

Récupération de chaleur dans les bâtiments d'élevage

Récupération de chaleur dans les bâtiments d'élevage

La récupération de chaleur dans les bâtiments d'élevage: une solution intéressante pour l'agriculture

Il existe en Suisse un très grand nombre d'écuries et d'élevages de bovins, de porcs et de volaille qui sont chauffés à l'aide d'énergies non renouvelables. Pour remplacer ou compléter cette énergie, de plus en plus nombreuses sont les exploitations agricoles qui s'équipent d'installations récupérant tout ou partie de la chaleur générée par le bétail, que ce soient des pompes à chaleur ou de simples échangeurs. Ces installations ne contribuent pas seulement aux économies d'énergie mais permettent également souvent d'améliorer la qualité de l'air dans les étables ou autres locaux d'élevage.

La brochure « Récupération de chaleur dans les bâtiments d'élevage », élaborée dans le cadre du programme PACER (Programme d'action énergies renouvelables) de l'Office fédéral des questions conjoncturelles traite de ce problème.

Les bases théoriques et pratiques pour le dimensionnement, la planification et la construction de ces installations y sont présentées.

La brochure est complétée par un logiciel de dimensionnement décrit en annexe et qui est un outil de calcul utile à tous ceux qui désirent calculer le bilan thermique d'un bâtiment d'élevage et de dimensionner une installation de récupération, que ce soit une pompe à chaleur ou un échangeur.

Cet ouvrage assorti du logiciel est destiné aux personnes concernées par la planification de constructions agricoles, soit les architectes, ingénieurs, conseillers et enseignants ainsi qu'au personnel des services d'améliorations foncières.

ISBN 3-905232-41-3

Edition originale: ISBN 3-905232-01-4

1996, 75 pages

N° de commande 724.221.2 f

Inclus logiciel de dimensionnement (IBM-PC)

N° de commande 724.221.24 f (Excel 4) ou

N° de commande 724.221.25 f (Excel 5)

Récupération de chaleur dans les bâtiments d'élevage

Conception, rédaction et réalisation de l'édition originale allemande

- Josef Brühlmeier, ZTL, 6048 Horw
- Kurt Egger, INFOENERGIE, 8356 Ettenhausen
- Wilfried Göbel, FAT, 8356 Tänikon †
- Hanspeter Pfenninger, Konvecta AG, 9015 St-Gallen-Winkeln

Collaborateur

- Josef Penasa, Alfa Laval, 6210 Sursee

Logiciel de dimensionnement (IBM-PC)

- Ludo Van Caenegem, FAT, 8356 Tänikon (concept)
- Daniel Stutz, FAT, 8356 Tänikon (programmation)
- Marco Nani, Enoec Nigg AG, 9470 Buchs (programmation)

Rédaction

- Kurt Egger, INFOENERGIE, 8356 Tänikon

Adaptation de l'édition française

- J.-M. Chapallaz, ingénieur EPFL, 1450 Ste-Croix
- P.-A. Mouchet, agro-ingénieur ETS, 1040 Echallens

Correcteur

- Jean-Claude Scheder, 1038 Bercher

Mise en pages, photocomposition et flashage

- DAC, 1006 Lausanne
- CITY COMP SA, 1110 Morges

Coordination générale

- Jean Graf, ingénieur ETS, EPFL-DA-ITB-LESO 1015 Lausanne

ISBN 3-905232-41-3

Edition originale: ISBN 3-905232-01-4

Copyright © 1996 Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, avril 1996.

Reproduction d'extraits autorisée avec indication de la source.

Diffusion: Coordination romande du programme d'action «Construction et Energie» EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne (N° de commande 724.221.2 f).

Form. 724.221.2 f 4.96 500

Associations de soutien

- ASETA Association suisse pour l'équipement technique de l'agriculture
- SIA Société suisse des ingénieurs et des architectes
- SRVA Service romand de vulgarisation agricole
- UTS Union technique suisse

Avant-propos

D'une durée totale de 6 ans (1990-1995), le Programme d'action « Construction et Energie » se compose des trois programmes d'impulsions suivants :

PI-BAT – Entretien et rénovation des constructions
RAVEL – Utilisation rationnelle de l'électricité
PACER – Energies renouvelables

Ces trois programmes d'impulsions sont réalisés en étroite collaboration avec l'économie privée, les écoles et la Confédération. Ils doivent favoriser une croissance économique qualitative et, par là, conduire à une plus faible utilisation des matières premières et de l'énergie, avec pour corollaire un plus large recours au savoir-faire et à la matière grise.

Jusqu'ici, si l'on fait abstraction du potentiel hydro-électrique, la contribution des énergies renouvelables à notre bilan énergétique est négligeable. Aussi le programme PACER a-t-il été mis sur pied afin de remédier à cette situation. Dans ce but le programme cherche :

- à favoriser les applications dont le rapport prix / performance est le plus intéressant ;
- à apporter les connaissances nécessaires aux ingénieurs, aux architectes et aux installateurs ;
- à proposer une approche économique nouvelle qui prenne en compte les coûts externes ;
- à informer les autorités, ainsi que les maîtres de l'ouvrage.

Cours, manifestations, publications, vidéos, etc.

Le programme PACER se consacre, en priorité, à la formation continue et à l'information. Le transfert de connaissances est basé sur les besoins de la pratique. Il s'appuie essentiellement sur des publications, des cours et d'autres manifestations. Les ingénieurs, architectes, installateurs, ainsi que les représentants de certaines branches spécialisées, en constituent le public cible. La diffusion plus large d'informations plus générales est également un élément important du programme. Elle vise les maîtres de l'ouvrage, les architectes, les ingénieurs et les autorités.

Le bulletin « Construction et Energie », qui paraît trois fois par an, fournit tous les détails sur ces activités. Ce bulletin peut être obtenu gratuitement sur simple demande. Chaque participant à un cours ou à une autre manifestation du programme reçoit une

publication spécialement élaborée. Toutes ces publications peuvent également être obtenues en s'adressant directement à la Coordination romande du programme d'action « Construction et Energie » EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne.

Compétences

Afin de maîtriser cet ambitieux programme de formation, il a été fait appel à des spécialistes des divers domaines concernés ; ceux-ci appartiennent au secteur privé, aux écoles ou aux associations professionnelles. Ces spécialistes sont épaulés par une commission qui comprend des représentants des associations, des écoles et des branches professionnelles intéressées.

Ce sont également les associations professionnelles qui prennent en charge l'organisation des cours et des autres activités. Pour la préparation de ces activités une direction de programme a été mise en place ; elle se compose du Dr Jean-Bernard Gay, du Dr Charles Filleux, de M. Jean Graf, du Dr Arthur Wellinger ainsi que de Mme Irène Wuillemin et de M. Eric Mosimann de l'OFQC. La préparation des différentes activités se fait au travers de groupes de travail, responsables du contenu des matières abordées, du maintien des délais et des budgets.

Documentation

La brochure « Récupération de chaleur dans les bâtiments d'élevage » traite le problème de la récupération de chaleur produite par les animaux pour chauffer tout ou partiellement des bâtiments ou habitations.

Les bases théoriques et pratiques pour le dimensionnement, la planification et la construction de telles installations y sont présentées.

La brochure est complétée par un logiciel de dimensionnement décrit en annexe et qui est un outil de calcul utile à tous ceux qui désirent dimensionner des systèmes de récupération de chaleur.

Cet ouvrage assorti du logiciel est destiné aux personnes concernées par la planification de constructions agricoles, soit les architectes, ingénieurs, conseillers et enseignants ainsi qu'au personnel des services d'améliorations foncières.

Ce document a fait l'objet d'une procédure de consultation, il a également été soumis à l'appréciation des participants au premier cours pilote. Ceci a permis aux auteurs d'effectuer les modifications nécessaires, ceux-ci étant toutefois libres de décider des corrections qu'ils souhaitaient apporter à leur texte. Dans ce sens ils assurent l'entière responsabilité de leurs textes. Des améliorations sont encore possibles et des suggestions éventuelles peuvent être adressées soit au directeur du cours, soit directement auprès de l'Office fédéral des questions conjoncturelles.

Enfin, nous ne voudrions pas conclure cet avant-propos sans remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette publication.

Office fédéral des questions conjonctuelles
Service de la technologie
Dr B. Hotz-Hart
Vice-directeur

Table des matières

1.	Climat d'étable	7
1.1	Introduction générale	9
1.2	Bilan thermique	10
1.3	Ventilation d'un bâtiment d'élevage	11
1.4	Logiciel pour ordinateur personnel	12

2.	Pompes à chaleur	13
2.1	Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur	15
2.2	Systèmes	18
2.3	Coefficient de performance et flux d'énergie	23
2.4	Matériaux	26
2.5	Utilisation de la chaleur	29
2.6	Frais d'investissement et de fonctionnement	32
2.7	Planification	33
2.8	Exemples d'installations	36

3.	Echangeurs de chaleur	39
3.1	Introduction	41
3.2	Notions générales	41
3.3	Corrosion et encadrement	42
3.4	Systèmes d'échangeurs de chaleur	43
3.5	Dimensionnement d'installations à échangeurs de chaleur	46
3.6	Rentabilité	49
3.7	Exemples d'installations	50

	Annexe	55
--	---------------	-----------

	Bibliographie	67
--	----------------------	-----------

	Publications du programme d'action PACER – Energies renouvelables	69
--	--	-----------

1. Climat d'été

1.1	Introduction générale	9
1.2	Bilan thermique	10
1.3	Ventilation d'un bâtiment d'élevage	11
1.4	Logiciel pour ordinateur personnel	12

1. Climat d'étable

1.1 Introduction générale

La notion de climat d'étable décrit l'état de l'air à l'intérieur d'un bâtiment d'élevage. Cet état est défini par les grandeurs mesurables suivantes: la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse de déplacement de l'air au voisinage des animaux et la teneur en gaz nocifs. L'état de l'atmosphère permettra que le métabolisme des animaux soit assuré avec une consommation minimale en énergie. Pour obtenir ce résultat, il est nécessaire que les paramètres climatiques du bâtiment d'élevage cités ci-dessus soient maintenus dans des limites précises quelles que soient les conditions météorologiques, en hiver comme durant les grandes chaleurs estivales. Ces paramètres varient selon le type et la taille de l'animal concerné et sont indiqués dans les normes du climat d'étable (voir tableau ci-contre).

La régulation du climat d'étable est assurée par divers systèmes d'aération tels que fenêtres (ventilation naturelle), cheminées (ventilation gravitaire) ou ventilateurs (ventilation forcée). A la différence des habitations et des locaux industriels, les bâtiments d'élevage produisent de grandes quantités de chaleur, de gaz carbonique et d'humidité. Le système de ventilation sera dimensionné pour assurer leur évacuation. Parallèlement, la température ne devrait pas être inférieure aux valeurs indiquées en hiver ni trop élevée en été. Le bilan thermique, calculé à partir du taux de renouvellement de l'air nécessaire à l'évacuation de l'humidité et du gaz carbonique, montrera si une chaleur suffisante est conservée dans le bâtiment pour y assurer le maintien d'une température acceptable.

S'il y a excédent de chaleur, les débits de ventilation peuvent être augmentés; dans le cas contraire, il est nécessaire d'installer un chauffage d'appoint ou un échangeur de chaleur.

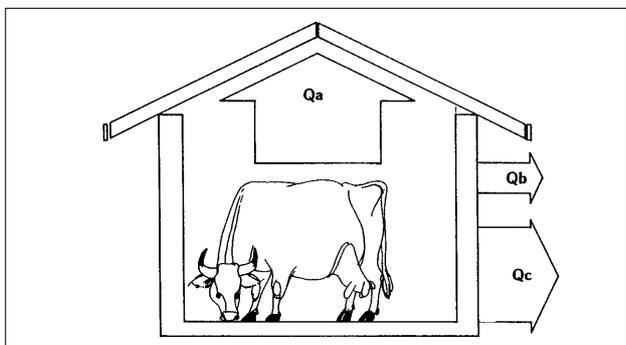
Il est également possible d'influencer le bilan thermique par adaptation de l'enveloppe du bâtiment (meilleure isolation, réduction de la surface des fenêtres, réduction de la surface de l'élevage).

Une exception est constituée par les étables dites «froides», pour lesquelles un climat confortable pour la majorité des animaux d'élevage est obtenu grâce à des ouvertures généreuses assurant un taux de renouvellement élevé de l'air (par exemple

Valeurs normales et valeurs limites du climat d'étable

(Norme suisse du climat d'étable, 1983)

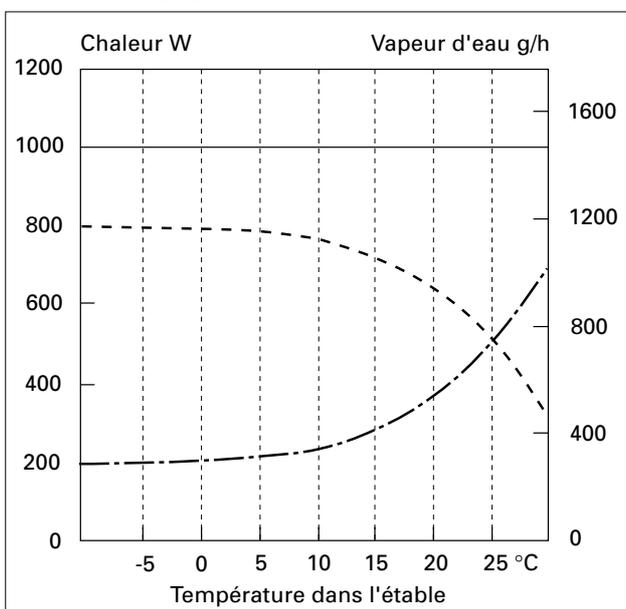
Humidité relative	70 à 80%
Température de l'étable (selon type d'animal)	0 à 30°C
Teneur en gaz carbonique	3500 ppm
Teneur en ammoniac	10 ppm
Teneur en hydrogène sulfuré	5 ppm
Vitesse de l'air	Hiver: 10 cm/s Été: 50 cm/s



Bilan thermique = $Q_a - Q_b - Q_c$
 Q_a : Chaleur dégagée par les animaux
 Q_b : Pertes de chaleur par transmission
 Q_c : Pertes de chaleur par ventilation

Remarque: La nouvelle méthode de calcul FAT, présentée en annexe avec son logiciel, prend en compte le dégagement de chaleur par la litière ainsi que l'échange de chaleur par le sol. L'énergie nécessaire pour évaporer l'eau à la surface du sol et de la litière est également considérée.

Chaleur dégagée par une vache



— Chaleur totale en watt
 - - - - - Chaleur sensible (chaleur contenue dans l'air) en watt
 - · - · - Chaleur latente (chaleur contenue dans l'humidité) en watt; correspond à la quantité d'humidité (vapeur d'eau) en g/h

Une vache de 500 kg dégage par heure environ 1000 watt de chaleur et environ 160 litres de gaz carbonique indépendamment de la température.

étables à ouverture frontale). Dans ce type d'étable, la température est proche de la température extérieure, ce qui rend les conditions de travail du personnel plus difficiles et nécessite des équipements techniques adaptés.

1.2 Bilan thermique

Le bilan thermique d'un bâtiment d'élevage non chauffé est déterminé par la chaleur dégagée par les animaux, les pertes de chaleur par transmission et par ventilation.

Bilan thermique = chaleur dégagée par les animaux moins pertes par transmission moins pertes par ventilation.

Chaleur dégagée par les animaux: chaque bête dégage une quantité déterminée de chaleur qui se subdivise en chaleur sensible et chaleur latente (humidité /vapeur d'eau). Alors que la chaleur totale reste pratiquement constante, les chaleurs sensible et latente varient fortement avec la température. La répartition de la chaleur totale en chaleur sensible (chaleur contenue dans l'air) et chaleur latente (chaleur utilisée pour l'évaporation de l'humidité en vapeur d'eau) est un facteur important dans le calcul du bilan thermique et de la formation de vapeur d'eau.

Les pertes par transmission à travers l'enveloppe du bâtiment d'élevage sont fonction du type de construction et de la différence entre températures intérieure et extérieure. La connaissance de cette différence ainsi que celle du coefficient de transmission k des parois du bâtiment permet l'estimation de ces pertes.

Les pertes par ventilation sont calculées à partir des quantités d'air nécessaires pour le renouvellement de l'atmosphère de l'étable et l'évacuation de l'humidité (selon échelle « humidité » du diagramme) ainsi que du gaz carbonique. Le système de ventilation sera conçu pour un fonctionnement hivernal en fonction des deux quantités à évacuer. La chaleur nécessaire pour chauffer l'air de renouvellement aspiré dans le local d'élevage de la température extérieure à la température ambiante correspond aux pertes par ventilation.

1.3 Ventilation d'un bâtiment d'élevage

Les débits d'air de ventilation varient fortement selon la saison de l'année.

En hiver, la chaleur dégagée par les petits animaux n'est pas suffisante pour amener l'atmosphère de l'étable à la température voulue. La ventilation sera dimensionnée de façon à ce que la teneur en CO₂ ne dépasse pas 0,35% (pointes horaires jusqu'à 0,5%) et l'humidité relative 70 à 80% selon le type d'animal. Le déficit de chaleur pourra être compensé dans nombre de cas par l'installation d'échangeurs de chaleur (voir chapitre 3).

Lorsque des pompes à chaleur sont installées pour fonctionner en recyclage (voir chapitre 2.2.) la vapeur d'eau se condense dans l'évaporateur, ce qui permet de maintenir dans l'étable un taux d'humidité inférieur à 80%. Dans ce cas, la ventilation sera toujours réglée en fonction de la teneur en CO₂. Les pompes à chaleur fonctionnant en recyclage peuvent être installées dans des étables à basse température (par exemple étables à bovins à 10°C).

Lorsqu'il n'y plus de déficit thermique dans un local d'élevage, spécialement durant l'entre saison, le débit d'air de ventilation est augmenté pour éviter que la température ambiante n'augmente. La qualité de l'air y est améliorée par meilleure dilution des gaz nocifs.

En été, les débits d'air doivent être augmentés considérablement, jusqu'à 10 fois les débits hivernaux, pour maintenir la température dans les locaux à un niveau acceptable en évacuant la chaleur en excès. Le calcul se base sur l'hypothèse que la température ambiante ne dépasse pas de plus de 2°C (porcs, volaille) respectivement de 3°C (vaches, bœufs) la température extérieure.

Valeur limite gaz carbonique CO₂

L'expérience a montré que la valeur limite pour le CO₂ de 3500 ppm peut être dépassée sans dommage pour la santé des animaux. La valeur maximale tolérée sur les places de travail (MAK) pour les hommes, et qui est de 5000 ppm est une indication qui va dans le même sens. Lors de l'utilisation de pompes à chaleur travaillant en recyclage, l'acceptation d'une valeur plus élevée pour la teneur en CO₂ permet une puissance de chauffe supérieure. Pour le dimensionnement de telles installations, une valeur limite pour le CO₂ de 5000 ppm est proposée.

Valeurs indicatives pour la chaleur dégagée et le taux de renouvellement d'air pour différents types d'animaux

	Poids (kg)	Chaleur dégagée (W)	Débit de renouvellement d'air	
			Hiver (m ³ /h)	Été (m ³ /h)
Vache	500	1000	50	500
Bœuf	200	400	20	200
Bœuf	400	800	40	400
Veau	100	200	10	100
Truie	200	400	20	200
Porc	100	200	10	100
Porc d'engrais- sement				
Porcelet	20	80	4	40

Chaleur dégagée par les animaux

Les valeurs de chaleur dégagée par les animaux figurant dans les normes suisses concernant les climats d'étable ne correspondent plus à la réalité dans de nombreux cas. Ceci s'explique par le fait que, par exemple, les chiffres sont basés, pour les vaches laitières, sur des animaux ne produisant que 8 litres de lait par jour. La nouvelle norme DIN 18910 est elle basée sur une production de 15 litres par jour. Le logiciel et les calculs présentés dans cette documentation se basent sur le procédé de calcul CIGR de 1984, qui a servi de base aussi bien aux normes allemandes qu'autrichiennes.

Le système de ventilation doit donc être prévu pour répondre aux exigences des conditions hivernales aussi bien qu'estivales. Ce qui signifie que la régulation doit pouvoir régler les débits d'air entre 10 et 100%. Les ventilateurs d'une ventilation forcée seront choisis pour qu'ils puissent fournir les grands débits nécessaires en été. Les débits hivernaux seront obtenus par abaissement de la vitesse et/ou réglés au moyen de clapets. Les systèmes de ventilation gravitaires ou à convection naturelle seront dimensionnés pour les températures de l'hiver et de l'entre saison. Des ouvertures supplémentaires (portes, fenêtres) seront prévues pour augmenter l'aération en été.

1.4 Logiciel pour ordinateur personnel

Exemples de calcul de climats d'étable

Type d'étable	Etable chaude	Etable froide
Altitude (m)	1350	480
Surface (m ²)	128	45
Cheptel	15 vaches laitières 20 veaux à l'engrais	9 bœufs à l'engrais
Température de l'étable (°C)	10	- 5
Humidité relative (%)	80	90
Température extérieure (°C)	-20	- 11
Humidité relative (%)	100	80
Chaleur totale (W)	21125	7470
Emission d'humidité (g / h)	7846	2418
Emission de gaz carbonique (l / h)	3443	1218
Débit d'air: hiver (m ³ / h)	1158	1738
été (m ³ / h)	12710	4018
Chaleur sensible (W)	16275	5975
Pertes par transmission (W)	4764	2268
Pertes par ventilation (W)	10229	3632
Bilan thermique (W)	1282	75

(Les valeurs à adopter pour l'humidité relative sont indiquées dans l'annexe)

Un logiciel informatique pour ordinateur personnel est à disposition. Les données qui lui seront fournies concernent le nombre et le type d'animaux ainsi que les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment. Le programme calcule les débits d'air de ventilation nécessaires pour obtenir un climat d'étable optimum ainsi que le bilan thermique du bâtiment d'élevage.

Le programme calcule les paramètres pour diverses températures extérieures et taux d'humidité. Il permet de varier les conditions climatiques de l'étable (température et humidité) et la chaleur dégagée par les animaux. Données et résultats peuvent être imprimés et/ou mis en mémoire pour une utilisation ultérieure.

Enfin, les effets sur le bilan thermique de l'installation d'échangeurs de chaleur ainsi que la puissance de chauffe d'une pompe à chaleur peuvent être calculés.

Une description détaillée du programme est donnée dans l'annexe.

2. Pompes à chaleur

2.1	Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur	15
2.1.1.	Qu'est-ce qu'une pompe à chaleur?	15
2.1.2	Définitions	17
2.1.3	Dénomination des pompes à chaleur	18

2.2	Systèmes	18
2.2.1	Pompes à chaleur air/eau et eau/eau	18
2.2.2	Récupération de chaleur par recyclage d'air	22
2.2.3	Récupération de la chaleur de l'air extrait	22

2.3	Coefficient de performance et flux d'énergie	23
2.3.1	Coefficient de performance annuel β	23
2.3.2	Flux d'énergie	25

2.4	Matériaux	26
2.4.1	Pompe à chaleur	26
2.4.2	Boîtiers et capots	26
2.4.3	Ventilateur	26
2.4.4	Evaporateurs	26
2.4.5	Commande et régulation électriques	27
2.4.6	Echangeur de chaleur d'étable (collecteur)	27
2.4.7	Canaux de ventilation	28
2.4.8	Nettoyage	28

2.5	Utilisation de la chaleur	29
2.5.1	Introduction	29
2.5.2	Besoins en chaleur d'une habitation	29
2.5.3	Distribution de la chaleur	30
2.5.4	Accumulateurs de chaleur	30
2.5.5	Régulation	31
2.5.6	Eau chaude sanitaire	31
2.5.7	Besoins annuels en énergie	32

2.6	Frais d'investissement et de fonctionnement	32
2.6.1	Frais d'investissement	32
2.6.2	Frais d'exploitation	32

2.7	Planification	33
------------	----------------------	----

2.8	Exemples d'installations	36
2.8.1	Etables pour vaches ou bovins d'élevage	36
2.8.2	Porcherie d'engraissement	37

2. Pompes à chaleur

2.1 Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur

2.1.1 Qu'est-ce qu'une pompe à chaleur?

Une pompe à chaleur est un appareil qui prend de la chaleur à une source dite «froide» et qui fournit de la chaleur à une température supérieure moyennant une certaine dépense énergétique. Selon VDI (Société allemande des ingénieurs), la pompe à chaleur est une machine thermique placée dans la catégorie des machines frigorifiques.

Les pompes à chaleur peuvent être utilisées de diverses manières:

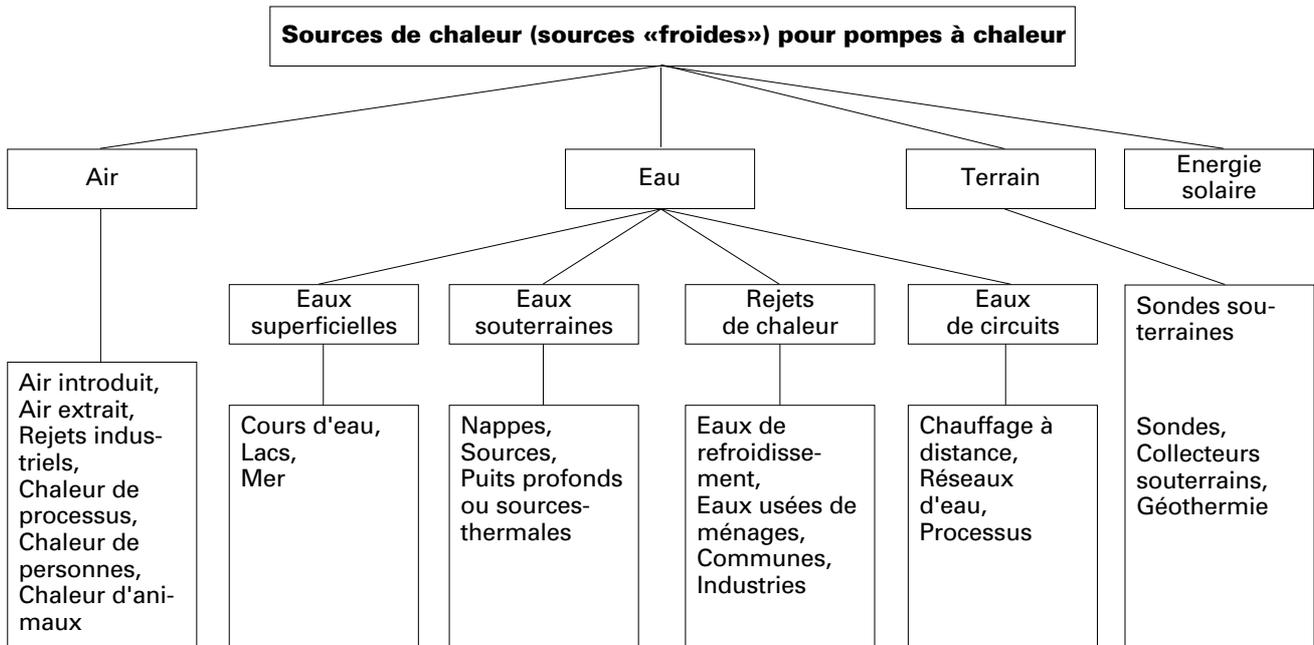
- comme machine frigorifique (production de froid);
- comme pompe à chaleur («pomper» de la chaleur d'une source froide pour la redonner à une température supérieure);
- en combinant les deux fonctions susmentionnées (parallèlement ou en alternance).

Les applications les plus intéressantes sont celles qui utilisent simultanément les deux effets, par exemple:

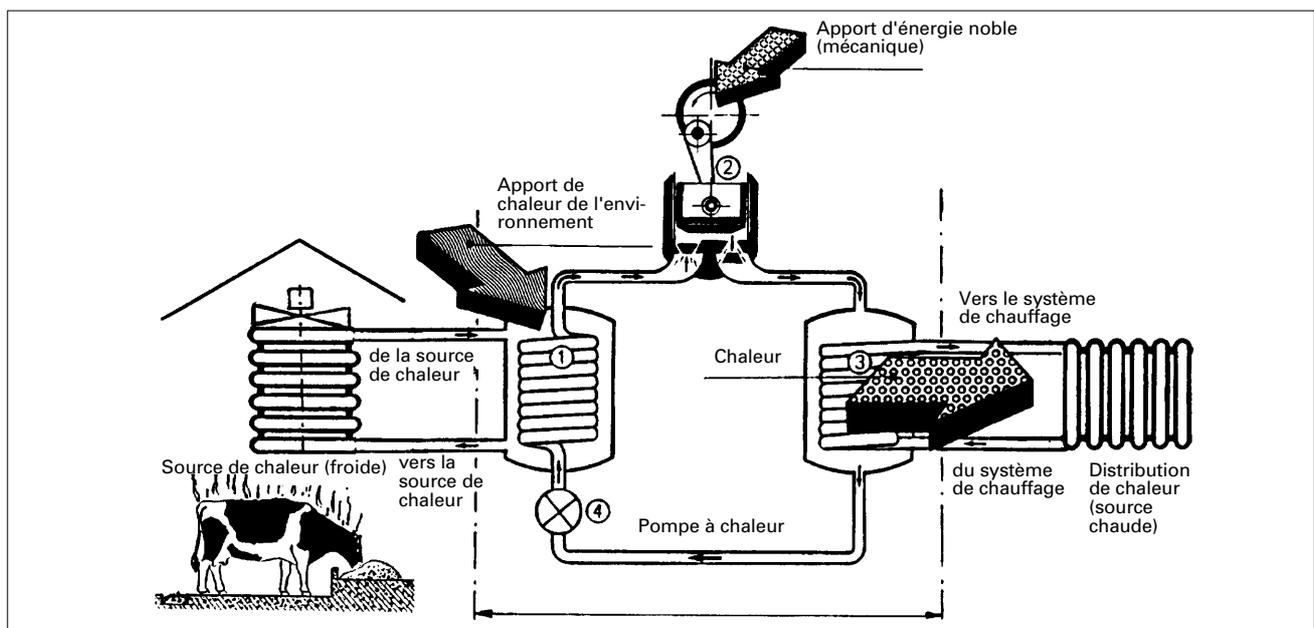
- refroidissement d'un local avec chauffage d'eau;
- déshumidification d'un local avec chauffage d'eau;
- refroidissement et séchage d'une cave à vin combiné avec la production d'eau chaude;
- refroidissement de lait combiné avec production d'eau chaude et / ou chauffage;
- rafraîchissement et déshumidification d'une étable combiné avec production d'eau chaude et / ou chauffage de locaux d'habitation ou d'élevage.

Fluides frigorigènes

Pour pouvoir fonctionner, une pompe à chaleur nécessite une substance ayant le pouvoir d'abaisser la température de la source «froide». Cette substance s'appelle «fluide frigorigène» et circule à l'intérieur de la machine. Il s'agit de composés fluorés tels que les R11, R12, R22, R500 et R502 ainsi que la bien connue ammoniacque (NH₃). Les fluides R11, R12, R500, R502 ne sont plus utilisés dans les



Principe de fonctionnement et composants principaux d'une pompe à chaleur à compresseur



- 1: Evaporateur pour absorption de la chaleur basse température (chaleur de la source «froide»)
- 2: Compresseur comprimant la vapeur du fluide frigorigène
- 3: Condenseur («liquéfacteur») permettant l'évacuation de la chaleur à niveau de température supérieur (source «chaude»)
- 4: Détendeur pour réduction de pression et contrôle du débit du fluide frigorigène

pompes à chaleur récentes du fait de leur nocivité pour la couche d’ozone. Ils devraient être prochainement interdits. Le R22 est considéré comme le produit de transition le mieux adapté.

Vecteurs de chaleur

L’air, l’eau ou les mélanges eau-glycol (eau-antigel) sont utilisés pour le transport et la distribution de la chaleur.

Sources de chaleur

(dites sources « froides »)

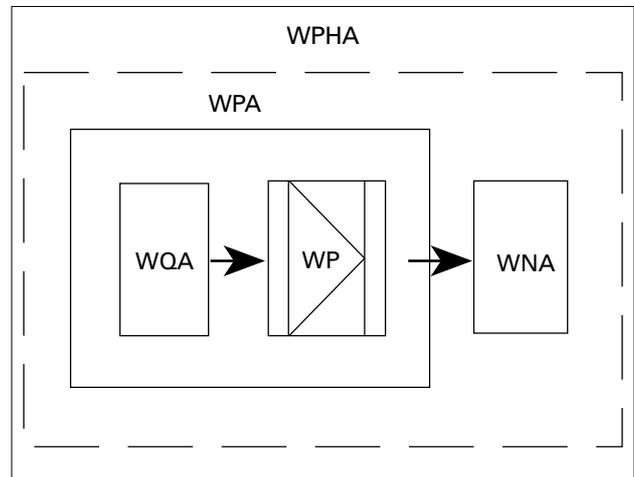
Diverses sources de chaleur, résumées sur le tableau ci-contre, peuvent alimenter une pompe à chaleur.

2.1.2 Définition

Lorsque l’on parle de pompes à chaleur, sources de chaleur, installations à pompes à chaleur, etc., il est utile de donner une définition claire des divers composants et paramètres selon la norme DIN 8900. Ceci est particulièrement utile pour pouvoir définir les performances d’une installation.

En particulier, lors d’une comparaison de différents systèmes de production de chaleur, il est possible de ne pas tenir compte de la pompe de circulation du circuit d’utilisation de la chaleur, car celle-ci apparaît indépendamment du système choisi.

Définition des composants selon DIN 8900



- WQA: Source de chaleur (source « froide »)
- WP: Pompe à chaleur
- WPA: Installation à pompe à chaleur
- WNA: Utilisation de la chaleur (utilisateur, source « chaude »)
- WPHA: Installation de chauffage à pompe à chaleur

2.1.3 Dénomination des pompes à chaleur

La dénomination des pompes à chaleur et installations à pompe à chaleur est définie, selon DIN 8900, comme suit : en première place le fluide caloporteur de la source de chaleur dite « froide » suivi par le fluide caloporteur de la source dite « chaude ».

Dénomination des pompes à chaleur et installations à pompes à chaleur selon DIN 8900

Source de chaleur	Côté froid	Côté chaud	Dénomination pompe à chaleur (WP = PAC)	Dénomination installation à pompe à chaleur (WPA)
terrain	saumure	air	WP-saumure/ air	WPA-terrain/ air
terrain	saumure	eau	WP-saumure/ eau	WPA-terrain/ eau
soleil	saumure	air	WP-saumure/ air	WPA-soleil/ air
soleil	saumure	eau	WP-saumure/ air	WPA-soleil/ eau
eau	eau	eau	WP-eau/ eau	WPA-eau/ eau
eau	eau	air	WP-eau/ air	WPA-eau/ air
air	air	eau	WP-air/ eau	WPA-air/ eau

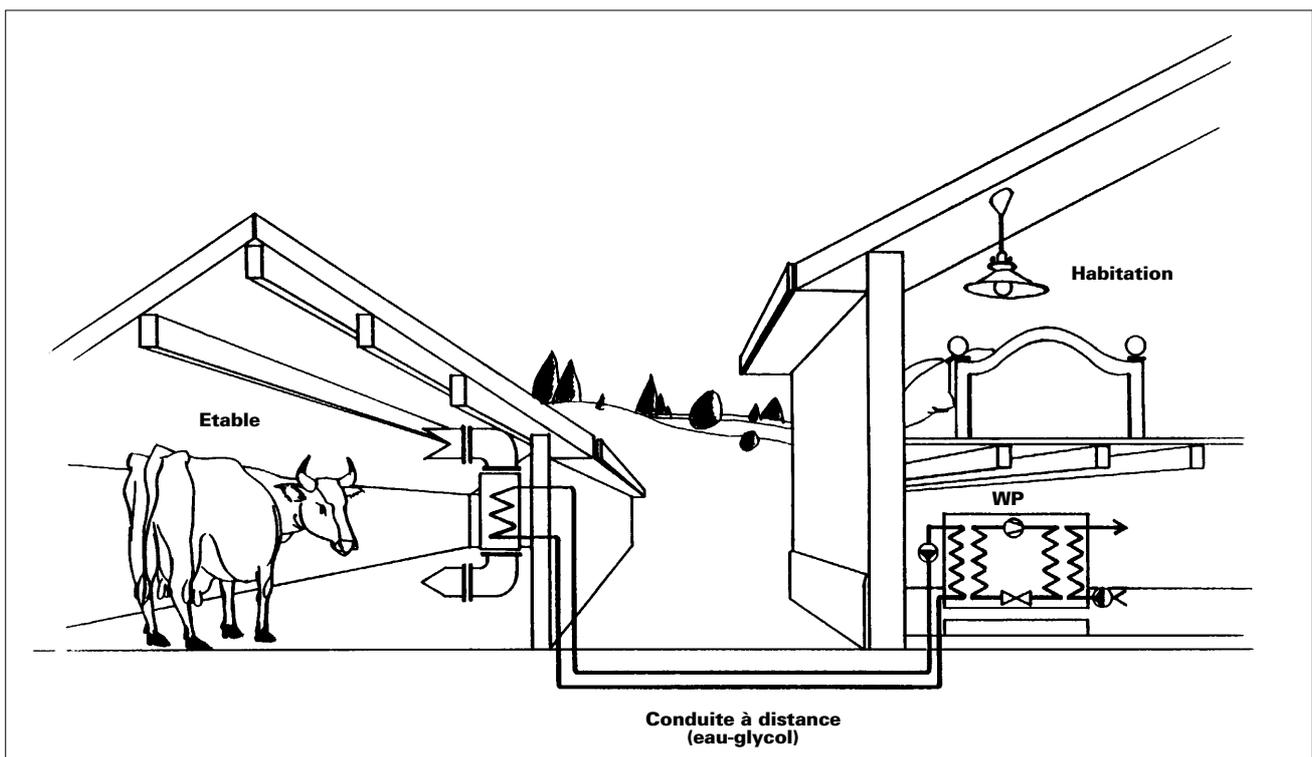
2.2 Systèmes

2.2.1 Pompe à chaleur air/ eau et eau/ eau

Les pompes à chaleur air/ eau et eau/ eau sont le plus fréquemment utilisées pour les applications suivantes dans les exploitations agricoles :

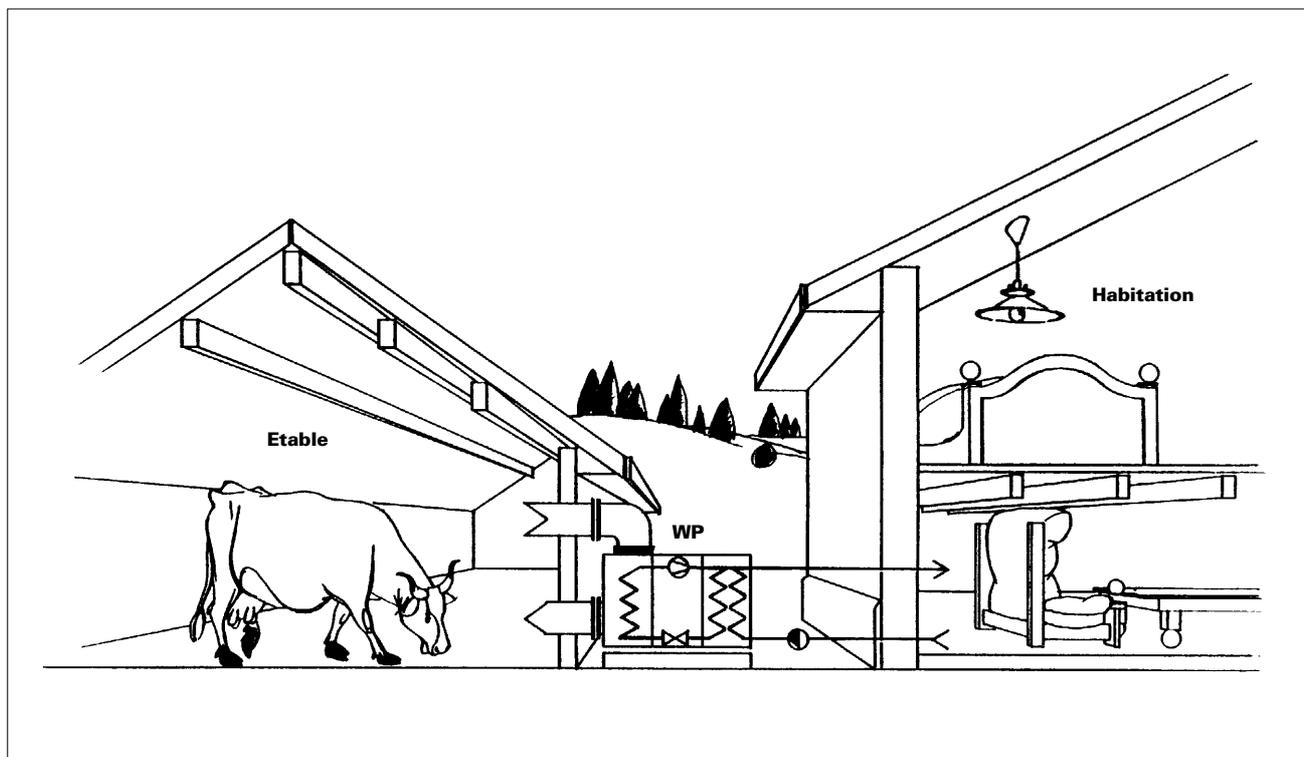
- pompe à chaleur compacte eau/ eau à échangeur de chaleur (installation à échangeur, figure A);
- pompe à chaleur compacte air/ eau (installation compacte, figure B);
- pompe à chaleur split air/ eau (installation split, figure C).

La pompe à chaleur eau/eau avec échangeur d'étable (collecteur) est reliée à la source de chaleur « froide » (étable) par une conduite transportant le fluide caloporteur eau-glycol. Ce type d'installation est approprié si une certaine distance sépare la source de chaleur de la pompe. Le coefficient de performance de l'installation est affaibli par la chute de température dans l'échangeur, chute de température nécessaire pour transmettre la chaleur entre l'air de l'étable et le glycol. Une pompe à chaleur normale de série peut être utilisée, car il n'y a pas de danger particulier lié à la corrosion.



A: Récupération de la chaleur d'une étable à l'aide d'une pompe à chaleur eau/eau avec échangeur de chaleur

La pompe à chaleur compacte air / eau peut être installée directement dans l'étable ou dans un local voisin. Elle peut travailler en recyclage ou avec l'air extrait. En cas d'installation dans l'étable, il faut porter une attention particulière au choix des matériaux de toute la machine à cause de l'atmosphère extrêmement corrosive qui y règne. Si la pompe à chaleur est placée dans un local annexe, ces précautions ne concernent que les composants de l'installation exposés directement à l'atmosphère de l'étable.

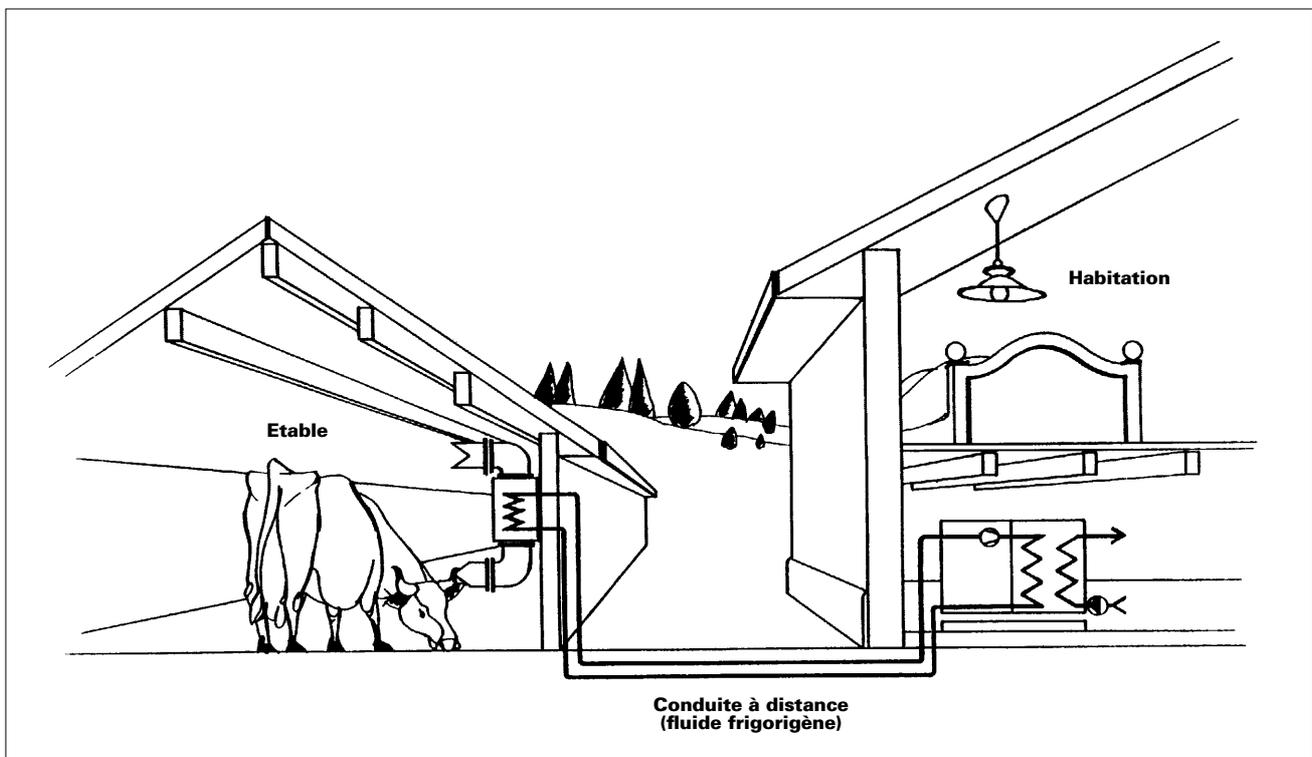


B: Pompe à chaleur air d'étable / eau à évaporation directe (installation compacte)

La pompe à chaleur split air / eau peut fonctionner aussi bien en recyclage qu'avec l'air extrait du local d'élevage. Dans une construction split, l'évaporateur de la pompe à chaleur est séparé de la pompe elle-même (compresseur, condenseur et détenteur) et est placé dans l'étable pour récupérer directement la chaleur de la source froide. Il est relié à la pompe par des conduites transportant le fluide frigorigène. La distance séparant l'évaporateur du compresseur ne devrait pas dépasser 50 m.

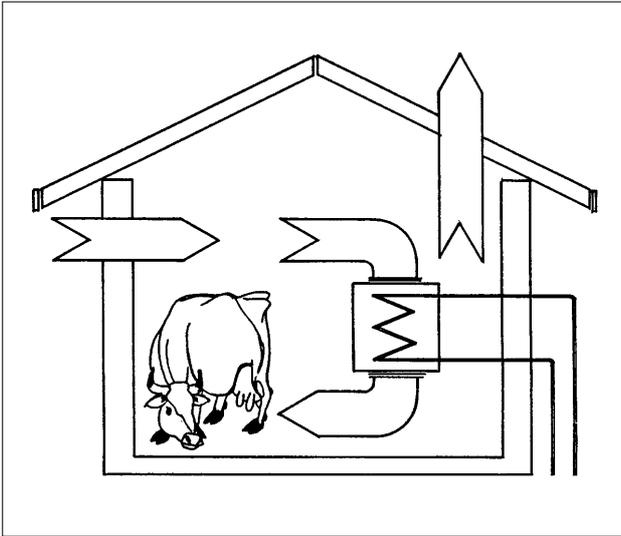
Les conduites transportant du fluide frigorigène sont non seulement plus coûteuses que celles transportant du glycol mais plus sujettes à des problèmes d'étanchéité. En cas de fuite, la totalité du fluide frigorigène peut être rapidement perdue.

Pour des raisons écologiques, ce type d'installation ne devrait plus être réalisé.



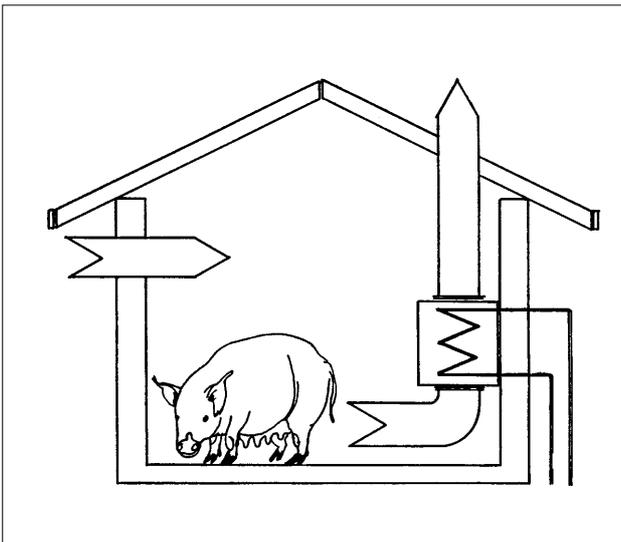
C: Pompe à chaleur split air d'étable / eau, avec évaporation directe dans l'étable (installation split)

Récupération de chaleur par recyclage de l'air



L'air est refroidi dans un échangeur de chaleur puis réinjecté dans l'étable

Récupération de chaleur de l'air extrait



L'air extrait de l'étable ou du local d'élevage est évacué dans l'atmosphère après avoir été refroidi dans un échangeur de chaleur

2.2.2 Récupération de chaleur par recyclage d'air

Pour la récupération de chaleur par recyclage, l'air de l'étable est refroidi en passant à travers l'évaporateur de la pompe à chaleur et en le réinjectant dans le local d'élevage. Le refroidissement de l'air provoque la condensation de la vapeur d'eau et de l'ammoniac que'il contient, ce qui diminue son humidité et améliore la qualité climatique de l'étable.

L'air recyclé est refroidi de 5 à 8°C et jusqu'à 2 grammes d'eau par m³ d'air sont condensés.

Ce procédé, qui refroidit l'air de l'étable, ne peut être adopté que dans des élevages où il y a excédent de chaleur. Ce qui est le cas des étables où la température est basse, c'est-à-dire où les pertes par transmission sont faibles. La récupération de chaleur à partir d'air recyclé est en particulier adaptée pour les étables à bovins.

Un canal séparé est nécessaire pour amener l'air frais (par exemple par gravité dans une étable). Celui-ci sera dimensionné pour que la teneur en CO₂ ne dépasse pas 0,35% (pointes horaires jusqu'à 0,5%). Comme une partie de la vapeur d'eau contenue dans l'air est condensée dans l'évaporateur de la pompe à chaleur, l'humidité ne pose pas de problème particulier dans ce type d'étables.

2.2.3 Récupération de la chaleur de l'air extrait

Dans les locaux d'élevage où la température est élevée (par exemple porcheries et élevages de volaille), la récupération de la chaleur de l'air extrait est appliquée, car elle permet de prélever une quantité plus élevée de calories. Pour les locaux caractérisés par un déficit thermique et qui doivent de toute façon être chauffés, il est judicieux d'envisager l'installation d'échangeurs de chaleur (voir chapitre 3).

L'air extrait des locaux d'élevage est refroidi d'environ 5°C avant d'être rejeté dans l'atmosphère. Comme ce procédé ne traite que l'air extrait, il n'a pas d'influence sur le climat intérieur.

La récupération de la chaleur de l'air extrait est surtout utilisée dans les porcheries. L'évaporateur de la pompe à chaleur est généralement directement installé dans le flux de l'air extrait.

Il est également possible de combiner la récupération de chaleur à partir de l'air recyclé avec la récupération à partir de l'air extrait.

2.3 Coefficient de performance et flux d'énergie

2.3.1 Coefficient de performance annuel β

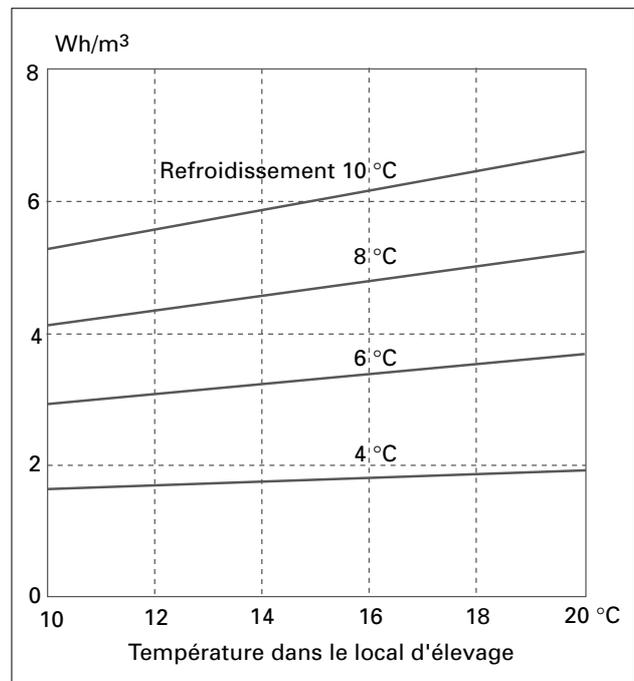
Le coefficient de performance annuel β ainsi que le coefficient performance ϵ sont les paramètres décisifs pour la planification d'une installation avec pompe à chaleur.

Le coefficient performance annuel β (coefficient moyen de la PAC) est le rapport entre l'énergie utile fournie par l'installation et la totalité de l'énergie facturée durant une année. Un coefficient de 3 signifie que pour un kWh d'électricité acheté 3 kWh seront produits sous forme de chaleur.

Pour calculer correctement ce bilan, il convient d'ajouter à la consommation du compresseur de la pompe à chaleur elle-même celle de tous les auxiliaires, soit: ventilateurs, pompes, chauffage du corps du compresseur, régulation. L'énergie consommée par la pompe de circulation du circuit de chauffage de l'utilisateur n'est pas considérée.

Le coefficient de performance annuel β est fonction de la température de la source de chaleur (source «froide») et de celle du circuit de chaleur de l'utilisateur. Le coefficient de performance est d'autant plus grand que la température de la source «froide» est élevée et que celle de l'utilisateur est basse. Exprimé autrement: ce coefficient est d'autant plus élevé que la différence entre sources «froide» et «chaude» (utilisateur) est faible. Enfin, la qualité et le dimensionnement correct des composants et auxiliaires de l'installation peut influencer fortement le coefficient de performance annuel β .

Le coefficient de performance β d'une installation à pompe à chaleur est indiqué dans le tableau ci-contre pour différentes températures d'étable et du circuit d'utilisation de la chaleur.



Chaleur récupérée en fonction de la température et du taux de refroidissement de l'air d'un local d'élevage

Température au départ du circuit de chauffage de l'utilisateur				
Température moyenne de l'étable	40°C	45°C	50°C	55°C
5°C	2,9-3,2	2,6-2,9	2,3-2,6	2,0-2,3
10°C	3,2-3,6	1,9-3,2	2,6-2,9	2,3-2,6
15°C	3,6-4,0	3,2-3,6	2,9-3,2	2,6-2,9
20°C	4,0-4,4	3,6-4,0	3,2-3,6	2,9-3,2
25°C	4,4-4,8	4,0-4,4	3,6-4,0	3,2-3,6

Coefficients de performance annuels β d'une installation de chauffage par pompe à chaleur en fonction de la température moyenne de l'étable et de la température de départ du circuit de chauffage. les valeurs inférieures sont valables pour des installations avec circuits auxiliaires à échangeurs de chaleur (installations avec circuits au glycol), les valeurs supérieures pour les installations à échange direct sur l'évaporateur

Le coefficient de performance ϵ correspond à la valeur instantanée du coefficient de performance annuel β . Dans ce cas, la consommation des auxiliaires n'est pas considérée. Comme dans les applications liées à l'agriculture les températures des sources « froides » ne varient pas fortement pendant la saison de chauffe (par comparaison avec une pompe à chaleur utilisant la chaleur de l'air extérieur), le coefficient de performance ϵ ne diffère pas fortement du coefficient de performance annuel β .

Coefficient de performance annuel β (valable pour une période, par exemple une année)	
$\beta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie facturée}}$	
Exemple:	
Energie utilisée dans une ferme:	24000 kWh
Energie facturée (électricité):	6667 kWh
Coefficient de performance annuel β :	3,5

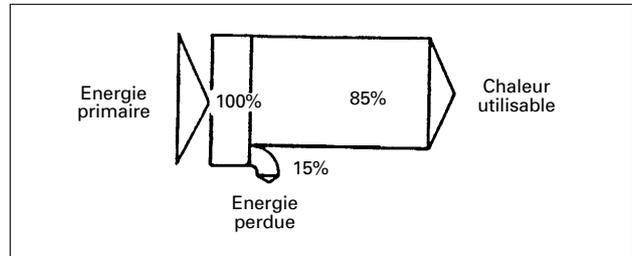
2.3.2 Flux d'énergie

Il est utile de considérer le processus de la pompe à chaleur en fonction de la consommation d'énergie primaire. La figure A montre qu'un chauffage conventionnel au mazout valorise environ 85 % de l'énergie primaire.

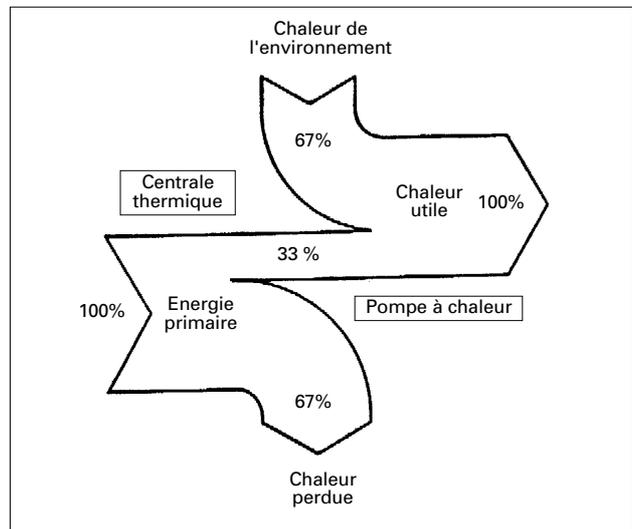
La figure B montre que la production d'électricité par une centrale thermique, au charbon ou nucléaire par exemple, ne valorise qu'un tiers environ de l'énergie primaire, alors que les deux tiers restant ne sont pas, ou peu utilisés dans la majorité des centrales. Contrairement au chauffage électrique direct, ces deux tiers peuvent être « récupérés » par l'utilisation d'une pompe à chaleur.

Dans une centrale hydroélectrique, l'énergie primaire est nettement mieux utilisée. Pour avoir une idée plus nette de la situation, il importe de savoir que 60 % de l'électricité sont produits en Suisse par voie hydraulique et 40 % par des centrales thermiques (en majorité nucléaires).

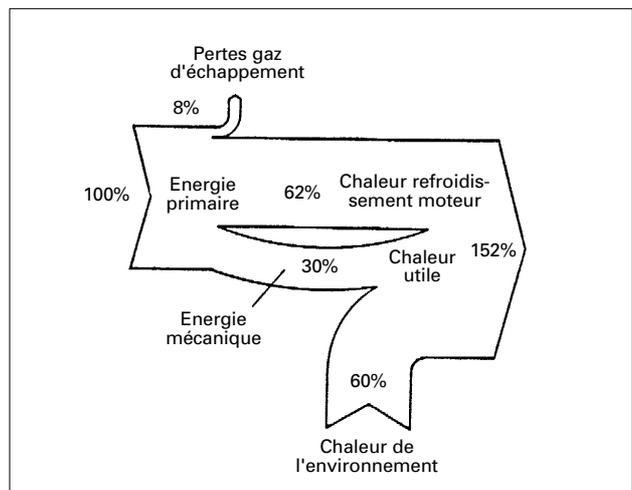
Des unités de production chaleur-force, couplées à des pompes à chaleur sont à même de produire 50 % plus d'énergie utile par rapport à l'énergie primaire consommée (figure C). Du point de vue efficacité, le moteur diesel est supérieur au moteur à allumage (type moteur à essence). Du point de vue émission de produits polluants, c'est le contraire. Les deux techniques rejettent cependant plus de produits polluants qu'une pompe à chaleur électrique utilisant de l'électricité produites aux conditions suisses actuelles.



A: Production conventionnelle de chaleur (chauffage à mazout)



B: Flux d'énergie d'une pompe à chaleur électrique utilisant de l'électricité produite par voie thermique



C: Flux d'énergie d'une pompe à chaleur entraînée par un moteur à combustion interne à gaz avec récupération de chaleur (groupe chaleur-force)

2.4 Matériaux

2.4.1 Pompe à chaleur

La résistance à la corrosion des matériaux utilisés pour la fabrication des machines utilisées dans des exploitations agricoles doit être bien plus élevée que pour des appareils d'usage courant. Ceci concerne aussi les pompes à chaleur.

D'une manière générale, il est possible de maîtriser les problèmes liés à la corrosion par un choix adéquat du matériau ou du revêtement de protection. Les appareils installés dans des porcheries ou des poulaillers sont soumis, du fait de la teneur élevée de l'air en hydrogène sulfuré, ammoniacque et poussières, à des conditions plus sévères que ceux installés dans des étables à bovins.

2.4.2 Boîtiers et capots

L'utilisation de tôle d'acier zinguée, recouverte d'une couche supplémentaire de laque, a donné de bons résultats pour les boîtiers et capots de pompes à chaleur.

2.4.3 Ventilateurs

Des ventilateurs radiaux en tôle d'acier zinguée sont le plus souvent utilisés. Si les roues sont dotées d'aubes serrées et que l'air n'est pas suffisamment filtré, la poussière s'y dépose et s'y accumule, ce qui conduit à un déséquilibre et des dommages aux paliers. Il est vivement recommandé de recouvrir les roues d'une couche de laque supplémentaire.

Les ventilateurs axiaux sont moins sensibles à la poussière. Les roues en aluminium devraient elles aussi recevoir une couche de peinture. De bons résultats ont été obtenus avec des roues en plastique.

2.4.4 Evaporateurs

Les évaporateurs traditionnels fabriqués en tubes de cuivre avec lamelles d'échange thermique en aluminium ne devraient pas être utilisés dans l'atmosphère d'une étable ou d'un local d'élevage car ils sont exposés à la corrosion par l'ammo-

niaque et le soufre; ceci bien que quelques cas où leur utilisation n'a pas posé problème soient connus. Comme protection minimale contre la corrosion, les lamelles d'aluminium devraient recevoir un revêtement plastifié ou une laque, si possible avant leur montage sur les tubes.

Les évaporateurs réalisés entièrement en cuivre (tubes et lamelles) sont soumis à corrosion par combinaison d'eau de condensation avec les composants sulfurés et l'ammoniacque contenus dans l'air. Une protection satisfaisante est obtenue par laquage ou zingage par trempage, pour autant que l'épaisseur de la couche soit suffisante.

Une meilleure protection est obtenue si tubes et lamelles sont revêtus d'une laque déposée par électrophorèse après leur assemblage. De cette manière, l'eau de condensation chargée de produits corrosifs ne peut pas s'introduire en lamelle et tube. Pour permettre leur nettoyage par jet d'eau sous haute pression, les lamelles seront suffisamment rigides (épaisseur minimale 0,4 mm).

La solution la plus sûre, mais aussi la plus coûteuse, consiste à réaliser l'évaporateur en acier inoxydable résistant aux acides (chrome-nickel-molybdène). Le coefficient d'échange thermique de ce matériau est cependant moins bon; il en résulte une augmentation de la surface d'échange, avec légère diminution du coefficient d'amplification annuel, due à l'augmentation des pertes de charge de la ventilation et de la température d'évaporation plus basse.

2.4.5 Commande et régulation électriques

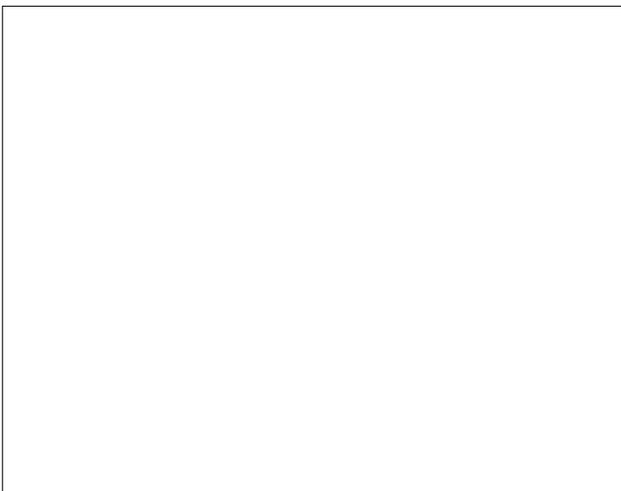
Bien que les armoires contenant les appareils de commande et de régulation offrent une certaine protection contre l'atmosphère agressive d'une étable, il est préférable de les placer à l'extérieur.

2.4.6 Echangeur de chaleur d'étable (collecteur)

Les matériaux suivants ont fait leurs preuves pour la construction d'échangeurs de chaleur d'étables: tôles d'aluminium laquées, plaques en plastique, registres ou torches en tuyaux de matière synthétique. L'acier inoxydable est approprié, mais très coûteux. Il est bon de garder à l'esprit que les coefficients de transmission de chaleur de l'acier inoxydable et du plastique sont moins favorables. Mais



Echangeur de chaleur à recyclage, monté à un emplacement peu favorable pour le nettoyage



Echangeur de chaleur à recyclage, monté à un emplacement favorable pour le nettoyage

il est plus important que le matériau choisi soit résistant à un nettoyage périodique énergique.

2.4.7 Canaux de ventilation

Les canaux de ventilation sont réalisés dans les matériaux suivants: tôle d'acier zingué, plaques de bois, ciment, plâtre ou mousse de polyuréthane avec revêtement aluminium. Des feuilles ou tubes en plastiques sont également utilisés, de même que des tuyaux flexibles renforcés par spirale ou treillis métallique. Les matériaux non combustibles auront la préférence.

Les canaux seront courts et faciles à nettoyer. Leur sortie sera conçue de manière à ce que les animaux ne soient pas exposés à des courants d'air. La vitesse de l'air y sera limitée pour des raisons énergétiques (maximum 4 m/s)

2.4.8 Nettoyage

L'air d'une étable est plus ou moins chargé de poussières selon le type d'animal, leur alimentation et le mode d'élevage. Ces poussières se déposent dans l'échangeur de chaleur de l'évaporateur et y forment, en liaison avec l'eau de condensation, une pâte collante.

Un nettoyage périodique des échangeurs est donc nécessaire, ce qui est le plus souvent réalisé à l'aide d'une pompe à haute pression. Il est donc important que l'échangeur soit facilement accessible et placé à un endroit où il est possible de gicler de l'eau sans inconvénients. L'intervalle entre nettoyages est de deux à trois semaines.

Pour protéger les échangeurs à évaporation directe, un filtre est installé sur l'entrée d'air. Des nattes filtrantes retiennent la poussière, ce qui permet de diminuer la fréquence des nettoyages à deux ou trois fois par année. Les nattes filtrantes devront elles être changées et lavées une à deux fois par semaine (au jet à la main ou avec machine à laver).

Des laveurs intégrés (par exemple des buses de nettoyage) n'ont pas donné, dans nombre de cas, les résultats escomptés, car la pression de l'eau y est insuffisante pour décoller la pâte collée sur les lamelles. De plus, les buses peuvent se colmater si l'eau est calcaire.

2.5 Utilisation de la chaleur

2.5.1 Introduction

Le chauffage de l'habitation représente l'utilisation principale de la chaleur produite, car c'est là que se trouvent les plus gros besoins d'une exploitation agricole.

Pour le chauffage de l'habitation, des pompes à chaleur utilisant la chaleur de l'étable sont utilisées en fonctionnement monovalent. Ceci signifie que la pompe à chaleur est le seul producteur de chaleur; il n'y a pas de chauffage d'appoint.

Au contraire des pompes à chaleur travaillant avec l'air extérieur, la température de la source de chaleur (air de l'étable) est relativement constante et assez élevée toute l'année, ce qui assure un bon coefficient d'amplification annuel.

D'autres possibilités d'utilisations sont la préparation d'eau chaude sanitaire et le chauffage des maternités. Les pompes à chaleur ne servent pas pour le séchage du foin, car la puissance à disposition est trop faible.

2.5.2 Besoins en chaleur d'une habitation

Les besoins en chaleur d'une habitation peuvent être estimés à l'aide de la puissance spécifique (W/m^2), voir tableau. Ces valeurs sont en particulier fonction de la taille, de la situation et de la qualité de l'isolation du bâtiment. La valeur de référence considérée est la surface au sol du volume chauffé, somme de la surface des étages habités.

La puissance de la pompe à chaleur est calculée en multipliant la puissance spécifique par la surface chauffée. Il n'est pas recommandé de prévoir de la réserve lors du dimensionnement, car un surdimensionnement d'une pompe à chaleur s'avère coûteux.

Des valeurs plus précises peuvent être obtenues pour des bâtiments existants lorsque la consommation d'énergie est connue. Le diagramme donne des valeurs indicatives concernant un chauffage à mazout avec et sans préparation d'eau chaude: grossièrement, la puissance de la pompe à chaleur peut être estimée en multipliant par quatre la consommation annuelle de mazout en m^3 .

Puissance de chauffe spécifique	Type d'habitation
80 ... 100 W/m^2	fermes anciennes
60 ... 80 W/m^2	maisons d'habitation isolées de façon conventionnelle
30 ... 50 W/m^2	maisons d'habitation bien isolées
Puissance de la pompe à chaleur = surface chauffée x puissance de chauffe spécifique	

(Exemple: consommation annuelle de mazout = 3000 litres = 3 m³,
Puissance de la pompe à chaleur = 3 x 4 = 12 kW)

Ces techniques d'évaluation sont valables pour des avant-projets. Avant l'exécution, la puissance thermique devra être impérativement calculée selon les normes SIA 384 / 2.

2.5.3 Distribution de la chaleur

Une pompe à chaleur travaille d'autant mieux que la température de départ est basse; elle ne devrait pas dépasser 50°C.

La chaleur peut être distribuée dans les locaux chauffés par un chauffage au sol ou par des radiateurs à basse température. Le chauffage au sol peut travailler avec la température de départ la plus basse tandis que les radiateurs peuvent mieux être réglés en fonction des apports de chaleur extérieurs (par exemple ensoleillement). La combinaison des deux systèmes dans le même circuit de distribution de chaleur est possible.

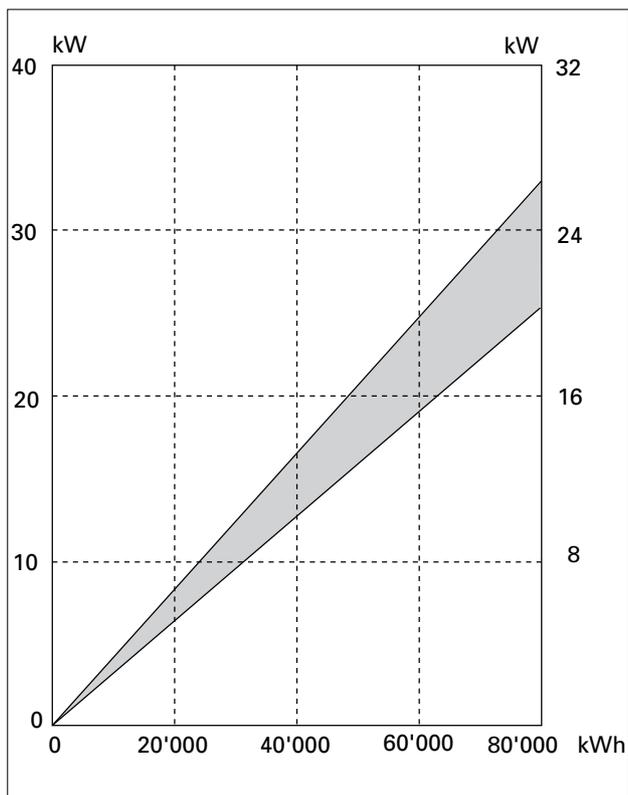
Des problèmes peuvent apparaître lorsque l'on passe d'un chauffage conventionnel à mazout ou à bois à l'utilisation d'une pompe à chaleur. Il est alors nécessaire de contrôler si les radiateurs existants peuvent distribuer suffisamment de chaleur aux locaux si la température de départ est de 50°C. Si ce n'est pas le cas, il faut ajouter des radiateurs ou améliorer l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment.

2.5.4 Accumulateur de chaleur

Les pompes à chaleur peuvent être utilisées avec ou sans accumulateur de chaleur. Un accumulateur n'est pas nécessaire si le circuit de chauffage à une inertie thermique suffisante et qu'un débit constant d'eau chaude y circule (par exemple pas de vannes thermostatiques). Par exemple le chauffage au sol, dont la capacité thermique permet d'éviter des enclenchements et déclenchements fréquents de la pompe à chaleur.

Pour obtenir une solution optimale du point de vue de l'hydraulique et de la régulation, il est préférable d'installer un (petit) volume d'eau chaude tampon. Grâce à ce volume, la durée de fonctionnement de la pompe à chaleur entre arrêts est plus longue, ce

Puissance d'une pompe à chaleur



Consommation annuelle de chaleur

Puissance de chauffe (zone foncée) d'une pompe à chaleur en fonction de la consommation annuelle d'un chauffage à mazout ou à gaz (limite gauche: pompe à chaleur sans préparation d'eau chaude sanitaire, limite droite: pompe à chaleur avec préparation d'eau chaude sanitaire)

qui se répercute positivement sur la durée de vie de la machine. Il est important que l'accumulateur soit hydrauliquement découplé du circuit de distribution de chauffage afin d'éviter des circulations parasites de l'eau.

Un accumulateur journalier n'est pas recommandé: le volume d'eau serait trop important pour une accumulation jour/nuit si l'on considère les faibles différences de température en jeu. Si la pompe à chaleur ne fonctionnait que durant la période à bas tarif (nuit), l'étable ne serait pas déshumidifiée la journée. D'autre part il est à prévoir que le bas tarif sera de moins en moins appliqué dans le futur, ce qui rendra cette solution financièrement moins intéressante.

2.5.5 Régulation

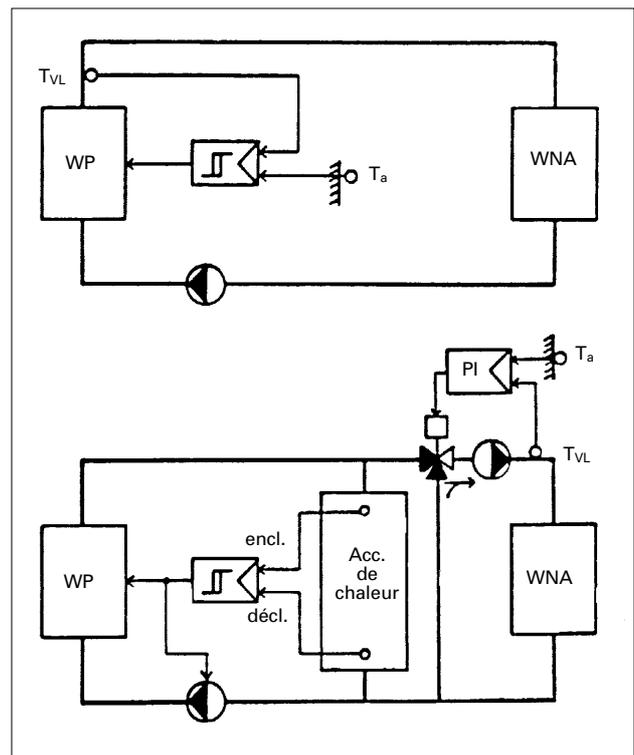
Sur les installations de chauffage sans accumulation, une régulation de la température de départ en fonction de la température extérieure est généralement prévue. Durant les périodes de fonctionnement à charge partielle, la puissance délivrée par la pompe à chaleur doit pouvoir être diminuée, le débit d'eau dans le circuit de chauffage restant constant. Dans les petites installations, un régulateur tout ou rien (arrêt/marche) sera adopté, le nombre de cycles d'enclenchements/déclenchements étant limité par l'adoption d'un circuit de distribution de chaleur à inertie suffisante (par exemple chauffage au sol).

Le réglage d'installations dotées d'un accumulateur est relativement compliqué. Une température constante de l'accumulateur permet de simplifier la régulation et le fonctionnement, mais conduit à des coefficients de performance annuels légèrement plus faibles. Dans ce cas, le débit à travers le circuit de distribution de chaleur peut être variable (autorisant l'utilisation de vannes thermostatiques).

2.5.6 Eau chaude sanitaire

L'eau chaude sanitaire peut être produite par le système de chauffage ou séparément (pompe à chaleur ou boiler électrique). Lorsqu'une pompe à chaleur produit l'eau chaude, le boiler n'est chauffé que durant certaines périodes, la température au départ de la pompe à chaleur étant réglée à la valeur maximum admissible (55°C). Entre ces périodes, la pompe à chaleur travaille à une température infé-

Commande et régulation d'une pompe à chaleur



En haut: sans accumulateur, circuit de distribution de chaleur avec grande inertie thermique

En bas: avec accumulateur de chaleur, utilisable avec tout système de distribution de chaleur

Un coefficient de performance annuel encore meilleur sera obtenu par réglage de la température de condensation de la pompe à chaleur en fonction de la température extérieure

WP = pompe à chaleur
 WNA = utilisateur de chaleur
 Ta = température ambiante
 TVL = température circuit chauffage

Besoins en énergie de chauffage de maisons familiales en MJ/m²a

	Constructions existantes (état 1988)	Valeur normale (rénov.)	Constructions-neuves
Chauffage y compris eau chaude sanitaire	485	400	340
Chauffage sans eau chaude sanitaire	425	340	280

Besoins en énergie de chauffage avec / sans préparation d'eau chaude sanitaire selon norme SIA 380 / 1.

Exemple de frais d'investissements (base prix 1990)

Pompe à chaleur air d'étable/ eau L15 / W50, Puissance thermique	14 kW
Puissance électrique	4 kW
Pompe à chaleur avec évaporateur et condenseur pour chauffage et préparation d'eau chaude, y compris tableau de commande et de surveillance et dégivrage automatique:	Fr. 21 000.–
35 m conduite de transport de chaleur (posée)	Fr. 3500.–
Canaux d'air d'amenée et de retour, isolés, pour fonctionnement en recyclage (posés)	Fr. 3500.–
Accumulateur (750 l), régulation en fonction de la température extérieure, pompe de charge avec sa régulation	Fr. 3200.–
Boiler de 300 l avec thermostat et pompe de charge	Fr. 3250.–
Mise en service	Fr. 1120.–
Total	Fr. 35 570.–

Ne sont pas compris dans ce prix: travaux de maçonnerie, électricité, raccordement au système de chauffage central existant de la maison d'habitation.

rieure en fonction de la courbe de chauffe demandée. Si une température supérieure à 55°C est demandée, le tiers supérieur du boiler sera équipé d'un corps de chauffe électrique pour assurer l'appoint.

L'eau chaude sanitaire peut également être produite par la pompe à chaleur en dehors de la période de chauffage. Dans ce cas, la pompe à chaleur sera mise en service une à deux fois par jour pour chauffer le boiler. Cette manière de faire a l'avantage de faire fonctionner le compresseur régulièrement et peut éviter des ennuis dus à un arrêt prolongé de la machine.

2.5.7 Besoins annuels en énergie

Les besoins annuels en énergie de chauffage peuvent être estimés à partir de la consommation actuelles (constructions existantes) ou sur la base de l'indice énergétique du bâtiment. La table ci-contre indique les besoins en énergie de maisons familiales. Les valeurs sont rapportées à la surface habitée, et les besoins en énergie se calculent en multipliant celles-ci par la surface. La consommation annuelle prévisible de la pompe à chaleur se calcule en divisant les besoins énergétiques par le coefficient de performance annuel (1 MJ = 0,28kWh).

2.6 Frais d'investissement et d'exploitation

2.6.1 Frais d'investissement

L'investissement nécessaire pour l'installation d'une pompe à chaleur varie fortement en fonction des conditions locales. Aux frais pour la pompe, il faut ajouter ceux nécessaires pour la récupération de chaleur (canaux de ventilation) et le transport de la chaleur jusqu'à l'utilisateur, fonction de l'éloignement de ce dernier de l'étable.

Les frais d'investissement pour une installation à pompe à chaleur dans la gamme de puissance 10 à 20 kW sont de l'ordre de Fr. 35 000.– à Fr. 45 000.–.

La répartition des frais pour les différents composants de l'installation est donnée dans le tableau ci-contre.

2.6.2 Frais d'exploitation

Les frais d'exploitation se subdivisent en frais d'achat d'électricité et ceux consacrés à l'entretien et aux révisions.

Les frais d'électricité sont calculés en connaissant la consommation de la pompe à chaleur (chapitre 2.5.7) et les tarifs de vente. Pour les pompes à chaleur travaillant sans accumulateur, la part du courant de jour atteint le 60 à 80 % de la consommation totale. Avec un accumulateur journalier, cette part se réduit à 30 à 40 %. Le bas tarif nocturne et du week-end devrait être de moins en moins appliqué dans le futur et nombre de communes appliquent déjà maintenant un tarif unique durant l'hiver. Lors du calcul du coût de l'électricité, il convient également de tenir compte des taxes de base et de puissance.

Les frais d'entretien et de révision d'une pompe à chaleur sont estimés à 1,5 % de l'investissement; frais auxquels il faut ajouter ceux consacrés au nettoyage de l'évaporateur et au changement éventuel du filtre. Une demi-heure par semaine devrait suffire pour ces travaux.

Exemple de calcul des frais annuels d'électricité

Habitation: Surface chauffée 180 m²
Besoins spécifiques 400 MJ / m²a

Pompe à chaleur: Puissance de chauffe 10 kW
Coefficient de performance annuel 3,5
Part tarif de jour dans la consommation 60%
Prix tarif de jour 18 cts / kWh
Prix tarif de nuit 10 cts / kWh

Besoins totaux en chaleur: $400 \times 180 = 72000$ MJ

Consommation électrique de la pompe à chaleur:
 $72000 : 3,5 = 20600$ MJ = 5714 kWh

Tarif de jour: $5714 \times 60\% \times 18 =$ Fr. 620.–
Tarif de nuit: $5714 \times 40\% \times 10 =$ Fr. 230.–

Coût annuel d'électricité : Fr. 850.–

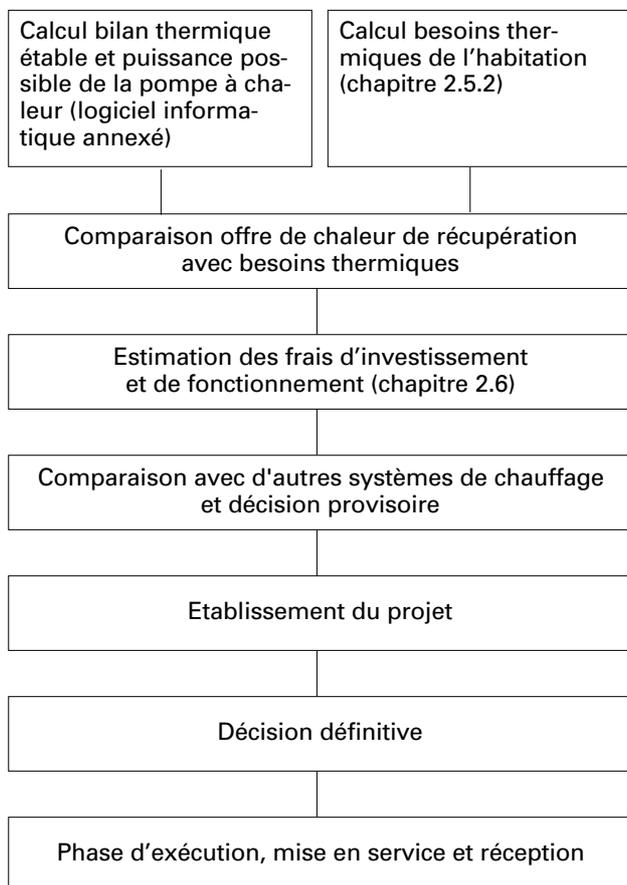
Les frais d'achat d'énergie d'une installation de chauffage au mazout pour couvrir les mêmes besoins atteignent également Fr. 850.– pour un prix de combustible de Fr. 40.– par 100 kg.

2.7 Planification

La planification d'une installation à pompe à chaleur touche à différents domaines qui sont interdépendants. Pour la récupération de chaleur, des connaissances concernant le climat d'étable, les systèmes de ventilation ainsi que les pompes à chaleur sont nécessaires. Pour l'utilisation de la chaleur, le bâtiment devra être examiné du point de vue énergétique et des compétences en chauffage central sont également demandées.

En conséquence, la planification d'une installation à pompe à chaleur, spécialement pour la récupération de la chaleur d'une étable, requiert un soin particulier. Ce travail devra être impérativement réalisé par un spécialiste en chauffage.

Le présent manuel donne des connaissances de base pour permettre la réalisation d'un avant-projet dans le cadre d'une exploitation nouvelle ou existante.



L'incitation pour la réalisation éventuelle d'une telle installation sera donnée au moment où une nouvelle étable, une nouvelle habitation ou l'assainissement d'un chauffage existant est examinée. L'amélioration du climat d'une étable ou d'un local d'élevage est également une raison suffisante pour en examiner l'opportunité.

Dans une première étape, calculer le bilan thermique de l'étable (à l'aide d'un ordinateur et du logiciel informatique décrit dans l'annexe). Le bilan sera calculé pour la température extérieure minimale en utilisant les données climatiques générales concernant les élevages. En tenant compte de l'état actuel des connaissances, une teneur en CO₂ de 0,5 % dans l'atmosphère de l'étable peut être admise. Pour les étables dont la température ambiante est inférieure à 15°C, la ventilation par recyclage sera choisie tandis que pour les locaux d'élevage à température supérieure, la chaleur sera récupérée à partir de l'air extrait. Le programme informatique calcule la puissance de la pompe à chaleur en fonction du coefficient d'amplification annuel.

La deuxième étape consistera à calculer ou estimer les besoins thermiques de l'habitation et d'éventuels autres consommateurs de chaleur (chapitre 2.5.2).

La comparaison entre ces deux résultats montrera si l'offre de chaleur par récupération permet de couvrir les besoins lorsque la température extérieure est minimale. Si cela n'est pas le cas, il conviendra d'examiner différentes possibilités d'améliorations: par exemple augmentation de l'offre de chaleur par meilleure isolation de l'étable, diminution de la consommation par meilleure isolation de l'habitation, chauffage d'appoint.

En troisième étape, les frais d'investissement seront estimés (chapitre 2.6) ou évalués sur la base d'offres. Il s'agira d'établir les coûts de l'ensemble de l'installation, en particulier ceux des canaux de ventilation, des conduites de transport de l'eau chaude et du fluide frigorigène y c. les travaux de fouille et de maçonnerie ainsi que le raccordement et les modifications du système de chauffage existant. Il est important d'examiner à ce stade l'emplacement optimal de l'évaporateur du point de vue accès et nettoyage.

Les frais d'achat d'électricité seront calculés sur la base du coefficient d'amplification annuel de la pompe à chaleur et des tarifs du distributeur local

(chapitre 2.6). Les frais d'entretien y seront ajoutés. Ceux-ci comprennent les coûts annuels pour le contrôle et la révision de la pompe à chaleur de même que le nettoyage de l'échangeur et le remplacement éventuel du filtre.

Les frais d'investissement et de fonctionnement seront ensuite comparés avec les coûts d'autres systèmes de chauffage (par exemple bois ou mazout). D'autres critères pourront être considérés pour une sélection provisoire: besoins en place, amélioration du climat de l'étable, effets écologiques.

Si l'évaluation préliminaire conduit à une décision positive, il est alors possible d'établir un projet définitif. Pour ce faire il est recommandé d'engager un spécialiste en chauffage qui sera chargé d'établir un projet détaillé accompagné d'offres permettant le calcul définitif des frais pour l'ensemble de l'installation. Les détails d'exécution seront examinés à ce moment, en particulier l'utilisation de l'énergie dans l'habitation. Sur la base de ce projet, le maître d'œuvre pourra prendre une décision définitive.

La dernière étape concerne l'exécution avec comparaison des offres, adjudication, conduite des travaux et mise en service. Pour une installation à pompe à chaleur, il est important que la responsabilité pour l'ensemble de l'installation soit portée par une seule personne (ingénieur ou technicien spécialisé). Ce point doit être précisé dans le contrat d'entreprise. Cette personne organise aussi la réception, la remise de l'installation au maître de l'ouvrage ainsi que la formation de l'exploitant. Il est indispensable qu'un protocole de réception soit établi, afin que les performances garanties par le fournisseur soient contrôlées. En cas de problème ultérieur, ce protocole pourra être utile pour établir un diagnostic. L'expérience a montré que très souvent la régulation des pompes à chaleur est mal adaptée au système de chauffage de l'utilisateur. Il est donc important que le responsable du projet assure un suivi de l'installation pendant au moins une année pour effectuer les mises au point nécessaires.

Critères déterminants pour le choix d'une pompe à chaleur

- Récupération de chaleur de l'air recyclé ou de l'air extrait
- Evaporateur à échange direct ou à échangeur de chaleur
- Emplacement optimal pour l'entretien et le nettoyage

Contenu d'une documentation pour le maître d'œuvre

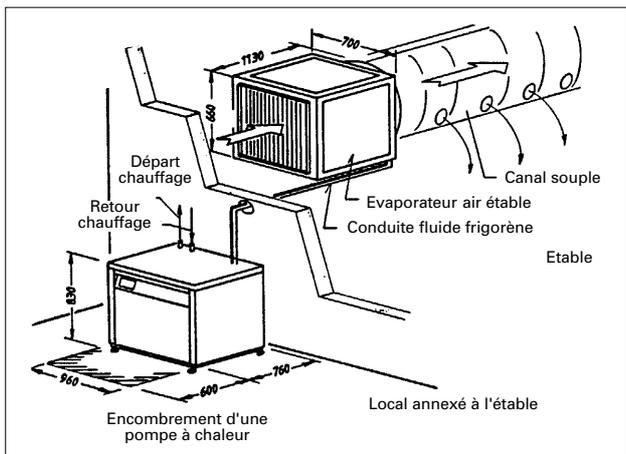
- Protocole de réception avec résultats mesurés
- Instructions de service et d'entretien
- Contrat d'entretien
- Dossier de calcul (par ex. besoins thermiques de l'habitation)
- Protocoles vides à remplir pour contrôle régulier par l'exploitant

Bilan thermique (à -13°C)

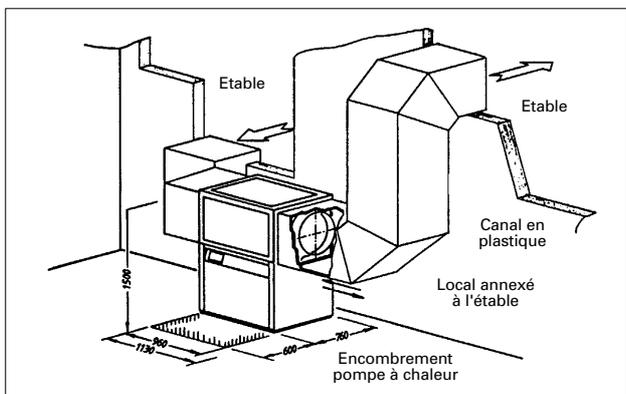
Paramètre de la ventilation	0,35%	0,5%-CO ₂
Débit d'air (m ³ /h)	1120	760
Chaleur sensible (W)	16870	16870
Pertes de chaleur par transmission (W)	-5300	-5300
Pertes de chaleur par ventilation (W)	-8440	-5740
Excédent de chaleur (W)	3130	5830
Puissance thermique pompe à chaleur (W)	4700	8750

La maison d'habitation peut être chauffée si l'on admet une teneur maximale en CO₂ de 0,5%.

A température extérieure minimale de -13°C, le débit d'air recyclé atteint 1500 m³/h (moyenne sur 24 heures). La condensation produit 2,5 litres d'eau par heure.



Exemple d'une installation «split» avec évaporateur direct pour récupération de chaleur à partir d'air recyclé



Exemple de pompe à chaleur compacte pour récupération de chaleur d'air recyclé

2.8 Exemples d'installations

2.8.1 Etables pour vaches ou bovins d'élevage

Une vache de 500 kg produit une puissance calorifique d'un bon kW, dont les trois quarts sous forme de chaleur sensible et un quart sous forme de chaleur latente (vapeur d'eau) en hiver. Cette chaleur est disponible à une température de 10 à 15°C. Ce sont là des conditions idéales pour une pompe à chaleur.

Dans la plupart des cas, des pompes à chaleur travaillant avec l'air recyclé sont installées dans les écuries à bovins pour en récupérer la chaleur excédentaire et l'humidité. L'air recyclé y est refroidi d'environ 6 à 7°C. Pour maintenir la teneur en CO₂ à un niveau inférieur à 0,35% (pointes horaires jusqu'à 0,5%), de l'air frais est introduit par ventilation naturelle ou forcée.

Exemple d'une étable pour vaches

Etable

Effectif d'animaux:	20 vaches de 600 kg chacune
Chaleur disponible:	22 kW
Surface au sol de l'étable:	189 m ²
Coefficient moyen de transmission de chaleur k du bâtiment:	0,7 W/m ² K
Température de l'étable:	10°C
Humidité relative dans l'étable:	80 %
Température extérieure minimale:	-13°C

Pompe à chaleur

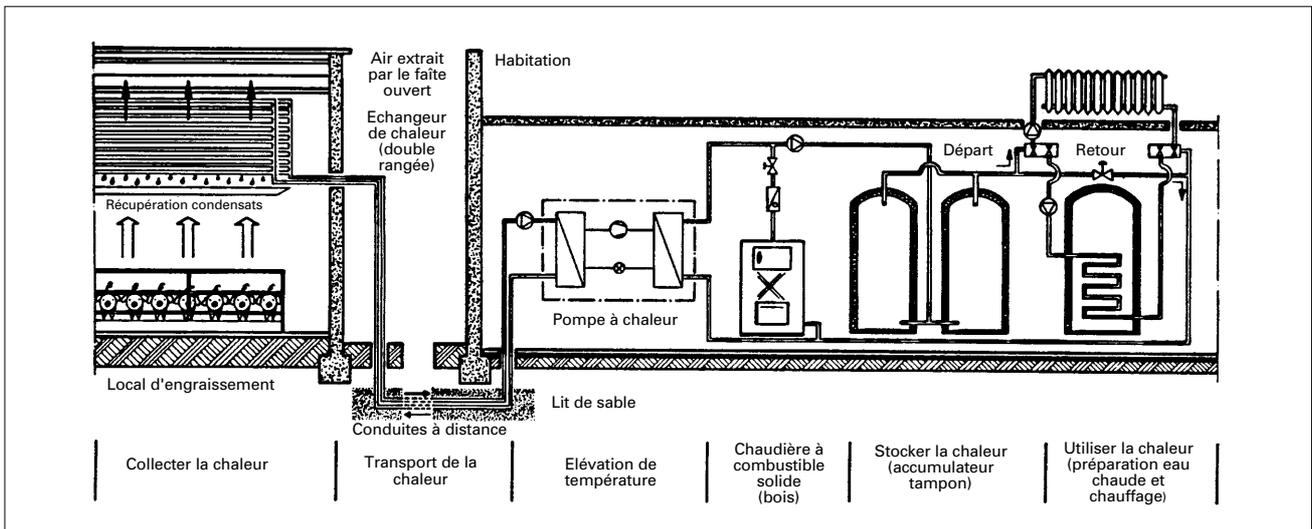
Coefficient de performance annuel:	3,0
Pompe à chaleur à recyclage d'air	

Habitation

Surface chauffée:	170 m ²
Besoins thermiques spécifiques:	50 W/m ²
Puissance de chauffe:	8500 W

2.8.2 Porcherie d'engraissement

Dans les porcheries d'engraissement, la chaleur est généralement récupérée à partir de l'air extrait. La température à l'intérieur du local varie entre 15 et 20°C, ce qui signifie qu'une plus grande quantité de chaleur peut être récupérée par rapport à l'air recyclé. Un abaissement de température de 10°C permet un gain de chaleur d'environ 6 Wh par m³ d'air extrait. Comme les gaz contenus dans l'atmosphère d'un élevage de porcs sont plus nocifs, la récupération n'est en pratique réalisée qu'à l'aide d'échangeurs de chaleur en matières synthétiques. Les échangeurs sont installés directement dans le courant d'air extrait au plafond du local (échangeurs à convection naturelle). Le montage dans le courant d'air extrait induit des pertes de charge supérieures, donc une consommation électrique supérieure des ventilateurs. L'échangeur à convection naturelle est caractérisé par un coefficient d'échange thermique plus faible et exige donc une plus grande surface.



Porcherie d'engraissement avec échangeurs de chaleur à convection naturelle dans l'air extrait (sans ventilateur)

Bilan thermique (à -13°C)

Paramètre de la ventilation	0,35%	0,5%-CO ₂
Débit d'air (m ³ /h)	807	764
Chaleur sensible (W)	10916	10916
Pertes de chaleur par transmission (W)	-3920	-3920
Pertes de chaleur par ventilation (W)	-7207	-6826
Déficit / excédent de chaleur (W)	-211	170
Chaleur récupérée de l'air extrait	4541	4301
Puissance thermique pompe à chaleur (W)	6812	6451

A température extérieure minimale la puissance fournie par la pompe à chaleur n'est pas suffisante pour chauffer l'habitation. Cette puissance couvre les besoins à température extérieure de -4°C.

Le bilan thermique du local d'engraissement est pratiquement équilibré à la température extérieure minimale. Ce qui signifie qu'il n'est pas nécessaire d'équiper le local d'un chauffage.

Exemple d'une porcherie d'engraissement**Local d'engraissement**

Effectif d'animaux: 40 porcs d'engraissement de 40 kg chacun
40 porcs d'engraissement de 80 kg chacun

Chaleur produite: 11,4 kW
Surface du local d'engraissement: 108 m²
Valeur moyenne du coefficient k du bâtiment: 0,6 W/m² K
Température du local: 15°C
Humidité relative de l'air: 75 %
Température extérieure minimale: -13°C

Pompe à chaleur

Coefficient de performance annuel: 3,0
Pompe à chaleur récupérant la chaleur de l'air extrait

Habitation

Surface chauffée: 170 m²
Besoins thermiques spécifiques: 50 W/m²
Puissance de chauffe: 8500 W

3. Echangeurs de chaleur

3.1	Introduction	41
3.2	Notions générales	41
3.3	Corrosion et encrassement	42
3.4	Systèmes d'échangeurs de chaleur	43
3.4.1	Echangeurs à plaques	43
3.4.2	Echangeurs de chaleur interconnectés par conduites	44
3.4.3	Echangeurs de chaleur en torche de tuyaux plastiques	45
3.4.4	Echangeurs rotatifs et conduites chauffantes	46
3.5	Dimensionnement d'installations à échangeurs de chaleur	46
3.5.1	Introduction	46
3.5.2	Calcul du débit d'air	47
3.5.3	Calcul de la puissance de l'échangeur de chaleur	48
3.5.4	Garantie/Réception	48
3.5.5	Service d'été	48
3.6	Rentabilité	49
3.6.1	Frais d'investissement et d'exploitation	49
3.6.2	Utilisation de la chaleur récupérée	49
3.7	Exemples d'installations	50
3.7.1	Elevage de porcs	50
3.7.2	Poulailler	51

3. Echangeurs de chaleur

3.1 Introduction

Les animaux dégagent de la chaleur et de l'humidité sous forme de vapeur. Ces gaz doivent être évacués et remplacés par de l'air frais. Dans les élevages de volailles et de porcelets, cet air frais doit en outre être chauffé. Pour ce faire, les moyens suivants sont à disposition :

- raccordement au chauffage central de l'habitation par l'intermédiaire de conduites de chauffage à distance ;
- installation d'un chauffage indépendant (à mazout, au gaz ou à l'électricité) ;
- installation d'un échangeur de récupération de chaleur sur la ventilation du local d'élevage.

Tant du point de vue énergétique qu'écologique, l'échangeur représente la solution la plus rationnelle. Si il est bien construit et bien intégré au bâtiment d'élevage, il représente même une solution financièrement intéressante par rapport à un chauffage conventionnel.

L'échangeur a pour tâche de récupérer la chaleur de l'air extrait du bâtiment d'élevage pour la transmettre à l'air frais introduit.

Comme la ventilation doit évacuer des gaz nocifs et de l'humidité avec l'air vicié, le système de récupération de chaleur doit assurer une séparation complète entre air extrait et air sec et frais introduit.

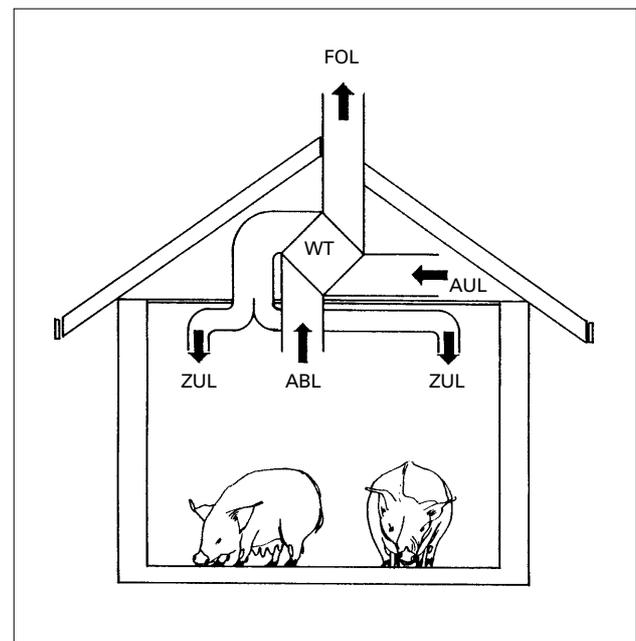
Les échangeurs trouvent la majorité de leurs applications dans les élevages de porcs et de volaille. Il y a peu d'expérience disponible pour les élevages de bovins.

3.2 Notions générales

L'air évacué du local d'élevage est nommé air ambiant avant l'échangeur et air extrait après l'échangeur. L'air frais est appelé air extérieur avant son passage dans l'échangeur et air introduit après l'échangeur. Dans la plupart des cas, on se limitera aux termes d'air extrait et d'air introduit, ce qui sera le cas pour la suite de ce document.

Le critère d'évaluation de la qualité d'un échangeur de chaleur est le rendement, nommé également le facteur de récupération. Il donne le rapport entre le

Echangeur de chaleur pour bâtiment d'élevage



WT: Echangeur de chaleur
 ABL: Air ambiant
 FOL: Air extrait
 AUL: Air extérieur
 ZUL: Air introduit

Rendement = $\frac{T_{ZUL} - T_{AUL}}{T_{ABL} - T_{AUL}}$			
T:	Température		
AUL:	Air extérieur		
ZUL:	Air introduit		
ABL:	Air ambiant		
Exemple			
Rendement	0,5	0,5	0,6
Température air extérieur (AUL)	-5	0	-5°C
Température air introduit (ZUL)	6	8	8°C
Température air ambiant (ABL)	17	17	17°C

réchauffement de l'air introduit et la différence de température entre air ambiant et air extérieur.

Le rendement est fonction du type et de la construction de l'échangeur, du niveau de température ainsi que de sa sensibilité à l'encrassement. En pratique, les rendements sont compris entre 0,2 et 0,7. Un échangeur de bonne qualité devrait avoir un rendement d'au moins 0,5 (>50 %) sous toutes les conditions de fonctionnement.

3.3 Corrosion et encrassement

Un échangeur de chaleur doit atteindre une durée de vie suffisante et en conséquence, il devra pouvoir résister à la corrosion par les gaz nocifs contenus dans l'air extrait. Il sera donc construit en matériaux résistant à la corrosion ou revêtus d'une protection adéquate. La présence d'ammoniaque dans l'air extrait exclu l'usage de tous métaux à base d'alliages de cuivre et d'aluminium (Cu, Al, Ms). Dans les cas où cela n'est financièrement pas acceptable (par exemple lamelles en aluminium à remplacer par de l'acier inoxydable), les matériaux devraient recevoir un revêtement de protection non poreux et résistant à la diffusion. Des laques à deux composants d'une épaisseur d'environ 100 microns donnent satisfaction.

Tout échangeur installé dans un local d'élevage s'encrasse rapidement. Il sera donc construit de manière à ce que les particules de poussières y adhèrent peu ou mal. Par exemple, le plastique ou un revêtement synthétique offre une adhésion moindre qu'une surface métallique ou en oxyde métallique nue qui est relativement poreuse. Les espaces entre lamelles ou plaques seront suffisants pour permettre un nettoyage complet des surfaces d'échange. L'installation de filtres diminue l'encrassement, mais par contre ceux-ci devront être nettoyés fréquemment (une fois par semaine au moins) sans pour autant éviter le nettoyage de l'échangeur (une fois par mois). Les filtres augmentent la résistance au passage de l'air et en conséquence la consommation d'électricité des ventilateurs d'extraction de l'air.

3.4 Systèmes d'échangeurs de chaleur

3.4.1 Echangeurs à plaques

Général

L'air extrait et l'air introduit sont forcés le long de plaques de séparation; la chaleur de l'air chaud passe à travers celles-ci pour réchauffer l'air introduit. Lorsque le point de rosée de l'air extrait est atteint au cours de son refroidissement, il y a dépôt d'eau de condensation avec dégagement de chaleur latente. Les échangeurs à plaques ont donné de bons résultats en particulier dans des porcheries et des élevages de volaille où ils sont les plus répandus.

Les matériaux les plus utilisés pour leur construction sont les plaques de matière synthétique ou d'aluminium. Le verre et les feuilles plastiques ne sont guère employés du fait de leur fragilité. L'espace entre plaques ne devrait pas être inférieur à 8 mm pour éviter l'encrassement.

Limite de givrage

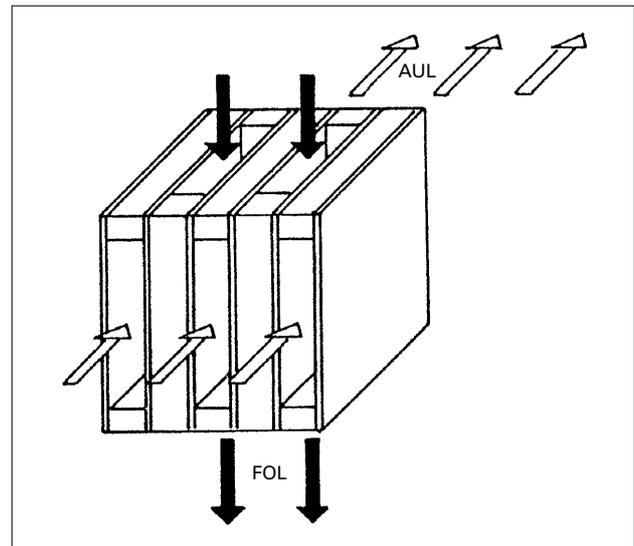
Les échangeurs à plaques ont malheureusement une limite de givrage assez élevée. Avec une température d'air extérieur de -10°C , la température des plaques atteint à peine 0°C si bien que l'eau de condensation libérée par l'air extrait commence à geler.

La couche de glace qui se forme diminue et le débit d'air et le coefficient de transmission de chaleur, si bien que la température à l'intérieur de l'échangeur continue de diminuer jusqu'à ce qu'il soit complètement colmaté par la glace. Il faut donc éviter que la température à l'entrée de l'échangeur descende au dessous de -10°C au plus froid de l'hiver. Un moyen souvent appliqué pour éviter le givrage est d'aspirer l'air extérieur par le vide entre toit et plafond de l'étable. La perte de chaleur par transmission à travers ce dernier permet le préchauffage l'air introduit. Une autre méthode consiste à diminuer le débit d'air introduit à travers l'échangeur sans changer celui de l'air extrait, ce qui est réalisé par un by-pass qui introduit directement une partie de l'air frais sans passer par l'échangeur.

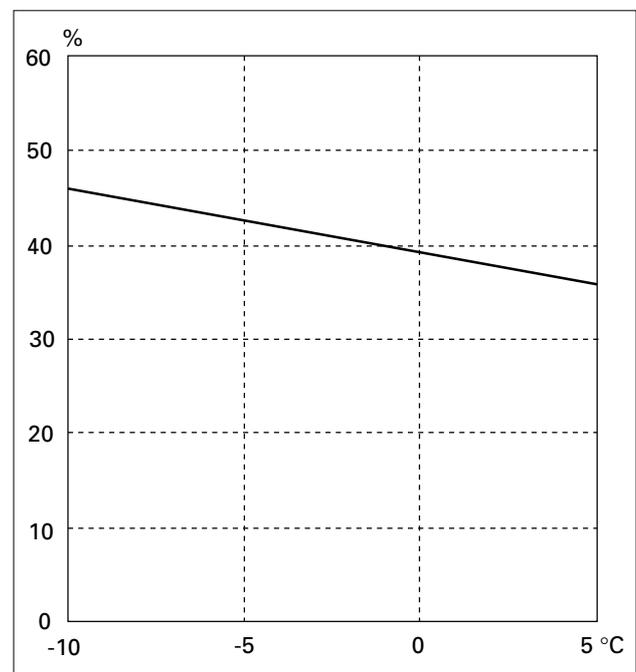
Nettoyage

Un échangeur à plaques devrait être nettoyé par rinçage à l'eau sous pression en gros toutes les trois

Echangeur de chaleur à plaques

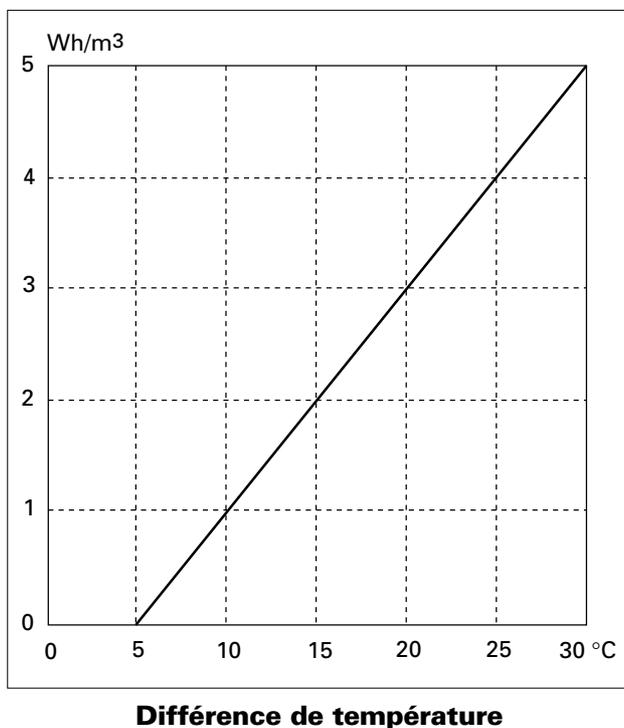


FOL = air extrait
AUL = air extérieur



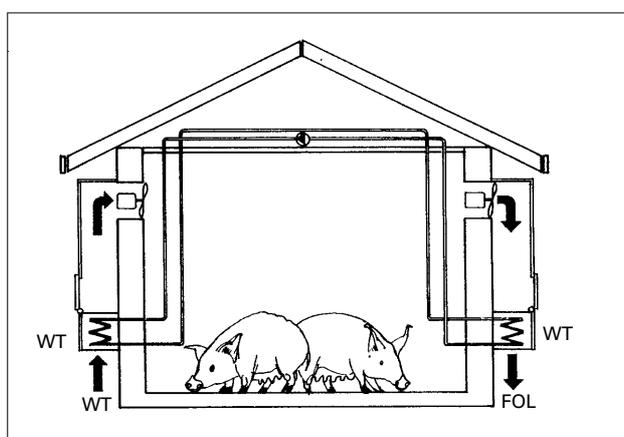
Température extérieure

Rendements moyens mesurés d'un échangeur de chaleur à plaques installé dans une porcherie, en fonction de la température extérieure. Les rendements obtenus sont plus faibles que ceux d'une installation moderne.



Récupération moyenne de chaleur d'échangeurs de chaleur à plaques pour élevages en fonction de la différence de température entre air extérieur et air ambiant.

Récupération de chaleur à partir d'échangeurs interconnectés par conduites



WT = échangeur de chaleur
 AUL = air extérieur (introduit)
 FOL = air extrait

semaines. Pour ce faire, l'accès à l'échangeur devrait être facile et un raccordement d'eau ainsi qu'un système d'écoulement indispensables. Les échangeurs construits en modules tiroirs pouvant être facilement extraits sont faciles à nettoyer.

Si l'intervalle entre nettoyages est trop long, le débit d'air ainsi que l'échange de chaleur se réduit. Dans le cas extrême, l'échangeur peut être totalement colmaté par une masse de poussière humide et collante.

Dimension des échangeurs

Les échangeurs de chaleur à plaques ont un coefficient d'échange thermique d'environ $10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pour chaque $25 \text{ m}^3/\text{h}$ de débit d'air extrait (aux conditions de débit minimum) il faut compter 1 m^2 de surface d'échange.

3.4.2 Echangeurs de chaleur interconnectés par conduites

Général

L'air extrait est refroidi dans des échangeurs à lamelles ou à tubes et il réchauffe ainsi le mélange eau/glycol qu'ils contiennent. Ce liquide est conduit par tuyaux et pompe de circulation vers l'échangeur réchauffant l'air introduit.

Ce système présente l'avantage de ne pas devoir amener l'air extrait et l'air introduit par des canaux vers les échangeurs. Les conduites d'eau glycolée prennent peu de place et sont moins onéreuses à l'achat et au montage. La chaleur récupérée de l'air extrait peut être conduite vers chaque local où de la chaleur est demandée. Dans le cas d'une porcherie, il est ainsi possible de conduire la chaleur récupérée dans le local d'engraissement vers les porcelets.

Construction des échangeurs de chaleur lamellaires

Les échangeurs de chaleur lamellaires remplis d'eau glycolée devraient être pourvus de collecteurs aux deux extrémités et pouvoir être vidangés intégralement.

Les conduites sont réalisées en acier galvanisé ou inoxydable V4A (résistant aux acides), les collecteurs en acier sablé et peints ou en V4A. L'aluminium avec revêtement, épaisseur $0,4 \text{ mm}$, est pratiquement exclusivement utilisé pour les lamelles. Le revêtement a une épaisseur minimale de $100\mu\text{m}$ et ne sera

pas poreux. Si l'espace entre lamelles est inférieur à 5mm, l'échangeur se colmatara rapidement.

Avant la mise en service, l'installation sera rincée soigneusement pour évacuer toutes les particules de rouille ou résidus de soudage avant de la remplir avec un mélange d'eau et de glycol.

Limite de givrage

La surface des tuyauteries ne doit pas atteindre une température inférieure à 0°C également dans les échangeurs interconnectés afin d'éviter le gel des condensats de l'air extrait.

La limite de givrage peut être abaissée par des moyens relativement simples à une température inférieure ou égale à -20°C.

La température de l'eau glycolée peut être augmentée, et ainsi abaisser la limite de givrage, en augmentant la surface d'échange en contact avec l'air extrait par rapport celle de l'air introduit. Le même effet peut être obtenu en augmentant le débit de circulation et par là diminuer la différence de température du fluide caloporteur entre entrée et sortie des échangeurs. Une régulation antigel peut être également intégrée à l'installation. Celle-ci diminuera la puissance du récupérateur lorsque les températures sont basses évitant ainsi le gel des condensats.

Nettoyage

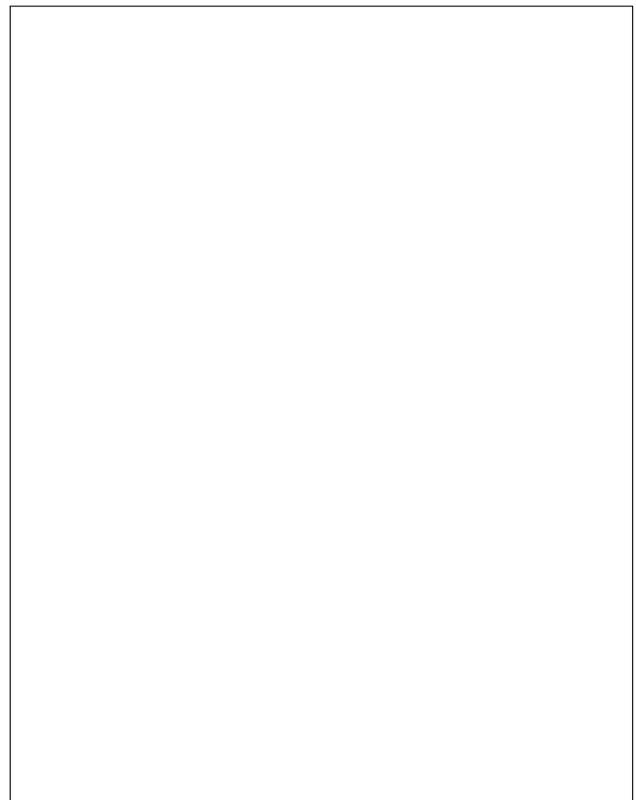
Etant donné l'espace réduit à 5 mm entre les lamelles de l'échangeur, l'intervalle entre nettoyages sera raccourci à environ deux semaines. Comme les échangeurs sont raccordés à des tuyauteries, leur nettoyage s'effectuera sans démontage. Il est donc très important de prévoir un accès aisé avec un raccordement à de l'eau sous pression et un écoulement. Les dépôts de poussière seront évacués des lamelles par un rinçage abondant.

3.4.3 Echangeurs de chaleur en torche de tuyaux plastiques

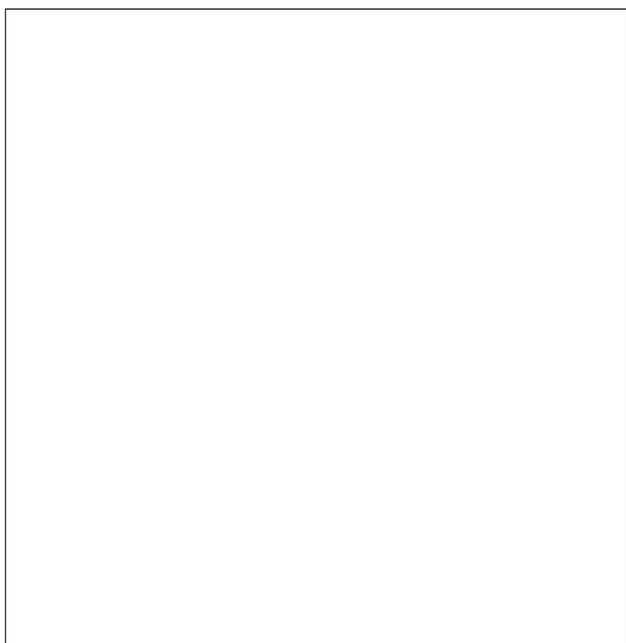
Des torches de tuyaux en plastique peuvent également être utilisées pour la récupération de la chaleur de l'air extrait d'un bâtiment d'élevage. La transmission de chaleur à l'air introduit s'effectuant toujours au moyen d'échangeurs à lamelles

Le grand avantage de ce type d'échangeur est la facilité avec laquelle il peut être nettoyé et sa faible sensibilité à l'encrassement.

Echangeur de chaleur à lamelles



Echangeur de chaleur en torche de tuyaux plastiques



L'inconvénient est la mauvaise transmission de chaleur et une faible surface utile. Pour obtenir un rendement suffisant (d'environ 50 %), la longueur des conduites installées sera importante.

Il est aussi important de prévoir l'utilisation de tuyaux en plastique totalement imperméables à la diffusion d'oxygène (par exemple avec feuille d'aluminium intégrée). La pénétration d'oxygène doit être évitée, car elle neutralise les inhibiteurs de corrosion avec pour conséquence une attaque des matériaux (trous par corrosion locale).

3.4.4 Echangeur rotatifs et conduites chauffantes

Les échangeurs de chaleur rotatifs ne sont pas adaptés pour des applications dans l'agriculture. Ils sont sensibles à l'encrassement et à la corrosion, et laissent passer l'humidité de l'air extrait dans l'air introduit. Des pertes volumétriques par manque d'étanchéité ne peuvent être évitées et leur nettoyage n'est pas sans problèmes.

Les conduites chauffantes à lamelles (dites heat-pipe) utilisables dans le domaine agricole n'existent pas sur le marché. Les produits disponibles sont réalisés dans leur majorité en tubes de cuivre à lamelles en aluminium très minces et à faible espacement. Ces produits sont sensibles à la corrosion et à l'encrassement; ils sont difficiles à nettoyer. Leur usage n'est donc pas recommandé.

3.5 Dimensionnement d'installations à échangeurs de chaleur

3.5.1 Introduction

Comme les échangeurs de chaleur font partie du système de ventilation du bâtiment d'élevage, ils doivent y être intégrés au moment de sa conception. Spécialement pour de petites unités, le planificateur de l'installation de ventilation sera responsable du dimensionnement des échangeurs, des ventilateurs, des canaux d'air et de la régulation et de la planification de l'installation de ventilation.

Les échangeurs peuvent être installés aussi bien dans des élevages complets que sur des bâtiments isolés. Des locaux destinés aux porcelets et aux truies peuvent être soumis à un déficit thermique en cas de mauvaise isolation, ceci même au cas où des récupérateurs de chaleur y seraient installés. Dans ce cas, un bilan positif peut être obtenu en rassemblant la chaleur récupérée dans d'autres parties du bâtiment (locaux d'engraissement) et en la ramenant dans la partie thermiquement déficitaire. Les calculs présentés ci-après sont donc valables aussi bien pour l'application à un bâtiment unique qu'à un élevage complet.

Ce document n'est pas consacré au calcul de la ventilation d'un bâtiment d'élevage, mais présente seulement la procédure de dimensionnement d'un récupérateur de chaleur à échangeur (débit d'air et performance de l'échangeur).

Au contraire des récupérateurs utilisés dans l'industrie et le commerce, la température de l'air introduit après l'échangeur ne joue qu'un rôle secondaire. Le débit d'air est fixé en fonction des données du climat du local d'élevage (évacuation de l'humidité et du gaz carbonique). La fonction de l'échangeur est de récupérer un maximum de chaleur à partir de l'air extrait et d'élever au maximum la température de l'air introduit.

Lors du dimensionnement d'un récupérateur de chaleur, il s'agit de déterminer les débits minimal et maximum ainsi que la puissance de l'échangeur.

3.5.2 Calcul du débit d'air

Le débit d'air utile pour le calcul de l'échangeur se détermine à l'aide du logiciel informatique « climat d'étable », voir annexe. Le débit d'air minimum correspond aux conditions hivernales lorsque la température extérieure est la plus basse. Le débit maximum est celui qui est atteint au moment où la température extérieure est suffisamment élevée pour justifier la mise hors service de l'échangeur de chaleur. Celle-ci est atteinte lorsque le bilan thermique du bâtiment est équilibré sans récupération.

Avec un récupérateur de chaleur à échangeur, le bilan thermique du bâtiment d'élevage est excédentaire lorsque la température extérieure est supérieure à la température minimale admise pour le dimensionnement. A ce moment, le débit des

Exemple			
Elevage de porcs avec 100 porcelets de 20 kg			
Débit d'air selon table des taux d'humidité			
Température de l'étable:		20°C	
Température extérieure minimale:		-12°C	
Humidité relative extérieure:		100 / 80 %	
Echangeur en service jusqu'à température extérieure de:		15°C	
Humidité relative dans le local d'élevage:		70 %	
Température extérieure (°C):		-12	15
Débit d'air	(m ³ / h)	513	2462
Chaleur sensible dégagée par les animaux	(W)	6241	6241
Pertes par transmission	(W)	-3200	-500
Pertes par ventilation	(W)	-5247	-4220
Bilan thermique sans échangeur	(W)	-2206	1521
Chaleur récupérée par l'échangeur	(W)	2772	0
Bilan thermique avec échangeur	(W)	566	1521
Dimensionnement de l'échangeur			
Débit d'air minimum:		513 m ³ / h	
Débit d'air maximum:		2642 m ³ / h	
Puissance d'échange nécessaire par -12°C:			2,7kW

ventilateurs pourra être augmenté par rapport au minimum théorique, ce qui conduira à une amélioration du climat à l'intérieur des locaux d'élevage sans manque de chaleur.

En règle générale, l'échangeur de chaleur restera en service jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de récupération utile (surchauffe du local). Ceci est le cas au moment où la température extérieure ne sera inférieure que de 5 à 10°C à la température ambiante. Le débit maximum de l'échangeur sera donc déterminé pour une température extérieure inférieure de 5°C à la température de l'étable. Un débit d'air suffisant sera ainsi assuré avec échangeur en service durant l'entre saison au moment où la température extérieure varie fortement au cours de la journée.

Le débit du ventilateur de l'échangeur sera réglable entre les débits minimum et maximum. A titre indicatif, une valeur comprise entre le triple et le quintuple du débit minimum peut être admise pour le débit maximum.

3.5.3 Calcul de la puissance de l'échangeur de chaleur

La puissance d'échange peut être déterminée à l'aide du logiciel informatique pour ordinateur personnel annexé.

3.5.4 Garantie / Réception

Le rendement d'un échangeur de chaleur doit être garanti par écrit par le fournisseur. Il devrait atteindre ou dépasser 50 % pour des différences de température de 30 à 10°C (valeur pour échangeur propre).

Lors de la réception de l'installation de ventilation, il est dans l'intérêt du maître de l'ouvrage que les débits et les puissances soient mesurées et protocolées. Ceci permet de calculer le rendement et le contrôle des performances garanties. En cas de problème ultérieur, le protocole peut s'avérer très utile pour un diagnostic.

3.5.5 Service d'été

Les échangeurs ne sont en service qu'en hiver et durant l'entre saison. L'installation devra par contre

être dimensionnée pour fonctionner l'été. Les débits correspondants peuvent être déterminés à l'aide du logiciel informatique « Climat d'étable ».

Le service d'été sera réalisé soit par une installation de ventilation indépendante, soit intégré au récupérateur de chaleur. Dans ce dernier cas, l'échangeur sera détourné par un by-pass, ce qui diminue les pertes de charge et conduit à une augmentation du débit. Dans certains produits, les modules d'échange peuvent être retirés de leur boîtier et remplacés par des « modules d'été », ce qui a le même effet qu'un by-pass.

3.6 Rentabilité

3.6.1 Frais d'investissement et d'exploitation

Les frais d'investissement pour un récupérateur de chaleur à échangeur sont difficiles à chiffrer en détail, car ce type d'installation est intégrée dans la ventilation du bâtiment d'élevage qui doit de toute manière être réalisée. Le calcul économique d'un récupérateur ne va donc tenir compte que du supplément d'investissement nécessaire pour des canaux de ventilation plus longs, les régulateurs de débit, les by-pass et l'échangeur de chaleur lui-même. L'exemple d'une porcherie comprenant quatre locaux d'engraissement est donné dans le tableau ci-contre.

Les frais d'exploitation comprennent le coût de l'augmentation de consommation d'électricité pour des ventilateurs plus puissants ainsi que les frais d'entretien. Les besoins en électricité peuvent être évalués en tenant compte des pertes de charge supplémentaires dues aux échangeurs. Ces pertes ne devraient pas excéder 100 à 150 Pa au débit maximum. Pour comparaison, une perte de charge de 80 Pa pour un débit de 2000 m³ / h correspond à une puissance électrique de 80 watt.

Les frais d'entretien comprennent surtout le nettoyage des échangeurs de chaleur. Pour ce travail, il faut compter en gros une demi à une heure de travail tous les quinze jours à un mois.

Exemple de frais d'investissement (prix 1990)

Ventilation à pression constante avec échangeurs de chaleur intégrés d'un bâtiment comprenant 4 locaux d'engraissement de porcs avec chacun 70 à 80 places (un échangeur par local).

Ventilation avec échangeur de chaleur à plaques en plastique (surface d'échange 40 m², débit maximum du ventilateur 4800 m³ / h):

4 x Fr. 2900.- Fr. 11 600.-

Canaux de ventilation, cheminées, prise sous toiture, régulation électronique, etc.

4 x Fr. 2500.- Fr. 10 000.-

Répartiteur d'air introduit dans la sous toiture:

Fr. 2500.-

Alarme:

Fr. 900.-

Montage et travaux d'adaptation:

Fr. 6000.-

Total:

Fr. 31 000.-

Part récupération de chaleur:

Echangeurs de chaleur avec leur boîtier:

Fr. 8000.-

Canaux de ventilation supplémentaires y c. montage:

Fr. 5000.-

Total part récupération de chaleur:

Fr. 13 000.-

3.6.2 Utilisation de la chaleur récupérée

Selon le rendement de l'échangeur de chaleur, 40 à 60 % de la chaleur perdue par ventilation peut être récupérée. Pour le calcul du bilan annuel, il ne faut compter que la chaleur effectivement valorisée (remplacement d'énergie de chauffage, amélioration du climat de l'étable par augmentation du débit d'air). Ce gain va dépendre en première ligne de la situation géographique de l'élevage et des paramètres du bâtiment (température intérieure, qualité de l'isolation, etc.). Pour des élevages exigeant une température ambiante relativement élevée (par exemple porcelets) et une isolation de qualité moyenne, l'échangeur restera en service environ 3000 heures par année. Pour des animaux en pré-engraissement, ce ne sont plus que 1000 heures. La chaleur utilement récupérée correspond pour une étable de 100 porcelets à environ 3000 à 6000 kWh, ce qui représente une économie de quelques centaines de francs par année.

Les frais d'investissements ne se laissent pas complètement amortir par la seule économie d'énergie. En général l'installation d'un récupérateur de chaleur à échangeur permet d'éviter l'installation d'un chauffage supplémentaire dans le bâtiment d'élevage. Dans ce cas, l'économie réalisée est plus qu'équilibrée, étant donné le prix supérieur d'un chauffage indépendant ou d'une conduite de chauffage à distance avec les radiateurs.

L'installation d'un échangeur de chaleur apporte encore d'autres avantages: l'air extérieur introduit est réchauffé en hiver d'environ 10°C, ce qui réduit les risques de refroidissement pour les animaux. Le climat dans le bâtiment est amélioré par le débit de ventilation supérieur nécessaire pour équilibrer le bilan thermique. ce qui réduit la teneur en gaz nocifs dans les locaux d'élevage, améliore la qualité de vie des animaux et produit un air plus sec qui permet de prévenir les dommages au bâtiment (par moisissures et condensation).

3.7 Exemples d'installations

3.7.1 Elevage de porcs

Une installation de récupération de chaleur centralisée est installée dans la porcherie de l'école d'agriculture de Flawil. Le bâtiment, d'une surface de 350 m², comprend trois locaux pour porcelets à cinq box

chacun, un local d'engraissement de 60 places et une étable pour truies, verrats et remontes. L'air extrait de chaque local est conduit vers un échangeur de chaleur central installé sous le toit. L'air extérieur est aspiré par la sous toiture dans l'échangeur puis réparti dans les locaux d'élevage. L'échangeur est du type à plaques en plastiques qui peuvent être extraites par paquets; sa surface d'échange est de 65 m². Le débit maximum des ventilateurs (air extrait et air introduit) est de 3000 m³/h. Le service d'été est assuré par des ventilateurs séparés.

Depuis la mise en service de l'installation de récupération, il n'est plus nécessaire de chauffer le bâtiment (à l'exception des lampes infrarouge des porcelets). Les calculs ont montré que l'installation est rentable, malgré les investissements relativement élevés de Fr. 20 000.- (prix 1980).

3.7.2 Poulailier

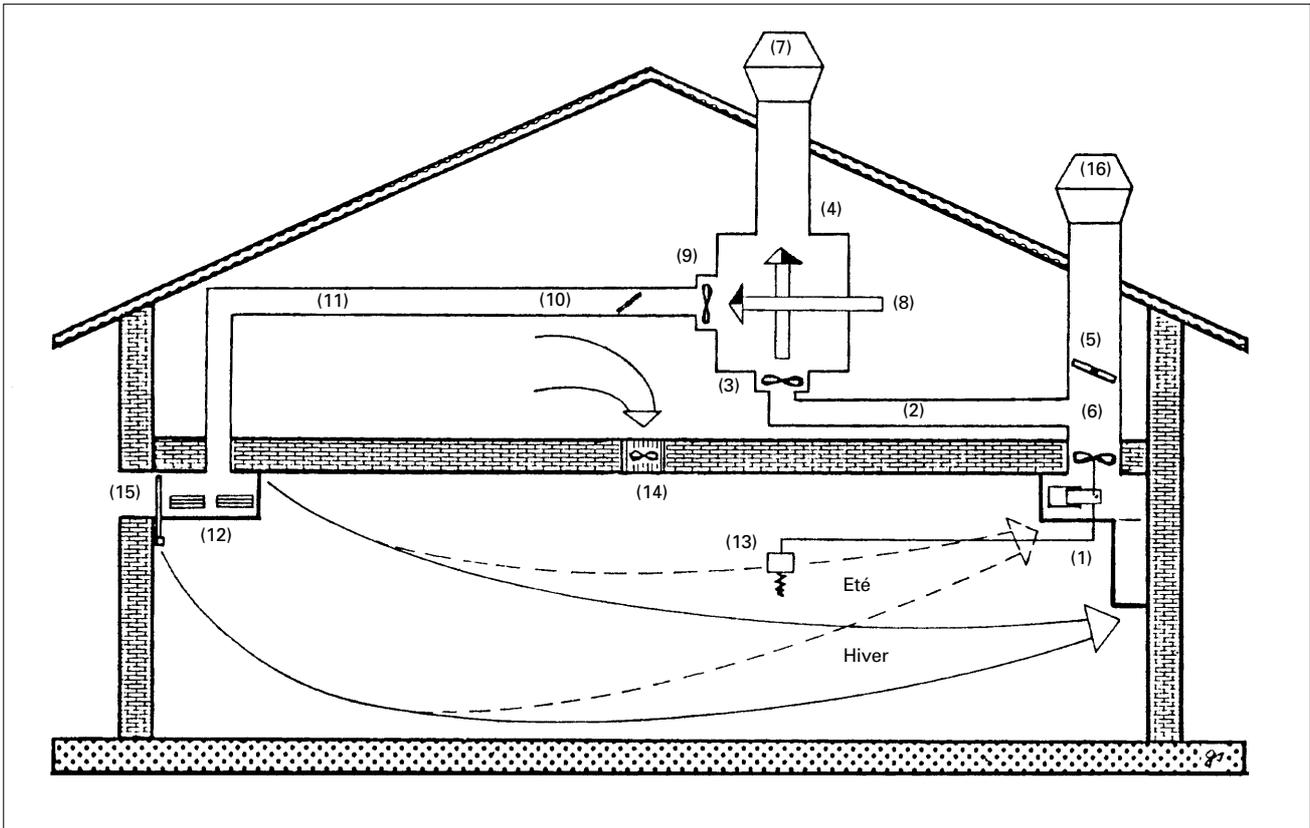
La récupération de chaleur est particulièrement intéressante pour les poulailiers, dans lesquels une température comprise entre 20 et 30°C est exigée suivant l'âge des animaux.

Les halles d'engraissement de poulets sont des unités réalisées clef en mains. Ce qui signifie que le bâtiment, la distribution d'aliments, l'évacuateur du fumier et la ventilation sont vendus en un bloc. En Suisse, un fournisseur équipe ses installations standard d'un échangeur de chaleur.

L'échangeur de chaleur est doté d'un soufflet cylindrique (voir figure) en aluminium revêtu d'une couche plastique, d'une surface d'environ 50 m². Le ventilateur, de type axial à double hélice, est capable de fournir un débit d'air maximum de 9000 m³/h.

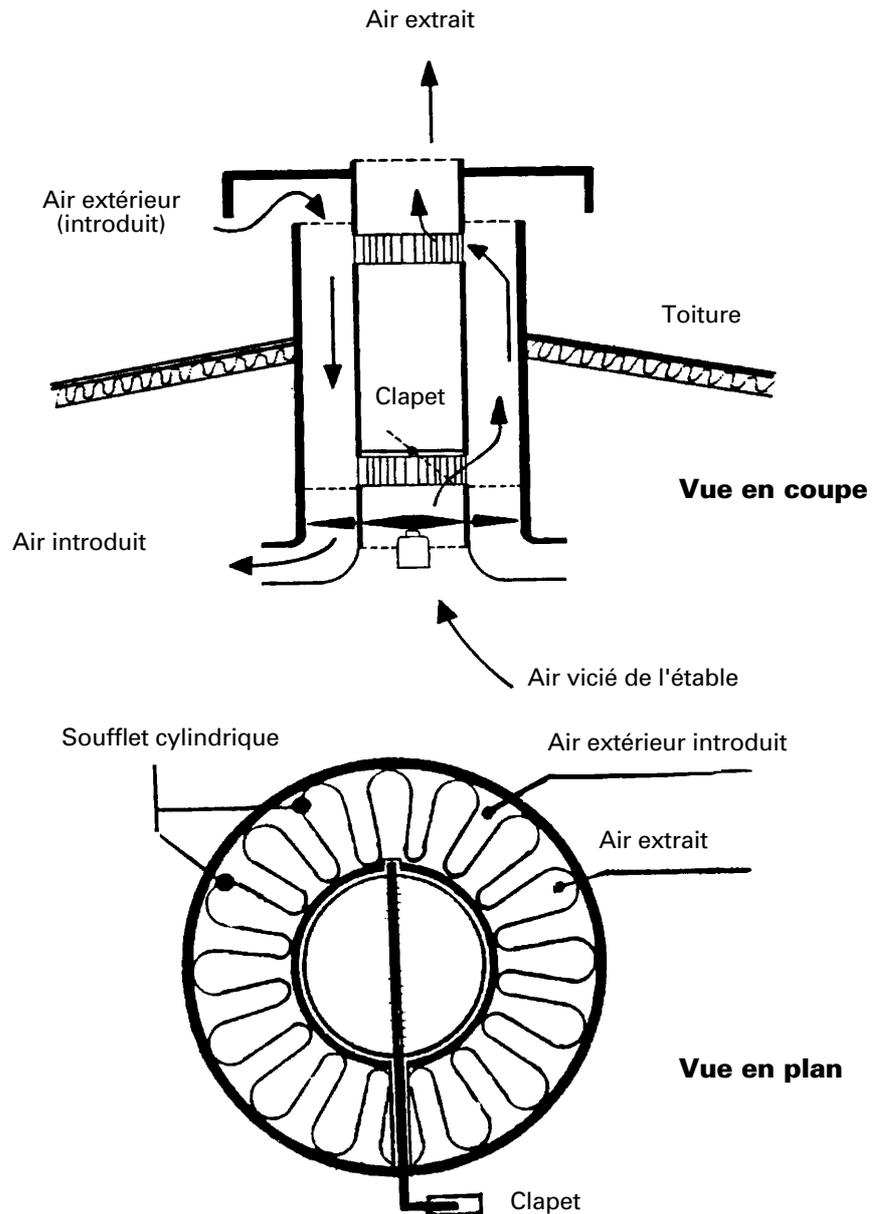
Une halle de 300 m² (environ 5000 poulets) est pourvue de deux unités de récupération à échangeur de chaleur. Des mesures ont montré que la consommation énergétique de ces unités a pu être diminuée de 60 %, ce qui correspond à environ 5000 kg de mazout par année. Le coût pour cette récupération de chaleur est de Fr. 15 000.-.

Récupération de chaleur par échangeur dans un élevage de porcs



- | | |
|---|--|
| 1: Canal collecteur d'air extrait | 10: Clapet de réglage dans le canal d'air introduit |
| 2: Canal d'amenée d'air à l'échangeur de chaleur | 11: Canal d'amenée d'air extérieur |
| 3: Ventilateur d'évacuation d'air du récupérateur | 12: Canal de distribution d'air introduit |
| 4: Echangeur de chaleur | 13: Thermostat du local d'élevage |
| 5: Clapet de réglage dans la cheminée d'air extrait | 14: Ouverture pour introduction d'air supplémentaire (depuis le local de préparation des aliments) |
| 6: Ventilateur de la cheminée | 15: Clapet à glissière pour air extérieur en service d'été |
| 7: Cheminée d'air extrait du récupérateur | 16: Cheminée d'air extrait pour service d'été |
| 8: Aspiration d'air extérieur sous le toit | |
| 9: Ventilateur d'air introduit du récupérateur | |

Echangeur de chaleur à soufflet cylindrique



Annexe

Logiciel PC climat d'étable version 4.1

55

Annexe

Logiciel PC climat d'étable version 4.1

1. Méthode de calcul FAT

Ludo Van Caenegem, Station fédérale de recherches en économie et technologie agricole (FAT)

La nouvelle méthode est basée sur des Normes C.I.G.R. (Commission internationale du Génie rural), des Normes SIA et des algorithmes de la FAT. Elle permet de calculer d'une façon dynamique le climat d'étable fonction de l'effectif moyen des animaux, du climat extérieur et de l'isolation du bâtiment. Elle comprend le calcul du bilan énergétique débit de ventilation, des orifices d'entrée et de sortie d'air, et de l'isolation minimale (valeur-k).

Les différences par rapport à la méthode utilisée jusqu'à présent (normes suisses du climat d'étable 1983) concernent les points suivants:

- Les calculs ne sont plus limités à la température optimale. Ils peuvent être exécutés pour des **plages** de températures.
- En ce qui concerne le dégagement de chaleur par les animaux (H_p), on distingue entre chaleur sensible (H_s) et chaleur latente (H_l); **$H_p = H_s + H_l$** .
- La chaleur totale (H_p) est corrigée en fonction de la température de l'étable.
- La proportion entre chaleur sensible (H_s) et latente (H_l) est calculée en fonction de la température.
- En ce qui concerne les pertes de chaleur par transmission on tient compte également des échanges avec le sol (+/-), des pertes des parois enterrées et de la condensation des vitres. (Méthode ThK77; Roulet, 1987: Energétique du bâtiment I). En été on tient compte du rayonnement solaire sur la toiture selon la méthode VSHL- (Verband schweiz. Heizungs- und Luftungsfirmer).
- Le débit de ventilation est basé sur le flux des masses (kg/h) non des volumes. Ceci permet de tenir compte de l'altitude (pression atmosphérique) d'une façon simple pour le calcul débits d'air à la fois pour le bilan H_2O et le bilan CO_2 .
- Les pertes de chaleur par la ventilation comprennent:
 - l'énergie nécessaire pour chauffer l'air frais extérieur introduit jusqu'à la température voulue.
 - l'énergie d'évaporation de l'eau sur le sol.

Cette méthode permet une optimisation de l'isolation de l'enveloppe tenant compte du bilan énergétique et du danger de condensation sur les parois et le plafond.

2. Calculs

Les calculs sont regroupés dans quatre niveaux:

Hiver (valable pour températures ext. < 20°C)

- production et dégagement de chaleur;
- débits de ventilation nécessaires selon bilan H_2O et CO_2 ;
- orifices nécessaires d'entrée et de sortie d'air;
- valeur-k minimale en vue du danger de condensation.

Été (valable pour des températures ext. > 20°C)

- débits de ventilation nécessaires selon bilan H_2O et CO_2 ;
- orifices nécessaires d'entrée et de sortie d'air.

Hiver avec échangeur de chaleur

- bilan énergétique avec et sans échangeur de chaleur;
- surface de l'échangeur de chaleur;
- eau de condensation dans l'échangeur de chaleur;
- température de l'air frais et de l'air vicié après l'échangeur de chaleur.

Hiver avec pompe à chaleur

- capacité réfrigérante et réchauffante nécessaire dans l'étable, énergie utile et puissance du moteur pour une à chaleur à air recyclé;
- débit de l'air recyclé à partir du bilan énergétique et H_2O ;
- capacité réfrigérante et réchauffante nécessaire dans étable. Énergie utile et puissance du moteur pour une pompe à chaleur à air de sortie.

Le logiciel fait les calculs d'une façon itérative pour une série de températures intérieures en fonction des paramètres suivants:

- climat extérieur (humidité relative et température selon situation géographique);

- humidité relative dans l'étable;
- enveloppe du bâtiment (superficies, valeur k, orientation);
- système de stabulation (surface sol mouillé, litière);
- animaux (genre, poids, nombre, production);
- rendement de l'échangeur de chaleur (WT);
- réfrigération de l'air recyclé dans la pompe à chaleur;
- température de l'air de sortie après la pompe à chaleur.

La plage des températures d'étable peut être modifiée. Les calculs pour l'échangeur de chaleur sont valables pour des échangeurs de chaleur à air croisé.

Les résultats sont présentés d'une façon graphique. La température extérieure et l'humidité relative intérieure concernées sont mentionnées dans chaque graphique.

3. Logiciel

Pour l'**installation** consultez la description ci-jointe (§ 6).

Le logiciel **démarre** en cliquant deux fois sur l'icône «Climat d'étable FAT». On peut ouvrir les différentes feuilles et graphiques à l'aide des menus (en haut de l'écran) ou des symboles (à gauche, vertical). Lors de la première utilisation **procéder comme suit**:

- Cliquer sur **ouvrir** (menu «climat»). Sélectionner dans le répertoire \FAT\CLIMAT1\DONNEES le fichier: Anbinfat.xls (exemple). La feuille: «Données générales» est ouverte. On peut se déplacer d'une cellule à l'autre en pressant la touche «Tab» (retour = Shift-Tab) ou à l'aide de la souris.
- Confirmer avec **OK**. La barre de symboles climat apparaît.
- Cliquer le premier symbole (soleil). La feuille: «Données climatologiques et topographiques» est ouverte.
- En pressant sur un des boutons en bas (Bâtiments, Bovins, Porcs, Autres Animaux, Valeurs défaut) on passe d'une feuille à l'autre et en même temps on sauve les données.
- Confirmer avec **OK**.
- Sous les trois symboles de données, on trouve 4 symboles, représentant chacun un groupe de graphiques. Au début le symbole «**W**» (Hiver) (quatrième symbole) est actif.
- On peut ouvrir les graphiques «Hiver» en pressant consécutivement sur un des quatre symboles en bas.
- Presser sur le symbole «**S**» (Eté) (cinquième symbole). Les symboles des graphiques «été» apparaissent.
- De la même façon on peut activer les graphiques «**Wt**» (Echangeur de chaleur) (sixième symbole) et «**Wp**» (Pompe à chaleur) (septième symbole).
- Pour **imprimer** cliquer «imprimer» (menu climat) et sélectionner les feuilles et graphiques désirés.
- Si l'on désire calculer un nouvel objet, il faut d'abord enregistrer et fermer le fichier précédent. ensuite cliquer «nouveau» (menu climat). Les résultats sont enregistrés dans le répertoire: \FAT\CLIMAT1\DONNEES.

Important: Avant de quitter le logiciel, il faut effacer l'écran en pressant un des symboles W, S, Wt ou Wp. Les **cellules** ne peuvent **pas être vides** (Valeur par défaut: «0», zéro).

4. Explication des tableaux

4.1 Données générales

Objet	Type de stabulation/animaux
Nom	Nom de l'agriculteur
Adresse	Rue
Localité	
Téléphone	
Utilisateur	du logiciel
Date	
Description	Variante, problèmes, etc.

4.2 Données climatiques et topographiques

Hiver température minimale extérieure	°C	Température minimale de l'air extérieur entre -6 et -26°C selon les documents suisses d'agrométéorologie
Humidité relative de l'air intérieur	% (70)	Normal entre 50 - 80%. L'humidité relative doit correspondre à la valeur k
Différence de température initiale dt	°C (4)	= différence minimale entre la température intérieure et la température extérieure minimale. Cette valeur détermine ensemble avec la température extérieure minimale la valeur initiale de l'abscisse des graphiques « hiver »
Intervalle axe X (2)	°C	L'intervalle détermine l'échelle de l'abscisse des graphiques « hiver » sans/avec échangeur de chaleur ou pompe à chaleur
Eté température maximum extérieure	°C	Température maximale de l'air extérieur entre 18 et 33°C, selon les documents suisses d'agrométéorologie
Humidité relative de l'air intérieur	% (60)	Normal entre 50 - 65%
Différence de température initiale dt	°C (1)	= différence minimale entre la température intérieure et la température extérieure maximale. Cette valeur détermine ensemble avec la température extérieure maximale, la valeur initiale de l'abscisse des graphiques « été »
Intervalle (0.5)	°C	L'intervalle détermine l'échelle de l'abscisse des graphiques « été »
Altitude	m	Altitude éventuellement corrigée selon la région

(): valeurs par défaut

4.3 Données bâtiment (1) et (2)

Ces données interviennent dans le calcul des pertes par transmission et par aération (évaporation de l'eau sur le sol). Les positions (F1 - F20, L1 - L8) se réfèrent à la figure 1.

Paroi en contact avec l'air extérieur	Inclus portes et fenêtres
Paroi intérieure	Paroi (inclus portes et fenêtres) en contact avec des locaux, ayant une température peu différente de la température extérieure (3 - 5°C). Les parois en contact avec des locaux à une même température ne sont pas prises en considération
Périmètre extérieur sous terrain	Longueur et profondeur des parois extérieurs enterrées
Périmètre au-dessus du terrain	Périmètre du sol à même niveau ou au-dessus du terrain
Plafond	Les plafonds ne s'étendant que sur une partie de l'étable (p. ex. planchers pour la paille) ne sont pas pris en considération
Sol	Sol entier (inclus partie paillée). Valeur k sol en béton non isolé (12 - 15 cm) = 5 W/m ² .K
Vitrage simple	k = 5 W/m ² .K
Vitrage double	k = 3 W/m ² .K
Portes	Les portes intérieures ne sont pas prises en considération
Sol mouillé	Surfaces à considérer : <ul style="list-style-type: none"> • stabulation entravée bovins: 1 m²/UGB • stabulation libre: <ul style="list-style-type: none"> - sol non perforé bovins: aires d'exercices et d'alimentation 100% - sol perforé bovins et porcs: aires d'exercices 50% de la surface - sol perforé entier 25% de la surface
Litière	Litière pour bovins et porcs
Toiture	Surface toiture (= surface sol/ cos (pente)) en contact direct avec l'étable

4.4 Données animaux (bovins, porcs et autres animaux)

La quantité de chaleur (sensible et latente) dégagée est calculée à partir du nombre et du poids des animaux selon des formules de la CIGR.

4.5 Valeurs par défaut

Climat et topographie		Valeur par défaut
Humidité relative extérieure hiver	% (95)	95°
Rendement échangeur de chaleur (WT) (air introduit)	(0.55)	$\text{Rendement WT} = \frac{t_{\text{introd}} - t_{\text{ext.}}}{t_{\text{int.}} - t_{\text{ext.}}} = 0.55$
Refroidissement air recyclé, pompe à chaleur WP	(5-8) °C	Refroidissement de l'air recyclé dans une pompe à chaleur à air recyclé = 6°C
Température air extrait pompe à chaleur WP	(5) °C	Température de l'air extrait pour une pompe à chaleur à air recyclé = 5°C
Humidité relative extérieure été	% (50)	50 %
Diffusivité thermique du sol sable/limon sol rocheux conglomérat	m ² /h (0.0036) (0.0072) (0.0005)	Cette valeur sert à calculer la température du sol 0.0036
Production laitière		
Vache	kg/j	15 kg/j
Chèvre	kg/j	5 kg/j
Mouton	kg/j	5 kg/j

Les valeurs par défaut peuvent être adaptées à la situation locale.

5. Brève description des graphiques

Graphique 1 : Production H et pertes Q de chaleur en hiver

Production de chaleur = dégagement de chaleur par les animaux + dégagement de chaleur par la litière

La chaleur totale dégagée par les animaux est d'abord corrigée en fonction de la température intérieure. Elle est ensuite partagée en chaleur sensible et chaleur latente (fig. 3). La chaleur sensible est la chaleur qui est réellement dégagée vers l'environnement. La chaleur latente est l'énergie que l'animal dégage par la production de vapeur (par respiration et transpiration). Cette dernière n'est pas utile pour le maintien de la température intérieure. Une partie de cette chaleur peut être récupérée à l'aide d'un échangeur ou d'une pompe à chaleur (condensation).

Pour la chaleur dégagée par la litière on suppose une différence de température de 15°C entre la litière (à 10 cm de profondeur) et l'air ambiant.

Pertes de chaleur Q = pertes de transmission par l'enveloppe du bâtiment + pertes de chaleur par l'aération

Les pertes de chaleur par l'enveloppe sont constituées par les différentes données du bâtiment. Les pertes par le périmètre sont calculées selon la méthode ThK77. Les pertes de chaleur à travers le vitrage tiennent compte de la radiation solaire (SIA 180/1) et de la condensation éventuelle. L'échange de chaleur par le sol est défini entre autres par la température du sol calculée à une profondeur de 1 m.

Les pertes de chaleur par l'aération comprennent la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'air entrant et l'énergie nécessaire pour évaporer l'eau à la surface du sol et de la litière. Le plus grand des deux débits (H₂O, CO₂) est pris en considération pour le calcul du bilan énergétique.

Graphique 2 : Débit d'air en hiver en fonction de l'humidité (H₂O) et du CO₂

Le débit de ventilation en fonction de l'humidité est déduit de la quantité totale de vapeur d'eau. Cette quantité est calculée en fonction de la température et se compose de :

- la vapeur d'eau produite par la respiration et la transpiration des animaux (déduite de la chaleur latente),
- l'eau évaporée à partir du sol mouillé (dépendante de la différence de pression partielle de vapeur d'eau entre l'air ambiant et la couche d'air adhérente au sol);
- l'eau évaporée à la surface de la litière (dépendante de la différence de pression partielle de vapeur d'eau entre l'air ambiant et la couche d'air adhérente à la surface de la litière);
- l'eau évaporée à l'intérieur de la litière (dépendante de la différence de pression partielle de vapeur d'eau entre l'air ambiant et l'air à l'intérieur de la litière);
- l'eau de condensation des vitres (terme négatif) dépend de la différence de pression partielle de vapeur d'eau entre l'air ambiant et la couche d'air adhérente aux vitres. On distingue entre vitrage simple et double. On suppose qu'il n'y a pas de condensation ni aux parois ni au plafond.

Le débit de ventilation en fonction du CO₂ est calculé à partir de la quantité de CO₂ dégagée par les animaux et la litière. Cette quantité est déduite de la quantité de chaleur totale. La concentration admissible intérieure de CO₂ est de 3000 ppm ou 0.3% (défini par le Conseil de l'Europe). La concentration extérieure est de 350 ppm (0.035%).

La densité de l'air est déterminée en fonction de la température et de l'altitude.

Le plus grand des deux débits (H₂O, CO₂) est pris en considération pour le calcul du bilan énergétique en hiver.

Graphique 3 : Section des cheminées (m²) en fonction de leur hauteur dh (m). Ventilation par gravité

La section nécessaire est calculée en fonction du plus grand des deux débits (H₂O ou CO₂) et de la vitesse de l'air par gravité.

Les valeurs présentées dans le graphique sont valables pour des cheminées et la faîtière ouvertes. Les ouvertures d'entrée ne doivent pas être inférieures à la section des cheminées.

Graphique 4 : Valeur k minimale pour éviter la condensation

Le coefficient de transfert de chaleur (α) se compose de la convection (environ 50%) et de la radiation (environ 50%) à des températures normales. Ainsi il faut distinguer entre matériaux réfléchissants et non réfléchissants.

La surface des matériaux réfléchissants est plus froide que celle des matériaux non réfléchissants. Par conséquent une paroi ou un plafond en matériau réfléchissant exige une valeur k plus petite. Pour des surfaces mal aérées (p. ex. par une répartition inégale des cheminées) on peut prendre la même valeur de k que pour des matériaux réfléchissants.

Graphique 5 : Débit d'air en été en fonction de l'humidité (H₂O), du CO₂ et du bilan énergétique

Les débits de ventilation sur la base de H₂O et du CO₂ sont calculés comme pour la situation « hiver » (graphique 2).

Le débit basé sur le bilan énergétique est le volume d'air nécessaire pour éviter que la température intérieure dépasse la valeur mentionnée dans l'abscisse du graphique.

En été on tient compte de la radiation solaire sur la toiture ou du réchauffement de l'espace au-dessus du plafond. La température de la surface extérieure de la toiture est déterminée comme : « température extérieure + 35°C ». la température au-dessus du plafond comme : « température extérieure + 5°C ».

Le plus grand des trois débits (H₂O/CO₂/énergie) doit être pris en considération.

Graphique 6 : Entrée et sortie d'air (m²) en été en fonction de la vitesse de l'air v (m/s)

L'aération par gravité ne fonctionne plus quand la différence de température se rapproche de zéro. Par

conséquence il faut en été une ventilation latérale (par les portes et fenêtres). Dans des régions à faible vent on peut tenir compte d'une vitesse de l'air de 0.5 m/s. Lors d'une ventilation par ventilateur la section d'entrée et de sortie d'air peut être trouvée en interpolant entre les courbes de $v = 0.5$ à 5 m/s.

Graphique 7 : Bilan énergétique avec et sans échangeur de chaleur (EC)

Les calculs d'échangeur de chaleur sont valables pour des échangeurs à air croisé.

L'échangeur de chaleur n'est intéressant que si le bilan énergétique est négatif. Dans les calculs de récupération de chaleur on tient compte de la condensation et on suppose que la différence de température entre l'air extrait (= air vicié sortant de l'échangeur) et l'air introduit (air frais sortant de l'échangeur) est d'au moins 2°C. Pour α (coefficient de transfert de chaleur, W/m².K) de l'air frais on a pris 20 W/m².K. En ce qui concerne (α) et c (chaleur spécifique, W/kg air sec.K) de l'air vicié, on tient compte de la condensation.

Le volume d'air traversant l'échangeur de chaleur est le plus grand des deux débits (H₂O/CO₂). L'humidité relative dans l'étable diminue proportionnellement à la condensation.

A partir d'une certaine température intérieure l'échangeur de chaleur n'est plus capable de compenser le déficit du bilan énergétique de l'étable.

Graphique 8 : Surface de l'échangeur de chaleur

La surface nécessaire de l'échangeur de chaleur est définie entre autres par les paramètres suivants :

- le bilan énergétique
- le plus grand des deux débits de ventilation (selon bilan H₂O ou CO₂)
- le facteur de rendement = $\frac{t_{\text{air introd.}} - t_{\text{air ext.}}}{t_{\text{air int.}} - t_{\text{air ext.}}}$
- la condensation

Le trajet de la courbe « surface nécessaire de l'échangeur de chaleur » en liaison avec la température intérieure, varie en fonction des paramètres: déficit

d'énergie, débit de ventilation et transfert de chaleur. Ces paramètres peuvent avoir des effets contraires.

Le déficit d'énergie devient en général plus grand quand la température augmente, tandis que le débit de ventilation diminue lorsque la température augmente. De plus, le transfert de chaleur par unité de surface augmente quand la différence de température intérieure-extérieure s'accroît.

Là où la condensation commence on remarque une discontinuité dans la courbe.

Les graphiques 5 et 6 sont à interpréter ensembles.

Graphique 9: Eau de condensation dans l'échangeur de chaleur

La condensation dans l'échangeur de chaleur est proportionnelle à la température et à l'humidité relative dans l'étable. La condensation augmente l'efficacité de l'échangeur, par contre elle cause de la pollution et de la corrosion.

Graphique 10: Température de l'air extrait et de l'air introduit

Ce graphique est intéressant pour vérifier l'efficacité de l'échangeur et pour estimer le danger de givrage. L'efficacité de l'échangeur peut être influencée dans un certaine mesure par le facteur de rendement (tab. 2). Une limite supérieure est fixée par le programme, lorsque l'on n'obtient pas une différence minimale de 2°C entre l'air extrait et l'air introduit.

Un danger de givrage existe lorsque en même temps la température de l'air extrait est inférieure à zéro et qu'il se forme de la condensation (graphique 9). Le programme ne calcule pas l'échangeur de chaleur aussi longtemps que le bilan énergétique est positif (température de l'air extrait = température intérieure, température de l'air introduit = température extérieure).

Graphique 11: Pompe à chaleur à air recyclé. Puissance motrice et utilisable. Capacité de refroidissement et de réchauffement de l'étable

Pour le calcul on part du débit minimum d'air frais (concentration CO₂ < 3000 ppm). Dans la table cli-

mat il est possible de définir le refroidissement de l'air recyclé (5 - 8°C).

La capacité de refroidissement est l'énergie qui peut être extraite à l'air de l'étable (utilisation de la chaleur sensible et latente) en fonction du bilan énergétique et de l'humidité relative.

Si sur la base du bilan H₂O trop de chaleur est extraite, une partie de la chaleur récupérée doit être ramenée à l'étable. C'est la capacité de réchauffement de l'étable.

La puissance motrice est définie comme capacité de refroidissement: 2 (estimation grossière).

La puissance utilisable = capacité de refroidissement + puissance motrice - capacité de réchauffement.

Graphique 12: Pompe à chaleur à air recyclé. Débit d'air en fonction de l'énergie (E - bilan) et de l'humidité (H₂O - bilan)

Le débit d'air de recyclage est le volume d'air nécessaire pour extraire à l'air intérieur le surplus d'énergie. Il est fonction du facteur de refroidissement de la pompe à chaleur à recyclage (5 - 8°C) (tab. 2).

Si on réduit le débit d'air frais au volume minimal (concentration CO₂ = 3000 ppm), la quantité totale de vapeur d'eau ne peut en général pas être évacuée. L'air doit être séché par la pompe à chaleur (eau de condensation). Le débit d'air recyclé selon le bilan-H₂O peut être éventuellement plus élevé que celui du bilan énergétique.

Graphique 13: Pompe à chaleur à air extrait. Puissance motrice et utilisable. Capacité de refroidissement et de réchauffement de l'étable

Pour le calcul on part d'un apport d'air frais minimal selon le bilan H₂O. En fonction de l'humidité relative. Dans la table climat (tab. 2) la température de l'air extrait peut être modifiée (5°C).

La capacité de refroidissement est l'énergie qui peut être extraite à l'air de l'étable (utilisation de la chaleur sensible et latente) en fonction de la différence de la température air extrait - air intérieur.

Si le bilan énergétique est déficitaire une partie de la chaleur du condenseur doit être ramenée à l'étable. C'est la capacité de réchauffement de l'étable.

La puissance motrice est définie comme capacité de refroidissement: 2 (estimation grossière).

La puissance utilisable = capacité de refroidissement + puissance motrice - capacité de réchauffement.

6. Description de l'installation programme climat d'étable

Equipement nécessaire

Software: Microsoft Windows 3.1
Microsoft Excel 4.0/5.0

Hardware: Utilisation nécessaire à Excel
(minimum 4 MB RAM conseillés)

Installation

Créer les sous-répertoires
C:\FAT\CLIMAT1

Copier tous les fichiers et le sous-répertoire «Données» de la disquette originale dans le répertoire
C:\FAT\CLIMAT1

Dans
Gestionnaire de programmes
Applications: fichier
Nouveau
Programme
Confirmer avec OK

Introduire les données suivantes:
Nom:
CLIMAT D'ETABLE

Ligne de commande:
C:\EXCEL\EXCEL.EXE SKLIMA1.XLS

Répertoire de travail C:
C:\FAT\CLIMAT1
Touche de raccourci:
Aucune

Changer d'icône:
Nom:
C:\FAT\CLIMAT1\FATSTK.ICO
Confirmer avec OK

Divers

Barre d'outils:
Si plus d'une barre d'outils est affichée à l'écran, nous vous conseillons de les supprimer durant l'utilisation du programme Climat (cliquer la touche droite de la souris sur la barre d'outils).

Répertoire:
Si l'on désire modifier le chemin d'accès:
\FAT\CLIMAT1
Procéder comme suit:
ouvrir la Macro SKSYSTEM.XLM
Important: pendant l'ouverture maintenir pressée la touche SHIFT.
Dans le champ B24/B25 un autre répertoire peut être introduit (\asdf\xcvb\adf). Sauver les données.
Important: pendant la fermeture maintenir pressée la touche SHIFT.

Bibliographie

Publications du programme d'impulsions – Installations du bâtiment

Amélioration thermique des bâtiments: expériences pratiques

Office fédéral des questions conjoncturelles, EDMZ/OCFIM Berne, N° 724.600 f

Wärmerückgewinnung in Lüftungs- und Klimaanlage

Office fédéral des questions conjoncturelles, EDMZ/OCFIM Berne, N° 724.709 d (n'existe qu'en langue allemande)

Lüftungstechnik

Office fédéral des questions conjoncturelles, EDMZ/OCFIM Berne, N° 724.618 d (n'existe qu'en langue allemande)

Systèmes de chauffage pour maisons à basse consommation d'énergie

Office fédéral des questions conjoncturelles, EDMZ/OCFIM Berne, N° 724.609 f

Chauffage avec pompes à chaleur air-eau

Office fédéral des questions conjoncturelles, EDMZ/OCFIM Berne, N° 724.712 f

Normes

Norme suisse du climat d'étable

Institut für Tierproduktion, ETH Zürich, 1983

Climatisation of Animal Houses

Commission internationale du génie rural CIGR, Aberdeen, 1984

SIA 384/2

Puissance thermique à installer dans les bâtiments, recommandation (1982)

SIA 380/1

L'énergie dans le bâtiment, recommandation (1988)

Autres publications

Pompes à chaleur

Infoenergie Colombier, 1981

Mesures effectuées au cours de l'utilisation pratique d'échangeurs thermiques à plaques

W. Göbel, Rapport FAT N° 301, Tänikon, 1987

Sources des illustrations

(Pour autant qu'elles ne soient pas tirées des publications ci-dessus)

FAT – Station fédérale de recherches en économie et technologie agricole

Ecole d'agriculture, Flawil

Kälte Fedder GmbH & Co, Loesfeld

Planair SA, La Sagne

B. Pulver & Co, Muri