

## 12.1 Procédure pour la mesure du débit d'air par bilan thermique dans les bâtiments d'élevage (*Guidelines for the measurement of air flow rate with the heat productions of animals in animal houses*)

### 12.1.1 Introduction (*Introduction*)

#### 12.1.1.1 Objectif (*Objective*)

La mesure du débit d'air peut être une bonne illustration de la qualité de l'air en relation avec les besoins physiologiques. À l'intérieur des bâtiments, le renouvellement d'air est une nécessité pour la régulation de la température et l'évacuation des gaz comme l'anhydride carbonique et l'ammoniaque. Quand la mesure de la vitesse d'air n'est pas faisable, par exemple dans des bâtiments à ventilation naturelle, ou quand la mesure du gradient CO<sub>2</sub> entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment est difficile, l'équilibre thermique du bâtiment d'élevage permet d'estimer le taux de ventilation. La mesure du gradient de CO<sub>2</sub> peut être difficile en raison des inexactitudes dans le gradient dues à la variabilité des concentrations en gaz. Dans certains cas, la mesure en continu de la ventilation est nécessaire mais le coût de la mesure en continu du gradient de CO<sub>2</sub> est trop élevé et la mesure de la vitesse d'air n'est pas faisable. Une autre application de cette évaluation du taux de ventilation est l'estimation des facteurs d'émissions gazeux où le taux de ventilation par animal est multiplié par le gradient de concentration du gaz étudié.

L'objectif de ces directives est de proposer une méthode pour mesurer le débit d'air dans des bâtiments d'élevage, sur la base des mesures de la température et d'humidité, que la ventilation soit naturelle ou forcée. Cette méthode est semblable à une méthode de traçage où la source de traceur est constituée par les animaux et les gradients entre l'intérieur et l'air extérieur sont ceux de chaleur sensible, chaleur latente, et chaleur totale.

*The measurement of air flow rate can be a good illustration of air quality in relation with physiological needs. Inside buildings, the renewal of air is a necessity for the temperature regulation and the evacuation of gases like carbon dioxide and ammonia. When the measurement of air velocity is not feasible, for example in naturally ventilated buildings, or when the control of the CO<sub>2</sub> gradient between inside and outside the building is difficult, the heat balance of the animal house allows to estimate the ventilation rate. The control of the CO<sub>2</sub> gradient can be difficult because of inaccuracies in the gradient due to gas concentration variability. In other cases, continuous monitoring of ventilation is required but the cost of continuous monitoring of the CO<sub>2</sub> gradient is too expensive and the measurement of air velocity is not feasible. Another application of this estimation of ventilation rate is found with gaseous emissions factors where the ventilation rate per animal is applied to the concentration gradient of the studied gas.*

*The objective of these guidelines is to propose a method to measure the air flow rate in animal houses, on the basis of temperature and humidity measurements, whatever if the ventilation is natural or mechanical. This method is similar to a tracing method where the tracer source is achieved by the animals and the gradients between inside and outside air are the sensible heat, the latent heat, and the total heat.*

#### 12.1.1.2 Domaine d'application (*Scope*)

L'utilisation du bilan thermique pour estimer le taux de ventilation peut être réalisée dans les bâtiments d'élevage où un modèle raisonnable de la chaleur produite par les animaux peut être

*Using the heat balance to estimate the ventilation rate can be achieved in the animal houses where a reasonable model of the heat produced by the animals can be applied, and where the other heat*

appliqué, et où les autres sources de chaleur (chauffage, transfert conducteur par les murs) sont connues ou négligeables. C'est le cas pour la plupart des bâtiments sur caillebotis ou sols pleins où les productions de chaleur données par le CIGR (2002) donnent une évaluation raisonnable. La majorité des connaissances sur la production de chaleur par des animaux a été observée dans des chambres de respiration sans accumulation d'effluent (Pedersen et autres, 2008). Quand l'effluent est accumulé dans le bâtiment pendant quelques semaines, la production de chaleur spécifique de l'effluent devrait être ajoutée. Quelques valeurs sont indiquées pour la production de porc par de Oliveira (de Oliveira et autres, 1998 ; de Oliveira, 1999). Cette production est mal connue ce qui explique que ces méthodes sont moins satisfaisantes dans les bâtiments avec fumier.

Cette méthode ne donne pas des évaluations précises en raison des variations de l'activité animale. Ces variations se produisent dans la plupart des bâtiments d'élevage (CIGR, 2002). Elles peuvent être modélisées mais quand le modèle est employé et qu'il y a un décalage de temps entre la sortie du modèle et la réalité, ce décalage a comme conséquence un biais significatif dans l'évaluation de taux de ventilation aux pas de temps horaires. Par conséquent, cette méthode devrait être employée quand l'objectif des mesures est d'avoir une évaluation raisonnable du taux de ventilation moyen à un pas de temps journalier ou d'une demi-journée (jour ou nuit).

Cependant, cette méthode peut être plus robuste que la méthode basée sur le gradient CO<sub>2</sub> quand la production de chaleur des animaux domine l'équilibre thermique (quand les autres apports de chaleur ou pertes de chaleur par les murs sont négligeables). Dans ce cas, quand les trois évaluations basées sur la chaleur sensible, la chaleur latente, et la chaleur totale convergent, la médiane est proche du taux de ventilation « vrai ».

*sources (heating, conductive transfer through the walls) are either known or negligible. This is the case for most buildings with slatted or solid floors where the heat productions given by the CIGR (2002) give a reasonable estimate. Most knowledge on heat production by animals was observed in respiration chambers without manure accumulation (Pedersen et al, 2008). When manure is accumulated in the building during some weeks, the specific heat production of the manure should be added. Some values are given for pig production by de Oliveira (de Oliveira et al, 1998; de Oliveira, 1999). This heat production is less known, therefore, these methods work less in the animal houses with solid manure.*

*This method does not give accurate estimates because of variations in animal activity. These variations occur in most animal houses (CIGR, 2002). They can be modeled but when the model is used and there is a time shift between the model output and the true animal activity, it results in a significant bias in ventilation rate estimate at hourly time steps. Therefore, this method should be used when the objective of the measurements is to have a reasonable estimate of the mean ventilation rate at a daily or half-daily (day or night) time step.*

*However, this method can be more robust than the method based on CO<sub>2</sub> gradient when the heat production of the animals dominates the thermal balance (other heat inputs or heat losses through the walls are negligible). In this case, when the three estimates based on sensible heat, latent heat, and total heat converge, the median is close to the "true" ventilation rate.*

### 12.1.1.3 Principes (Principles)

Le principe est le même que celui du traçage : on suppose connu le flux de chaleur, on suppose que la ventilation explique la relation entre production de chaleur et gradient de température (ou enthalpie, ou vapeur d'eau), et on en déduit que le taux de ventilation égale le rapport du gradient de

*The principle is the same as that of tracing: the heat fluxes are supposed to be known, it is assumed that ventilation explains the relation between heat production and temperature gradient (or enthalpy, or water vapor) between inside and outside the room, then it is deduced*

température par la production de chaleur sortant par la ventilation.

*that the rate of ventilation is equal to the ratio of the gradient of temperature by the production of heat output by ventilation.*

### 12.1.2 Appareillage (equipment)

On utilise des mesures de température et d'humidité intérieur et extérieur. Etant donné la grande sensibilité de la ventilation déduite de la production de chaleur latente au gradient de vapeur d'eau, il est très important que les capteurs d'humidité soient correctement entretenus et étalonnés.

*Moisture and temperature are measured inside and outside the house. Given the high sensitivity of the ventilation deduced from the latent heat production to the steam gradient, it is very important that the moisture sensors are correctly maintained and calibrated.*

Par ailleurs il faut une estimation du poids et de la production des animaux. Le résultat est peu sensible à cette entrée. Par conséquent si une mesure est préférable, le dire d'éleveur est souvent suffisant.

*In addition an estimate of the weight and the production of the animals is necessary. The result is not very sensitive to this input. Consequently if a measurement is preferable, what the farmer says is often sufficient.*

### 12.1.3 Observations (Observations)

En cas d'observations manuelles on doit circuler dans tout le volume du bâtiment sans s'approcher trop des bords ou des animaux. Il est important d'éviter tout mouvement brusque qui pourrait déclencher des mouvements de panique.

*In the case of manual observations one must walk in all the volume of the house without approaching too much the edges or the animals. It is important to avoid any abrupt movement which could start movements of panic.*

En cas d'enregistrements de température et humidité, on doit positionner au moins 2 capteurs, l'un proche de la sortie d'air, l'autre dans l'aire de vie des animaux.

*In the case of recording temperature and moisture, at least 2 sensors should be used, one close to the exit of air, the other in area where live the animals.*

Il est utile de compléter ces observations par des mesures de vitesse d'air aux orifices si elle sont faisables.

*It is useful to supplement these observations by air velocity measurements in the openings if they are feasible.*

### 12.1.4 Calculs (Calculations)

#### Poids des animaux

Les animaux sont pesés en totalité ou en partie, au début et à la fin de l'élevage, par l'éleveur ou les personnes en charge des mesures. Le poids à un instant donné est estimé par interpolation linéaire entre le premier et le dernier jour.

#### Weight of the animals

*The animals are weighed entirely or partly, at the beginning and the end of the batch, by the farmer or by the persons in charge of the measurements. The weight at a given moment is estimated by linear interpolation between the first and the last day.*

$$PV_J = PV_{J_{initial}} + \frac{PV_{J_{final}} - PV_{J_{initial}}}{J_{final} - J_{initial}} \cdot (J - J_{initial})$$

où  $PV_J$  est le poids vif des porcs en kg,  $J$  le

*where  $PV_J$  is the live weight of the pigs in kg,  $J$*

numéro du jour où l'on souhaite l'estimation,  $J_{\text{initial}}$  le jour de l'arrivée des animaux sur la litière et  $J_{\text{final}}$  le jour de la sortie des animaux.

*the number of the day at day of estimate,  $J_{\text{initial}}$  the day of the arrival of the animals on the litter and  $J_{\text{final}}$  the day of exit of the animals.*

### **Production de chaleur par les animaux**

La production de chaleur totale est estimée selon les recommandations de la CIGR (CIGR, 1984). Dans le cas d'un élevage de porcs à l'engrais, nous avons constaté que cette relation reste une bonne approximation (de Oliveira, 1999, Robin et al., 1999) pour des animaux et un mode d'alimentation standards et elle ne nécessite pas la connaissance de l'aliment :

### **Heat production by the animals**

*The heat production is estimated according to the recommendations of the CIGR (CIGR, 1984, 2002). In the case of finishing pigs, we noted that this relation remains a good approximation (de Oliveira, 1999, Robin et al., 1999) for standard animals and feeding practices, and it does not require knowledge of feed:*

$$2 \quad H_{\text{tot}} = 29 * PV_j \cdot 2^{J_{\text{initial}} - J_{\text{final}}} \cdot 40$$

où  $H_{\text{tot}}$  est la production de chaleur totale (en W/animal).

Pour les volailles de chair, la production de chaleur peut être estimée par (CIGR, 1984):

*where  $H_{\text{tot}}$  is the total heat production (in W/animal).*

*For poultry, heat production can be calculated from (CIGR, 1984):*

$$3 \quad H_{\text{tot}} = 10 * PV_j^{0,75}$$

D'autres équations de production de chaleur totale, pour les principales espèces d'animaux d'élevage, peuvent être trouvées dans CIGR (2002). On y trouve également la prise en compte des variations dans l'activité des animaux. Néanmoins ces dernières sont basées sur des cycles de 12h nuit/jour, ce qu'il est préférable de modifier dans le cas des élevages de volailles de chair où les durées d'éclairage sont plus longues en début de lot.

*Other equations giving the total heat production of the main animal species can be found in CIGR (2002). Equations giving the variations in animal activity over the day can also be found in this document. However, ces equations are based on periods of 12 hours day/night, that should be adapted in the case of poultry meat production, where the day period is longer during the first weeks of the flocks.*

### **Partition entre chaleurs sensible et latente**

Nous utilisons ici les recommandations de la CIGR (1984, 2002) pour la forme générale de l'équation. Cependant les indicateurs de confort thermique du porc (regroupement des animaux et position couchée sur le ventre, membres repliés) indiquent que la réaction au froid intervient pour des températures nettement inférieures à celles de l'élevage sur caillebotis. Sur caillebotis on utilise une correction de température de 10 K ( $t_{\text{in}} + 10$  dans l'équation suivante). En l'absence de confirmation expérimentale, nous avons utilisé une correction de 18 K ( $t_{\text{in}} + 18$  dans l'équation suivante), intermédiaire entre les 15 K indiqués par la littérature (effet de la litière d'environ 5 K) et les 20 K ou plus que l'on peut constater en

### **Partition between sensible and latent heat**

*We use here the recommendations of the CIGR (1984, 2002) for the general form of the equation. In the case of pigs the indicators of thermal comfort (regrouping of the animals and position laid down on the belly, folded up members) indicate that the cold reaction intervenes for temperatures definitely lower than those of the animal farm on slatted floor. On slatted floor, a temperature correction of 10 K is usually used ( $t_{\text{in}} + 10$  in the following equation). In the absence of experimental confirmation, we used a correction of 18 K ( $t_{\text{in}} + 18$  in the following equation), intermediary between 15 K (litter effect around 5 K) indicated by the literature and 20 K*

élevage, lorsque la litière est sèche et épaisse :

or more as can be observed in animal farms, when the litter is dry and thick:

$$4 \quad H_{sens} = H_{tot} * (0,8 - 1,85 \cdot 10^{-7} * (t_{in} + 18)^4)$$

$$5 \quad H_{lat} \uparrow H_{tot} \sim H_{sens}$$

où  $H_{sens}$  est la production de chaleur sensible (en W/animal),  $H_{lat}$  est la production de chaleur latente (en W/animal).

### Chaleurs sensible et latente de la litière de porcs

Des mesures réalisées précédemment pour différents supports (de Oliveira, 1999, Robin *et al*, 1999) peuvent être utilisées. Une litière à base de paille produit environ 50 W/porc de chaleur totale ( $H_{tot,lit}$ ), dont 40 W/porc de chaleur sensible ( $H_{sens,lit}$ ) et 10 W/porc de chaleur latente ( $H_{lat,lit}$ ). Nous avons montré qu'en période froide, le partage des chaleurs sensible et latente dérive vers une augmentation de la production de chaleur sensible au détriment de la chaleur latente. J'ai donc utilisé 50 W/porc de chaleur totale partagés entre 45 W/porc de chaleur sensible et 5 W/porc de chaleur latente en période hivernale.

Pour les dindes une valeur de production de chaleur atteignant 30% de la chaleur produite par les animaux a été déduite pour expliquer un fort déficit d'évaporation d'eau par le milieu d'élevage (Hassouna, pers. comm.).

### Eau métabolique

Une partie de l'eau sortant du bâtiment est issue de la dégradation de la matière sèche de l'aliment. Ce terme est appelé eau métabolique. On fait l'hypothèse qu'elle sort sous forme gazeuse du bâtiment, dans la mesure où les émissions de vapeur d'eau que nous avons observées en conditions contrôlées étaient légèrement supérieures aux prévisions théoriques. On a utilisé la valeur de 0,1 g/h pour 1W chaleur totale produite, valeur estimée en faisant l'hypothèse qu'une mole de  $H_2O$  est produite pour une mole de  $CO_2$  émise et en utilisant le coefficient de la CIGR (1984), soit 0,163 L  $CO_2$ /h.W. Cela donne l'équation suivante

where  $H_{sens}$  is the production of sensible heat (in W/animal),  $H_{lat}$  is the production of latent heat (in W/animal).

### Sensibile and latent heat of the litter of pigs

Measurements previously carried out for various supports (de Oliveira, 1999, Robin and Al, 1999) can be used. A litter containing straw produces approximately 50 W/ pig of total heat ( $H_{tot}$ , reads), including 40 W/ pig of sensible heat ( $H_{sens}$ , reads) and 10 W/ pig of latent heat ( $H_{lat}$ , reads). We showed that in cold period, the partition between sensible and latent heat drifts towards an increase in the production of sensible heat to the detriment of the latent heat. Thus 50 W/ pig of total heat can be divided between 45 W/pig of sensible heat and 5 W/ pig of latent heat in winter period.

In the case of turkey, it was observed from the water balance that a heat production reaching 30% of animal heat production could be assumed (Hassouna, pers. comm.).

### Metabolic water

Part of water output of the house is resulting from the degradation of the dry matter of food. This term is called metabolic water. It is assumed that it leaves in gas form the house, insofar as the steam emissions which we observed in controlled conditions were slightly higher than the theoretical forecasts. The value of 0,1 g/h for 1W total heat produced, value estimated by making the assumption that a mole of  $H_2O$  is produced for a mole of emitted  $CO_2$  and by using the coefficient of the CIGR (1984), that is to say 0,163 L  $CO_2$ /h.W. That gives the following equation:

$$6 \quad Eau_{métab} \uparrow 0,1 \cdot H_{tot} \cdot H_{tot,lit}$$



On distingue, pour l'étude thermique des bâtiments d'élevage deux situations : la situation « endothermique » où la chaleur produite par les animaux ne suffit pas à maintenir l'ambiance recherchée pour l'élevage compte tenu des pertes à travers les parois et par le renouvellement d'air ; la situation « exothermique » où la chaleur produite par les animaux excède le besoin de chauffage de l'ambiance et l'on augmente alors le débit d'air pour maintenir la température d'ambiance au voisinage de la consigne. Dans le premier cas le chauffage n'est pas toujours estimé avec une précision suffisante pour l'estimation du débit d'air à chaque pas de temps. C'est pourquoi nous avons choisi ici d'estimer le chauffage (au sens large = chauffage+éclairage+autres sources de chaleur anthropiques ou naturelles comme l'ensoleillement), sachant que cette valeur peut être contrôlée dans le cas d'un suivi régulier et qu'elle doit être voisine de zéro dans notre cas (en général dans le cas des salles d'engraissement de porcs le chauffage est absent et l'éclairage des salles est inutile en raison de l'éclairage naturel). L'autre intérêt de cette estimation est que l'on compense une éventuelle erreur sur l'estimation des pertes de chaleur à travers les parois (par exemple : surestimation du chauffage si les pertes parois sont surestimées). L'inconvénient est d'augmenter la sensibilité de l'estimation à une erreur sur l'humidité relative, inconvénient qui est atténué lorsque l'on utilise plusieurs capteurs indépendants.

Le chauffage est déduit de la loi de conservation de la chaleur sensible. Il est calculé à partir du renouvellement d'air estimé sur la base de la production de vapeur d'eau des animaux, de l'écart d'humidité spécifique de l'air intérieur et extérieur et des calculs de production de chaleur sensible et de pertes parois. L'équation suivante a été utilisée :

*One distinguishes, for the thermal study of the animal housings two situations: the "endothermic" situation where the heat produced by the animals is not enough to maintain environment sought for the animal farm taking into account the losses through the walls and by ventilation rate; the "exothermic" situation where the heat produced by the animals exceeds the need for heating of environment and one then increases the air flow to maintain the temperature of environment in the vicinity of the instruction. In the first case the heating is not always estimated with an accuracy sufficient for the estimate of the air flow at each step of time. This is why we chose here to estimate the heating (in the broad sense = heating+lighting+other sources of heat either anthropic or natural such as solar radiation), knowing that this value can be controlled in the case of a regular follow-up and that it must be close to zero in many case (in general in the case of the rooms of fattening of pigs the heating is absent and the lighting of the rooms is useless because of the daylight). The other interest of this estimate is that one compensates for a possible error on the estimate of the losses of heat through the walls (for example: over-estimate of the heating if the losses walls are over-estimated). The disadvantage is to increase the sensitivity of the estimate to an error on the relative humidity, disadvantage which is attenuated when several independent sensors are used.*

*The heating is deduced from the law of conservation of sensible heat. It is calculated starting from the ventilation rate estimated on the basis of production of steam of the animals, of the specific variation of moisture of the air inside and outside and calculations of production of sensible heat and losses walls. The following equation was used:*

$$9 \quad H_{chauff} = \frac{Q_{air,lat}}{3600} \times \rho_{air} \times C_p \times (t_e - t_i) + P_{parois} \cdot \frac{cool}{Lat} + H_{sens} + H_{sens,lit}$$

où  $H_{chauff}$  est la puissance de chauffage durant le pas de temps étudié (en W/animal) et  $C_p$  est la chaleur massique de l'air à pression constante (ou capacité calorifique, égale à environ 1010 J/kg air sec.K pour la gamme d'air humide qui nous concerne). Nous appliquons en outre deux conditions à ce résultat :

$$\text{si } H_{chauff} < 0 \text{ alors } H_{chauff} = 0$$

*where  $H_{chauff}$  is the power of heating during the time step studied (in W/animal) and  $C_p$  is the specific heat of the air with constant pressure (or heat-storage capacity, equal to approximately 1010 J/kg dry air. K for the range of humid air which concerns us). We apply moreover two conditions to this result:*

$$\text{if } H_{chauff} < 0 \text{ then } H_{chauff} = 0$$

si  $H_{chauff} > H_{chauff, maxi}$  alors  $H_{chauff} = H_{chauff, maxi}$

où  $H_{chauff, maxi}$  est la puissance maximale de chauffage, toutes sources comprises, installée dans le bâtiment (en W/animal).

### Débit d'air selon la production de chaleur totale

Le débit d'air sortant du bâtiment peut être déduit de la production de chaleur totale et de l'écart d'enthalpie entre l'air intérieur et extérieur selon l'équation suivante :

$$10 \quad Q_{air,tot} \uparrow \frac{H_{tot} - H_{tot,lit} - H_{chauff} - P_{parois}}{X_i - E_i} \cdot 3600$$

où  $Q_{air,tot}$  est le débit d'air selon la chaleur totale (en m<sup>3</sup>/heure.animal).

### Débit d'air selon la production de chaleur sensible

Le débit d'air sortant du bâtiment peut être déduit de la production de chaleur sensible et de l'écart de température entre l'air intérieur et extérieur selon l'équation suivante :

$$11 \quad Q_{air,sens} \uparrow \frac{H_{sens} - H_{sens,lit} - H_{chauff} - P_{parois} - \frac{cool}{Lat}}{X_i - C_p \cdot t_i - t_e} \cdot 3600$$

où  $Q_{air,sens}$  est le débit d'air selon la chaleur sensible (en m<sup>3</sup>/heure.animal).

if  $H_{chauff} > H_{chauff, maximum}$  then  $H_{chauff} = H_{chauff, maximum}$

where  $H_{chauff, maximum}$  is the maximum power of heating, all sources included, installed in the house (in W/animal).

### Air flow according to the production of total heat

The ventilation of the house can be deduced from the total heat production and the variation from enthalpy between the air inside and outside according to the following equation:

where  $Q_{air,tot}$  is the air flow according to total heat (in m<sup>3</sup>/heure.animal).

### Air flow according to the production of sensible heat

The ventilation of the house can be deduced from the sensible heat production and the variation in temperature between the air inside and outside according to the following equation:

where  $Q_{air,sens}$  is the ventilation according to sensible heat (in m<sup>3</sup>/hour.animal).

## 12.1.5 Contrôles et vérifications (Control and checkout)

Les estimations par les productions de chaleur totale, latente et sensible doivent concorder dans une fourchette de 30% de la médiane.

Si ce n'est pas le cas, il est possible que certaines hypothèses ne soient pas respectées :

- productions de chaleur différentes (activité des animaux, fumier, répartition sensible/latent, etc.) ;
- autres flux de chaleur mal estimés (flux parois, entrées de chaleur par l'ensoleillement, refroidissement évaporatif, etc.) ;
- dérive dans les capteurs (humidité) ;
- mauvaise représentativité des points de mesure.

The estimates by the total, latent and sensible heat productions should agree in a range of 30% of the median.

If it is not the case, it is possible that some assumptions are not fulfilled:

- different heat productions (activity of the animals, solid manure, sensible/latent distribution, etc);
- other heat fluxes poorly estimated (fluxes through the walls, heat input by the sunshine, evaporative cooling, etc);
- drift in the sensors (moisture);
- bad representativeness of the points of

Une analyse de sensibilité en faisant varier les différents paramètres du calcul peut aider à expliquer les écarts et les réduire.

Sinon, on retient la valeur la plus probable et on lui affecte une forte incertitude.

*measurement.*

*A sensitivity analysis which varying the various parameters can help to explain the variations and to reduce them.*

*If not, the most probable value is retained and a strong uncertainty is affected to it.*