumes de toutes les gouttes de l'échantillon.

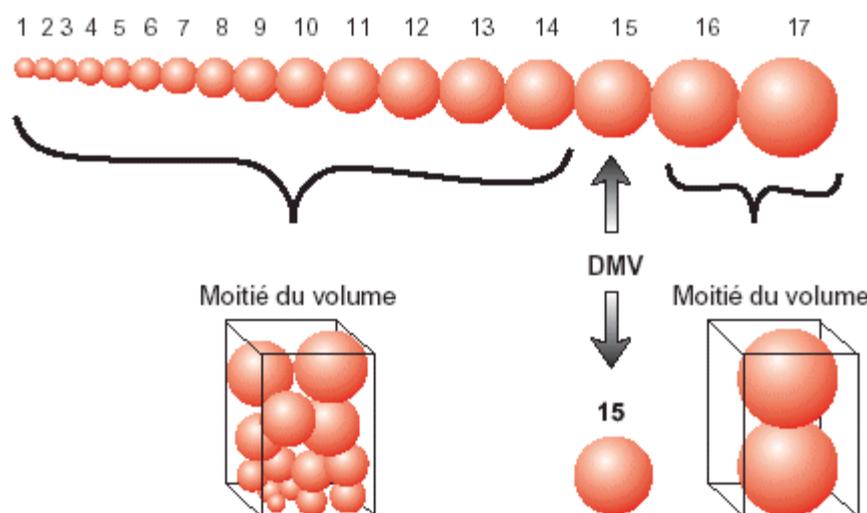


Figure 6: Diamètre moyen en volume

❖ Diamètre moyen de Sauter (DMS ou D32)

Le diamètre moyen Sauter (DMS ou D32) est très importante pour le calcul d'échanges thermiques des procédés de refroidissement par évaporation, parce qu'elle permet d'évaluer la

surface d'échange obtenue en atomisant un volume donnée de liquide. Il privilégie les effets de volume et il est le plus représentatif en terme de transport de masse. Le diamètre de Sauter établit un rapport entre des effets de volume (inertie..) et de surface (traînée).

$$DMS = \frac{\int_0^{\infty} n(d)d^3 d(d)}{\int_0^{\infty} n(d)d^2 d(d)} \quad (3-1)$$

n(d): distribution des gouttelettes de diamètre d

Dans notre cas (transfert de masse et de chaleur), l'emploi du diamètre de Sauter est le plus indiqué.

Le rapport (R) entre les valeurs du DMV et du DMN donne une mesure approximative de la largeur du spectre des gouttelettes. Plus il est proche de un et plus les tailles des gouttelettes sont similaires d'où un spray homogène; plus il est grand et plus la gamme de taille des gouttelettes est étendue.

III-5) Présentation d'une installation de brumisation

Une installation de brumisation comporte un certains nombre d'éléments qui doivent être assemblés selon un schéma directeur pour assurer le bon fonctionnement de celle-ci.

De façon générale, une telle installation se présente de la manière suivante

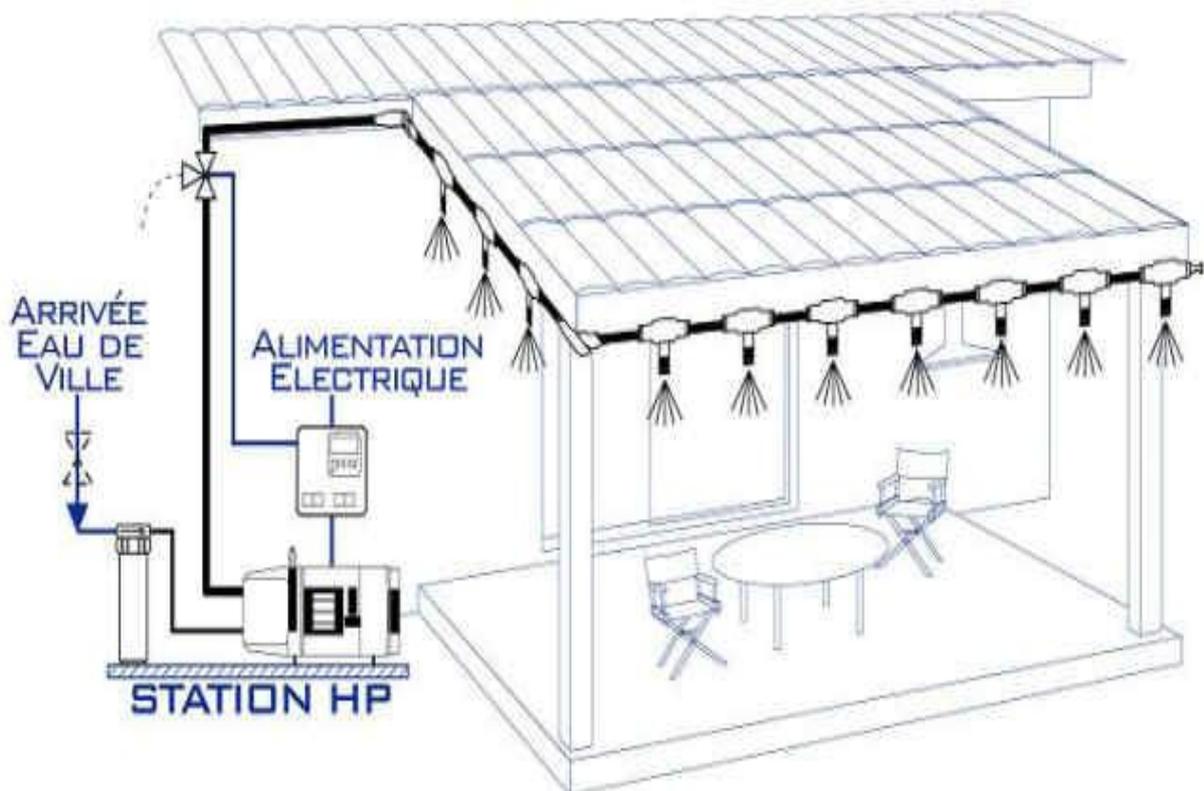


Figure 7: Schéma type d'une installation de brumisation

Nous pouvons observer sur cette figure deux principaux blocs :

- Bloc 1 constitué de :
 - L'arrivée de l'eau
 - Une mini station de pompage haute pression
 - Un système d'alimentation électrique
- Bloc 2 constitué de :
 - Rampe de distribution de l'eau
 - Et de petites buses

De façon plus détaillée le bloc 1 peut être présenté comme suit :

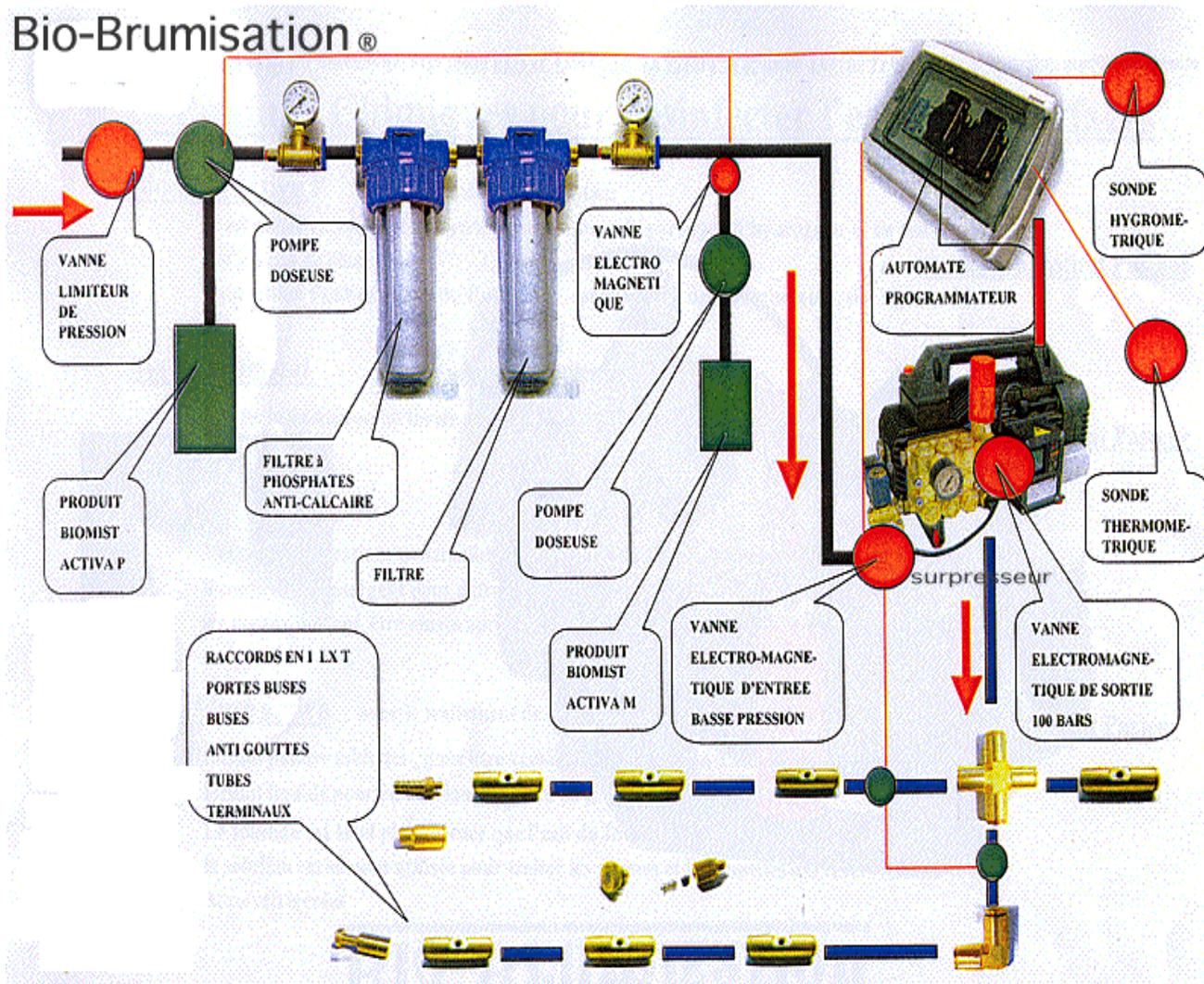


Figure 8: Schéma détaillé pour un système complet de brumisation

III-6) Description du fonctionnement d'une installation de brumisation

Le principe de fonctionnement de façon résumée est le suivant :

- Alimentation en eau de ville ou eau d'une société agréée de distribution d'eau.
- Cette eau à travers une pompe doseuse qui contient un produit pour le traitement de l'eau
- L'eau continue son trajet en passant par un dispositif de filtration
- Ensuite elle rejoint une pompe de surpression qui l'envoie dans les rampes de distribution d'eau qui se positionnent très souvent dans la partie supérieure de la pièce à refroidir.

Pour rentrer dans les détails et avoir un système plus sophistiqué et plus pointu, on peut :

- Prévoir une vanne limiteur de pression entre le point où arrive l'eau et la pompe doseuse. Ceci permet de maintenir une pression désirée à chaque fois dans le circuit.
- Aussi prévoir un kit de « régulation » constitué d'un automate et de sondes thermique et hygrométrique
-

IV-) MODELISATION DE L'EVAPORATION

Dans cette partie de mon développement il est question de prédire quelle pourrait être la trajectoire éventuelle de la particule liquide à la sortie de la buse d'injection et aussi de montrer comment son évolution dans l'espace à refroidir conditionnerait, ceci en fonction de la charge thermique et de l'humidité relative de l'enceinte, la variation du diamètre de ladite particule.

IV-1) Hypothèses de travail :

Nous raisonnerons en considérant une seule particule (goutte) liquide et non pas un agrégat de gouttes. Ceci dans l'optique de simplifier les développements. N'oublions pas de préciser aussi que nous opérons en brumisation haute pression, ce qui permet une évaporation rapide de la particule et donne la sensation d'absence d'eau liquide dans l'enceinte.

Comme humidité relative nous prendrons 20% et comme température ambiante moyenne de la salle à refroidir 45°C.

La pression à la sortie de la buse variera dans une fourchette allant de 70 à 250 bars (comme spécifié dans les termes de références du mémoire). Le diamètre de la goutte (ou encore diamètre initial) varie de 20 à 100µm

L'itinéraire de notre développement pour aboutir à la modélisation complète de l'évaporation sera comme suit :

- Détermination du régime d'écoulement
- Détermination de l'équation de la trajectoire
- Etablissement de l'équation combinée du transfert de charge et de matière appliquée à la goutte d'eau.

IV-2) Détermination du régime d'écoulement :

-  **Estimation du Reynolds :**

La valeur du Reynolds nous permettra de déterminer le régime d'écoulement. Pour ce faire nous devons d'abord opérer un calcul intermédiaire, à savoir celui de la vitesse de la particule à sa sortie de l'injecteur.

- Calcul de la vitesse de la goutte :

La particule liquide juste avant sa sortie de l'injecteur fait partir d'une ligne de courant liquide. Donc nous pouvons aisément appliquer le théorème de Bernoulli entre deux points : juste avant la sortie (point A) de l'injecteur et juste après sa sortie (point B).

On a donc :

$$\frac{P_A}{\rho g} + Z_A + \frac{V_A^2}{2g} = \frac{P_B}{\rho g} + Z_B + \frac{V_B^2}{2g}$$

(4-1)

Nous prendrons pour origine des abscisses le point A soit $Z_A = 0$ et pour origine des pressions la pression atmosphérique : soit $P_B = 0$. Le point B étant très proche de A nous avons aussi Z_B négligeable devant les autres termes d'énergie. Avant la sortie de la buse d'injection toute la charge est sous forme d'énergie de pression et juste à la sortie elle est sous forme cinétique. Ce qui nous conduit à :

$$\frac{V_B^2}{2g} = \frac{P_A}{\rho g}$$

(4-2)

Soit

$$V_B = \sqrt{\frac{2P_A}{\rho}}$$

(4-3)

$$\text{AN : } V_B = \sqrt{\frac{2 \times 70 \times 1,013 \times 10^5}{1000}} \quad \Rightarrow \quad \underline{V_B = 119,09 \text{ m/s}}$$

- Calcul du Reynolds :

Nous déduisons la valeur du Reynolds pour une goutte de 20 μm :

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad \longrightarrow \quad Re = \frac{119,09 \times 20 \times 10^{-6}}{1,57 \times 10^{-5}} \quad \longrightarrow \quad \underline{\underline{Re = 151,71}}$$

Comme nous avons $Re < 5.10^5$, nous pouvons conclure que l'écoulement est **Laminaire**.

IV-3) Equation de la trajectoire :

Pour établir convenablement l'équation de la trajectoire, nous nous devons d'appliquer le théorème de conservation de la quantité de mouvement au système « gouttelette d'eau » en mouvement dans la salle à rafraichir.

L'inventaire des forces externes appliquées à ce système sont :

- Le poids de la particule liquide
- La force de frottement subie par la particule due à l'air

En ce qui concerne la force de frottement, étant donné le régime d'écoulement est laminaire, le coefficient de frottement approprié est de la forme :

$$C_m = \frac{1,328}{Re_D^{1/2}} \quad (4-4)$$

Et la force de frottement associée est :

$$f = \frac{AC_m \rho V^2}{2} \quad (4-5)$$

Où

$$A = \pi R^2 = \pi \frac{D^2}{4}$$

qui est la surface projetée de la goutte d'eau dans un plan.

$$f = \frac{\pi C_m \rho D^2 V^2}{8}$$

En remplaçant le Reynolds par sa valeur dans l'expression de C_m , et l'expression de C_m elle-même dans f , on a :

$$f = \frac{1,328\pi\rho V^2 D^2 \nu^{1/2}}{8} = \frac{1,328\pi\rho \nu^{1/2}}{8} V^{3/2} D^{3/2} \quad (4-6)$$

D'où

$$f = kV^{3/2} D^{3/2} \quad (4-7)$$

où

$$k = \frac{1,328\pi\rho \nu^{1/2}}{8}$$

Après application du principe de conservation de la quantité de mouvement à la particule liquide en mouvement, nous avons :

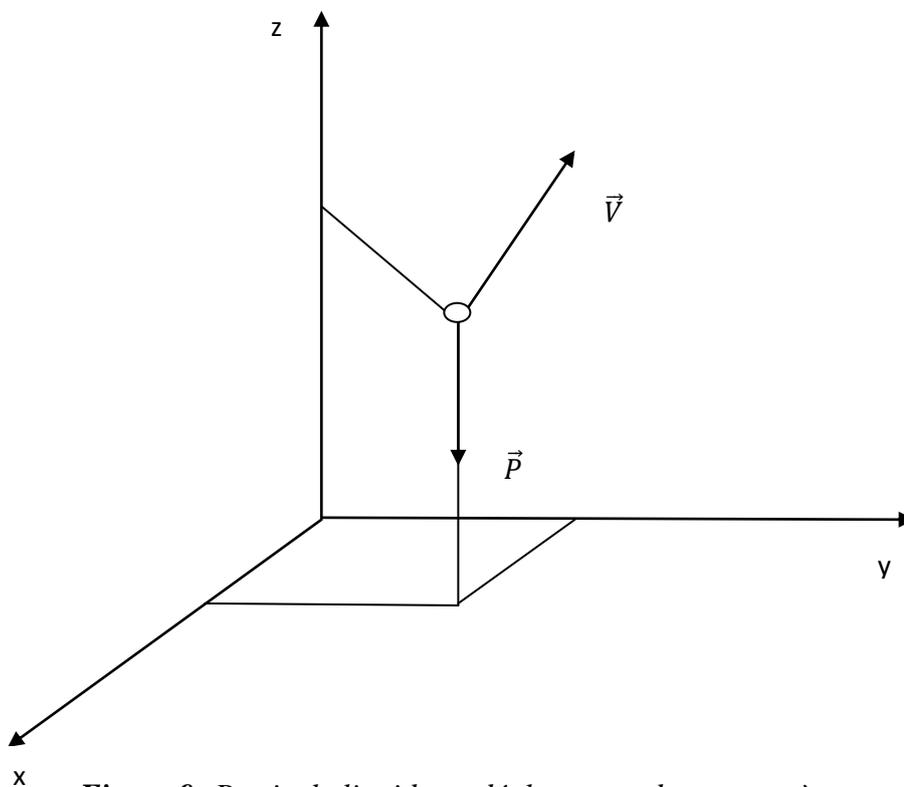


Figure 9: Particule liquide en déplacement dans un repère cartésien

$$\vec{P} + \vec{f} = m \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (4-8)$$

$$m\vec{g} + k\vec{V}^{3/2}D^{3/2} = m \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (4-9)$$

$$\vec{g} + \frac{k}{m}\vec{V}^{3/2}D^{3/2} = \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (4-10)$$

Or $\rho = \frac{m}{V}$ et $V = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{D}{2}\right)^3 = \frac{\pi D^3}{6}$

$$m = \frac{\pi\rho}{6}D^3$$

En projetant l'équation qui rend compte la conservation de la quantité de mouvement suivant les trois axes du repère à trois dimensions, nous obtenons le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{k}{m}V_x^{3/2}D^{3/2} & = \frac{dV_x}{dt} \\ \frac{k}{m}V_y^{3/2}D^{3/2} & = \frac{dV_y}{dt} \\ -g - \frac{k}{m}V_z^{3/2}D^{3/2} & = \frac{dV_z}{dt} \end{cases} \quad (4-11)$$

Et en remplaçant la masse par son expression dans le système précédent on obtient :

$$\begin{cases} a \left(\frac{V_x}{D}\right)^{3/2} &= \frac{dV_x}{dt} \\ a \left(\frac{V_y}{D}\right)^{3/2} &= \frac{dV_y}{dt} \\ -g + a \left(\frac{V_z}{D}\right)^{3/2} &= \frac{dV_z}{dt} \end{cases} \quad (4-12)$$

Où

$$a = \frac{6k}{\pi\rho} = 4,64 \times 10^{-6}$$

Il faut noter que l'expression globale de la vitesse est :

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

Et l'équation de la trajectoire ou vecteur position est obtenue par :

$$\overrightarrow{OM} = \int \vec{V} dt$$

IV-4) Equation d'évaporation :

Ici nous traduisons mathématiquement l'évaporation de la particule liquide. Et pour y arriver nous utiliserons les équations de bilan d'énergie et de matière.

Si on considère le système formé par une goutte, on suppose que la variation de son énergie interne dans le temps est nulle. Soit

$$\frac{dU}{dt} = 0 \quad (4-13)$$

Cette variation d'énergie est la différence entre le flux thermique apporté par convection et le flux emporté par évaporation. Nous pouvons donc écrire :

$$\frac{dU}{dt} = hS(T_\infty - T_h) - n_V SL_V(T_h) \quad (4-14)$$

On en déduit

$$n_V = \frac{h(T_\infty - T_h)}{L_V(T_h)} \quad (4-15)$$

A partir des hypothèses prises plus haut (température ambiante, humidité relative), nous obtenons, par lecture sur le diagramme psychométrique la valeur de la température humide qui est de **25,3°C**.

La valeur de la chaleur latente d'évaporation de l'eau à la température de bulbe humide est donnée par la relation :

$$L_V(T_h) = 2501 - 2,65T_h \quad (4-16)$$

Soit à la température de bulbe humide

$$L_V(T_h) = 2\,434 \text{ kJ/kg}$$

La nouvelle expression de la densité de flux massique est donc :

$$n_V = 8,1 \times 10^{-6} h$$

h est le coefficient de transfert de chaleur par convection. Et son expression dépend d'un certain nombre de paramètres adimensionnels. $h = f(N_u)$

Et $N_u = f(Re, Pr)$

On a :

$$h = \frac{N_u \lambda}{D}$$

Le nombre de Prandtl s'écrit

$$Pr_{air} = \frac{\mu C_p}{\lambda} = \frac{1006 \times 1,85 \times 10^{-5}}{0,0262} = 0,71$$

Pour les paramètres caractéristiques de l'air, voir le tableau [] en annexe.

Le produit $Re_p Pr^{2/3} = 120,74$ et on a bien $1 < Re_p Pr^{2/3} < 5 \times 10^4$

Par conséquent nous pouvons utiliser le Nusselt donné par la relation de RANZ MARSHALL

$$N_u = 2 + 0,6 Re_p^{1/2} Pr^{1/3}$$

La nouvelle expression de la densité de flux de matière est par conséquent :

$$n_V = \frac{8,1 \times 10^{-6} \times 0,0262}{D} [2 + 0,6 Re_p^{1/2} Pr^{1/3}] \quad (4-17)$$

En remplaçant le Reynolds et le Prandtl par leur expression et valeur respective, et en négligeant le 2 dans l'expression du nusselt de RANZ MARSHAL, nous obtenons :

$$n_V = 4,5 \times 10^{-10} V^{1/2} D^{-1/2} \quad (4-18)$$

Par ailleurs l'équation de conservation de la masse se traduit par :

$$\dot{m} = -n_V S = \frac{dm}{dt}$$

$$n_V = -\frac{1}{S} \frac{d(\rho V)}{dt} \quad (4-19)$$

$$\text{Or} \quad S = 4\pi r^2 = \pi D^2 \quad \text{et} \quad \rho V = \frac{\pi \rho}{6} D^3$$

D'où

$$n_V = -\frac{1}{\pi D^2} \frac{d\left(\frac{\pi \rho}{6} D^3\right)}{dt} \quad (4-20)$$

soit

$$n_V = -\frac{\rho}{6D^2} \frac{dD^3}{dt} \quad (4-21)$$

En égalant cette équation de la densité de flux massique à celle trouvée précédemment nous obtenons :

$$-\frac{\rho}{6D^2} \frac{dD^3}{dt} = 4,5 \times 10^{-10} V^{1/2} D^{-1/2}$$

d'où

$$\frac{dD^3}{dt} = -2,7 \times 10^{-12} V^{1/2} D^{3/2}$$

(4-22)

Le système différentiel à résoudre pour obtenir les solutions de la vitesse V et du diamètre D est donc le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} a \left(\frac{V_x}{D} \right)^{3/2} = \frac{dV_x}{dt} \\ a \left(\frac{V_y}{D} \right)^{3/2} = \frac{dV_y}{dt} \\ -g + a \left(\frac{V_z}{D} \right)^{3/2} = \frac{dV_z}{dt} \\ \frac{dD^3}{dt} = -2,7 \times 10^{-12} V^{1/2} D^{3/2} \end{array} \right.$$

(4-23)

IV-5) Résultats

❖ **Cas particulier** : Particule en déplacement dans une seule direction

Dans ce cas le système différentiel précédent devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} -g - 4,64 \times 10^{-10} \left(\frac{V}{D} \right)^{3/2} = \frac{dV}{dt} \\ -2,7 \times 10^{-12} V^{1/2} D^{3/2} = \frac{dD^3}{dt} \end{array} \right.$$

La résolution est développée en annexe [I] et la méthode de résolution utilisée est numérique, en utilisant le tableur Excel. En considérant que la particule est éjectée vers le haut. En prenant un pas de temps de 0,001s

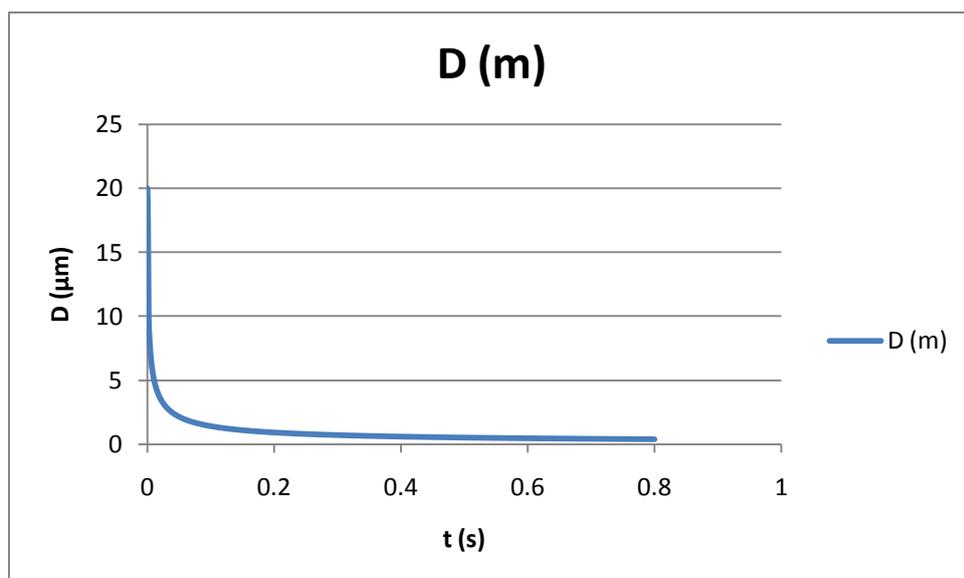


Figure 10: Courbe d'évolution de la particule liquide dans le temps

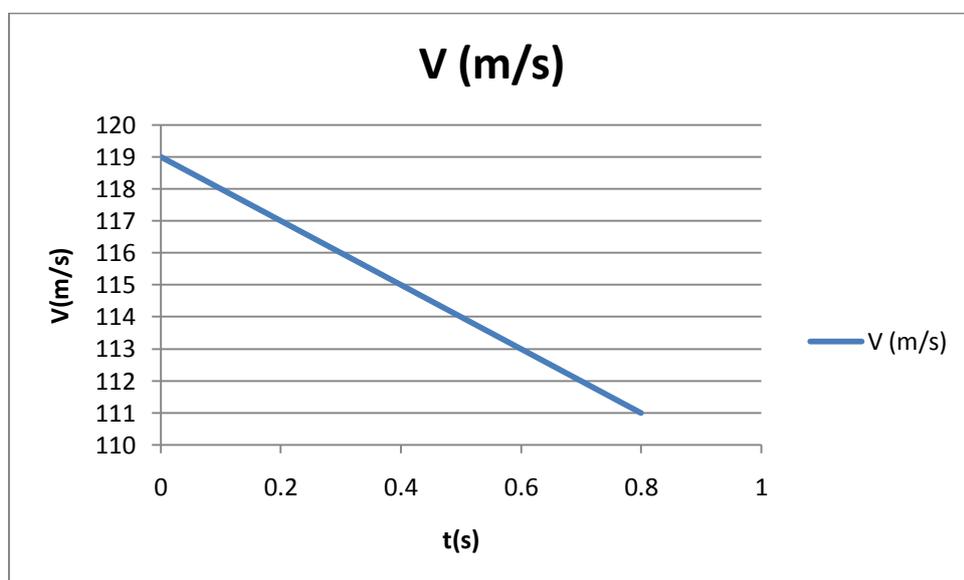


Figure 11: Courbe d'évolution du diamètre de la particule liquide dans le temps

IV-6) Discussion

On remarque aisément que la vitesse de la particule décroît en fonction du temps. Dans le même temps le diamètre de la particule décroît aussi et s'annulerait à un temps avoisinant 0,9s. Ce qui explique bien le fait que la goutte finira par s'évaporer au bout d'un certain temps. Car le diamètre s'annule.

Et à partir de cette courbe de vitesse, par intégration, on peut avoir la trajectoire de la goutte ou alors le rayon de l'espace pouvant être rafraîchi par un système.

V-) MODELISATION DU REFROIDISSEMENT

La diminution de la chaleur dans une enceinte (ou un système) induit une augmentation du froid. Donc l'évaporation est liée au refroidissement. Après avoir traduit mathématiquement le phénomène d'évaporation plus haut, il s'agira dans cette partie de trouver aussi un modèle caractérisant le refroidissement d'un système.

V-1) Hypothèses

Le système ici considéré est l'une des chambres d'étudiant du 2^{ie}. Précisons que la température interne de la chambre est fixée à 35°C pour une humidité relative de 60% (ceci dans l'optique de rester dans zone de confort thermique qui est celle d'humidité relative de 70%) et la température extérieure dans un premier temps sera prise égale à 45°C pour une humidité relative de 20%, car elle pourra varier avec la saison.

Supposons aussi que toutes les faces de la pièce sont soumises à la même température extérieure. Ceci pour se placer dans le cas le plus défavorable et faire un bon dimensionnement.

Admettons aussi qu'il n'y a personne dans la chambre. Ce qui signifie qu'il n'y a pas de charge due au métabolisme humain.

Faisons aussi l'hypothèse de régime permanent.

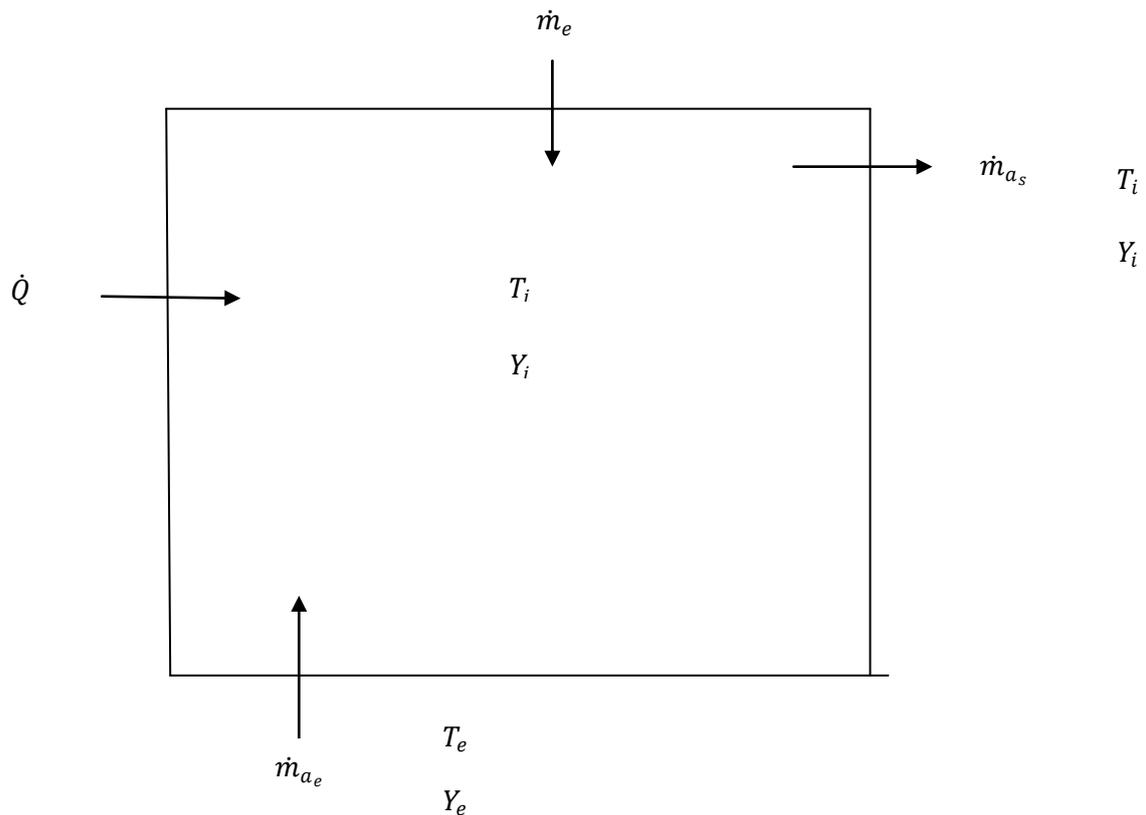


Figure 12: Schéma de la pièce à refroidir

Pour obtenir le modèle recherché, après avoir décrit le phénomène, place maintenant à une étude bilancielle tant du point de vue matière qu'énergétique.

V-2) Equations et Résultats

✚ Bilan de matière

Le bilan matière considérera deux constituants ; d'une part un bilan de matière de l'air sec, et d'autre part un bilan relatif à l'eau.

Une hypothèse que nous faisons à ce niveau c'est que nous travaillons en régime permanent.

- **Air sec**

On a :

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{a_e} - \dot{m}_{a_s}$$

(5-1)

Le régime étant permanent, on a :

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (5-2)$$

D'où

$$\dot{m}_{a_e} = \dot{m}_{a_s} \quad (5-3)$$

- **Eau**

On a :

$$\dot{m}_e + \dot{m}_{a_e} Y_e - \dot{m}_{a_s} Y_i = 0 \quad (5-4)$$

D'où

$$\dot{m}_e = \dot{m}_{a_e} Y_e - \dot{m}_{a_s} Y_i \quad (5-5)$$

Soit

$$\dot{m}_e = \dot{m}_{a_e} (Y_e - Y_i) \quad (5-6)$$

Bilan énergie

Le premier principe de la thermodynamique pour les systèmes ouverts nous donne :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt} + \sum_{i \text{ entrant}} \dot{m}_i h_i - \sum_{j \text{ sortant}} \dot{m}_j h_j \quad (5-7)$$

Appliqué à notre système qui est l'une des chambres de la cité universitaire du 2iE modélisée plus haut, on a :

$$\frac{dQ}{dt} + \dot{m}_{a_e} h_e - \dot{m}_{a_s} h_i = 0$$

(5-8)

Nous sommes en régime permanent et ce système n'échange aucun travail par unité de temps.

De plus on sait que :

$$\dot{m}_{a_e} = \dot{m}_{a_s}$$

D'où

$$\frac{dQ}{dt} + \dot{m}_{a_e}(h_e - h_i) = 0$$

(5-9)

- **Détermination de \dot{Q}**

En fait c'est le gain thermique de la pièce. Et nous supposons que cette charge est due à la conduction à travers les murs, le plafond et les vitrages.

$$\dot{Q} = U(T_e - T_i) \quad \text{où } U \text{ est le coefficient global d'échange thermique}$$

$$U = \frac{1}{R_T}$$

et

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_V}$$

Et leurs expressions respectives des résistances sont :

$$R_m = \frac{1}{h_i S_m} + \frac{e_m}{\lambda_m S_m} + \frac{1}{h_e S_m}$$

$$R_p = \frac{1}{h_i S_p} + \frac{e_p}{\lambda_p S_p} + \frac{1}{h_e S_p}$$

$$R_V = \frac{1}{h_i S_V} + \frac{e_V}{\lambda_V S_V} + \frac{1}{h_e S_V}$$

Les valeurs nécessaires à l'évaluation de cette résistance totale et par là le coefficient global de transfert sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau 1: Données caractéristiques de la pièce à refroidir

	Murs (brique de terre)	Plafond	Vitres
e (m)	0,1	0,15	0,05
λ (W/m°C)	1,1	1,4	0,78
S (m ²)	32,91	9,24	0,64

$$\text{Et } h_i = 9 \text{ W/m}^2\text{K} \quad h_e = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

En introduisant ces valeurs dans les expressions des résistances on obtient :

$$R_m = 1,12 \times 10^{-2} \text{ K/Wm}^2$$

$$R_p = 4,17 \times 10^{-2} \text{ K/Wm}^2$$

$$R_v = 5,34 \times 10^{-1} \text{ K/Wm}^2$$

D'où

$$R_T = 115,14 \text{ K/Wm}^2$$

Le gain thermique est alors :

$$\dot{Q} = \mathbf{1\ 152\ W}$$

Le gain thermique total dans la chambre est donc :

$$\dot{Q}_1 = \mathbf{1\ 152\ W}$$

- **Détermination des enthalpies**

L'équation rendant compte du bilan énergie devient alors :

$$\dot{m}_{a_e}(h_e - h_i) + \dot{Q}_1 = 0$$

Où h est l'enthalpie de l'air humide, donnée par la relation :

$$h = h_a + Yh_v$$

On a:

$$h_i = h_{a_i} + Y_i h_{v_i}$$

$$h_e = h_{a_e} + Y_e h_{v_e}$$

$$\text{Or } \begin{cases} Y_i = 0,0214 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}} \\ Y_e = 0,012 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}} \end{cases} \quad \text{car} \quad \begin{cases} T_i = 35^\circ\text{C} \\ T_e = 45^\circ\text{C} \end{cases}$$

De plus on a:

$$h_a = C_a T + Y[L_v(0) + C_v T]$$

Où

$$h_{a_i} = 1006 \times 35 + 0,0214[2\,501\,000 + 1\,840 \times 35]$$

$$h_{a_i} = 90,11 \text{ kJ/kg}_{\text{as}}$$

$$h_{a_e} = 1006 \times 45 + 0,012[2\,501\,000 + 1\,840 \times 45]$$

$$h_{a_e} = 75,81 \text{ kJ/kg}_{\text{as}}$$

On a alors :

$$h_i = 90,11 + 0,0214 \times 2429,9$$

$$\mathbf{h_i = 142,11 \text{ kJ/kg}_{\text{as}}}$$

$$h_e = 75,81 + 0,012 \times 2406,2$$

$$\mathbf{h_e = 105,17 \text{ kJ/kg}_{\text{as}}}$$

Résultat

- Détermination du débit d'eau

Le débit d'air entrant est donc :

$$\dot{m}_{a_e} = \frac{\dot{Q}}{(h_e - h_i)}$$

(5-10)

Soit

$$\dot{m}_{a_e} = 0,031 \text{ kg}_{as}/\text{S}$$

A partir de l'équation donnant le bilan de matière de l'eau qui est :

$$\dot{m}_e = \dot{m}_{a_e} (Y_i - Y_e)$$

On obtient le débit massique d'eau à injecter dans l'enceinte.

$$\dot{m}_e = 31,17 \text{ kg}_{eau}/\text{s}$$

$$\dot{m}_e = 3 \times 10^{-4} \text{ kg}_{eau}/\text{s}$$

Ou encore un débit massique d'eau de $3 \times 10^{-4} \text{ l/s}$

En utilisant la relation : $\dot{m}_e = \rho V S n$ on a :

$$D = \left(\frac{4\dot{m}_e}{\pi\rho V n} \right)^{1/2}$$

Qui donne $D = 57\mu\text{m}$ comme diamètre de la buse.

V-3) Discussion

Le débit d'eau trouvé est réaliste car il permet d'obtenir un diamètre de buse de l'ordre de $57\mu\text{m}$. Et nous savons que le diamètre des gouttelettes est inférieur au diamètre de la buse, donc dans notre cas inférieur à la valeur trouvée. Ce qui nous met le diamètre de nos gouttelettes dans la fourchette des diamètres classiques confère [I]. Cet intervalle allant de 20 à $100\mu\text{m}$.

Remarquons aussi que le débit d'eau que nous avons trouvé est deux fois inférieur au débit de la plus petite buse trouvée ($0,03 \text{ l/mn}$), et est aussi plus petit que le débit de la pompe trouvée (1 l/mn). Donc avec la pompe choisie nous pouvons refroidir plusieurs chambres semblables, chacune étant munie d'une seule buse.

VI) DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION

Les principaux éléments à dimensionner dans cette partie sont :

- La pompe
- La tuyauterie

VI-1) Dimensionnement de la tuyauterie

A ce niveau on choisira simplement dans la littérature des tuyaux correspondants à des buses de débits se rapprochant au notre. Et nous trouvons un tuyau de diamètre 10mm(en inox et peut supporter une pression de 70 bars) pour une buse de 0,03l/mn sous 70 bars.

VI-2) Dimensionnement de la pompe

Ici il faut d'abord calculer toute les pertes de charges (singulières et linéaires) avant de choisir la pompe, connaissant bien évidemment le débit de celle-ci. La perte de charge totale ou encore hauteur manométrique totale est :

$$HMT = pdc_L + pdc_S + Hg$$

Où

$$pdc_L = 0,5 \times L_T$$

D'où

$$HMT = 10,55 \text{ mCE}$$

La pompe choisie est donc (voir [D]) :

Groupe motopompe CAT en coffret 1 à 10 l/mn 2SF10 du constructeur CAT.

Sachant que mon débit d'eau est de 0,017 l/mn.

La pression de refoulement de la pompe est de 70 bars

VI-3) Energie consommée

La pompe choisie a une puissance de 3 ch soit 2 206,5 W. La consommation du système électrique est négligeable devant celle de la pompe. Et dans certain cas de figure on peut même le sursoir. Pour un temps de fonctionnement de 8h par jour, nous avons l'énergie consommée par le système qui est :

$$E = P_{pompe} \times t$$

Soit

$$E = 18 \text{ kJ}$$

VII) CONDITION DE MISE EN OEUVRE

Après avoir élaboré toute la théorie d'un système de brumisation, il est question maintenant d'étudier la faisabilité d'un tel procédé à l'échelle locale, notamment au Burkina-Faso. D'un point de vue pratique, il faut répondre à deux inquiétudes :

- Peut-on trouver sur place les différents éléments du système ?
- Y a-t-il de la compétence sur place ? C'est des gens pouvant monter le système et assurer à la longue sa maintenance ?

- Et enfin le coût d'une telle installation bien qu'adapté à notre contexte est-il abordable ?

Nous commencerons par une étude du coût de l'installation.

VII-1) Coût de l'installation

A titre de rappel le système dont nous voulons évaluer le coût reste celui étudié précédemment, visant à rafraichir notre chambre.

Le tableau donnant les coûts des différents éléments est le suivant :

Tableau 2: Coûts des différents éléments du système de brumisation

Constituant	Prix (Euros)
Pompe	61
Buse	712,5
Porte buse	449,16
Tuyaux inox	40,6
Manomètre	28,48
Kit de filtration et accessoire	119
Système électrique	533,33
Main d'œuvre	487
TOTAL	2431,07

Les références sont données en [D]

Soit 1 864 631F CFA, en appliquant un facteur de 1,18 pour tenir compte du transport de certains éléments jusqu'au Burkina.

VII-2) Faisabilité de l'installation

+ Disponibilité des équipements

D'un point de vue local, la plupart des éléments entrant dans la constitution du système peuvent être trouvés sur place. Notamment les pompes, la tuyauterie, le manomètre, et tout ce qui entre dans le système électrique (connecteur pour électrovanne, temporisateur, etc...)

Les éléments dont il nous faut absolument importer parceque après une enquête sur le marché de Ouagadougou je n'en ai pas trouvé sont les buses et leurs supports.

+ Montage

Le montage d'une telle installation est assez aisé pour un électricien. Car il suffit de monter une pompe sur un circuit d'eau de ville et la raccorder à notre réseau de distribution de brumisation, et coupler le tout à un petit circuit électrique. Un guide d'installation se trouve en annexe [III].

De plus, on peut de passer de plusieurs éléments et monter un système qui fonctionne tout aussi. Ces éléments peuvent être :

- La pompe
- Le système électrique
- Les supports pour buses

Mais l'inconvénient dans ce cas est qu'on se sert juste de la pression d'arrivée de l'eau de ville, qui n'est que de l'ordre de 5 bars. Et par conséquent, nous avons des gouttes de diamètre plus grand.

Ces gouttes malgré leur diamètre élevé, parviennent à s'évaporer quand même lorsqu'on se trouve en plein air. Donc pour ces systèmes simplifiés, il est préférable qu'on ne se trouve pas dans une enceinte fermée. Car en plein air le débit massique de renouvellement d'air est plus grand.

+ Avantage de la brumisation

Le principal avantage est celui de l'économie d'énergie car avec une puissance comme celle que nous avons (celle de la pompe car elle consomme plus), nous pouvons rafraichir plusieurs chambres. Pourtant s'il faut utiliser de la climatisation, un climatiseur par chambre coûterait plus cher.

Le deuxième avantage est lui de la réduction de la quantité de CO₂ émis, comparativement à celle émise par utilisation d'une climatisation.

N'oublions pas que la souplesse de l'équipement qui est aussi un atout pour ce type de système.

+ Inconvénients

Un inconvénient de ce procédé est qu'il est un peu consommateur en énergie même si la consommation pour notre cas est faible.

Un autre ce sont les risques de maladies liées à l'utilisation d'une eau pas traitée dans un tel système.

CONCLUSION

La brumisation des gouttelettes d'eau dans l'écoulement d'air permet de refroidir celui-ci. Ceci parce que cette eau en s'évaporant emporte une partie de l'énergie contenue dans l'enceinte ou l'espace où cette eau est injectée.

Nous avons d'abord effectué une étude bibliographique sur le traitement de l'air de façon générale, ensuite nous avons développé particulièrement la brumisation. Ceci en présentant même quelques schémas type d'une installation de brumisation.

Ensuite nous avons posé les bases d'un bon dimensionnement d'un système de brumisation. Ceci en procédant à une étude théorique du phénomène allant de la modélisation de l'évaporation jusqu'à la modélisation du refroidissement. Et nous avons noté des diamètres de gouttelettes inférieurs à $57\mu\text{m}$ (ce qui est conforme avec la pratique), avec un débit d'injection d'eau de $0,017 \text{ l/mn}$. Nous sommes arrivés aussi à déterminer la trajectoire suivie par une goutte jusqu'à son évaporation complète, ce qui nous permet dans le temps, d'estimer le rayon de refroidissement couvert par une installation.

Pour terminer nous avons étudié les conditions de faisabilité d'un tel système au Burkina-Faso. Et nous sommes arrivés à la conclusion selon laquelle il est possible de monter même si ce n'est qu'un modèle simplifié sur place. Déjà qu'il en existe et qui fonctionne correctement en faisant juste un bon entretien.

Facile à mettre en œuvre, ayant un coût abordable, les systèmes de brumisation ne seraient-ils pas une alternative intéressante aux systèmes de climatisation classique ?

Bibliographie

Ouvrages

- [1] Arfaoui Akila (2009), Etude de la brumisation d'un condenseur à air sur un pilote exploratoire, Mémoire de Master ingénierie et technologie, Université Henri Poincaré Nancy1
- [2] Didier Lecomte (2010), Bilans et transferts, Cours de Procédés Energétiques, 2iE
- [3] Didier Lecomte (2010), Eléments de transfert de matière, Cours de Procédés énergétiques, 2iE
- [4] Koichi Asano (2006), Mass transfer from fundamentals to modern industrial applications,
- [5] Sylvain Salvador (2008), Transfert convectif de matière , Ecole des mines d'Albi
- [6] Yves Jannot (2005), Air humide, Cours de froid, 2iE

Sites internet

- [A] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Air>
- [B] <http://www.priceminister.com/offer/buy/74463037/Kit-ligne-de-brumisation-polyamide-70x-Buses-Brumissimo---Pour-brumisateur-haute-pression-Chauffage-et-climatisation.html>
- [C] <http://www.twenga.fr/dir-Electromenager,Assainissement-de-l-air,Pompe-de-brumisation>
- [D] <http://aero-eau.oxatis.com/PBSCatalog.asp?ActionID=67174912&PBCATID=389663&PBCATName=02-11%20Buses%20Inox%20Nettoyable>
- [E] <http://brumisateurs.eboaz.com/brumisateur/haute-pression/>

ANNEXE I: Résolution du modèle d'évaporation

Comme déjà mentionné, nous précisons que cette résolution est analytique.

Le système différentiel est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} a \left(\frac{V_x}{D}\right)^{3/2} = \frac{dV_x}{dt} \\ a \left(\frac{V_y}{D}\right)^{3/2} = \frac{dV_y}{dt} \\ -g - a \left(\frac{V_z}{D}\right)^{3/2} = \frac{dV_z}{dt} \\ \frac{dD^3}{dt} = -2,7 \times 10^{-12} V^{1/2} D^{3/2} \end{array} \right.$$

On a :

$$\left\{ \begin{array}{l} -g - a \left(\frac{V}{D}\right)^{3/2} = \frac{dV}{dt} \\ \frac{dD^3}{dt} = -2,7 \times 10^{-12} V^{1/2} D^{3/2} \end{array} \right.$$

Ou encore

$$\left\{ \begin{array}{l} g + a \frac{V^{3/2}}{Z^{1/2}} = \frac{dV}{dt} = f(V, Z) \\ -2,7 \times 10^{-12} V^{1/2} Z^{1/2} = \frac{dZ}{dt} = g(V, Z) \end{array} \right.$$

Avec : $c = 1,72 \times 10^{-7}$ $b = 2,54 \times 10^{-9}$ $a = 4,64 \times 10^{-6}$ $Z = D^3$

En appliquant la méthode de résolution d'Euler qui est semblable à celle de Runge- Kutta d'ordre 1 on a :

$$\begin{cases} V_{n+1} = V_n + \Delta t \times f(V_n, Z_n) \\ Z_{n+1} = Z_n + \Delta t \times g(V_n, Z_n) \end{cases}$$

En utilisant le tableur Excel on obtient les résultats présentés sur les figures

valeurs	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$v(\text{m}^2/\text{s})$	$g(\text{m}^2/\text{s})$
Eau	1000	$8,91 \times 10^{-7}$	10
Air	1,117	$1,57 \times 10^{-5}$	10

ANNEXE II Caractéristiques physiques de l'air à la pression atmosphérique

Air à pression atmosphérique							
T	ρ	μ	ν	C_p	λ	α	Pr
K	kg.m^{-3}	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$	m^2s^{-1}	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	m^2s^{-1}	-
250	1,413	$1,60 \times 10^{-5}$	$0,949 \times 10^{-5}$	1005	0,0223	$1,32 \times 10^{-5}$	0,722
300	1,177	$1,85 \times 10^{-5}$	$1,57 \times 10^{-5}$	1006	0,0262	$2,22 \times 10^{-5}$	0,708
350	0,998	$2,08 \times 10^{-5}$	$2,08 \times 10^{-5}$	1009	0,0300	$2,98 \times 10^{-5}$	0,697
400	0,883	$2,29 \times 10^{-5}$	$2,59 \times 10^{-5}$	1014	0,0337	$3,76 \times 10^{-5}$	0,689
450	0,783	$2,48 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-5}$	1021	0,0371	$4,22 \times 10^{-5}$	0,683
500	0,705	$2,67 \times 10^{-5}$	$3,69 \times 10^{-5}$	1030	0,0404	$5,57 \times 10^{-5}$	0,680
550	0,642	$2,85 \times 10^{-5}$	$4,43 \times 10^{-5}$	1039	0,0436	$6,53 \times 10^{-5}$	0,680
600	0,588	$3,02 \times 10^{-5}$	$5,13 \times 10^{-5}$	1055	0,0466	$7,51 \times 10^{-5}$	0,680
650	0,543	$3,18 \times 10^{-5}$	$5,85 \times 10^{-5}$	1063	0,0495	$8,58 \times 10^{-5}$	0,682
700	0,503	$3,33 \times 10^{-5}$	$6,63 \times 10^{-5}$	1075	0,0523	$9,67 \times 10^{-5}$	0,684
750	0,471	$3,48 \times 10^{-5}$	$7,39 \times 10^{-5}$	1086	0,0551	$10,8 \times 10^{-5}$	0,686
800	0,441	$3,63 \times 10^{-5}$	$8,23 \times 10^{-5}$	1098	0,0578	$12,0 \times 10^{-5}$	0,689
850	0,415	$3,77 \times 10^{-5}$	$9,07 \times 10^{-5}$	1110	0,0603	$13,1 \times 10^{-5}$	0,692
900	0,392	$3,90 \times 10^{-5}$	$9,93 \times 10^{-5}$	1121	0,0628	$14,3 \times 10^{-5}$	0,696
950	0,372	$4,02 \times 10^{-5}$	$10,8 \times 10^{-5}$	1132	0,0653	$15,5 \times 10^{-5}$	0,699
1000	0,352	$4,15 \times 10^{-5}$	$11,8 \times 10^{-5}$	1142	0,0675	$16,8 \times 10^{-5}$	0,702

1100	0,320	$4,40 \times 10^{-5}$	$13,7 \times 10^{-5}$	1161	0,0723	$19,5 \times 10^{-5}$	0,706
1200	0,295	$4,63 \times 10^{-5}$	$15,7 \times 10^{-5}$	1179	0,0763	$22,0 \times 10^{-5}$	0,714
1300	0,271	$4,85 \times 10^{-5}$	$17,9 \times 10^{-5}$	1197	0,0803	$24,8 \times 10^{-5}$	0,722

ANNEXE III Guide d'installation d'un système de brumisation

INSTALLATION

KIT rampe de brumisation :

LA FILTRATION

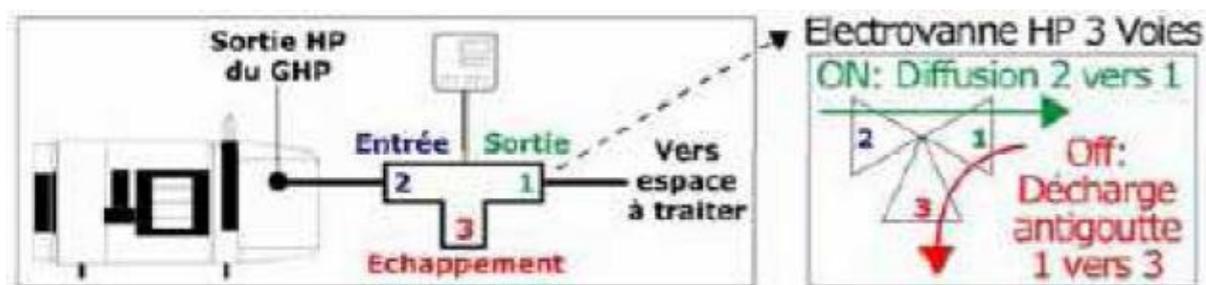
- Fixer au mur le support du Filtre.
- Fixer l'ensemble du Filtre sur le support, en respectant le sens de circulation d'eau indiqué par une petite flèche sur la tête du bocal.
- Raccorder l'arrivée d'eau sur l'entrée du Filtre.
- Raccorder la sortie du Filtre avec le tuyau de raccordement livré.
- Laisser l'autre côté du tuyau en attente de branchement.

LE GROUPE HAUTE PRESSION (GHP)

- Placer le GHP à l'emplacement définit, en prenant soin de le positionner sur un plan de niveau.
- Vérifier que le niveau d'huile soit correct, sinon procéder comme indiqué au paragraphe « GROUPE HAUTE PRESSION » du chapitre « ENTRETIEN – MAINTENANCE »
- Raccorder le tuyau connecté au Filtre, sur l'entrée du GHP.

L'ELECTROVANNE 3 VOIES

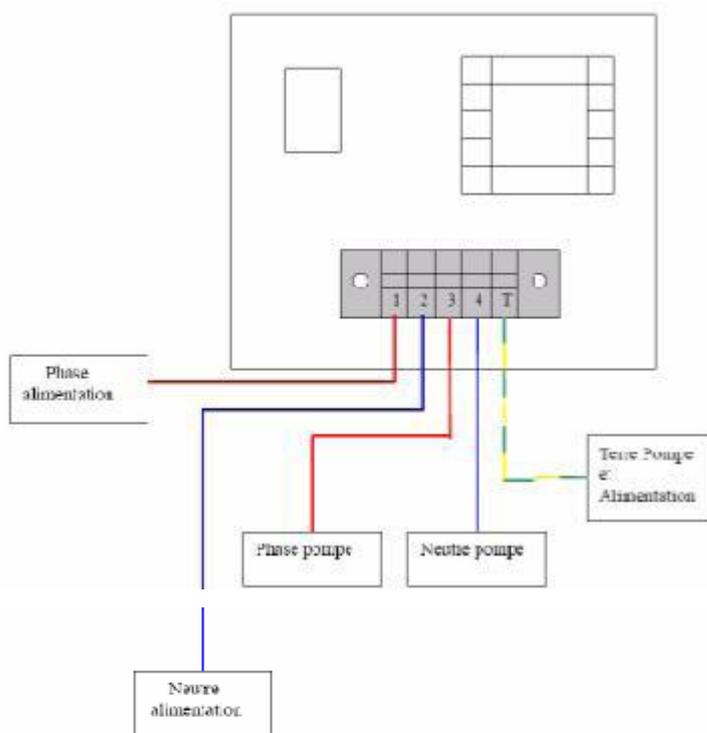
Ce système se compose d'une électrovanne HP 3 Voies qui doit être positionnée en premier sur le circuit HP. Son montage se réalise ainsi :



- Raccorder la sortie du GHP sur l'Entrée de l'Electrovanne HP 3 Voies (Repère « 2 »).
- Insérer sur l'échappement de l'Electrovanne HP 3 Voies (Repère « 3 »), une extrémité Du tuyau de canalisation de la décharge, l'autre extrémité étant positionnée en un point d'écoulement.
- Sur la Sortie de l'Electrovanne HP 3 Voies (Repère « 1 »), réaliser l'installation de l'espace à traiter.

BRANCHEMENT DU TEMPORISATEUR OU DE LA CENTRALE HYGRO/TEMPERATURE

- Couper l'alimentation électrique en amont de l'installation
- Réaliser le branchement de la pompe HP au temporisateur, en respectant le couplage des fils (Voir schéma ci-dessous).



L'installation se réalise en ceinture extérieure de l'Espace à Traiter. On peut y adjoindre une ou

plusieurs Rampes centrales selon le volume à traiter.

Avant de procéder à la « REALISATION DE L'INSTALLATION », prendre connaissance des quatre

paragraphes suivants :

1 - REPARTITION DES BUSES DE DIFFUSION :

En général :

- Les espaces non couverts : 1 buse de diffusion tous les 75cm.
- Les espaces couverts : 1 buse tous les 1m20.
- La hauteur de fixation des Rampes doit se situer entre 2,5m et 4m.
- L'orientation de la diffusion se règlera selon le besoin.
- Eviter tout obstacle dans l'environnement immédiat de la diffusion : risque de point de rosée.

2 - UTILISATION DES RACCORDS HP A EMBOITEMENT :

Les raccords HP à Emboîtement sont conçus pour une installation simple et rapide. Ils ne doivent s'utiliser qu'avec le Tube HP Nylon fournit avec votre Kit

Le montage s'effectue en 2 temps :

-La coupe du Tube HP Nylon : elle doit s'effectuer à l'aide du Coupe Tube, afin d'obtenir une coupe franche.

-Le montage du Tube HP Nylon dans le raccord s'effectue par emboîtement.

-Après emboîtement, tirer vigoureusement en opposition le raccord et le Tube HP Nylon pour s'assurer d'un bon montage.

Le démontage des raccords :

Pour démonter un raccord, pousser à fond la bague d'emboîtement tout en enfonçant le Tube HP Nylon, maintenir la bague compressée contre le raccord et tirer le Tube HP Nylon.

Conseil : si vous n'arrivez pas à retirer le raccord, s'aider avec une clé de 10 posée sur la bague.

3 - FIXATION DES RAMPES DE DIFFUSION ET DU TUBE HP NYLON :

Les Kits sont fournis avec des Colliers Iso phoniques servant à la fixation des rampes de diffusion

ainsi qu'au Tube HP Nylon.

La fixation s'effectue de la façon suivante :

-Définir l'emplacement de la Buse de diffusion.

-Emboîter le Tube HP Nylon précédemment coupé dans chaque extrémité du Raccord à fixer.

-Pointer les emplacements des Colliers Iso phoniques entre 10 et 15cm de part et d'autre du raccord.

-Insérer le Tube HP Nylon dans le Collier Iso phonique.

-Introduire la vis en maintenant le côté plat du Collier Iso phonique contre le support.

-Visser raisonnablement à l'endroit pointé ou chevillé, le serrage du Tube HP Nylon s'effectue automatiquement.

4 – CHEMINEMENT DE L'EAU, POSE DU TUBE HP :

Quelques soit le type d'installation, il est impératif, en cas de besoin, de pouvoir vidanger toute

l'eau du circuit. Cela signifie que l'installation ne doit pas comporter de siphon non vidangeable.

REALISATION DE L'INSTALLATION

- Raccorder le Tube HP Nylon à la sortie du coffret et dérouler la couronne de Tube HP Nylon

jusqu'à l'Espace à Traiter.

- Fixer le Tube HP Nylon.

- Insérer les raccords et les portes buses selon les préconisations et les méthodes de pose précédemment détaillées dans ce chapitre.

- A chaque extrémité des Rampes de Diffusion, insérer un Bouchon Fin de Ligne.

NE PAS VISSER LES BUSES DE DIFFUSION SUR LES PORTES BUSES. CETTE OPERATION DEVRA

ETRE EFFECTUEE LORS DE LA MISE EN SERVICE.

Cette phase est terminée. Poursuivre l'installation au paragraphe « Réglage du temporisateur ».

