

Optimisation du processus d'aération des céréales à l'air ambiant

El Melki Mohamed najib¹, Khaled El Moueddeb², Mohamed Elies Hamza³ Ezzedine Nehdi⁴

^{1,2} Ecole Supérieure des Ingénieurs de l'Équipement Medjez el Bab, université de Jandouba

² Institut National Agronomique de Tunis, université de Carthage

³ École Nationale d'Ingénieur de Tunis, unité de recherche : énergétique et environnement

¹ mohamed.najib.melki@gmail.com

² khalelmoeddeb@yahoo.fr

³ h_elies@hyhoo.com

⁴ nehdi_ezzedine@yahoo.fr

1. Abstract

Un modèle de simulation de l'aération de grain entreposé à l'air ambiant a été utilisé et comparé avec les données expérimentales obtenues dans l'unité de conservation et de stockage à l'ESIER Medjez El Bab. En comparant le modèle avec les données recueillies entre le 15 juin et le 24 Octobre 2014, il a été observé que les résultats de simulation sont en accord avec les conditions réelles. Trois scénarios S1, S2 et S3 sur les conditions d'activation d'aération ont été évalués. Le scénario S2 peut être considéré comme bénéfique en termes de consommation énergétique et de préservation de la qualité des grains par rapport aux deux autres scénarios S1 et S3.

2. introduction

La récolte de céréales en Tunisie commence habituellement au mois de Juin, généralement la température du grain est supérieure à 25 ° C. Le stockage dans les silos expose le grain à une série de facteurs écologiques complexes qui peuvent causer une perte économique énorme pour l'industrie céréalière tunisienne. Les facteurs principaux de détérioration sont la température et la teneur en humidité. La température de stockage est importante car elle influe directement sur la qualité du grain stocké, le développement des ravageurs et la perte de la matière sèche (Maier, Adams, Trône, & Mason, 1996; Muir, 1970; Sun, & Woods, 1994a, 1994b). Le taux d'humidité est important dans le maintien de la qualité du grain lors du stockage plus elle est basse, moins la masse de grain est sensible à la détérioration par les insectes, les acariens et les champignons (Longstaff, 1994).

L'aération est le déplacement forcé de l'air ambiant à travers une masse de grain afin de préserver ou améliorer les conditions physiques du produit. En fait, l'utilisation de cette technique a reçu plus d'attention en tant que un outil principal de préservation de la qualité des grains pour les organismes stockeurs en Tunisie. Idéalement, un système d'aération efficace devrait convenir les conditions climatiques (température et humidité de l'air ambiant), caractérisé par une forte variabilité temporelle et spatiale, pour le maintien de la qualité des grains pendant le stockage avec le minimum de consommation d'énergie électrique.

Certains auteurs ont développé et validé des modèles mathématiques pour prédire le transfert de masse et de chaleur dans des silos à grains au cours du processus d'aération. Ces modèles ont été utilisés pour estimer la teneur en humidité, la température et la perte de matière sèche du grain, ce sont des outils intéressants pour les stratégies de contrôle et de surveillance (Khatchatourian et Oliveira, 2006).

L'objectif de ce travail est :

1. La validation d'un modèle de transfert de masse et de chaleur au cours du processus d'aération pour les régions nordiques de la Tunisie.
2. L'optimisation de l'aération à l'air ambiant en utilisant trois conditions d'activation de l'aération.

2.1 Modèle de transfert de chaleur et masse

Le modèle mathématique utilisé dans ce travail est basé sur la formulation de Thorpe (1997). Ce modèle concerne les relations psychométriques de l'air ambiant avec les bilans de masse et de chaleur au cours du processus d'aération des grains stockés. Les équations différentielles décrivant le transfert de chaleur et de masse dans un volume de grain aéré avec l'air ambiant sont décrites par les équations (1) et (2)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \left(\rho_b [c_g + c_w] + \varepsilon \rho_a \left[c_a + R \left(c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right] \right) = \rho_b h_s \frac{\partial U}{\partial t} - u_a \rho_a \left[c_a + R \left(c_w + \frac{\partial h_v}{\partial T_a} \right) \right] \frac{\partial \theta}{\partial y} + \rho_b \frac{\partial m_s}{\partial y} (Q_r - 0.6 h_v) \quad (1)$$

$$\rho_b \frac{\partial U}{\partial t} = -u_a \rho_a \frac{\partial R}{\partial t} + \frac{\partial m_s}{\partial t} (0.6 + U) \quad (2)$$

où c_a est la chaleur spécifique de l'air ($\text{J kg}^{-1} \text{C}^{-1}$), c_g la chaleur spécifique de grain sec ($\text{J kg}^{-1} \text{C}^{-1}$), c_w la chaleur spécifique de l'eau ($\text{J kg}^{-1} \text{C}^{-1}$), h_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau (J kg^{-1}), h_s la chaleur de sorption (J kg^{-1}), U le contenu en humidité du grain (%) sur une base sèche, m_s perte de matière sèche du grain (%), Q_r la chaleur d'oxydation de grain ($\text{J s}^{-1} \text{m}^{-3}$), T_a la température de l'air en équilibre avec le grain ($^{\circ}\text{C}$), t le temps (s), u_a la vitesse de l'air d'aération (m s^{-1}), R le taux d'humidité de l'air (kg kg^{-1}), y coordonnée verticale (m), ε la porosité du grain (décimal), ρ_a la densité de l'air intergranulaire (kg m^{-3}), ρ_b

la densité apparente du grain (kg m^{-3}) et θ est la température du grain ($^{\circ}\text{C}$).

La chaleur de sorption a été estimée l'équation (3) (Thorpe, 2001).

$$h_s = h_v \left(1 + \frac{Ae^{-(BU)}}{(\theta+C)^2} (\theta + 273.15) \left(-5 \frac{6800}{(\theta+273.15)} \right) \right) \quad (3)$$

Où A, B et C sont des constantes qui dépendent de la nature du produit stocké.

La chaleur latente de vaporisation de l'eau dans la masse de grain pour une marge de température 0 à 50 $^{\circ}\text{C}$ avec une erreur maximale de 0,02% est présenté par l'équation (4), Thorpe (2001).

$$h_v = 2501330 - 2363T_a \quad (4)$$

Dans l'équation (1) la chaleur d'oxydation du grain Q_r à été considérée égale à 15778 $\text{kJ s}^{-1}\text{m}^{-3}$ étant donné que l'oxydation de 1 kg de grain libère 15.778 kJ de chaleur et forme 1,47 kg de dioxyde carbone et 0,6 kg d'eau (Thorpe, 2001).

La vitesse de l'air d'aération u_a a été calculée par l'équation (5) en fonction des dimensions du silo et de débit d'air requis.

$$u_a = \frac{qV}{S} \quad (5)$$

Où u_a est la vitesse de l'air d'aération (m s^{-1}), V le volume de grain dans le silo (m^3), S la surface de la section transversale de silo (m^2) et q le débit d'air requis ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-3}$).

La méthode développée par Thompson (1972) a été utilisée pour déterminer le taux de perte de matière sèche m_s .

$$\frac{dm_s}{dt} = 14.72 \cdot 10^{-10} \{ \exp(1.667 \cdot 10^{-6} \cdot t / M_M M_T) \} + 2.883 \cdot 10^{-9} / M_M M_T \quad (6)$$

Les termes M_M (modificateur de l'humidité) et M_T (modificateur de la température) modifient les conditions de grains en fonction de sa teneur en humidité et de sa température. M_T peut être calculée par les équations (7) et (8) présentées dans le tableau 1

Tab. 1- Modificateur de température en fonction de la température et l'humidité du produit stockée

θ $^{\circ}\text{C}$	U (%)	M_T
≤ 15.5	≤ 19	$M_T = 32.2 \exp(-0.10440 - 1.856)$ (7)
> 15.5	$18 \leq U \leq 28$	$M_T = 32.2 \exp(-0.10440 - 1.856) + ((UP - 19)/100) \exp(0.01830 - 0.2847)$ (8)

Le modificateur de l'humidité est obtenu par l'équation (9)

$$MM = 0.103 \{ \exp[455 / (100U)^{1.53}] - 0.845U + 1.558 \} \quad (9)$$

Les équations aux dérivées partielles (1) et (2) qui décrivent le transfert de chaleur et de masse au cours du processus d'aération à l'air ambiant, pour un volume de contrôle d'épaisseur Δy , ont été programmés en utilisant la méthode de différence finie. C'est équations ont été mis en œuvre dans un logiciel de simulation appelé AERO développée par Lopes et al (2006).

La longueur de volume de contrôle a été obtenue en divisant la hauteur de la masse de grain (L) par le nombre de sections (N_s), fig.1.

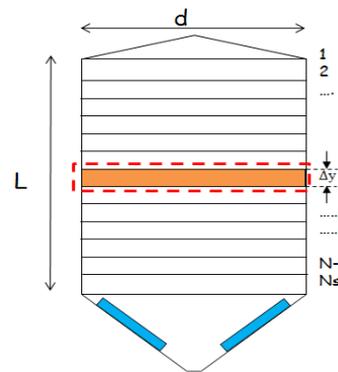


Fig.1. diagramme schématique d'une cellule de stockage

Les entrées du programme de simulation AERO sont la distribution initiale de la température, la teneur en humidité du grain, le type de produit stockée et sa densité apparente, le nombre de volumes de contrôle N_s d'épaisseur Δy , le diamètre de silo d et le débit d'air requis q.

2.2 Méthode de simulation

L'objectif recherché par les organismes stockeurs Tunisien est la préservation de la qualité des stocks dans les silos industriels durant la période de stockage. Pour atteindre cet objectif le système d'aération doit fournir des températures basses et uniformes à l'intérieur des cellules de stockage pour bloqué l'activité des insectes et le maintien du taux d'humidité proche de la valeur sûre pour bloqué l'activité des moisissures avec un minimum d'énergie.

Un système d'aération peut être considéré comme inefficace si l'humidité ou les températures du grain dépassent les seuils de sécurité ou la consommation en énergie électrique pour l'aération devient inacceptable. Ainsi, une combinaison appropriée des paramètres de commande de système d'aération est étroitement liées aux conditions météorologiques (température et humidité relative de l'air ambiant) de la région où il a été installé.

Pour cela, trois scénarios S1, S2 et S3 sur les conditions météorologiques (température et humidité relative de l'air ambiant) ont été établies. Selon ces scénarios, le système d'aération peut être activé ou désactivé.

Les conditions d'activation du système d'aération pour les trois scénarios sont présentées dans le tab.2

Tab.2 scénarios d'activation du système d'aération

scenario	conditions d'activation du système d'aération
S1	De minuit à 06 :00h du matin
S2	T_{air} (température de l'air ambiant) $\leq 20^{\circ}\text{C}$
S3	Et U (humidité relative de l'air ambiant) $\leq 80\%$

2.3 Expérimentation

Afin de vérifier le modèle de simulation, une expérience de stockage avec le blé dur aéré à l'air ambiant a été réalisée dans la station de stockage de céréales à Medjez el Bab (Ecole Supérieure des Ingénieurs de l'Équipement Rural de l'Université de Jendouba, T'unis). Le silo de stockage est de forme cylindrique en acier galvanisé ondulé avec un fond de forme conique, muni de conduits de distribution d'air perforés fig.2.

Le ventilateur a été opéré conformément à la condition présentée dans le scénario S1. La teneur en humidité initiale de blé stocké était de 10.52% sur une base humide.

Initialement, la température enregistrée par les trois capteurs 1, 2 et 3 (fig. 1) pour les trois couches de grain en vrac était de 23.5, 23 et 22,7 °C, respectivement.

La température et l'humidité relative de l'air ambiant ont été mesurées tous les heures par deux capteurs (Pt-100, Testo, l'Allemagne, la précision de mesure $\pm 1.55\%$ pour l'humidité relative et $\pm 0,58^{\circ}\text{C}$ pour la température), installé en deux points proches de l'unité d'expérimentation



Fig.2 station d'expérimentation (ESIR medjez el Bab)

Les dimensions du silo et l'emplacement des capteurs de température du grain sont présentés dans la fig. 3. Trois capteurs de température sont connectés à un système d'acquisition Duoline Data Manager. Les données de température de trois points de la cellule de stockage ont été enregistrées toutes les 60 minutes en utilisant des sondes avec une précision de $0,1^{\circ}\text{C}$. L'expérience a été menée du 15 Juin 2014 jusqu'au 24 Octobre 2014. L'aération a été réalisée en aspirant mécaniquement l'air ambiant à travers la masse de grain (flux d'air vers le bas).

Les propriétés thermo-physiques de blé et de l'air de ventilation utilisés pour la simulation et l'expérimentation sont présentées dans le tableau 3

Tab.3- propriétés thermo-physique de blé et de l'air de ventilation

Paramètre	Valeur ou équation	ou référence
chaleur spécifique de l'eau	$4186 \text{ J }^{\circ}\text{C kg}^{-1}$	Navarro and Noyes (2001)
chaleur spécifique de l'air	$1000 \text{ J }^{\circ}\text{C kg}^{-1}$	Navarro and Noyes (2001)
chaleur spécifique de grain sec	$c_g = 1000(K + QU_p)$	Brooker et al. (1992)
Densité en vrac de blé	863 kg m^{-3}	expérimentale

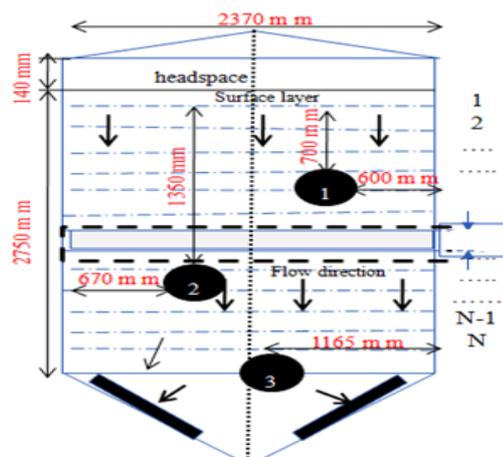


Fig.3-dimensions de la station d'expérimentation et emplacements des capteurs de mesure de température

3. Résultats et discussion

3.1 Validation du modèle

Les Fig. 4 montrent l'évolution des températures prédites par le modèle et expérimentale durant 3161 heures d'aération selon les conditions du scénario S1 (aération de minuit à 06 :00 matin).

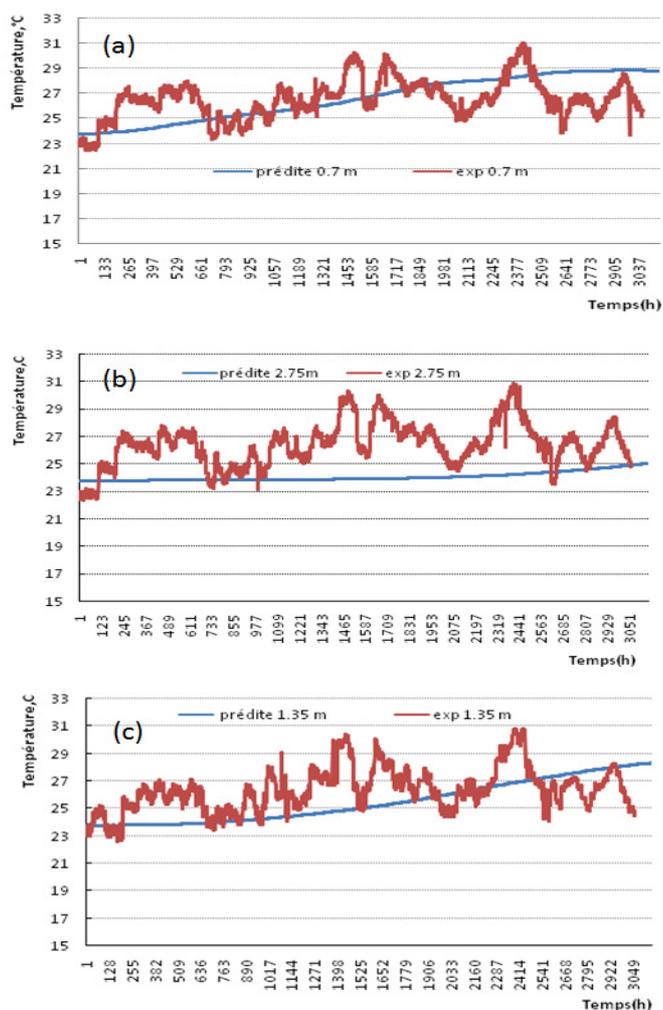


Fig.4 - températures prédite et observé pour la couche 0.7 m selon le scenario S1

L'écart maximal entre les températures mesurées et simulées était de 4.82°C pour la couche 0.7 m avec une fréquence de 0.007, 5.8°C pour la couche 1.35 m avec une fréquence de 0.053 et 5.83 pour la couche 2.75 m avec une fréquence de 0.03.

La figure 4 montre également que les températures prédites et mesurées sont semblables pour les trois couches de grains). Toutefois, les valeurs prédites sont presque toujours inférieures à celles mesurées .Ce phénomène pourrait être expliqué par:

Le modèle prédit des températures de haut, de milieu et des couches inférieures (couche 1, couche 2 et couche 3). Ces températures sont les moyennes des températures des couches d'épaisseurs de 0,7, 1,35 et 2,75 m respectivement. Ensuite, en raison du retard de refroidissement de la totalité de la couche, une différence logique entre la température moyenne prédite et la température mesurée par le capteur. L'écart tend à un minimum lorsque le front thermique atteint l'extrémité de la couche de grain. L'écart entre la température prédite et observé est proportionnel à l'épaisseur de la couche de grain ce qui à été expliqué par l'écart maximale entre les températures mesurées et simulées (4.82°C pour la couche 0.7 m, 5.8°C pour la couche 1.35 m et 5.83 pour la couche 2.75 m).

Il est important de souligner que la réduction de l'épaisseur de volume de contrôle Δy permet au modèle de prédire les meilleures approximations des températures mesurés.

3.2 Optimisation de l'aération

Les températures prédites en adoptant le scenario S1 dépassent généralement 24°C (fig.4) durant presque la totalité de la période d'aération avec un léger effet d'humidification de la masse de grain fig.7.

Les insectes de stockage sont principalement des thermophiles dans la nature. Ainsi, leur croissance et leur survie est fortement influencée par la température. Le seuil inférieur de développement de la majorité de ces insectes est d'environ 18 °C et la gamme optimale de leurs développement est environ 25 à 35° C (Ileleja et al. 2007). Cependant les températures obtenue par l'aération nocturne (scenario S1) dépassent généralement 25 °C (fig.4) ce qui favorise l'augmentation de la densité de développement des insectes.

La puissance électrique spécifique absorbée par le système d'aération en adoptant le scenario S1 et de l'ordre de 0.0713 kw par jour de stockage par tonne de blé. Pour un silo industriel tel que le silo de Bir Kassaa dont la capacité de stockage dépasse 50.000 tonnes les besoins en énergie électrique selon le scenario S1 est de l'ordre 467500 kW .cependant l'activation de l'aération selon le scenario S2 (l'aération et activé lorsque la température de l'air ambiant est inférieur à 20 °C) permet de diminuer la température

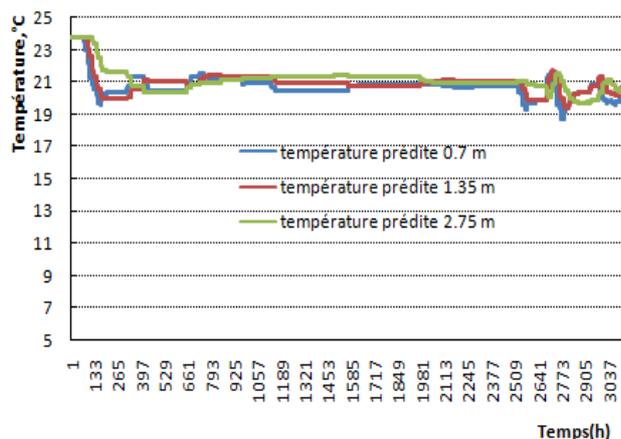


Fig.5-températures prédite pour les trois couches de grain selon le scenario S2

Des trois couches de grains à 20°C (fig.5) durant les premier 133 heures de conservation soit durant le 21^{ème} jour du mois de juin sans risque de condensation parce que les températures des trois couches sont semblables (fig.5),pour les grains récoltés au mois de juin les températures obtenue ,en utilisant un simple thermostat dont la température de consigne est de 20°C, sont très encourageant pour la conservation à long terme .Ce ci s'explique par la faible densité de migration des insectes de stockage des champs récoltés vers les structures de stockage.La consommation énergitique pour ce scenario est 0.025 kw par tonne par jour de stockage fig.8. Ainsi une consommation 165500 kw pour un silo de capacité 50.000 tonnes soit un gain de

302000kw par rapport au scenario S1 pour 3161 heures de stockage.

La fig.7 montre l'évolution de teneur en humidité pour les trois scenarios d'aération. On remarque que la teneur en humidité (base humide) commence à augmenter en Octobre d'où la nécessité d'ajustement du programme d'aération.

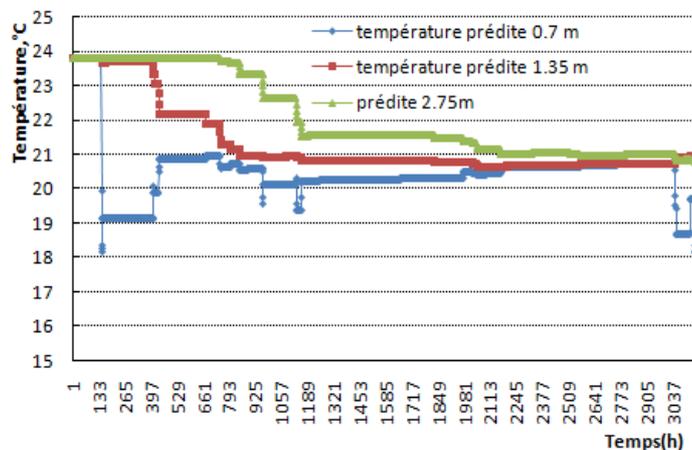


Fig.6-températures prédite pour les trois couches de grain selon le scenario S3

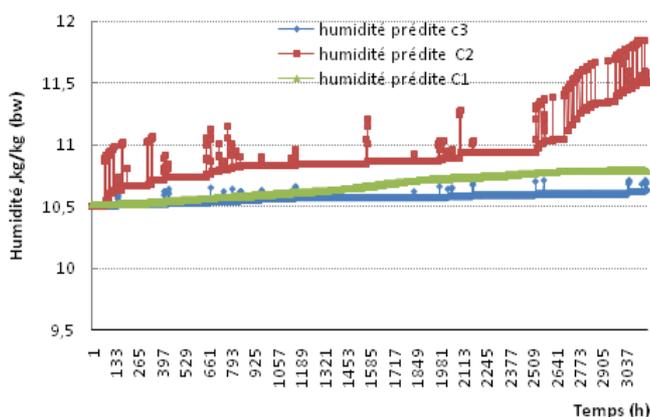


Fig.7-teneur en humidité (base humide) prédite pour trois scenarios d'aération S1, S2 et S3

La commande de l'aération par thermostat et hygostat (scenario S3) permet d'atteindre la température de consigne (20°C) avec une teneur en humidité (base sèche) stable fig.6. Cependant durant les premières heures (400 h) d'aération l'écart de température entre les couches est de 5°C. Pour un silo industriel l'écart de température entre les couches de grain augmente avec la hauteur du silo ce qui favorise la condensation et la prise en masse de grains dans la structure de stockage. Cependant la consommation énergétique selon ce scenario est très bénéfique par rapport aux deux autres scenarios (8% et 2.7% de la consommation énergétique spécifique des scenarios S1 et S2 respectivement).

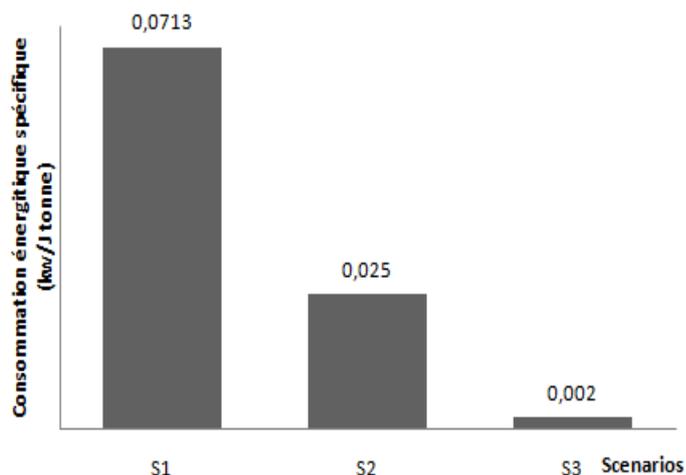


Fig.8- consommation énergétique spécifique pour trois scenarios d'aération

4. Conclusion

Le modèle mathématique proposé par Thorpe (1997) peut être utilisé pour l'élaboration des stratégies de conservation et de stockage. Cependant la précision et la marge d'erreur de prédiction doit être mis au point. (Écart entre la température observé et prédite dépasse 4.8°C).

Trois scénarios S1, S2 et S3 ont été évalué, les températures obtenues selon S2 et S3 sont bénéfiques en terme de consommation énergétique et préservation de la qualité des grains. Cependant S3 ne permet pas la préservation de la qualité des grains pendant le stockage car l'écart de température selon S2 peut être l'origine de

5.références

1. Ileleja, K.E., Maier, D.E., Woloshukb, C.P., 2007. Evaluation of different temperature management strategies for suppression of Sitophilus zeamais(Motschulsky) in stored maize. J. Stored Prod. Res. 43 (4), 480–488.
2. Maier, D.E., Adams, W.H., Throne, J.E., & Mason, L.J. (1996). Temperature management of the maize weevil, Sitophilus zeamais Motsch. (Coleoptera: Curculionidae), in three locations in the United States. Journal of Stored Products Research, 32, 255–273
3. Muir, W.E. (1970). Temperature in grain bins. Canadian Agricultural Engineering, 12(1), 21-24.
4. Sun, D.W., Woods, J. L. (1994a). Low temperature moisture transfer characteristics of barley: thin-layer models and equilibrium isotherms. Journal of Agricultural Engineering Research, 59, 273-283.
5. Sun, D.W., Woods, J. L. (1994b). Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers. Transactions of the ASAE, 37(6), 1919-1926
6. Longstaff, B.C. (1994). The management of stored product pests by non-chemical means: an

- Australian perspective. *Journal of Stored Products Research*, 30, 179–185.
7. Lopes, D.C., Martins, J.H., Melo, E.C., Monteiro, P.M.B., 2006. Aeration simulation of stored grain under variable air conditions. *Postharv. Biol. Technol.* 42, 115–120
 8. Thorpe, G.R. (2001). Physical basis of aeration. In: Navarro, S., Noyes, R.T. (Eds.). *The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management*. CRC Press, Boca Raton, pp. 125–194, Chapter
 9. Khatchatourian, O.A., Oliveira, F.A., 2006. Mathematical modelling of air flow and thermal state in large aerated grain storage. *Biosyst. Eng.* 95 (2), 159–169.
 10. Thorpe, G.R., 1997. Modelling ecosystems in ventilated conical bottomed farm grain silos. *Ecol. Modell.* 94, 255–286.
 11. Thompson, T.L., 1972. Temporary storage of high-moisture shelled corn using continuous aeration. *Transactions of the ASAE*. St. Joseph, MI, vol. 15, no. 2, pp. 333–337.