

République Algérienne Démocratique Et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Hassiba Ben Bouali – Chlef

جامعة حسيبة بن بوعلي – الشلف

Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur

Département de Mécanique

Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Magister

Option : Energétique

Etude expérimentale des performances de la ventilation du blé dans un silo à modèle réduit

Présenté par :

ZIANE BERROUDJA Mohamed Amine

Jury composé de :

MM. LOUKARFI Larbi	Professeur	UHBC	Président
BOUTHIBA Abdelkader	M. Conf	UHBC	Examineur
ZAARAOUI Abdelkader	M. Conf	CU Khemis Meliana	Examineur
BAHLOULI Abdelkrim	Directeur OAIC	Khemis Meliana	Invité
BETTAHAR Ahmed	Professeur	UHBC	Directeur de mémoire
HUSSINE Amar	MACC	UHBC	Co-Directeur

Année universitaire : 2008/2009

Tables des matières

Remerciements	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Résumé	
Introduction et but du sujet	

Chapitre I : Etude Bibliographique

I.1 Généralités	05
I.1.1 Introduction	05
I.1.2 Notions de base	05
I.1 Généralités	05
I.2 Développement d'une théorie simplifiée à partir d'un essai de laboratoire	09
I.2.1 Conditions expérimentales	09
I.3 Condition de stockage	20
I.3.1 Les silos	20
I.3.2 Principe de stockage	22
I.3.5 Durée d'entreposage maximal du grain humide	23
I.4 Problèmes inhérents au stockage	25
I.4.1 Les causes d'altération	25
I.5 Techniques usuelles de stockage	28
I.5.1 Le séchage des grains	28
I.5.1.1 Définition	28
I.5.1.2 Séchage artificiel	28
I.5.1.3 Avantages du séchage	28
I.5.1.4 Types de séchoir	29

Chapitre II : Ventilation

II.1 Généralités	32
II.1.1 Introduction	32

II.2 Principe de la Ventilation des grains	32
II.2-1 Introduction	32
II.3 Les ventilateurs	37
II.3.1 Ventilateur hélicoïde ou axial	37
II.3.2 Ventilateur centrifuge	37
II.3.3 Positionnement du ventilateur	38
II.3.4 Modes de ventilation	39
II.3.5 Avantages et inconvénients des modes de ventilation	39
II.4 Base de calcul de la ventilation des grains	41
II.4.1 Éléments théoriques	41
II.4.2 Courbe d'équilibre d'humidité air -grain	42
II.4.3 Diagramme de l'air humide (ou diagramme enthalpique de Mollier du mélange air- vapeur d'eau)	43
II.4.3.1 Définition de l'air humide	43
II.4.4 Evolution du point caractéristique sur le diagramme de l'air humide	46
II.4.4.1 Réchauffage de l'air	46
II.4.4.2 Séchage ou réhumidification du grain	46
II.4.4.3 Refroidissement du grain par la ventilation	48
II.4.5 Calcul énergétique	51
II.4.5.1 les Pertes de charge dues au système de répartition de l'air	51
II.4.5.2 Pertes de charges dues au système de diffusion de l'air dans le grain	52
II.4.5.2.1 Diffusion par faux fond	52
II.4.5.2.2 Diffusion par cheminée centrale	52
II.4.5.2.3 Diffusion par gaines	52
II.4.6 Conditions de ventilation	53

Chapitre III : Interaction entre eau -grains dans les silos

III.1 Généralités	55
III.1.1 Introduction	55
III.2 Teneur en eau (H_2O %)	55
III.3 Concepts thermodynamiques d'activité de l'eau	55
III.4 Corrélation entre A_w et la teneur en eau : la courbe isotherme de sorption- désorption	56
III.5 Transfert de chaleur et de vapeur d'eau dans le grain	56

III.6 Propriétés thermiques des grains	57
III.6.1 Définition	57
III.6.2 Facteurs agissant sur la production de chaleur et de gaz carbonique	58
III.6.2.1 Action de la température	58
III.6.2.2 Action d'humidité	58
III.6.2.3 Formule de dégagement de gaz carbonique	58
III.7 Masse volumique apparente	59
III.8 Pertes de charges dues à l'écoulement unidimensionnel de l'air à travers les masses de grains	59
III.8.1 Influence de la vitesse de l'air	59

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1 Dispositif expérimental	61
IV.1.1 Description détaillée des éléments	61
IV.1.1.1 Le silo	61
IV.1.1.1.1 Double parois	62
IV.1.1.1.2 Chapeau	62
IV.1.1.1.3 Porte de visite	63
IV.1.1.1.4 Planchers	63
1. Plancher entièrement perforé	63
2. Plancher en gaines surajoutées	63
3. Plancher en forme de X	64
e. Orifices de prélèvement	64
f. Table du silo (support)	65
IV.1.1.2 Ventilateur	65
IV.1.1.3 Anémomètre	68
IV.1.1.4 Thermomètre	69
IV.1.1.5 Humidimètre	70
IV.1.1.6 Sonde d'échantillonnage	71
IV.2 Méthodes	71
IV.2.1 Mesures des paramètres de fonctionnement à cellule vide Débit, vitesse, pression statique	72
IV.2.1.1 À la sortie du ventilateur	72

IV.2.1.2 À la sortie du plancher entièrement perforée	73
IV.2.1.3 À la sortie du deuxième plancher en X	73
IV.2.1.4 À la sortie du troisième planché en gaines surajoutées	74
IV.2.1.2 Débit, vitesse, pression statique à travers la masse granulaire	74
IV.2.1.3 Température et humidité	76
IV.2.2 Déroulement des essais et prises des mesures	78
<i>IV.2.2.1</i> Avant ventilation	79
<i>IV.2.2.2</i> Sous ventilation	80
<i>IV.2.2.3</i> Déroulement des essais	80

Chapitre VI : Résultats et discussions

V.1 Température et humidité avant ventilation	82
V.2 Evolution de la température dans le temps en cours de ventilation	85
V.3 Evolution de l'humidité des grains	91
V.4 courbes de Synthèse	96
Conclusion générale	100
Références bibliographiques	102
Annexes	108

Listes des figures :

Figure N°	Page
I.1 : Résultats d'un essai de laboratoire	06
I.2 : Progression d'une zone de refroidissement	07
I.3 : Evolution du pouvoir d'évaporation de l'air en fonction de la durée de ventilation	13
I.4 : Silo à grain	22
I.5 : Effet de la température et de la teneur en eau sur la durée de l'entreposage	24
I.6 : Zone de stockage.	25
II.1 Déplacement de l'humidité en automne et en hiver	33
II.2 : Déplacement de l'humidité au printemps et en été	34
II.3 : Ventilateur axial	37
II.4 : Ventilateurs centrifuge	38
II.5 : Positionnement du ventilateur	39
II.6 : Courbe d'équilibre Air –Blé	42
II.7 : Diagramme de l'air humide	45
II.8 : Réchauffement de l'air à teneur en eau sur le diagramme de l'air humide	46
II.9 : Séchage isenthalpique	47
II.10 : Réhumidification de type isenthalpique	48
II.11 : Evolution du point caractéristique de l'air sur le diagramme de l'air humide au cours d'une ventilation, avec de l'air dont l' H.R est inférieure à l'H.RE.	49
II.12 : Evolution du point caractéristique de l'air sur le diagramme de l'air humide	51
IV.1 : silo expérimental à échelle réduite	61
IV.2 : double paroi	62
IV.3 : chapeau du silo	62
IV.4 : porte visite	63
IV.5 : plancher entièrement perforé	63
IV.6: plancher en gaines surajoutées	64
IV.7 : Plancher en forme de x	64
IV.8 : Orifices de prélèvement	64
IV.9 : Table du silo	65
IV.10 : Ventilateur centrifuge, Modèle MB 12/5 T2 1/7	67
IV.11: Anémomètre, VELOCICALC 8386de TSI	68
IV.12 : Thermomètre, HI 8757	69
IV.13 : Humidimètre	70
IV.14 : Sonde d'échantillonnage	71
IV.15 : Points de mesures	72
IV.16 : Evolution de la perte de charge dans la masse de grain	76
IV.17 : Emplacement de la sonde de température	78
IV.18 : Emplacement de la sonde d'échantillonnage	79
V.1 : Répartition de la température dans le silo	82

V.2 : Répartition de l'humidité dans le silo	83
V.3 : Plancher entièrement perforé : Evolution de la température dans le temps à 10cm de la paroi	86
V.4 : Plancher entièrement perforé : Evolution de la température dans le temps à 30cm de la paroi	86
V.5 : Plancher entièrement perforé : Evolution de la température dans le temps à 50cm de la paroi	86
V.6 : Plancher en x: Evolution de la température dans le temps à 10cm de la paroi	87
V.7 : Plancher en x: Evolution de la température dans le temps à 30cm de la paroi	87
V.8 : Plancher en x: Evolution de la température dans le temps à 50cm de la paroi	87
V.9 : Plancher en gaines surajoutées : Evolution de la température dans le temps à 10cm de la paroi	88
V.10 : Plancher en gaines surajoutées : Evolution de la température dans le temps à 30cm de la paroi	88
V.11 : Plancher en gaines surajoutées : Evolution de la température dans le temps à 50cm de la paroi	88
V. 12 : Progression d'une zone de transition dans la masse de grain.	90
V.13 : plancher entièrement perforer : Evolution de l'humidité dans le temps à 10cm de la paroi	92
V.14 : plancher entièrement perforer : Evolution de l'humidité dans le temps à 30cm de la paroi	92
V.15 : plancher entièrement perforer : Evolution de l'humidité dans le temps à 50cm de la paroi	92
V.16 : plancher en x : Evolution de l'humidité dans le temps à 10cm de la paroi	93
V.17 : plancher en x : Evolution de l'humidité dans le temps à 30cm de la paroi	93
V.18 : plancher en x : Evolution de l'humidité dans le temps à 50cm de la paroi	93
V.19 : plancher en gaines surajoutées : Evolution de l'humidité dans le temps à 10cm de la paroi	94
V.20 : plancher en gaines surajoutées : Evolution de l'humidité dans le temps à 30cm de la paroi	94
V.21 : plancher en gaines surajoutées : Evolution de l'humidité dans le temps à 50cm de la paroi	94
V.22 : Evolution de la température à 10cm de la paroi et à une hauteur de 1.60m de grain pour les trois plancher	96
V.23 : Evolution de l'humidité à 10cm de la paroi et à une hauteur de 1.60m de grain pour les trois planchers	97

Listes des tableaux :

Tableau N°	Page
I.1 : caractéristiques des paramètres de l'air	12
II.1 : Le temps de la mise en marche de la ventilation pendant l'hiver	37
IV.1 : Coefficient k1 et k2	66
IV.2 : Caractéristiques du thermomètre	69
IV.3 : Mesures à la sortie du ventilateur	72
IV.4 : Mesures à la sortie du premier plancher entièrement perforé	73
IV.5 : Mesures à la sortie du deuxième plancher en X	73
IV.6 : Mesures à la sortie du troisième planché en gaines surajoutées	74
IV.7 : Débit, vitesse, pression statique à travers la masse granulaire	75
V.1 : Les paramètres statistiques calculés	84
V.2 : Résultats d'analyse de la variance	85

Nomenclature :

Symboles	Définition	Unité
c	Chaleur massique.	(kcal/kg, °C)
t	Température	(°C).
q	Débit massique.	(kg/h)
Q_v	Débit volumique	(m^3 / h)
ρ	Masse volumique	(kg / m^3)
V	Vitesse	(m/ h)
S	Section	(m^2)
h	Enthalpies	kcal/ kg d'air sec
W	Teneur en eau	kg d'eau / kg d'air sec
T_R	Temps de refroidissement	(heures)
ε	Humidité relative (H.R)	(%)
E	Perte d'eau par quintal	(kg/100kg).
H	Hauteur	(Mètre)
ρ_g	Masse volumique du grain	(kg/ m^3)
c_g	Chaleur spécifique du grain.	(kcal / kg. c°)
c_a	Chaleur spécifique moyenne de l'air	(kcal / kg. C°)
ρ_a	Masse volumique moyenne de l'air au cours de la transformation 2-3	(kg / m^3)
V_g	Vitesse de propagation de la zone de transition	(m / h)
f_g	Pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit.	(mmCE)
P	Masse de grain contenu dans la cellule	(kg).
V_a	Vitesse de l'air dans le grain	(m / h).
f	Pression partielle de vapeur d'eau de l'air.	(mmCE)
T	Température humide	(C°)
v	Volume	(m^3)
ΔP	Pertes de charge singulières	(mmCE).
R	rayon	(Cm)
A_w	Activité de l'eau	(%)
P_v	Poids volumique	(kg / m^3)
P_s	Poids spécifique en place	(kg / m^3)
μ	Potentiel chimique de l'eau dans le produit.	-
μ'	Potentiel chimique l'eau pure à la même température T (°k) et à la même pression P	-

k_1 et k_2	Coefficients dépendant de la nature du grain et de sa teneur en eau.	-
q_v	Débit spécifique volumique.	(m^3 / h)
H_i	Humidité initiale	(%).
H_f	Humidité finale	(%).
R	constante des gaz parfaits	-
K	constante dépendant de l'humidité	-
p_0	Pression statique à la sortie du ventilateur	(mmCE)
p_1	Pression statique à la sortie du plancher entièrement perforée	(mmCE)
p_2	Pression statique à la sortie du plancher en X	(mmCE)
p_3	Pression statique à la sortie du planché en gaines surajoutées	(mmCE)
SCE	Somme des carrés entre classes	-
d.l.	Degré de liberté	-
F :	Test de Fischeur	-
m'	Masse de grain, après le passage à l'étuve	(g)
m_0	Masse de grain, de la prise d'essai	(g).

Résumé

Résumé :

Cette étude est une contribution au développement d'un thème sur le comportement du blé durant l'opération de ventilation. Le choix de ce sujet entre dans le cadre du développement d'un projet de recherche sur le blé, actuellement en cours à la faculté d'Agronomie, U.H.B de Chléf.

Nous présentons une étude expérimentale de ventilation du blé dans un silo à échelle réduite. Des expériences sur les différentes performances influentes sur la ventilation (mode de diffusion de l'air, pression et débit de l'air, température et humidité), ont été effectuées.

Les résultats expérimentaux obtenus sont en bonne concordance avec les résultats trouvés dans la littérature.

Introduction et objectif du sujet :

Les grains constituent depuis toujours la principale ressource alimentaire de l'homme et des animaux domestiques. C'est pourquoi la connaissance des phénomènes régissant leur conservation et la maîtrise des techniques de leur stockage est déterminante pour la survie de millions de personnes. Il n'est donc pas surprenant que chaque société, avec sa culture et ses moyens techniques propres, ait accordé le plus grand intérêt à cette question.

Lorsque les sociétés primitives sont passées d'une économie nomade de cueillette à une agriculture sédentaire, elles se sont trouvées confrontées à un problème majeur, dont l'acuité demeure toujours. C'est celui de la bonne conservation des denrées entre deux récoltes successives.

On ne saurait trop souligné le fait qu'un stocke (dans un silo) de grains est un ensemble d'êtres vivants, en étroite association et en constante évolution écologique.

Cette structure granulaire offre un très grand intérêt, car il est possible d'insuffler de l'air à travers la masse des grains (ventilation), et par ce moyen :

- d'évacuer facilement chaleur et humidité excédentaires.
- de modifier la composition de l'atmosphère intercielles (concentration, CO_2 , O_2 , N_2)

La ventilation des grains est utilisée pour la conservation des grains secs, le maintien des grains en attente de séchage, le séchage en deux étapes et le système mixte de séchage- conservation à basse température. La ventilation évacue la chaleur et l'humidité qui résultent de l'activité biologique des grains et des micro- organismes présents dans le silo.

La ventilation des grains secs sert également à refroidir et à uniformiser la température du silo, à maintenir et corriger sa température et à changer périodiquement l'air interstitiel des grains.

Le phénomène de transfert de chaleur et de vapeur d'eau dans les silos de stockage a fait l'objet pendant ces dernières décennies de nombreuses études tant

Introduction

expérimentales que théoriques. Ces études montrent l'extrême complexité de ces phénomènes, surtout leur aspect biologique.

Dans une cellule de grains, il y a toujours une hétérogénéité des températures, et des teneurs en eau. Par conséquent, le problème posé pour la conservation est un problème dynamique, auquel la connaissance des fonctions d'équilibre qui sont la température et la teneur en humidité du grain, ne pourrait apporter à elle seule les éléments d'une solution.

La présente étude est présentée sous cinq chapitres, une introduction et une conclusion générale.

Chapitre I : Etude Bibliographique

Chapitre II : Ventilation

Chapitre III : Interaction entre eau -grains dans les silos

Chapitre IV : Matériels et méthodes

Chapitre V : Résultats et discussions

Chapitre I
Chapitre I
Etude bibliographique
Etude bibliographique

I.1 Généralités :

I.1.1 Introduction :

La nécessité de stocker les céréales relève de plusieurs facteurs, le principal est l'étalement ponctuel de la consommation de denrées dans l'année. De nombreux facteurs socio-économiques s'y ajoutent dont l'importance pour le revenu des paysans est énorme.

Si l'on destine le blé à l'alimentation humaine, il importe assez peu que le grain ait perdu de son pouvoir germinatif. Mais il faut éviter qu'il ait subi tout début de germination même imperceptible, qui le rend impropre à la panification. Toute atteinte par les moisissures dont le goût se communiquerait à la farine et rendrait le pain immangeable [6].

Si le blé est destiné à l'alimentation des animaux, il faudra éviter qu'il ait un goût fermenté, mais là encore, la valeur germinative importera peu.

Enfin, si le blé est conservé pour la semence, c'est la faculté germinative qui aura une importance primordiale [2].

I.1.2 Notions de base [17] :

I.1.2.1 Le grain respire

En consommant l'oxygène de l'air, le

Blé rejette:

- de la chaleur
- du gaz carbonique
- de l'eau



C'est l'amidon des réserves qui, en présence d'oxygène, se transforme en eau et en gaz carbonique.

Cette réaction chimique dégage beaucoup de chaleur.

En l'absence d'oxygène, la respiration peut être remplacée par la fermentation des grains...

I.1.2.2 Plus il est chaud, plus le grain respire



Inversement, plus le blé est froid, moins il respire.

Lorsque la température du grain augmente de 5°C, l'intensité respiratoire est multipliée par 2.

Plus le grain respire, plus il y a dégagement de chaleur, donc la température augmente et l'intensité respiratoire se multiplie encore: il y a auto accélération du phénomène

I.1.2.3 Plus il est humide, plus le grain respire

Inversement, plus il est sec, moins il respire.

Du grain à 30% d'humidité a une intensité respiratoire 400

fois plus importante que celle du grain à 15% d'humidité.



I.1.2.4 Plus il respire, plus il s'épuise

Plus le grain respire Plus il Perd du poids, en provoquant une diminution des réserves, donc de matière sèche tout en occasionnant :

- brunissement des grains
- baisse du pouvoir germinatif
- détérioration de la valeur alimentaire
- acidification des matières grasses

Et indirectement, il résulte un développement de moisissures

et d'insectes ravageurs.

Un blé à 30°C et à 22% d'humidité pendant une semaine perd 1,4% de son poids!



I.1.2.5 Pour refroidir il faut ventiler [15]:

En cas de stockage de longue durée, au printemps la température de la masse du grain s'élève lentement. Pour éviter qu'elle dépasse 15 °C, le meilleur moyen consiste à abaisser la température du lot de grain pendant l'hiver:

- entre 10 et 12 °C pour un stockage inférieur à 8 mois,
- entre 5 et 10 °C pour une conservation d'un an.

1.1.2.6 Faut-il ventiler :

Pour refroidir, il faut faire circuler dans toute la masse granulaire stockée, de l'air plus froid que le grain.

On ventilerait de préférence la nuit, car :

- l'air est plus froid que dans la journée;
- le prix de l'électricité est plus bas.

Mais il n'est pas possible de ramener en une seule fois du grain de 30 ou 35 °C à 10°C car en été, la différence de température entre grain et air n'est jamais aussi importante:

- dès la récolte, une première dose de ventilation abaisse la température du grain autant que le permet la température de l'air, (par exemple entre 20 et 25 °C).
- dès que la température de l'air commence à baisser, à l'automne et au début d'hiver, des doses de maintien (ou de conservation) successives permettent d'abaisser progressivement la température du grain.

1.1.2.7 L'influence du ventilateur [16] :

Au cours de son passage dans le ventilateur, l'air est comprimé légèrement afin de pouvoir traverser toute la couche de grain. Cette pression est exprimée en mm de colonne d'eau (mm C.E.) ou en Pascals.

La compression de l'air, comme dans une pompe à vélo, a pour conséquence de le réchauffer: plus la pression est élevée plus l'air est réchauffé.

L'expérience montre que l'air se réchauffe de 1 °C pour une pression de 85 mm C.E. Ceci veut dire que pour les cas courants, le réchauffage de l'air ne dépasse pas 3 à 4 °C. Mais dans les cellules de grande hauteur (30 à 40 m) la ventilation de refroidissement est une affaire délicate car, la pression pourra atteindre 800 mm C.E., l'air peut être réchauffé de 8 et même 10 °C.

Il faut alors utiliser : soit des installations comprenant deux ventilateurs, un qui pousse l'air l'autre qui l'aspire de l'autre côté). Soit d'autres principes de conservation [9].

Lorsque l'on envisage de faire fonctionner un ventilateur en aspiration, il faut s'assurer que la dépression est compatible avec la résistance de la cellule. A titre d'exemple, les plafonds de cellules rondes en béton ne résistent pas à des dépressions supérieures à 200 ou 300 mm C.E. (2.000 à 3.000 Pa) [14].

1.1.2.8 Est-il possible d'arrêter la ventilation en cours de refroidissement et de la reprendre un peu plus tard [15] :

Il est possible d'arrêter le ventilateur pendant quelques heures sans que le déroulement du refroidissement en soit affecté : la zone de transition séparant le grain encore chaud du grain refroidi s'immobilise et les températures restent stationnaires. C'est ce qui permet d'effectuer des ventilations nocturnes pour lesquelles le ventilateur est arrêté le matin et remis en route le soir. Cette particularité permet aussi de faire face à une panne de l'installation ou d'attendre que la température ambiante soit redescendue.

1.1.2.9 Principes de base d'une installation [14] :

Pour refroidir complètement un lot de grain, il faut une quantité d'air sensiblement constante, variant peu avec les températures du grain et de l'air:

1000 m³ d'air par m³ de grain = dose spécifique.

La température atteinte en fin de refroidissement dépendra de la température de l'air.

Le refroidissement doit être terminé avant que la couche supérieure du tas n'ait souffert. Pour du grain aux normes, on peut supporter 2 à 3 semaines: si l'on ne ventile que la nuit, sur une durée de 10 heures par nuit, on dispose au maximum de 15 à 20 jours de 10 h soit 150 h à 200 heures par dose. En pratique, il sera prudent de faire plus vite pour garder une marge de sécurité; le principal élément caractérisant les qualités d'une installation est le **débit spécifique**, ou le débit d'air pour 1 m³ de grain ventilé, souvent fixé à 20 m³/h/m³ de grain. Connaissant le volume de la cellule à ventiler, on en déduit le débit d'air nécessaire en m³/heure.

A partir de ces éléments, on a :

- dose spécifique = 1000 m³ d'air par m³ de grain,
- débit spécifique variable en fonction de l'installation,

Il est possible d'évaluer le temps nécessaire pour effectuer un refroidissement (dose de ventilation dès la récolte ou dose de maintien à l'automne) on écrit :

$$\text{temps de refroidissement (heures)} = \frac{\text{dose spécifique}(1000\text{m}^3 / \text{m}^3)}{\text{débit spécifique}(\text{m}^3 / \text{h})}$$

Pour que l'air traverse toute la couche de grain, il faut vaincre les frottements en donnant à l'air une pression statique qui dépend de la nature du grain (grosseur) et de la

hauteur de la cellule. Cette pression est exprimée en millimètres de colonne d'eau (mm C.E.) ou en Pascal (Pa).

Le débit et la pression statique sont les caractéristiques de base d'une installation. Ils servent notamment à choisir un ventilateur bien adapté.

Si l'installation ne doit servir que pour un seul type de grain, on prendra un débit spécifique "n" de 20 m³/h/m³. (Cette valeur peut être diminuée de moitié dans les zones où l'on récolte du grain généralement sec).

Dans le cas fréquent où l'installation doit servir pour divers types de grains, elle sera généralement calculée pour le blé (sauf dans les régions du Sud-Ouest à dominante maïs).

Précautions à prendre :

- Une pression trop forte entraînerait un gaspillage de puissance,
- Le ventilateur fournit une pression dite "pression totale" qui se décompose en:

Pression statique : qui permet à l'air de traverser le grain. Exemple: pression dans une chambre à air.

Pression dynamique : qui correspond à la vitesse de l'air à la sortie du ventilateur.

Chaque ventilateur est représenté par une courbe "débit-pression" correspondant à une vitesse de rotation: si le débit augmente, la pression diminue et vice versa, mais le point représentatif de la ventilation reste toujours sur la courbe.

Le ventilateur qui met l'air en mouvement est caractérisé par une courbe débit-pression: plus la pression demandée augmente, plus son débit diminue, et inversement

I.2 Développement d'une théorie simplifiée à partir d'un essai de laboratoire [5] :

I.2.1 Conditions expérimentales :

I.2.1.1 Cellule :

Section	1m×1m=1 m ² .
Hauteur de grain	3m
Contenance	3 m ³

Capacité	2040 kg.
-----------------	----------

I.2.1.2 Grain :

Humidité du blé	20%.
Température initiale	27,5°C.
Humidité relative d'équilibre à 20% d'humidité du grain et à 20°C	88%.

I.2.1.3 Air de refroidissement :

Débit total	100m ³ /h ou 120kg/h
Débit spécifique	33 m ³ /h.m ³ de grain
Vitesse de l'air	100 m/h ou 2,78cm/s
Température sèche	19,5-20°C
Température humide	16°C
Humidité relative	68%

Des sondes thermométriques ont été placées dans le grain aux niveaux 0, 50, 100, 150, 250, 300 centimètres, de façon à suivre l'évolution du refroidissement en fonction du temps de ventilation.

I.2.2 Evolution des températures dans le grain :

Les résultats obtenus sont présentés sur le graphique I.1. [5]

On constate que les couches de grain se refroidissent successivement les unes après les autres. La vitesse de progression du refroidissement doit être telle que la dernière couche de grain soit atteinte par le refroidissement avant d'avoir pu s'échauffer.

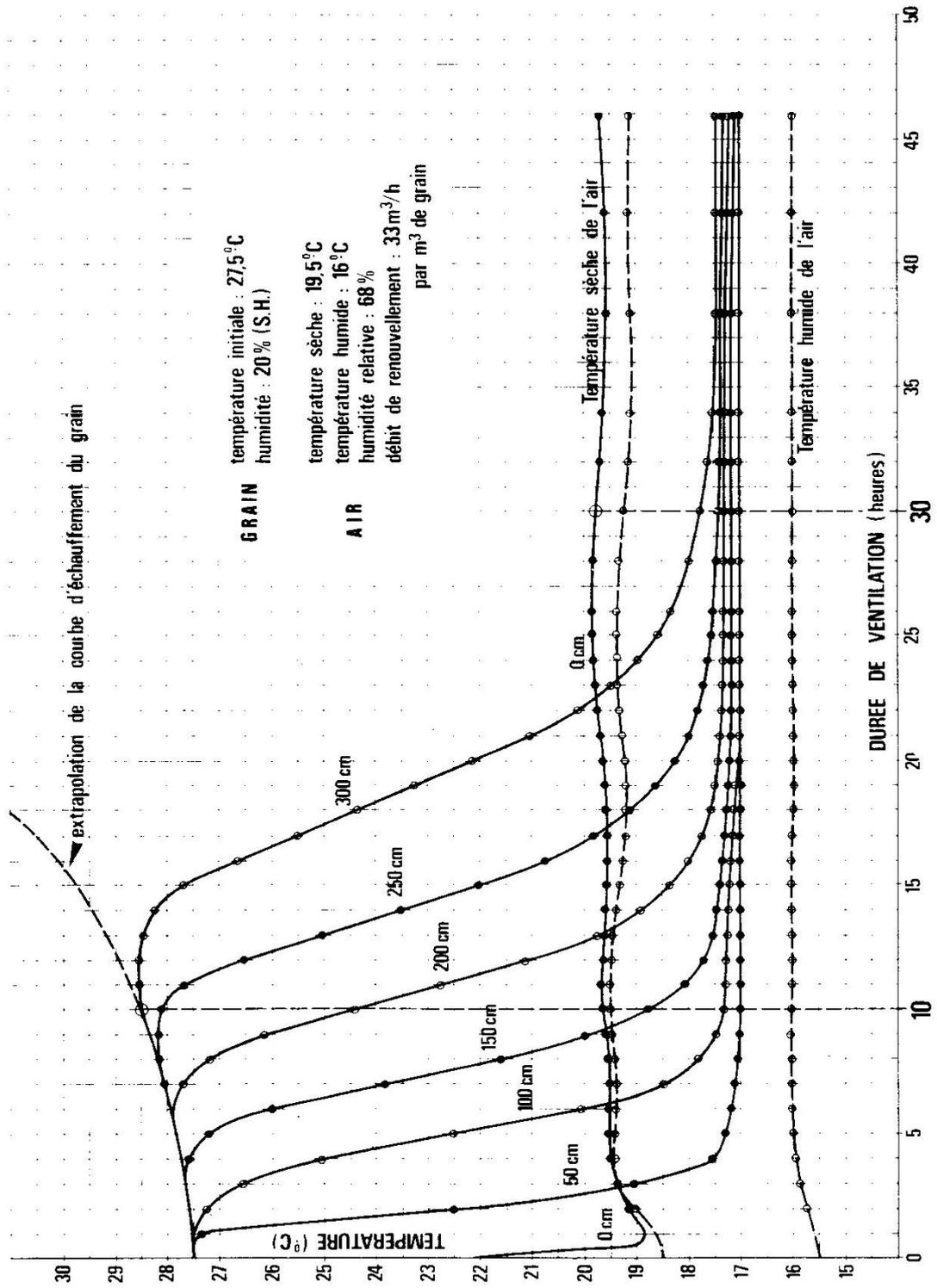


Figure I.1 : Résultats d'un essai de laboratoire [5]

I.2.3 Vitesse de refroidissement :

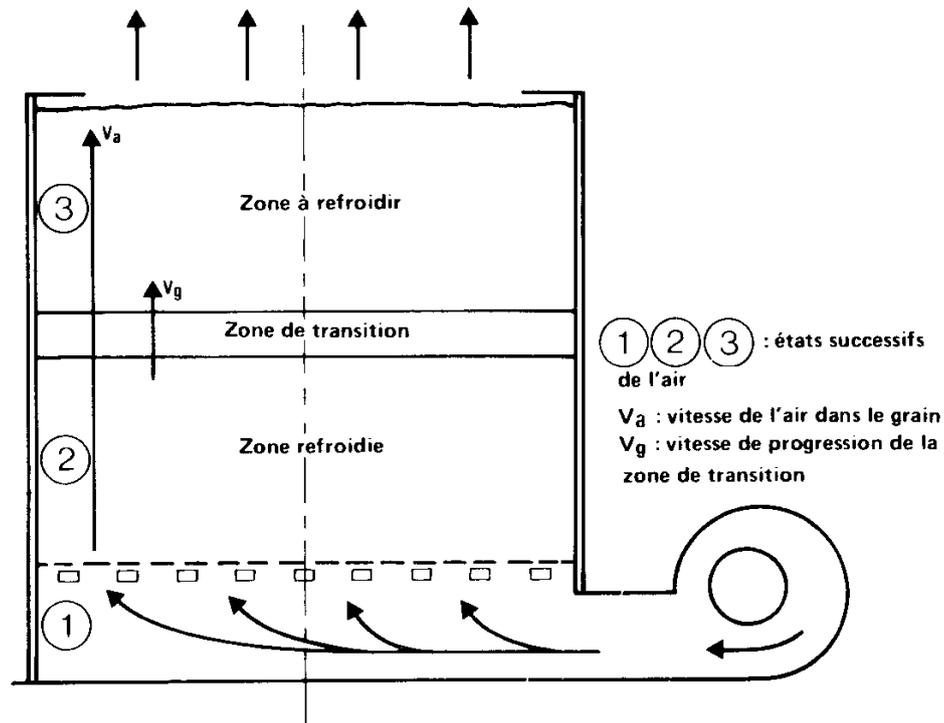


Figure I.2 : Opération de refroidissement [3].

Les échanges entre l'air et le grain se produisent dans une couche d'épaisseur limitée appelée zone de transition. [3]

Peut-on représenter schématiquement l'échange comme n'affectant qu'un volume minimum de la masse de grain, en suivant le sens de propagation de l'air, en deçà du volume où a lieu l'échange, la température du grain devient égale à celle de l'air (t_2), et au-delà c'est la température de l'air qui est égale à celle du grain (t_3).

Si on prend pour repère fixe la zone d'échange, l'air défile dans cet échangeur dans un sens et le grain dans un autre sens.

Affectons l'air de l'indice 2, et le grain de l'indice 3, afin de respecter la notation sur le diagramme de l'air humide.

- q_2 et q_3 les débits massiques (kg/h).

- c_2 et c_3 les chaleurs massiques (kcal/kg, °C).

- t_2 et t_3 les températures (°C).

L'échange de chaleur se traduit par l'égalité de la chaleur apportée par le grain et prise par l'air [5]:

On écrit :

$$q_2 c_2 (t_3 - t_2) = q_3 c_3 (t_2 - t_1) \quad (\text{I.1})$$

Où

$$\frac{q_3}{q_2} = \frac{c_2}{c_3}$$

Appelons ρ_2 et ρ_3 les masses volumiques de l'air et du grain (kg / m^3), Q_2 et Q_3 les débits volume (m^3 / h). On a :

$$q_2 = \rho_2 Q_2 \quad \text{et} \quad q_3 = \rho_3 Q_3$$

D'où :

$$\frac{q_3}{q_2} = \frac{\rho_3 Q_3}{\rho_2 Q_2} \quad (\text{I.2})$$

En vertu de la formule (1.1), on a donc :

$$\frac{Q_3}{Q_2} = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_3 c_3}$$

Les vitesses V_2 et V_3 (m / h) de l'air et du grain, ne sont autres que les débits volumiques Q_2 et Q_3 par unité de surface; soit S (m^2) la section de la cellule. Il vient [5]:

$$V_2 = \frac{Q_2}{S} \quad \text{et} \quad V_3 = \frac{Q_3}{S}$$

D'où

$$\frac{Q_3}{Q_2} = \frac{V_3}{V_2} = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_3 c_3}$$

Soit encore

$$V_3 = V_2 \frac{\rho_2 c_2}{\rho_3 c_3} \quad (\text{I.3})$$

Puisque l'indice 2 se rapporte à l'air, et l'indice 3 au grain, posons $a = 2$ et $g = 3$, la relation (1.3) s'écrit alors :

$$V_g = V_a \frac{\rho_a c_a}{\rho_g c_g} \quad (\text{I.4})$$

La vitesse de propagation dans le grain (V_g), c'est-à-dire la vitesse d'avancement de la zone de transition, est proportionnelle à la vitesse apparente de l'air dans le grain (V_a).

Soit :

$$K = \frac{\rho_a c_a}{\rho_g c_g} \quad (\text{I.5})$$

$\overline{\rho_a}$: est la masse volumique moyenne de l'air au cours de la transformation 2-3 figure (I.2), (Kg / m^3). Cette masse volumique moyenne est donnée par.

$$\overline{\rho_a} = \frac{\rho_{a2} + \rho_{a3}}{2} \quad (\text{I.6})$$

ρ_g Est la masse volumique du grain (kg/m^3)

c_g Est la chaleur spécifique du grain ($\text{kcal} / \text{kg} \cdot \text{c}^\circ$).

Chaleur spécifique du blé : $c_g = 0,334 + 0,0098 \varepsilon$.

c_a Est la chaleur spécifique moyenne de l'air ($\text{kcal} / \text{kg} \cdot \text{c}^\circ$)

$$c_a = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{h_3 - h_2}{t_3 - t_2} \quad (\text{Kcal} / \text{kg}, \text{ }^\circ\text{c}) \quad (\text{I.7})$$

Par définition, l'enthalpie de l'air s'exprime comme suit :

$$h = 0,24t + W (597 + 0,46t) \quad (\text{I.8})$$

Dans ces conditions, Δh est exprimé par :

$$\Delta h = h_3 - h_2 = 0,24(t_3 - t_2) + 597(W_3 - W_2) + 0,46(W_3 t_3 - W_2 t_2)$$

Le dernier terme de cette expression étant négligeable, c_a devient :

$$c_a = \frac{h_3 - h_2}{t_3 - t_2} = 0,24 + 597 \frac{W_3 - W_2}{t_3 - t_2} \quad (\text{I.9})$$

$$V_g = V_a \frac{\overline{\rho_a} \times \left[0,24 + 597 \cdot \frac{W_3 - W_2}{t_3 - t_2} \right]}{\rho_g c_g} \quad (\text{I.10})$$

1.2.4 Calcul du temps nécessaire pour refroidir complètement une cellule de grain [19]:

Il faut souffler jusqu'à ce que la dernière couche soit totalement refroidie, c'est-à-dire jusqu'à ce que sa température devienne égale à la température finale de refroidissement, soit 17°C.

Pour cela, il faut ventiler pendant 30 heures.

Cette température finale de refroidissement n'est autre que la température isenthalpique d'équilibre. En effet, la courbe d'équilibre air-blé figure III.8 indique pour du grain à 20% d'humidité et à 20°C une humidité relative d'équilibre de 88%. Sur le diagramme de l'air humide figure III.9, le point figuratif de l'air ne subit plus que la transformation 1-2 à ce stade de l'évolution des phénomènes de refroidissement :

Etat 1 : $t = 20^\circ\text{C}$, $t' = 16^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 68\%$.

Etat 2 : point d'intersection de l'isenthalpe passant par 1 avec la courbe $\varepsilon = 88\%$, $t = 17,5^\circ\text{C}$. La température sèche du point 2 (17,5°C), obtenue sur le diagramme de l'air humide, correspond bien à la température finale du refroidissement du grain obtenue expérimentalement.

Une ventilation de refroidissement se décompose schématiquement en deux périodes de durée sensiblement double :

1^{ère} période : temps nécessaire à la zone de transition pour aborder la couche supérieur du grain.

2^{ème} période : temps nécessaire à la dernière couche de grain pour atteindre la température isenthalpique d'équilibre. Nous avons dans cet essai les conditions pour réaliser un « surrefroidissement » de $20 - 17,5 = 2,5^\circ\text{C}$.

Le temps T nécessaire à la zone de transition pour effectuer ce parcours sur une hauteur H de grain à ventiler est :

$$T = \frac{H}{V_g}$$

Expérimentalement, il a été montré que le temps nécessaire au refroidissement complet de la cellule est égal à trois fois ce temps, donc :

$$T_R = 3 \frac{H}{V_g} \quad (\text{I.11})$$

Avec

T_R : Temps de refroidissement complet (heures)

H : hauteur de grain à ventiler (mètres)

V_g : Vitesse de propagation de la zone de transition (m/h)

1.2.5 Volume d'air nécessaire pour refroidir complètement un mètre cube de grain [5] :

Il est intéressant, pour des raisons pratiques, de connaître le volume d'air nécessaire pour refroidir un mètre cube de grain, soit R ce ratio (volume unitaire).

Considérons une cellule de grain S (m^2) et de hauteur H (m), ventilé avec un débit d'air Q_V (m^3/h), la quantité totale d'air insufflé est de :

$$Q_V \times T_R$$

La quantité R s'écrit :

$$R = \frac{Q_V \times T_R}{S \times H} = \frac{Q_V}{S \times H} \times T_R$$

En exprimant T_R d'après la formule (I.13), on obtient :

$$R = \frac{Q_V}{S \times H} \times \frac{3H}{V_g} = \frac{3Q_V}{V_g S} = \frac{3}{V_g} \times \frac{Q_V}{S}$$

$$\text{Or, } V_a = \frac{Q_V}{S}$$

Donc :

$$R = 3 \frac{V_a}{V_g} \tag{I.12}$$

R peut s'écrire en utilisant de la formule (1.4)

$$R = 3 \frac{\rho_g c_g}{\rho_a c_a} \tag{I.13}$$

Dans le cas de l'expérience :

$R = 350 \times 3 = 1050 \text{ m}^3 \text{ d'air} / \text{m}^3 \text{ de grain}$, valeur équivalente à celle obtenue en considérant les conditions et courbe expérimentales, il vient :

$$R = \frac{100 \times 30}{3} = 1000 \text{ m}^3 / \text{m}^3$$

I.2.6 Effets de séchage accompagnant la ventilation [5] :

Reprenons l'expérience de ventilation de blé. Sur le diagramme de l'air humide, reportons les trois points caractéristiques de l'air, figuratifs des transformations subies par ce dernier dans sa traversée du grain.

Au cours de la première période de refroidissement, l'effet évaporatoire est important.

Caractéristique de l'air	Etat 1 : air initial	Etat2 : grain refroidi	Etat3 : grain chaud
Température sèche	19,5	17,4	28
Température humide	16	16	27
Humidité relative	68	88	88
Teneur en eau	10	11	21,3

Tableau I.1 : caractéristiques des paramètres de l'air

$$W_3 - W_1 = 21,3 - 10 = 11,3 \text{ g d'eau par kg d'air sec.}$$

Soit pour la durée de 10 heures de l'opération avec un débit d'air de $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ou 120 kg/h :

$$11,3 \times 120 \times 10 = 13750 \text{ g d'eau}$$

Au cours de la période suivante (refroidissement complet de la dernière couche jusqu'à la température isenthalpique d'équilibre) l'air progressivement de l'état 3 à l'état 2, pour lequel l'effet évaporatoire atteint sa valeur résiduelle c'est-à-dire ici :

$$W_2 - W_1 = 11 - 10 = 1 \text{ g / kg d'air.}$$

La quantité d'eau évaporée au cours de cette 2^{ème} période est plus difficile à estimer, on peut toutefois faire l'hypothèse simplificatrice d'une décroissance linéaire du pouvoir d'évaporation, (figure I.3) ce qui donne :

$$\frac{11,3 + 1,0}{2} \times 120 \times 20 = 14,76 \text{ kg}$$

Au total, l'effet de séchage accompagnant cette expérience de ventilation est :

$$13,57 + 14,76 = 28,33 \text{ kg d'eau,}$$

Soit pour 100 kg de blé humide, en rappelant que la capacité de cellule expérimentale est de 2040 kg :

$$\frac{28,33}{2040} \times 100 = 1,39 \text{ Kg d'eau / 100kg}$$

Ce qui représente un peu plus de 1 point d'humidité.

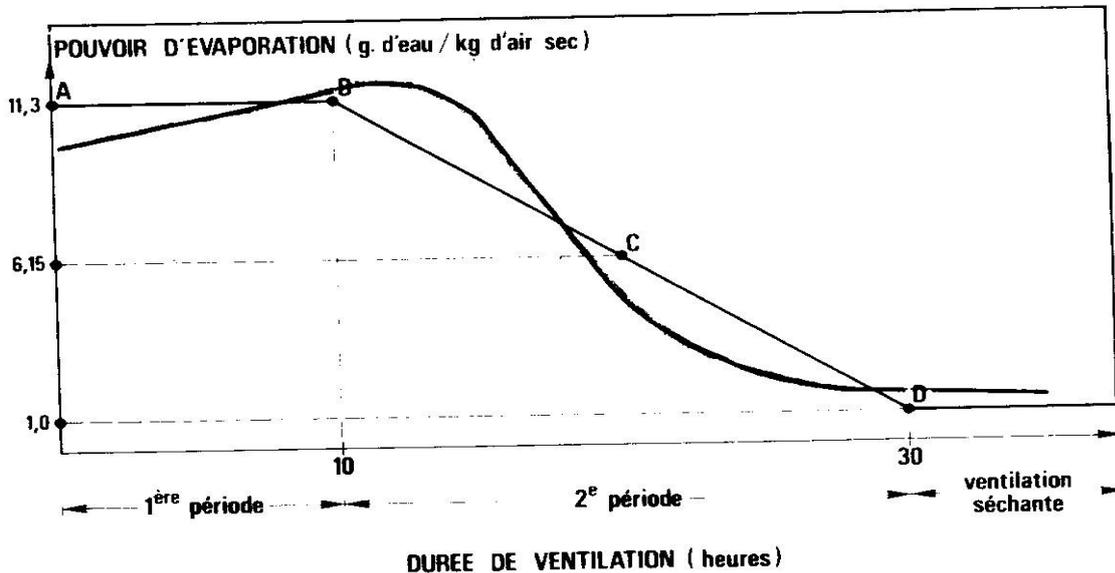


Figure I.3 : Evolution du pouvoir d'évaporation de l'air en fonction de la durée de ventilation [5]

I.2.7 Expression mathématique de la perte d'eau au refroidissement [8]:

Soit E (kg / 100kg) cette perte d'eau. Le raisonnement qui vient d'être utilisé se traduit par l'expression suivante :

$$E = \left[(W_3 - W_1) \frac{T_R}{3} + \frac{(W_3 - W_1) + (W_2 - W_1) \cdot 2T_R}{3} \right] \times \frac{Q_v \times \rho_a}{p} \times \frac{100}{1000}$$

Ce qui peut s'arranger sous la forme :

$$E = \frac{T_R}{30} (2W_3 + W_2 - 3W_1) \frac{Q_v \times r_a}{p} \tag{I.14}$$

P : le poids de grain contenu dans la cellule (kg).

L'expression de E peut encore se simplifier, en effet :

$$T_R = \frac{3H}{V_g} \text{ Formule (I.11)}$$

Ou encore

$$\frac{T_R}{3} = \frac{H}{V_g}$$

En posant

$$Q_V = S \times V_a$$

Et

$$P = S.H.\rho_g$$

Avec :

ρ_g : Poids spécifique du grain en place (kg/m^3), il vient en remplaçant les valeurs de

T_R, Q_V et P dans E :

$$E = \frac{1}{10} \times \frac{H}{V_g} \times \frac{SV_a\rho_a}{SH\rho_g} (2W_3 + W_2 - 3W_1)$$

Soit

$$E = \frac{1}{10} \times \frac{V_a}{V_g} \times \frac{\rho_a}{\rho_g} (2W_3 + W_2 - 3W_1)$$

Or

$$\frac{V_a}{V_g} = \frac{\rho_g C_a}{\rho_a C_g}$$

L'expression finale de la perte de 100 kg est donc la suivante :

$$E = \frac{1}{10} \cdot \frac{C_g}{C_a} (2W_3 + W_2 - 3W_1) \quad (1.15)$$

Les valeurs de E calculées sont des données maximales correspondantes à un rendement d'échange de 100%.

Chapitre II

Stockage et conservation des céréales

1.3 Conditions de stockage :

1.3.1 Les silos :

Historique :

Un centre commercial très important des céréales dans l'antiquité a probablement été à l'origine du mot silo. Il s'agit de la ville de silo, devenu Selun, qui se trouvait au nord de Palestine. Silo est devenu le terme générique pour désigner les récipients de plus ou moins grande taille, destinés au stockage de toute matière pulvérulente [5].

L'instinct de préservation a amené les producteurs à stocker les céréales pour constituer des réserves de sécurité qui permettent de commercialiser celles-ci en fonction des besoins ou des demandes. Au Moyen Âge, et surtout en Occident, on stockait dans les greniers. Mais le grain ne s'y trouve pas protégé et il est difficile de l'y traiter. L'évolution a donc amené à édifier des récipients de plus ou moins grandes dimensions pour permettre le stockage en vrac, avec les moyens mécaniques et pneumatiques de manutention de celui-ci, et de contrôle de sa température.

Le 19^{ème} siècle a vu les premières recherches en matière de conditions de stockage des céréales en silo [5].

Les résultats de ces premières expériences ont permis alors de déterminer les conditions de stockage des céréales, en particulier la limitation du pourcentage de l'humidité. Les premiers réalisés le furent en maçonnerie. Ensuite vinrent les silos en bois, puis les silos en métal, en béton armé. À l'heure actuelle, il y a une nette prédominance des silos :

-En métal, pour les équipements de moyenne et petite capacités, destinés aux producteurs.

-En béton armé, pour les équipements de moyennes et grandes capacités, également, comme les précédents, adoptés dans les ports, essentiellement pour des considérations de protection aux attaques de l'atmosphère marine.

Ce pendant, dans les pays nordiques, où le bois constitue un matériau naturellement disponible et de qualités intéressantes, des silos en bois sont construits, pour des petites et moyennes capacités [11].

Enfin, les matières en plastiques ont fait leur apparition sur le marché. Les silos réalisés sont de petites capacités unitaires.

Le choix de ce matériau pouvant résulter soit de conditions locales :

-Soit dans certaines régions plus ou moins accessibles ou défavorisées en agrégat, le choix peut s'orienter vers des silos métalliques soudés, ou boulonnés.

-Soit de considérations résultant de la capacité :

-les silos en béton armé pouvant être généralement de très grandes capacités unitaires, permettent des stockages importants, sur de fortes hauteurs.

Mais la destination d'une unité de stockage peut aussi orienter la réalisation de la paroi de chaque silo constituant cette unité vers tel ou tel matériaux, et vers tel procédé constructif.

C'est ainsi que l'on peut :

-Avoir une paroi étanche permettant une circulation d'air à travers elle,

-Avoir une paroi seulement étanche à l'eau de pluie, dans le cas de silos extérieurs,

- Avoir une paroi étanche à l'eau et à l'air pour garantir certaines conditions de conservation de la matière stockée,

-N'imposer aucune prescription d'état de surface de la paroi, c'est –dire que le parement de contact de celle-ci avec la matière est accepté brut de réalisation,

-Exiger, au contraire, un état de surface parfaitement lisse,

-Demander une paroi thermiquement isolée,

-Demander une paroi finie, sur son parement intérieur, un revêtement soit de protection de surface, soit de glissement de la matière ensilée lors de la vidange en particulier [9].



Figure I.4 : silo à grain.[9]

1.3.2 Principe de stockage :

De la récolte au stockage et à la vente, certaines précautions sont essentielles pour la conservation du grain. De mauvaises conditions de stockage ont des effets irréversibles sur la qualité du grain [16].

-Avant la récolte, la première règle est de maintenir dans la mesure du possible la culture propre.

-Il s'agit ensuite de bien choisir le moment de la récolte. Le grain se conserve d'autant plus facilement qu'il est récolté mur et sec.

-L'humidité associée à la température sont les deux principaux paramètres qui vont influencer sur la conservation du grain. Deux principes de base doivent être respectés pour optimiser la conservation [3] :

-Une humidité inférieure à 16%

-Une température inférieure à 15°C

1.3.3 Le nettoyage :

Afin de limiter l'échauffement du tas, la persistance d'humidité et les contaminations, le nettoyage et le tri sont des opérations avant le stockage. En éliminant les impuretés et les grains maigres échaudés ou attaqués par les champignons, ils permettent d'améliorer l'homogénéité du lot et le poids spécifique.

De plus, l'absence de brisures, auxquelles s'attaquent de préférence les insectes et les moisissures, limite fortement les risques d'infestation [21].

-Le Nettoyage de l'installation est indispensable avant la récolte, car :

Les insectes que l'on peut trouver dans la céréale récoltée ne viennent généralement pas du champ mais proviennent des bâtiments, ou du matériel. Il convient d'effectuer un nettoyage complet des murs, parois, charpentes et sols du lieu de stockage, ainsi que du matériel de récolte

On utilise trois types d'appareils pour le nettoyage [19]:

1-les tarares, utilisant le courant d'air de refoulement d'un ventilateur pour éliminer les impuretés légères.

2-les séparateurs, appareils à plus gros débit, utilisant le courant d'air d'aspiration d'un ventilateur pour entraîner les impuretés légères et le faire évacuer vers l'extérieur.

3-les épurateurs, appareil à fort débit, ventilant les poussières.

1.3.4 Conditions métrologiques :

Le stockage de longue durée commence le jour de la moisson, les conditions dans lesquelles se fait la récolte ont une influence décisive sur la qualité du grain, en particulier sur sa teneur en eau [12].

1.3.5 Durée d'entreposage maximal du grain humide :

La durée d'entreposage du grain humide dépend de la teneur en eau du grain. La figue I.5, indique les durées approximatives d'entreposage sans risque. A noter que, dès l'apparition de points d'échauffement, la détérioration

occasionnée par les moisissures et par les infestations d'insectes s'accélère. Par conséquent, il faut surveiller attentivement la température du grain humide afin d'assurer un entreposage sans risque, même si la température de l'air est bien au dessous de 0°C.

La teneur en eau maximale pour un entreposage sans risque pendant le premier hiver est 14.5 % [3].

Le grain mis dans une cellule par temps chaud ou qui contient des matières vertes pourrait s'échauffer même à une teneur de 14.5%. L'entreposage à long terme où la transformation des cultures spéciales peut exiger une teneur inférieur à 14,5%.

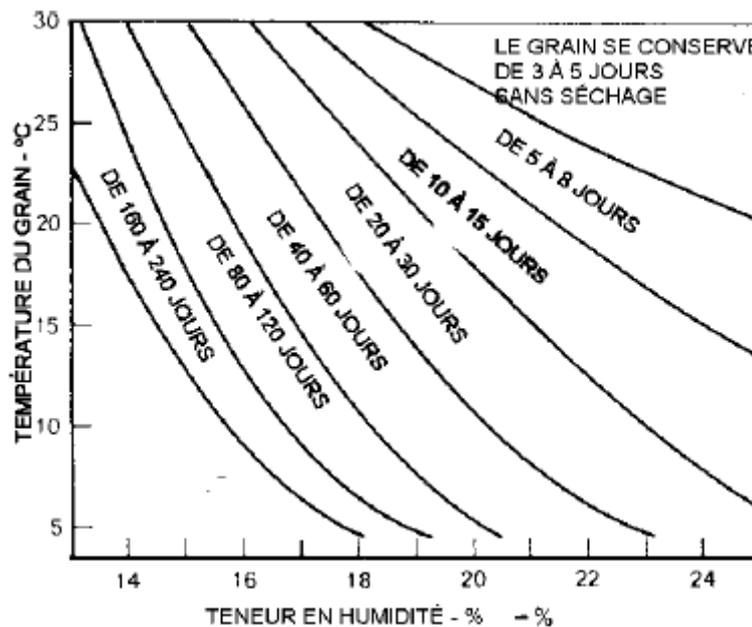


Figure I.5 : Influence de la température et de la teneur en eau sur la durée de l'entreposage [3]

On peut remarquer sur la figure I.6, les zones de stockage sécuritaire pour une bonne conservation, et les zones de stockages dangereux qui favorisent la germination du grain et l'apparition des insectes [3].

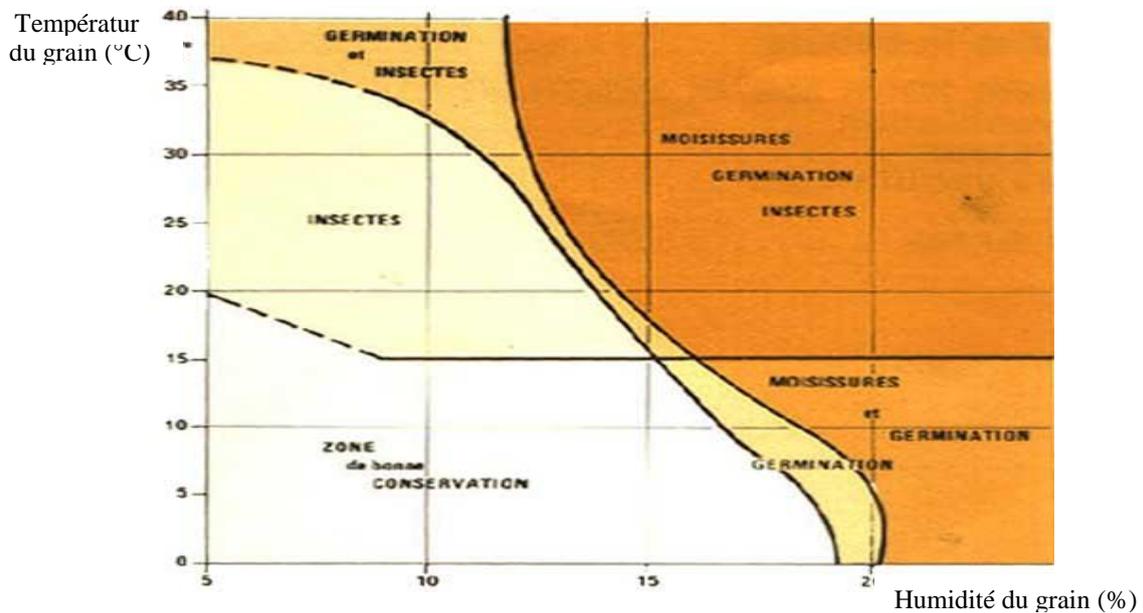


Figure I.6: Zone de stockage [3].

I.4 Problèmes inhérents au stockage :

I.4.1 Les causes d'altération [19] :

I.4.1.1 Réactions chimiques de dégradation :

Elles sont de natures très variées :

-les réactions de milliard, donnent par condensation des glucides et des protéines un grand nombre de composés intermédiaires, dont l'activité physiologique a été reconnue, et aboutissent dans leur stade ultime à la libération de composés polymères [4]

-la dénaturation des protéines et des acides nucléiques conduit à des modifications des structures quaternaire, tertiaire et même secondaire de la molécule [4].

-les modifications physico-chimiques, de l'amidon sont caractérisées à des températures assez élevées, par l'écartement des grains d'amidon, suivi d'un empesage plus ou moins prononcé selon l'eau disponible.

-la destruction des vitamines.

- les oxydations non enzymatiques, se produisent en particulier au niveau des lipides et surtout des acides gras, elles démarrent à des températures basses, et élèvent rapidement la température du milieu.

1.4.1.2 Altérations enzymatiques :

Elles sont provoquées essentiellement par les enzymes propres du grain. Ce sont des hydrolases, agissant sur les protéines, les lipides, les glucides. Certaines enzymes peuvent modifier la coloration.

D'autres accélèrent les réactions donnant des produits qui peuvent se dégrader ensuite par d'autres voies.

1.4.1.3 Altérations biologiques :

Elles sont dues aux activités métaboliques de l'écosystème. Il est commode de définir un écosystème par les échanges d'énergie et de masse qu'il effectue avec le milieu extérieur (Peusner 1974).

On peut dire alors que, la conservation et le stockage des grains ne sont pas autre chose que la conservation dans un écosystème particulier, d'une certaine quantité d'énergie chimique que l'homme souhaite utiliser plus tard, pour ses propres besoins, en évitant sa transformation ou sa dégradation en d'autres formes énergétiques. C'est donc bien essentiellement un problème thermodynamique, que l'on résoudra dans certains cas en imposant un échange énergétique avec l'extérieur (ventilation), tendant ainsi à rendre le système ouvert et isotherme [5].

1.4.1.4 Altérations d'origine mécanique ou physique :

Elles sont surtout dues à des chocs entraînant des cassures qui favorisent très largement les autres causes d'altération et notamment l'invasion des micro-organismes. D'une manière générale, les brisures et les frottements (générateur

de poussière) créent des particules offrant à masse égale une surface d'échange plus élevée que les grains dont elles proviennent [8].

1.4.1.5 le facteur temps :

Il introduit la notion de vitesse de réaction, dont la connaissance est indispensable, afin de déterminer la durée maximale de stockage.

1.4.1.6 Facteur température :

En augmentant l'agitation moléculaire, la chaleur fait accroître l'énergie cinétique des molécules, ainsi que la probabilité des chocs entre molécules et favorise les réactions.

1.4.1.7 Facteur hydratation :

Il existe de véritables seuils d'humidité relative en dessous ou au-delà desquels, pour une température donnée, l'activité des causes d'altérations se trouve inhibée [1].

1.4.1.8 Facteur teneur en oxygène et en gaz carbonique :

La composition de l'atmosphère intergranulaire, intervient sur la nature du métabolisme –des microorganismes et des cellules vivantes du grain.

1.4.1.9 Explosion des silos :

C'est la combustion (oxydation vive) très rapide d'un nuage de poussière (combustible) dans l'oxygène de l'air.

1.4.1.10 Inflammation de dépôt de poussière :

Des poussières de grains à forte teneur en lipide peuvent agglomérer en couche mince dans certaines zones des appareils du silo. Ces poussières, très fines, sont réactives, si elles se trouvent en contact avec un point chaud (palier –arbre....).

I.5 Techniques usuelles de stockage :

I.5.1 Le séchage des grains :

I.5.1.1 Définition :

Le séchage est la séparation partielle entre un liquide (généralement l'eau) et une matière solide. La partialité du séchage, par rapport aux autres techniques de séparation, est que le départ des molécules d'eau est obtenu par entraînement, grâce à une différence de pression partielle de vapeur d'eau, [4] entre la surface du produit à sécher et l'air qui entoure le produit.

La condition nécessaire et suffisante pour qu'un produit soit soumis à un phénomène de séchage est [20] :

$$f_g > f$$

Avec : f_g : pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit.

f : pression partielle de vapeur d'eau de l'air.

Si $f_g = f$,

il n'y a plus de séchage mais il y a équilibre hygroscopique, entre le grain et l'air [20].

I.5.1.2 Séchage artificiel :

Le séchage artificiel est obtenu en soumettant le produit humide, dans un séchoir, à l'action d'un courant d'air généralement chaud, grâce à une source d'énergie calorifique. Le séchage artificiel est un procédé coûteux en énergie. Calorifique et mécanique. En effet, la vaporisation des molécules d'eau est un phénomène endothermique [20].

I.5.1.3 Avantages du séchage :

-Le séchage artificiel permet d'abaisser très rapidement la teneur en eau des grains agricoles récoltés humides et éviter ainsi les altérations caractéristiques des grains en vrac fortement hydratés [12].

-prolongement de la saison de récolte : il est possible de récolter pendant des heures supplémentaires le matin et le soir de chaque jour. Le nombre d'heures

disponible de récolte se voit augmenté considérablement, ce qui pourrait réduire l'investissement total en machinerie.

-Récolte hâtive : Il est possible de commencer la récolte plus tôt si l'on utilise un séchoir à grains. Le blé, peu battu à une teneur en eau de 20%, puis séché sans qu'il y ait diminution de qualité [20].

1.5.1.4 Types de séchoirs :

Il existe trois principaux types de séchoirs [11] :

1. Séchoir à cellules verticales :

Ils sont Disponibles selon diverses tailles et capacités. Les séchoirs à cellules verticales peuvent fonctionner de différentes manières afin d'obtenir des vitesses de séchage diverses. Ils possèdent normalement des débits d'air plus lents que ceux des autres types de séchoirs, ce qui entraîne un séchage moins rapide mais aussi une consommation de combustible faible [5].

2. séchoirs mobiles :

- Séchoirs discontinus :

Il existe deux types fondamentaux de séchoirs discontinus mobiles sur le marché :

Les types avec recirculation et sans recirculation du grain. Etant pourvus de roues, ces séchoirs peuvent être déplacés.

Le séchoir discontinu comporte certains avantages par rapport à d'autres types dans le cas du séchage de quantités relativement petites de grains différents. L'amorçage du processus et le changement d'un type de grain à un autre sont relativement faciles comparativement aux opérations d'un séchoir continu, tandis que le déchargement et le nettoyage sont généralement plus faciles que dans le cas d'un séchoir d'une cellule verticales [3].

* Type sans recirculation du grain : Il existe plusieurs variantes de séchoir discontinu sans recirculation du grain, mais la plupart sont constitués de deux colonnes entièrement enfermées. Le séchoir, chargé par le haut, est rempli de grain humide, puis l'air chaud y est forcé jusqu'à ce que le grain soit sec. Le grain

ne se déplace pas à l'intérieur du séchoir, aussi la couche à l'intérieur est-elle surséchée tandis que la couche extérieure n'est pas séchée suffisamment. Après le cycle de chaleur, le grain est refroidi à l'intérieur du séchoir par arrêt de la chaleur, ou est transféré dans une cellule de ventilation pour y être refroidi. Pendant que le déchargement, le grain plus humide se mêle au grain plus sec et, si des températures sans risque ont été utilisées et que le grain a été suffisamment séché et refroidi, on obtient un produit satisfaisant.

* Type à recirculation du grain :

Les séchoirs discontinus à recirculation du grain présentent un plénum d'air central entouré par le grain et fonctionnent dans la même séquence que les séchoirs discontinus sans recirculation du grain. Ils se distinguent principalement par le fait que le grain est constamment recirculé pendant le cycle de chauffage et de refroidissement [13].

3. Séchoirs continus :

Il existe de nombreux types de séchoirs continus mobiles. Parmi les plus courants, celui comportant deux ou quatre colonnes de grain verticales, l'air traversant le grain à angle droit par rapport à l'écoulement des grains. Le grain chargé dans une trémie à l'extrémité supérieure du séchoir, s'écoule vers le bas des deux côtés du plénum d'air chaud, puis dépasse le plénum d'air froid pour être retiré par les vis sans fin.

II.1 Généralités

L'objectif essentiel de la ventilation est le refroidissement du grain et son maintien à une température suffisamment basse pour assurer une bonne conservation. Accessoirement, le but recherché peut être un léger effet de séchage [5].

Ainsi, la ventilation d'une masse de grain ensilé à deux effets simultanés, mais dont la réalisation complète demande des durées très différentes :

-Dans un premier temps relativement court, elle amène la température du grain à une température proche de celle de l'air, c'est l'effet de refroidissement.

-Dans un deuxième temps, lorsque l'application de la ventilation se poursuit suffisamment longtemps, l'effet obtenu peut être le séchage sous réserve que l'air utilisé soit relativement sec [3].

Dans un cas comme dans l'autre, les phénomènes physiques commandant les échanges de chaleur et d'eau, découlent des lois d'équilibre entre l'air et le grain.

La ventilation ou aération du grain est réalisée par circulation forcée d'air ambiant à travers une masse de céréales, l'air puisé ou aspiré par un ventilateur, est amené dans le grain à l'aide de conduites, puis réparti dans la masse par un système plus ou moins complexe de gaines de distribution.

L'efficacité de la ventilation repose en grande partie sur l'homogénéité de la distribution de l'air.

La ventilation des céréales est rendue possible par le fait qu'une masse de grain est un matériau poreux [5].

II.2 Principe de la Ventilation des grains :

II.2-1 Introduction :

La ventilation est l'utilisation d'un débit d'air relativement lent pour refroidir le grain et éliminer les différences de température et d'humidité dans le silo de stockage. Cette méthode peut être employée pour du grain séché aux champs ou pour du grain récolté alors qu'il est humide et qui est ensuite séché et refroidi dans un séchoir à air chaud [15]. Dans les deux cas, il peut y avoir des

différences de température et de teneur en humidité du grain, où celui-ci peut être trop chaud pour être entreposé en toute sécurité. Des changements dans la température de l'air extérieur une fois que le grain a été entreposé, peuvent également entraîner des variations dans la température du grain.

Les différences de température peuvent entraîner un déplacement de l'humidité des zones froides du silo. La figure II.1 montre de quelle façon l'humidité se déplace lorsque des températures ambiantes basses génèrent des différences de température dans un silo [2].

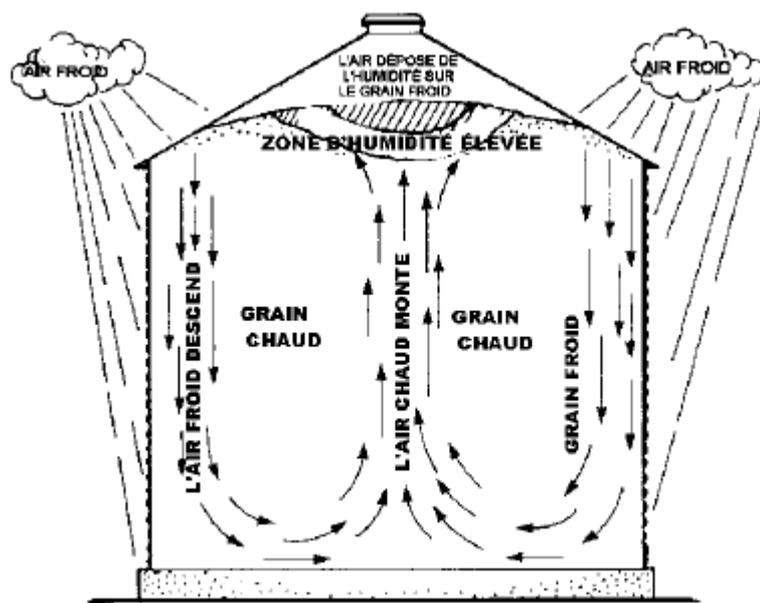


Figure II.1 Déplacement de l'humidité en automne et en hiver [2]

L'air chaud qui s'élève au centre, se refroidit lorsqu'il atteint le grain froid près de la surface. Ceci produit, près de la surface, une augmentation de la teneur en humidité qui peut entraîner une détérioration rapide du grain. La formation d'une croûte à la surface du grain stocké est un symptôme classique du déplacement de l'humidité. En été, si la température extérieure est supérieure à celle du grain, il peut y avoir un déplacement de l'humidité en sens inverse, comme le montre la figure II.2.

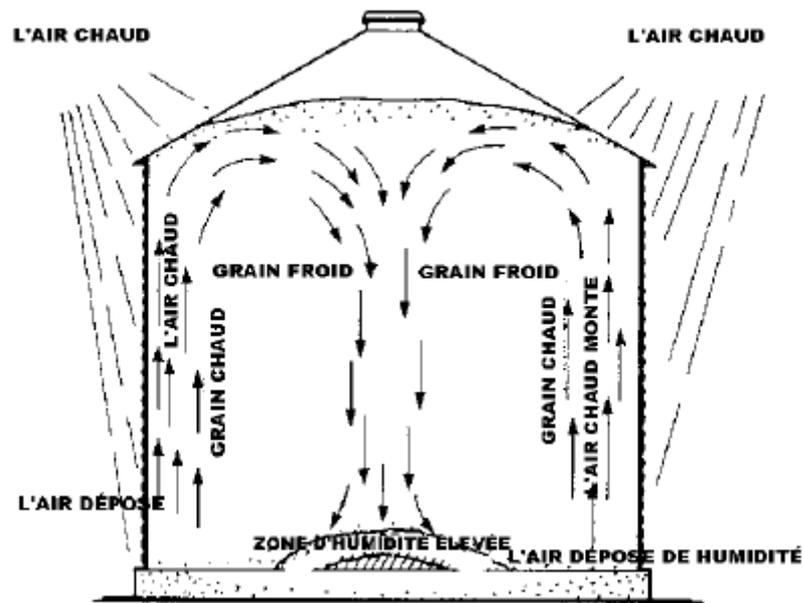


Figure II.2 : Déplacement de l'humidité au printemps et en été [2]

Les grands silos, les écarts importants entre la température du grain et celle de l'air ambiant génère un déplacement marqué de l'humidité.

La ventilation a pour but de garder le grain à la température la plus basse pour qu'il soit pratique de le maintenir, tout en atténuant le plus possible les écarts de celle-ci dans la masse de grain entreposé.

La ventilation n'est pas un système de séchage du grain et ne doit pas être perçu comme tel. Dans des conditions météorologiques idéales, la ventilation entraîne un certain séchage mais, à moins que les températures du grain soient près de 0°C ou lui soient inférieures. Les débits d'air volumiques pour la ventilation sont normalement d'un à deux litres par seconde par mètre cube de grain. Les débits pour le séchage à l'air ambiant sont normalement beaucoup plus élevés que cela. Par exemple avec un débit d'air volumique de $20(m^3/h/m^3)$, il faut que le ventilateur fonctionne pendant 150 à 200 heures environ pour changer la température dans tout le silo [14]. La ventilation diffère d'une saison à une autre. Autrement dit, elle est conditionnée par la température du milieu ambiant.

II.3 Les ventilateurs

II.3.1 Ventilateur hélicoïde ou axial

L'air est propulsé parallèlement à l'axe de rotation. En général, ce type de ventilateur est à faible pression et à grand débit. On le retrouve sur les installations de climatisation de l'air, pour ventiler de grandes surfaces sur de faibles hauteurs (10 m), voir figure II.3 [14].

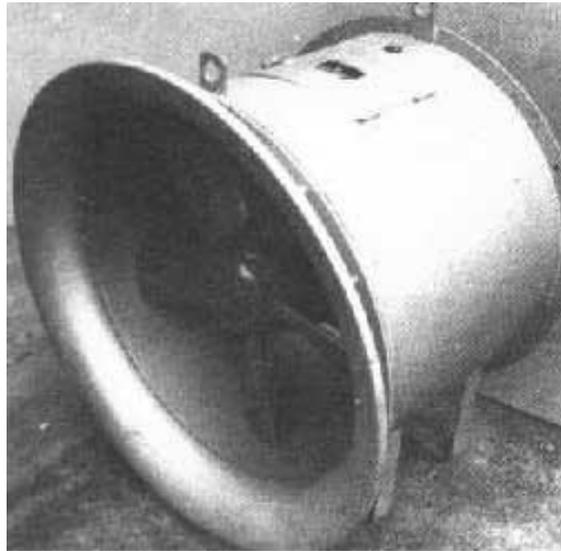


Figure II.3 : Ventilateur axial [14].

II.3.2 Ventilateur centrifuge :

L'air est propulsé perpendiculairement à l'axe de rotation .ces Ventilateurs Il sont à forte pression et à débit moyen. Ils sont plutôt destinés aux cellules de grande hauteur et de faible diamètre. On les retrouve généralement dans les installations d'organismes stockeurs, figure II.4.



Figure II.4 : Ventilateurs centrifuge [14].

II.3.3 Positionnement du ventilateur :

Les recommandations suivantes sont importantes pour assurer une meilleure ventilation II.5:

- Le ventilateur doit être bridé à l'aspiration
- Eviter de placer l'aspiration d'un ventilateur trop près d'une paroi, sinon ajouter celle-ci
- Eviter de placer deux ventilateurs côte à côte et surtout de faire coïncider les ouïes d'aspiration.

Cela pourrait entraînerait des pertes de débit énormes pouvant atteindre 40 % et multiplier, les consommations.

- Le ventilateur ne doit pas être bridé au refoulement
- Vérifier le circuit de gaines de ventilation et éviter qu'elles ne soient obstruées.
- Le ventilateur doit fonctionner dans les conditions prévues par le constructeur
- Vérifier le sens de rotation du ventilateur
- Vérifier aussi qu'il tourne au régime recommandé

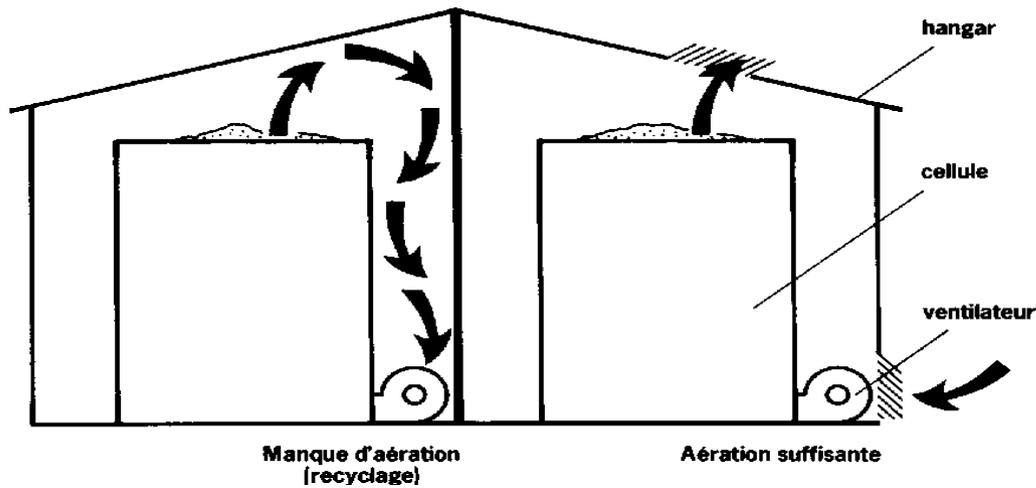


Figure II.5 : Positionnement du ventilateur [17].

II.3.4 Modes de ventilations :

Envoyer de l'air dans du grain peut être réalisé par soufflage ou par aspiration, en réservant la ventilation par soufflage aux cellules de hauteur moyenne (jusqu'à 25 mètres) et par aspiration aux cellules de plus grandes hauteurs.

En effet, avec le système par soufflage, l'air passe d'abord à travers le ventilateur qui le réchauffe de quelques degrés (3 à 4°C pour une cellule de 25 mètres et 14°C pour une cellule de 40 mètres). L'air se réchauffe également en traversant la masse du grain [15].

II.3.5 Avantage et inconvénients des deux modes de ventilation

II.3.5.1 pour la ventilation par soufflage:

· *Avantages :*

- L'air réchauffé par passage dans le ventilateur a des capacités de séchage.
- Il est possible de rajouter du grain dans une cellule qui a été mise en ventilation, avant que celle-ci ne soit terminée, car le froid progressant de bas en haut, le grain chaud -rajouté- ne sera pas directement en contact avec du grain déjà refroidi [9].

- Lorsque la température extérieure est très élevée, l'air très chaud, stagnant sous le toit des cellules, est chassé par l'air de ventilation.
- Il est aisé de contrôler la température du grain en partie supérieure, déterminant la fin de la ventilation [9].

• **Inconvénients :**

- En période froide, l'air de ventilation qui s'est réchauffé dans le ventilateur et au contact du grain et risque de provoquer de la condensation sous toiture ;
- Développement de moisissures autour des gaines de ventilation si l'hygrométrie de l'air de ventilation est supérieure à l'humidité d'équilibre air-grain

II.3.5.2 pour la ventilation par aspiration :

• **Avantages :**

- Ventiler des cellules de très grande hauteur.
- Pas de condensations sous toiture.
- La ventilation peut être mise en route quelque soit la différence de température entre air et grain, sans qu'il y ait condensation.
- Meilleur pouvoir refroidissant de l'air puisqu'il n'est pas réchauffé par un ventilateur avant d'être introduit dans le grain.

• **Inconvénients :**

- Pas d'effet séchant de l'air.
- Une cellule déjà mise en ventilation ne peut plus être rechargée ; sous peine de créer de la condensation à la surface du premier niveau de remplissage.
- De la poussière entraînée par l'air peut, à la longue, boucher les perforations des gaines de ventilation [15].

II.3.6 Conduite de la ventilation

Pour être efficace, la ventilation à l'air ambiant par soufflage ne doit être déclenchée que lorsque la température de l'air est inférieure de 5 à 7°C à celle du grain, en gardant en mémoire que l'air pulsé par un ventilateur, se réchauffe.

Une différence trop importante entraînerait des condensations au-dessus du tas de grain [11].

De fait, il est recommandé de refroidir le grain par paliers de 8 à 9°C chacun, pour ramener sa température de 35°C à la moisson, à 10°C, permettant d'assurer une conservation de longue durée.

La conduite de la ventilation suppose donc la connaissance de la température de la masse du grain et celle de l'air extérieur.

Une installation de thermométrie est donc hautement conseillée (elle est obligatoire pour les silos de volume supérieur à 15000 m³).

La température extérieure peut être mesurée par un simple thermomètre, ou mieux par un thermostat qui n'autorisera la mise en route du ventilateur que lorsque cette différence de température, repérée par une consigne, sera atteinte.

Par aspiration, il est possible de ventiler quelque soit la différence de température entre air et grain car les condensations éventuelles se produiraient à l'extérieur à la sortie du ventilateur. Par ailleurs, la mise en œuvre de la ventilation étant grosse consommatrice d'énergie.

De ce point de vue, la ventilation par aspiration est plus intéressante, n'ayant pas à faire concorder périodes tarifaires et différence de température entre air et grain [10].

II.4 Base de calcul de la ventilation des grains :

II.4.1 Éléments théoriques [5]:

- Calcul du poids d'eau enlevée par le séchage

En ce qui concerne les pertes d'eau occasionnées par la ventilation mise en œuvre pour réaliser une dessiccation partielle ou définitive des grains.

Soient :

H_i L'humidité initiale (%).

H_f L'humidité finale (%).

E la perte d'eau par quintal (kg/100kg).

Deux cas sont à considérer :

$$\text{Cas 01 : } E_1 = 100 \times \frac{H_i - H_f}{100 - H_f} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Cas 02 : } E_2 = 100 \times \frac{H_i - H_f}{100 - H_i} \quad (\text{II.2})$$

II.4.2 Courbe d'équilibre d'humidité air -grain :

Le grain est un produit hygroscopique, c'est-à-dire qu'il peut absorber ou rejeter de l'eau, par échanges sous forme de vapeur avec l'air, selon les caractéristiques hygrométriques de l'atmosphère qui l'entoure. A une humidité relative donnée de cette dernière, correspond une teneur en eau du grain dite d'équilibre.

Cet équilibre hygroscopique pourra s'obtenir lorsque l'air et le grain sont à la même température. Pour chaque espèce de grain, on a pu établir la série de courbes isothermes qui traduit cet équilibre [5]. La courbe de désorption du blé figure II.6.

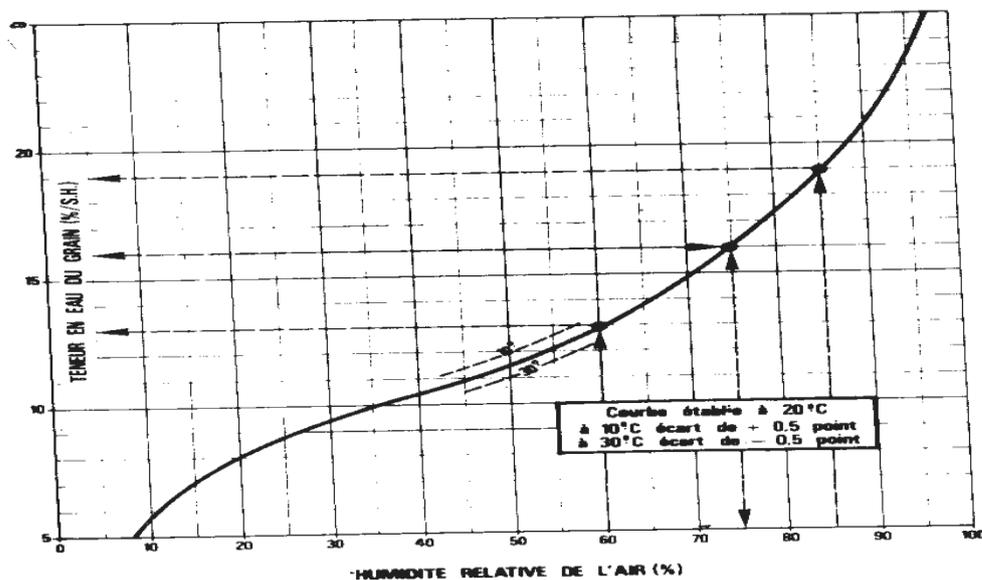


Figure II.6 : Courbe d'équilibre Air -Blé [5].

Soit, une masse de grain ensilé, à une teneur en eau, et à une température donnée.

Si on ne ventile pas, le grain va imposer l'humidité relative de l'atmosphère intergranulaire.

Inversement, si on ventile avec de l'air extérieur à température et à hygrométrie constantes, c'est l'humidité relative de ce dernier qui va imposer la teneur en eau finale du grain. Ces phénomènes de mise en équilibre au moyen de la ventilation sont excessivement lents. Leur ordre de grandeur est de un à plusieurs mois, selon le débit spécifique d'air appliqué au grain [5].

II.4.3 Diagramme de l'air humide (ou diagramme enthalpique de Mollier du mélange air- vapeur d'eau) :

II.4.3.1 Définition de l'air humide :

L'air sec a le pouvoir d'absorber une certaine quantité d'eau sous forme de vapeur, jusqu'à une limite appelée saturation, au-delà de laquelle la vapeur d'eau en excès se condense. Le pouvoir d'absorption en vapeur d'eau de l'air ainsi que la pression de vapeur d'eau à la saturation augmentent très rapidement avec sa température [16].

II.4.3.2 Constitution du diagramme de l'air humide :

Le diagramme de l'air humide est établi pour des raisons de commodité, figure III.9, il se compose des paramètres caractéristiques suivants :

II.4.3.2.1 Teneur en vapeur d'eau (w) :

Elle représente la masse de vapeur en dissolution dans l'air sec, exprimée en grammes ou kg d'eau par kg d'air sec.

II.4.3.2.2 Enthalpie (h) :

C'est la chaleur totale de 1kg d'air sec + vapeur d'eau en dissolution. L'enthalpie est exprimée en kilocalories par kg d'air sec.

II.4.3.2.3 Humidité relative (ϵ) :

Elle exprime la proportion de vapeur d'eau contenue dans l'air par rapport à la saturation. La courbe $\epsilon = 100\%$ limite le diagramme dans sa partie inférieure.

II.4.3.2.4 Température sèche (t) :

Elle est mesurée par un thermomètre dans l'air environnant.

II.4.3.2.5 Température humide (t') :

Elle est mesurée par un thermomètre dont le bulbe est maintenu humide par une gaze imbibée d'eau et située dans un courant d'air.

II.4.3.2.6 Volume spécifique de l'air (ρ), ou volume massique :

Il est exprimé en m^3 d'air humide par kg d'air sec. On obtient la masse volumique réelle ρ du mélange air- vapeur par la relation :

$$\rho = \frac{1}{V}(1+w) \quad (\text{kg d'air humide} / m^3 \text{ d'air humide})$$

II.4.3.2.7 Tension de vapeur d'eau (f) :

C'est la pression partielle de la vapeur d'eau dans le mélange.

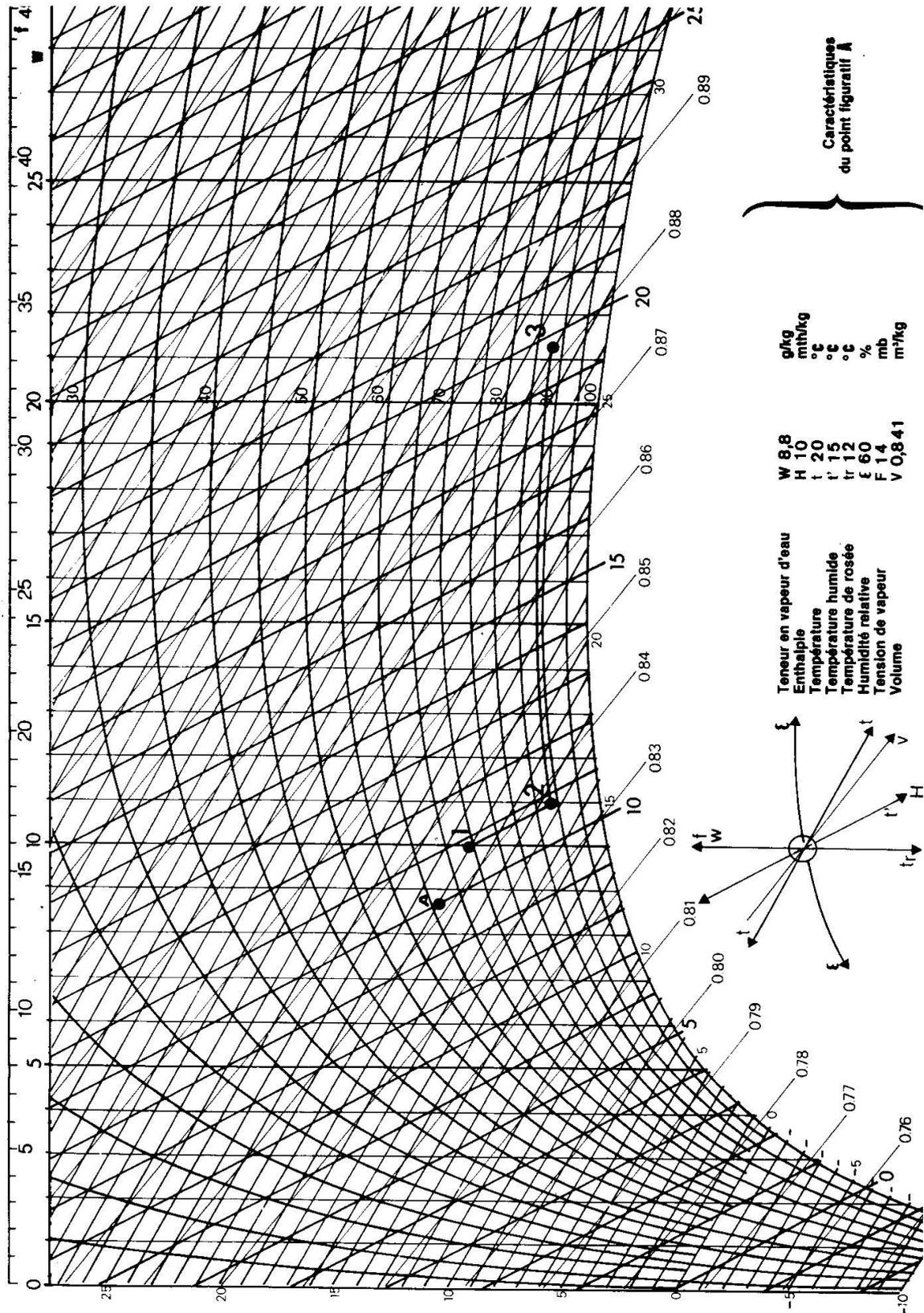


Figure II.7 : Diagramme de l'air humide [5].

II.4.4 Evolution du point caractéristique sur le diagramme de l'air humide :

II.4.4.1 Réchauffage de l'air :

Lorsqu'on réchauffe de l'air ambiant (température t_1 , H.R. = ε), le point caractéristique se déplace verticalement suivant une droite de même teneur en eau, ($w = \text{constante}$) : points 1 à 2 sur la figure II.8 (point 2 : température t_2 , H.R.). On abaisse ainsi son humidité relative, et l'on augmente son pouvoir séchant.

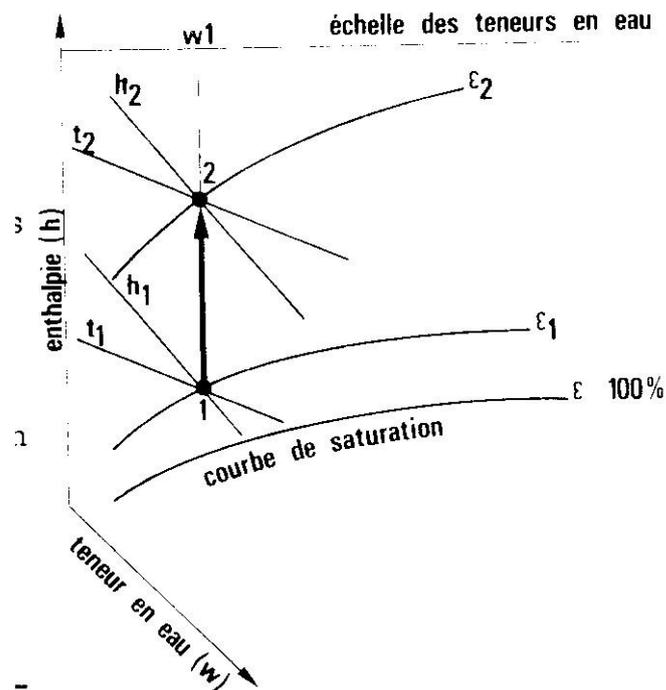


Figure II.8 : Réchauffement de l'air à teneur en eau sur le diagramme de l'air humide [21]

II.4.4.2 Séchage ou réhumidification du grain (Air et grain étant à la même température):

Lorsqu'on met en contact de l'air sec (température t_1 , H.R. = ε_1) avec un produit humide à même température que cet air, l'effet observé est généralement le séchage, et le point caractéristique de l'air se déplace vers le bas suivant une isenthalpe ($h = \text{constante}$) ; point 1 à 2 sur la figure II.9 (point 2 : température t_2 , H.R. = ε_2).

C'est le séchage de type isenthalpique. En effet, il se produit entre l'air et le produit un échange d'eau et de chaleur, dont le bilan se traduit par conservation de la chaleur totale, c'est-à-dire de l'enthalpie. Le point maximal d'évolution possible du point caractéristique sur une isenthalpe est la courbe de saturation ($\varepsilon = 100\%$). Toutefois, lorsque le produit humide présente, en raison de sa teneur en eau, une humidité relative d'équilibre inférieure à 100%, le point caractéristique se déplace seulement jusqu'à cette valeur d'équilibre. Dans un cas comme dans l'autre, l'air absorbe une quantité de vapeur d'eau supplémentaire et sa température sèche s'abaisse. Cette température de refroidissement est appelée température isenthalpique d'équilibre (température t_2 sur la figure II.9). Il faut encore remarquer que le pouvoir séchant de l'air est d'autant plus grand que l'humidité relative de l'air de ventilation est basse par rapport à l'humidité relative d'équilibre [21].

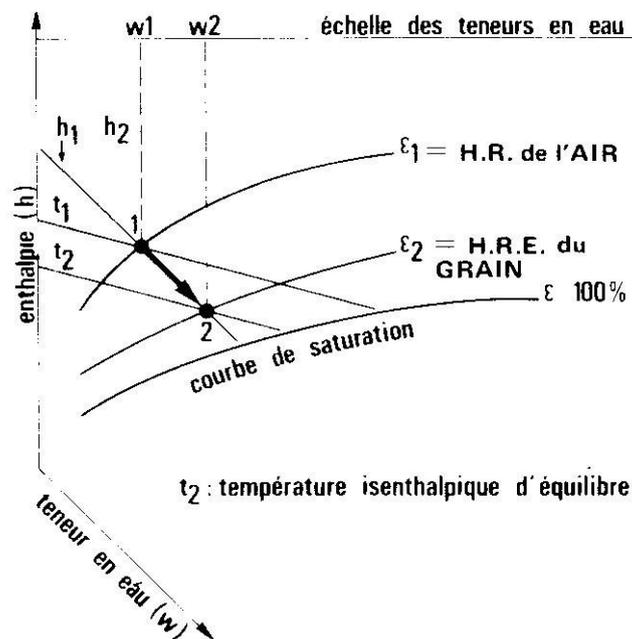


Figure II.9 : Séchage isenthalpique [21].

Par contre, le pouvoir séchant est nul lorsque l'humidité relative de l'air est égale à l'humidité relative d'équilibre.

Inversement, si l'humidité relative de l'air (ε_1) est supérieure à l'humidité relative d'équilibre du grain (ε_2), autrement dit, quand on envoie de l'air humide sur du grain sec, l'effet observé est la réhumidification du produit. Dans ce cas, le point caractéristique de l'air évolue vers le haut, mais encore sur une même enthalpie : points 1 à 2 sur la figure II.10. On a donc ici une réhumidification de type isenthalpique, puisque l'air cède au grain (w_1-w_2) grammes d'eau par kg d'air sec. Par ailleurs, l'air et la masse de grain sont réchauffés par la température isenthalpique d'équilibre t_2 .

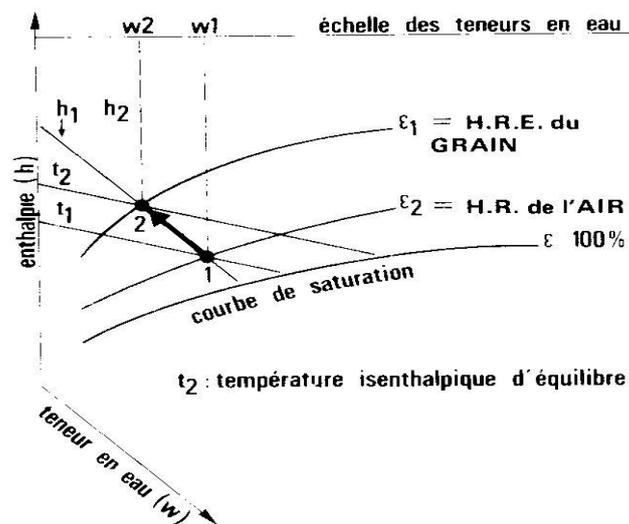


Figure II.10 : Réhumidification de type isenthalpique [21].

II.4.4.3 Refroidissement du grain par la ventilation :

Lorsque l'air frais (température t_1 , H.R = ε_1) est utilisé pour refroidir du grain chaud, le point caractéristique de l'air qui traverse le grain se déplace d'abord suivant une isenthalpe dans la partie de grain déjà refroidie : point 1 à 2 sur les figure II.11 et II.12 (point 2 : température t_2 , H.R = ε_2), ensuite selon une ligne de même humidité relative dans la zone de transition entre le grain refroidi

et le grain encore chaud : point caractéristique de l'air évoluant jusqu'à un point situé à l'intersection de la courbe d'humidité relative d'équilibre du produit (ε_2) avec sa température sèche initiale (t_3).

En effet, l'air se réchauffe au contact du grain chaud tout en se mettant à l'équilibre hydrique que ce dernier lui impose. Ce phénomène se produit au court du refroidissement des grains dans la première phase de l'opération de ventilation.

Par la suite, lorsque le grain est refroidi, il ne reste plus que l'effet de séchage résiduel de type isenthalpique (figure II.11, point 1 à 2), ou l'effet résiduel de réhumidification de type isenthalpique (figure II.12, point 1 à 2), si l'H.R de l'air est égale à l'H.R.E. d'équilibre du grain les point 1 et 2 sont confondu, il n'y a dans ce cas, aucun effet résiduel.

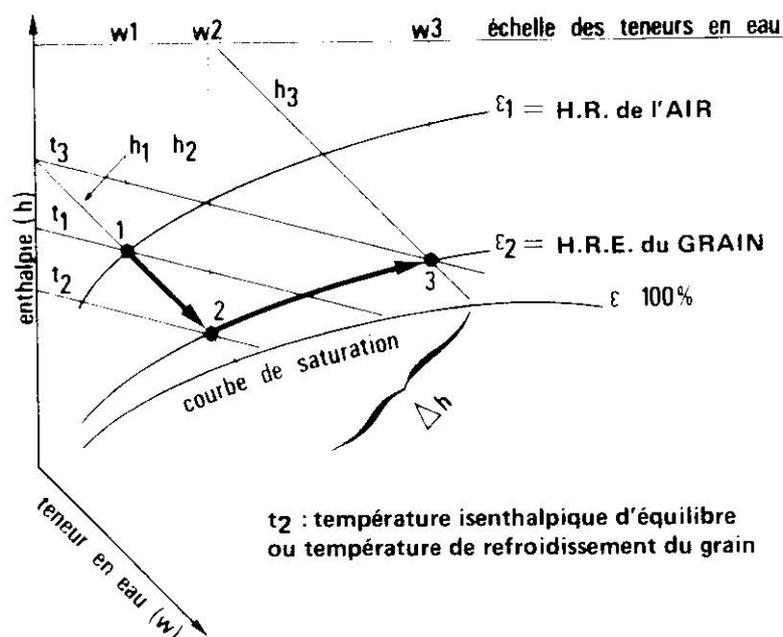


Figure II.11 : Evolution du point caractéristique de l'air sur le diagramme de l'air humide au cours d'une ventilation, avec de l'air dont l' H.R est inférieure à l'H.RE. [21].

Selon que l'H.R de l'air est inférieure, égale ou supérieure à l'H.R.E du grain, la température finale de refroidissement du grain t_2 (température isenthalpique d'équilibre) est :

- inférieure à la température de l'air ($t_2 < t_1$) : c'est l'effet dit de

Sur-refroidissement (cas de la figure II.11) : ici le refroidissement réel ($t_3 - t_2$) est supérieur au refroidissement potentiel ($t_3 - t_1$).

- Egale à la température de l'air ($t_2 = t_1$) : ici le refroidissement réel ($t_3 - t_2$) est identique au refroidissement potentiel ($t_3 - t_1$).

- Ou supérieure à la température de l'air ($t_2 > t_1$) : c'est l'effet dit de

Sous-refroidissement ; ici, le refroidissement réel ($t_3 - t_2$) est inférieur au refroidissement potentiel ($t_3 - t_1$) ; ce cas est fréquent en ventilation nocturne quand l'H.R de l'air est supérieure à 70-75% pour des grain aux normes.

Il est à noter que dans presque tous les cas de figure de refroidissement par ventilation, il y a globalement, une tendance vers un léger séchage et non vers la réhumidification du produit. Cet effet de séchage est de ($W_3 - W_1$) gramme d'eau par kg d'air sec traversant le produit ; il est amplifié si l'H.R de l'air est plus basse que l'H.R.E du grain (cas de la figure II.11), c'est-à-dire lorsque $W_1 < W_2$; il est minoré dans la situation inverse lorsque l'H.R de l'air est plus élevée que l'H.R.E du grain (cas de la figure II.12), c'est-à-dire quand $W_1 > W_2$. Par ailleurs, cet effet de séchage est d'autant plus important que l'amplitude de température entre l'air et le grain est grande ($t_3 - t_1$). C'est ce que l'on recherche dans le procédé de refroidissement lent différé. Par contre, en ventilation classique de grains aux normes d'humidité, cet effet de séchage par refroidissement qui doit être limité pour ne pas occasionner une freinte de poids supplémentaire.

La ventilation nocturne, avec une hygrométrie qui peut être élevée, est seulement possible, mais recommandée, on limite l'effet de séchage par refroidissement.

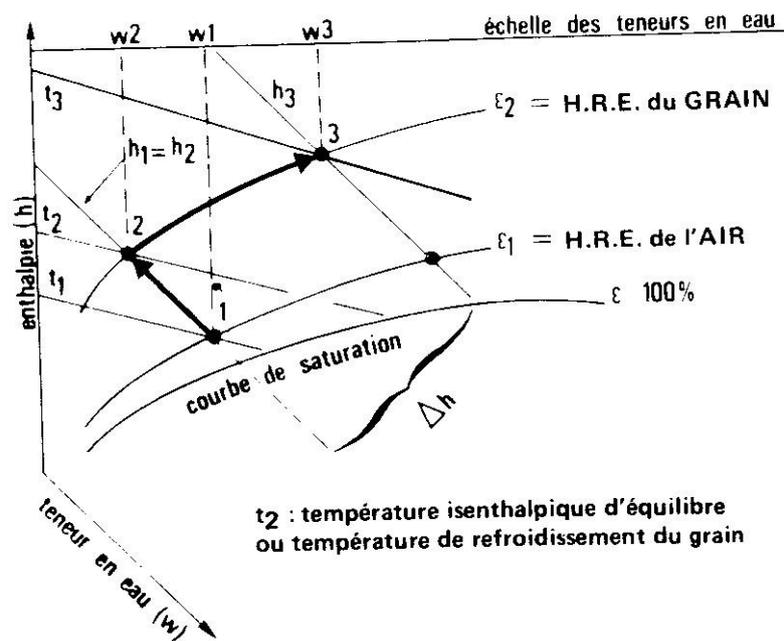


Figure II.12 : Evolution du point caractéristique de l'air sur le diagramme de l'air humide [21].

II.4.5 Calcul énergétique :

Les résistances opposées au déplacement de l'air peuvent être classées en trois grandes familles [10]:

- Celles dues au système de répartition d'air.
- Celles dues au dispositif de diffusion de l'air dans le grain.
- Celles dues au grain.

II.4.5.1 Pertes de charge dues au système de répartition de l'air :

La contre-pression, résultant de la résistance du circuit à l'écoulement de l'air, dépend d'un grand nombre de facteurs. Pour assurer l'écoulement de l'air, il faut bien plus de pression avec une canalisation de faible section. Il est difficile de faire passer l'air dans un coude brusque de 90° que dans un tube à grand rayon de courbure. En chaque point du réseau, de l'énergie est consommée, ce qui produit une contre-pression statique s'opposant à celle fournie par le ventilateur.

Les pertes de charge singulières ΔP sont proportionnelles à la pression dynamique [10].

$$\Delta P = KP_d = k \frac{V^2}{16} \quad (\text{II.4})$$

II.4.5.2 Les pertes de charges dues au système de diffusion de l'air dans le grain :

Les modes de diffusion sont :

- Soit un faux fond, solution qui permet une répartition très homogène de l'air dans le grain.
- Soit une cheminée centrale.
- Soit des gaines de ventilation.

- II.4.5.2.1 Diffusion par faux fond :

Il n'y a pas de majoration à appliquer avec une chambre de mise en charge ayant une hauteur convenable et un faux fond assurant un coefficient de passage de l'air 30% minimum, la perte de pression à la traversée du fond étant négligeable dans ce cas.

- II.4.5.2.2 Diffusion par cheminée centrale :

La perte de pression est donnée en mm de C. E. par la formule suivante :

$$\Delta P = \left(-36,66K_1 \cdot Q \cdot \log_{10} \frac{r_1}{r_2} \right) + \left(253,37K_2 \cdot Q^2 \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_1 \times r_2} \right) \quad (\text{II.5})$$

Avec :

Q : est le débit en m^3 / s par mètre linéaire de cheminée,

r_1 et r_2 sont les rayons intérieur et extérieur du silo en mètres.

K_1 et K_2 ont les coefficients [13].

- II.4.5.2.3 Diffusion par gaines :

On assimile les gaines, quelque soit leur forme, à des demi- cheminées cylindriques dont le rayon fictif r_1 est calculé de façon à ce que la surface de

distribution de l'air soit égale à celle de la gaine, le rayon r_2 est le demi-espacement entre gaines

$$r_1 = \frac{S}{\pi.l} \quad r_2 = \frac{d}{2}$$

On applique ensuite la formule générale de diffusion par cheminée (II.5) [10].

II.4.6 Conditions de ventilation :

On utilise le diagramme de conservation présenté en annexe II, pour éviter le risque de réhumidification.

On note l'intersection entre la droite de la température de l'air et la courbe de la température du grain. Puis on note l'humidité de l'air correspondante à ce point. Cette humidité de l'air est l'humidité relative maximale au dessous de laquelle on peut ventiler sans risque de réhumidification.

Exemple :

Pour une température de l'air de 15°C.

Et la température du grain est de 20°C

On remarque qu'il n'y a pas d'intersection entre les deux courbes (température de l'air et température de grain), donc on peut ventiler à n'importe quelle humidité de l'air.

Si la température du grain est 15°C, l'intersection correspond à 74% de l'humidité relative de l'air, donc on ventile avec de l'air ayant une humidité relative inférieure à 74% [21].

Chapitre IV

Chapitre IV

Interaction entre eau-grains dans les silos

Interaction entre eau-grains dans les silos

III.1 Généralités :**III.1.1 Introduction :**

On observe que le débit de la circulation de l'eau diminue progressivement au cours de la période de formation depuis la fécondation jusqu'à la maturité. A la maturité, il n'y a plus d'eau en circulation, mais uniquement de l'eau adsorbée dont le comportement peut être analysé en termes thermodynamique.

On peut schématiquement considérer qu'il règne à la surface de la macromolécule un champ de force qui influence un espace limité aux alentours, immobilisant un certain nombre de molécules d'eau adsorbée. Mais au-delà d'une certaine distance, l'influence du champ de force devient négligeable. Celui-ci n'agit plus sur l'eau liquide environnante [12].

Les grains ne comportent pas une phase liquide continue, mais uniquement cette fraction d'eau adsorbée, en équilibre avec la phase vapeur environnante.

III.2 Teneur en eau (H_2O %) :

La « teneur en eau » (ou « titre en eau », ou plus communément « humidité ») de la substance rend compte de l'aspect extensif de l'hydratation. Elle s'exprime en gramme d'eau rapportée à 100 g de substance sèche (Teneur en eau H_2O % s.s), ou plus habituellement rapportée à 100g de substance humide (H_2O % s.h). Les deux expressions suivantes sont liées par une relation [7].

$$H_2O\%_{s.s} = \frac{100(H_2O\%_{s.h})}{100 - H_2O_{s.h}} \quad (III.1)$$

$$H_2O\%_{s.h} = \frac{100(H_2O\%_{s.s})}{100 + H_2O_{s.s}}$$

III.3 Concepts thermodynamique d'activité de l'eau :

L'activité de l'eau (A_w) est un paramètre thermodynamique qui se définit par rapport au potentiel chimique de l'eau, soit :

$$\mu_{(p,T)} - \mu'_{(p,T)} = RT \log_e A_w \quad (4.2)$$

Où μ est le potentiel chimique de l'eau dans le produit, μ' Celui de l'eau pure à la même température T (°C) et à la même pression p, R est la constante des gaz parfaits [1].

III.4 Corrélation entre A_w et la teneur en eau : la courbe isotherme de sorption- désorption :

Lorsqu'un produit humide est placé dans une atmosphère, gazeuse contenant de la vapeur d'eau, il y a des échanges de chaleur et de vapeur d'eau entre les deux phases, soit que le grain absorbe de l'eau et se réhumidifie, soit au contraire qu'il perde de l'eau au profit de l'atmosphère, jusqu'à ce que l'équilibre thermodynamique s'établisse.

La phase solide, où l'on peut définir la teneur en eau et l'activité de l'eau et, la phase vapeur où l'on peut mesurer la pression partielle de vapeur d'eau (p), ou encore l'humidité relative

$$H.R = \left(\frac{p}{p'} \right)_T \times 100 \quad (\text{III.3})$$

Dans les condition d'équilibre, et en admettant que l'eau soit un gaz parfait [1]

$$A_w = \frac{p}{p'} = \frac{H.R.E\%}{100} \quad (\text{III.4})$$

III.5 Transfert de chaleur et de vapeur d'eau dans le grain :

Nous trouvons dans un problème de transfert de chaleur et de vapeur d'eau entre deux milieux, un milieu vivant constitué par le grain et des microorganismes, et un autre constitué par l'air.

Le transfert de chaleur et celui de la vapeur d'eau se font par l'intermédiaire de l'air interstitiel circulant entre les grains (convection forcée), en particulier les transferts de chaleur par conduction entre les grains sont très faibles et en général négligeables, c'est-à-dire que la température à la surface d'un grain est pratiquement égale à la température moyenne de celui-ci :

L'échange de chaleur dans un volume unité de grains traversé par de l'air qui le est régit par une loi de la forme :

$$dQ = K(t_g - t_a)dt \quad (\text{III.5})$$

Avec dQ quantité élémentaire de chaleur échangée pendant le temps élémentaire dt

t_a, t_g Températures de l'air et du grain, K coefficient de convection.

Pour le transfert de vapeur d'eau, l'enthalpie d'un kilogramme d'air ayant une teneur en eau W est donnée par la formule $h = 0,24t + 0,6W$, l'enthalpie d'un mètre cube d'air dans des conditions normales sera donc [8] :

$$h = 0,3t + 0,75W$$

Soit :

$$dh = 0,3dt + 0,75dW \quad (\text{III.6})$$

Où

$$\frac{dh}{dt} = 0,3 + 0,75 \frac{dW}{dt}$$

Et en posant :

$$c_a = \frac{dh}{dt}$$

$$c_a = 0,3 + 0,75 \frac{dW}{dt}$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{4}{3}(c_a - 0,3) \quad (\text{III.7})$$

III.6 Propriétés thermiques des grains :

III.6.1 Définition :

Le grain est à l'état de vie ralentie et en milieu favorable, il peut reprendre son activité de respiration.

En effet, le complexe micro- organismes- grains est le siège d'une intense activité respiratoire. Ce phénomène est exothermique, c'est-à-dire

s'accompagnant d'un dégagement de chaleur, il existe une relation entre le dégagement de gaz carbonique et la quantité de chaleur produite [18]:

$$q = 1,07 d \quad (\text{III.8})$$

q : la quantité de chaleur produite par tonne de matière sèche et par heure.

d : le dégagement de gaz carbonique exprimé en mg par 100g de matière sèche et par 24 heures.

Le dégagement de chaleur résulte de l'équation de combustion calorimétrique d'un hexose et est vérifiée avec une assez bonne précision :



En atmosphère confinée, dès que la teneur en gaz carbonique dépasse 10%, le phénomène respiratoire est bloqué. Les dégagements simultanés de gaz carbonique et de chaleur contribuent à la dégradation de la qualité du produit [6].

III.6.2 Facteur agissant sur la production de chaleur et de gaz carbonique :

III.6.2.1 Action de la température :

Jusqu'à des températures de 28°C environ, le dégagement de gaz carbonique double tous les 5°C. Au-delà, il tend vers une limite d'autant plus basse que l'humidité du grain est elle-même plus faible [5].

III.6.2.2 Action d'humidité :

Le dégagement de gaz carbonique double tous les 1,5% pour des humidités allant jusqu'à 20% [5].

III.6.2.3 Formule de dégagement de gaz carbonique :

La formule la plus simple, valable jusqu'à 28°C environ, est [5] :

$$q = Ke^{at} \quad (\text{III.10})$$

K est la constante dépendant de l'humidité

a est l'inverse d'une température et égale à 0,1385.

t Est la température en C °.

Pour des gammes plus étendues :

$$q = \frac{Ae^{(Kt-m)}}{1 + e^{(Kt-m)}} \quad (III.11)$$

III.7 Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente « poids spécifique » dépend notamment de la teneur en eau et du tassement des grains. D'une manière générale, il y a dans une masse de grains en vrac un gradient de masse volumique croissant avec la profondeur des grains [10].

On distingue par porosité le rapport du volume intergranulaire au volume total :

$$\varepsilon = 1 - \frac{Ps}{Pv} \quad (III.12)$$

ε : La porosité exprimé en %

Ps: poids spécifique en place kg/m^3

Pv : poids volumique kg/m^3

III.8 Pertes de charges dues à l'écoulement unidimensionnel de l'air à travers des masses de grains :

III.8.1 Influence de la vitesse de l'air :

La vitesse apparente de l'air dans le grain, ou vitesse de l'air à l'attaque du grain, appelée vitesse débitante, est le rapport du débit total à la section de passage de l'air dans la cellule.

En France MATTEI propose une équation, dérivée de la théorie générale de KOZENY-CAREMAN et ERGUN-MEYER sur les écoulements gazeux dans des milieux poreux non consolidés [4].

$$\Delta p = k_1 V^2 + k_2 V \quad (III.13)$$

Avec, Δp : Perte de charge par mètre linéaire, en mmCE.

V : vitesse de l'air en cm/s.

k_1 et k_2 : Coefficients dépendant de la nature du grain et de sa teneur en eau, tableau IV.1

Chapitre V
Chapitre V
Matériels et méthodes

IV.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué des éléments suivants :

1. Silo
2. Ventilateur
3. Anémomètre
4. Thermomètre
5. Humidimètre
6. Sonde d'échantillonnage.

IV.1.1 Description détaillée des éléments

IV.1.1.1 Le silo

Nous avons conçu et fabriqué un silo à échelle réduite, figure IV.1 en tôle de forme cylindrique en utilisant les moyens de l'UHBC. Le silo a les dimensions suivantes :

Section	$0,708 m^2$
Hauteur	2,06m
Contenance	$1,17 m^3$
Capacité	936 kg

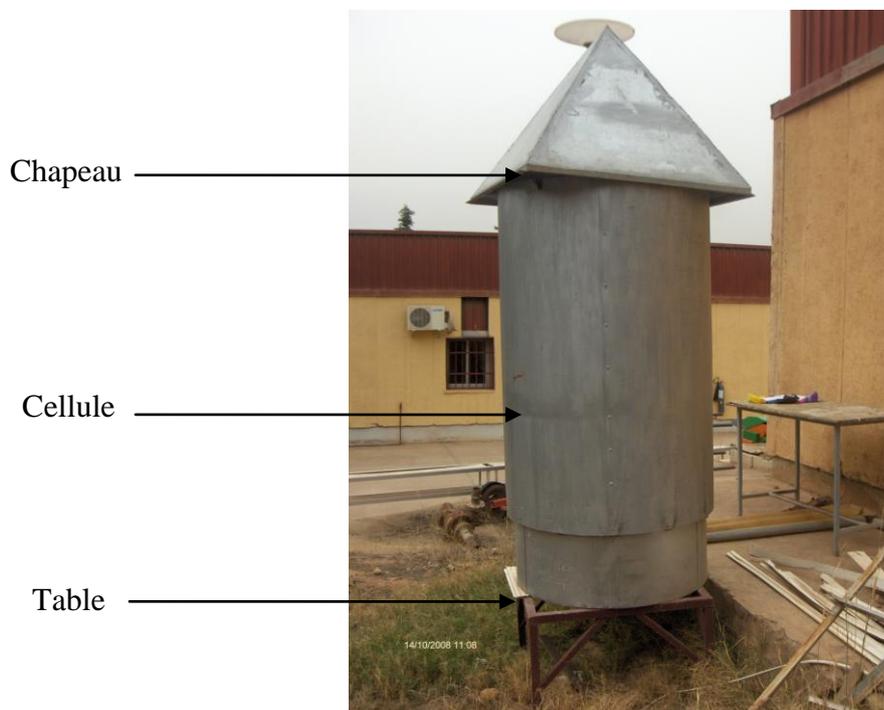


Figure IV.1 : Silo expérimentale à échelle réduite

Le silo comporte les éléments suivants :

- a. Une double paroi en bois
- b. Un chapeau
- c. Une porte de visite
- d. Le plancher perforé
- e. Les orifices de prélèvement
- f. La table du silo (support)

IV.1.1.1.1 Double parois

Elle permet d'assurer un bon isolement thermique du grain, afin d'empêcher les échanges thermiques entre le grain et le milieu ambiant. Elle a une forme cylindrique en bois, figure IV.2, et entoure le silo, l'espace entre le silo et la paroi isolante est de 5cm.



Figure IV.2 : Double paroi

IV.1.1.1.2 Chapeau

Il a une forme pyramidale, figure IV.3, il joue le rôle d'un abri, afin d'éviter l'entrée des poussières, de la pluie, des insectes etc..... par le haut du silo.

L'espace entre le chapeau et le haut du silo permet d'assurer l'échappement de l'air usé



Figure IV.3 : Chapeau du silo

IV.1.1.1.3 Porte de visite

Elle se trouve à 40cm de la base du silo, et permet la vidange du silo, figure IV.4, ainsi que la prise des mesures.



Figure IV.4 : Porte visite

IV.1.1.1.4 Le plancher perforé

On utilise trois modes de diffusion de l'air différents :

1. Plancher entièrement perforé (figure IV.5)

Les perforations sont réparties à 76% de la totalité de la surface du plancher, afin d'assurer une diffusion de l'air homogène.



Figure IV.5 : Plancher entièrement perforé

2. Plancher perforé en gaines surajoutées :

La surface du plancher reçoit des gaines surajoutées qui doivent être espacées telles que, la largeur de la gaine doit être égale à celle de la surface non perforée.

Dans notre cas, le diamètre du plancher est de 0,95m, la largeur des gaines surajoutées est de 0,13m, et la distance entre les gaines surajoutées est de 0,13m.

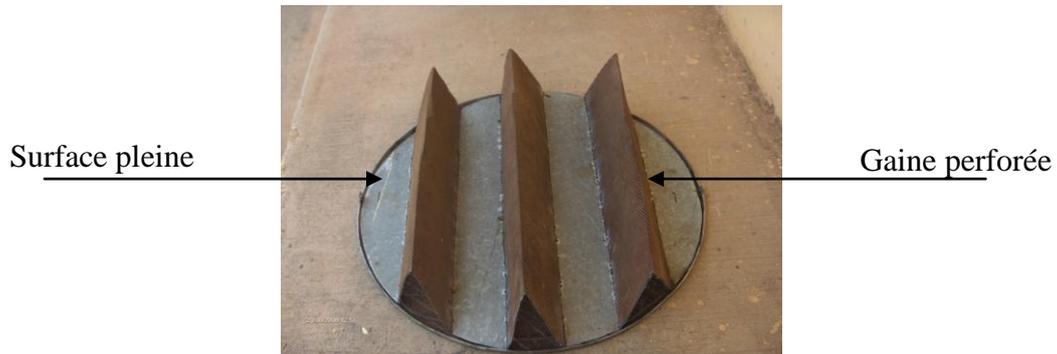


Figure IV.6: Plancher en gaines surajoutées

3. Plancher perforé en forme de X :

La largeur de la surface perforée est de 20cm figure IV.7.



Figure IV.7 : Plancher en forme de x

e. Les orifices de prélèvement :

Nous avons 4 orifices perforés à distance équitable de 40cm, l'un de l'autre sur toute la hauteur du silo.

Chaque orifice mesure 1cm de diamètre, afin de permettre l'accès facile de la sonde thermométrique (figure IV.8).



Figure IV.8 : Orifices de prélèvement

f. La table du silo :

On utilise la table du silo, (figure IV.9), afin d'éviter le contact du silo avec le sol et également comme support du dispositif expérimental.



Figure IV.9 : Table du silo

IV.1.1.2 Ventilateur :

Le choix du ventilateur dépend des paramètres suivants :

Surface de la cellule $s = 0,708 \text{ m}^2$

Hauteur de la cellule $H = 1,66 \text{ m}$

Volume de la cellule $v = 1,17 \text{ m}^3$

Débit spécifique $q_v = 40 \text{ m}^3 / \text{h} / \text{m}^3$

Débit du ventilateur : $Q_v = q_v \times v = 46,81 \text{ m}^3 / \text{h}$

Vitesse de l'air, dans la cellule $V = Q_v / s = 1,83 \text{ cm/s}$

Calcul de la pression, Statique par mètre : $\Delta p = k_1 V^2 + k_2 V$

Les coefficients (k_1, k_2) sont choisis à partir du tableau IV.1

Grain	Poids spécifique en place (kg/m ³)	K ₁	K ₂
Maïs	750	0,6185	0,05372
	800	0,9530	0,07768
	850	1,4980	0,11500
Blé	750	1,933	0,0860
	800	2,802	0,1170
	850	4,082	0,1613
Orge	700	3,959	0,1571
	750	5,639	0,2089
Colza	600	3,471	0,0750
	650	5,580	0,1140
	700	9,210	0,1707
Sorgho	700	1,066	0,0258
	750	1,622	0,0367
	800	2,526	0,0536
Tournesol	450	1,968	0,1003
	500	3,459	0,1587
	550	6,249	0,2601

Tableau IV.1 : Les coefficients (k_1, k_2), [14].

A N : pour le blé

$$\Delta p = 0,117 \times (1,83)^2 + 2,802 \times (1,83)$$

$$\Delta p = 5,52 \text{ mmCE}$$

La pression statique de pour toute la hauteur du grain : $p_s = \Delta p \times H = 9,16 \text{ mmCE}$

Afin de déterminer le ventilateur qui peut satisfaire le type de ventilation que l'on souhaite avoir (refroidissement + conditionnement), il faut prévoir plusieurs courbes

Les ventilateurs sont choisis en vue de fournir le débit d'air qui convient sous une certaine pression et leurs performances sont définies principalement par ces deux paramètres

Le débit de l'air à mettre en œuvre étant $46,8\text{ m}^3/\text{h} \approx 47\text{ m}^3/\text{h}$, la pression statique sous laquelle il devra être insufflé est 9 mmCE.

Tout ventilateur est donc caractérisé par un ensemble de courbes débit-pression, pour une vitesse de rotation et pour un fluide à caractéristiques connues, on a une seule courbe de caractéristique reliant le débit fourni à la pression. Cette dernière dépend uniquement de la résistance à l'écoulement de l'air dans le circuit. Le point de fonctionnement est obtenu par l'intersection de la courbe caractéristique du ventilateur avec celle de la conduite

La fiche technique, en annexe III, fournie par le constructeur comporte la courbe caractéristique d'un ventilateur centrifuge à moyenne pression. Modèle MB 12/5 T2 1/7 (figure IV.10)

Les calculs que nous venons d'effectuer nous autorisons à utiliser le ventilateur type MB 12/5 T2 1/7 que l'on a acheté du marché.

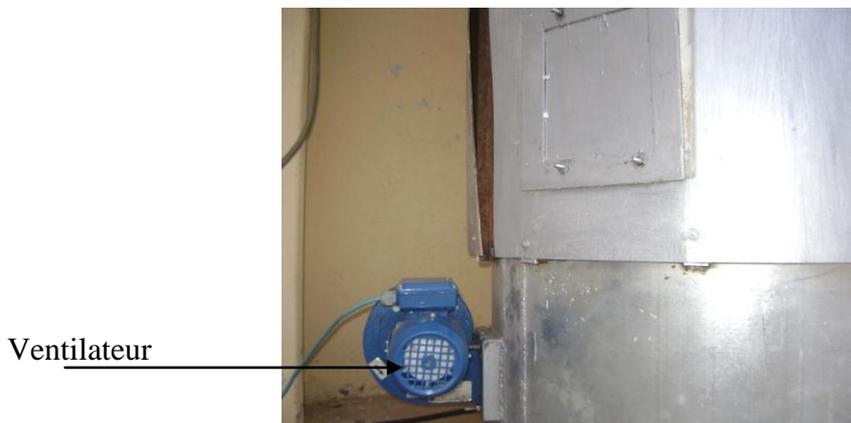


Figure IV.10 : Ventilateur centrifuge, Modèle MB 12/5 T2 1/7

IV.1.1.3 Anémomètre à fil chaud



Figure IV.11:

Anémomètre, VELOCICALC

8386de TSI

Les anémomètres peuvent être divisés en deux classes :

- ceux qui mesurent la vitesse
- ceux qui mesurent la pression du vent

Cependant, il y a une relation étroite entre la vitesse et la pression. Ainsi, un appareil prévu pour une mesure fournira des informations sur les deux quantités. Le premier anémomètre a été inventé par Leone Batista Alberti au XV^e siècle.

L'anémomètre utilisé pour nos mesures est de type : VELOCICALC 8386de TSI, figure IV.11, il permet les mesures de la vitesse de l'air, la température, l'humidité relative, la pression différentielle. Il calcule le point de rosée et le bulbe humide dans une échelle de vitesse de 0 à 50 m/s, à une température de -10°C à $+60^{\circ}\text{C}$ et dans une gamme de 0 à 100% HR.

L'appareil est programmé pour prendre plusieurs mesures simultanément comme :

- la vitesse de l'air, la température, l'humidité relative
- le calcul du débit d'air et du flux de chaleur, le calcul des turbulences, le calcul du bulbe humide et du point de rosé, le calcul du débit volumique.

Le VELOCICALC possède un capteur de pression différentiel et est conçu pour travailler avec une vaste gamme de sondes : tube de Pitot, anémomètre, pression différentielle. L'appareil est capable d'imprimer les données enregistrées via le système Bluetooth®

IV.1.1.4 Thermomètre :

Le thermomètre à microprocesseur HI 8757 est conçu pour un usage général. Il est simple d'utilisation (figure IV.12). Un commutateur rotatif en face avant, permet la mise sous tension de l'appareil et le choix de la gamme de mesure. Le HI 8757 mesure la température en °C.



Figure IV.12 : Thermomètre, HI 8757

Le tableau IV.2 suivant donne les caractéristiques du thermomètre utilisé :

HI 8757	
Gamme	- 50°C à + 900 °C
Résolution	0,1 °C (-50°C à + 150 °C) 1 °C (- 50°C à + 900 °C)
Précision @ 20 °C	± 0,5 % pleine échelle
Affichage	Cristaux liquides 3 ½ "
Alimentation	Pile 9 V assurant un fonctionnement continu de 200 heures
Sonde	Thermocouple K
Conditions d'utilisation	0 à 50 °C - 95 % d'Humidité Relative
Dimensions	180 X 83 X 40 mm
Poids	350 g avec la sonde

Tableau IV.2 : Caractéristique du thermomètre

IV.1.1.5 Humidimètre :

Le Wile 55 permet de mesurer l'humidité sur 16 types de graines céréalières, oléagineuses ou protéagineuses (figure IV.13).

Le système de bouchon à vis permet de travailler sur le même volume d'échantillon et le même tassement de grains à chaque mesure. Contrairement aux systèmes sans bouchons, celui la garantit de bonnes performances.



Figure IV.13 : Humidimètre Wile 55

IV.1.1.6 Sonde d'échantillonnage :

L'accès facile de la sonde dans la masse de grain nous permet de prendre des échantillons de blé à n'importe quel point souhaité dans la masse granulaire, figure IV.14.



Figure IV.14 : Sonde d'échantillonnage

IV.2 Méthode :

Conditions expérimentales

- Nous avons utilisé du blé récemment récolté de type mexicali.
- Les grains mis dans le silo ont été laissés pendant un mois (avant ventilation).
- Les paramètres mesurés sont la température et l'humidité.
- Les points de mesure sont schématisés sur la figure IV.15 suivante :

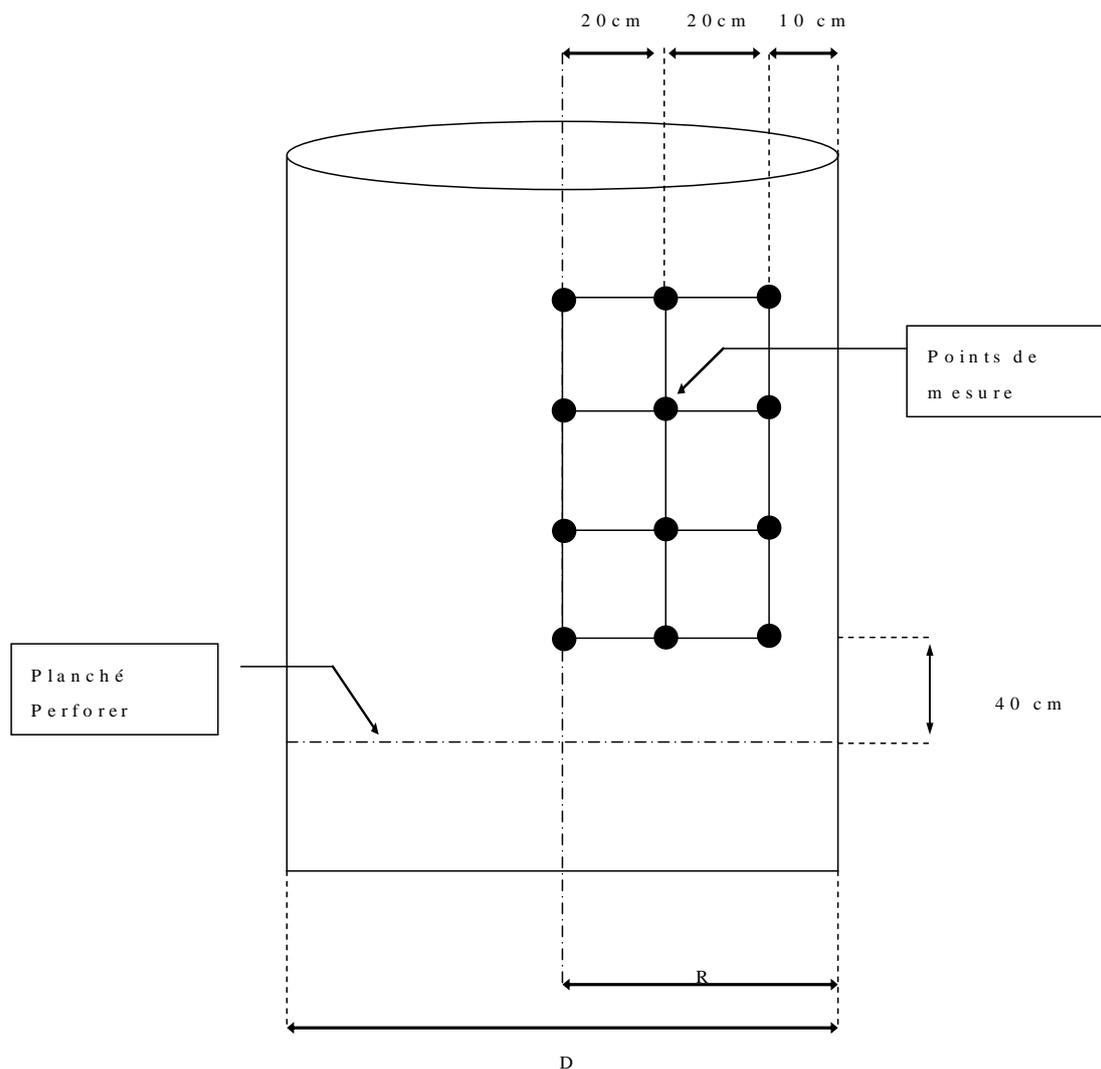


Figure IV.15 : Points de mesures

IV.2.1 Mesure des paramètres de fonctionnement à cellule vide

Débit, vitesse, pression statique

IV.2.1.1 À la sortie du ventilateur

L'accès facile de l'anémomètre à travers la porte de visite, nous permet de mesurer à la sortie du ventilateur, les paramètres de l'air suivants (tableau IV.3)

:

Débit d'air	433 m ³ /h
Vitesse d'air	0,17m/s
Pression statique p₀	14,4mmCE

Tableau IV.3 : Mesures à la sortie du ventilateur

IV.2.1.2 À la sortie du plancher entièrement perforée 76% :

Après avoir placé le plancher entièrement perforé, nous avons procédé aux mesures des paramètres de ventilation à la sortie de ce plancher, les résultats obtenus sont les suivantes tableau IV.4 :

Débit d'air	433m ³ /h
Vitesse d'air	0,22 m/s
Pressions statique p₁	13,8mmCE
Perte de charge	$\Delta p = p_0 - p_1 = 0,6 \text{ mmCE}$

Tableau V.4 : Mesures à la sortie du premier plancher entièrement perforée 76%

p_0 : Pression statique à la sortie du ventilateur (mmCE)

p_1 : Pression statique à la sortie du plancher entièrement perforée (mmCE)

IV.2.1.3 À la sortie du deuxième plancher en X:

Nous avons remplacé le plancher entièrement perforé par le plancher en x, et nous avons obtenu les résultats suivants tableau IV.5 :

Débit d'air	433m ³ /h
Vitesse d'air	0,41 m/s
Pressions statique p₂	11,3mmCE
Perte de charge	$\Delta p = p_0 - p_2 = 3,1 \text{ mmCE}$

Tableau IV.5 : Mesures à la sortie du deuxième plancher en X

p_2 : Pression statique à la sortie du plancher en X (mmCE)

IV.2.1.4 À la sortie du troisième planché en gaines surajoutées

On remplace le plancher en x par un troisième en gaines surajoutées. Les résultats obtenus sont les suivantes tableau IV.6 :

Débit d'air	433m ³ /h
Vitesse d'air	0,26 m/s
Pressions statique p₃	12,8mmCE
Perte de charge	$\Delta p = p_0 - p_3 = 1,6mmCE$

Tableau IV.6 : Mesures à la sortie du troisième planché en gaines surajoutées

p_3 : Pression statique à la sortie du plancher en gaines surajoutées (mmCE)

Commentaires :

-D'après ces résultats, on peut tirer les remarques suivantes :

Le débit d'air est constant, de la sortie du ventilateur, à la sortie du plancher, compte tenu de la conservation du débit.

-La vitesse de l'air à la sortie du ventilateur est faible par rapport à la vitesse de l'air à la sortie des trois planchers. Ceci étant, car la surface à la sortie du ventilateur est la plus grande que celle des orifices des planchers à travers lesquels circulent l'air. Autrement dit l'air se diffuse dans la masse de grain avec une vitesse importante.

-En comparant la vitesse d'air à travers les trois planchers, la vitesse d'air à travers le plancher en X est la plus importante.

IV.2.1.2 Débit, vitesse, pression statique à travers la masse granulaire

Après avoir mesuré les paramètres de fonctionnement à vide, nous avons rempli le silo de grains en couches successives de 20cm d'épaisseur. On mesure pour chaque couche, les paramètres de fonctionnement.

Pour les mesures des paramètres de fonctionnement, on utilise l'anémomètre, en introduisant sa sonde dans la masse granulaire, à travers un orifice exécuté sur la paroi latérale du silo. Les mesures (vitesse et débit de l'air) seront prises, par la suite,

à la position souhaitée en déplaçant la sonde de l'anémomètre. Une fois les données enregistrées à une hauteur donnée, nous passons à la hauteur suivante, et ainsi de suite. On fait la même chose pour la mesure de la pression statique.

On calcule la perte de charge de l'air à la sortie du grain en se servant du tube de Pitot :

$$\Delta P = P_0 - P_{st}$$

On a :

ΔP : Perte de charge

P_0 : Pression statique à la sortie du ventilateur

P_{st} : Pression statique à la sortie du grain

Les mesures des paramètres de fonctionnement sont mentionnées sur le tableau IV.7 suivant :

niveau (cm)	p_0 (mmCE)	p_{st} (mmCE)	Δp (mmCE)	v (m/s)	q_v (m ³ /h)
20	14,4	12,6	1,8	0,32	433
40	14,4	11,4	3	0,34	433
60	14,4	10,1	4,3	0,35	433
80	14,4	8,68	5,72	0,38	433
100	14,4	7,21	7,19	0,42	433
120	14,4	5,63	8,77	0,47	433
140	14,4	3,96	10,44	0,52	433
160	14,4	2,21	12,19	0,6	433

Tableau IV.7 : Débit, vitesse, pression statique à travers la masse granulaire

Commentaires :

En examinant le tableau IV.7 nous pouvons tirer les conclusions suivantes :
 -Le débit d'air est constant pour chaque hauteur de couche de grain, où l'on peut augurer que le débit est conservé.

-La vitesse de l'air à la sortie de la couche de grain augmente à chaque fois qu'on ajoute un tas de grain, cela est dû essentiellement au fait que le grain est un milieu poreux, A chaque fois qu'on ajoute un tas de grain à une hauteur, le tassement de grain devient plus important et l'espace entre le grain diminue, donc la vitesse de l'air à l'issue du grain augmente. Ces résultats nous ont permis de tracer la courbe de la figure IV.16

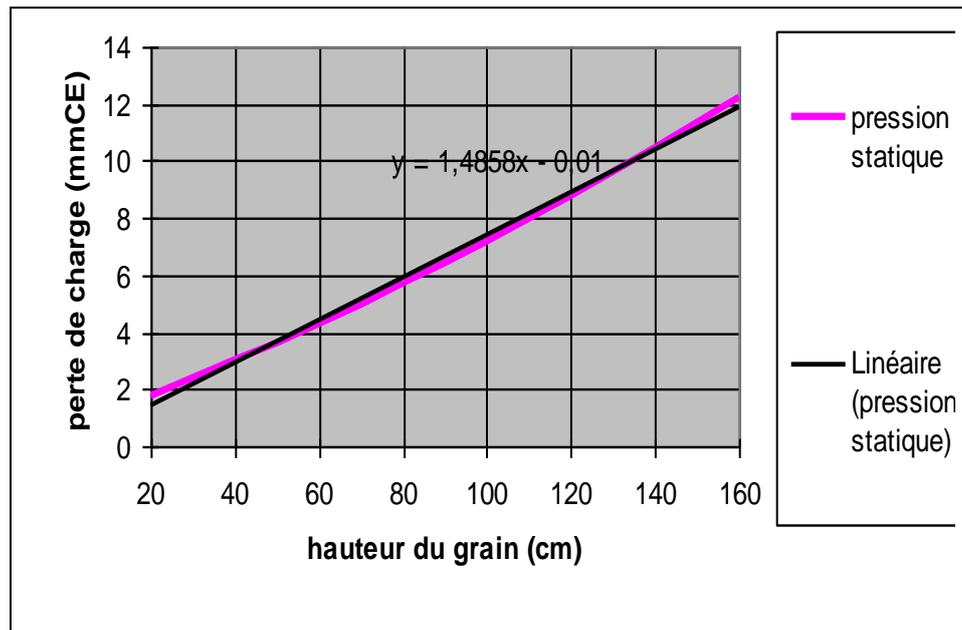


Figure IV.16 : Evolution de la perte de charge dans la masse de grain

En examinant la figure IV.16, dans laquelle, nous pouvons dire qu'après le remplissage du silo par couche, on observe une augmentation de la perte de charge à chaque remplissage du grain. Chaque fois qu'on ajoute une couche de grain, le tassement de grain augmente et les espaces entre les grains sont petits. Donc la friction de l'air est plus grande, cela veut dire que la perte de charge est proportionnelle à la hauteur du grain, et la figure IV.16 montre que le coefficient de corrélation est de 0,9963.

IV.2.1.3 Température et humidité

Protocole d'essai :

Les grains de blé dur, d'humidité initiale variant de 17 à 18% (base humide), ont été prélevés des silos de l'OAIC Khemis Miliana au moment du vidange. Nous

avons rempli le silo expérimental jusqu'à la hauteur de 1,60m. Nous avons prélevé périodiquement l'évolution de la température et de la teneur en eau du grain.

La température a été mesurée à l'aide du thermomètre et la teneur en eau des grains a été mesurée à l'aide du Wile 55 et été étalonné avec la méthode de double pesée selon la norme NFV03-707 base humide (%) où :

$$H = \frac{m_0 - m'}{m_0}$$

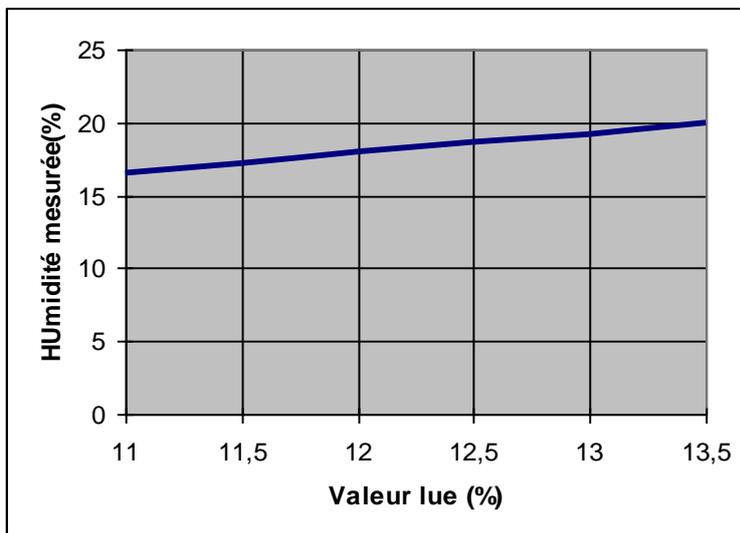
m_0 : Masse de grain, de la prise d'essai (g).

m' : Masse de grain, après le passage à l'étuve (g).

Etalonnage de l'humidimètre Wile 55 :

Valeur lue (%)	11	11,5	12	12,5	13	13,5
Humidité mesurée (%)	16,5	17,2	18	18,7	19,2	20

On trace la droite d'étalonnage :



D'où le coefficient de tendance est :

$$R = 1,5$$

Donc on multiplie les valeurs relevées par le Wile 55 par 1,5.

Mesures :

- On relève périodiquement la température, à l'aide de la sonde du thermomètre, aux points fixés préalablement.
- On place la sonde dans l'orifice de prélèvement de la première hauteur (40cm), figure IV.17.



Figure IV.17 : Emplacement de la sonde de température

- On déplace la sonde radialement à 10cm puis à 30cm et à 50cm.
- On note la température, pour chaque position radiale.
- On passe à la hauteur suivante à 80 cm et on fait la même chose. On répète les mesures aux points fixés précédemment.
- On refait la même procédure jusqu'à la hauteur de 1,60m
- On procède à des prises d'échantillons à partir des points fixés, pour mesurer l'humidité des grains.
- On enfonce la sonde d'échantillonnage par le haut du silo à une hauteur de 1,60m, et à 10cm de la paroi (radialement), comme le montre la figure IV.18.



Figure IV.18 : Emplacement de la sonde d'échantillonnage

- On descend la sonde d'échantillon à une hauteur de 1,20m, (on est toujours à 10cm de la paroi).
- On continue à enfoncer la sonde d'échantillonnage jusqu'à la hauteur de 40cm (on est toujours à 10cm de la paroi).
- Pour chaque position axiale, on note l'humidité du grain à l'aide de l'affichage de l'humidimètre.
- En suite on déplace la sonde d'échantillon vers une nouvelle position axiale à 30cm de la paroi, et on refait la même chose, et cela, pour chaque hauteur.
- On fait la même procédure pour la position axiale de 50 cm.
- Les mesures seront prises quand l'affichage se stabilise.
- Les essais s'effectueront pour les trois planchers.

IV.2.2 Déroulement des essais et prises des mesures

IV.2.2.1 avant ventilation

Après le remplissage du silo jusqu'à une hauteur de 1,60m, on attend jusqu'à ce que la température de la masse de grain devienne supérieure à 19°C.

On enfonce la sonde dans la masse de grain pour vérifier chaque fois la température du grain (à n'importe quelle point).

On mesure aussi la température et l'humidité de l'air extérieur, pour vérifier si les conditions de ventilation permettent le déclenchement du ventilateur.

IV.2.2.2 sous ventilation

On déclenche ensuite le ventilateur (si les conditions sont réunies, on se réfère au diagramme de ventilation, voir annexe).

IV.2.2.3 Déroulement des essais :

Premier jour

Durant le premier jour, on note chaque heure la température.
A la fin des dix premières heures, on mesure l'humidité des grains.

Deuxième jour

On vérifie si les conditions de ventilation sont réunies, on déclenche le ventilateur, on fait les mesures de température deux fois, au milieu de la journée et à la fin de la journée. A la fin de la journée, on prend l'humidité du grain.

On refait les essais chaque jour, si nécessaire 3jours, 4jours,..., jusqu'à ce que le grain sera prêt pour le stockage en toute sécurité (dans des conditions optimales de température et d'humidité,).

chapitre VI
chapitre VI
Résultats et discussions

V.1 Température et humidité avant ventilation

Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux en annexe. Ces résultats ont permis de tracer les courbes de répartition de la température, et de l'humidité dans le silo avant la ventilation (on utilise le logiciel Serfeur). Ces courbes sont données dans les figures V.1 et V.2.

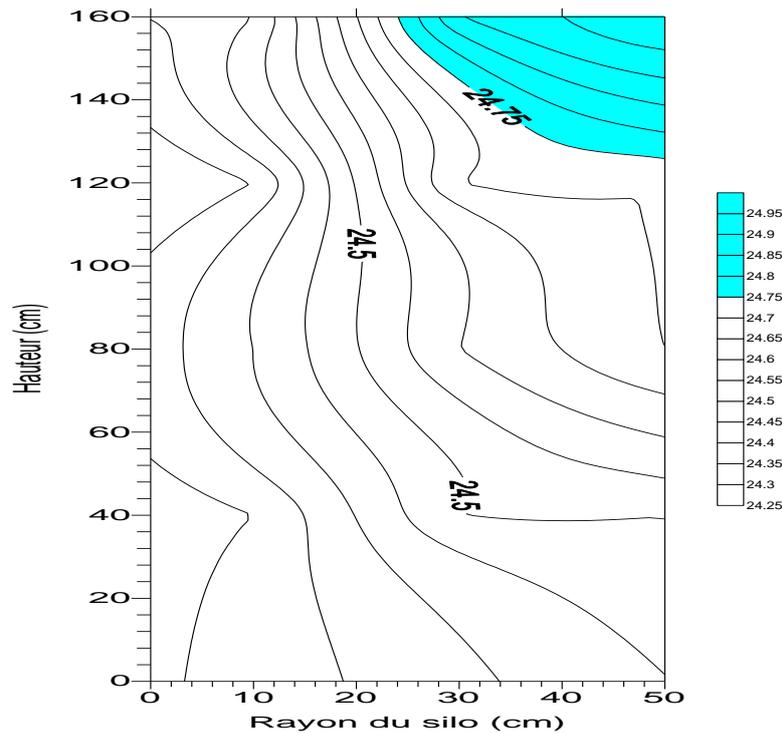


Figure V.1 : Répartition de la température dans le silo

On peut remarquer que la zone en couleur verte est une zone de température élevée par rapport aux autres zones, cela est la conséquence d'un déplacement des courants d'air vers le haut d'où résulte une zone chaude.

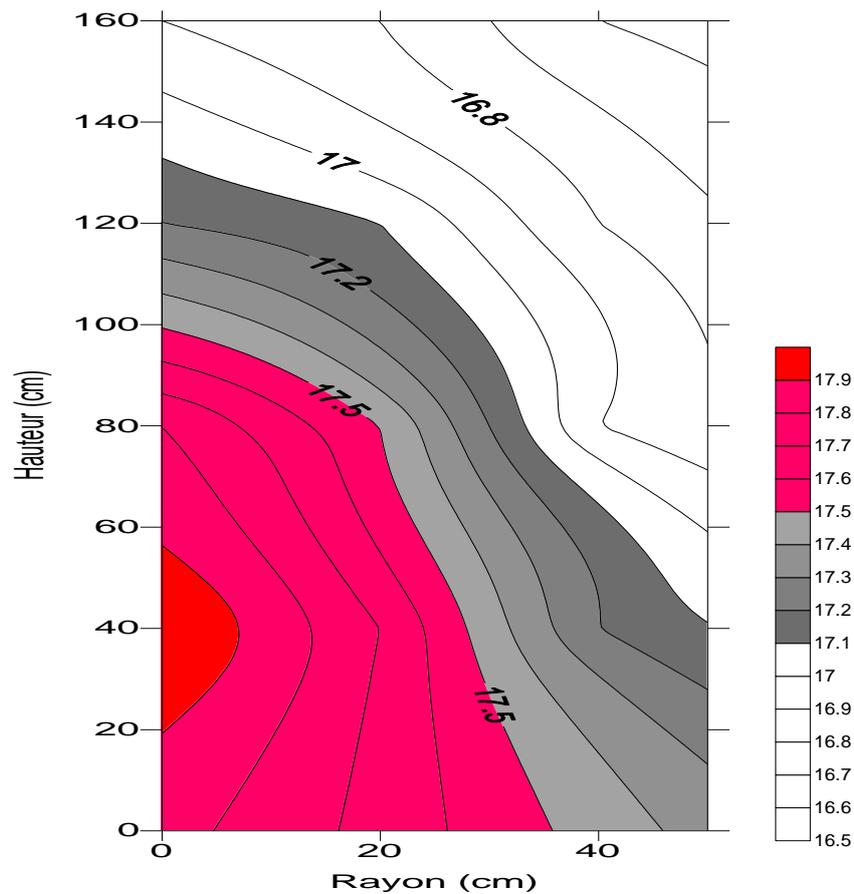


Figure V.2 : Répartition de l'humidité dans le silo

Le déplacement de l'air chaud dans le silo pendant l'été, génère une zone d'humidité élevée (couleur rouge) par rapport aux autres zones, cela est la conséquence des différences de température qui peut entraîner un déplacement de l'humidité vers les zones froides du silo.

Dans le but de déterminer comment la température varie d'un point à un autre le long du rayon, nous avons soumis les résultats obtenu aux tests statistiques et d'analyse de variance de comparaison des moyennes [22].

Les paramètres statistiques calculés sont donnés dans le tableau V.1. A noter que nous avons réparti ces résultats en trois blocs A, B et C, qui représentent le rayon du silo [22].

$$SCE = \Sigma (x^2) - (\Sigma x)^2 / n \quad (V.1)$$

$$SCE = n (\sigma n)^2 \quad (V.2)$$

Rappelons que le nombre de *d.l.* de chaque échantillon est égal à $(n - 1)$ et que le nombre total de *d.l.* est la somme des *d.l.* des échantillons.

Bloc	A	B	C	Total
-	24,30	24,50	24,50	-
-	24,40	24,60	24,70	-
-	24,30	24,70	24,70	-
-	24,40	24,90	25,00	-
Σx	97,40	98,70	98,90	295,00
Xb	24,35	24,68	24,73	24,58
Σx^2	2 371,70	2 435,51	2 445,43	7 252,64
$(\Sigma x)^2 / n$	2 371,69	2 435,42	2 445,30	7 252,08
<i>SCE</i>	0,01	0,09	0,13	0,56
<i>d.l.</i>	3	3	3	11

Tableau V.1 : Les paramètres statistiques calculés

Le problème est donc de savoir si les différences entre les moyennes sont significatives.

Il existe trois façons d'estimer la variance. On se place dans l'hypothèse nulle, c'est-à-dire que toutes les données sont supposées provenir d'une même population normale.

Dans tous les cas, la variance s'exprime par

$$s^2 = SCE / d.l. \quad (V.3)$$

Première estimation.

En comparant les 12 données à la moyenne générale, toutes classes confondues, nous calculons la *SCE* totale, on obtient 0,56. Cette *SCE* ayant 11 *d.l.*, la première estimation de la variance est :

$$0,56 / 11 = 0,05061$$

Deuxième estimation.

Considérons les moyennes des quatre échantillons. On trouve 24,35, 24,68 et 24,73. La *SCE* inter classes est la somme pondérée des carrés des écarts de ces quatre valeurs à la moyenne générale, soit :

$$4 \times 24,35^2 + 4 \times 24,68^2 + 4 \times 24,73^2 - 295^2 / 24 = 7\,254,39 - 7\,252,08 = 2,31$$

Cette *SCE* ayant 2 *d.l.*, la deuxième estimation de la variance est :

$$2,31 / 2 = 1,155$$

Troisième estimation.

La *SCE* intra-classes est simplement la somme des *SCE* des échantillons, soit $0,01 + 0,09 + 0,13 = 0,22$

Le nombre de *d.l.* est la somme des *d.l.* des échantillons, soit $3 + 3 + 3 = 9$. La troisième estimation de la variance est :

$$0,22 / 9 = 0,0244$$

Portons ces résultats sur le tableau V.2 d'analyse de la variance.

Il convient de nommer *carré moyen* l'estimation de la variance.

Source de Variation	SCE	D.L	Carré moyen	Rapport	F de la table
Inter classes	2,31	2	1,155	47,250	5% (19,38)
Intra classes	0,22	9	0,024	-	3% ()
Total	0,56	11	0,051	-	1% ()

Tableau V.2 : Résultats d'analyse de la variance

Analyse de la variance

Dans le cas présent, $F = 47,25$

L'hypothèse nulle est donc rejetée, ce qui signifie qu'il y a des différences significatives entre les moyennes des traitements [22].

V.2 Evolution de la température dans le temps en cours de ventilation

Après que la température des grains aura atteint un certain seuil, nous déclenchons la ventilation et effectuons respectivement les mesures indiquées précédemment.

Les résultats des mesures obtenus sont donnés dans les tableaux, en annexe.

Ces résultats nous ont permis de tracer les courbes d'évolution de la température, figure V.3 à V.11 :

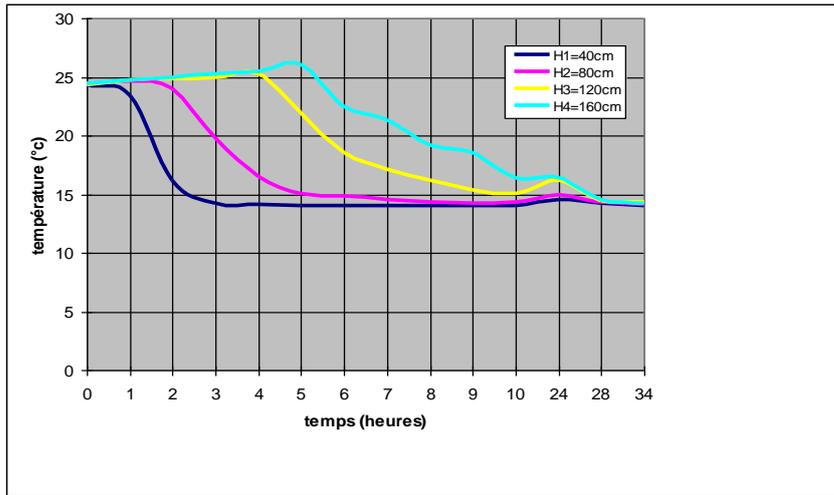


Figure V.3: Plancher entièrement perforé:
Évolution de la température dans le temps à 10cm de la paroi

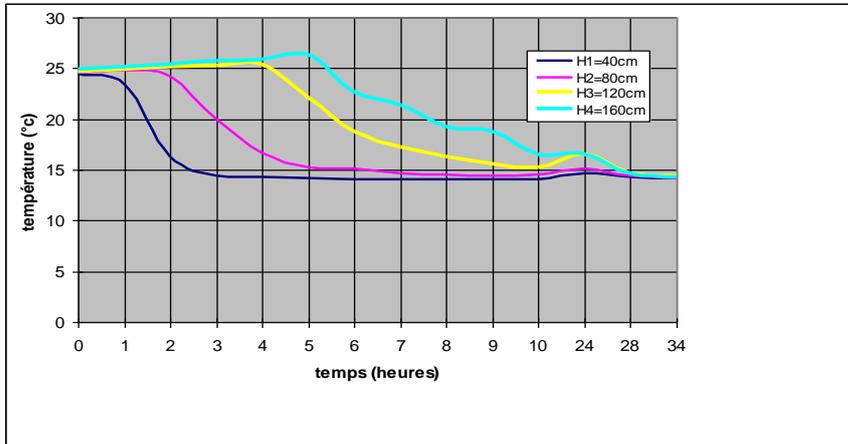


Figure V.4: Plancher entièrement perforé:
Évolution de la température dans le temps à 30cm de la paroi

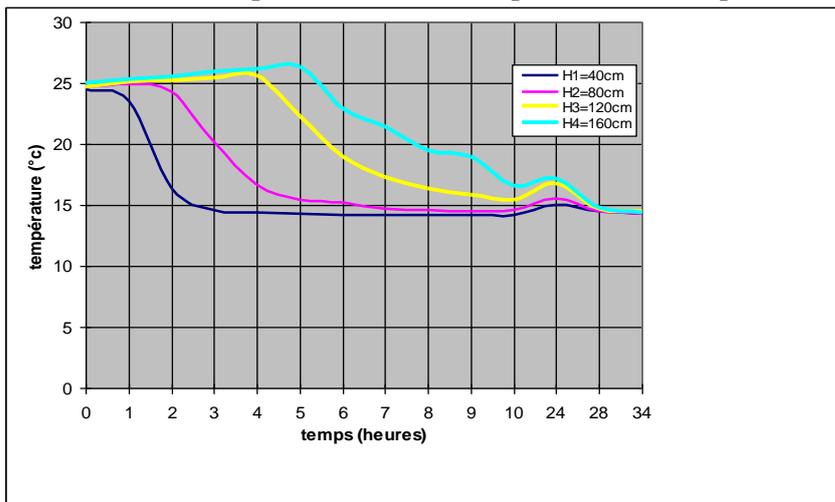


Figure V.5: Plancher entièrement perforé:
Évolution de la température dans le temps à 50cm de la paroi

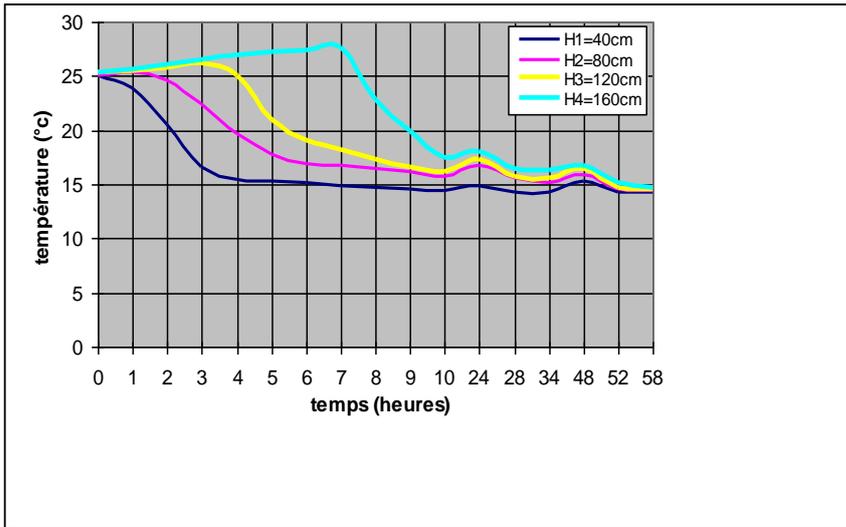


Figure V.6: Plancher en X:
Évolution de la température dans le temps à 10cm de la paroi

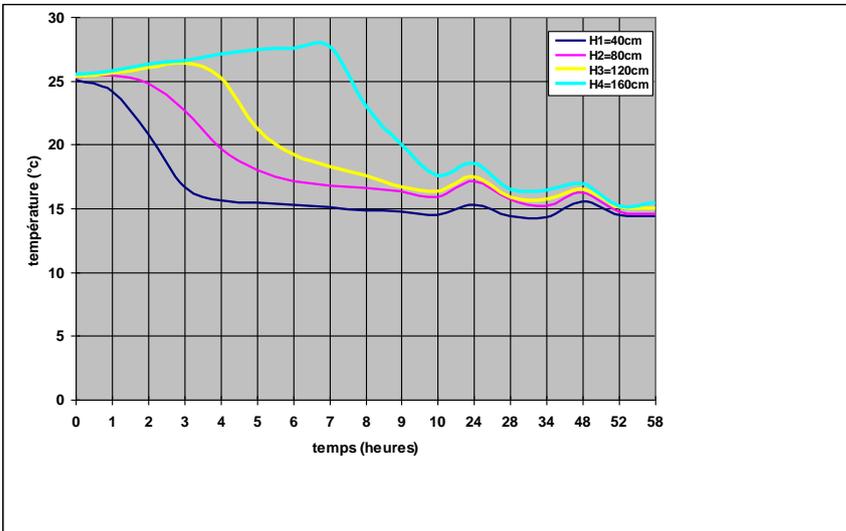


Figure V.7: Plancher en X:
Évolution de la température dans le temps à 30cm de la paroi

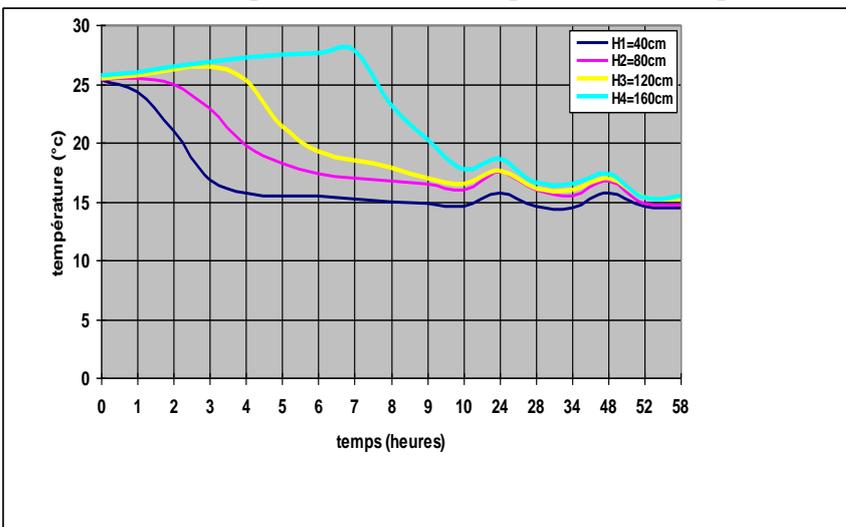


Figure V.8 : Plancher en X:
Évolution de la température dans le temps à 50cm de la paroi

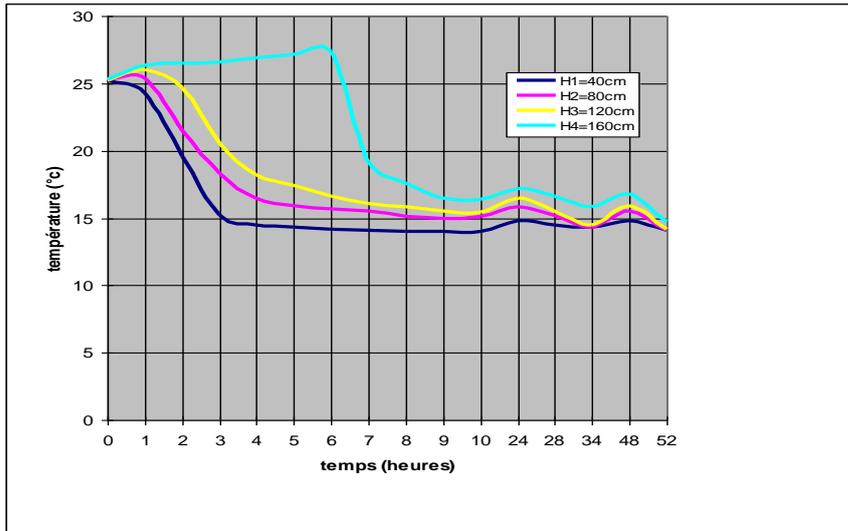


Figure V.9 : Plancher en gaine surajouté:
Évolution de la température dans le temps à 10cm de la paroi

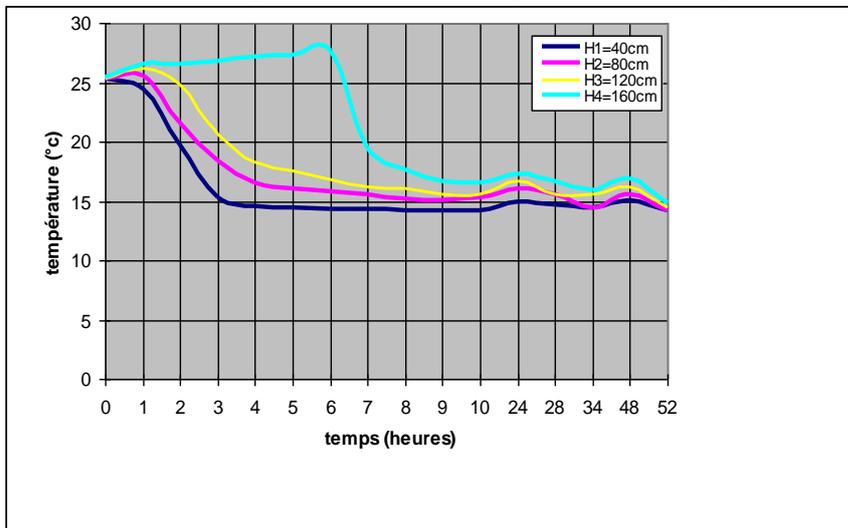


Figure V.10:Plancher en gaine surajouté:
Évolution de la température dans le temps à 30cm de la paroi

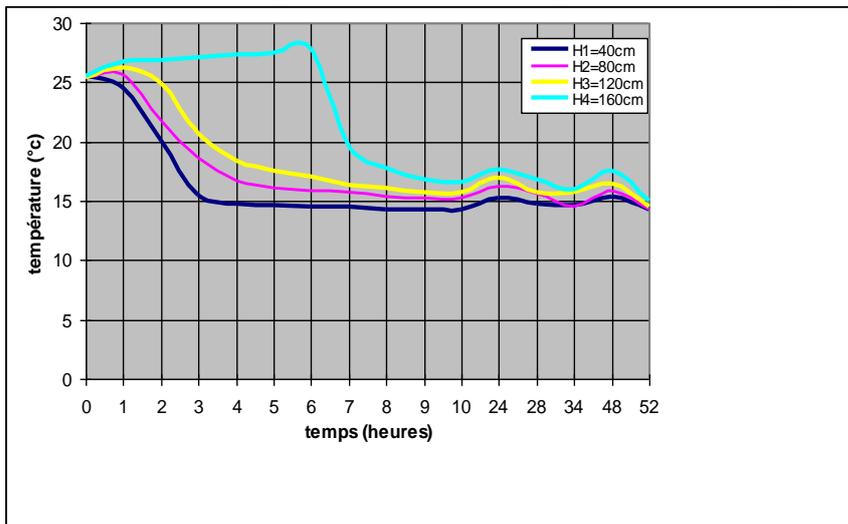


Figure V.11: Plancher en gaine surajouté:
Évolution de la température dans le temps à 50cm de la paroi

Après le déclenchement du ventilateur, le refroidissement du blé se présente sous forme de l'avancement d'un front qui évolue dans le temps. C'est-à-dire que les couches de grains se refroidissent successivement les unes après les autres.

La première couche est atteinte, ensuite la seconde et ainsi de suite, les couches suivantes attendent un certain temps avant de se refroidir successivement l'une après l'autre. On note même un début d'échauffement pour les dernières couches.

Cependant, on constate une augmentation de la température des couches qui se trouvent aux niveaux supérieurs, à savoir aux altitudes ($z= 120$ et 160cm) et ce, après une certaine durée de ventilation. Cela est dû essentiellement au fait que la chaleur dégagée par les grains se déplace du bas vers le haut par convection forcée, mais cette augmentation est un phénomène passager.

Après l'écoulement d'une période de ventilation, on note une régression de la température dans la dernière couche. Cette constatation est une conséquence de l'atteinte des conditions d'équilibre thermique au sein de la totalité du lit. En toute rigueur, on peut augurer que le front a balayé les différentes couches du lit de blé.

Une première conclusion est que la vitesse de refroidissement doit être telle que la dernière couche de grain soit atteinte par le refroidissement avant d'avoir pu s'échauffer

On peut schématiser l'opération de refroidissement comme le montre la figure V.12, qui montre que le refroidissement dans une masse de grain est un phénomène de propagation

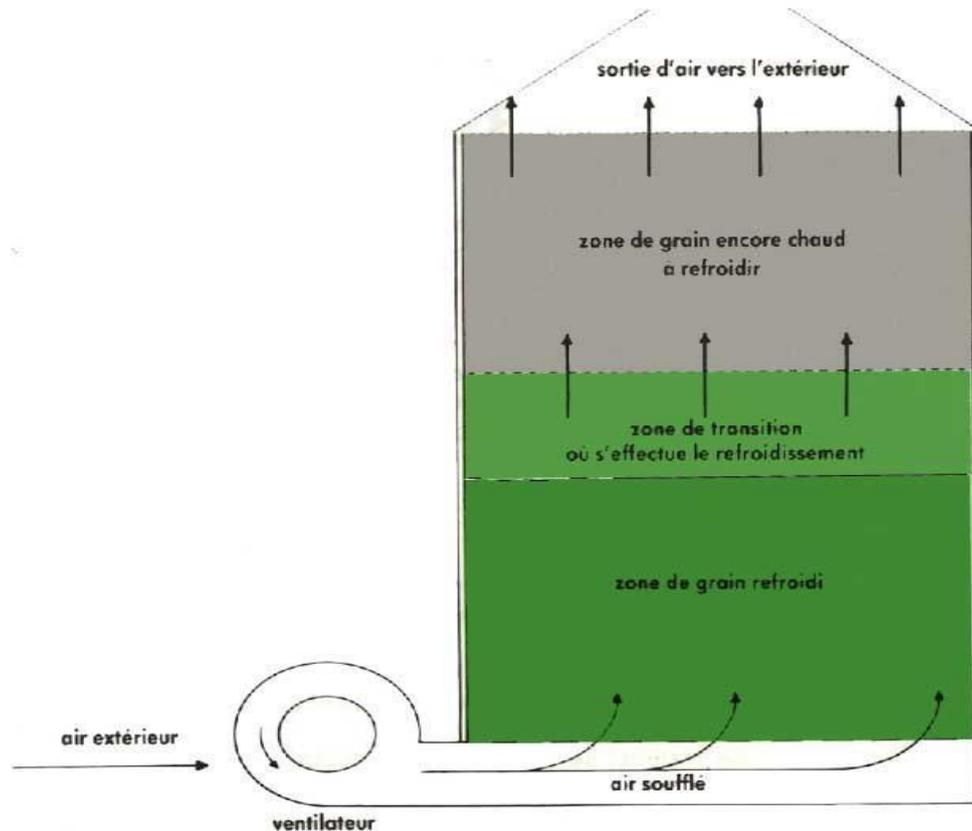


Figure V. 12 : Progression d'une zone de transition dans la masse de grain.

Les échanges entre l'air et le grain se produisent dans une couche d'épaisseur limitée appelée zone de transition qui peut être considérée comme un échangeur thermique, qui progresse dans le sens du courant d'air.

Les figures V.3et V.4, V.5 montrent que le grain ne risque plus rien dès que sa dernière couche commence à se refroidir, ce qui correspond au moment où le front de refroidissement atteint cette couche, soit au bout de 5heures. Toutefois, il faut souffler jusqu'à ce que la dernière couche soit totalement refroidie. Pour cela, il faut ventiler pendant 34 heures.

Pour les figures V.6 et V.7, V.8, on remarque que la dernière couche commence à se refroidir, au bout 7heures, et pour que toute la masse de grain se refroidisse, il faut ventiler pendant 58 heures.

Concernant les figures V.9 et V.10, V.11, on note une régression de la température de la dernière couche à 6 heures de ventilation, et pour amener la température de toute la masse de grain à se stabiliser il faut ventiler pendant

52heures. La tendance de l'allure de la température dans le temps est comparable à celle obtenue par, (figureI.1, chapitre I) ces résultats sont conformes à la réalité [5].

V.3 Evolution de l'humidité des grains :

Comme pour la température, nous avons procédé aux mesures de l'humidité, qui nous donne le pourcentage de l'humidité en matière humide (%MH). Les résultats obtenus sont donnés sur les tableaux en annexe, et nous permettent de tracés les courbes suivantes (figures V.13.....V.21) :

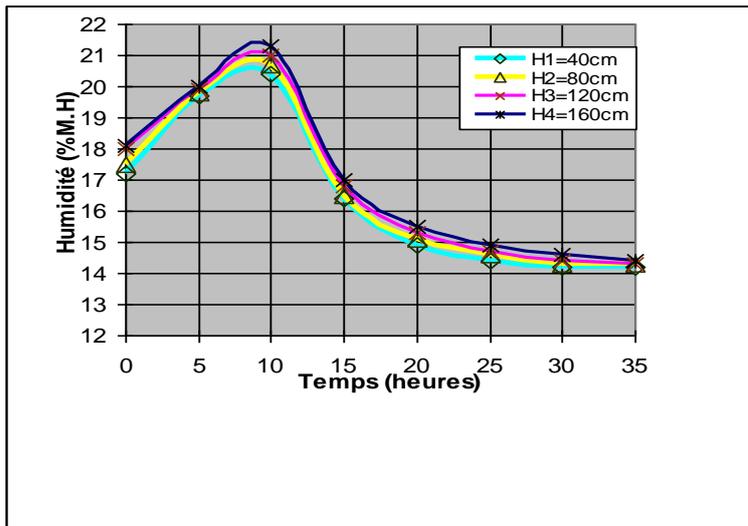


Figure V.13 : Plancher entièrement perforé:
Évolution de l'humidité dans le temps au niveau de l'axe central du silo

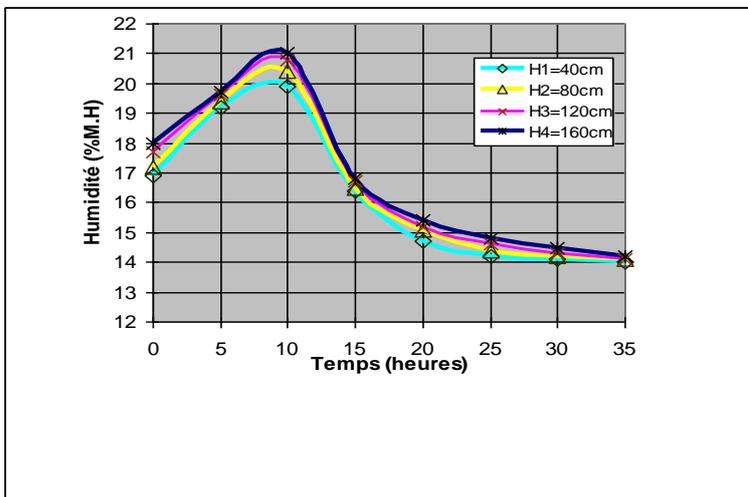


Figure V.14 : plancher entièrement perforé:
Évolution de l'humidité dans le temps à 20cm de l'axe central du silo

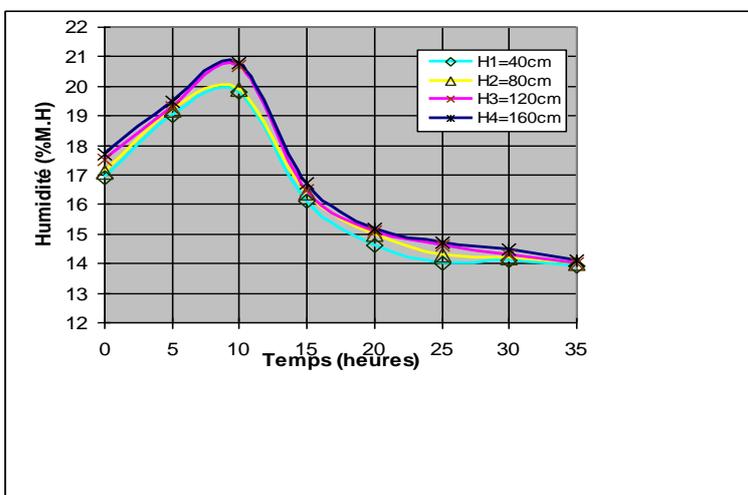


Figure V.15 : Plancher entièrement perforé:
Évolution de l'humidité dans le temps à 40cm de l'axe central du silo

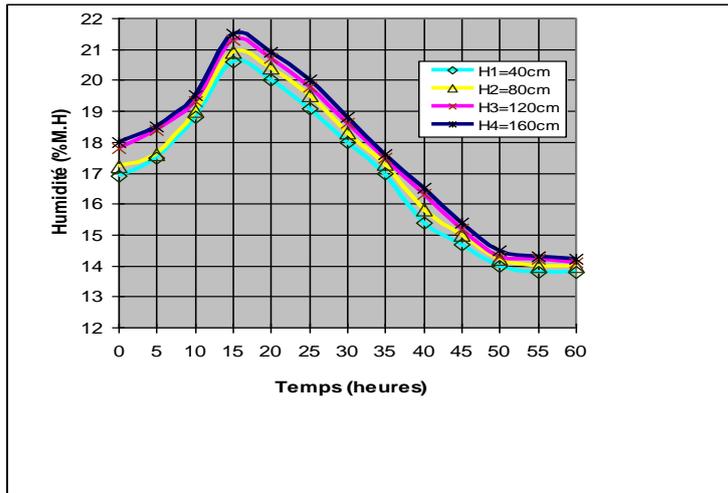


Figure V.16 : Plancher en X:
Évolution de l'humidité dans le temps au niveau de l'axe central du silo

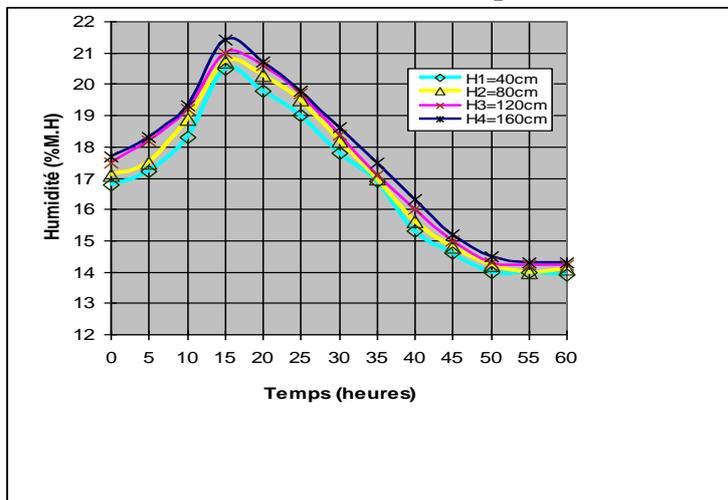


Figure V.17 : Plancher en X:
Évolution de l'humidité dans le temps à 20cm de l'axe central du silo

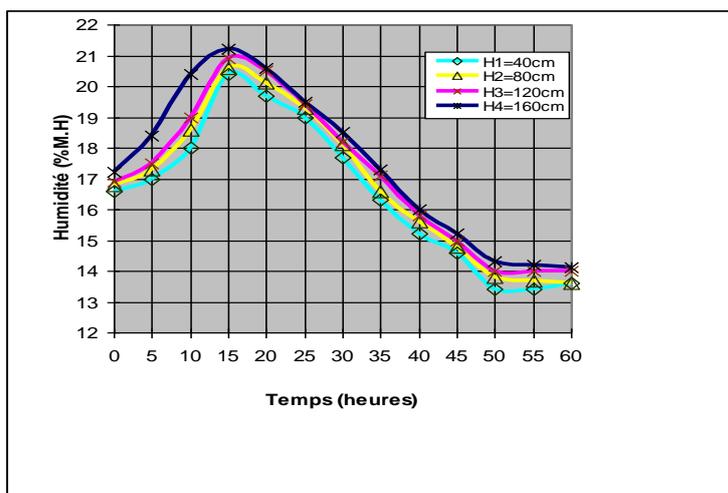


Figure V.18 : Plancher en X:
Évolution de l'humidité dans le temps à 40cm de l'axe central du silo

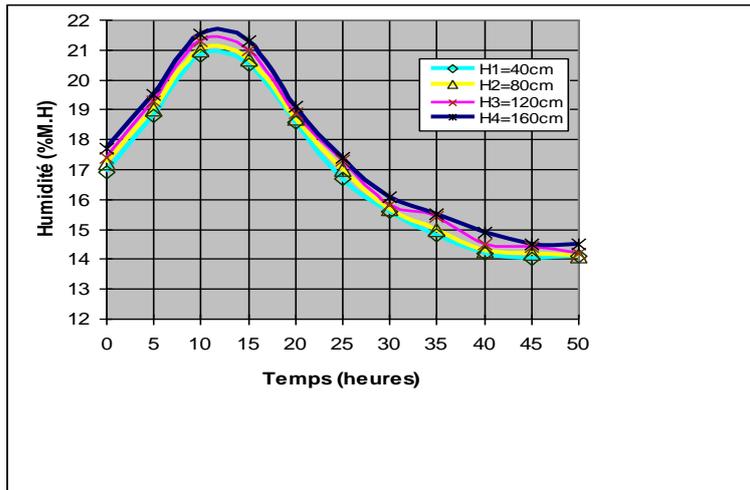


Figure V.19 : Plancher en gaine surajoutée:
Évolution de l'humidité dans le temps au niveau de l'axe central du silo

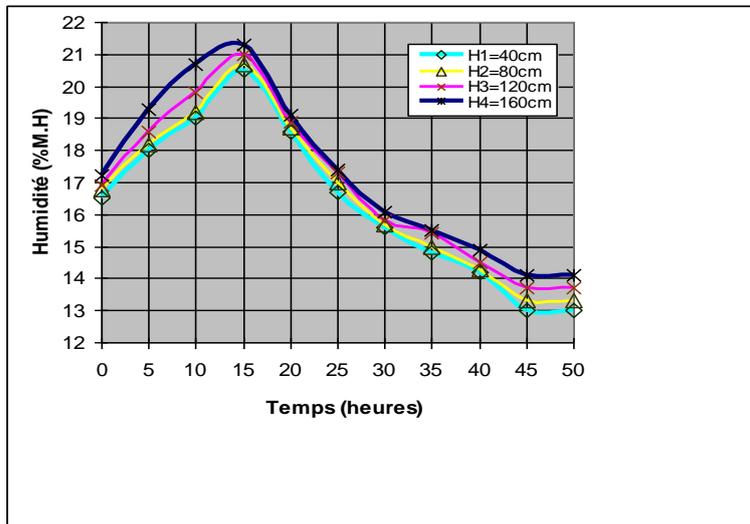


Figure V.20 : plancher en gaine surajoutée:
Évolution de l'humidité dans le temps à 20cm de l'axe central du silo

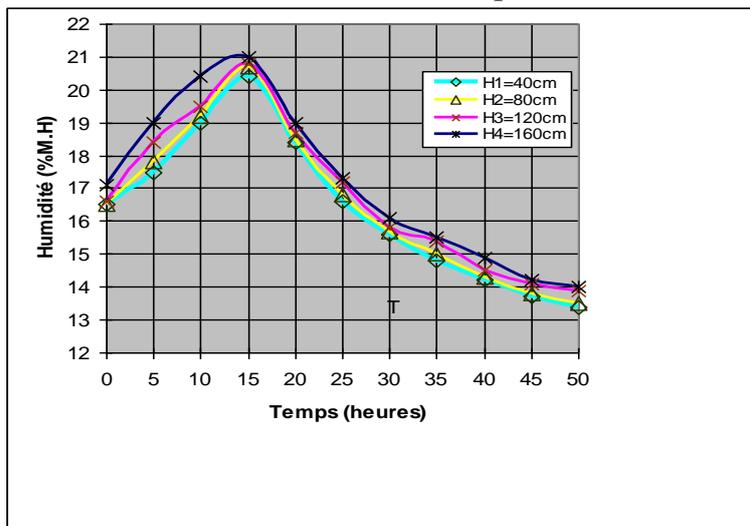


Figure V.21 : plancher en gaine surajoutée:
Évolution de l'humidité dans le temps à 40cm de l'axe central du silo

En examinant ces courbes, nous pouvons constater que l'humidité varie d'une couche de grain à une autre. D'une manière générale l'humidité diminue du fond du silo vers le haut. On constate aussi une augmentation de l'humidité des couches de grains et ce après une certaine durée de ventilation. Cela est dû essentiellement au fait que l'humidité dégagée par les grains se déplace du bas vers le haut par convection forcée, mais cette augmentation est un phénomène passager.

Après l'écoulement d'une période de ventilation, on note une régression de l'humidité dans les couches de grain jusqu'à quelle soit uniforme et stabilise. Cette constatation est une conséquence de l'atteinte des conditions de séchage à l'air ambiant au sein de la totalité des couches de grain.

Aussi que l'humidité du grain se stabilise au bout de 60 heures pour le plancher en X, et 50 heures de ventilation sont nécessaires pour le plancher en gaine surajoutée. Mais pour le plancher entièrement perforé 35 heures de ventilation suffisante pour que l'humidité se stabilise.

On peut dire que le meilleur plancher est le plancher entièrement perforé (76%) suite au passage facile et la diffusion homogène de l'air.

Donc il ne fait aucun doute que ce plancher entièrement perforé permet d'obtenir les meilleures diffusions de l'air en occasionnant une perte minimale. Mais le plancher en gaines surajoutées est vivement recommandé suite au qualités proche (diffusion d'air facile et résistance minimal), au plancher entièrement perforé qui est pratiquement difficile à construire, bien qu'il soit un peu coûteux, a cette effet le plancher en gaines surajoutées est le plus utilisé.

V.4 courbes de Synthèse:

Suite aux résultats de mesure que l'on a obtenus, on a pu déduire d'autres courbes de synthèse intéressantes. Nous avons tracé les courbes de température pour une même distance, (à dix centimètres de la paroi du silo), et pour une même hauteur de grain (1,60m), pour les trois configurations de plancher,

(entièrement perforé, en X, et en gaines surajoutées), et cela à partir des figure V.3, V.6, V.9.

Ces courbes de synthèse permettent de comparer les performances de chaque plancher en matière de diffusion de l'air et par conséquent de température et humidité à la même distance de la paroi et à une hauteur qui, considérée comme la plus sensible, (figure V.22).

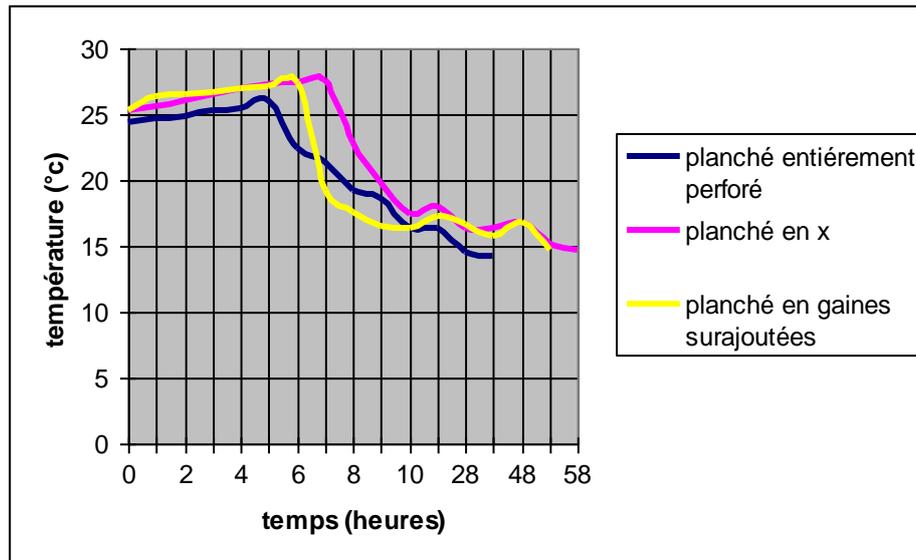


Figure V.22 : Evolution de la température à 10cm de la paroi et à une hauteur de 1,60m de grain pour les trois planchers.

Nous pouvons constater que la durée de ventilation varie d'un plancher à un autre. Le plancher entièrement perforé exige moins de temps de ventilation que les deux autres planchers, soit de 34 heures. Il vient ensuite le plancher en gaines surajoutées puis celui en X.

Nous constatons aussi, que la température à travers les trois planchers, continue à augmenter depuis le déclenchement du ventilateur jusqu'à au moment où elle commence à diminuer. Ce moment varie d'un plancher à un autre : 5heures pour le plancher entièrement perforé, 6 heures pour le plancher en gaines surajoutées et 7 heures pour le plancher en X

Notons aussi que la meilleure régression de la température pour les trois planchers est celle du plancher en gaines surajoutées, car elle diminue brusquement, mais pour les deux autres planchers, on remarque que la

diminution de la température se fait par palier. Cela est dû essentiellement au fait que la température ambiante au moment de l'expérience, est faible par rapport à la température du grain à l'intérieur du silo comparativement aux deux autres planchers.

La figure V.23 qui est une synthèse des résultats des figures V.13, V.16 et V.19, montre l'influence de la nature du plancher sur l'évolution de l'humidité du grains à une même distance, (ici celle au niveau de l'axe central du silo), et à la même hauteur de grain, (1,60m). On peut remarquer que la durée de stabilisation de l'humidité varie d'un plancher à un autre comme suit :

- Plancher entièrement perforé, 35 heures de ventilation
- Plancher en X, 60 heures de ventilation
- Plancher en gaines surajoutées, 50 heures de ventilation

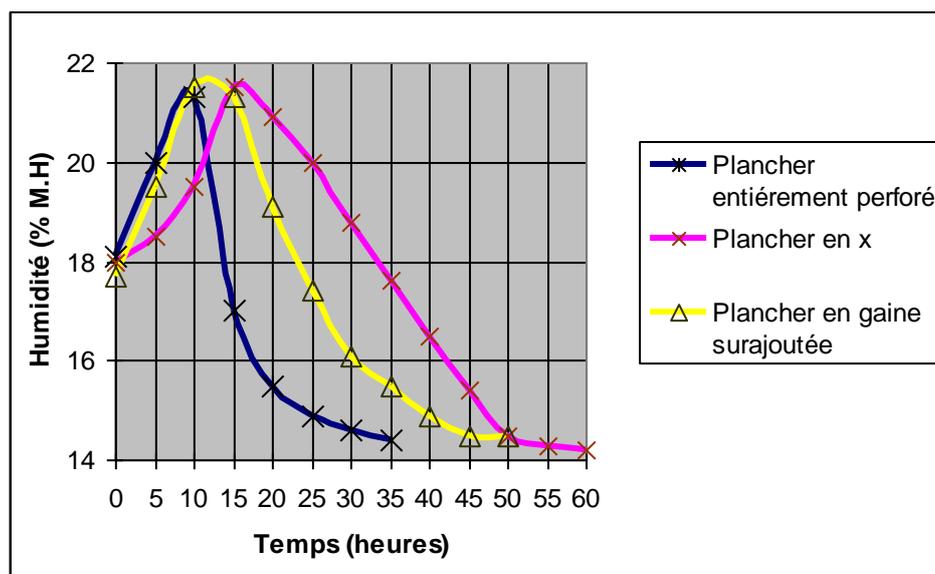


Figure V.23 : Evolution de l'humidité au niveau de l'axe central du silo et à une hauteur de 1,60m de grain pour les trois plancher.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Afin d'appréhender l'influence de la ventilation et de ces performances sur le stockage du blé dans les silos, nous avons fait des expériences sur le blé stocké dans un silo à échelle réduite avec l'application d'une convection forcée (ventilation).

Cette étude nous permet d'abord de conclure que l'utilité des ventilateurs centrifuges sur la ventilation du blé est incontournable.

Il faut dire aussi que ce travail nous a été bénéfique dans la mesure où nous avons pu comprendre et apprécier la place qu'occupe la ventilation du blé dans les silos.

Les objectifs visés dans le développement de cette étude ont été tous atteints malgré des contraintes que nous avons rencontrées ici et là, mais cela est tout à fait naturel lorsqu'il s'agit de travail expérimental.

L'allure générale des courbes des évolutions de la température et de l'humidité dans le temps révèle une bonne concordance avec celle trouvée dans la littérature [5]. A travers ces résultats, on peut affirmer avec satisfaction que le processus de ventilation est bien assimilé. Ce qui nous a conduit à dire qu'une meilleure compréhension des paramètres d'influence dans les procédés de ventilation et celle du mode de diffusion de l'air, nous a permis de choisir le plancher en gaines surajoutées comme la meilleure diffusion de l'air dans le silo voire les silos en général. Ce mode de diffusion est fréquemment utilisé dans le domaine de l'industrie agroalimentaire, compte tenu de l'homogénéité de la diffusion de l'air avec des pertes de charges minimales et même des coûts minimaux, que cela peut engendrer.

Enfin, la réalisation du dispositif expérimental (silo et accessoires) à l'aide des services des moyens de l'université Hassiba Ben Bouali est un exploit dont on peut s'en réjouir quant à sa contribution certaine dans la formation de nos futures diplômés.

Perspectives :

L'implantation du dispositif expérimental au sein de la faculté des sciences agronomiques de l'U.H.B.B chlef, pourra servir à la fois à la recherche expérimentale et appliquée et aussi à des fins pédagogiques pour enrichir les connaissances des

Conclusion générale

étudiants de graduation. Des séances de travaux pratiques pourraient alors être préparées à cet effet.

Références
Références
Bibliographiques
Bibliographiques

Références bibliographiques

Références :

- [1].Adel Ghenaiet, Transfert thermiques, Ecole Militaire polytechnique 2003.
- [2].O.H.FRIESEN, D.N.HUMINICKI, ventilation et séchage des grains à l'air ambiant, CEROM, juin 1996.
- [3].SERGE FORTIN, automatiser la ventilation pour mieux conserver, CROM, 1998
- [4].SERGE FORTIN, ventilateur et système de ventilation pour les grains CROM, 1998
- [5]. J.L. MULTON, volume 1+2 conservation et stockage des grains et graines Technique et Document Lavoisier, 1982.
- [6].Séminaire sur les ventilations industrielles, Centre inter- entreprise de formation industrielle, juin 2002
- [7].HEMISS. Med, thèse de magister : simulation des champs de températures et d'humidité dans les silos à université Hassiba Ben Boali de Chlef, Département Mécanique 2000.
- [8].CRUZ J. F, GRIFFON D, HERBERT J.P, conservation des grains en régions chaudes -2. Edition. Techniques rurales en afrique. 1988. Paris Ministère de la coopération et du Développement .CEEMAT- centre d'étude et d'expérimentation du Machinisme Agricole et Topical.
- [9].Ventilation industrielle Cours destiner aux inspecteurs spécialistes en prévention – inspection
Maurice Beaudet, ing Beaulier INC Montréal – 2000 .
- [10].TRG- TRC013-EN Trane. Air conditioning Fans
- [11].MEchalikh. Mustapha, étude d'un Ventilateur centrifuge destine à la ventilation des silos à grain, Université Hassiba Ben Boali de Chlef Département Mécanique 2006-2007
- [12].B. Khiari, S. Ben Mabrouk et M. Sassi, simulation des Phénomènes de Transfert dans un Milieu Granulaire, Institue National de recherche Scientifique et technique Hammam Lif, Tunisie 2001.
- [13].BEN MOUSSA, Etude des transferts de chaleur et de masse dans un silo à grains soumis à un flux de chaleur, thèse de doctorat Université de Poitiers, 1984.

Références bibliographiques

[14].Site : Guide pratique de ventilation des grain, comment construire une installation de ventilation. htm

[15].Site : Ingénieur de paris ventilation des grains. htm

[16].Site : [http : www.zeil-abegg.fr](http://www.zeil-abegg.fr).

[17].Choix d'un ventilateur climatisation. Conservation. htm

[18].H. LEGOT. L, Jourdan construction industrielle, édition Dunod, paris 1982.

[19].Guilbert. A, Poisson .J, Condition de stockage et durée de conservation des grains. Journée d'étude sur la conservation I.T.C.F, Paris

[20] www.rs2.agr.ca Séchoirs, agricoles.

[21] Lasseran J. C 1979 Conduite pratique de la ventilation des grains, Le producteur français n°252.

[22] Statistique et probabilité cours et exercice, Série Shaume.