

Zeitschrift: Technique agricole Suisse
Herausgeber: Technique agricole Suisse
Band: 73 (2011)
Heft: 3

Artikel: Diviser la consommation d'énergie du chauffage et de la ventilation par deux et plus : economiser de l'énergie dans l'étable est aussi important sur le plan écologique qu'intéressant sur le plan économique
Autor: Caenegem, Ludo Van / Jöhl, Gallus / Sax, Markus
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1085925>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 05.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Diviser la consommation d'énergie du chauffage et de la ventilation par deux et plus

Economiser de l'énergie dans l'étable est aussi important sur le plan écologique qu'intéressant sur le plan économique

Octobre 2010

Auteurs

Ludo Van Caenegem, Gallus Jöhl,
Markus Sax, Alina Soltermann,
ART

Impressum

Edition:
Station de recherche Agroscope
Reckenholz-Tänikon ART,
Tänikon, CH-8356 Ettenhausen,
Traduction Regula Wolz, ART

Les Rapports ART paraissent
environ 20 fois par an.
Abonnement annuel: Fr. 60.-.
Commandes d'abonnements
et de numéros particuliers: ART,
Bibliothèque, 8356 Ettenhausen
T +41 (0)52 368 31 31
F +41 (0)52 365 11 90
doku@art.admin.ch
Downloads: www.agroscope.ch

ISSN 1661-7576

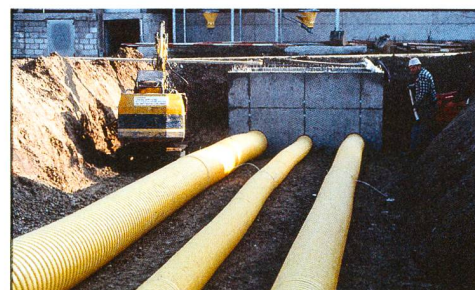
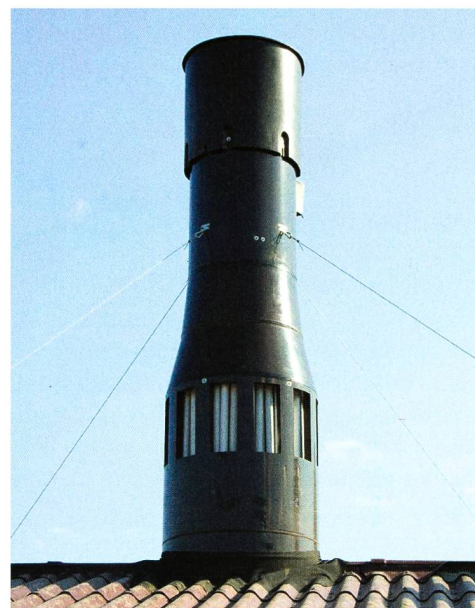
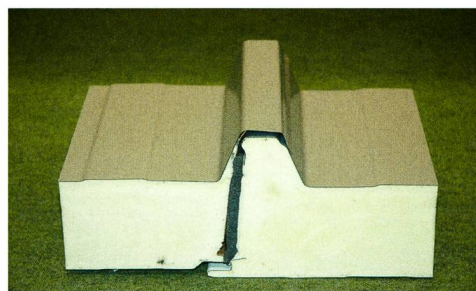


Fig. 1: L'isolation thermique, la ventilation commandée par la concentration en CO₂, l'utilisation de la géothermie et la récupération de chaleur permettent de réduire considérablement la consommation d'énergie pour le chauffage.

La consommation annuelle d'énergie dans les porcheries est estimée à 90 millions de kilowatt heures pour le chauffage et à 40 millions de kilowatt heures pour la ventilation. Des simulations et des essais pratiques à la station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART montrent que

différentes mesures permettent de réduire considérablement la consommation d'énergie. L'étude a porté sur le potentiel d'économie d'énergie de l'isolation thermique, de la régulation du débit de ventilation, de l'utilisation de la géothermie et de la récupération de la chaleur de l'air



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de
l'économie DFE
Station de recherche
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

sortant des porcheries et des halles d'engraissement de volaille.

Sachant que la ventilation est la principale responsable des pertes de chaleur, son potentiel d'économie d'énergie est plus important que celui de l'isolation thermique. Cela ne veut pas dire pour autant qu'il faut renoncer à une excellente isolation thermique dans les nouveaux bâtiments. Celle-ci entraîne d'ailleurs peu de coûts supplémentaires lorsque la technique de construction est adaptée. La mesure d'économie d'énergie la plus simple consiste à ne pas aérer plus que nécessaire. Les essais montrent qu'une bonne régulation du CO₂ permet d'adapter le débit de ventilation aux besoins du moment. D'autres économies significatives d'énergie sont possibles en utilisant la géothermie et en récupérant la chaleur con-

tenue dans l'air sortant. C'est la récupération de chaleur qui permet le plus de réduire les besoins de chauffage. La quantité d'énergie économisée dépend toutefois du rendement thermique de l'échangeur de chaleur dans les conditions pratiques. De plus, la consommation de courant des ventilateurs augmente car la résistance de l'air est plus importante. C'est pourquoi avec les échangeurs thermiques, il est recommandé d'utiliser uniquement des commandes de ventilateur économes.

Les mesures d'économie d'énergie ne sont rentables que si les investissements nécessaires peuvent être amortis pendant la durée d'exploitation prévue. Cela suppose aussi que le potentiel théorique d'économie d'énergie puisse être exploité grâce à un dimensionnement, une réalisation et une manipulation corrects.

Problématique

La consommation d'énergie des ventilateurs qui sont en service toute l'année dans la porcherie et des chauffages qui fonctionnent sur de longues périodes dans des bâtiments qui nécessitent des températures élevées, est inutilement élevée dans de nombreuses exploitations. Si les prix de l'énergie continuent à monter, la facture des coûts d'énergie pourrait être élevée dans de telles exploitations. C'est pourquoi pour éviter d'en arriver à ce stade, il est recommandé de prendre dès maintenant des mesures pour réduire la consommation d'énergie. Comme les mesures d'économie d'énergie sont liées à de gros investissements, il est important de savoir combien de temps il faudra pour les amortir, afin de pouvoir choisir la solution la plus avantageuse.

Le présent rapport compare différentes mesures permettant de réduire la consommation d'énergie à l'aide de simulations et présente les résultats d'essais pratiques. Une méthode dynamique a été développée spécialement pour les simulations. Elle permet de calculer la consommation annuelle d'énergie dans les conditions de la pratique. Une méthode de calcul spéciale a dû être développée car la méthode de calcul de la consommation d'énergie décrite dans la norme SIA 380/1 [1] ne peut, pour différentes raisons, être appliquée aux bâtiments d'étable. La température intérieure comme le débit de ventilation ne sont pas constants dans les étables, mais dépendent des animaux. Le dégagement de chaleur par les animaux, sensible et latent, qui dépend lui aussi de la température de l'étable, influe largement sur le bilan énergétique. Par ailleurs, il faut également prendre en compte les cycles d'occupation usuels pour chaque type d'étable.

Les valeurs de consigne en matière de température et d'humidité relative, ainsi que les valeurs limites de concentrations en gaz ont été définies selon des recommandations reconnues au niveau international [2, 3]. Outre la consommation d'énergie pour le chauffage, on a également calculé la consommation de courant des ventilateurs de l'étable. Comme il manquait les données néces-

saires au calcul du potentiel d'économie d'énergie de la ventilation commandée par la concentration en CO₂, un essai pratique a été mis en place dans la porcherie de mise bas d'ART afin d'évaluer la précision de l'adaptation des débits de ventilation. La principale motivation pour mettre volontairement en pratique des mesures d'économie d'énergie tient à leur intérêt économique. C'est pourquoi il était indispensable de considérer la rentabilité des différentes solutions.

Simulations

Mesures d'économie d'énergie

Les simulations ont permis de calculer la consommation annuelle d'énergie de différentes variantes d'isolation thermique (I), d'utilisation de la géothermie (II) et de récupération de chaleur (III). L'étude a porté sur cinq type d'étables chauffées couramment rencontrées dans la pratique: porcherie de mise bas (16 boxes de mis bas), porcherie de sevrage (480 porcelets), porcherie de pré-engraissement (200 porcs), porcherie de finition (200 porcs), halle d'engraissement de volaille (12 000 poulets; fig. 2, tab. 1).

Tab. 1: Dimension des étables étudiées.

	Surface			Longueur
	Paroi	Toit	Fenêtres/ Portes	Périmètre
	m ²	m ²	m ²	m
Porcherie de mise bas PMB	134	188	17	61
Porcherie de sevrage PS	155	293	27	76
Porcherie pré-engraissement PP	157	232	29	73
Porcherie de finition PF	199	313	29	79
Halle d'engraissement de volaille	623	979	89	159

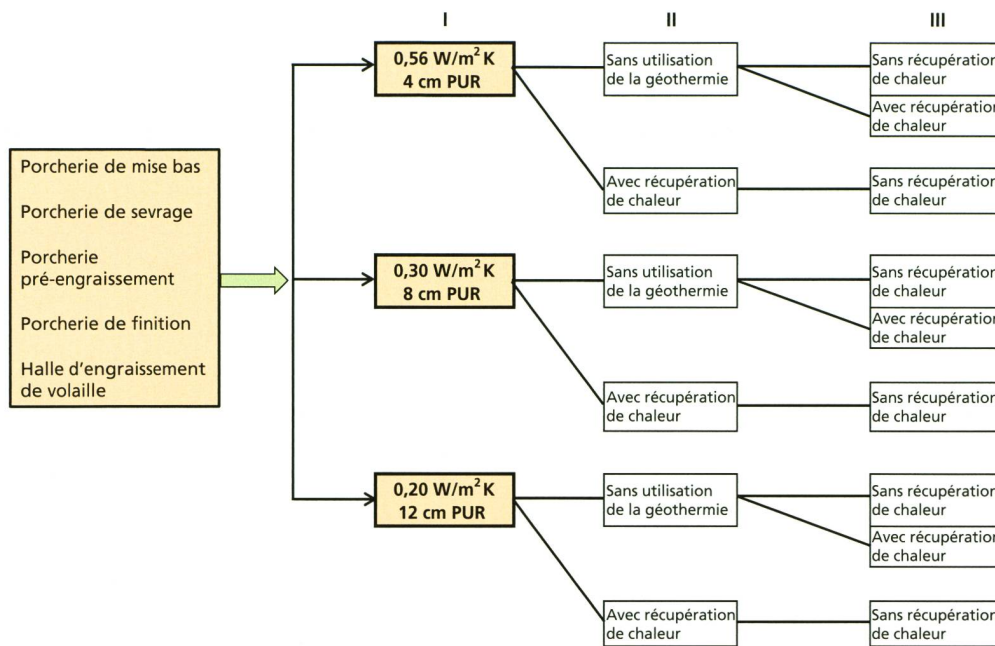


Fig. 2: Simulations réalisées pour différents types de porcheries/halles et différentes mesures d'économie d'énergie.

Pour l'isolation thermique des parois et du toit, trois valeurs ont été étudiées : 0,56 W/m² K, 0,30 W/m² K et 0,20 W/m² K. Les coefficients de transmission thermique (U) correspondent à 4, 8 et 12 cm de polyuréthane (PUR) et sont disponibles sous forme de panneaux sandwich dans le commerce. Pour les fenêtres et les portes, on est parti d'un coefficient de transmission thermique de 2,5 W/m² K pour toutes les variantes. Pour le périmètre, la valeur U linéaire est de 0,8 W/m K [4].

Les calculs de l'utilisation de la géothermie reposent sur les températures d'arrivée d'air, qui ont été enregistrées lors d'essais antérieurs avec un échangeur thermique à tuyaux ondulés d'un rendement thermique de 70 % en hiver et de 50 % en été [5]. La résistance supplémentaire de l'air dans l'échangeur thermique a été fixée à 30 Pa pour un débit de ventilation maximum. Dans la porcherie de mise bas où la densité des animaux est relativement faible, il est possible d'obtenir le même réchauffement de l'air d'amenée en hiver lorsque l'air provient d'une cavité située sous la porcherie [6]. Dans les autres types de porcherie, la surface d'échange avec la chaleur souterraine

sous le bâtiment est trop réduite par rapport à la masse des animaux.

Pour la récupération de chaleur, un échangeur thermique à contre-courant refroidit l'air sortant de l'étable et réchauffe l'air venant de l'extérieur. Si la température de l'air sortant descend en dessous du point de condensation, de l'eau est évacuée. Grâce à la chaleur de condensation ainsi libérée, le rendement thermique de l'échangeur de chaleur peut théoriquement atteindre plus de 70 %. Cette valeur est loin d'être atteinte dans la pratique, à cause de l'encrassement, du manque d'étanchéité des canaux et de la commande imprécise des clapets. Les simulations se sont basées sur un rendement thermique de 50 %. On a admis que la résistance d'air causée par l'échangeur thermique s'élevait à 100 Pa pour un débit d'air maximum de 40 %. Lorsque le débit d'air est plus élevé, l'échangeur thermique est court-circuité côté entrée et sortie d'air. L'air frais vient directement de l'extérieur tandis que l'air sortant est évacué par une cheminée séparée. Lorsque l'échangeur thermique est hors circuit, la résistance totale de l'air tombe à 90 Pa pour un débit d'air de 100 % comme dans la variante sans échangeur thermique.

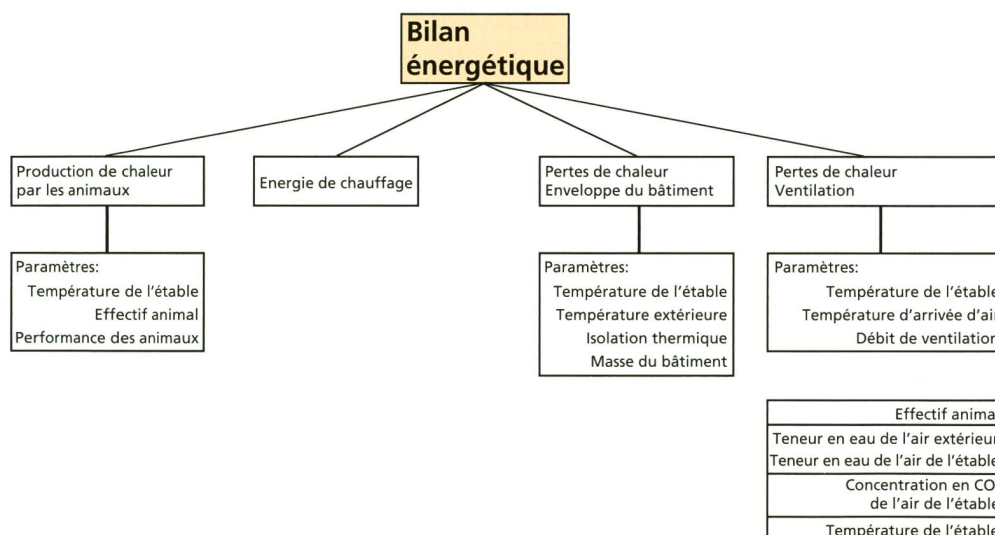


Fig. 3: Paramètres déterminants pour le calcul du bilan énergétique.

Tab. 2: Valeurs limites de la température de l'étable, humidité relative, concentration en CO₂ et débits de ventilation pour les simulations des types de porcherie/halle étudiés.

	Porcherie de mise bas (16)	Porcherie de sevrage (480)	Porcherie pré-engraissement (200)	Porcherie de finition (200)	Halle d'engraissement de volaille (12 000)
Température minimale de la porcherie/halle (°C)	Porcherie: 18 nids de porcelets 34 > 26	26 > 20 décroissant avec l'âge	18	16	34 > 20 décroissant avec l'âge
Température maximale autorisée dans le bâtiment (°C)	22	26	22	22	–
Humidité relative maximale autorisée (%)	90 – température de l'étable	90 – température de l'étable	90 – température de l'étable	90 – température de l'étable	90 – température de l'étable
Concentration en CO ₂ maximale autorisée (ppm)	2000	2000	2000	2000	2000
Poids des animaux (moyenne) (kg)	Truie: 250 Porcelet: 1.5 > 8	8 > 25	40	80	0.04 > 2.2
Débit de ventilation maximal (m ³ /animal et h)	375	40	50	90	8.33

* A partir de cette température, le débit de ventilation est maximal.

Calcul du bilan énergétique

La consommation d'énergie du chauffage se calcule à partir du bilan énergétique. Le bilan énergétique compare la production de chaleur des animaux et l'énergie nécessaire au chauffage avec les pertes de chaleur dues à l'enveloppe du bâtiment et au renouvellement de l'air (fig. 3). Le débit de ventilation doit remplir trois conditions: la concentration en CO₂ ne doit pas dépasser 2000 ppm (0,2 vol.-%), l'humidité relative doit être inférieure à «90 % moins la température de la porcherie» et la température de la porcherie ne doit pas dépasser la valeur maximale autorisée selon le tableau 2. Si la température maximale autorisée est dépassée, la ventilation passe à 100 % de la capacité maximale disponible. Pour la température et l'humidité relative de l'air extérieur, on a utilisé des séries temporelles avec des intervalles de demi-heures, séries qui ont été

enregistrées lors d'un essai antérieur à Buckten (2005–2006). La consommation d'énergie du chauffage et de la ventilation a été calculée pour chaque demi-heure. La somme de ces calculs donne la consommation énergétique annuelle pour chaque type de porcherie/halle et chaque variante de construction.

Résultats de calcul

Isolation thermique

Le fait de doubler l'isolation thermique (8 cm au lieu de 4 cm PUR) permet de réduire la consommation d'énergie pour le chauffage de 18 à 27 % selon le type d'étable (tab. 3). Une augmentation de l'isolation thermique de 4 cm supplémentaires réduit encore les besoins de chauffage de 7 à 20 %.

Comme on pouvait s'y attendre, l'utilité marginale diminue autant en valeur relative qu'en valeur absolue lorsque l'isolation thermique augmente. Une isolation thermique encore plus épaisse de 16 cm PUR (U = 0,15 W/m² K) ne réduirait le chauffage annuel de la porcherie de mise bas que de 970 kWh par rapport à une isolation de 12 cm PUR. La consommation électrique des ventilateurs augmente légèrement avec l'isolation thermique. Cela vient du fait qu'une plus grande quantité de la chaleur animale est évacuée par la ventilation du fait qu'il y a moins de pertes de transmission, ce qui implique un débit de ventilation plus important. Cette augmentation reste néanmoins négligeable par rapport à l'énergie économisée sur le chauffage.

Utilisation de la géothermie

L'utilisation de géothermie permet d'économiser entre 94 et 35 % de l'énergie de chauffage (tab. 4). La baisse relative du chauffage s'améliore plus l'isolation thermique est

Tab. 3: Consommation annuelle d'énergie pour le chauffage avec trois isolations thermiques différentes (PUR=polyuréthane).

	Consommation d'énergie pour le chauffage [kWh] par an avec différentes isolations thermiques				
	4 cm PUR	8 cm PUR	12 cm PUR	% [8/4 cm]	% [12/4 cm]
Porcherie de mise bas (PMB)	19372	14100	11350	73	59
Porcherie de sevrage (PS)	51114	42136	39031	82	76
Porcherie pré-engraissement (PP)	26934	21048	19016	78	71
Porcherie de finition (PF)	22684	16839	14702	74	65
Halle d'engraissement de volaille (HEV)	193850	151814	137064	78	71

Tab. 4: Consommation annuelle d'énergie pour le chauffage avec différentes isolations thermiques, avec ou sans échangeur de chaleur souterrain (ECS) ou récupération de chaleur (RC).

	Chauffage nécessaire [kWh] par an		
	Sans ECS	Avec ECS	Avec RC
Porcherie de mise bas 4 cm PUR	19372	11618	4748
Porcherie de mise bas 8 cm PUR	14100	6662	1572
Porcherie de mise bas 12 cm PUR	11350	5034	898
Porcherie de sevrage 4 cm PUR	51114	33392	8368
Porcherie de sevrage 8 cm PUR	42136	24969	3863
Porcherie de sevrage 12 cm PUR	39031	22110	2618
Porcherie pré-engraissement 4 cm PUR	26934	11256	2149
Porcherie pré-engraissement 8 cm PUR	21048	6282	653
Porcherie pré-engraissement 12 cm PUR	19016	4795	333
Porcherie de finition 4 cm PUR	22684	4181	581
Porcherie de finition 8 cm PUR	16839	1514	67
Porcherie de finition 12 cm PUR	14702	954	16
Halle d'engraissement de volaille 4 cm PUR	193850		85719
Halle d'engraissement de volaille 8 cm PUR	151814		54426
Halle d'engraissement de volaille 12 cm PUR	137064		48849

importante. Dans la porcherie de finition, il est possible de supprimer totalement le chauffage, sauf lors de l'installation des porcs dans la porcherie en hiver, lorsque l'enveloppe du bâtiment présente une isolation thermique de 8 cm PUR (0,3 W/m² K). L'échangeur de chaleur souterrain augmente la résistance de l'air d'environ 30 Pa lorsque les ventilateurs fonctionnent à plein régime. D'un autre côté, lorsque les températures extérieures sont élevées, les débits de ventilation peuvent diminuer grâce au refroidissement. Ceci ne fait augmenter la consommation d'énergie annuelle des ventilateurs que de manière insignifiante (tab. 5).

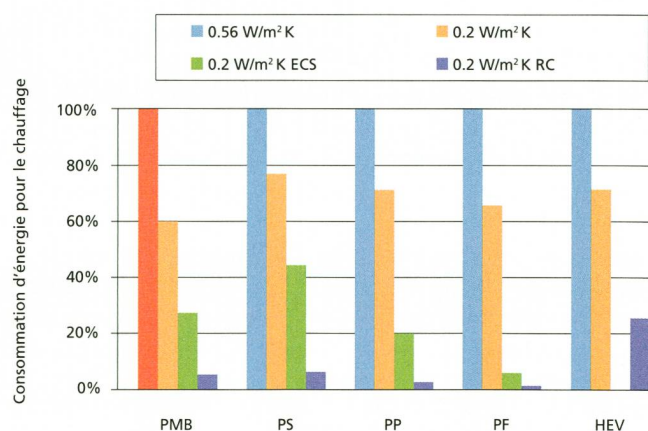
Récupération de chaleur

Selon les simulations, le potentiel d'économie d'énergie de la récupération de chaleur est très élevé (tab. 4). Il n'est pratiquement pas nécessaire de chauffer les porcherie d'engraissement, lorsque le bâtiment est totalement occupé et que l'isolation ne dépasse pas un coefficient de transmission thermique de 0,56 W/m² K (4 cm PUR). Il suffit de chauffer en hiver avant l'installation des porcs dans la porcherie. La chaleur qui se dégage des nids à porcelets suffit à compenser le déficit énergétique dans les porcherie de mise bas. Il devrait suffire de prévoir un petit chauffage pour l'élevage des porcelets.

Ces affirmations ne sont toutefois valables que si l'échangeur thermique a un rendement d'au moins 50 %. Cette condition devrait être difficile à remplir dans les halles d'engraissement de volaille à cause du fort pourcentage de poussière dans l'air évacué et de la plage élevée de fluctuation des débits de ventilation.

Tab. 5: Consommation annuelle d'énergie des ventilateurs avec différentes isolations thermiques, avec ou sans échangeur de chaleur souterrain (ECS) ou récupération de chaleur (RC).

	Consommation d'énergie des ventilateurs [kWh] par an		
		Avec ECS	Avec RC
Porcherie de mise bas 4 cm PUR	1312	1308	1565
Porcherie de mise bas 8 cm PUR	1351	1347	1598
Porcherie de mise bas 12 cm PUR	1372	1374	1597
Porcherie de sevrage 4 cm PUR	2233	1932	3024
Porcherie de sevrage 8 cm PUR	2306	2002	3121
Porcherie de sevrage 12 cm PUR	2334	2022	3118
Porcherie pré-engraissement 4 cm PUR	2705	2973	3661
Porcherie pré-engraissement 8 cm PUR	2781	3075	3747
Porcherie pré-engraissement 12 cm PUR	2794	3120	3751
Porcherie de finition 4 cm PUR	4150	4362	4816
Porcherie de finition 8 cm PUR	4217	4520	4850
Porcherie de finition 12 cm PUR	4239	4567	4878
Halle d'engraissement de volaille 4 cm PUR	8630	–	12565
Halle d'engraissement de volaille 8 cm PUR	8783	–	12945
Halle d'engraissement de volaille 12 cm PUR	8863	–	13017



PMB = Porcherie de mise bas, PS = Porcherie de sevrage
 PP = Porcherie de pré-engraissement, PF = Porcherie de finition
 HEV = Halle d'engraissement de volaille

Fig. 4: Suivant le type d'étable, les différentes mesures d'économie d'énergie ont permis une baisse variable de la consommation d'énergie.

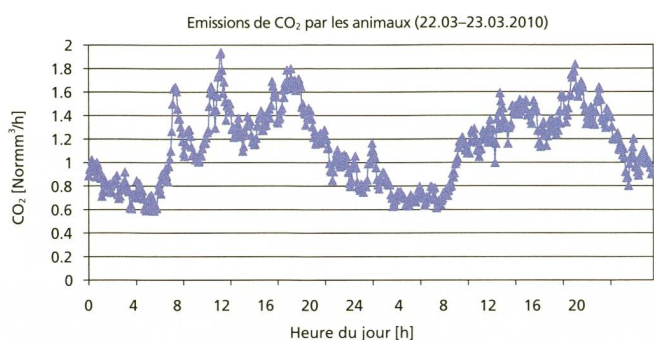


Fig. 5: Le CO₂ émis par les animaux et par conséquent leur besoin en air frais fluctuent énormément tout au long de la journée.

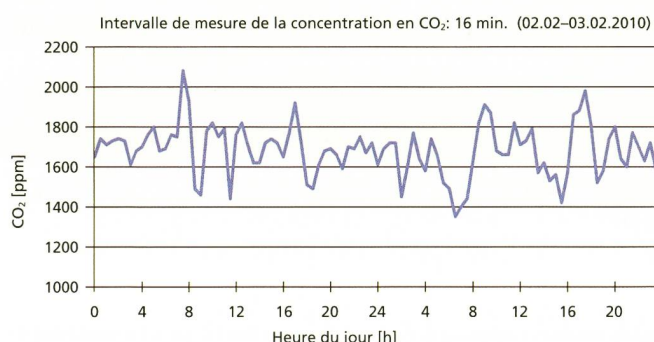


Fig. 6: Si le débit de ventilation n'est réglé que toutes les 16 minutes, la concentration en CO₂ dans l'étable varie considérablement (valeur de consigne 1600 ppm).

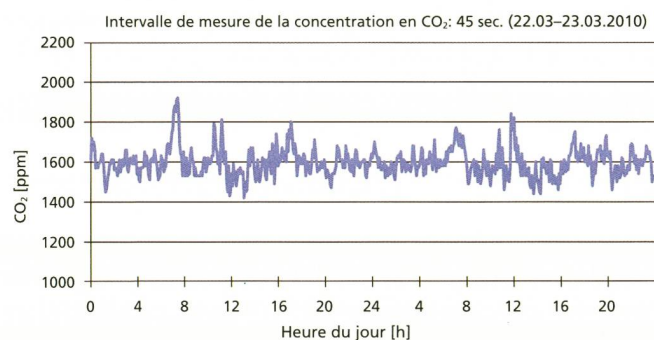


Fig. 7: Une adaptation plus fréquente du débit de ventilation (intervalle de 45 secondes) permet un meilleur réajustement de la concentration en CO₂ à la valeur de consigne (1600 ppm).

Lors du dimensionnement de l'échangeur thermique, il faut non seulement veiller au rendement thermique mais aussi à la résistance de l'air. Cette dernière doit être la plus basse possible, pour que la consommation d'énergie des ventilateurs ne soit pas trop élevée (tab. 5).

La combinaison d'une très bonne isolation thermique et de l'utilisation de la géothermie ou de la récupération de chaleur permet de diviser les besoins de chauffage par deux voire plus dans toutes les variantes (fig. 4). Comme dans ces installations, la résistance augmente pour les ventilateurs, il est important de n'utiliser que des appareils économes en énergie. Pendant l'essai (du 15.09.2009 au 31.05.2010), les deux ventilateurs commandés par un régu-

lateur à hachage de phase (Ø 40 cm) ont consommé 1075 kWh, les deux ventilateurs ETAvent à contrôleur EC intégré (Ø 40 cm) seulement 366 kWh dans des conditions similaires.

Ventilation commandée par la concentration en CO₂

Dans les systèmes conventionnels, le débit de ventilation est commandé par la température de la porcherie. Le régime minimal des ventilateurs n'est pas variable, mais a une valeur fixe. Par conséquent, tant que la température définie n'est pas dépassée, le débit d'air reste constant, indépendamment du besoin réel d'air frais qu'ont les animaux. Or, celui-ci ne dépend pas uniquement de la densité d'occupation, mais aussi de l'activité des animaux. Pendant les phases de repos, (notamment la nuit), le débit de ventilation est trop élevé tandis qu'il est trop bas lorsque les animaux sont actifs. En hiver, cette situation se traduit par d'importantes fluctuations de la qualité de l'air et par une augmentation de la consommation d'énergie pour le chauffage, sachant que pendant la nuit, la température extérieure est généralement la plus basse, et les déperditions de chaleur sensible des animaux les plus faibles.

Installation expérimentale

Dans la porcherie expérimentale de la station de recherche ART, dans une des deux aires de mise bas, on a étudié l'influence d'un système de ventilation commandé par le CO₂ sur la courbe quotidienne de concentration en CO₂ et sur la consommation d'énergie pour le chauffage. L'aire de mise bas comprend huit boxes (type FAT2) avec des nids à porcelets isolés et commandés par la température. Elle est ventilée à pression équilibrée (2 ventilateurs ETAvent FC040-4IQ.4C.3). La commande de ventilation est basée sur la température et sur la concentration en CO₂ (système Veng, fig. 1). Outre la température de la porcherie et la concentration en CO₂, l'essai a également permis d'enregistrer les températures de l'air extérieur et de l'air entrant, la vitesse de l'air dans le canal d'arrivée, l'humidité relative de l'air entrant et de l'air à l'intérieur de la porcherie, la concentration en NH₃ dans la porcherie et enfin la consommation d'énergie des ventilateurs, du chauffage des nids à porcelets et du chauffage de la porcherie. La concentration en CO₂ et en ammoniac a été mesurée à l'aide d'un multicapteur avec préchauffage (VE 18). Les prélèvements d'air ont été obtenus par aspiration à travers un filtre, alternativement en provenance des deux aires et de l'extérieur. Le rinçage à l'air extérieur après chaque analyse de l'air de la porcherie permettait d'éviter que le capteur NH₃ ne soit saturé. La précision des mesures de CO₂ et de NH₃ a été contrôlée à intervalles réguliers à l'aide de tubes Draeger. Le débit de ventilation est déduit à partir de la vitesse de l'air dans le canal d'arrivée. Tous les éléments sont reliés à l'ordinateur de gestion du climat (VE 108) et au PC via un système BUS.

Résultats de mesure

Avec une ventilation commandée par la concentration en CO₂, le débit de ventilation est continuellement adapté

aux besoins momentanés des animaux. La concentration en CO₂ mesurée en temps réel sert en effet à réguler le régime des ventilateurs. Si les émissions de CO₂ par les animaux diminuent pendant les phases de repos, le débit de ventilation est automatiquement réduit, car la valeur limite définie pour la concentration de CO₂ n'est pas atteinte. Selon la norme suisse sur le climat d'étable, la valeur limite est de 3000 ppm (0,3 vol.-%). Les expériences montrent toutefois que dans la plupart des cas, pour une concentration en CO₂ de 3000 ppm, la concentration d'ammoniac dépasse la valeur limite (20 ppm). Il est donc recommandé de choisir une valeur limite plus basse (2000 ppm).

Plus la commande de ventilation est efficace, plus les fluctuations de la concentration de CO₂ sont réduites par rapport à la valeur de consigne. Dans la pratique, il est difficile d'éviter totalement les fluctuations de la concentration de CO₂, car les animaux peuvent changer considérablement leur production de CO₂ (fig. 5) en très peu de temps. Or, la correction du régime des ventilateurs est toujours décalée dans le temps, car elle se base sur la concentration en CO₂ de la période antérieure. D'autre part, une augmentation des émissions de CO₂ par les animaux ne se répercute que lentement sur l'augmentation de la concentration de CO₂ dans la porcherie à cause de l'effet tampon du volume du bâtiment [7]. Pour toutes ces raisons, il arrive souvent que le débit de ventilation ne change qu'au moment où les émissions de CO₂ commencent déjà à diminuer ou inversement. Par conséquent, il n'est possible de lutter efficacement contre les fluctuations de la concentration en CO₂, que lorsque les mesures de CO₂ et l'adaptation du régime des ventilateurs se font à très courts intervalles. Le réajustement à la valeur de consigne est nettement meilleur avec une fréquence de mesure de 45 secondes (fig. 7) qu'avec une fréquence de 16 minutes (fig. 6).

Pour que les fluctuations de CO₂ restent très basses, il ne suffit pas toutefois d'un court intervalle de mesure. Il faut aussi que le régime des ventilateurs et par conséquent, le débit de ventilation puissent être adaptés rapidement en fonction des écarts enregistrés dans la concentration de CO₂. La valeur de réglage idéale doit être déterminée individuellement sur la base d'essais dans chaque porcherie. La question de savoir combien d'énergie la conversion à un système de ventilation commandé par la concentration en CO₂ permet d'économiser dépend avant tout du système de ventilation utilisé jusque-là. Plus les exigences en matière de qualité de l'air étaient élevées et par conséquent,

plus les débits de ventilation minimaux étaient élevés et moins le régime minimal des ventilateurs devait être corrigé manuellement par l'éleveur, plus les économies d'énergie sont importantes après l'installation du système commandé par CO₂. Pour exploiter totalement le potentiel d'économie d'énergie, la plage de régulation du ventilateur doit également être suffisamment grande. Dans les porcheries où l'effectif animal varie beaucoup, une plage de régulation de 1:5 ne suffit pas. Dans la porcherie de mise bas, le 24 mars, on a relevé une production maximale de CO₂ de 1,62 Normm³/h pour un effectif de 8 truies et 78 porcelets allaités d'un poids moyen de 8,3 kg pendant la phase d'activité. Avant la mise bas, le 13 février, la production minimale de CO₂ s'élevait à 0,12 Normm³/h pendant la phase de repos. La commande de ventilation par la concentration en CO₂ a pour conséquence de réduire considérablement le débit de ventilation pendant les phases de repos des animaux. La crainte que cela puisse faire augmenter la concentration en ammoniac dans l'air de la porcherie, s'est avérée sans fondement pendant les essais. Dans la porcherie d'essai d'ART, dans la période comprise entre le 15.09.2009 et le 31.05.2010, l'économie d'énergie réalisée grâce au système de ventilation commandé par la concentration en CO₂ représentait environ 35 % par rapport au système conventionnel.

Rentabilité

La combinaison de différentes mesures permet de réduire considérablement la consommation d'énergie (tab. 6). Dans les bâtiments neufs, toutes les mesures sont possibles. Dans les bâtiments existants, l'isolation thermique ne peut souvent être améliorée qu'au prix de lourds investissements. En cas d'installation a posteriori d'un système de récupération de chaleur, il faut en général changer tout le concept de ventilation du fait de la nécessité de centraliser l'arrivée et la sortie de l'air. En revanche, le passage à un système de ventilation commandé par la concentration en CO₂ est relativement simple à réaliser.

Pour que les mesures d'économie d'énergie soient rentables, elles doivent pouvoir être amorties pendant la durée d'exploitation. Les coûts supplémentaires des panneaux sandwich sont d'environ Fr. 11.– par m² pour une isolation thermique de 8 cm de PUR par rapport à 4 cm. Pour 12 cm, les coûts supplémentaires sont de Fr. 20.– par m² par rapport à 4 cm. Avec un prix du kilowatt heure de Fr. 0.10, il

Tab. 6: Consommation d'énergie calculée dans les porcheries après amélioration de l'isolation thermique ($U = 0,2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), après passage de la ventilation conventionnelle ($A_{\text{conventionnel}}$) à la ventilation commandée par la concentration en CO₂ (A_{CO_2}), avec utilisation de la géothermie (ECS) ou avec récupération de chaleur (RC).

Type d'étable	U=0,6 W/m ² K $A_{\text{conventionnel}}$	U=0,2 W/m ² K $A_{\text{conventionnel}}$	U=0,2 W/m ² K A_{CO_2}	U=0,2 W/m ² K $A_{\text{conventionnel}}$ ECS	U=0,2 W/m ² K $A_{\text{conventionnel}}$ RC	U=0,2 W/m ² K A_{CO_2} ECS	U=0,2 W/m ² K A_{CO_2} RC
Porcherie de mise bas	100%	64%	45%	26%	5%	18%	3%
Porcherie de sevrage	100%	76%	53%	43%	5%	30%	4%
Porcherie de pré-engraissement	100%	71%	49%	18%	1%	12%	1%
Porcherie de finition	100%	65%	45%	4%	0%	3%	0%

Tab. 7: Période d'amortissement pour une isolation thermique supplémentaire avec panneaux sandwich dans différents types d'étable (prix de l'énergie: Fr. 0.10 par kWh, correspond à un prix du mazout de Fr. 1.00 par litre).

	Parois+plafond 8 cm au lieu de 4 cm PUR			Parois+plafond 12 cm au lieu de 4 cm PUR		
	Investissements supplémentaires	Economies d'énergie	Période d'amortissement	Investissements supplémentaires	Economies d'énergie	Période d'amortissement
	Fr.	Fr./an	Années	Fr.	Fr./an	Années
Porcherie de mise bas	3542	527	6.7	6440	802	8.0
Porcherie de sevrage	4928	898	5.5	8960	1208	7.4
Porcherie de pré-engraissement	4279	589	7.3	7780	792	9.8
Porcherie de finition	5621	584	9.6	10220	798	12.8
Halle d'engraissement de volaille	17622	4204	4.2	32040	5679	5.6

est possible d'amortir le doublage de l'isolation thermique (8 cm au lieu de 4 cm PUR) en l'espace de 4,2 à 9,6 ans en fonction du type d'étable (tab. 7). Une isolation thermique de 12 cm au lieu de 4 cm nécessite une période d'amortissement de 5,6 à 12,8 ans. C'est dans les halles d'engraissement de volaille et dans les porcheries de sevrage que l'amélioration de l'isolation thermique est la plus rentable, car les températures doivent être élevées dans ces bâtiments, ainsi que dans la porcherie de mise bas où, du fait d'une faible densité d'occupation, les déperditions de chaleur par l'enveloppe du bâtiment sont relativement élevées.

Comme les investissements nécessaires pour les systèmes de ventilation commandés par la concentration en CO₂, l'utilisation de la chaleur souterraine et la récupération de chaleur dépendent des fabricants et des porcheries/halles, il est difficile d'estimer la durée d'amortissement de ces mesures. C'est pourquoi on a calculé les investissements maximaux (limite d'investissement), économiquement raisonnables sur la base des économies d'énergie de chauffage attendues (tab. 4) et dans des conditions définies (taux d'intérêt et tarif des réparations, durée d'amortissement et prix de l'énergie) (tab. 8).

La rentabilité de la commande par concentration en CO₂ dépend avant tout du nombre de capteurs, nécessaires par étable. En vue d'obtenir un intervalle de mesure court, le même capteur ne doit mesurer que quelques secteurs. L'intervalle compris entre deux mesures ne devrait pas dépasser cinq minutes. Dans une halle d'engraissement de volaille, il n'est pas possible actuellement de calculer la limite d'investissement, car il règne encore une grande incertitude quant aux possibles économies d'énergie dans la pratique. De nombreux éleveurs de volaille luttent contre des problèmes d'humidité dans la litière et sont donc contraints de ventiler davantage que ce que la concentration en CO₂ dans la halle nécessiterait. Comme le débit de ventilation total des 12000 animaux peut être réglé avec un seul capteur et que les besoins de chauffage sont très importants, il suffit que l'économie d'énergie atteigne quelques pourcents pour amortir le système de ventilation commandé par la concentration en CO₂. On constate que mise à part la porcherie de sevrage, la limite d'investissement de l'échangeur de chaleur souterrain (ECS) est supérieure à

Tab. 8: Limite d'investissement par unité pour un système de ventilation commandé par la concentration en CO₂, pour l'échangeur de chaleur souterrain (ECS) et la récupération de chaleur (RC, rendement 50%) avec une isolation thermique de 0,2 W/m² K et des économies d'énergie selon le tab. 4.

	Ventilation commandée par le CO ₂	ECS	RC
Taux d'intérêt	3 %	3 %	3 %
Réparations	3 %	1 %	3 %
Amortissement	10 ans	25 ans	15 ans
Prix de l'énergie	0.1 Fr./kWh	0.1 Fr./kWh	0.1 Fr./kWh

Unité	Limite d'investissement Fr.		
	Fr./unité	Fr./unité	Fr./unité
Box de mise bas	249	582	490
Place de sevrage	22	52	57
Place de pré-engraissement	28	105	70
Place de finition	23	101	55
Place d'engraissement de volaille	?		5.5

celle de la récupération de chaleur. Les investissements économiquement rentables les plus élevés ne suffisent pas, et de loin, à financer un échangeur de chaleur souterrain à tuyaux ondulés. Une installation de ce type ne peut donc être rentable que si, outre les économies de chauffage, elle permet également d'obtenir de meilleurs rendements avec les animaux en été grâce à la climatisation. Les données calculées pour la récupération de chaleur doivent être consultées avec prudence. On dispose encore de peu d'expériences avec les nouveaux types d'échangeur de chaleur, qui disposent à la fois d'un nettoyage automatique, mais aussi d'un réglage Bypass. C'est pourquoi leur rendement pratique dans les conditions pratiques est encore incertain.