

EXPERIMENTAL STUDY OF THE VENTILATION OF STOCKED WHEAT IN A SILO

A. Hussine^{1*}, A. Bettahar², A. Youcefi¹

¹USTMB, Oran, Département de Génie Mécanique. Faculté de Génie Mécanique,

BP. 1505 Bir El Djir 31000 Oran

²Laboratoire de Mesures, Contrôles et Simulations Mécaniques, Université de Hassiba

Benbouali, Chlef B.P. 151, 02000 Chlef

Received: 18 July 2017 / Accepted: 20 July 2018 / Published online: 01 September 2018

ABSTRACT

This work is an experimental study of the ventilation of durum wheat stored in a silo of reduced dimensions and equipped with a ventilation system. The wheat, freshly harvested in June of the year 2015, was put in the silo. It underwent first drying ventilation during which we compared the influence of three air velocities on the evolution of the water content of the grains and their temperature. The set velocities are: 0.10 m/s, 0.15 m/s and 0.24 m/s. Two other ventilations were carried out in October (2015) and in January (2016) with an air velocity of 0.24 m/s. The results obtained allowed us to conclude that the ventilation of the wheat is necessary as soon as it is put in the silo to cause its drying. On the other hand, it allows the heat generated and the cooling of the wheat to be evacuated in autumn and winter. Drying and cooling were carried out in successive layers before stabilizing. There is therefore a transfer of heat and humidity by forced convection.

Key words: Ventilation, forced convection, drying, cereals.

Corresponding Author, e-mail: hussine.am@gmail.com

doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v10i3.21>

1. INTRODUCTION

Le blé constitue la base de l'alimentation humaine dans beaucoup de pays. Il assure 15% des besoins énergétiques [1]. Cette céréale représente 17% des échanges internationaux de

produits agricoles [1]. On estime que la demande mondiale s'élèvera à un milliard de tonnes en 2020 [1]. Les enjeux liés à sa production et à sa commercialisation sont importants.

En Algérie la production du blé, qui avoisine 1,6 millions de tonnes, ne couvre que 30 à 35% des besoins [2]. Ces besoins se situent actuellement dans la moyenne de la demande à l'échelle mondiale. Donc, pour assurer la sécurité alimentaire, il est nécessaire non seulement d'augmenter les rendements pour une indépendance alimentaire, mais aussi d'améliorer les moyens et les conditions de stockage. Les grains étant souvent stockés juste après la récolte et continuent à respirer, en dégageant de la chaleur. Or, Le développement des micro-organismes, des insectes et des acariens au cours du stockage, peut conduire à la détérioration de la qualité des grains [3-4]. Ainsi, pour préserver cette qualité des grains pendant le stockage, il faut les protéger contre la croissance voire la production des insectes, des acariens et des champignons [5]. Certaines espèces et souches de la flore de stockage peuvent synthétiser des mycotoxines qui sont des substances toxiques pour la santé humaine et la santé animale [3-4].

La température et la teneur en eau sont les plus important paramètres qui jouent un rôle déterminant dans l'écosystème et la qualité des grains stockés dans les silos [6]. La température de stockage est l'un des facteurs importants qui déterminent la qualité des grains [7-8]. Elle diminue à mesure que l'on s'éloigne de la paroi et de la surface du silo [9]. Le stockage à une température inférieure à 15 °C, peut empêcher le développement des insectes [10]. Les moisissures, quant à elles, peuvent se développer dans les champs ou au cours du stockage en fonction des conditions de température et d'humidité environnantes [1]. Donc une lutte préventive contre le développement des insectes et la prolifération des moisissures de stockage est nécessaire. Elle repose sur le contrôle de la température et de l'activité de l'eau des grains stockés [11]. En effet, la croissance des acariens et des champignons peut être contrôlée par la réduction de l'activité de l'eau [12-13]. En conséquence, les grains récoltés trop humides, doivent être séchés pour éviter leur altération [1]. Afin d'éviter la formation des mycotoxines après la récolte, il convient donc de sécher immédiatement le grain [14]. Après séchage, le grain peut normalement être conservé pendant une certaine durée [9]. La norme codex fixe la teneur en eau maximale du blé à 14,5% comme critère de qualité [15].

La ventilation par l'air ambiant semble être une opération nécessaire pour la conservation des céréales sans risque d'altération. Mais il existe une marge considérable pour améliorer la conception et l'exploitation de ces systèmes [6]. Elle est réalisée par la circulation forcée de l'air ambiant qui est aspiré puis refoulé par un ventilateur dans la masse de grains à travers

une conduite et des gaines de distribution. La ventilation provoque l'aération et le refroidissement du grain pendant le stockage et offre la possibilité de lutter contre les insectes et réduire ainsi l'application des pesticides [16-6]. A noter que la température de l'air entre les grains reste proche de la température de l'air sec jusqu'à ce que la teneur en eau des grains diminue à 15% [17].

Cette technique commence à être appliquée en Algérie dans les silos métalliques par la coopérative des céréales et légumes secs (C.C.L.S ex. O.A.I.C) qui pratiquait autrefois le transilage dans les silos en béton pour aérer les grains et réduire leur humidité. Cette opération est onéreuse et nécessite toujours un silo vide.

L'objectif du présent travail consiste à déterminer expérimentalement l'influence de la ventilation à l'air ambiant, sur les évolutions temporelles de la teneur en eau et de la température des grains de blé stockés dans un silo conçu à échelle réduite. Cela pourrait mettre en évidence l'effet de la vitesse de ventilation ainsi que les durées adéquates de l'opération en rapport des normes de qualité du grain.

2. EQUIPEMENT ET METHODES

Les essais se sont déroulés au niveau de l'institut des sciences agronomiques de l'université de Chlef (ALGERIE). Cette ville fait partie de la plaine du grand Chélif qui est caractérisée par un climat semi aride.

2.1. Equipement

Le dispositif expérimental comprend un silo conçu à échelle réduite (photo 1 et Figure.1).

Il est constitué d'un cylindre métallique en tôle galvanisée, d'un mètre de diamètre et de hauteur égale 1,2 m. Sa capacité de stockage est de 750 kg. Ce silo est muni d'un plancher nervuré et perforé à 30% d'orifices de diamètre 1,5 mm, pour le passage de l'air de ventilation. Il est équipé d'un ventilateur centrifuge de puissance 0,09 kW et débitant 510 m³/heure au maximum. Ce ventilateur est muni d'un variateur de vitesses. Il a été choisi en déterminant son point de fonctionnement dans ce dispositif. Pour effectuer les mesures, nous avons utilisé trois sondes thermocouples de type K (Nicro-Ni), de diamètre 2 mm et de longueur 12 cm, connectées chacune à un thermomètre digital de type GTH 1160 à l'aide d'un câble de 1 mètre de longueur. Le thermomètre effectue des mesures avec une précision de 0,1°C sur une plage de -50 à 199,9°C. Un anémomètre multifonctions de type velocicalc TSI, muni d'un tube de Pitot, a été utilisé pour effectuer les mesures de la température, de l'humidité, de la vitesse, du débit et de la pression statique de l'air. Enfin, une sonde

d'échantillonnage est utilisée pour effectuer les prises d'essais pour la détermination de la teneur en eau des grains.



Photo 1. Silo expérimental

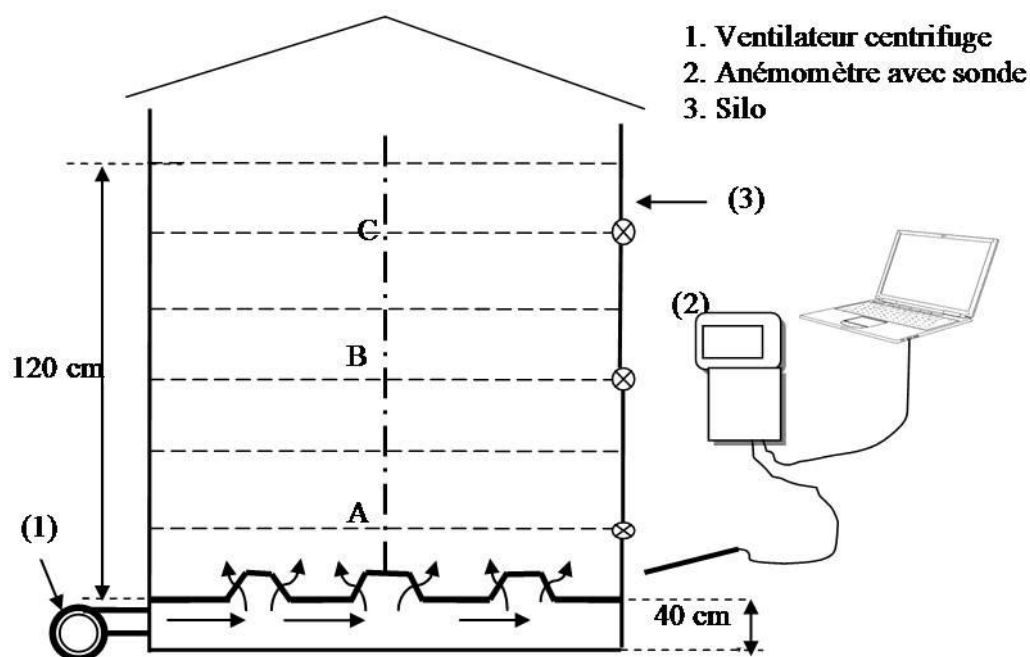


Fig. 1. Schéma du silo expérimental

2.2. Méthode

Du blé dur fraîchement récolté, d'une teneur en eau initiale comprise entre 15 et 15,5% (base humide), a été introduit dans le silo. La stratégie de ventilation adoptée est la suivante: Une première ventilation, d'une durée de 12 heures, a été pratiquée en mi juin 2015. Nous avons

mesuré l'évolution de la température (°C) et de la teneur en eau, base humide (% b.h), des grains pour trois vitesses d'air à la sortie du plancher (à l'attaque des grains). Les vitesses fixées sont 0.10 m/s, 0.15 m/s et 0.24 m/s. Ces vitesses correspondent à des débits spécifiques respectifs 1.8 m³/min.tonne, 2.8 m³/min.tonne et 4.5 m³/min.tonne.

Le silo est vidangé à la fin de chaque essai puis rempli de grains à nouveau pour l'essai suivant. Nous avons conservé le silo rempli lors du dernier essai pour effectuer deux autres cycles de ventilation avec la vitesse de 0.24 m/s. Le premier cycle pratiqué au mois d'octobre 2015 et le second au mois de janvier 2016. Les mesures ont été effectuées au niveau de l'axe central du silo aux points A, B et C qui correspondent respectivement aux hauteurs 0.20 m, 0.60 m et 1.00 m (cf Figure. 1). Les essais se sont déroulés la nuit aux mois de juin et octobre et le jour au mois de janvier.

Les températures aux différents niveaux de la masse granulaire ont été relevées par les trois sondes thermométriques. La détermination de la teneur en eau, M (base humide), est effectuée selon la méthode arrêtée en Algérie [18]. Elle est donnée par la formule ci après :

$$M = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_0} \cdot \% \quad (1)$$

Où : M₀ est la masse, en gramme, de la capsule vide ; M₁ est la masse, en gramme, de la capsule et de la prise d'essai humide ; M₂ est la masse, en gramme, de la capsule et de la prise d'essai après séchage.

Les paramètres de ventilation mesurés avec l'anémomètre ont été pris à la sortie du ventilateur et à la sortie du plancher (avant de remplir le silo). Les résultats sont donnés dans le tableau 1. La température et la teneur en eau initiales de la masse granulaire ainsi que la température et l'humidité relative de l'air relevées au cours des essais sont données dans le tableau 2. La connaissance de ces données est indispensable pour pouvoir suivre l'évolution de la ventilation d'un silo de céréales.

Les valeurs adimensionnelles de la teneur en eau des grains M* Eq.(2) et de la température T* Eq. (3) pour analyser les données.

$$M^* = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

Où M, M_e et M₀ sont respectivement la teneur en eau des grains finale, à l'équilibre et initiale.

$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_a}{\theta_i - \theta_a} \quad (3)$$

Où θ , θ_i et θ_a sont respectivement la température des grains finale, initiale et celle de l'air.

Tableau 1. Paramètres de ventilation

Vitesses de l'air à la sortie du ventilateur (m/s)	1,4	2,5	3,26
Débit de l'air (m ³ /h)	30	53	72
Pression statique à la sortie du ventilateur ps (Pascal)	465	450	440
Vitesse de l'air à la sortie du plancher (m/s).	0.1	0.15	0.24
Pression statique à la sortie du plancher ps (Pascal).	230	213	202

Tableau 2. Température et humidité des grains et de l'air de ventilation

	juin (2015)	octobre (2015)	janvier (2016)
Température de l'air (°C)	17,5- 22,5	15,2- 20	5- 8
Humidité relative de l'air (%)	20- 38,8	60- 65	70- 78
Teneur en eau initiale des grains (% b.h)	15,2- 15,6	15- 15,4	14,5- 15,2
Température initiale des grains (°C)	28,6- 30,5	25- 25,5	18,6- 19

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Evolution de la température et de la teneur en eau des grains au cours de la première ventilation.

Le but de cette ventilation est de provoquer le séchage dès la mise des grains dans le silo. Pour chaque vitesse d'air, à l'attaque de la masse granulaire, nous avons mesuré l'évolution temporelle de la teneur en eau des grains et de leur température aux niveaux des points A, B et C correspondants respectivement aux hauteurs 0.20 m, 0.60 m et 1.00 m.

Sur la base des résultats obtenus, nous avons tracé les courbes montrant l'évolution temporelle de la teneur en eau (Figure. 2) et de la température inter granulaire à chaque niveau (Figure. 4). En examinant ces courbes, nous remarquerons que l'évolution de la teneur en eau des grains suit la même allure pour les trois niveaux et les trois vitesses. Pour une vitesse donnée, la teneur en eau commence à diminuer dès la première heure de ventilation au niveau (A), puis elle chute directement. Un peu plus tard, elle commence à diminuer au niveau (B). Au niveau (C), par contre, la teneur en eau des grains augmente légèrement puis elle chute à partir de la deuxième heure (Figure. 2). Donc, le séchage s'est effectué par couches

successives. Les graphes présentés peuvent nous renseigner d'une part qu'il y a un différentiel de séchage entre les couches et que pour les durées de séchage, le repère serait évidemment la couche superficielle dominante pour cette configuration, d'autre part.

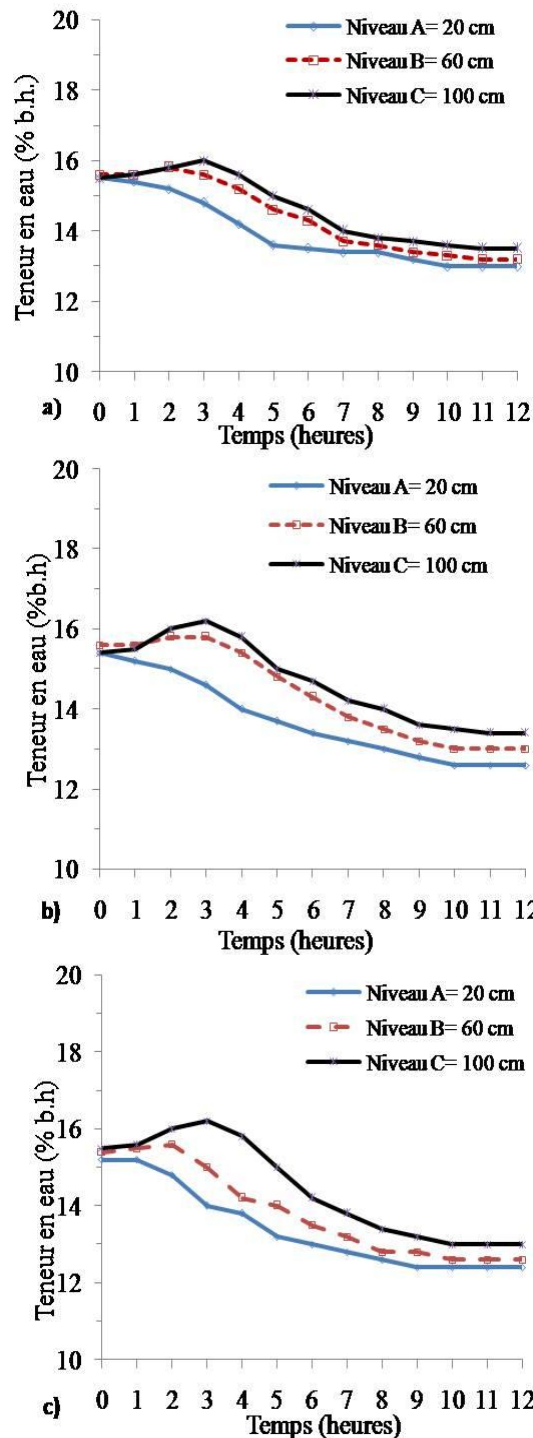


Figure 2. Evolution de la teneur en eau des grains
a) V1=0.10 m/s; b) V2=0.15 m/s; c) V3=0.24 m/s

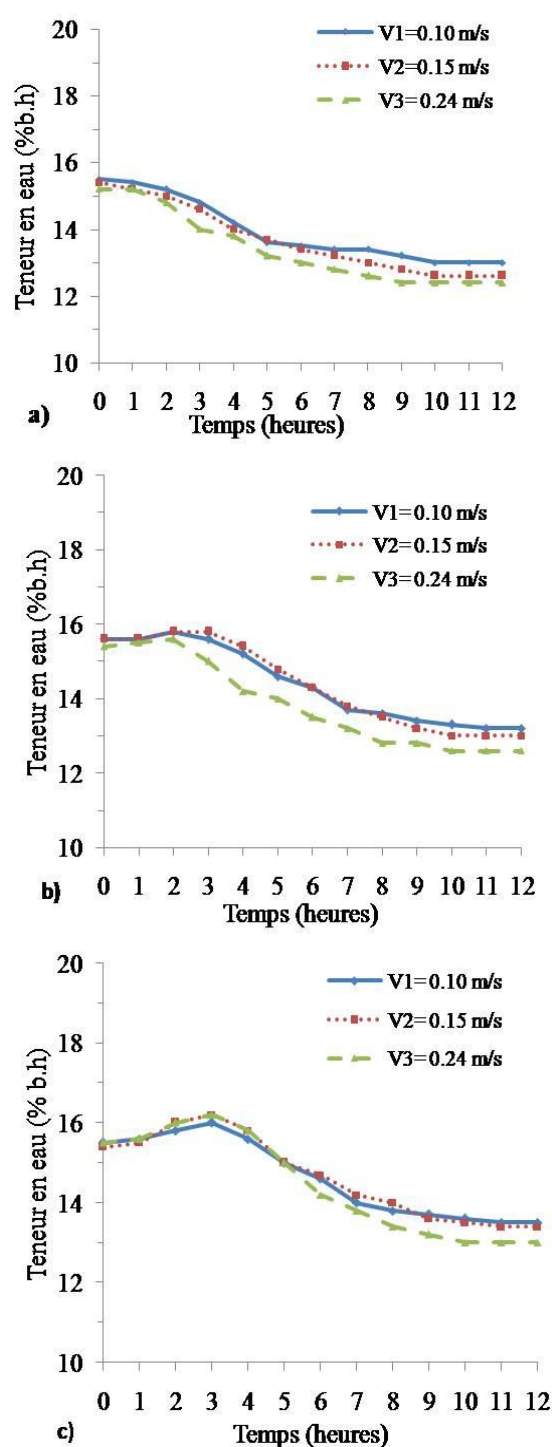


Figure 3. Evolution de la teneur en eau aux niveaux
A=20 cm (a); B= 60 cm (b); C= 100 cm (c)

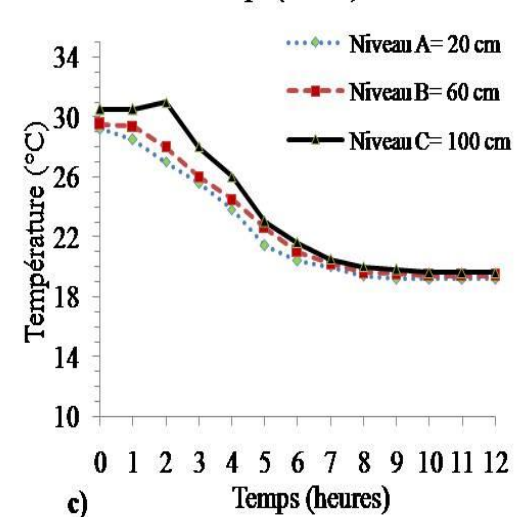
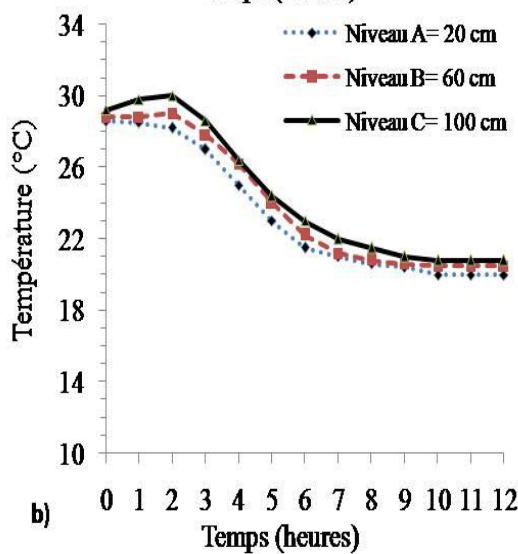
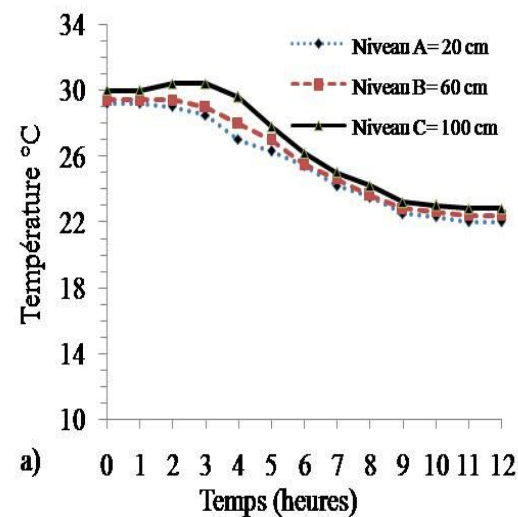


Figure 4. Evolution de la température des grains:
a) $v=0.10$ m/s; b) $v=0.15$ m/s; c) $v=0.24$ m/s

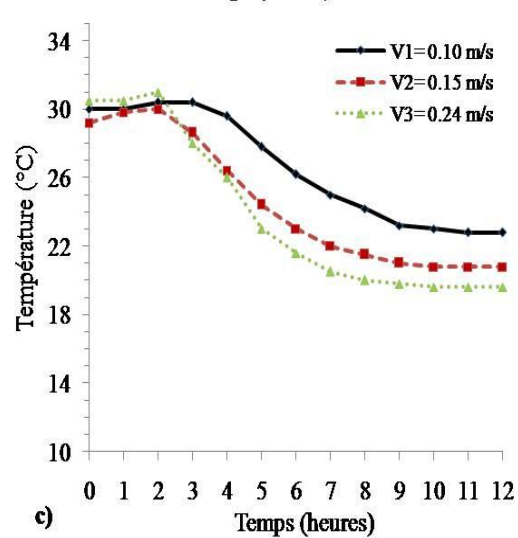
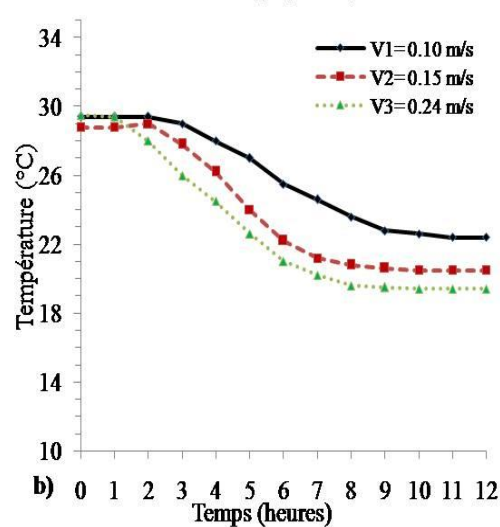
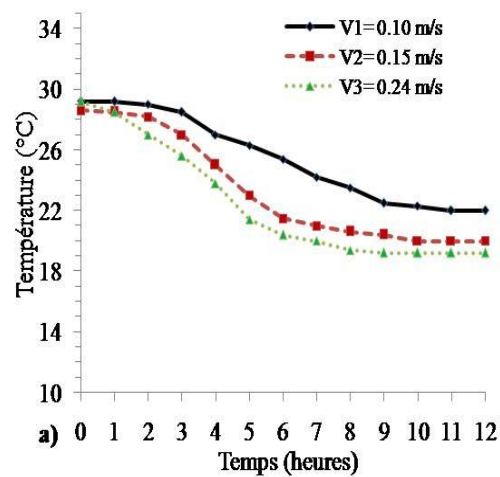


Figure 5. Evolution de la température aux niveaux:
A=20 cm (a); B=60 cm (b); C=100 cm (c)

Concernant la température le même phénomène est observé. On constate un refroidissement mais sans atteindre le seuil recommandé qui est de 15°C (Figure. 4) car la température de l'air

est supérieure à 18°C. Des échanges hydriques et thermiques se sont établis en permanence, d'une part au sein de la masse granulaire (que caractérise un volume d'air interstitiel important dans le tas de grains) et d'autre part, entre les grains et le milieu extérieur Feillet [1]. Il y'a donc un transfert de chaleur et d'humidité qui sont évacuées par convection forcée. En observant les courbes (Figure.3 et Figure.5) et en analysant les tableaux 3 et 4, nous constatons que les valeurs adimensionnelles de la température diminuent au fur et mesure que la vitesse d'air augmente et tendent vers zéro à la vitesse de 0.24 m/s. Par contre celles de la teneur en eau ne varient que très peu d'une vitesse à une autre. Ainsi nous pouvons conclure que dans la limite des vitesses choisies et des conditions expérimentales fixées, la vitesse de ventilation n'a pas d'influence notable sur la vitesse de séchage des grains. Cependant, son effet est plus marqué sur leur vitesse de refroidissement, surtout à partir 0,15 m/s qui correspond à un débit d'air de 2.8 m³/min.tonne. A noter que des auteurs ont préconisé divers débits d'air de ventilation en fonction des conditions expérimentales, notamment la température de l'air. Selon Shove [19], des débits de 1 à 2 m³/min.tonne peuvent être utilisés pour le séchage de la masse de grains avec de l'air ambiant.

Nous pouvons conclure, qu'en ventilant les grains en été avec de l'air ambiant, il serait impossible de ramener la température du grain à une température idéale de conservation. Mais, cette opération est nécessaire dès la mise en silo pour provoquer le séchage. Elle permet aussi de dégager la chaleur produite par auto échauffement, ce qui évite la détérioration des grains.

Tableau 3. Comparaison des teneurs en eau obtenues au cours de la première ventilation.

Vitesse de ventilation (m/s)	Niveau (cm)	Teneur en eau initiale M _i (% b.h)	Teneur en eau finale M _f (%b.h)	M*	ΔM/t
0.10	A	15,5	13	0.54	0,25
0.10	B	15,6	13,2	0.57	0,21
0.10	C	15,5	13,5	0.60	0,18
0.15	A	15,4	12,6	0.48	0,28
0.15	B	15,6	13	0.50	0,26
0.15	C	15,4	13,4	0.34	0,18
0.24	A	15,2	12,4	0.46	0,31
0.24	B	15,4	12,6	0.48	0,28
0.24	C	15,5	13	0.54	0,25

Tableau 4. Comparaison des températures mesurées au cours de la première ventilation

Vitesse de ventilation (m/s)	Niveau (cm)	Température initiale θ_i (%)	Température finale θ_f (%)	θ^*	$\Delta\theta/t$
0.10	A	29,2	22	0.31	0,65
0.10	B	29,4	22,4	0.32	0,63
0.10	C	30	22,8	0.34	0,65
0.15	A	28,6	20	0.10	0,95
0.15	B	28,8	20,5	0.15	0,92
0.15	C	29,2	20,8	0.17	0,93
0.24	A	29,2	19,2	0.02	1,25
0.24	B	29,5	19,4	0.03	1,26
0.24	C	30,5	19,6	0.05	1,21

3.2. Evolution de la température et de l'humidité au cours de la deuxième et la troisième ventilation.

Le but de la deuxième et la troisième ventilation est de refroidir les grains afin de les maintenir à une température idéale de conservation inférieure à 15°C. Durant ces opérations, le grain est aéré en tenant compte des conditions climatiques (température et hygrométrie de l'air). Ainsi, nous avons tenu compte du diagramme d'équilibre air-grain pour éviter tout risque de ré-humectation des grains.

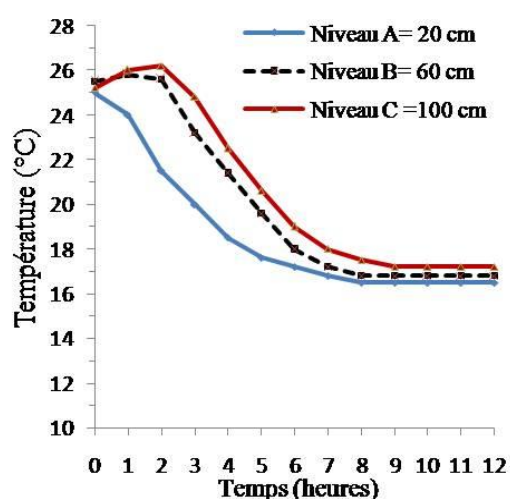


Fig. 6. Evolution de la température (ventilation d'octobre 2015)

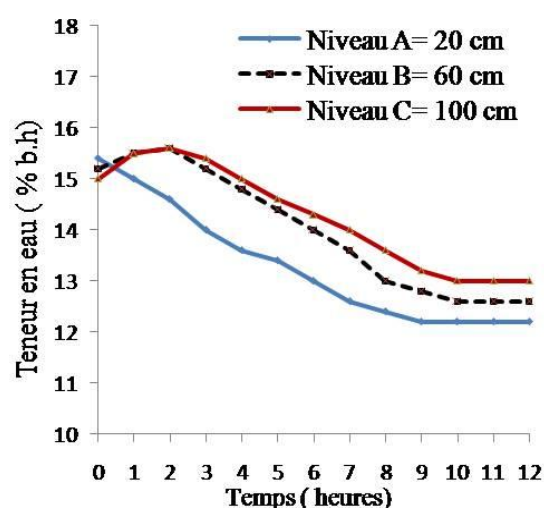


Fig.7. Evolution de la teneur en eau (ventilation d'octobre 2015)

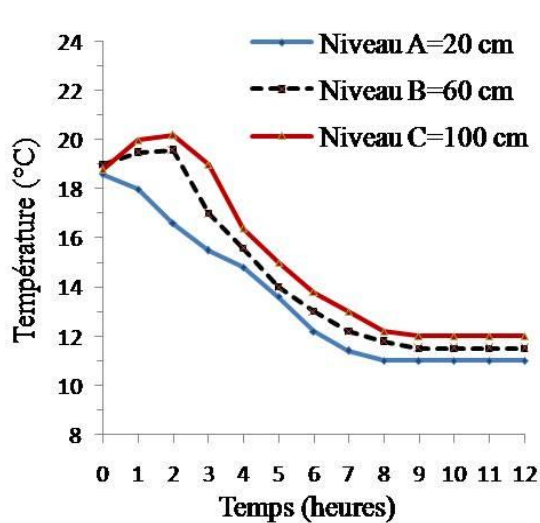


Fig. 8. Evolution de la température (Ventilation d'hiver)

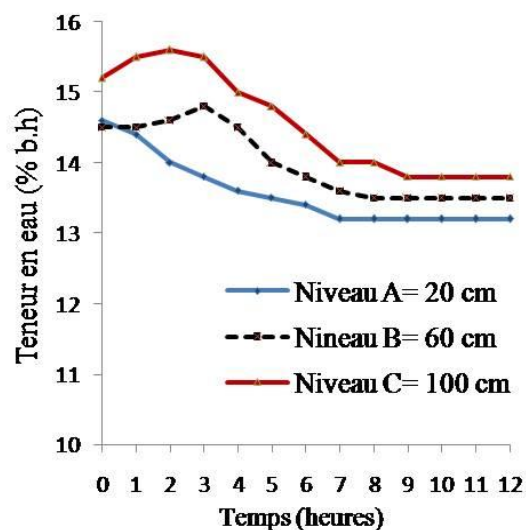


Figure 9. Evolution de la teneur en eau (Ventilation d'hiver).

Les résultats des mesures effectuées nous ont permis de tracer les courbes d'évolution temporelle de la température (Figure. 6 et 7) et de la teneur en eau des grains (Figure. 8 et 9). Tout d'abord, nous pouvons constater qu'au mois d'octobre, les grains ont subi une légère réhumectation et un échauffement. Cela est dû à une transpiration et une production de chaleur par auto échauffement. Il est à noter qu'on ne peut pas négliger l'effet de la chaleur qui règne dans cette région durant ce mois. En période hivernale, on note aussi une légère augmentation de la teneur en eau des grains surtout au niveau de la couche superficielle (C). Nous constatons aussi qu'une ventilation de courte durée peut ramener la teneur eau des grains à des seuils acceptables.

D'une manière générale, la teneur en eau des grains et leur température, varient d'une couche à une autre. Lorsqu'on envoie de l'air à travers la masse granulaire, en vue de la refroidir, la couche la plus basse du silo est refroidie et séchée, les couches suivantes attendent un certain temps avant de se refroidir. On constate même que la température et la teneur en eau des couches supérieures commencent par accroître puis elles chutent avant de se stabiliser, après environ 8 heures de ventilation. Ce phénomène est donc passager et peut être expliqué par l'évacuation progressive par convection forcée, de la chaleur et de l'humidité accumulées au cours du stockage. Donc, nous pouvons dire que la ventilation d'automne est une ventilation de refroidissement accompagnée d'un léger séchage. La ventilation d'hiver est nécessaire pour le renouvellement de l'air inter granulaire et maintenir ainsi la température et l'humidité à des seuils acceptables de conservation.

4. CONCLUSION

La ventilation d'été, avec de l'air ambiant, a un effet bénéfique sur le séchage des grains de blé dès leur mise dans les silos. Celle d'automne et d'hiver permet le refroidissement des grains et l'évacuation la chaleur produite par auto échauffement. D'une manière générale, l'effet de la ventilation sur l'ensemble de la masse granulaire se fait par couches successives jusqu'à évacuation totale de l'atmosphère inter granulaire.

Les résultats obtenus nous ont permis de conclure que la vitesse de ventilation n'influe pas sur la vitesse de séchage, cependant son effet est plus marqué sur la vitesse de refroidissement des grains à partir de la vitesse d'air de 0.15 m/s qui correspond à un débit spécifique de 2.8 m³/min.tonne.

Enfin, nous pouvons dire que la ventilation est un moyen nécessaire et indispensable pour la conservation du blé dans les silos métalliques. Il reste néanmoins à déterminer une stratégie de ventilation des céréales, valable pour notre pays en vue de l'optimiser, en déterminant les conditions quasi-idéales et configurations de ventilation qui nous semblent comme une nécessité pour réduire les coûts dus à la consommation d'énergie. Elle repose en grande partie sur le choix d'un système de ventilation adapté, sur l'homogénéité de la distribution de l'air et sur les conditions climatiques au moment de la ventilation (température et humidité relative de l'air).

5. REFERENCES

- [1] Feillet P. Le grain de blé : Composition et utilisation, INRA Paris, 2000, 318 pages.
- [2] Haddad L., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, H. Zerargui, A. Hannachi, A. Bachir, M. Salmi, A. Oulmi, H. Nouar, Z. Laala. Analysis of phenotypic variability of some varieties of durum wheat (*Triticum Durum* DESF) to improve the efficiency of performance under the constaing conditions of semi arid environments. Journal of fundamental and applied sciences, El Oued Algeria, 2016, 8(3), 1021- 1036.
- [3] Fleurat L. Optimisation des conditions de stockage des blés. Nouveaux concepts pour la maitrise de la qualité des grains stockés. Symposium. Int. Revue de microbiologie et hygiène alimentaire de Tunisie, 22-23 mai 2003, 57- 70.
- [4] Fourar- Belaifa R. Interactions dynamiques insectes- mycoflore et leur influence sur la qualité des grains du blé au cours du stockage. Thèse de Doctorat ENSA El Harrach 2013, 168 pages.

-
- [5] Sun D.-W., Woods J. L. Deep Bed simulation of the cooling of stored grain with ambient air: a test bed for ventilation strategies. *Journal of stored Research*, 1997, 33(4), 299- 312.
- [6] Thorp G.R. Modelling ecosystem in ventilated conical bottomed farm grains silo. *Ecological Modelling* 94, Melbourne, Australia, 1997, 255-286.
- [7] Brooker D.B., Bakker-Arkema F. W. and Hall C. W. Drying and storage of grains and oilseeds. Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A., 1992.
- [8] Chang C.S., Converse H.H., Steel J.L. Modelling of temperature of grain during storage with aeration. *Transaction of the ASAE*, 1993 (36), 509-519.
- [9] Canchum J., Sun D.W., Chogwen C. Computer simulation of temperature changes in a wheat storage bin. *Journal of stored products research*, 2001(37), 165-177.
- [10] Sun D.W., Woods J.L. Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers. *Transaction of the ASAE*, 1994, 37(b), 1919-1926.
- [11] Multon J.L. Conservation et stockage des grains et des graines et produits dérivés. Ed. Tec&Doc. Lavoisier, Paris, 1982, vol. 1, 1158 pages.
- [12] Sun D.W. Comparaison and selection of EMC/ERH isotherm equation for rice. *Journal of stored products research*, 1999 (35), 27-43.
- [13] Sun D.W., Byrne C., Selection of EMC/ERH isotherm equation of rapeseed. *Journal of agricultural engineering research*, 1998 (69), 307-315.
- [14] Molinié A., Pfohl-Leszkowicz A. Les mycotoxines dans les céréales : les points importants de contrôle de la production au stockage, le devenir dans les produits dérivés. Notes de l'ASEDIS-SO N° spécial mycotoxines, ENSAT Tolosane, 2003.
- [15] Anonyme. Norme CODEX pour le blé et le blé dur. Codex standard, 199- 1995.
- [16] Wilkin D. R., Armitage D.M., Cogan P.M. et Thomas K. P. Integrated pest control strategy for stored grain, HGCA Project report N° 24, Home-Grown cereal authority, London, 1990.
- [17] Gu D., Sokhansanj S., Haghighi, K. Influence of floor air entry on grains moisture content, temperature and bulk shrinkage during ambient air in bin drying of wheat. *Canadian Agricultural Engineering*, 2000, 42(4), 185-193.
- [18] Anonyme. Méthode de détermination de la teneur en eau dans les céréales et les produits céréaliers. Ministère du commerce, journal officiel de la république Algérienne, 6 fev. 2013, N°08.
- [19] Shove G.C. New techniques in grain conditioning. Chapter 9, 1973, p: 209-228, in Sharma S.C. and Muir. Simulation of heat and mass transfer during ventilation of wheat and rapeseed bulks. *Canadian agricultural engineering*, 1974, 65(1), p: 41-44.

How to cite this article:

Hussine A, Bettahar A, Youcefi A. Experimental study of the ventilation of stocked wheat in a silo. *J. Fundam. Appl. Sci.*. 2018. 10(3). 320-334.