



Productions de chaleur d'un élevage intensif de canards sur caillebotis ou sur litière, application au calcul du débit d'air d'un bâtiment.

Paul ROBIN ⁽¹⁾, Gérard AMAND ⁽²⁾, Pierre PERRIN ⁽¹⁾, Claude AUBERT ⁽²⁾, Yves FRANCK ⁽³⁾, Sophie LUBAC ⁽³⁾, Jean-Claude FERREN ⁽¹⁾

(1) INRA – USARQ – 65, rue de Saint-Brieuc – 35042 RENNES CEDEX

(2) ITAVI – Zoopôle Beaucemaine – BP 37 – 22440 PLOUFRAGAN

(3) ITAVI – Actipôle Agriculture – 5, rue Hermann Frenkel – 69364 LYON-CEDEX 07

RESUME

L'estimation des émissions de gaz polluants et d'odeurs des bâtiments d'élevage de canard passe par une estimation du débit d'air. Pour calculer celui-ci nous avons mis à jour les connaissances sur les productions de chaleur des élevages de canard. Celles-ci ont été mesurées en continu durant une bande complète d'élevage en conditions contrôlées de climat, bâtiment, animaux, aliment et abreuvement. Nous en avons déduit un modèle de production de chaleur et un mode de calcul du débit d'air. Les estimations ont été validées sur nos mesures de débit d'air. Le modèle a été appliqué à un bâtiment à ventilation naturelle.

SUMMARY

Heat productions of two duck housing systems, slatted floor and litter, application to air flow rate estimates in commercial buildings The knowledge of air flow rate is necessary to estimate the gaseous air pollutant or odour emissions in duck housing systems. We updated the data on duck heat productions to estimate the air flow rate. We measured them during a full production period with controlled climate, building, animals, food and watering. We deduced a model of heat production and proposed directions to calculate the air flow rate. The estimates were checked against our air flow rate measurements. The model was applied to a commercial building naturally ventilated.

1. Introduction

Depuis quelques dizaines d'années le contexte économique n'est plus le seul à forcer l'évolution des modes de production de volaille. Les préoccupations environnementales de la société sont devenues d'abord un élément important de cette évolution (Aubert *et al.*, 2001). Le souci principal a été de réduire l'impact polluant des systèmes de production intensifs, avec des progrès dans la gestion des rejets d'azote. En élevage de canards plus spécifiquement, l'émission

d'odeurs liées à la conduite des déjections sur lisier (élevage sur caillebotis intégral) est également devenue une préoccupation à mesure que les élevages se multipliaient au voisinage d'habitation rurales en relation avec le développement de cette production (Baeza, 1995). A ces préoccupations s'ajoutent aujourd'hui deux obligations, celle de prendre en compte la demande d'amélioration du "bien-être" des animaux de rente et celle de réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre (principalement N₂O, CO₂ et CH₄ pour le secteur agricole).

Dans ces conditions, le choix d'une hiérarchie des points à améliorer et la connaissance pointue du fonctionnement de chaque système d'élevage deviennent nécessaires à l'optimisation des techniques de production et des investissements dans les bâtiments et les matériels. Dans le domaine thermique, la connaissance des quantités de chaleur produites par le métabolisme des milieux d'élevage (animaux et litière éventuelle) est nécessaire pour réaliser le "besoin d'ambiance des animaux". Il s'agit de s'approcher d'une température et d'une hygrométrie optimales de

production, fonctions du stade physiologique des animaux, quel que soit le climat extérieur. Pour cela, on règle le débit de renouvellement d'air du bâtiment. Ainsi le débit d'air est lui-même fonction du stade de développement des animaux, du climat et de l'isolation du bâtiment (limitation des flux de chaleur à travers les parois au profit de celles via le renouvellement d'air). De plus, pour des conditions données de climat, bâtiment et animaux, les productions de chaleur sont affectées par l'intensité des transformations biologiques en litière, par la température d'ambiance (effet de l'homéothermie des animaux) et par une forte densité d'élevage (effet sur la "température vécue" par rapport à la température de l'air).

La modélisation des productions de chaleur permet d'estimer le débit de renouvellement d'air d'un bâtiment au niveau des animaux. Le calcul est basé sur la loi de conservation de l'énergie entre d'une part celle produite par les animaux, d'autre part celle évacuée du bâtiment. Il utilise les mesures de température et d'hygrométrie dans l'aire de vie des animaux et dans l'air extérieur au bâtiment. Ce mode de calcul est particulièrement intéressant (robuste et peu coûteux) dans le cas des bâtiments à ventilation dite "statique", c'est-à-dire par les effets naturels de vent et de densité (sans ventilateurs), pour lesquels la surface d'ouverture peut être très grande. Il a été utilisé dans plusieurs pays européens pour estimer les émissions de polluants gazeux et particuliers (Philips *et al*, 1998).

L'ITAVI a privilégié ce mode d'estimation pour interpréter les écarts de concentration en gaz (NH_3 , odeurs) observés entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments d'élevage de canards, à l'instar des élevages de volailles sur litière (Renault et Aubert, 1997). Or, peu de connaissances sont disponibles pour estimer les productions de chaleur des élevages de canards en conditions commerciales. Sauveur et de Carville (1990) proposent d'utiliser les équations valables pour les poulets élevés sur litière de 7 à 37 jours d'âge données par Chwalibog *et al* (1985) en appliquant un coefficient d'augmentation de 20% (Siregar et

Farrell, 1980 estimé sur la base de comparaisons à poids voisins entre 9 et 28 jours d'âge pour les canards et 15 à 39 jours pour les poulets dont la croissance était plus lente). Ces travaux ne donnent pas d'indication sur la totalité de la période de croissance qui dépasse 10 semaines. Aussi, nous avons également considéré les estimations théoriques de la CIGR (1984) pour les volailles de chair.

Notre premier objectif a été d'acquérir les connaissances manquantes pour permettre une évaluation robuste du débit d'air des bâtiments d'élevage de canards à partir de mesures simples (température et hygrométrie) dans le but d'estimer les émissions de gaz par ce type de bâtiments. L'évaluation du débit d'air a été ainsi réalisée à partir d'une série enregistrée au préalable dans un élevage réel dans lequel l'ITAVI teste des moyens de réduction des odeurs (élevage de G. Martin-Peulet).

Dans une perspective d'exploration de modes d'élevages diversifiés, l'élevage sur litière présente quatre intérêts : réduction de l'émission d'odeurs lorsque la litière reste globalement aérobie (maintien "libre à l'air" d'une fraction significative de la porosité ; les conflits de voisinage semblent moins nombreux dans le cas des élevages sur litière ; Healy, 1996 quantifie cet effet dans le cas du porc) ; réorganisation sous forme organique de l'azote excrété (réduction du risque de lessivage vers les eaux souterraines et réduction des pertes d'azote ammoniacal) et possibilité de maîtriser les émissions gazeuses azotées (Robin *et al*, 1999) ; augmentation de la surface par animal (une des composantes du "bien-être") ; apport accru de carbone au sol lors de l'épandage des effluents et possibilité de réduire la masse épandue par l'évaporation de l'eau des déjections (réduction potentielle de la consommation d'énergie et augmentation potentielle de la teneur en matière organique des sols dans le cadre de la réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre).

Notre second objectif a été d'évaluer la possibilité d'un élevage sur litière. L'élevage sur litière réalisé a permis d'évaluer la densité maxi-

male d'élevage, la capacité de ce type d'élevage à évaporer l'eau des déjections et à réorganiser l'azote et le carbone sous forme organique.

2 - Matériel et méthode

2.1. Dispositif expérimental

L'expérimentation a été réalisée en conditions contrôlées de climat, bâtiment, animaux et litière. Les enceintes de mesure étaient deux cellules identiques de 14,5 m², l'une comportant une surface de caillebotis de 7,8 m². Elles ont été conduites durant douze semaines dans un local climatisé à une température correspondant à des conditions climatiques moyennes pour le territoire français. Les enceintes étaient ventilées naturellement par les effets de densité, générés par les productions de chaleur sensible et de vapeur d'eau des animaux et de la litière, complétées au besoin par un apport de chauffage. Chaque enceinte était équipée d'un chauffage radiant de 2kW dont la hauteur a été ajustée en sorte d'obtenir la même température de surface au sol que pour l'élevage de G. Martin-Peulet. Nous avons choisi des régimes climatiques quasi-permanents pour favoriser la reproductibilité de l'expérience et la précision des mesures de flux d'énergie. Nous avons fait varier les températures extérieures et d'ambiance par paliers, en fonction des recommandations d'élevage (guide Grimaud) et du besoin d'explorer le partage entre flux sensible et latent. La durée d'éclairage a été réduite progressivement de 24h à 14h durant les quatre premières semaines d'élevage, selon les mêmes recommandations, l'éclairage continu étant évité conformément aux souhaits relatifs à l'amélioration du bien être animal.

2.2. Animaux et densité d'élevage

Les canards sont de souche "ST4 reduc" et issus de l'élevage de reproduction de France-canards (53). Le ratio mâles/femelles a été de 65%/35%. La densité animale pour le système caillebotis a été de 13 animaux.m² en moyenne et

10 animaux.m⁻² pour le système litière. Les mâles et les femelles étaient séparés par une grille. Un échantillon d'animaux a été pesé le 26^{ème} jour d'élevage puis la totalité des animaux a été pesée aux 55^{ème}, 75^{ème} et 82^{ème} jours d'élevage.

2.3. Alimentation et abreuvement

L'aliment a été fabriqué essentiellement à base de végétaux (Grousset, 44). Trois types ont été utilisés (démarrage, croissance, finition). Il était pesé à chaque apport, les mangeoires étant remises à niveau constant (alimentation *ad libitum*).

L'eau venait du réseau d'eau potable. Elle était apportée et pesée journalièrement sans traitement ultérieur. L'abreuvement était réalisé par des pipettes sans récupérateur d'eau (même matériel et densité que l'élevage de G. Martin-Peulet) pour le système caillebotis et avec récupérateur d'eau pour le système litière.

2.4. Sols : caillebotis et litière

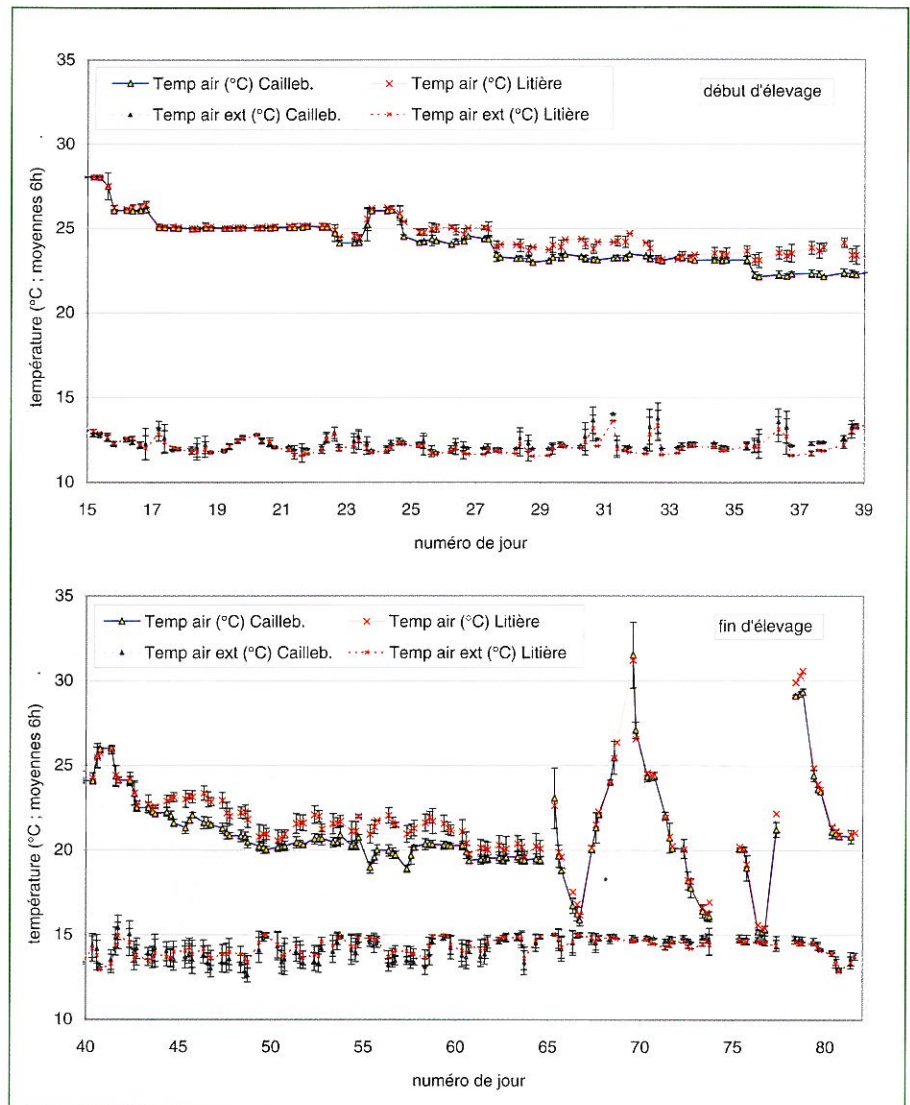
Les caillebotis étaient en inox et identiques à ceux de l'élevage de G. Martin-Peulet.

La litière (fournie par M. Guilherm, 29) était constituée de paille broyée et agglomérée en granulés qui se désagrégeaient et gonflaient avec l'humectation et le piétinement des animaux.

2.5. Mesures et contrôles

Les pesées d'eau ont été effectuées sur une bascule (Metler). Les pesées d'aliment et animaux ont été effectuées sur une balance commerciale (Méto). Les mesures de température et d'hygrométrie ont été effectuées en continu par des psychromètres équipés de thermocouples de type K (ThermoElectric, Paris), contrôlés par un thermo-hygromètre manuel (Testo-term, Shiltigheim). La température de litière n'a pas été suivie régulièrement du fait de son hétérogénéité spatiale forte (zones couchage et abreuvoirs) et de la difficulté d'interpréter cette mesure en l'absence de mesures locales de production de chaleur et de conductivité thermique. Les débits d'air ont été mesurés en continu par des anémomètres fil chaud (TSI, 8450) et contrôlés manuellement par un anémomètre à hélice (Airflow, LCA 6000). Les débits,

Figure 1 : évolution des températures intérieures et extérieures durant l'expérimentation



température et hygrométrie ont été contrôlés numériquement par la vérification des lois de ventilation par effets de densité (débit en fonction de la géométrie d'ouvrants et de l'écart de température virtuelle ; Souloumiac et Itier, 1989) et par la fermeture du bilan d'eau. Les mesures en continu ont été réalisées toutes les minutes, moyennées et mémorisées toutes les 30 minutes sur une centrale d'acquisition (AOIP, SA70, SA120). Plus de détails sur le dispositif expérimental et les calculs de flux de gaz et de chaleur sont donnés dans Robin et al (1997).

3. Résultats et discussion

3.1. Elevage

Les températures intérieures sont présentées sur la figure 1. En début d'élevage, la température a été ajustée

pour obtenir la même activité des animaux dans les deux cellules. La température a été augmentée autour des jours 25, 40 et 70 pour caractériser son effet sur les émissions de chaleur à trois âges différents. La température intérieure a été abaissée et augmentée par rapport à la température de consigne lorsque les animaux étaient plus âgés (jours 70 et 80, avant et après le départ des femelles pour caractériser son effet à deux densités animales différentes). Des amplitudes de variation croissantes (2 à 15 K) ont été choisies en fonction des valeurs observées en élevage réel (figure 2).

Les canards ont grandi normalement, la courbe de poids observée (figure 3) n'ayant pas été inférieure à la courbe théorique, à l'exception de la fin de l'élevage. Les changements rapides et importants dans la température d'ambiance que nous

Figure 2 : évolution des températures intérieures dans un élevage réel (d'après les mesures enregistrées par S. Lubac, ITAVI)

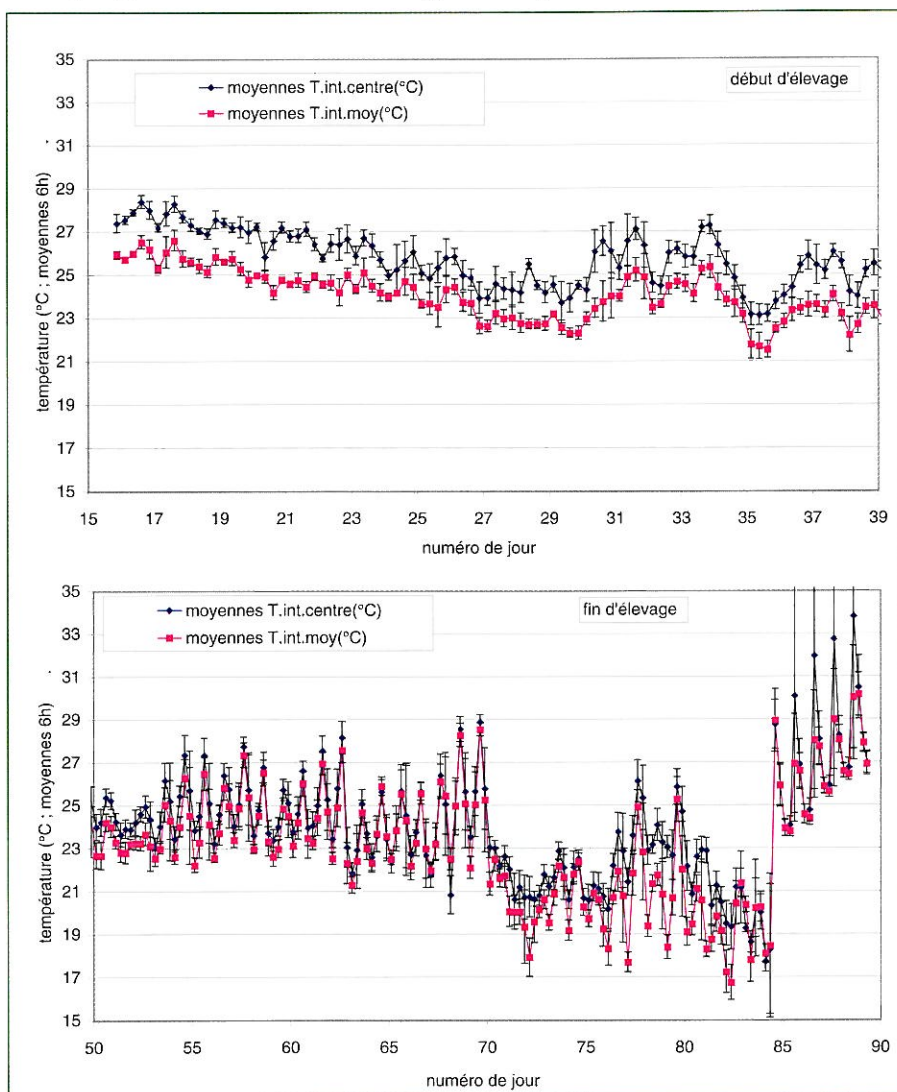
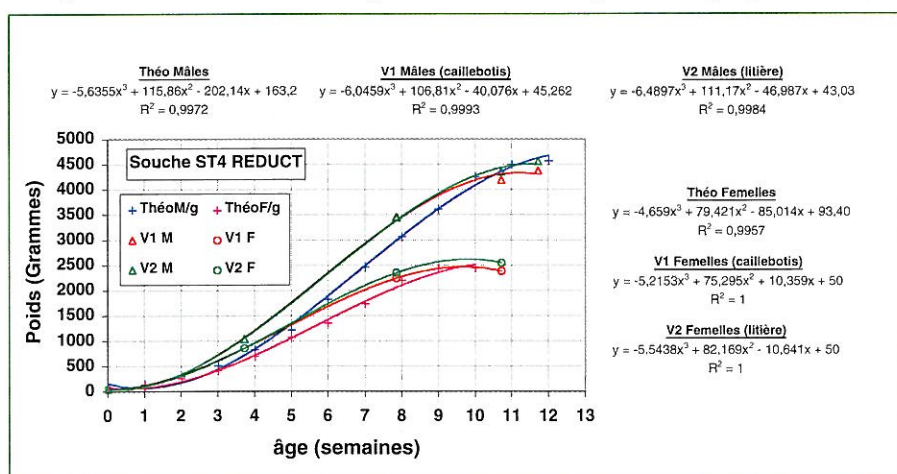


Figure 3 : évolution du poids des canards, valeurs observées et valeurs théoriques (les valeurs théoriques sont données par France Canards ; les équations indiquées ont servi à estimer le poids des animaux pour chaque pas de temps)



avons réalisés ont pu affecter la prise alimentaire et la croissance (cf. figure 2). Le taux de mortalité a été inférieur à 3% dans l'enceinte caillebotis et supérieure à 9% dans l'enceinte litière. La mortalité accrue en litière vient probablement de

plusieurs facteurs simultanés et défavorables durant les premières semaines de l'élevage : éclairage trop intense (piquage des animaux accru) ; entretien de la litière inadapté ; densité animale un peu trop forte pour ce mode d'élevage.

De même, les consommations d'aliment et d'eau ont évolué normalement (Hester et al, 1980) à l'exception de la fin de bande (figures 4 et 5).

La densité animale a été globalement de 11 canards par mètre carré dans l'élevage sur litière avec des variations entre mâles et femelles au cours de l'élevage (13 canards.m² au début à 12 canards.m² le 48^{ème} jour d'élevage chez les mâles, 10 canes.m² pour les femelles ; 11 canards.m² à partir du 56^{ème} jour). Les différences de mortalité (13% de mortalité côté mâles contre 2% côté femelles) et d'évolution de la litière nous conduisent à penser qu'il est préférable de limiter la densité des canards à 10 canards.m² dans le cas d'un élevage sur litière.

La consommation de litière a atteint 8 kg.canard⁻¹. L'apport initial a été trop élevé, les apports suivants ont été trop faibles et trop espacés. Un mélange correct des déjections et de la litière, sans émission forte d'ammoniac et laissant des animaux propres, a été obtenu en fin de bande avec deux apports quotidiens d'environ 100 g.canard⁻¹. Ce besoin aurait été plus faible avec une densité animale moindre et une conduite de litière adaptée dès le début de l'élevage.

Les bilans de masse d'eau, de carbone et d'azote ont confirmé dans le cas de l'élevage de canards, la capacité de la litière à évaporer l'eau des déjections, à stocker du carbone, à réduire les quantités d'azote ammoniacal et d'azote total à épandre.

3.2. Productions de chaleur des modes d'élevage sur caillebotis et sur litière

Les productions de chaleur totale sont bien estimées par la théorie (CIGR, 1984) pour les deux modes d'élevage durant les quatre premières semaines (figure 6). Durant les sept dernières, la théorie explique assez bien la production de l'élevage sur litière mais surestime de plus de 30% celle de l'élevage sur caillebotis. L'équation proposée par Sauveur et de Carville (1990), à savoir l'estimation de Chwalibog *et al* (1985) augmentée de 20% (Siregar et Farrell (1980) conduit également à une nette sur-estimation. Le rapport entre le poids

Figure 4 : évolution des consommations d'eau et d'aliment ; on peut constater à quel point les variations importantes de température en fin d'élevage perturbent la consommation d'aliment des animaux.

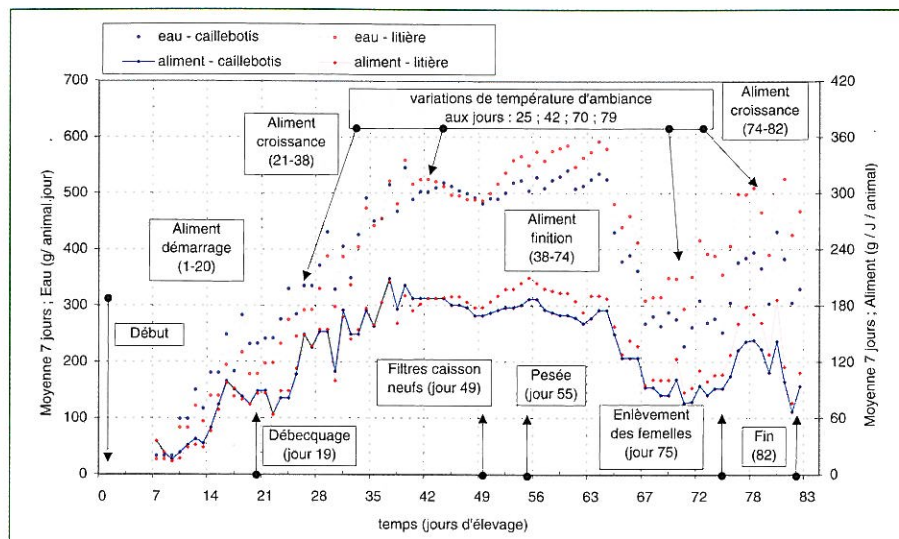


Figure 5 : évolution de l'indice de consommation et du rapport eau/aliment ; les équations utilisées pour estimer le poids moyen des animaux pour chaque journée n'ont pas permis de calculer l'indice de consommation en fin de bande (variations de poids négatives ou nulles, cf. figure 4)

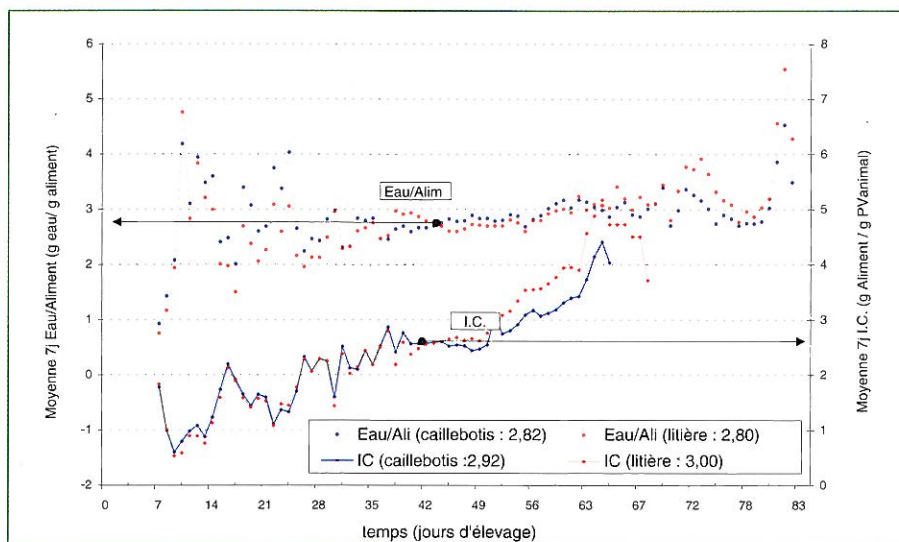
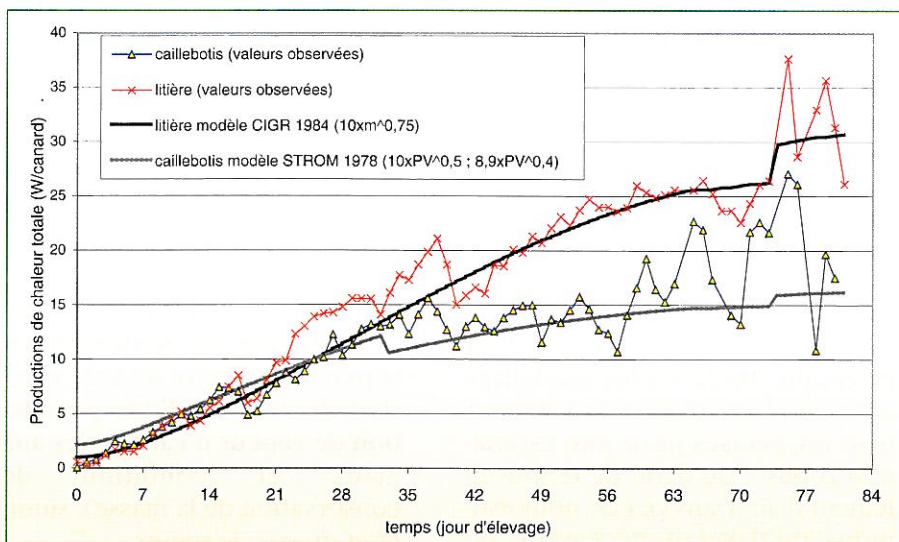


Figure 6 : évolution des productions de chaleur totale théoriques (CIGR, 1984 ; Strøm, 1978) et observées pour les deux modes d'élevage (W.canard-1).



métabolique ($PV^{0,75}$) et la production de chaleur, supposé constant par la CIGR (1984) pour les volailles de chair, diminue donc à partir de la cinquième semaine. Cette baisse de la production de chaleur par rapport au poids métabolique a déjà été notée par Kotrbacek (1973) en termes de consommation d'oxygène et d'émission de dioxyde de carbone. Reprenant des travaux antérieurs, il l'explique par une proportion croissante de la masse corporelle dont le métabolisme est moins actif.

La précision nécessaire pour l'estimation du débit d'air conduit à rechercher une nouvelle modélisation de la production de chaleur pour l'élevage sur caillebotis. En valeurs moyennes journalières, nous pouvons utiliser une équation du même type que celle de la CIGR (1984) mais en réduisant sensiblement les deux coefficients de calage. L'équation proposée par Strøm (1978 ; cité par CIGR, 1984) s'avère mieux adaptée, hormis lors des variations importantes de températures réalisées en fin d'élevage :

- pour des poulets de $PV < 1,5 \text{ kg}$:
Chaleur totale = $10 \times \text{Poids Vif}^{0,5}$
- pour des poules de $PV > 1,5 \text{ kg}$:
Chaleur totale = $8,9 \times \text{Poids Vif}^{0,4}$

Les productions de chaleur sensible et latente de l'élevage sur caillebotis sont assez bien estimées par la théorie pour l'élevage sur caillebotis les cinq premières semaines si l'on utilise la production de chaleur totale proposée par Strøm (1978, cité par CIGR, 1984) et l'équation de partage entre chaleur sensible et latente proposée par la CIGR (1984) (figures 7 et 8). L'équation proposée par Sauveur et de Carville (1990) conduit à une très nette sur-estimation. Durant les semaines 6 à 14, la théorie explique assez bien la production de chaleur latente de l'élevage sur caillebotis en conditions normales et moins bien pour des variations importantes de température. En conditions froides, la chaleur sensible est largement sous-estimée (plus de 30%) ce qui explique principalement l'écart à l'estimation de la chaleur totale (cf. figure 6).

Figure 7 : évolution des productions de chaleur sensible théorique (CIGR, 1984) et observée pour les deux modes d'élevage (W.canard-1).

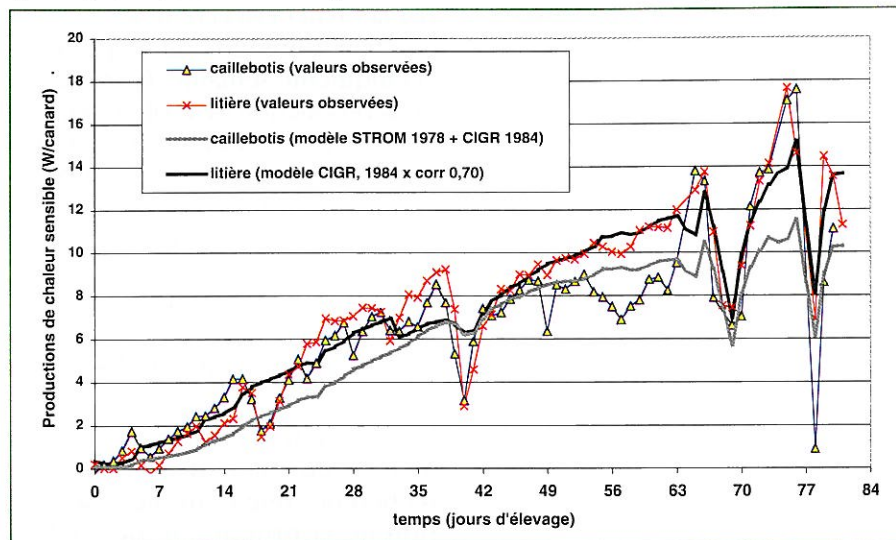
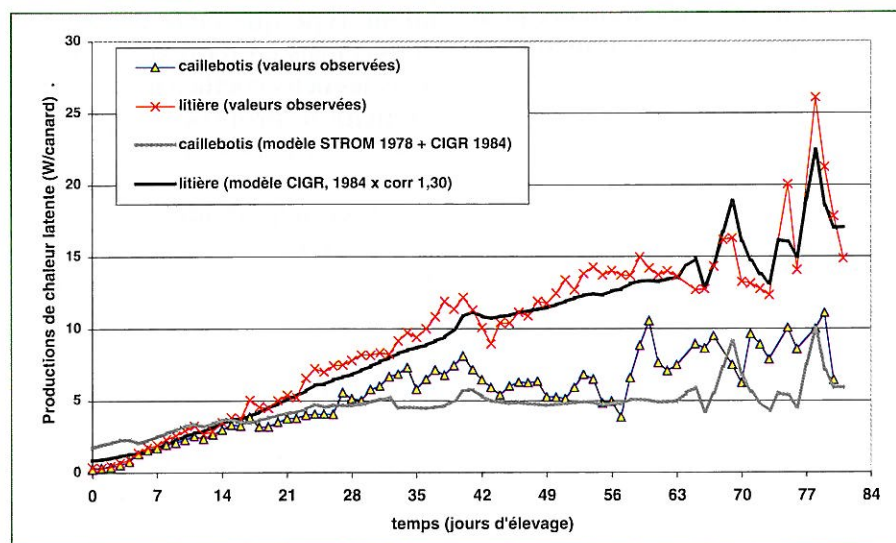


Figure 8 : évolution des productions de chaleur latente théorique (CIGR, 1984) et observée pour les deux modes d'élevage (W.canard-1).



Les productions de chaleur sensible et latente de l'élevage sur litière sont assez bien estimées si l'on utilise le mode de calcul de la CIGR (1984) et un facteur de réduction de la fraction de chaleur sensible, selon la méthode mise en œuvre par Pedersen et Thomsen (2000). Le coefficient qu'ils proposent (0,83) conduit à une nette surestimation qui est atténuée lorsque l'on utilise un coefficient de 0,70 (soit plus de 15% inférieur). Dans ces conditions, la production de chaleur latente est correctement estimée tandis que la production de chaleur sensible reste sous-estimée durant les semaines 4 et 5 de 20% à 30% à l'instar de la production de chaleur totale.

Vis-à-vis de notre objectif d'estimation des débits d'air, ces résultats montrent que la théorie proposée

par la CIGR (1984) ne pouvait être utilisée en l'état *a fortiori* durant la seconde moitié de la période d'élevage où les débits d'odeurs et de gaz attendus sont plus élevés. En conditions normales de température (au voisinage des consignes) le modèle proposé par Strøm (1978, cité par CIGR, 1984) pour les poulets et pondeuses est utilisable pour la chaleur totale, tandis que la régulation du partage entre chaleur sensible et latente proposée par la CIGR (1984) permet une estimation correcte des productions de chaleur. En fin d'élevage et en conditions plus froides ou plus chaudes (en dehors d'un intervalle 18-22°C) les modalités actuelles de modélisation s'avèrent trop imprécises pour une estimation robuste du débit de renouvellement d'air. Dans ce cas, nous estimons qu'il serait nécessaire de

proposer une modélisation différente des productions de chaleur totale, sensible et latente basée sur les spécificités métaboliques des canards.

3.3. Application à l'estimation du débit d'air d'un élevage réel sur caillebotis

L'estimation du débit de renouvellement d'air d'un bâtiment à partir d'une modélisation des productions de chaleur et de mesures de température et hygrométrie observées à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment se compose de deux étapes : le choix des valeurs, le calcul du débit.

3.3.1. Conditions d'application du modèle

Les observations doivent respecter les lois physiques fondamentales (conservation de la matière et de l'énergie, états physiques possibles) et doivent se trouver dans le domaine de validité du modèle.

Les tests introduits afin de calculer le débit dans les meilleures conditions sont les suivants :

- les observations (température et hygrométrie) permettent de calculer l'enthalpie de l'air intérieur et extérieur (condition de disponibilité complète des mesures), sinon rejet du pas de temps ;
- l'humidité relative est comprise entre 30% et 100,6% (test de validité de cette mesure pour laquelle le capteur est sujet à des dérives qui sont repérées à l'étalonnage mais pas toujours renseignées dans un fichier d'observations brutes), sinon rejet du pas de temps ;
- la température intérieure est dans un intervalle de 2K autour de la température de consigne (conditions de mise au point du modèle), sinon rejet du pas de temps ;
- l'humidité spécifique de l'air (ou rapport de mélange en kg eau.kg air sec⁻¹) intérieur est strictement supérieure à celle de l'air extérieur (existence d'une production de vapeur d'eau par les animaux et condition de conservation de la masse), sinon rejet du pas de temps ;

- l'enthalpie intérieure dépasse de plus de 1% l'enthalpie extérieure (existence d'une production de chaleur par les animaux et condition de conservation de l'énergie), sinon rejet du pas de temps ;
- si la température intérieure est inférieure à la température extérieure alors le débit d'eau de refroidissement évaporatif doit être strictement positif (impossibilité physique d'un refroidissement de l'air en l'absence d'un puit de chaleur sensible, dans notre cas nous faisons l'hypothèse que seul le refroidissement évaporatif peut être un puit de chaleur sensible, condition de conservation de l'énergie), sinon rejet du pas de temps.

3.3.2. Description du mode de calcul

Le débit d'air est estimé en ($\text{m}^3 \cdot \text{heure}^{-1} \cdot \text{canard}^{-1}$) à partir d'un jeu de données contenant les températures et les hygrométries intérieure et extérieure en fonction du temps.

Calcul de l'humidité spécifique de l'air

L'humidité spécifique de l'air est déduite des mesures de température et d'humidité en trois étapes.

- calcul de la pression de vapeur saturante (formule de Tetens)

$$(1) \quad P_{\text{sat},i} = 610,78 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times t_i}{237,3 + t_i} \right)}$$

où $P_{\text{sat},i}$ est la pression de vapeur saturante de l'air en eau (en Pa) pour l'air intérieur à la température t_i (en °C), 610,78, 7,5 et 237,3 sont des coefficients de calage. On calcule de même $P_{\text{sat},e}$ pour l'air extérieur.

- calcul de la pression partielle de vapeur d'eau

$$(2) \quad P_{\text{vap},i} = P_{\text{sat},i} \times \frac{HR_i}{100}$$

où $P_{\text{vap},i}$ est la pression partielle de vapeur d'eau (en Pa) dans l'air, sachant que par définition l'humidité relative caractérise le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la pression de vapeur saturante à la température de l'air, et HR_i est l'humidité relative de l'air intérieur (en %). On calcule de même $P_{\text{vap},e}$ pour l'air extérieur.

- calcul de l'humidité spécifique

On fait l'hypothèse que l'air est un mélange parfait de gaz parfaits et l'on calcule la masse d'eau rapportée à la masse d'air sec qui circule à travers le bâtiment :

$$(3) \quad q_i = 0,622 \times \frac{P_{\text{vap},i}}{P_{\text{atm}} - P_{\text{vap},i}}$$

où q_i est l'humidité spécifique de l'air intérieur (en $\text{kg eau} \cdot \text{kg air sec}^{-1}$), 0,622 correspond au rapport des masses molaires de l'eau et de l'air (en $\text{kg eau} \cdot \text{kg air sec}^{-1}$) et P_{atm} est la pression atmosphérique (en Pa, soit en conditions normales 101325 Pa). On calcule de même q_e pour l'air extérieur.

Calcul de la masse volumique de l'air

Celle-ci est nécessaire pour convertir le débit d'air volumique habituellement utilisé en élevage (en $\text{m}^3 \cdot \text{heure}^{-1}$) en débit massique (en $\text{kg d'air sec} \cdot \text{heure}^{-1}$) qui permet de mettre en œuvre les lois de conservation de la masse et de l'énergie.

Pour la calculer on utilise la loi des gaz parfaits qui établit une relation entre la masse d'un gaz, son volume et sa pression : (4)

$$\rho_i = \left[\frac{P_{\text{vap},i}}{47,1 \times (273,15 + t_i)} + \frac{P_{\text{atm}} - P_{\text{vap},i}}{29,27 \times (273,15 + t_i)} \right] \times \frac{1}{g_{\text{grav}}}$$

où ρ_i est la masse volumique de l'air intérieur (en $\text{kg d'air sec} \cdot \text{m}^{-3}$ d'air humide), g_{grav} l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), 47,1 et 29,27 sont les deux constantes des gaz parfaits pour la vapeur d'eau et pour l'air sec respectivement, 273,15 est la température du point critique de l'eau qui permet de convertir les degrés Celsius en Kelvin. On calcule de même ρ_e pour l'air extérieur.

Calcul de l'enthalpie de l'air

Nous avons utilisé ici l'équation simplifiée proposée par Andréieff de Notbeck (1978) : (5)

$$E_i = (0,24 \times t_i + q_i \times (0,47 \times t_i + 595)) \times 4,184 \times 1000$$

où E_i est l'enthalpie de l'air intérieur (en $\text{J} \cdot \text{kg air sec}^{-1}$). On calcule de même E_e pour l'air extérieur.

Estimation du poids des animaux

Une fonction polynomiale a été calée sur nos observations en

cellule expérimentale pour estimer le poids des animaux en fonction du temps (souche ST4 réduit ; 65% mâles/35% femelles ; figure 3). Il est bien sûr préférable de peser régulièrement les animaux et d'utiliser une fonction adaptée ou une interpolation linéaire. (6)

$$PV = -0,0000181 \times J^4 + 0,002018 \times J^3 - 0,00164 \times J + 0,05473$$

où PV est le poids vif des canards en kg et J l'âge des canards (en jours). La différence entre ces coefficients et ceux de la figure 3 vient de ce qu'ici les sexes sont regroupés.

Calcul de la production de chaleur totale

La production de chaleur totale est estimée selon le modèle de Strøm (1978, cité par CIGR, 1984), nous avons vu ci-dessus que cette estimation n'était plus valide pour des températures d'ambiance très différentes de la température de consigne :

$$(7a) \quad \text{si } PV < 1,5 \text{ kg alors } H_{\text{tot}} = 10 \times PV^{0,5}$$

$$(7b) \quad \text{si } PV \geq 1,5 \text{ kg alors } H_{\text{tot}} = 8,9 \times PV^{0,4}$$

où H_{tot} est la production de chaleur totale (en $\text{W} \cdot \text{canard}^{-1}$).

Calcul des parts de chaleur sensible et latente

Nous utilisons ici les recommandations de la CIGR (1984), soit :

$$(8a) \quad H_{\text{sens}} = H_{\text{tot}} \times (0,8 - 1,85 \times 10^{-7} \times (t_i + 10)^4)$$

$$(8b) \quad H_{\text{lat}} = H_{\text{tot}} - H_{\text{sens}}$$

où H_{sens} est la production de chaleur sensible (en $\text{W} \cdot \text{canard}^{-1}$), H_{lat} est la production de chaleur latente (en $\text{W} \cdot \text{canard}^{-1}$).

Calcul du débit d'air selon la production de vapeur d'eau (chaleur latente)

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

$$(9) \quad Q_{\text{air,lat}} = \frac{\left(H_{\text{lat}} + \frac{\text{cool}}{\text{Lat}} \right)}{\rho_i \times (q_i - q_e) \times \text{Lat}} \times 3600$$

où $Q_{\text{air,lat}}$ est le débit d'air selon la chaleur latente (en $\text{m}^3 \cdot \text{heure}^{-1} \cdot \text{canard}^{-1}$), cool est le débit d'eau de refroidissement évaporatif (en $\text{kg eau} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{canard}^{-1}$) et Lat est la chaleur latente de vaporisation de l'eau

(2,45.106 J.kg eau⁻¹). P_i est utilisée pour calculer le débit d'air sortant. On utiliserait P_e pour calculer le débit d'air entrant dans le bâtiment. On utiliserait r_i avec la concentration intérieure et r_e avec la concentration extérieure pour calculer la production de gaz ou d'odeurs par le milieu d'élevage (animaux+litière ou lisier).

Calcul des pertes de chaleur conductives à travers les parois du bâtiment

Celles-ci sont estimées à partir du coefficient d'isolation thermique du bâtiment G_p (en W.K⁻¹.canard⁻¹), soit :

$$(10) \quad P_{\text{parois}} = G_p \times (t_i - t_e)$$

où P_{parois} est le flux de chaleur à travers les parois (en W.canard⁻¹), t_i et t_e sont les températures intérieure et extérieure (en °C).

Calcul du chauffage apporté en complément de la chaleur produite par les animaux

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 anthropiques de chaleur), sachant que cette valeur peut être contrôlée dans le cas d'un suivi régulier. 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'esti-

mation 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. Nous utilisons l'équation suivante : (11)

$$H_{\text{chauff}} = \frac{Q_{\text{air,lat}}}{3600} \times \rho_i \times C_p \times (t_i - t_e) + P_{\text{parois}} + \frac{\text{cool}}{\text{Lat}} - H_{\text{sens}}$$

où H_{chauff} est la puissance de chauffage durant le pas de temps étudié (en W.canard⁻¹) et C_p est la chaleur massique à pression constante (ou capacité calorifique, égale à environ 1010 J.kg air sec⁻¹.K⁻¹ pour la gamme d'air humide qui nous concerne). Nous appliquons en outre deux conditions à ce résultat : (12a)

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

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

où $H_{\text{chauff,maxi}}$ est la puissance maximale de chauffage installée dans le bâtiment (en W.canard⁻¹).

Si le chauffage est produit dans l'aire de vie des animaux par une combustion, il convient d'ajouter à la production de chaleur latente, la part de vapeur d'eau dégagée par la combustion (par exemple 0,117 g H₂O.heure⁻¹.W⁻¹ ou 1,64 kg H₂O.kg C₃H₈⁻¹ pour la combustion complète du propane, Lide, 1998). Cette quantité ne doit pas être négligée. Elle est du même ordre de grandeur que la production de vapeur d'eau des animaux en début de bande et en conditions froides (Amand *et al*, 1998).

Calcul du 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 : (13)

$$Q_{\text{air,tot}} = \frac{(H_{\text{tot}} + H_{\text{chauff}} - P_{\text{parois}})}{\rho_i \times (E_i - E_e)} \times 3600$$

où $Q_{\text{air,tot}}$ est le débit d'air selon la chaleur totale (en m³.heure⁻¹.canard⁻¹).

Calcul du 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

$$(14) \quad Q_{\text{air,sens}} = \frac{(H_{\text{sens}} + H_{\text{chauff}} - P_{\text{parois}} - \frac{\text{cool}}{\text{Lat}})}{\rho_i \times C_p \times (t_i - t_e)} \times 3600$$

où $Q_{\text{air,sens}}$ est le débit d'air selon la chaleur sensible (en m³.heure⁻¹.canard⁻¹).

3.4. Validation du modèle

Le modèle a été validé sur le jeu de données que nous avons observé sur la cellule caillebotis, composé des données d'entrée du modèle et des débits d'air. Ces dernières sont indépendantes des mesures ayant servi au choix des modèles de Strøm (1978, cité par CIGR, 1984) pour la chaleur totale et de la CIGR (1984) pour le partage entre chaleur sensible et latente. Elles nous ont permis d'identifier le modèle utilisable pour ce type d'élevage sur la base des valeurs moyennes journalières mais elles n'ont servi à aucun moment à ajuster les coefficients empiriques du modèle pour l'élevage sur caillebotis. La limite de notre jeu de données vient de ce que les observations ne permettent ni une validation sur toute la gamme de débits d'air existant en élevage réel ni de vérifier la représentativité de nos conditions expérimentales (animaux, alimentation, abreuvement, chauffage, bâtiment, éclairage, etc.). L'absence d'effets de vents dans le cas de notre installation entraîne des débits inférieurs à ceux que l'on peut observer en élevage. Cependant cette validation reste pertinente pour le problème des odeurs. C'est en fin de bande et lorsque le débit d'air est faible que les odeurs posent le plus de problèmes de voisinage car alors la concentration en odeurs de l'air sortant est plus forte. Une validation du débit d'air par des mesures en élevage reste néanmoins souhaitable.

Dans notre cas nous avons utilisé les mesures de chauffage pour chaque pas de temps. En cas d'utilisation du chauffage calculé, les points se rapprochent de l'estimation par le flux de chaleur latente.

Figure 9 : comparaison des débits d'air observés et calculés au cours de l'élevage expérimental de canards sur caillebotis (début et milieu de bande).

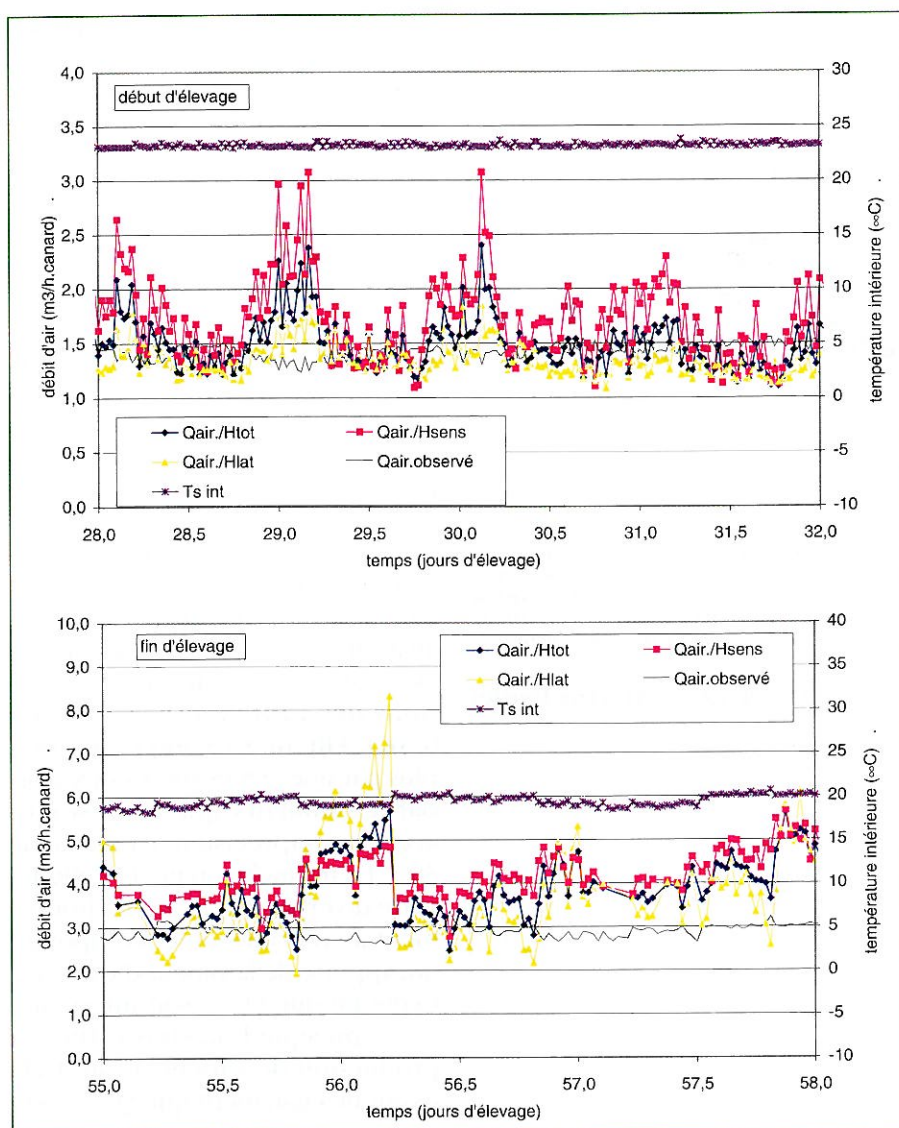
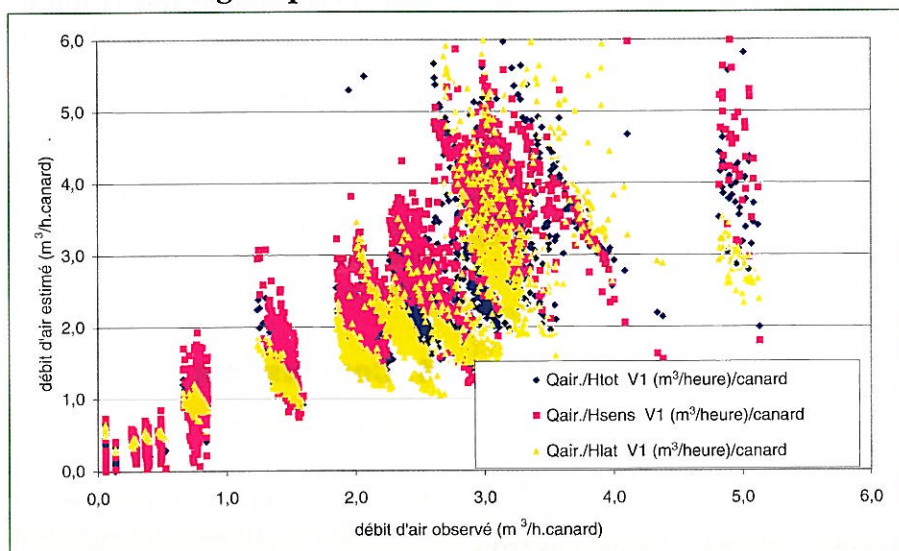


Figure 10 : : comparaison des débits d'air observés et calculés au cours de l'élevage expérimental de canards sur caillebotis



La figure 9 présente l'évolution des débits observés et calculés en fonction du temps pour deux courtes périodes distinctes tandis que la

figure 10 montre la comparaison des débits pour l'ensemble des mesures. On constate sur la figure 9 que l'ordre de grandeur des débits est

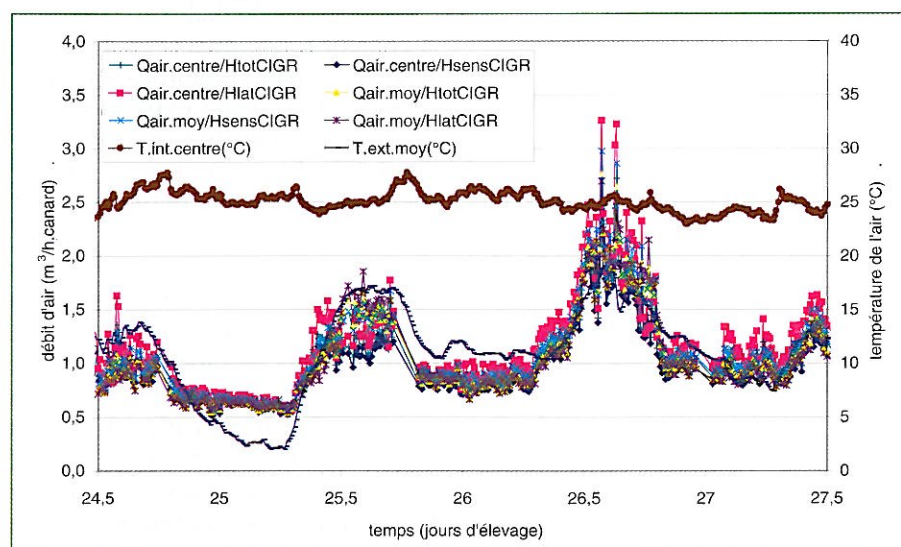
assez bien estimé (1 à 3 m³.heure⁻¹.canard⁻¹). La meilleure estimation est donnée par la chaleur latente puis la chaleur totale puis la chaleur sensible. Les variations diurnes sont sous-estimées. Cela peut s'expliquer par le poids important de variations dans l'activité des animaux entre les périodes diurne et nocturne. Smith *et al* (1976) montrent que les rythmes cardiaque et respiratoire sont plus bas et plus réguliers à l'obscurité. Cela peut également être relié à l'existence de deux états métaboliques chez le canard quelle que soit l'heure de la journée (Hagan et Heath, 1976), l'un où la consommation d'oxygène est nettement supérieure à celle de l'autre. Dans nos conditions, le débit d'air était mieux estimé en période diurne. En conséquence il semble préférable de réaliser les mesures manuelles de concentrations dans les élevages (NH₃, odeurs, etc.) en période diurne en sorte d'avoir une meilleure indication du débit d'air.

On constate sur la figure 10 que les estimations sont voisines des mesures sur toute la gamme des débits d'air. La dispersion augmente avec le débit. Compte tenu de la très forte variabilité des débits d'air en élevage de volailles (rapport de 1 à 100 entre les débits minimum et maximum), cette dispersion nous semble acceptable. Elle ne remet pas en cause l'usage du modèle pour l'estimation de flux d'odeurs ou d'ammoniac. Elle conduit néanmoins à recommander de réaliser les mesures en période diurne et dans la gamme de validité du modèle pour la température intérieure (18-22°C en fin de bande), de façon à améliorer l'estimation. L'incertitude sur la mesure de flux d'odeurs ou d'ammoniac dépend non seulement du modèle d'estimation du débit d'air mais aussi de la précision des mesures de concentration en gaz ou en odeurs et de la représentativité du bâtiment, des conditions d'élevage et des conditions climatiques au moment de la mesure. Elle peut être évaluée en répétant l'estimation dans des conditions diversifiées.

3.5. Application du modèle à un élevage de terrain

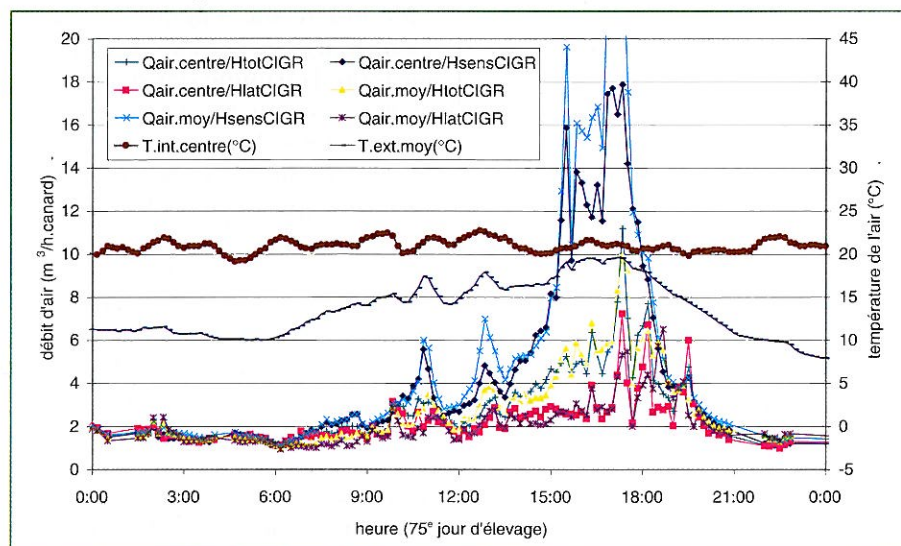
Le modèle a été appliqué sur un jeu de mesures de température et hygrométrie enregistrées au pas de 10 minutes dans l'élevage de G. Martin-Peulet. La température et

Figure 11 : estimation du débit d'air de l'élevage de G. Martin-Peulet en début d'élevage



("centre" indique que les mesures utilisées sont celles observées au centre du bâtiment ; "moy" indique que les valeurs utilisées résultent de la moyenne des trois points observés dans le bâtiment ; "Htot", "Hlat" et "Hsens" indiquent que le débit d'air a été estimé sur la base de la chaleur totale, latente et sensible respectivement ; les deux séries d'observations croisées avec les trois méthodes d'estimation conduisent à six séries de débits estimés ; les six estimations sont en accord, cf. texte).

Figure 12 : estimation du débit d'air de l'élevage de G. Martin-Peulet en fin d'élevage



("centre" indique que les mesures utilisées sont celles observées au centre du bâtiment ; "moy" indique que les valeurs utilisées résultent de la moyenne des trois points observés dans le bâtiment ; "Htot", "Hlat" et "Hsens" indiquent que le débit d'air a été estimé sur la base de la chaleur totale, latente et sensible respectivement ; les deux séries d'observations croisées avec les trois méthodes d'estimation conduisent à six séries de débits estimés ; les six estimations sont en accord hormis de 14h à 18h ; on peut supposer qu'à cette période la divergence entre les méthodes résulte d'une pulvérisation d'eau dans l'ambiance, cf. texte).

L'hygrométrie extérieures ont été observées en deux points de façon à limiter l'effet d'un ensoleillement temporaire au point de mesure. La température et l'hygrométrie intérieures ont été observées en trois points de façon à caractériser l'hétérogénéité à l'intérieur du bâtiment. Nous avons choisi d'utiliser comme température et hygrométrie extérieure la moyenne des deux observations. Pour l'intérieur du bâtiment nous avons utilisé d'une part la

moyenne des deux observations localisées sur le côté du bâtiment et d'autre part les observations réalisées au centre du bâtiment. Ainsi nous avons deux estimations du renouvellement d'air nommées respectivement "moyenne" et "centre" et dans chaque cas trois estimations basées sur la chaleur sensible, la chaleur latente et la chaleur totale.

Nous présentons les résultats pour une période en début d'élevage

(figure 11) et pour une période en fin d'élevage (avant le départ des femelles, figure 12).

On constate sur ces graphiques que l'estimation du débit de renouvellement d'air est très voisine quelle que soit la méthode employée (chaleur sensible, totale ou latente) et le site (centre ou moyenne) en début d'élevage ainsi qu'en période de température extérieure froide en fin d'élevage.

L'estimation diverge fortement entre les méthodes ($Q_{air,lat} \ll Q_{air,tot} \ll Q_{air,sens}$) en fin d'élevage et lorsque la température extérieure se rapproche de la consigne (figure 12). Cette divergence ne s'explique pas par l'imprécision des mesures de température. Les capteurs ont été comparés avant leur installation dans le bâtiment. Ils ne présentent pas de biais systématique, l'erreur aléatoire est faible et la résolution de mesure conforme aux spécifications des capteurs (précision de 0,3K). Elle ne s'explique pas non plus par une erreur sur les flux émis par les animaux qui sont estimés avec une imprécision maximale de 30%. En revanche on peut expliquer cette divergence par le fonctionnement du refroidissement évaporatif qui apporte de la vapeur d'eau. Cela explique que $Q_{air,lat}$ soit inférieur à $Q_{air,tot}$ puisque l'on sous estime la production de vapeur d'eau. Cela explique également que $Q_{air,sens}$ soit supérieur à $Q_{air,tot}$ puisque l'on sur-estime la production de chaleur sensible. Cela explique que la surestimation par la chaleur sensible soit très supérieure à la sous-estimation par la vapeur d'eau car une faible quantité d'eau évaporée correspond à une forte quantité de chaleur. Enfin, si l'on fixe une valeur de 7 g eau.heure⁻¹.canard⁻¹ de 14 à 18 heures on obtient un bon accord entre les six estimations.

4. Conclusions

L'expérimentation réalisée au cours de ce travail a permis d'élaborer et de valider un modèle d'estimation du débit d'air, utilisable pour l'élevage de canards sur caillebotis. Ce modèle est utilisable en conditions réelles à partir d'un couple de mesures de températures et hygrométries à l'intérieur et l'extérieur du

bâtiment. Il serait souhaitable de poursuivre la validation de ce modèle par des mesures de débit d'air en conditions commerciales. La méthode de référence dans le cas d'un bâtiment dynamique en dépression pourrait être la mesure des vitesses d'air à l'aspiration de l'air extrait, tandis que ce pourrait être l'utilisation d'un gaz traceur pour un bâtiment à ventilation naturelle.

Nous avons également montré que la production de chaleur d'un canard ainsi que le partage de cette production entre flux sensible et flux latent (production de vapeur d'eau) sont régulés de façon très différente de celle d'un poulet de chair. Nous avons proposé un modèle empirique au pas de temps journa-

lier, s'inspirant des équations actuelles de modélisation. Ce travail pourrait aller beaucoup plus loin, d'une part en travaillant au pas de temps horaire, d'autre part en s'appuyant sur les connaissances actuelles en matière de métabolisme énergétique.

L'expérimentation réalisée a fait ressortir l'intérêt de l'élevage de canards sur litière et l'importance de la densité d'élevage pour faciliter la conduite des animaux et de la litière. L'amélioration de la conduite de la litière nécessite de définir le contexte économique et d'approvisionnement en litière des élevages concernés et d'évaluer les besoins agronomiques

Remerciements

Nous remercions ici toutes les personnes qui ont contribué aux résultats présentés ci-après, et particulièrement les partenaires financiers (ACTA dans le cadre de l'enveloppe recherche), qui ont permis la réalisation des travaux, Gilles Martin-Peulet et les éleveurs de canards qui nous ont accueilli dans leur élevage. Nous tenons également à remercier vivement Michel Guilherm (Tréflaouénan, 29) qui nous a fourni la litière pour faire les tests préliminaires et démarrer l'essai.

Références bibliographiques

Amand G., Aubert C., Balaine L., Valancony H., Renault P., 2001. La gestion technique des bâtiments avicoles. Sciences et Techniques Avicoles, hors série septembre 1998, 64p.

Andréieff de Notbeck G., 1978. Manuel du conditionnement de l'air. tome II, ed. Pyc-Edition-Desforges, Paris, 239p.

Aubert C., Amand G., Bouvarel I., Lubac S., Renault P., Valancony H., Blondel R., Conan S., Delabrosse C., Hamon J.P., Quideau P., Vernon P., 2001. Aviculture et respect de l'environnement. Sciences et Techniques Avicoles, hors série septembre 2001, 66p.

Baeza E., 1995. La viande de canard : production et principales caractéristiques. INRA Productions Animales, 8, (2), 117-125.

Chwalibog A., Pedersen J., Eggum B.O., 1985. Evaporative and sensible heat loss from chickens kept at different temperatures. Arch. Geflügelk., 49(2), 50-54.

CIGR, 1984. Report of working group on climatization of animal houses. Commission Internationale du Génie Rural, S.F.B.I.U., Aberdeen.

Hagan A.A., Heath J.E., 1976. Metabolic response of white pekin ducks to ambient temperature. Poultry Science, 55, 1899-1905.

Healy A., 1996. Contribution à l'étude comparative des nuisances olfactives émanant des élevages de porcs sur lisier ou sur litière biomérisée. Thèse de l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, Faculté de Médecine de Créteil, 94p.

Hester P.Y., Pierson F.W., Wilson E.K., Adams R.L., Stadelman W.J., 1980. Feed/gain ratios of white pekin ducks as affected by age and environmental temperature. Poultry Science, 60, 2401-2406.

Kotrback V., 1973. Age-dependent changes in O₂ consumption and CO₂ production of pekin ducks from hatch to 60 days of age at different ambient temperatures. Acta Vet. Brno, 42, 15-21.

Lide D.R., 1998. CRC Handbook of Physics and Chemistry, CRC Press, 2400p.

Pedersen S., Thomsen M.G., 2000. Heat and moisture production of broilers kept on straw bedding. J. agric. Engng. Res., 75, 177-187.

Philips V.R., Holden M.R., Sneath R.W., Short J.L., White R.P., Hartung J., Seedorf J., Schröder M., Linkert K.H., Pedersen S., Takai H., Johnsen J.O., Groot Koerkamp P.W.G., Uenk G.H., Scholtens R., Metz J.H.M., Wathes C.M., 1998. The development of robust methods for measuring concentrations and emission rates of gaseous and particulate air pollutants in livestock buildings. J. agric. Engng. Res., 70, 11-24.

Renault P., Aubert C., 1997. Etude de la qualité de l'air en élevages avicoles par l'analyse de trois paramètres (poussière, flore totale aérobie, ammoniac). Sciences et Techniques Avicoles, 18, 2-10.

Robin P., Souloumiac D., Oliveira P.A.V., Kermarrec C., 1997. Maîtrise des émissions gazeuses et de l'état final des litières en élevage de porcs intensif. Rapport d'étape contrat B.E.P. n°95/12-014, 100p.

Robin P., Souloumiac D., Oliveira P.A.V., Kermarrec C., 1999. Maîtrise à la source des émissions gazeuses et de l'état final des effluents en élevage intensif de porcs sur litière. Rapport final contrat B.E.P. n°95/12-014, 66p.

Sauveur B., de Carville H. 1990. Le canard de Barbarie. Editions INRA. Versailles (FRA). 181 pages.

Siregar A.P., Farrell D.J., 1980. A comparison of the energy and nitrogen metabolism of starved ducklings and chickens. British poultry science, 21, 203-211.

Smith N.E., Peterson C., Thigpen K., 1976. Body temperature, heart rate and respiration rate of an untrained domestic mallard duck, *Anas platyrhynchos domesticus*. Comp. Biochem. Physiol., 54A, 19-20.

Souloumiac D., Titer B., 1989. C.R.Acad. Sci., série 11, Tome 308 n-3, 269-274.



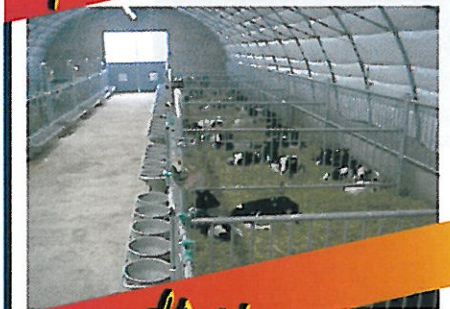
La passion de l'élevage
depuis 25 ans



poulaillers...



porcherie...



tunnels...

MATERIEL D'ELEVAGE FOREZIEN
Z.I. Le Chanasson
RN 82- EPERCIEUX SAINT PAUL
Tél. 04 77 27 47 47
Fax 04 77 26 60 50

Annexe : notations utilisées

symbole	Signification	Unité
constantes	vapeur d'eau dégagée par la combustion complète du propane	0,117 g H ₂ O.heure ⁻¹ .W ⁻¹ 1,64 kg H ₂ O.kg C ₃ H ₈ ⁻¹
	rapport des masses molaires de l'eau et de l'air	0,622 kg eau.kg air sec ⁻¹
C_p	chaleur massique à pression constante (ou capacité calorifique)	1010 J.kg air sec ⁻¹ .K ⁻¹ pour la gamme d'air humide habituellement rencontrée dans les bâtiments d'élevage
H_{chauff}	puissance de chauffage durant le pas de temps étudié	W.canard ⁻¹
G_p	coefficient d'isolation thermique du bâtiment	W.K ⁻¹ .canard ⁻¹
P_{parois}	flux de chaleur à travers les parois	W.canard ⁻¹
Lat	chaleur latente de vaporisation de l'eau	2.45.10 ⁶ J.kg eau ⁻¹ dans les conditions habituelles de température et de pression
$cool$	débit d'eau de refroidissement évaporatif	kg eau.s ⁻¹ .canard ⁻¹
$Q_{air,tot}$	débit d'air selon la chaleur totale	m ³ .heure ⁻¹ .canard ⁻¹
$Q_{air,sens}$	débit d'air selon la chaleur sensible	m ³ .heure ⁻¹ .canard ⁻¹
$Q_{air,lat}$	débit d'air selon la chaleur latente	m ³ .heure ⁻¹ .canard ⁻¹
H_{tot}	production de chaleur totale	W.canard ⁻¹
H_{sens}	production de chaleur sensible	W.canard ⁻¹
H^{lat}	production de chaleur latente	W.canard ⁻¹
J	âge des canards	jours
PV	poids vif des canards	kg
E_e	enthalpie de l'air extérieur	J.kg air sec ⁻¹
E_i	enthalpie de l'air intérieur	J.kg air sec ⁻¹
P_e	masse volumique de l'air extérieur	kg d'air sec.m ⁻³ d'air humide
P_i	masse volumique de l'air intérieur	kg d'air sec.m ⁻³ d'air humide
$grav$	accélération de la pesanteur	9,81 m.s ⁻² dans nos conditions géographiques
P_{atm}	pression atmosphérique	101325 Pa en conditions normales
q_e	humidité spécifique de l'air extérieur	kg eau.kg air sec ⁻¹
q_i	humidité spécifique de l'air intérieur	kg eau.kg air sec ⁻¹
HR_e	Humidité relative de l'air extérieur	%
HR_i	humidité relative de l'air intérieur	%
$P_{vap,e}$	pression partielle de vapeur d'eau de l'air extérieur	Pa
$P_{vap,i}$	pression partielle de vapeur d'eau de l'air intérieur	Pa
t_e	température de l'air extérieur	°C
t_i	température de l'air intérieur	°C
$P_{sat,e}$	pression de vapeur saturante de l'air extérieur en eau	Pa
$P_{sat,i}$	pression de vapeur saturante de l'air intérieur en eau	Pa