



Performances d'un échangeur thermique de type air-sol



Après la canicule de l'été 2003, de nombreux éleveurs se sont équipés en systèmes de refroidissement tels que le cooling et la brumisation. Leur fonctionnement étant basé sur le pouvoir évaporatif de l'air, l'efficacité est limitée puisqu'elle dépend de la teneur en vapeur d'eau présente initialement dans l'air. Un échangeur thermique de type tuyaux enterrés dans le sol a été conçu à la station expérimentale de l'ITP, à Romillé. Son fonctionnement est différent puisque son principe est basé sur les échanges de températures entre le sol et l'air circulant dans le réseau de tubes enterrés. Un bon dimensionnement de ce système est nécessaire pour optimiser ses performances qui sont analysées tout au long de l'année en distinguant les saisons hivernales et estivales.

Matériel et méthode

L'échangeur thermique de Romillé est constitué d'un réseau de 36 tubes de 16 cm de diamètre, longs de 25 m et situés à 3 profondeurs différentes : 2 m, 2,5 m et 3 m.

Les tubes sont disposés en quinconce et espacés les uns des autres d'une distance entre axe de 50 cm. Pour soutenir correctement l'ensemble des 36 tubes, ceux-ci sont scellés sur des murets transversaux en béton espacés de 2 m les uns des autres. Un caniveau en sortie d'échangeur et une pente de 2 % permettent

de recueillir les eaux de condensation et de les évacuer en cas de besoin à l'aide d'une pompe.

Par ailleurs, deux fosses de réception en béton sont construites à l'entrée et en sortie d'échangeur. Un ventilateur de 450 mm est ajouté à l'entrée du bâtiment afin de compenser les pertes de charge générées par le système.

Le sol est constitué d'un sable fin compacté qui entoure l'ensemble des 36 tuyaux. Au dessus, le couvert végétal est présent sur environ 50 cm.

Résumé

Un échangeur thermique de type tuyaux enterrés dans le sol a été créé à la station expérimentale porcine de l'ITP à Romillé. Depuis l'été 2003, un total de 70 000 données a été relevé au cours de 112 jours d'enregistrement.

L'analyse des résultats met en évidence un réchauffement proche de 10°C lorsque la température hivernale est de -2°C et un refroidissement en été maximal de 13,4°C lorsque la température extérieure avoisine les 32°C.

Par ailleurs un amortissement moyen de 91% des amplitudes thermiques quotidiennes est mesuré sur l'ensemble de l'année. Le dimensionnement et les investissements nécessaires à la mise en place d'un tel système sont aussi traités dans cet article.

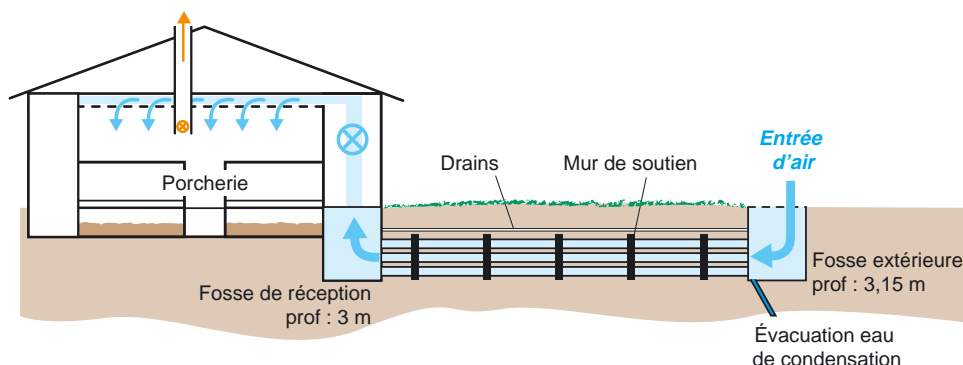


Figure 1 : Echangeur thermique de Romillé

David BARTOLOMEU



Bien que surdimensionnée pour des raisons expérimentales, l'installation de cet échangeur permet de conditionner l'air destiné à deux salles d'engraissement de 48 places.

Plusieurs sondes thermiques ont été placées à l'entrée, au milieu et en sortie des tuyaux, ainsi que dans le sol à 2, 2,5 et 3 m de profondeur.

Des enregistrements ont ainsi été réalisés toutes les 15 min au cours de périodes réparties entre juin 2003 et avril 2004.

Les niveaux de ventilation ont été relevés, ils correspondent aux besoins réels des animaux situés dans les deux salles alimentées par l'échangeur thermique. Les débits évoluent d'un minimum de 8 m³/h/porc à un maximum de 70 m³/h/porc.

Résultats et discussion

Les résultats obtenus permettent de bien comprendre le fonctionnement de l'échangeur thermique au cours des saisons.

Durant les 6 campagnes de mesures enregistrées en été (graphique 1), le système joue un rôle de refroidissement. Les variations thermiques élevées, expliquées par des jours chauds et des nuits

fraîches sous nos latitudes, contrastent avec les faibles amplitudes thermiques obtenues en sortie d'échangeur.

L'hiver, le système récupère l'énergie stockée dans le sol et l'utilise pour réchauffer l'air circulant dans le réseau enterré.

Tableau 1 : Températures du sol à différentes profondeurs

	Températures (en °C)		
	à -3m	à -2,5m	à -2m
Mini	8,7	7,9	7,5
Maxi	15,8	16,5	17,5

Concernant l'évolution des températures du sol aux différentes profondeurs, on observe à -3 m une variation annuelle de 7,1°C avec des températures évoluant de 8,7°C (avril 2004) à 15,8°C (septembre 2003). A -2 m, l'écart augmente puisque la température varie annuellement de 10°C, des valeurs intermédiaires sont obtenues à -2,5 m. **Les variations de température sont d'autant plus faibles que la profondeur du système est importante.**

Par ailleurs, si on analyse de plus près les jours où l'on obtient les minima et maxima de températures (sol + air extérieur), **un décalage temporel d'environ 2 mois apparaît.**

Le sol agirait comme un véritable « amortisseur saisonnier », ses tem-

pératures les plus basses (à -3 m) datent du mois d'avril alors que celles de l'air extérieur de février. Il en est de même pour les températures les plus hautes enregistrées fin septembre pour le sol et début août pour l'air extérieur.

Ce décalage dans le temps est indispensable pour le bon fonctionnement du système (TIEDMANN, GOETSCH et al), il se manifeste d'autant plus que le sol est profond et de nature plus inerte.

Sur l'ensemble de la période estivale, soit 59 jours, l'échangeur thermique parvient à refroidir l'air de 2°C. Cette valeur est une moyenne et peut sembler peu élevée. Toutefois, lors des jours les plus chauds, avec une température extérieure culminant à 32°C, le refroidissement est très significatif puisqu'il atteint 13,4°C.

En saison hivernale, la température du sol est supérieure à celle de l'air extérieur.

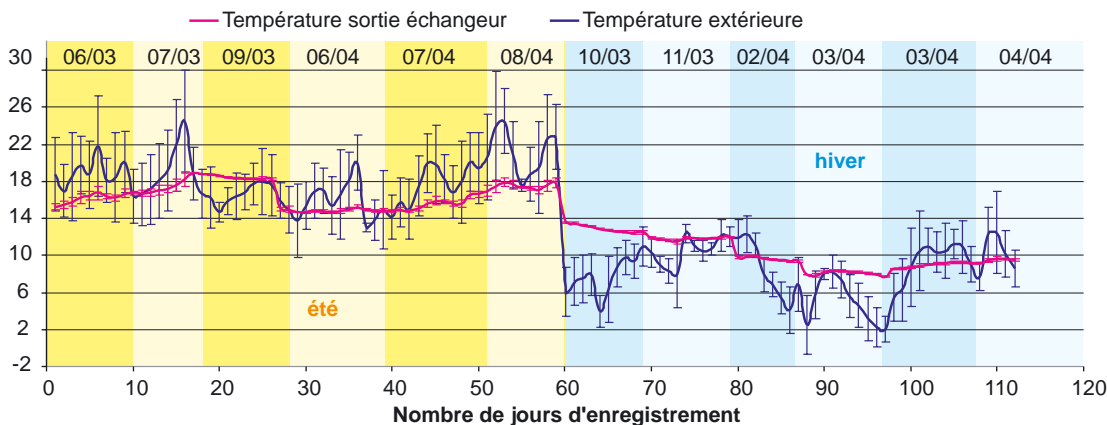
L'échangeur permet de réchauffer l'air d'environ 2°C sur l'ensemble de la période enregistrée. Le réchauffement maximal obtenu est de 10°C lorsque les jours sont les plus froids.

Quelle que soit la saison, on peut donc affirmer que **plus l'écart entre la température extérieure**

Entrée d'air de l'échangeur



En saison hivernale, la température du sol est supérieure à celle de l'air extérieur. L'échangeur permet de réchauffer l'air de 10°C dans les conditions extrêmes.



Graphique 1 : Evolution des températures au cours des campagnes d'enregistrement



Tableau 2 : Gains thermiques de l'échangeur

	Nombre de jours d'enregistrement	Température extérieure moyenne (en °C ±Ecart Type)	Température sortie échangeur (en °C ±Ecart Type)	Température du sol à -3m (en °C ±Ecart Type)	Débit de ventilation (m ³ /h/porc ±ET)
Saison estivale	59	18,0 ±4,4	16,2 ±1,3	15,1 ±1,3	42,0 ±11,3
	12	22,0 ±4,5	17,2 ±1,0	15,3 ±0,6	53,0 ±9,1
	Le jour le plus chaud	24,0 ±5,9 T.max = 32,0	17,4 ±0,7 T.max = 18,6	15,3 ±0,0 T.max = 15,3	55,6 ±8,8 D.max = 68,6
Saison hivernale	43	8,4 ±3,7	10,2 ±1,8	11,5 ±2,6	24,0 ±5,7
	7	3,2 ±2,5	8,9 ±1,7	10,3 ±2,3	20,0 ±2,8
	Le jour le plus froid	2,5 ±3,1 T.min = -1,8	7,9 ±0,0 T.min = 7,8	9,5 ±0,0 T.min = 9,4	20,3 ±2,8 D.min = 20,3

et celle du sol est important, meilleure est l'efficacité de l'échangeur.

Par ailleurs tout au long de l'année, on observe à partir des écarts types calculés, des variations de températures saisonnières fortement atténuées en sortie d'échangeur. **Le système parvient à diminuer les amplitudes quotidiennes de 91 % sur l'ensemble des 112 jours enregistrés.**

Rendement thermique

Le rendement R de l'échangeur thermique peut se calculer à différentes longueurs (x) du système, à différentes profondeurs (p) et à différentes vitesses (v). Il caractérise l'efficacité du système et se définit comme le pourcentage d'utilisation de la différence de température entre l'air et celle du sol à une profondeur donnée :

$$R(x,p,v) = \frac{T(x,p) - T_{ext}}{T_{sol}(p) - T_{ext}} \times 100$$

Le rendement thermique de l'échangeur augmente avec la longueur des tuyaux. Sur l'ensemble de l'année, il est d'environ 55 % à 12,5 m et de 80 % à la sortie des tuyaux c'est-à-dire à 25 m. Cette dernière valeur correspond exactement aux résultats obtenus par DUTERTRE et ROUSSEAU en 1995.

Cependant dans notre étude, le rendement reste stable quelle que soit la saison (Tableau 3). L'efficacité de l'échangeur à 25 m est identique en été comme en hiver. Les débits de ventilation peuvent expliquer ce résultat, ils correspondent ici aux besoins réels des animaux et non pas à des débits théoriques constants comme dans la plupart des publications.

Modélisation

La modélisation de ce système permet de déterminer la température de sortie de l'échangeur à partir des principaux facteurs explicatifs qui sont :

Tableau 3 : Rendement de l'échangeur à 25 m et à mi-longueur en fonction de la saison

Saison	ETE	HIVER
Débit (m ³ /h/place)	42,0 ±11,3	24,0 ±5,7
Nombre d'observations	1557	1146
Rendement R (x=25m)	79 %	77 %
Rendement R (x=12,5m)	50 %	59 %

- la température extérieure (en °C)
- la température du sol (en °C)
- les débits de ventilation (en m³/h).

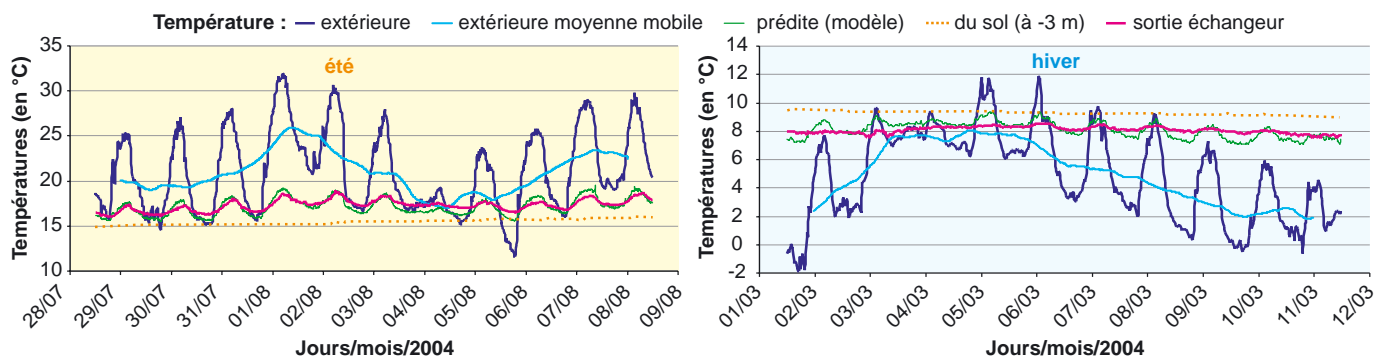
Avec un coefficient de régression $r^2 = 0,94$ l'équation obtenue est la suivante :

$$T(\text{sortie}) = 0,136 T(\text{ext.}) + 0,907 T(\text{sol}) + 85.10^{-5} \text{ Débit} - 1,863$$

La température prédite par le modèle apparaît en vert sur le graphique 2.

La rendement thermique de l'échangeur augmente avec la longueur des tuyaux.

La moyenne mobile permet de mieux visualiser l'évolution de la température extérieure au fil des jours : des cycles courts de 5 à 7 jours apparaissent en été alors qu'en hiver les cycles sont beaucoup plus longs. Ces facteurs



Graphique 2 : Évolution des températures les plus chaudes d'été et les plus froides hivernales



L'échangeur thermique améliore tout au long de l'année les conditions thermiques recherchées dans les élevages.

L'efficacité de ce système repose sur la qualité des échanges entre le sol et l'air transitant dans le réseau souterrain.

naturels ne semblent pas affecter l'efficacité du système puisque la température en sortie d'échangeur reste stable quelle que soit la saison, avec un décalage de 2 à 3°C par rapport à la température du sol.

Dimensionnement et coût

Cette étude permet aussi d'apporter les éléments concrets pour dimensionner de manière optimale ce type d'installation dans les élevages.

L'efficacité de ce système repose en partie sur la qualité des échanges entre le sol et l'air transitant dans le réseau souterrain.

- **Un sol bien compact en limon ou argileux** sera plus inerte qu'un sable grossier et donc beaucoup plus performant en terme d'échange thermique. On peut éventuellement prévoir des **drains** de manière à pouvoir humidifier le sol, la capacité d'accumulation de chaleur et la conductivité thermique étant plus élevés dans les sols humides (VAN CAENEGEM et al).
- Les tubes doivent être choisis avec un **diamètre de 140 à 200 mm**. En effet, lorsque le diamètre d'un tuyau est doublé, la

surface d'échange double également tandis que le débit d'air quadruple pour une même vitesse d'air. Ce qui se répercute par une perte de rendement des échanges. Les tubes doivent être **rigides, longs de 25 m et positionnés à une seule profondeur** (2 à 3 m) en évitant des points bas intermédiaires qui sont des sources potentielles de réserves d'eau de condensation.

- **La vitesse de l'air** dans les tuyaux ne devrait pas dépasser **3 m/s** pour favoriser une durée suffisante d'échange avec le sol.
- Prévoir un **tube** de 160 mm de diamètre **pour 3 à 4 places d'engraissement**.

Le total des investissements est évalué entre **50 et 70 € la place d'engraissement**. Il dépend de la disposition, du diamètre, de la longueur et de la profondeur des tuyaux. Il comprend donc le terrassement (20 % du prix), une fosse de réception en béton (55 %), l'achat des tubes (15 %) et la ventilation (10 %).

La surface nécessaire à l'installation est de toute évidence l'une des principales contraintes à prendre en compte.

Le coût de fonctionnement est peu élevé et le retour sur investissement reste à calculer. Néanmoins, un gain d'énergie semble indiscutable, en hiver sur les dépenses de chauffage et en été sur les débits de ventilation.

Conclusion

L'intérêt de l'échangeur thermique est majeur puisqu'il améliore tout au long de l'année les conditions thermiques recherchées dans les élevages. Qu'il soit utilisé en mode réchauffement en hiver ou refroidissement en été, il intervient de manière efficace sur l'amortissement des amplitudes thermiques. Les variations de débits étant largement diminuées, ce système favorise un confort d'ambiance pour les animaux en limitant les courants d'air et donc les risques de maladie ou troubles comportementaux (toux, cannibalisme...). La rentabilité de l'échangeur peut être atteinte s'il permet l'amélioration des performances techniques dans l'élevage. D'après MASSABIE, une ambiance plus homogène en terme de température permet effectivement de gagner en croissance et en indice de consommation. ■

Contacts :
david.bartolomeu@itp.asso.fr

Références bibliographiques

- BARBARI M., CHIAPPINI U., 1984. Budapest, CIGR, p.388-395
- DUTERTRE C., ROUSSEAU P., CASTAING J., COUDURE R., CAZAUX J.G., 1995. Journées de la Recherche Porcine en France, 27, 329-336
- GOETSCH W., JACOBSON L., REEDER R., STOMBAUGH D., 1992. West Lafayette, Indiana, Earth Tempering of ventilation air, PIH 102.
- MUTAF S., ALKAN S., SEBER N., 2004. The effects of natural ventilation air on Psychrometric results in poultry houses in hot environment, Turkey, CIGR BC 03 023
- TIEDEMANN H., 1991. KTBL. Schiff 340. 105p.
- VAN CAENEGEM L., DECLIN D., 1997. Tänkion, Echangeur de chaleur souterrain pour porcherie, rapport FAT n°504
- MASSABIE P., QUINIOU N., GRANIER R., 1999. Journées de la Recherche Porcine en France 31, 125-131
- MASSABIE P., QUINIOU N., 2001. Journées de la Recherche Porcine en France 33, 17-23
- NEUKERMANS G., DE SCHRIJVERE K., DEBRUYCKERE M., VAN DER BIEST W., BALEMANS L., 1989. Rotterdam, Conditionnement de l'air de ventilation des porcherie d'élevage par l'échangeur thermique enterré dans le sol. Land and Water Use, Dodd & Grace, p.1365-1392.