

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE
LA MAITRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Ing.

PAR
FRANÇOIS LACHANCE

INVESTIGATION D'UNE NOUVELLE STRATÉGIE DE CONTRÔLE
ENVIRONNEMENTAL POUR BÂTIMENT AVICOLE

MONTRÉAL, LE 2 OCTOBRE 2005

(c) droits réservés de François Lachance

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jacques-André Landry, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Benoit Laberge, codirecteur de mémoire
Directeur technique chez Excel Technologies

M. Gilles Doyon, examinateur externe
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Roland Maranzana, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 16 SEPTEMBRE 2005

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

INVESTIGATION D'UNE NOUVELLE STRATÉGIE DE CONTRÔLE ENVIRONNEMENTAL POUR BÂTIMENT AVICOLE

François Lachance

SOMMAIRE

Le principal objectif de ce mémoire est de développer une méthode permettant d'évaluer objectivement le confort du poulet dans un bâtiment avicole commercial. À partir de cet indice, les lignes directrices d'une nouvelle stratégie de contrôle environnemental pour bâtiment avicole sont proposées. La revue de littérature présentée fait une synthèse de la notion de confort animal et évalue en détail les différents facteurs influençant le confort animal. Effectué en partenariat avec la compagnie *Excel Technologies*, ce projet présente un modèle mathématique permettant de calculer la production de chaleur et d'humidité des poulets en continu dans un bâtiment avicole. À l'aide des équipements disponibles sur le marché, il a été possible de récolter 40 jours de données en continu pour valider ce modèle. Les données ont été recueillies dans un bâtiment avicole commercial dans la région de Lanaudière au Québec à l'aide d'un contrôleur *Momentum*. Les modèles d'échanges thermiques et d'humidité permettent de calculer les chaleurs totale, latente et sensible produites par les poulets. Avec les données amassées, il a été possible d'étudier l'effet de la température, de l'humidité relative, de la vitesse de l'air et de l'intensité lumineuse sur la production de chaleurs totale, latente et sensible. Suite à ce projet, une méthodologie permettant de développer un modèle mathématique pour évaluer le débit de ventilation avec précision est proposé ainsi qu'une démarche expérimentale pour évaluer les résistances thermiques équivalentes les différentes surfaces d'un bâtiment avicole. Finalement, les bases d'une nouvelle stratégie de contrôle environnemental sont proposées pour parvenir à un meilleur contrôle de l'environnement de production à l'intérieur des bâtiments avicoles commerciaux québécois. L'utilisation des concepts d'intelligence artificielle pourrait s'avérer prometteuse lors du développement d'une stratégie de contrôle basée sur le confort animal.

INVESTIGATION OF A NEW ENVIRONMENTAL CONTROL STRATEGY FOR COMMERCIAL POULTRY HOUSE

François Lachance

ABSTRACT

The principal objective of this master's thesis was to develop an objective measure of poultry thermal comfort in a commercial poultry building. From that index, the foundations of a new environmental control strategy are proposed. In partnership with *Excel Technologies*, this project proposes a mathematical model that can be used to calculate online heat and moisture production in a broiler house. The literature review goes through the notion of poultry thermal comfort and explains in detail the effects of various factors on thermal comfort. Using traditional equipments found in the industry, 40 days of data were recorded in order to validate the model. The data have been recorded in a commercial poultry house near Joliette, Québec with a *Momentum PLC*. The heat and moisture exchange models can be used to calculate total, latent and sensible heat losses by broiler chicken. From the data, it is possible to study the effect of temperature, relative humidity, air speed and light intensity on total, latent and sensible heat productions. From that project, a new method is also proposed to develop a model that can be used to measure with accuracy the ventilation rate and the different equivalent thermal resistance of poultry building surfaces. Finally, the foundations of a new control strategy based on thermal comfort of broilers are proposed in order to improve the environmental control inside Eastern Canadian's poultry building. In further work, the use of artificial intelligence will be study in the development of that environmental control strategy based on animal comfort.

REMERCIEMENTS

Je remercie Jacques-André Landry et Benoît Laberge de m'avoir conseillé et dirigé dans la bonne direction tout au long de ce projet. Les nombreuses heures qu'ils ont consacrées à m'écouter ainsi que le temps passé à commenter mes travaux m'ont permis de prendre les bonnes décisions. En travaillant avec eux, j'ai eu l'honneur de découvrir un monde nouveau, la recherche appliquée.

Je remercie Dominic Désy, l'équipe de chez *Excel Technologies* et *Les Équipements Modernes* pour leurs conseils, expérience et l'aide qu'ils m'ont apportés pour achever ce projet.

Je remercie la famille Landreville de m'avoir permis d'utiliser leur site de production avicole pour y effectuer cette recherche. Leurs judicieux conseils et leurs nombreuses années d'expérience en tant que producteurs avicoles m'ont permis d'acquérir des connaissances qui ont mené à la réussite de ce projet.

Je remercie mes parents, ma sœur Marie-Hélène, Éric, Vincent et amis de m'avoir supporté moralement tout au long de ce projet.

Je remercie Caroline St-Onge d'avoir rehaussé la qualité du français de ce rapport final.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES GRAPHIQUES	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES.....	xiii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Introduction	3
1.2 Mécanismes de thermorégulation du poulet	3
1.2.1 Chaleur latente	5
1.2.2 Chaleur sensible	6
1.3 Environnement de production avicole	9
1.3.1 Système de ventilation	9
1.3.2 Litière	13
1.3.3 Humidité.....	13
1.3.4 Évolution des conditions d'élevage	14
1.4 Évaluation de la zone de confort des poulets	16
1.5 Chaleur produite par le poulet de chair.....	21
1.6 Relation entre la chaleur produite, la température ambiante, l'humidité relative et la vitesse de l'air.....	24
1.6.1 Relation entre la chaleur produite et la température ambiante.....	24
1.6.2 Relation entre la chaleur produite et l'âge	26
1.6.3 Relation entre la chaleur produite et la vitesse de l'air	27
1.6.4 Relation entre la chaleur produite et l'humidité.....	30
1.7 Conclusion	33
CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA PRODUCTION DE CHALEUR ET D'HUMIDITÉ.....	35
2.1 Introduction à la modélisation.....	35
2.2 Modèle des échanges thermiques et d'humidité	35
2.2.1 Gain ou perte d'énergie sensible par le système de ventilation	38

2.2.2	Gain ou perte d'énergie du bâtiment.....	38
2.2.3	Gain d'énergie provenant des lumières.....	39
2.2.4	Gain d'énergie provenant des moteurs.....	39
2.2.5	Gain d'énergie et d'humidité provenant des éleveuses.....	40
2.2.6	Perte d'humidité par le système de ventilation	41
2.2.7	Gain d'humidité provenant des gicleurs	41
2.2.8	Gain d'humidité provenant de la litière	42
2.3	Propriétés psychrométriques de l'air.....	42
2.3.1	Pression de la vapeur d'eau à saturation (P_{sat})	42
2.3.2	Pression actuelle de la vapeur d'eau (P_{act})	43
2.3.3	Rapport d'humidité (μ)	43
2.3.4	Énergie d'évaporation de l'eau à saturation (h_{fg}).....	43
2.3.5	Densité de l'air (ρ)	44
2.3.6	Enthalpie (H).....	44
CHAPITRE 3 CALCUL DE LA TEMPÉRATURE AMBIANTE		
TOTALE EFFECTIVE (EAT_t).....		
		45
3.1	Introduction à la température ambiante totale effective.....	45
3.2	1 ^{ière} étape	45
3.3	2 ^{ième} étape	47
3.4	3 ^{ième} étape	48
3.5	4 ^{ième} étape	49
3.6	5 ^{ième} étape	51
CHAPITRE 4 CONCEPTION DE L'EXPÉRIMENTATION.....		
		53
4.1	Description générale du bâtiment.....	53
4.2	Système de contrôle et d'acquisition de données Momentum	54
4.3	Lobby	57
4.4	Chambre d'élevage.....	57
4.5	Conditions d'élevage.....	58
4.6	Équipement de contrôle.....	58
4.6.1	Unités de chauffage au propane	60
4.6.2	Lumières.....	60
4.6.3	Eau.....	61
4.6.4	Moulée.....	61
4.6.5	Ventilateurs	62
4.6.6	Entrées d'air	62
4.6.7	Gicleurs	63
4.7	Instrumentation	63
4.7.1	Capteurs de température.....	64
4.7.2	Capteurs d'humidité relative	65
4.7.3	Capteurs de vitesse de l'air	65
4.7.4	Capteurs de pression statique	65
4.7.5	Balance.....	66

4.7.6	Station météorologique	66
CHAPITRE 5	ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DE L'ISOLATION D'UN BÂTIMENT AVICOLE.....	68
5.1	Transfert de chaleur par conduction.....	68
5.2	Démarche expérimentale.....	70
5.2.1	1 ^{er} étage	72
5.2.2	2 ^{ième} étage	72
5.2.3	Système d'acquisition de données	72
5.2.4	Gestion du système de chauffage.....	73
5.3	Discussion et interprétations des résultats	73
5.4	Conclusion	78
CHAPITRE 6	MÉTHODOLOGIE POUR ÉVALUER LE DÉBIT DE VENTILATION EN CONTINU.....	79
6.1	Description des installations	79
6.2	Expérimentation	81
6.3	Discussion et interprétation des résultats	82
CHAPITRE 7	DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	86
7.1	Évolution des conditions d'élevage	86
7.2	Croissance des poulets	87
7.3	Effets du poids sur la production de chaleur totale	88
7.4	Précision du modèle	90
7.5	Influence de la litière sur la production de chaleur totale	94
7.6	Influence de l'intensité lumineuse sur l'activité animale.....	95
7.7	Influence de l'intensité lumineuse sur la production de chaleur.....	96
7.8	Effet de la température sur la production de chaleur	101
7.9	Effet de l'humidité sur la production de chaleur.....	111
7.10	Effet de la vitesse de l'air sur la production de chaleur	116
7.11	Stratégie de contrôle environnemental.....	117
CONCLUSIONS	122
RECOMMANDATIONS	124
ANNEXES :		
1	: Évaluation du confort chez l'être humain.....	126
2	: Équations de production de chaleur et d'humidité	129
3	: Photographies du site expérimental	135
4	: Plans du site expérimental.....	144
5	: Système de fichier .xls pour l'analyse des données.....	152

6 : Spécifications des moteurs électriques	156
7 : Résistances thermiques théoriques des matériaux	158
8 : Évaluation du débit de ventilation en continu.....	162
9 : Effet de l'intensité lumineuse	164
BIBLIOGRAPHIE.....	168

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau I	Effet de la température, de l'humidité et de la vitesse de l'air sur la production de chaleurs latente et sensible	8
Tableau II	Production totale de chaleur pour le poulet de chair	23
Tableau III	Réduction du temps d'élevage et augmentation du poids de l'indice de conversion alimentaire	25
Tableau IV	Chaleur totale pour différents âges et conditions environnementales calculées à l'aide de l'équation 3.1	48
Tableau V	Température thermoneutre et chaleur totale pour chaque groupe d'âge et vitesse de l'air	49
Tableau VI	Paramètres des régressions linéaires pour chaque groupe d'âge et vitesse de l'air	51
Tableau VII	Valeur de EAT_s et de C pour des groupes d'âge et vitesse de l'air autre que le point de référence	53
Tableau VIII	Valeur de EAT_t en fonction de la température ambiante, de l'âge et de la vitesse de l'air	54
Tableau IX	Résistance équivalentes théoriques et ajustées	79
Tableau X	Coefficients de l'équation 6.1	83
Tableau XI	Corrections apportées aux différents capteurs	94
Tableau XII	Évaluation du confort chez l'être humain	126
Tableau XIII	Équations de production de chaleur et d'humidité (Pedersen & Thomsen, 2000)	129
Tableau XIV	Équations de production de chaleur et d'humidité (Gates et.al.,1996)	131
Tableau XV	Équations de production de chaleur et d'humidité (Reece & Lott,1982)	132
Tableau XVI	Équations de production de chaleur et d'humidité (Longhouse et al.,1968)	134
Tableau XVII	Équations de production de chaleur et d'humidité (Ota et Garver.,1958)	136
Tableau XVIII	Spécifications des moteurs électriques (Soigneurs)	158

Tableau XIX	Spécifications des moteurs électriques (Vis à moulée)	158
Tableau XX	Résistance thermique théorique des matériaux	160
Tableau XXI	Évaluation du débit de ventilation en continu.....	164
Tableau XXII	Effet de l'intensité lumineuse	166

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Types de chaleurs produites5
Figure 2	Ventilation conventionnelle 10
Figure 3	Effet d'une grande ouverture de l'entrée d'air 11
Figure 4	Effet d'une petite ouverture de l'entrée d'air 11
Figure 5	Ventilation en tunnel 13
Figure 6	Concept de la température effective.....21
Figure 7	Transfert de chaleur par conduction.....69
Figure 8	Hiérarchie des fichiers d'analyse157

LISTE DES GRAPHIQUES

	Page
Graphique 1 Augmentation du rendement des poulets de chair	23
Graphique 2 Chaleur produite en fonction de la température ambiante pour une	25
Graphique 3 Production de chaleur pour une poule pondeuse avec et sans plume	26
Graphique 4 Production de chaleur en fonction de l'âge.....	27
Graphique 5 Production de chaleur en fonction de la température ambiante	29
Graphique 6 Production de chaleur en fonction de la température ambiante en deçà et incluant la température thermoneutre pour différentes vitesses de l'air	30
Graphique 7 Production de chaleurs totale, latente et sensible en fonction de la température ambiante pour une masse de 1,65 kg et une humidité relative de 65 %.....	31
Graphique 8 Production de chaleur latente en fonction de la température ambiante pour une humidité relative de 65 %.....	32
Graphique 9 Production de chaleur latente en fonction de l'humidité relative pour une température de 23,3 °C	32
Graphique 10 Régression linéaire pour une dinde âgée de 10 jours et une vitesse	48
Graphique 11 Seuil de température effective pour une dinde âge de 10 jours et	50
Graphique 12 Températures extérieure et intérieure lorsque le système.....	70
Graphique 13 Variations de températures en hauteur.....	74
Graphique 14 Variation de température sur la longueur du bâtiment.....	75
Graphique 15 Diminutions d'enthalpie et perte thermique du bâtiment.....	76
Graphique 16 Débit en fonction du voltage RMS pour un ventilateur	83
Graphique 17 Débit en fonction de la pression statique pour un ventilateur Vista 16021F fonctionnant à 40% ($V_{rms} = 110$) de sa vitesse maximale.....	84
Graphique 18 Évolution des températures intérieures et extérieures pour le mois d'avril 2005	86
Graphique 19 Conditions d'élevage entre le 1 ^{er} et 5 mai 2005.....	87
Graphique 20 Croissance des poulets en 1960, 1982 et 2005.....	88
Graphique 21 Chaleur totale en fonction du poids selon différents modèles	89

Graphique 22	Chaleur produite par oiseau en fonction du poids et de la	90
Graphique 23	Chaleur totale produite en fonction de la masse	93
Graphique 24	Température de la litière comparée à la température	94
Graphique 25	Temps de marche total des trois soigneurs en fonction de la.....	95
Graphique 26	Temps de marche total des trois soigneurs en fonction de	96
Graphique 27	Production de chaleur dans le temps et intensité des lumières pour des poulets âgés entre 22 et 25 jours.....	97
Graphique 28	Production de chaleur dans le temps et intensité des lumières pour des poulets âgés entre 26 et 30 jours.....	97
Graphique 29	Variation du débit de ventilation et de la chaleur sensible pour des poulets âgés de 24 et 25 jours	98
Graphique 30	Variations de température et de chaleur sensible pour des poulets âgés de 24 et 25 jours	100
Graphique 31	Production de chaleurs totale, latente et sensible en fonction de la température pour un poulet âgé de 21 jours	104
Graphique 32	Production de chaleurs totale, latente et sensible en fonction de la température pour des poulets âgés de 30 jours.....	106
Graphique 33	Production de chaleurs totale, latente et sensible en fonction de la température pour des poulets âgés de 36 jours ayant un poids moyen de 1,67 kg.....	108
Graphique 34	Consigne et moyenne de température pour les données entre le 31 mars et 5 mai 2005	109
Graphique 35	Pourcentage de la chaleur totale sous formes latente et sensible pour un poulet âgée de 38 jours ayant un poids moyen de 1,85 kg	110
Graphique 36	Chaleur latente en fonction de la température.....	112
Graphique 37	Chaleur latente en fonction de l'humidité relative.....	113
Graphique 38	Effet de l'humidité absolue extérieure sur la production de chaleur totale, latente et sensible pour un poulet âgé de 35 jours ayant un poids moyen de 1,6 kg.	114
Graphique 39	Démonstration de l'effet de l'humidité relative sur le modèle mathématique	116
Graphique 40	Production de chaleur en fonction de la température effective.....	118

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

A_i	Aire de la surface i , m^2
a	-27 405,526
A	Âge, jours
$a^{A_{0,2}}$	Constante de la droite pour une âge A et une vitesse d'air de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$
$b^{A_{0,2}}$	Pente de la droite pour une âge A et une vitesse d'air de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$
b_0	$2,142 29 \times 10^{-4}$
b_1	$-8,065 14 \times 10^{-3}$
b_2	$-2,314 36 \times 10^{-1}$
b_3	$-2,524 47 \times 10^0$
b_4	$9,059 06 \times 10^0$
b_5	$-5,014 81 \times 10^{-2}$
b_6	$8,674 86 \times 10^1$
b_7	$1,369 63 \times 10^0$
b_8	$1,384 98 \times 10^{-1}$
b_9	$1,945 71 \times 10^1$
b	97, 541 3
C	Quotient des pentes
c	- 0,146 244
C_p	$1,006 \text{ kJ.}(K. \text{ kg d'air sec})^{-1}$
C_1	-5,674 535 9E+03
C_2	6,392 524 7E+00
C_3	-9,677 843 0E-03
C_4	6,221 570 1E-07
C_5	2,074 782 5E-09
C_6	-9,484 024 0E-13
C_7	4,163 501 9E+00
d	0,000 125 58
D	$0,025 167, \text{ kg H}_2\text{O.s}^{-1}$

e	-4,850 2 E-08
Σ	Sommation
E	pression de la vapeur d'eau, mbar
Eff	Efficacité des ampoules, %
E_{req}	Évaporation requis pour maintenir l'équilibre thermique, $W.^{\circ}C^{-1}$
E_{max}	Évaporation maximal possible selon les limites environnementales et physiologiques, $W.^{\circ}C^{-1}$
EATs	Seuil de temperature effective, $^{\circ}C$
EATt	Température ambiante totale effective, $^{\circ}C$
f	4,349 03
g	-0,003 938 1
H	Enthalpie de l'air humide, $kJ.kg^{-1}$
h_{fg}	Énergie d'évaporation de l'eau à saturation, $kJ.kg d'H_2O^{-1}$
HR	Humidité relative, %
$I_{rangée i}$	Intensité lumineuse des ampoules de la rangée i, %
J	Nombre J du momentum
k	Conductivité thermique, $(W.^{\circ}C).m^{-2}$
m	mètre
M	Poids du poulet, kg
n	Nombre de gicleurs
N	Nombre d'ampoule allumée par rangée
$\%Q_{latente}$	Pourcentage de la chaleur totale sous forme latente
$P_{act.}$	Pression actuelle de la vapeur d'eau, Pa
$P_{ampoules i}$	Puissance des ampoules de la rangée i, W
P_{atm}	Pression atmosphérique, Pa
$P_{moteur i}$	Puissance du moteur i, kW
P_{sat}	Pression de la vapeur d'eau à saturation, Pa
$PH_{éleveuses}$	Humidité produite par l'ensemble des éleveuses, $kg H_2O$
$PH_{gicleurs}$	Humidité ajoutée par les gicleurs, $kg H_2O$
$PH_{ventilation}$	Gain ou perte d'humidité pour l'ensemble des ventilateurs, $kg H_2O$

$ph_{\text{éleveuses}}$	Taux de production d'humidité moyen pour l'ensemble des éleveuses, $\text{kg H}_2\text{O.s}^{-1}$
ph_{extrant}	Quantité moyenne d'humidité évacuée du système, $\text{kg H}_2\text{O.s}^{-1}$
ph_{gicleurs}	Taux de production d'humidité moyen des gicleurs, $\text{kg H}_2\text{O.s}^{-1}$
ph_{intran}	Quantité moyenne d'humidité entrant dans le système, $\text{kg H}_2\text{O.s}^{-1}$
$ph_{\text{intérieur}}$	Quantité moyenne d'humidité produite à l'intérieur du système, $\text{kg H}_2\text{O.s}^{-1}$
ph_{poulet}	Taux de production d'humidité moyen des poulets, $\text{kg H}_2\text{O.s}^{-1}$
$ph_{\text{ventilation}}$	Taux de gain ou de perte d'humidité moyen pour l'ensemble des ventilateurs, $\text{kg H}_2\text{O.s}^{-1}$
q	Chaleur transférée au système ou par le système, kW
$Q_{\text{éleveuses}}$	Énergie libérée par l'ensemble des éleveuses, kJ
$Q_{\text{lumières}}$	Énergie libérée par l'ensemble des ampoules, kJ
Q_{moteurs}	Énergie libéré par l'ensemble des moteurs, kJ
$Q_{\text{ventilation sens.}}$	Gain ou perte d'énergie sensible par l'ensemble des ventilateurs, kJ
$Q_{\text{poulet TNT}}$	Chaleur produite par l'oiseau à température thermoneutre, W.kg^{-1}
$q_{\text{bâtiment}}$	Taux moyen de gain ou de perte de chaleur du bâtiment, kW
$q_{\text{éleveuses}}$	Taux moyen de production de chaleur des éleveuses, kW
$q_{\text{évacuée}}$	Chaleur évacuée du système, kW
q_{entrante}	Chaleur entrante dans le système, kW
$q_{\text{produite intérieur}}$	Chaleur produite à l'intérieur du système, kW
$q_{\text{latent poulet}}$	Taux moyen de production de chaleur latente des poulets, kW
$q_{\text{lumières}}$	Taux moyen de production de chaleur des lumières, kW
q_{moteurs}	Taux moyen de production de chaleur des moteurs, kW
$q_{\text{sensible poulet}}$	Taux moyen de production de chaleur sensible des poulets, kW
$q_{\text{total poulet}}$	Taux moyen de production de chaleur total des poulets, kW
$q_{\text{ventilation}}$	Taux moyen de gain ou de perte de chaleur sensible des ventilateurs, kW
R	22 105 649,25
$R_{\text{équi. théorique}}$	Résistance thermique de la surface i , $\text{m}^2.(\text{°C W})^{-1}$

RMS	Root Means Square,
SR	Radiation solaire, $W.m^{-2}$
TNT	Température thermoneutre, °C
T_a	Température ambiante, °C
$T_{\text{extérieur } i}$	Température de l'air près de la surface extérieur i , °C
$T_{\text{intérieur } i}$	Température de l'air près de la surface intérieur i , °C
$t_{\text{ampoules } i}$	Temps de marche des ampoules de la rangée i , s
$t_{\text{éleveuse } i}$	Temps de marche de l'éleveuse i , s
t_{gicleurs}	Temps de marche des gicleurs, s
T_g	Température du globe noir, °C
$t_{\text{moteur } i}$	Temps de marche du moteur i , s
$t_{\text{ventilateur } i}$	Temps de marche du ventilateur i , s
T_w	Température du bulbe humide, °C
V	Vitesse du vent, $km.h^{-1}$
V_i	Débit du ventilateur i , $m^3.s^{-1}$
v	Vitesse de l'air, $m.s^{-1}$
W	Watt
α	Coefficient tableau X
β	Coefficient tableau X
χ	Coefficient tableau X
δ	Coefficient tableau X
$\mu_{\text{extérieur}}$	Rapport d'humidité de l'air extérieur, $kg H_2O.kg \text{ air sec}^{-1}$
$\mu_{\text{intérieur}}$	Rapport d'humidité de l'air intérieur, $kg H_2O.kg \text{ air sec}^{-1}$
τ	Période d'échantillonnage des données, s
ϕ_i	Efficacité énergétique du moteur i , %
θ_i	Capacité des éleveuses, kW
ρ	Densité de l'air sec, $kg \text{ d'air sec}.m^{-3}$

INTRODUCTION

Les producteurs avicoles québécois se doivent d'obtenir de bons rendements de production afin d'être compétitifs sur le marché international. De bonnes conditions d'élevage sont synonyme de bons rendements de production dans le domaine du poulet de chair. Nombreux sont les producteurs qui contrôlent les conditions d'élevage à l'intérieur de leurs bâtiments selon le confort du poulet. Ces producteurs expérimentés utilisent leurs sens pour évaluer le confort des poulets, or le confort est une notion subjective. Si le confort animal pouvait être quantifié, il serait possible d'intégrer ce concept au coeur même d'une stratégie de contrôle environnemental et ainsi obtenir de meilleur rendement de production, car les poulets pourraient exprimer leur plein potentiel génétique.

Ce projet, réalisé en collaboration avec la compagnie *Excel Technologies*, a pour but principal de développer un indice objectif à partir duquel il est possible de mesurer le confort du poulet de chair en milieu de production commercial. Ce paramètre de contrôle doit fournir une description plus réaliste de l'environnement de production en évaluant le confort de l'oiseau selon différentes combinaisons de température, d'humidité relative et de vitesse de l'air. À partir de cet indice du confort animal, les lignes directrices d'une stratégie de contrôle environnemental des bâtiments avicoles commerciaux sont proposées.

Ce mémoire est composé de plusieurs chapitres qui expliquent les réalités de l'industrie ainsi que les démarches à suivre pour développer un modèle mathématique à partir duquel l'indice en question sera développé. Pour confirmer la validité du modèle, il a été nécessaire de développer différentes méthodologies permettant d'évaluer le débit de ventilation en continu ainsi que l'isolation du bâtiment expérimental.

Une fois le modèle validé à partir des résultats obtenus expérimentalement dans un bâtiment avicole commercial de la région de Lanaudière, les bases d'une stratégie de contrôle utilisant le concept de température effective sont proposées. Les grandes lignes d'une stratégie de contrôle innovatrice sont proposées suite à l'étude de la dynamique du système. La stratégie de contrôle proposée pourrait être implantée dans un module d'intelligence artificielle, étant donnée la complexité des analyses devant être effectuées avant qu'une correction ne soit appliquée au système en question.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

L'aviculture occupe une place importante au sein de l'économie québécoise et, afin que les producteurs avicoles québécois puissent tenir tête à la compétition internationale, ils se doivent de gérer leurs bâtiments d'élevage de façon efficace. L'un des principaux défis des producteurs est de maintenir ces conditions d'élevage optimales quelles que soient les conditions météorologiques, car les poulets de chair issus d'élevages intensifs sont des oiseaux dont la croissance est largement affectée par les conditions d'élevage. Au cours des années, l'évolution génétique a fait en sorte qu'il est essentiel que les poulets de chair ne soient pas confrontés à des conditions environnementales extrêmes, car l'énergie ingérée servirait à maintenir leur métabolisme, et non plus au gain de poids, augmentant ainsi l'indice de conversion alimentaire, où cet indice traduit comme étant le nombre de kilogrammes de moulée nécessaire à la production d'un kilogramme de chair. (Proudfoot et al., 1991). Ces situations peuvent mener à des pertes économiques importantes pour le producteur, car la moulée peut représenter jusqu'à 80 % du coût de production (Yvon Landreville et Claude Émery). Avant même d'élaborer une stratégie de contrôle environnemental ayant pour but d'améliorer les conditions d'élevage, il est essentiel de comprendre les mécanismes de thermorégulation du poulet, les différents aspects de l'environnement de production avicole et les méthodes utilisées afin de quantifier le confort du poulet en milieu de production.

1.2 Mécanismes de thermorégulation du poulet

Lorsqu'un poulet est élevé dans un milieu où les conditions environnementales sont stables et qu'il ne cherche pas à diminuer ou augmenter sa température corporelle, on dit que celui-ci est dans sa zone de confort thermique. Selon Chepete et Xin (2001),

Jurkschat et al. (1986), Burmeister et al. (1986) ainsi que Richards (1977), la zone de confort thermique du poulet est une combinaison des variables suivantes;

- a. âge;
- b. régime alimentaire;
- c. poids;
- d. descendance génétique;
- e. densité animale;
- f. plumage;
- g. taux d'activité;
- h. température;
- i. humidité relative;
- j. vitesse de l'air;
- k. intensité lumineuse.

Seuls la température, l'humidité relative, l'intensité lumineuse, l'accès à la moulée et le taux de ventilation sont les facteurs pouvant être contrôlés par le producteur avicole pour s'assurer que le poulet est dans sa zone de confort thermique. Étant donné que le poulet ne peut convertir qu'un maximum de 20 % de l'énergie ingérée en viande (Teeter et Belay, 1996), il est vital pour le poulet d'évacuer le surplus d'énergie de son organisme afin d'éviter que sa température corporelle n'augmente. Dans la littérature, plusieurs modèles de réactions physiologiques du poulet ayant pour but de transférer la chaleur hors de son organisme ont été proposées. Ces modes de transfert de chaleur sont généralement associés à la production de chaleur latente et sensible (Figure 1).

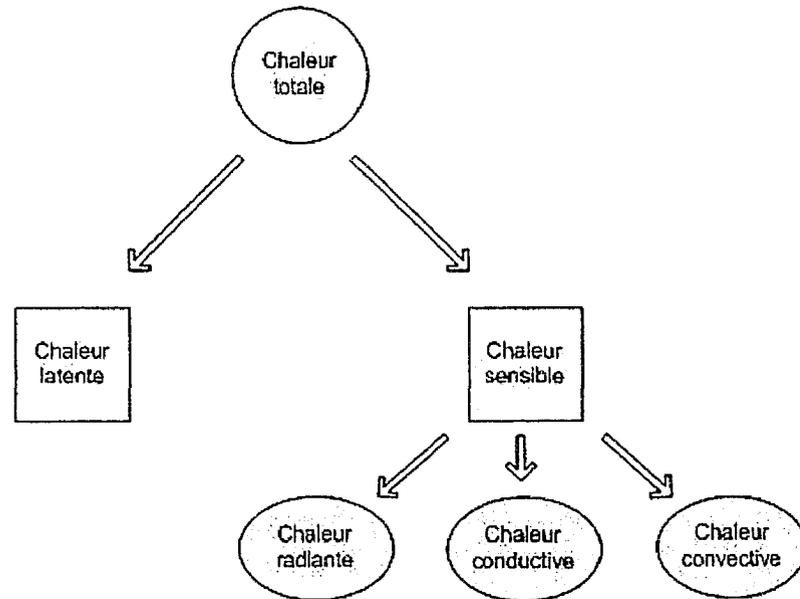


Figure 1 Types de chaleurs produites

1.2.1 Chaleur latente

La chaleur latente est définie comme étant l'énergie fournie par un animal pour évaporer l'eau évacuée par la respiration et par la transpiration (Zhang ,1998). Dans le cas d'un poulet presque couvert entièrement de plumes, ce dernier ne peut pas libérer de chaleur par transpiration (Simmons et al, 1997). Même s'il peut aussi perdre de l'eau par diffusion passive, ces deux mécanismes ne sont pas suffisants pour lui permettre de maintenir sa température corporelle. Donc, lorsqu'il est confronté à des conditions où la température ambiante est élevée et la vitesse de l'air est basse, la chaleur excédentaire produite par le poulet est évacuée de son système par respiration. C'est en évaporant l'eau de son propre système par respiration et diffusion passive que le poulet réussit à maintenir sa température corporelle.

Cependant, ces façons d'évacuer la chaleur sont limitées : premièrement, si les poulets évacuent plus d'eau qu'ils n'en consomment, il y a possibilité de déshydratation. Cette réaction peut être expliquée par une déstabilisation de la balance acido-basique dans le

sang (Teeter et Belay, 1996). Timmons et Hillman (1993) ont observé que cette déstabilisation entraîne une diminution de croissance chez les poulets de chair. Ensuite, à haute température, l'efficacité de ce processus peut-être diminuée si l'humidité relative est très élevée, car le poulet aura de la difficulté à évaporer de l'eau dans l'environnement, étant donné que l'air est déjà pratiquement saturé d'eau. Yahav et al. (1995) ont démontré que pour des poulets mâles confrontés à une température ambiante de 35°C, une augmentation de l'humidité relative de 10% engendre une augmentation de la température de la peau de 0,5 °C. Ainsi, dans une situation où la température ambiante et l'humidité relative sont très élevées, alors que la vitesse de l'air est basse, le poulet doit augmenter son rythme cardiaque à un niveau supérieur à la normale afin de libérer suffisamment de chaleur sous forme latente dans le but de maintenir sa température corporelle. Cependant, pour maintenir son rythme cardiaque élevé pendant une longue période, celui-ci doit avoir ingéré suffisamment d'énergie, car lorsque le poulet entre en état d'hyperthermie, il diminue sa consommation de nourriture pour limiter l'énergie entrant dans son organisme (Butcher et Miles, 1996) et augmente sa consommation d'eau (May et al, 1997). Or, en tentant de maintenir son rythme cardiaque élevé durant une longue période de temps, il est possible que le poulet succombe d'épuisement si celui n'a pas assez d'énergie.

En conclusion, le poulet utilise une partie du surplus d'énergie ingérée afin d'évaporer l'eau de son organisme et ainsi garder sa température corporelle stable. Économiquement, cette réaction physiologique entraîne des coûts supplémentaires aux producteurs avicoles, car l'indice de conversion alimentaire et le taux de mortalité seront plus élevés qu'à la normale si le poulet est en stress thermique.

1.2.2 Chaleur sensible

Les échanges de chaleur sensibles se divisent en trois catégories telles qu'illustrées à la figure 1; soit les échanges par radiation, échange par conduction et échange par convection. La chaleur sous forme radiante émise par le poulet dépend de l'émissivité

ainsi que du gradient de température entre la surface du poulet et la température ambiante. La chaleur conductive se transmet par les pattes ou bien toute autre partie du corps en contact avec une autre surface. Finalement, les échanges de chaleur par convection sont fonction de la vitesse de l'air, de la grandeur de la surface du poulet ainsi que du gradient de température entre la température ambiante et la température de la surface du poulet. Ainsi, lorsqu'il fait trop chaud dans un poulailler, il n'est pas rare de voir les poulets battre des ailes ou bien les étirer. Ce comportement ayant pour but d'augmenter la surface du corps disponible aux échanges de chaleur sensible, entraîne du même coup une diminution de la température corporelle (Teeter et Belay, 1996). De plus, il a été mentionné à plusieurs reprises dans la littérature que le moyen le plus efficace énergétiquement de contrôler la température corporelle d'un poulet est en contrôlant la chaleur sensible produite par celui-ci (Yahav et al., 2001; Wiernusz et Teeter, 1993; Timmons et Hillman, 1993). Le tableau I résume les effets des différents facteurs environnementaux sur la production de chaleurs latente et sensible d'un poulet.

Tableau I

Effets de la température, de l'humidité et de la vitesse de l'air sur la production de chaleurs latente et sensible

		Chaleur totale	
		Chaleur latente	Chaleur sensible
Température ambiante	Élevée	Augmente	Diminue
	Basse	Diminue	Augmente
Humidité	Élevée	Diminue	-
	Basse	Augmente	-
Vitesse d'air	Élevée	-	Augmente
	Basse	-	Diminue

Le poulet de chair peut dissiper jusqu'à 80 % de la chaleur totale produite sous forme de chaleur latente (Wiernusz et Teeter, 1993). Par contre, lorsque le poulet de chair utilise ce mécanisme afin de maintenir sa température corporelle, l'énergie ingérée sert à libérer

de la chaleur latente et non à sa croissance. Ainsi, puisque ce phénomène augmente l'indice de conversion alimentaire, il est tout à fait avantageux pour le producteur avicole de minimiser la production de chaleur latente et de maximiser les échanges de chaleur sensible. Par exemple, les échanges de chaleur par convection peuvent représenter jusqu'à 65 % de la chaleur sensible libérée par un poulet, dans le cas où la température ambiante est de 35 °C et la vitesse de l'air est de 2,0 m.s⁻¹ (Timmons et Hillman, 1993). Donc, il est tout à fait logique pour le producteur avicole de contrôler les échanges de chaleur sensible entre les poulets et leur environnement par le biais du système de ventilation. Yahav et al. (2001) ont conclu qu'une vitesse de l'air située entre 1,5 et 2,0 m.s⁻¹ était optimale pour un environnement où la température ambiante est de 35 °C et l'humidité relative de 60 %, et ce pour des poulets âgés entre 5 et 7 semaines. De plus, il a été conclu par Lott et al. (1998) que la méthode la plus efficace pour dissiper la chaleur produite par un poulet sujet à un environnement où la température ambiante est élevée est d'augmenter la vitesse de l'air au plancher. Toujours dans le même ordre d'idées, Yahav et al. (1995) ont aussi rapporté que l'indice de conversion alimentaire était optimal pour une température ambiante de 35 °C et une humidité relative entre 60 % et 65 % pour des poulets âgés entre 28 et 35 jours. Mitchell (1985) a observé une plus grande perte de chaleur par convection lorsque la vitesse de l'air est augmentée de 0,2 m.s⁻¹ à 1,1 m.s⁻¹ et que la température ambiante est de 30 °C. Cependant, comme il a été rapporté par Timmons et Hillman (1993), l'augmentation de la vitesse de l'air au niveau du poulet peut nuire à sa croissance lorsque la température ambiante est plus élevée que sa température corporelle, soit environ 37,8 °C, puisque l'échange thermique sera inversé.

Ainsi, en gérant de manière efficace la production de chaleur sensible à l'intérieur de leur poulailler, les producteurs avicoles seront en mesure de maximiser la croissance de leur troupeau tout en réduisant l'indice de conversion alimentaire et le taux de mortalité. En conclusion, la chaleur convective libérée par le poulet augmente avec la vitesse de l'air tandis que la chaleur latente diminue. De plus, la chaleur sensible dégagée par les

poulets diminue et la production de chaleur latente augmente lorsque la température ambiante augmente (Simmons et al., 1997).

1.3 Environnement de production avicole

Dans l'industrie avicole, il n'est pas rare de voir des poulaillers où sont élevés entre 40 000 et 50 000 poulets destinés à l'abattoir pour leur viande. Un poulailler typique est construit sur 2 ou 3 étages et a une largeur d'environ 12 m et une longueur de 92 m en moyenne (Proudfoot et al., 1991). La fondation du poulailler est en béton et les poutres soutenant la structure sont en acier. Si la structure est entièrement faite de bois, des colonnes supporteront le toit et les planchers. Les divisions, planchers, murs et plafonds sont faits de bois. Le toit et les murs extérieurs de la bâtisse sont normalement recouverts d'aluminium ou de tôle en acier. Dans la majorité des installations au Québec, le chauffage est au gaz propane ou naturel, et les poulets ont accès à la nourriture et à l'eau *ad libitum*. L'eau est fournie par des abreuvoirs à bec (Annexe, photographies du site expérimental, photographie 13) et la nourriture par une vis à moulée qui distribue la moulée dans des cloches (Annexe, photographies du site expérimental, photographie 14). L'utilisation d'abreuvoirs à bec diminue le gaspillage et l'évaporation de l'eau qui peuvent contribuer à augmenter l'humidité relative à l'intérieur de la salle d'élevage. Quant au contenu énergétique des rations de moulée, celui-ci est ajusté en fonction de l'âge des poulets.

1.3.1 Système de ventilation

Afin de maintenir des conditions d'élevage adéquates, les poulaillers sont équipés d'un système de ventilation. Les systèmes de ventilation au Québec sont de types conventionnels à pression négative. Ce type de système de ventilation est composé de ventilateurs qui évacuent l'air vicié de la pièce, vers l'extérieur du bâtiment (Figure 2). Ensuite, une entrée d'air, située sur le mur opposé aux ventilateurs, permet au vide créé par les ventilateurs d'aspirer l'air frais de l'extérieur.

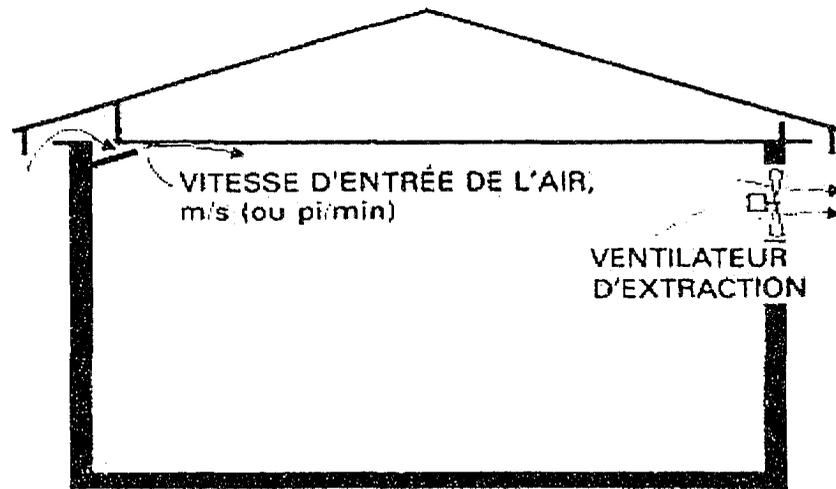


Figure 2 Ventilation conventionnelle
(Adapté de Canada Service de Plans, Plan M-9700)

Par le biais des entrées d'air, il est possible de diriger l'air frais vers le plancher afin de rafraîchir les poulets en été (Figure 3). De cette façon, la vitesse de l'air est plus élevée au niveau du plancher. D'un autre côté, il est important de contrôler les jets d'admission d'air en hiver, car une ouverture d'entrée d'air trop grande, combinée à un faible débit de ventilation, mènera à une vitesse d'entrée de l'air extérieur trop basse (Figure 3). Une vitesse d'entrée lente combinée à la densité élevée de l'air froid fera en sorte que l'air froid se dirigera immédiatement vers le plancher, une fois l'air entré à l'intérieur de la bâtisse. Ce genre de situation doit être évité à tout prix puisque les poulets sont très sensibles au courant d'air froid.

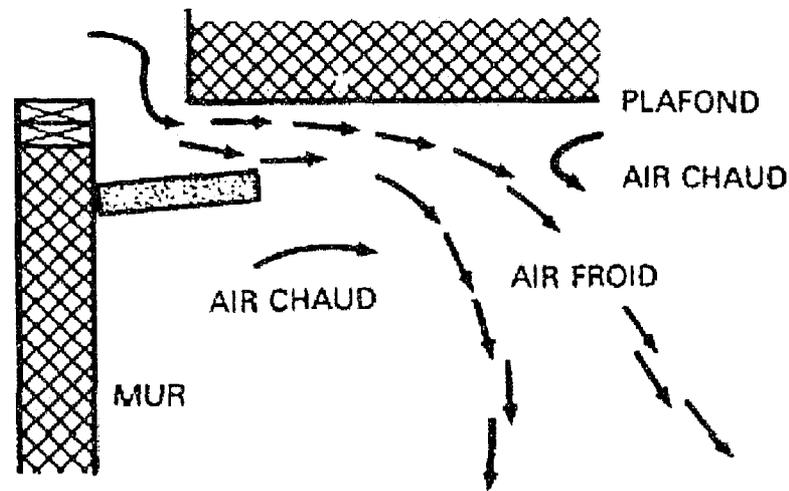


Figure 3 Effet d'une grande ouverture de l'entrée d'air
(Canada Service de plans, Plan M-9700)

Il est préférable de favoriser une vitesse d'entrée de l'air élevée en hiver ($4-5 \text{ m.s}^{-1}$), car ceci permettra de mélanger l'air chaud et l'air froid de façon homogène, prévenant du même coup des écarts de température et des différences marquées au niveau de la qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment (Figure 4). Ogilvie et al. (1990) ont établi des corrélations entre le nombre J et la vitesse de l'air au sol. Le nombre J est fonction du débit de ventilation, de la vitesse de l'air à l'entrée et du volume de la salle d'élevage.

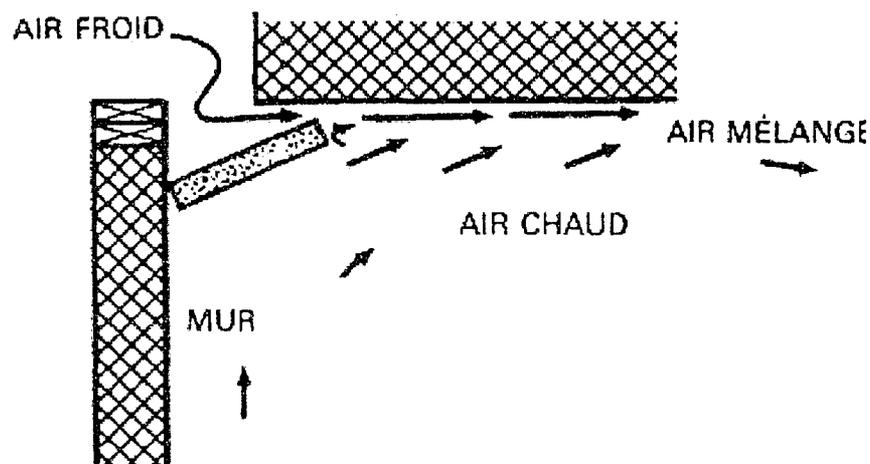


Figure 4 Effet d'une petite ouverture de l'entrée d'air
(Canada Service de plans, Plan M-9700)

Dans un système de ventilation conventionnel il peut arriver que les vitesses de l'air soient plus élevées au plancher (0,48m du sol) qu'au niveau de l'humain (1,68m du sol), contrairement à la ventilation en tunnel (Wheeler et al., 2003). De plus, la ventilation conventionnelle permet de maintenir des conditions d'élevage uniformes sur toute la longueur du bâtiment. Ces systèmes sont généralement mécaniques, quoique certains producteurs aient adopté la ventilation naturelle qui ne nécessite aucun ventilateur. La ventilation naturelle est considérée comme n'étant pas très fiable par plusieurs, puisqu'elle dépend essentiellement des conditions climatiques extérieures.

Dans le sud des États-Unis, la ventilation en tunnel (Figure 5) est très populaire, puisqu'elle permet de réduire le taux de mortalité dû aux chaleurs accablantes, de diminuer le taux de conversion alimentaire et d'augmenter la densité d'élevage lors des saisons chaudes (Bucklin et al., 1999). Par exemple, les travaux de Wheeler et al. (2003) ont montrée que la vitesse d'air moyenne à l'intérieur d'un bâtiment avec une ventilation en tunnel est environ 5 fois plus élevée que dans une bâtisse ayant un système de ventilation conventionnel. La ventilation en tunnel permet d'obtenir une vitesse d'air plus uniforme sur toute la surface d'élevage et il est beaucoup plus facile de contrôler les vitesses d'air, contrairement à la ventilation conventionnelle.

Donc, dans une situation où la température ambiante est élevée, la ventilation en tunnel est bénéfique pour les animaux. Cependant, un désavantage important associé à ce type de ventilation est qu'en période froide, la réduction du taux de ventilation entraîne une différence de température et d'humidité entre l'avant et l'arrière du bâtiment ainsi qu'une accumulation de gaz nocifs à l'arrière du bâtiment.

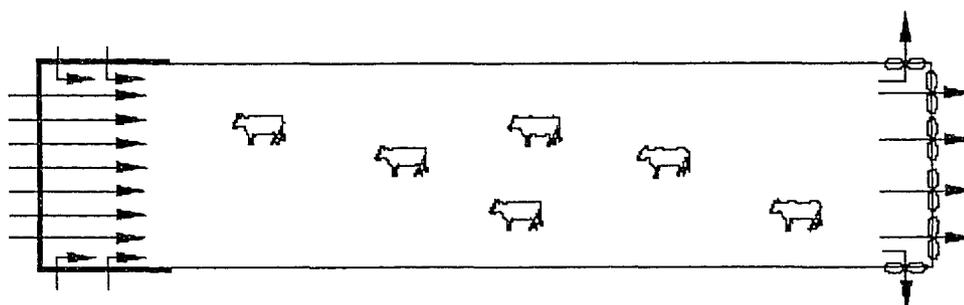


Figure 5 Ventilation en tunnel
(Tunnel Ventilation to Alleviate Animal Heat Stress, 1995)

1.3.2 Litière

Afin d'absorber l'humidité, d'accélérer le processus de décomposition des excréments et de protéger le plancher, des copeaux de bois sont étendus sur toute la surface du plancher accessible aux poulets. Lorsque les poulets sont envoyés à l'abattoir, le fumier est ramassé et entreposé à l'extérieur. Avant même que d'autres poulets soient accueillis dans le poulailler, le producteur avicole nettoie le bâtiment pour prévenir la propagation de maladies d'un lot de poulets à l'autre. En été, la décomposition de la litière libère tellement de chaleur, que la température ambiante à 0,10 m du plancher peut être 2°C plus élevée que la température ambiante moyenne sur le plancher d'élevage (Pedersen et Thomsen, 2000). D'un autre côté, en hiver, les copeaux de bois agissent comme isolant en protégeant les poussins d'un plancher froid. De plus, une mauvaise gestion des conditions d'élevage peut détériorer la condition de la litière à un point tel qu'il est nécessaire de ventiler pour évacuer les gaz produits par la litière et maintenir la qualité de l'air à un seuil acceptable. Finalement, une litière humide amorcera un processus de décomposition anaérobie, qui à son tour libérera de l'ammoniaque (NH_3).

1.3.3 Humidité

Tout au long de l'élevage, il est important de garder l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment entre 50% et 80%, car si l'humidité relative est trop basse, il y aura beaucoup de poussière dans l'air, ce qui peut causer des dommages irréversibles aux poumons des volailles. D'un autre côté, si l'humidité relative à l'intérieur de la bâtisse est élevée, de

l'ammoniaque se formera et la litière deviendra un milieu propice au développement des bactéries et des champignons, ce qui augmentera du même coup les chances que des maladies se développent. Par ailleurs, il a été présenté par Kristensen et Wathes (2000) que l'exposition à l'ammoniaque affecte la physiologie, la production et le comportement des poulets tout en compromettant leur bien-être. Une concentration d'ammoniaque d'environ 10 ppm peut endommager les parois pulmonaires, à 20 ppm elle augmente les chances de développer la maladie de Newcastle et à 50 ppm, la croissance des poulets sera réduite (Bulletin Technique Shur-Gain, #840). De plus, un niveau élevé d'humidité relative en hiver peut provoquer de la condensation à l'intérieur de la bâtisse, diminuer l'efficacité des isolants, ainsi qu'endommager les matériaux et les équipements servant à l'élevage. Dans un bâtiment où les conditions environnementales sont humides, il est nécessaire de chauffer et de ventiler beaucoup plus, afin d'empêcher la condensation de l'air humide sur les parois froides et la formation de gaz nocif.

1.3.4 Évolution des conditions d'élevage

Lorsque le producteur reçoit les lots de poussins, ils sont âgés entre 24 et 48 heures et ils pèsent approximativement 50 grammes. Au début de l'élevage, il est critique que la température intérieure au niveau du plancher soit entre 32°C et 35°C, car avec une température au plancher inférieure à 32°C les poussins peuvent souffrir d'hypothermie ou d'hyperthermie pour une température supérieure à 35°C (Malheiros et Moraes, 2000). À ce stade de la production, le système de ventilation doit être en mesure d'évacuer le dioxyde de carbone produit par les unités de chauffage et assurer un apport constant en oxygène. D'un autre côté, un trop grand débit d'air provoquera des courants d'air au niveau du plancher et nuira à la croissance des poussins. De plus, un taux de ventilation trop élevé entraînera des coûts de chauffage et d'électricité additionnels.

Au fur et à mesure que les poussins gagnent du poids, la température ambiante doit être réduite graduellement afin d'empêcher qu'ils souffrent de stress thermique. De plus, il devient de plus en plus critique de ventiler pour trois raisons : premièrement, il faut

évacuer l'humidité produite par la respiration et la décomposition de la litière, car une humidité relative élevée entraînera la formation d'ammoniaque qui s'avère autant toxique pour les poulets que pour les humains; deuxièmement, pour évacuer les surplus de dioxyde de carbone et d'ammoniaque et assurer un apport constant en oxygène; et finalement, le système de ventilation permet d'évacuer les surplus de chaleur sensible produits par les poulets, tout en maintenant la température ambiante à un niveau idéal afin que les poulets soient dans leur zone de confort. Le système de ventilation doit aussi assurer une bonne distribution de l'air frais afin d'uniformiser les conditions d'élevage sur toute la longueur du bâtiment.

Lorsque l'élevage s'effectue l'été, la température intérieure est généralement plus élevée que la température extérieure. Cette situation peut entraîner une telle accumulation de chaleur à l'intérieur du bâtiment que les poulets peuvent subir un stress thermique et même mourir si le débit de ventilation n'est pas adéquat. Dans ce genre de situation, les poulets ont tendance à boire plus d'eau pour diminuer leur température corporelle car ils transfèrent une partie de leur chaleur sensible à l'eau froide ingérée. Du même fait, le poulet ne gagnera pas de poids puisqu'il aura diminué sa consommation de moulée. Dans ces situations extrêmes, les producteurs peuvent avoir recours à des brumisateurs. Les brumisateurs produisent de fines gouttelettes d'eau projetées dans l'air qui sont évaporées par l'énergie contenue dans l'air. Alors, en évaporant de l'eau, la température ambiante diminue et ceci permet de maintenir la zone de confort du poulet à un niveau idéal, cependant ce mécanisme augmente l'humidité relative du même coup.

En hiver, la température extérieure est de beaucoup inférieure à la température intérieure, alors le bâtiment perd de la chaleur à un rythme plus élevé, alors l'air extérieur doit être préchauffé. Donc, il est nécessaire d'activer le chauffage afin de maintenir la température ambiante à un niveau adéquat pour les poulets. Si la température ambiante est maintenue trop basse, l'énergie ingérée par les poulets servira à maintenir leur température corporelle et non à leur croissance. Par ailleurs, cette

situation engendrera une augmentation de l'indice de conversion alimentaire. Même si parfois l'activation du système de ventilation contribue à diminuer la température ambiante à l'intérieur du bâtiment, il est toujours nécessaire de ventiler afin d'évacuer l'humidité, les gaz nocifs et d'assurer un apport constant d'oxygène. De plus, lorsque le système de ventilation est en état de marche en hiver, il est important que le producteur s'assure qu'il n'y ait aucun courant d'air froid au niveau des poulets.

Pour les producteurs avicoles québécois, le printemps et l'automne sont deux saisons où le contrôle de l'environnement à l'intérieur de leurs bâtiments est très complexe, puisque la température ambiante, l'humidité relative et la concentration des gaz doivent toutes être contrôlées à la fois. Les journées chaudes et les nuits froides font qu'il est nécessaire de ventiler le jour pour contrôler la température et évacuer l'humidité, et la nuit le système de chauffage doit être activé afin de maintenir la température ambiante à un niveau adéquat tout en assurant un minimum de ventilation pour prévenir l'accumulation de gaz toxiques. Cependant, les systèmes de contrôle environnemental disponibles sur le marché ont de la difficulté à maintenir un environnement de production stable en rapport avec la physiologie du poulet lorsque les conditions extérieures fluctuent beaucoup. Alors, les producteurs avicoles doivent vérifier et ajuster plus fréquemment les conditions environnementales à l'intérieur de leurs poulaillers.

1.4 Évaluation de la zone de confort des poulets

Plusieurs recherches ont été menées afin de développer des indices qui permettent d'évaluer le niveau de chaleur perçu par l'être humain. Dans les pays du sud, ces indices de chaleur ont été développés afin de pouvoir quantifier la chaleur à laquelle font face les militaires (Moran et al. 2003) et travailleurs (Bernard et Hanna, 1988; Peters 1991) dans leur environnement de travail et par le fait même, minimiser les risques de déshydratation. Depuis longtemps, la température du globe à bulbe humide (*Wet Bulb Globe Temperature, WBGT ou ISO 7243*), l'indice de stress thermique (*Heat Stress Indice, HSI*), l'index de stress environnemental (*Environmental Stress Index*), le facteur

humidex et le facteur de refroidissement éolien (*Windchill factor*) sont des indices qui sont utilisés par les différents gouvernements et industries de chaque pays (Annexe, Évaluation du confort chez l'être humain, Tableau XII). Cependant, aucun de ces indices ne tient compte des mêmes variables et ils ne peuvent être appliqués qu'à l'être humain, et ce, dans des circonstances spécifiques. Certains d'entre eux prennent en considération la température ambiante et la vitesse du vent, tandis que d'autres tiennent compte des radiations solaires, de l'humidité relative ou même de la tenue vestimentaire.

Ces indices peuvent être classés en deux catégories. Soit des échelles de température effectives qui sont seulement basées sur des paramètres météorologiques, telles que la température ambiante, la température du bulbe humide, la température du globe noir, ou bien des index rationnels de chaleur combinant les facteurs environnementaux et physiologiques (chaleurs sensible et latente, production de chaleur métabolique). Par exemple, le WBGT ou ISO 7243 est un indice dérivé du principe de la température effective (Moran et al. 2003) tandis que l'HSI tient compte de la température du bulbe sec, de la vitesse d'air, de la pression de la vapeur et des vêtements (Bernard et Hanna, 1988).

Dans le domaine de la production animale, les densités d'élevage dans les bâtiments sont telles que les conditions environnementales à l'intérieur peuvent atteindre un seuil critique lorsque la température est élevée et que l'humidité se met de la partie. Or, il est impossible de quantifier le stress thermique subit par les animaux dans de pareilles conditions. Ainsi, afin d'évaluer l'impact des différentes conditions environnementales sur les animaux, des chercheurs ont développé des modèles semblables à ceux utilisés pour l'humain, mais conçus pour les animaux (Tao et Xin, 2003). Certains de ces modèles requièrent la mesure de la température du bulbe humide. Or dans un bâtiment de production, la quantité de poussière qui s'y trouve due à la litière et la moulée risque de fausser les lectures de ce dernier. De plus, pour ajouter à la complexité du problème, il est nécessaire d'évaluer la vitesse d'air au plancher. D'autre part, étant donné que les

conditions de production et la physiologie animale changent d'une espèce à l'autre, plusieurs modèles furent développés pour tenir compte de ces différences. Il est important de noter que la combinaison des température du bulbe sec et humide est à la base de plusieurs modèles développés pour les vaches (Buffington et al., 1981), les porcs, les poules pondeuses, les dindes pondeuses et les dindes (Brown-Brandl al., 1997).

Kettlewell et al. (1997) ont développé une autre méthode qui permet d'évaluer le stress des poulets pour différentes conditions de production. Il s'agit d'un système radio télémétrique qui permet d'enregistrer le pouls et la température corporelle d'un poulet. Suite à ce projet, les travaux de Lacey et al. (2000a, b) ont permis de conclure que la température corporelle peut-être utilisée comme indicateur de stress pour les poulets. Cependant, l'application d'un tel système à grande échelle n'est pas économiquement viable à ce jour (Brown-Brandl et al, 2003). Certains auteurs ont été même jusqu'à utiliser la thermographie (Bottcher et al.,1992) pour évaluer le confort des poulets, tandis que Xin et Shao (2002) ont utilisé des caméras CCD pour le même genre d'application dans le milieu porcin. Bien qu'intéressantes, ces recherches sont encore préliminaires. Dans le cas du poulet de chair, un modèle basé sur la température effective, tenant compte de la température ambiante, de l'humidité relative et de la vitesse du vent, vient tout juste d'être développé par Tao et Xin (2003). Cependant, celui-ci ne peut être appliqué que pour des poulets âgés de 45 jours. Avant que les résultats de Tao et Xin (2003) ne soient présentés, les modèles mathématiques publiés négligeaient souvent l'influence de la vitesse d'air au niveau du plancher. Or, Bottcher et al. (1992) ont conclu que la vitesse d'air devrait être considérée dans les indices évaluant le confort des poulets, et en incluant la vitesse de l'air dans leur modèle, Tao et Xin (2003) introduisent cet aspect négligé par plusieurs. Aujourd'hui, nous savons qu'en situation d'élevage commercial, il existe un moyen très efficace pour réduire le stress causé par la chaleur, soit d'augmenter la vitesse d'air au plancher (Lott et al., 1998; Yahav et al., 2001; Tao et Xin, 2003). Donc, en augmentant les échanges convectifs entre les poulets et leur

environnement, ceux-ci ont moins de chance de mourir d'épuisement cardiaque lorsqu'ils combattent l'hyperthermie en produisant de la chaleur latente. Dans leurs travaux, Tao et Xin (2003) ont ainsi développé des courbes qui permettent d'estimer la condition physique du poulet (Urgent, Danger, Alerte, Normal) après que celui-ci soit exposé à une température effective donnée pendant un certain temps. Cet aspect est très important, car il a été rapporté par Furlan et al. (2000) et par Segura et al. (2002) que le temps d'exposition des poulets aux conditions environnementales est un point critique pour le maintien de leur équilibre thermique.

Nichelmann et al. (1986a) ont introduit la notion de température ambiante totale effective pour les poules pondeuses. Ce principe tient compte de la température ambiante, de l'humidité relative, de la vitesse de l'air et de l'âge des poulets. La température effective se définit comme suit; c'est un index arbitraire qui combine sous une seule valeur les effets de la température, de l'humidité et du mouvement de l'air sur la sensation de chaleur ou de froid perçue par l'être humain (Bligh et Johnson, 1973). Comme point de référence, on utilise la température de l'air saturé d'eau lorsque celui-ci n'est pas en mouvement. Toutes les conditions environnementales qui procurent à un individu les mêmes sensations thermiques que le point de référence ont la même température effective.

Quant à la température ambiante totale effective, celle-ci est basée sur le même concept, quoique la définition soit légèrement différente; tous les facteurs environnementaux menant à la même production de chaleur que la référence ont la même température totale ambiante effective. Comme point de référence, Tzschentke et Nichelmann (2000) et Nichelmann et al. (1986a, 1986b) considèrent une situation où la vitesse de l'air au plancher ne dépasse pas $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ et où l'humidité relative se situe entre 65 % et 75 %. Les températures ambiantes totales effectives déterminées par Nichelmann et al. (1986b) sont valides pour différentes espèces telles que les poules pondeuses, les dindes et les canards musqués.

Avant d'aller plus loin dans la définition de zone de confort du poulet, il est important de définir tous les termes se rapportant à ce sujet dans la littérature. À la figure 6, on note que le poulet tombera dans un état d'hypothermie s'il est confronté à un environnement où la température effective se situe dans la zone A. Ensuite, le point B représente la température effective où la production de chaleur est maximale, alors que le point C représente le début de la zone de métabolisme minimale, c'est-à-dire la zone où la production de chaleur est au minimum. La zone entre les points C et D représente la zone de thermorégulation minimale. Il s'agit de la zone de température effective où le poulet fait un minimum d'effort pour maintenir sa température corporelle. C'est donc dans cette zone que la performance du poulet de chair sera optimale. Le point D marque le début d'une éventuelle diminution de la production de chaleur sensible et une augmentation de la production de chaleur latente. Ce phénomène s'explique par le fait que le poulet est incapable de libérer suffisamment de chaleur sensible pour maintenir sa température corporelle, il libère alors de l'énergie sous forme de chaleur latente. Le point E indique que lorsque la température effective dépasse la température corporelle du poulet, le poulet gagne de l'énergie sensible, car le gradient de température est inversé. Donc, le poulet doit libérer plus de chaleur latente qu'initialement afin de dissiper cette chaleur. La figure 6 indique que la température corporelle du poulet commence à augmenter lorsqu'il lui est impossible de dissiper suffisamment de chaleur latente pour compenser la chaleur produite par son métabolisme et la chaleur gagnée en raison de l'augmentation de la température ambiante (zone F). À partir de ce moment, le poulet se trouve en état d'hyperthermie.

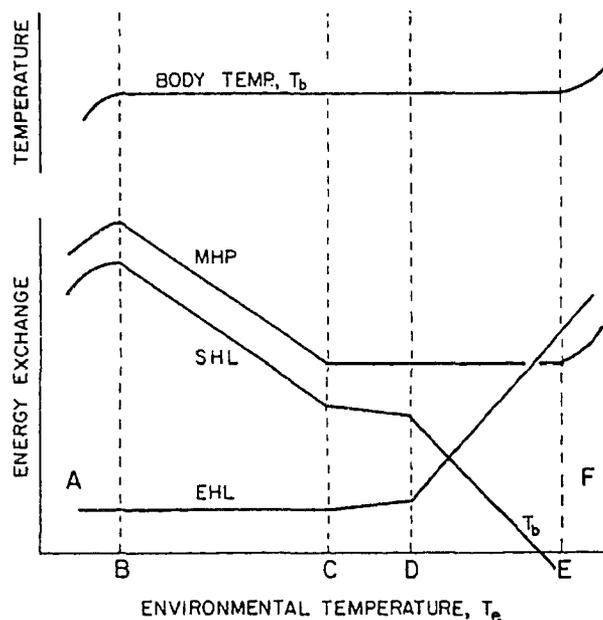


Figure 6 Concept de la température effective
(Adapté de Scott et al., 1983)

À la suite de leurs travaux, Tzschentke et Nichelmann (2000) affirment que la chaleur produite par un poulet est un excellent indice afin de déterminer si il est situé dans sa zone de confort. Néanmoins, la sélection génétique fait en sorte que le taux de croissance des poulets augmente sans cesse (Flood et al., 1992) et augmente du même coup leur production de chaleur, d'où le besoin de constamment renouveler les données de production de chaleur des poulets de chair (ASHRAE, 2001; Gates et al., 1996; Chepete et Xin, 2001). De plus, des données actualisées sont nécessaires afin que les ingénieurs puissent établir les débits de ventilation minimum et maximum pour permettre aux producteurs avicoles de maintenir une température effective adéquate à l'intérieur de leurs bâtiments d'élevage, quel que soit l'âge des poulets.

1.5 Chaleur produite par le poulet de chair

Aujourd'hui, lorsque les ingénieurs conçoivent le système de ventilation d'un poulailler, ils se réfèrent aux différents ouvrages publiés par des organismes tels la Commission Internationale du Génie Rural (CIGR) et l'American Society of Agricultural Engineers

(ASAE), puisque les plus récentes données techniques concernant le poulet de chair y sont publiées. L'ASAE publie des valeurs de production d'humidité, de chaleur sensible et de chaleur totale qui ont été mesurées expérimentalement (ASAE, 2001). Quoique datant de plus de 20 ans, ces données sont encore utilisées aujourd'hui par les ingénieurs afin de concevoir les systèmes de ventilation des bâtiments avicoles. Récemment, une revue de littérature a été conduite par Chepete et Xin (2001) afin de pouvoir comparer les données de chaleur totale (Tableau II) et d'humidité produites afin de démontrer la magnitude du changement de ces données lors des 50 dernières années. Cette revue de littérature fait une synthèse de toutes les équations publiées au fil des années (Annexe, Équation de production de chaleur et d'humidité). Il est à noter que cette revue de littérature fut commanditée par l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) et pourrait devenir la nouvelle référence en la matière d'ici peu.

Tableau II

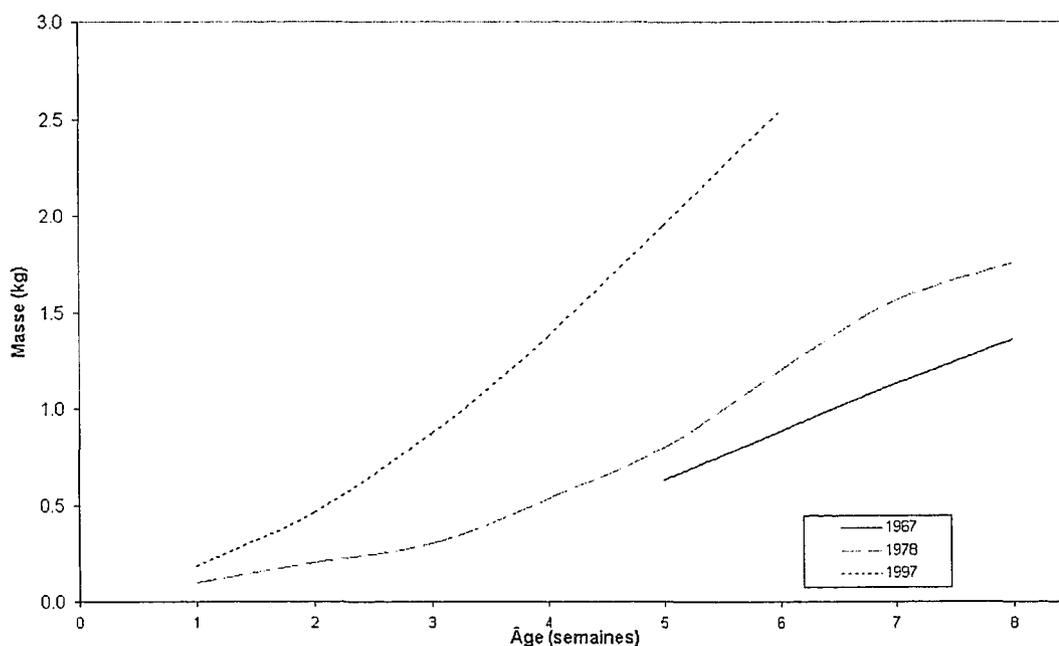
Production totale de chaleur pour le poulet de chair

Année(s)	Q_{totale} W.kgt ⁻¹	Q_{totale} W.poulet ⁻¹	Source
1968	8,31 M ^{-0.29}	8,31 M ^{0.71}	Chepete et Xin, 2001
1982-2000	10,60 M ^{-0.26}	10,60 M ^{0.74}	
1996	-	9,6 M ^{0.75}	Jorgensen et al., 1996
1999	-	10,0 M ^{0.75}	CIGR Handbook, 1999

(Adapté de Chepete et Xin, 2001)

Plusieurs chercheurs ont constaté l'augmentation de la croissance des poulets au fil du temps (Gates et al., 1996; Flood al., 1992; Reece et Lott, 1982a). Le graphique 1 présente l'évolution de la croissance du poulet de chair entre 1967, 1978 et 1997. De plus, il a été mentionné à plusieurs reprises dans la littérature que les données concernant

les productions des chaleurs totale, latente et sensible ont constamment augmentées au courant des dernières années en raison de l'amélioration de la génétique, de la nutrition et des conditions d'élevage, d'où le besoin de constamment actualiser ces données (Chepete et Xin, 2001; Xin et al. 2001). Chepete et Xin (2001) vont même jusqu'à mentionner que la production de chaleur totale d'un poulet pesant 1,6 kg a augmenté de 22 % entre 1968 et 2000. Le tableau III montre que les améliorations apportées pour ce qui est de la gestion de la production ont augmenté significativement l'efficacité de la production puisqu'en comparant les données de 1950 à celle de 1988 ont observé que le temps d'élevage a diminué de moitié, alors que le poids à l'abattage a augmenté de presque 50 %.



Graphique 1 Augmentation du rendement des poulets de chair
(Adapté de ASAE, 2001; Avipro-Coq Performances, 1997)

Tableau III

Réduction du temps d'élevage et augmentation du poids et de l'indice de conversion alimentaire

Année	Âge à l'abattage jours	Poids kg	Indice de conversion alimentaire kg.kg ⁻¹
1950	84	1,36	3,40
1965	63	1,59	2,25
1975	49	1,73	2,00
1977	47	1,90	1,95
1988	42	2,00	1,85
2003	40	2,05	1,83

(Tirée de Proudfoot et al, 1991; CO-OP, 2003)

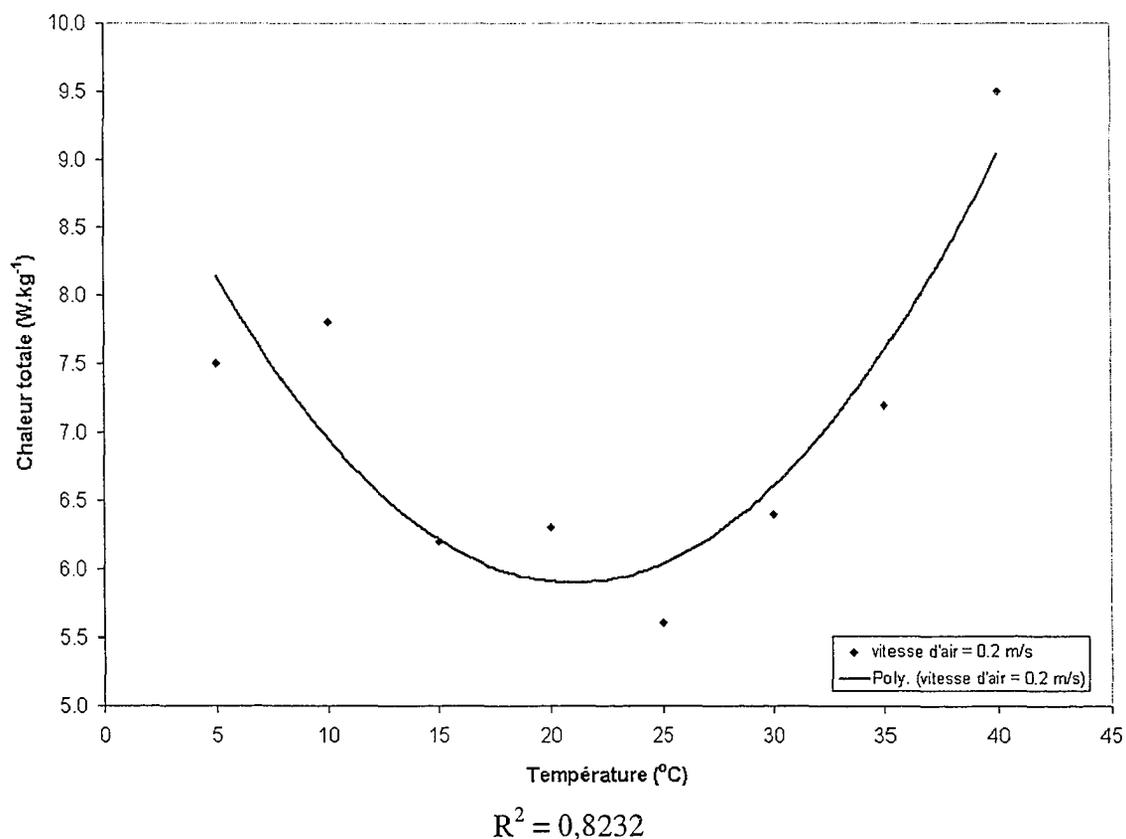
1.6 Relation entre la chaleur produite, la température ambiante, l'humidité relative et la vitesse de l'air

Les quatre sections suivantes permettent de mieux comprendre les relations entre la chaleur produite et la température ambiante, l'humidité relative et la vitesse de l'air. Ces explications sont basées sur les travaux de Nichelmann et al. (1986a, 1986b) ainsi que ceux de Tzschentke et Nichelmann (1986,2000).

1.6.1 Relation entre la chaleur produite et la température ambiante

La relation entre la température ambiante et la chaleur totale produite pour tous les niveaux d'humidité relative est décrite par une fonction parabolique. Le graphique 2 montre l'effet de la température sur la production de chaleur d'une poule pondeuse âgée de 252 jours et une humidité relative entre 60 et 80% lorsque l'âge et la vitesse de l'air au plancher sont constants (Nichelmann et al. 1986b; Jurkschat et al., 1986; Tzschentke et Nichelmann, 1996; Tzschentke et Nichelmann, 2000). Pour tous les âges, on retrouve

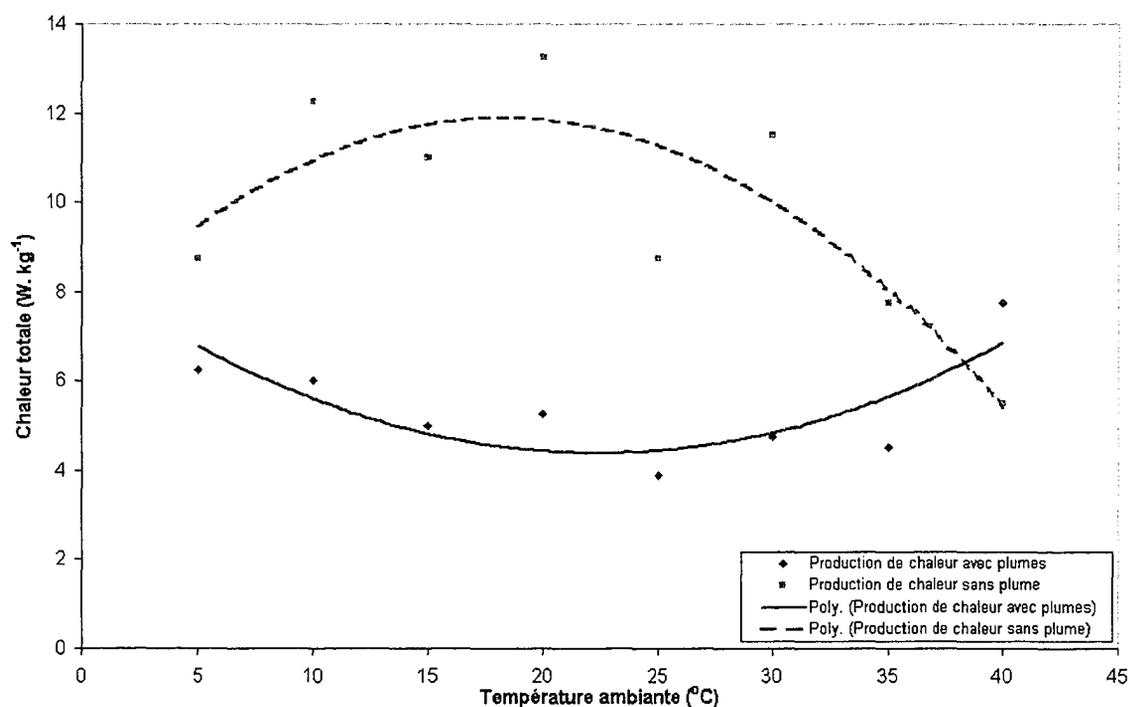
ce type de relation entre la température ambiante et la chaleur totale produite. Par contre, lors de leurs travaux, Nichelmann et al. (1986a) ont remarqué que la présence ou l'absence de plumes sur une poule pondeuse peut affecter énormément la quantité de chaleur libérée par cette dernière.



Graphique 2 Chaleur produite en fonction de la température ambiante pour une poule pondeuse
(Adapté de Tzschentke et Nichelmann, 2000)

Du graphique 3, on observe que les fonctions mathématiques décrivant la production de chaleur pour une poule pondeuse ayant des plumes et une poule pondeuse déplumée sont très différentes. Pour une poule pondeuse déplumée, on observe que si la température ambiante est diminuée en deçà d'un certain niveau, la poule pondeuse produit de la chaleur à un taux maximal (sommet métabolique). Ensuite, si la température est abaissée à un niveau inférieur, la production de chaleur diminuera éventuellement et la poule

pondeuse tombera en état d'hypothermie. De plus, on voit qu'une poule pondeuse dépourvue de plumes peut résister beaucoup plus facilement à des températures ambiantes élevées. Dans le cas d'une poule pondeuse ayant toutes ses plumes, on voit que les plumes agissent comme un isolant puisqu'elles permettent à la poule de résister à l'hyperthermie lorsque la température ambiante est très élevée.



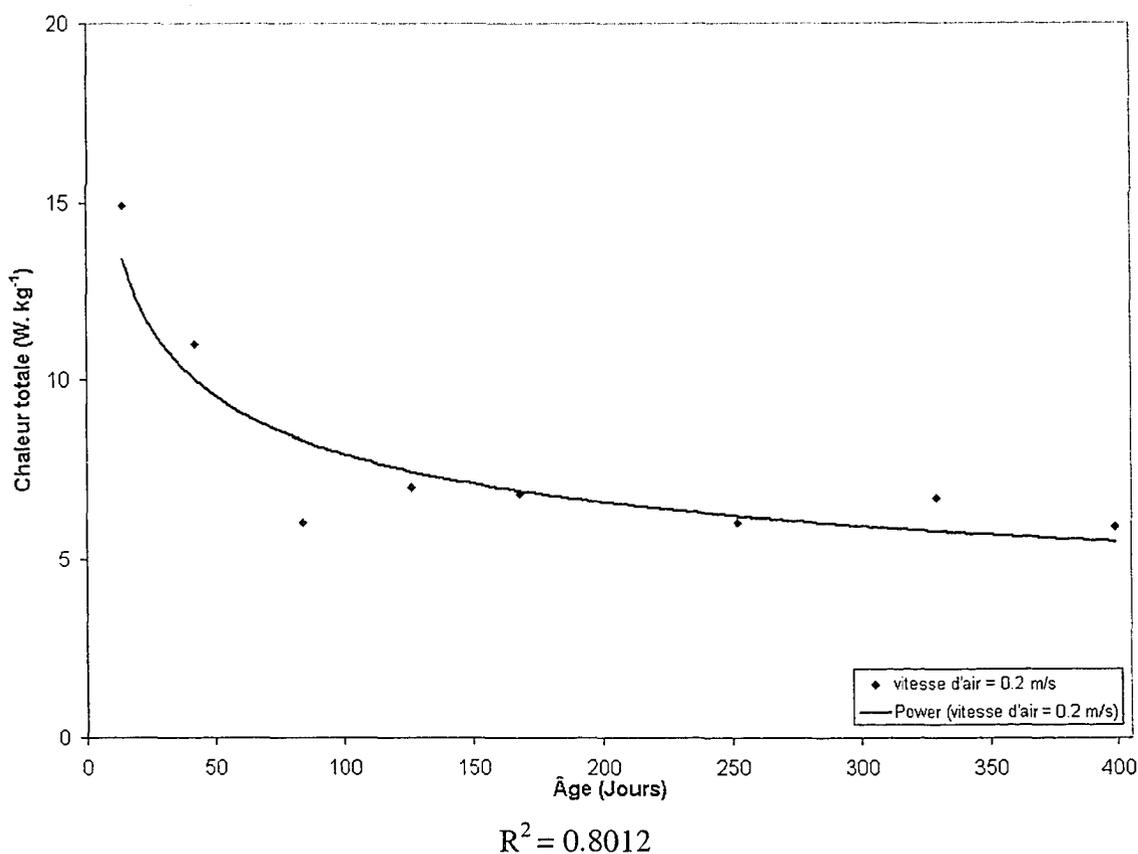
$$R^2_{\text{plumes}} = 0,7154 \quad R^2_{\text{déplumé}} = 0,6512$$

Graphique 3 Production de chaleur pour une poule pondeuse avec et sans plume (Adapté de Nichelmann et al., 1986a)

1.6.2 Relation entre la chaleur produite et l'âge

La température ambiante où le poulet est le plus confortable diminue avec l'âge. Même si celui-ci produit moins d'énergie par kilogramme, il produit tout de même plus de chaleur au total. Le graphique 4 indique que la fonction décrivant la production de chaleur totale en fonction de l'âge est représentée par une fonction de puissance (Tzschentke et Nichelmann, 1986; Jurkschat et al., 1986; Tzschentke et Nichelmann 1996; Xin et al., 2001). Ce graphique est valide pour une température de 20°C et une

humidité relative entre 60% et 80%. Par ailleurs, la température de confort du poulet de chair diminue lorsque le poulet vieillit, peu importe l'humidité relative et la vitesse de l'air (Tzschentke et Nichelmann, 2000).



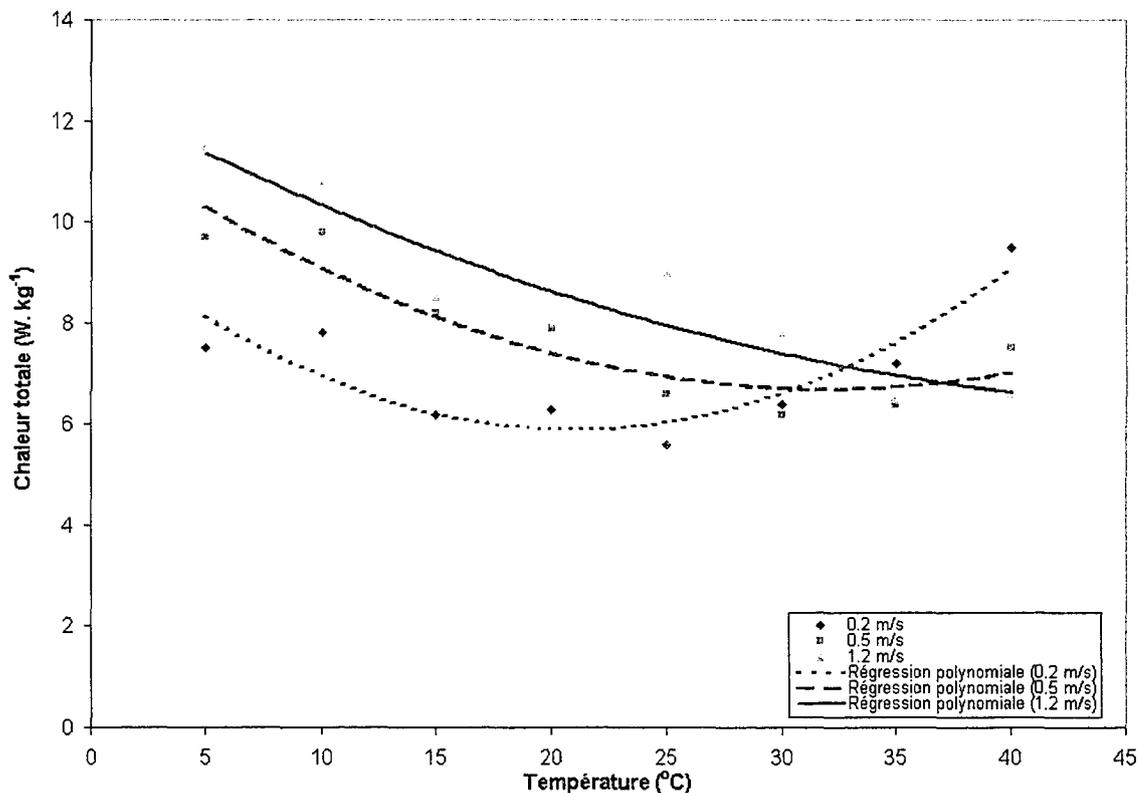
Graphique 4 Production de chaleur en fonction de l'âge
(Adapté de Tzschentke et Nichelmann, 1986)

1.6.3 Relation entre la chaleur produite et la vitesse de l'air

Le graphique 5 provient des résultats de Tzschentke et Nichelmann (1986). Les auteurs démontrent qu'il est nécessaire d'augmenter la vitesse de l'air au plancher si on veut minimiser la chaleur produite par une poule pondeuse de 252 jours. On observe dans le graphique 5 que pour une température ambiante basse, l'augmentation de la vitesse de l'air augmente le stress thermique. D'ailleurs, si la vitesse de l'air est augmentée alors que la température ambiante est de 37,8 °C, le poulet peut se retrouver dans un état

d'hyperthermie (Timmons et Hillman, 1993). Toujours en se référant au graphique 4, on observe qu'une augmentation de la vitesse de l'air déplace la parabole à la fois vers le haut et vers la droite. De plus, une augmentation de la vitesse de l'air de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ influence beaucoup plus la production de chaleur qu'une augmentation de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ à $1,2 \text{ m.s}^{-1}$ (Tzschentke et Nichelmann, 2000).

Advenant la situation où l'on désire maintenir la production de chaleur totale à $6,6 \text{ W.kg}^{-1}$, alors pour une température de $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ une vitesse de l'air de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ est requise, selon la régression polynomiale présentée au graphique 5. Si la température est augmentée à 35°C et que la vitesse d'air est maintenue constante, la production de chaleur augmente à $7,6 \text{ W.kg}^{-1}$. De ce graphique, on observe qu'en augmentant la vitesse de l'air de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$, ceci a pour effet de réduire la production de chaleur à $6,8 \text{ W.kg}^{-1}$. Une augmentation de la température ambiante à 40°C , alors que la vitesse de l'air est de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$, entraîne une production de chaleur de $7,0 \text{ W.kg}^{-1}$. Cependant, si on veut maintenir la production de chaleur constante à $6,6 \text{ W.kg}^{-1}$, on devra augmenter la vitesse de l'air à $1,2 \text{ m.s}^{-1}$. Donc, à partir du graphique 5 on constate que plus la température ambiante augmente, plus il est nécessaire d'augmenter la vitesse de l'air si l'on souhaite minimiser la production de chaleur totale.



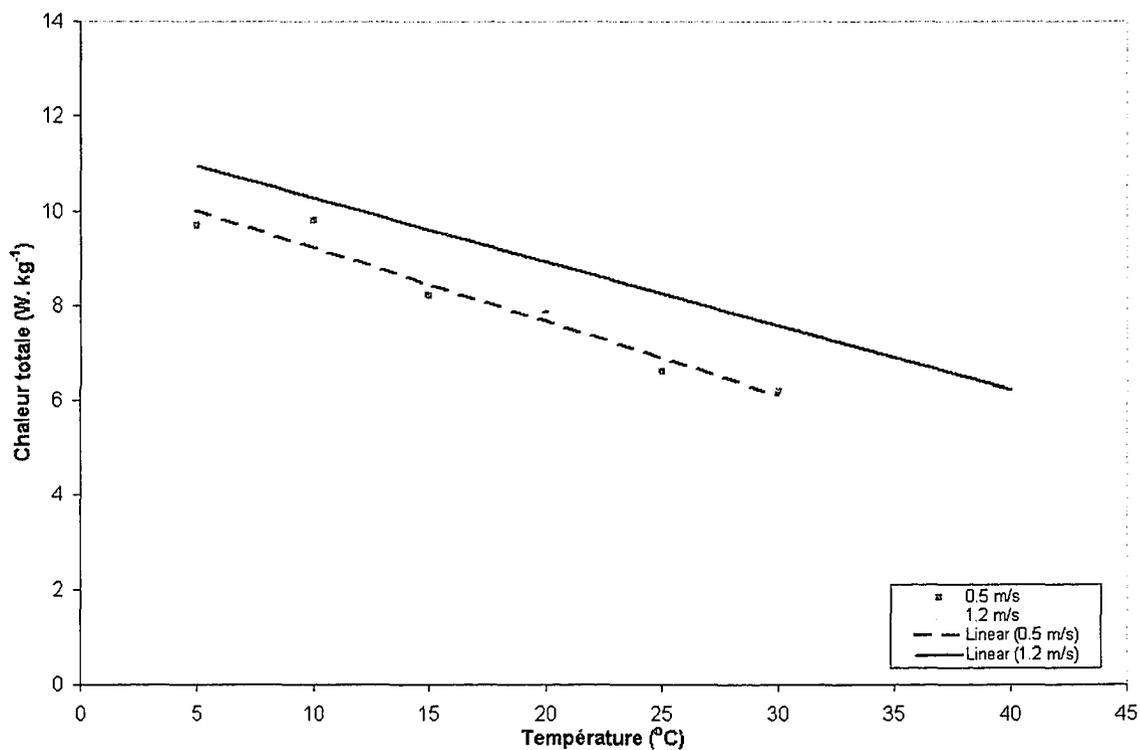
$$R^2_{0,2 \text{ m.s}^{-1}} = 0,8232$$

$$R^2_{0,5 \text{ m.s}^{-1}} = 0,8664$$

$$R^2_{1,2 \text{ m.s}^{-1}} = 0,8708$$

Graphique 5 Production de chaleur en fonction de la température ambiante pour différentes vitesses d'air
(Adapté de Tzschentke et Nichelmann, 1986)

Pour les vitesses d'air de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ et $1,2 \text{ m.s}^{-1}$, la partie gauche de la parabole, soit tous les points avant et incluant le point minimum, peut être représentée par une fonction linéaire (Tzschentke et Nichelmann, 1986, 1996). Le graphique 6 indique que les sections gauches des paraboles sont fortement linéaires pour des vitesses d'air de l'ordre de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ et $1,2 \text{ m.s}^{-1}$.



$$R^2_{0,5 \text{ m.s}^{-1}} = 0,9447$$

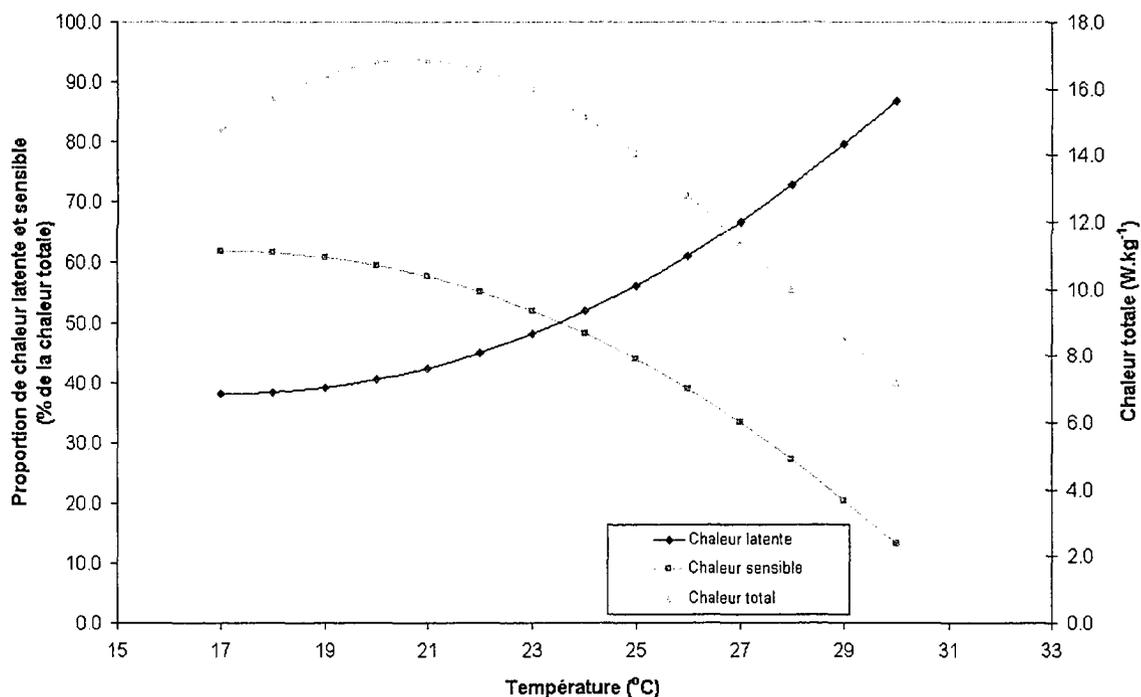
$$R^2_{1,2 \text{ m.s}^{-1}} = 0,8442$$

Graphique 6 Production de chaleur en fonction de la température ambiante en deçà et incluant la température thermoneutre pour différentes vitesses de l'air
(Adapté de Tzschentke et Nichelmann, 1986)

1.6.4 Relation entre la chaleur produite et l'humidité

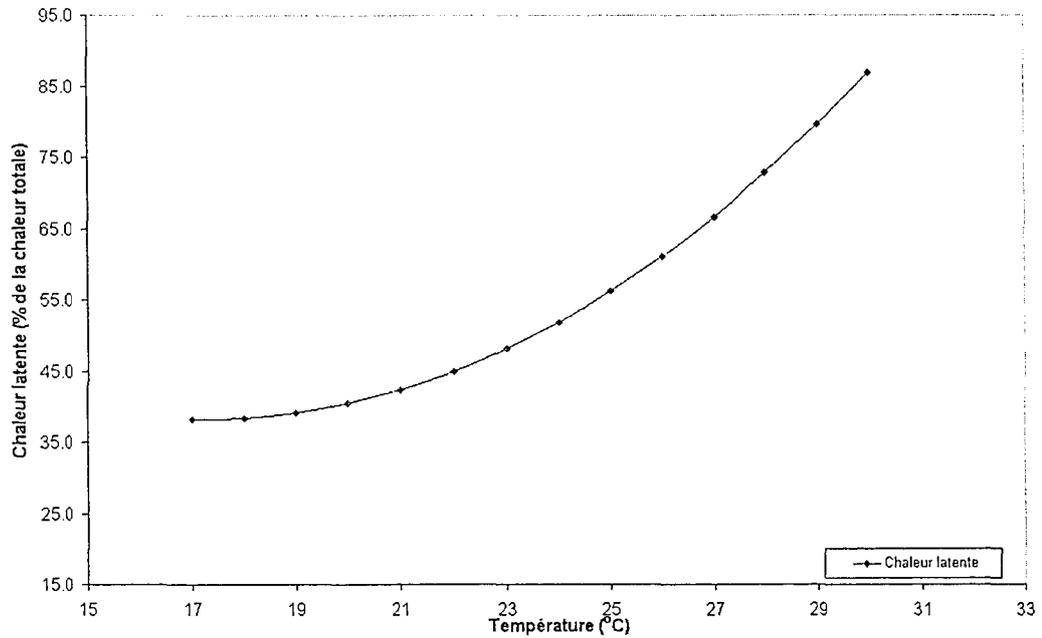
Dans les situations où la température est élevée et que la vitesse de l'air au plancher est faible, la chaleur produite sera principalement sous forme de chaleur latente (Timmons et Hillman, 1993). Le graphique 7 montre la distribution de chaleur latente, de chaleur sensible et la production de chaleur totale en fonction de la température. Pour une température élevée et une vitesse de l'air faible, le poulet dégagera moins de chaleur sensible au profit de la chaleur latente. Or, dans un cas où l'humidité relative est élevée, le poulet aura de la difficulté à produire de la chaleur latente, car l'environnement est déjà saturé en eau. Si l'humidité relative est basse, le poulet peut évacuer la chaleur de

son système en produisant de la chaleur latente sans être limité par les conditions environnementales, et ce, même si la température ambiante est élevée.

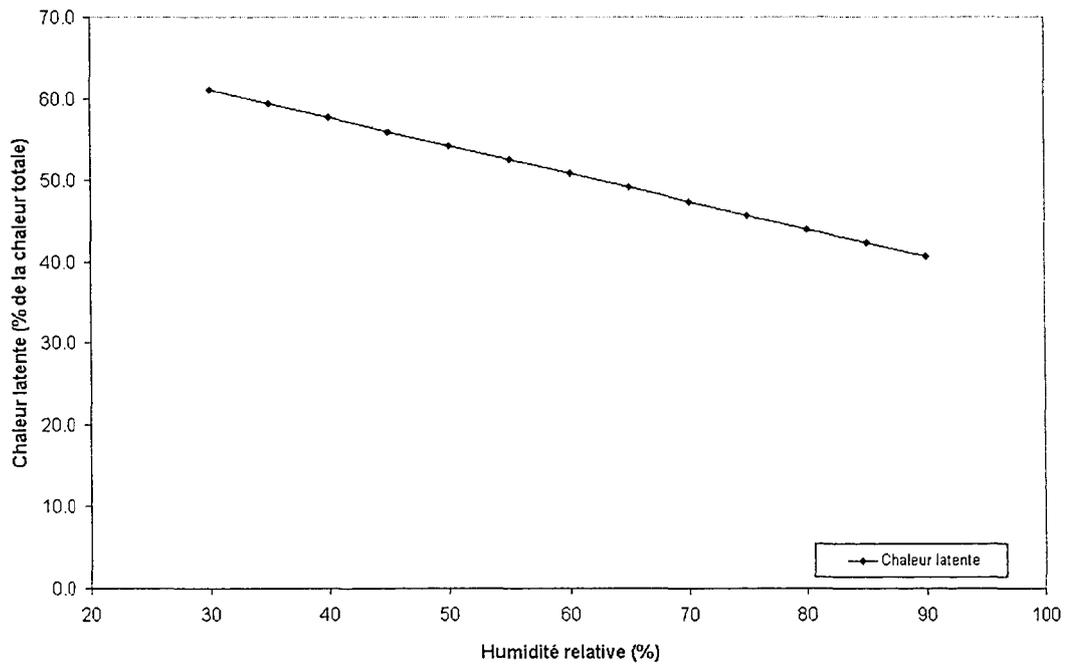


Graphique 7 Production de chaleurs totale, latente et sensible en fonction de la température ambiante pour une masse de 1,65 kg et une humidité relative de 65 %
(Adapté de Xin et al., 2001)

De leur côté, Xin et al. (2001) ont développé un modèle mathématique basé sur une régression exponentielle qui permet de calculer le pourcentage de chaleur latente par rapport à la chaleur totale produite en fonction de la température ambiante (Graphique 8). De plus, ils ont trouvé qu'en augmentant l'humidité relative de 40% à 80%, la production de chaleur latente est diminuée de 15% (Graphique 9).



Graphique 8 Production de chaleur latente en fonction de la température ambiante pour une humidité relative de 65 %
(Adapté de Xin et al. 2001)



Graphique 9 Production de chaleur latente en fonction de l'humidité relative pour une température de 23,3 °C
(Adapté de Xin et al. ,2001)

1.7 Conclusion

En se basant sur les travaux de Nichelmann et al. (1986a, 1986b), Tzschentke et Nichelmann (1986,1996 et 2000) et Tao et Xin (2003), il est proposé d'une part de développer un indice de confort du poulet en milieu de production basé sur le concept de température effective. Ensuite, par le biais de cet indice de confort, l'environnement de production sera contrôlé. Cet indice de confort est une combinaison des paramètres étudiés par Tao et Xin (2003), Tzschentke et Nichelmann (1986,1996, 2000), Jurkschat et al. (1986) et Xin et al. (2001), soit la température ambiante, l'humidité relative, la vitesse d'air et le poids de l'animal. Dans leurs travaux, les auteurs utilisent la température corporelle du poulet afin de déterminer si celui-ci est en état d'équilibre thermique avec son environnement. Au lieu d'utiliser la température corporelle, il est proposé ici d'utiliser le concept de température effective développé par Nichelmann et al. (1986a, 1986b), où la température effective est définie comme étant une combinaison de conditions environnementales où le poulet produit la même quantité de chaleur qu'à un point de référence pré-établi. L'équilibre thermique sera considéré comme étant le point où la production de chaleur est minimale et que le poulet ne subit aucun stress thermique.

D'autre part, si on veut développer une nouvelle stratégie de contrôle environnemental basée sur le concept de température effective pouvant être appliquée dans un bâtiment d'élevage avicole commercial, il est primordial d'obtenir des données actuelles sur les productions de chaleurs totale, latente et sensible. Cependant, les données concernant la production de chaleur et d'humidité des poulets datent de plus de 20 ans. De plus, il a été mentionné à plusieurs reprises dans la littérature que les productions de chaleur et d'humidité ont augmenté significativement grâce au progrès génétique et à l'amélioration de conditions d'élevage. Alors, en se basant sur les travaux de Fennir et al. (2003), les productions de chaleurs totale, latente et sensible seront mesurées en exécutant les balances thermique et d'humidité. Ainsi, en effectuant les balances

thermique et d'humidité dans le bâtiment avicole d'un producteur québécois, nous serons en mesure d'obtenir des données actuelles et fiables.

Ensuite, en analysant ces données, il sera possible d'associer les différentes combinaisons de température ambiante, d'humidité relative et de vitesses de l'air qui font en sorte que le poulet de chair libère les mêmes quantités de chaleur que le point de référence établi par Tzschenke et Nichelmann (1986, 2000). À partir de ces balances thermique et d'humidité, il sera possible d'observer l'effet de la température, de l'humidité relative, de la vitesse de l'air et du poids sur la production de chaleurs totale, latente et sensible, ainsi que sur la température effective. Finalement, à la suite de l'élaboration de cet indice de confort, les lignes directrices d'une stratégie de contrôle visant à stabiliser et contrôler l'environnement de production seront développées.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION DE LA PRODUCTION DE CHALEUR ET D'HUMIDITÉ

2.1 Introduction à la modélisation

Le premier objectif de ce chapitre est de présenter un modèle permettant de déterminer les chaleurs totale, latente et sensible produites par le poulet de chair en situation d'élevage commercial. À l'aide du chiffrier électronique *Excel* de *Microsoft*, le modèle des échanges thermiques et d'humidité entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment a été programmé. La balance thermique tient compte de l'énergie provenant des lumières, des moteurs et des éleveuses, ainsi que des pertes d'énergie par le système de ventilation et le bâtiment. En tenant compte de tous ces facteurs, il est désormais possible d'évaluer la chaleur totale produite par le poulet. Ensuite, en élaborant une balance d'humidité, il est possible d'évaluer la chaleur latente produite par les poulets.

2.2 Modèle des échanges thermiques et d'humidité

Considérant que le système étudié est un système fermé non adiabatique ne comprenant que la chambre d'élevage et son environnement immédiat et en se basant sur le principe de la conservation de l'énergie, il est alors possible d'effectuer une balance thermique du système. Cependant, puisqu'un environnement de production stable est désiré, on doit s'assurer que les échanges de chaleur entre le système et son environnement sont balancés en régime permanent. Ainsi, la chaleur évacuée du système ($q_{\text{évacuée}}$) doit être en tout temps égale à la somme de la chaleur entrante (q_{entrante}) et de la chaleur produite à l'intérieur ($q_{\text{produite intérieure}}$) du système.

$$q_{\text{entrante}} + q_{\text{produite intérieure}} + q_{\text{évacuée}} = 0 \quad (2.1)$$

À partir de l'équation 2.1, il est possible de déterminer la chaleur produite par l'ensemble des poulets ($q_{\text{totale poulet}}$) de chair en situation d'élevage. Le modèle développé dans le cadre de ce projet se base sur l'hypothèse suivante : lorsque la température extérieure est moins élevée que la température moyenne à l'intérieure du bâtiment d'élevage, il y a une perte d'énergie par le bâtiment. À partir de cette hypothèse, la convention suivante est adoptée :

$q > 0$: chaleur entrante ou produite à l'intérieur du système

$q < 0$: chaleur évacuée du système

La chaleur totale produite par un animal peut être séparée en deux formes, soit la chaleur latente ($q_{\text{latente poulet}}$) et la chaleur sensible ($q_{\text{sensible poulet}}$). Afin de déterminer la production de chaleur totale ($q_{\text{totale poulet}}$) on doit évaluer quelles sont les proportions de chaleur qui sont produites sous forme sensible et latente (équation 2.2).

$$q_{\text{totale poulet}} = q_{\text{sensible poulet}} + q_{\text{latente poulet}} \quad (2.2)$$

Les équations 2.3 et 2.4 permettent de mieux visualiser quelles sont les sources et les pertes de chaleur sensible impliquées dans la balance thermique.

$$q_{\text{sensible poulet}} + q_{\text{lumières}} + q_{\text{moteurs}} + q_{\text{éleveuses}} + q_{\text{ventilation}} + q_{\text{bâtiment}} = 0 \quad (2.3)$$

$$q_{\text{sensible poulet}} = -q_{\text{bâtiment}} - q_{\text{ventilation}} - q_{\text{lumières}} - q_{\text{moteurs}} - q_{\text{éleveuses}} \quad (2.4)$$

Sachant que la chaleur latente et la production d'humidité sont liées par la chaleur d'évaporation de l'eau (h_{fg}) (Xin et *al.*, 2001), il est proposé de calculer la production d'humidité des poulets (ph_{poulet}) pour déterminer indirectement la chaleur latente produite (équation 2.5). La chaleur latente d'évaporation de l'eau est l'énergie nécessaire pour évaporer de l'eau à une température donnée.

$$q_{\text{latente poulet}} = ph_{\text{poulet}} h_{fg} \quad (2.5)$$

En s'appuyant cette fois-ci sur le principe de la conservation de la matière, on effectue cette fois-ci une balance d'humidité (équation 2.6) afin de déterminer l'humidité produite par les poulets en milieu de production.

$$ph_{\text{intrans}} + ph_{\text{intérieure}} + ph_{\text{extrant}} = 0 \quad (2.6)$$

Pour effectuer une balance d'humidité, on pose comme hypothèse de départ que le rapport d'humidité de l'air intérieur est plus élevé que l'air extérieur, d'où l'adoption de la convention suivante :

$ph > 0$: humidité entrante ou produite par le système

$ph < 0$: humidité évacuée du système

Les équations 2.7 et 2.8 sont des versions détaillées de la balance d'humidité. Connaissant le taux auquel l'humidité est évacuée du système ($ph_{\text{évacuée}}$) et introduite (ph_{entrante}) dans le système ainsi que les sources d'humidité à l'intérieur ($ph_{\text{intérieure}}$) du système, il est possible de calculer le taux de production d'humidité des poulets (ph_{poulet}).

$$ph_{\text{ventilation intrans}} + ph_{\text{poulet}} + ph_{\text{gicleurs}} + ph_{\text{éleveuses}} + ph_{\text{ventilation extrant}} = 0 \quad (2.7)$$

$$ph_{\text{poulet}} = - ph_{\text{ventilation intrans}} - ph_{\text{ventilation extrant}} - ph_{\text{gicleurs}} - ph_{\text{éleveuses}} \quad (2.8)$$

Étant donné que l'humidité libérée par la litière vient principalement de l'eau contenue dans les excréments, il est tout à fait logique de considérer que l'humidité provenant de la litière est une forme indirecte de chaleur latente. D'un autre côté, bien que l'énergie latente calculée inclut aussi l'eau pouvant s'évaporer des abreuvoirs, cette source d'humidité est négligeable puisque des abreuvoirs à becs sont utilisés.

2.2.1 Gain ou perte d'énergie sensible par le système de ventilation

Afin d'être en mesure d'évaluer le plus précisément possible la quantité d'énergie sensible transférée par le système de ventilation, le temps de marche de chacun des ventilateurs ($t_{\text{ventilateur } i}$) a été enregistré. Connaissant le gradient de température ainsi que le débit d'air de chacun des ventilateurs (V_i), il est possible d'estimer l'énergie évacuée par les ventilateurs durant leur fonctionnement. Une fois cette quantité d'énergie déterminée ($Q_{\text{ventilation}}$), on fait une moyenne sur la période d'échantillonnage des données (τ) pour finalement obtenir un taux moyen de perte de chaleur ($q_{\text{ventilation}}$). Afin d'évaluer précisément le débit de ventilation sur le site expérimental, des tests furent effectués dans le tunnel de ventilation de la compagnie *Les Équipements Modernes inc.* À partir de ces tests, des équations permettant de déterminer le débit de ventilation en fonction du voltage rms et de la pression statique furent développées pour les ventilateurs 16 021F et 16 032F utilisés lors de cette expérience. Pour les ventilateurs 24 050F et 36 050F, une équation du débit en fonction de la pression statique fut développée puisque ceux-ci ne sont pas des ventilateurs à vitesse variable. Quant à la densité de l'air (ρ) et à la chaleur spécifique de l'air (C_p), il s'agit de propriétés psychrométriques dont les détails sont discutés plus loin. Les gains ou les pertes d'énergies sensibles par les 15 ventilateurs sont calculées de la façon suivante :

$$Q_{\text{ventilation sens.}} = \sum_{i=1}^{15} V_i \rho C_p (T_{\text{extérieur}} - T_{\text{intérieur}})_i t_{\text{ventilateur}} \quad (2.9)$$

$$q_{\text{ventilation sens.}} = \frac{Q_{\text{ventilation sens.}}}{\tau} \quad (2.10)$$

2.2.2 Gain ou perte d'énergie du bâtiment

Afin d'estimer les pertes ou les gains de chaleur associés aux murs et à la structure du bâtiment ($q_{\text{bâtiment}}$), les résistances thermiques équivalentes ($R_{\text{équi théorique}}$) des murs extérieurs, du mur intérieur, du plafond et du plancher ont dû être déterminées à l'aide des plans originaux du bâtiment. Les aires des sept différentes surfaces exposées aux échanges de chaleur (A_i) ont été mesurées avant de débiter l'acquisition des données.

Afin de mesurer le gradient de température des deux côtés de chaque surface du bâtiment, des capteurs de température installés à divers endroits (Annexe, plans du site expérimental, plan 3) dans la salle d'élevage ($T_{\text{intérieure}}$) et à l'extérieur ($T_{\text{extérieure}}$) de celle-ci sont utilisés afin d'avoir plusieurs points de lectures représentatifs des conditions environnementales.

$$q_{\text{bâtiment}} = \sum_{i=1}^7 \frac{A_i (T_{\text{extérieure}} - T_{\text{intérieure}})_i}{1000 R_{\text{équi.théorique } i}} \quad (2.11)$$

2.2.3 Gain d'énergie provenant des lumières

Afin de déterminer l'énergie apportée par les lumières ($Q_{\text{lumières}}$), le temps de marche ($t_{\text{ampoule } i}$) et l'intensité de chaque rangée de lumières ($I_{\text{rangée } i}$) ont été enregistrés en continu. Puisque l'efficacité (Eff) des lumières dépend largement de l'intensité de ces dernières, des tests furent effectués sur les lumières à l'aide d'un calorimètre afin d'être en mesure d'estimer l'efficacité des lumières selon leur intensité. Donc, une fonction estimant l'énergie transmise par les lumières en fonction de leur intensité, de leur puissance nominale ($P_{\text{ampoule } i}$) et de leur temps de marche fut développée (équation 2.12). Afin d'avoir une valeur moyenne de production de chaleur ($q_{\text{lumières}}$), l'énergie produite par les lumières est divisée par la période d'échantillonnage des données (équation 2.13).

$$Q_{\text{lumières}} = \sum_{i=1}^3 (1 - \text{Eff}(I_{\text{rangée } i})) * P_{\text{ampoule } i} * t_{\text{ampoule } i} * N \quad (2.12)$$

$$q_{\text{lumières}} = \frac{Q_{\text{lumières}}}{1000 * \tau} \quad (2.13)$$

2.2.4 Gain d'énergie provenant des moteurs

Puisque les deux vis à moulée des silos et les trois vis à moulée des soigneurs sont opérées par des moteurs électriques, il est nécessaire de tenir compte de leur apport en énergie puisque ceux-ci sont peu efficaces énergétiquement et ils libèrent une quantité non négligeable d'énergie. Basé sur la puissance nominale du moteur ($P_{\text{moteur } i}$),

l'efficacité (ϕ_i), et le temps de marche de chaque moteur ($t_{moteurs\ i}$), il est possible de déterminer l'énergie libérée par l'ensemble des moteurs ($Q_{moteurs}$) (équation 2.14). Ensuite, il est possible de calculer le taux de production de chaleur des moteurs ($q_{moteurs}$) en divisant l'énergie produite par la période d'échantillonnage des données (équation 2.15). De cette façon, une valeur moyenne de production de chaleur pour l'ensemble des moteurs durant la période d'échantillonnage est obtenue.

$$Q_{moteurs} = \sum_{i=1}^5 P_{moteur\ i} * t_{moteur\ i} * (1 - \Phi_i) \quad (2.14)$$

$$q_{moteurs} = \frac{Q_{moteurs}}{\tau} \quad (2.15)$$

2.2.5 Gain d'énergie et d'humidité provenant des éleveuses

Les éleveuses radiantent libèrent de l'énergie sensible et de l'humidité. Les huit éleveuses ont une capacité de 11,7 kW (40 000 BTU. Hr⁻¹) chacune. Afin de calculer l'énergie libérée par les éleveuses ($Q_{éleveuse}$) (équation 2.16), le temps de marche de chaque éleveuse ($t_{éleveuse\ i}$) est enregistré. Le taux de production de chaleur des éleveuses (θ_i) est donné par les spécifications du détaillant. Il est important de noter que la combustion du propane libère de l'eau à un taux de 0,39 g H₂O.s⁻¹ ou 0,03362 g H₂O.kJ⁻¹ d'énergie libérée par la combustion du propane (Xin et *al.*, 2001). Dans le cadre de cette expérience, l'humidité produite par les éleveuses ($PH_{éleveuse}$) est considérée dans le modèle mathématique. Cependant cette valeur est presque négligeable puisqu'elle représente moins de 1 % de l'humidité totale produite par les poulets (équations 2.18 et 2.19). En divisant l'énergie et l'humidité produites par les éleveuses par le temps d'échantillonnage, on obtient respectivement la production de chaleur ($q_{éleveuse}$) (équation 2.17) et d'humidité ($ph_{éleveuse}$) moyenne (équation 2.18).

$$Q_{éleveuses} = \sum_{i=1}^8 \theta_i t_{éleveuse\ i} \quad (2.16)$$

$$q_{éleveuses} = \frac{Q_{éleveuses}}{\tau} \quad (2.17)$$

$$ph_{\text{éleveuses}} = \frac{PH_{\text{éleveuses}}}{\tau} \quad (2.18)$$

$$PH_{\text{éleveuses}} = \sum_{i=1}^8 0.00039 t_{\text{éleveuse } i} \quad (2.19)$$

2.2.6 Perte d'humidité par le système de ventilation

La production de chaleur latente est calculée à partir d'une balance d'humidité. À partir de la température ambiante (T_a) et de l'humidité relative (H.R), il est possible de déterminer les propriétés psychrométriques de l'air entrant et évacué du système. Les calculs permettant de déterminer les propriétés psychrométriques de l'air sont expliqués dans la section 2.3. Ensuite, connaissant la température de l'air ambiant, le temps de marche et le débit de chaque ventilateur, il est possible de calculer l'humidité évacuée du système ($PH_{\text{ventilation}}$) (équation 2.20). Finalement, pour obtenir un taux de gain ou de perte d'humidité ($ph_{\text{ventilation}}$) pour l'ensemble du système de ventilation, il suffit de prendre l'humidité totale ajoutée ou évacuée du système et de la diviser par la période d'échantillonnage (équation 2.21).

$$PH_{\text{ventilation}} = \sum_{i=1}^{15} (u_{\text{extérieur}} - u_{\text{intérieur}})_i * V_i * \rho * t_{\text{ventilateur } i} \quad (2.20)$$

$$ph_{\text{ventilation}} = \frac{PH_{\text{ventilation}}}{\tau} \quad (2.21)$$

2.2.7 Gain d'humidité provenant des gicleurs

Le principal objectif des gicleurs est de diminuer la température du bulbe sec en injectant de fines gouttelettes d'eau dans la salle d'élevage. L'énergie contenue dans l'air évapore l'eau; l'air perd ainsi de l'énergie et la température ambiante est diminuée. En enregistrant le temps de marche des gicleurs ($t_{\text{gicleurs } i}$), il est possible de calculer la masse d'eau ajoutée (PH_{gicleurs}) au système (équation 2.22) et le taux moyen auquel cette masse d'eau est ajoutée (ph_{gicleurs}) (équation 2.23) en assumant que toute l'eau injectée

dans le système est évaporée. Selon les spécifications données par le détaillant, chaque gicleur a un débit de $1,51 \text{ kg H}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$.

$$PH_{gicleurs} = n * D * t_{gicleurs} \quad (2.22)$$

$$ph_{gicleurs} = \frac{PH_{gicleurs}}{\tau} \quad (2.23)$$

2.2.8 Gain d'humidité provenant de la litière

Dans le cadre de ce projet, l'humidité produite par les poulets inclut aussi l'humidité libérée par la litière lors du processus de décomposition, puisque cette humidité provient principalement des défécations des poulets.

2.3 Propriétés psychrométriques de l'air

Les calculs nécessaires pour effectuer la balance thermique et d'humidité requièrent que certaines propriétés physiques de l'air soient déterminées. Par hypothèse, nous supposons que la pression atmosphérique (P_{atm}) est toujours de $101\,325 \text{ Pa}$ lors des calculs des propriétés psychrométriques.

2.3.1 Pression de la vapeur d'eau à saturation (P_{sat})

Lorsqu'une masse d'air humide étant en équilibre avec son environnement contient le maximum d'humidité qu'elle peut potentiellement contenir, on dit que celle-ci est saturée d'eau. L'eau à l'intérieur de cette masse d'air exerce une pression et c'est cette pression qui est définie comme étant la pression de la vapeur d'eau à saturation. La pression de la vapeur d'eau à saturation est une fraction de la pression totale de l'air. De plus, elle est fonction de la température de l'air sec et de la pression atmosphérique. Alors, sachant la température intérieure et la température extérieure, il est possible de calculer les valeurs de P_{sat} pour l'air intérieur et extérieur. La pression de la vapeur d'eau à saturation est calculée de la façon suivante (Rite 2001; ASAE ,1987);

$$\text{Si } -100 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_a \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_{sat} = \exp\left(\frac{C_1}{T_a} + C_2 + C_3 (T_a) + C_4 (T_a)^2 + C_5 (T_a)^3 + C_6 (T_a)^4 + C_7 \ln(T_a)\right) \quad (2.24)$$

Si $0 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_a \leq 260 \text{ }^\circ\text{C}$

$$P_{sat} = \left(\frac{a + b(T_a + 273.15) + c(T_a + 273.15)^2 + d(T_a + 273.15)^3 + e(T_a + 273.15)^4}{f(T_a + 273.15) + g(T_a + 273.15)^2}\right) R \quad (2.25)$$

2.3.2 Pression actuelle de la vapeur d'eau (P_{act})

Si la masse d'air humide est en équilibre avec son environnement, mais que celle-ci n'est pas saturée d'eau, on fait alors référence à la pression actuelle de la vapeur d'eau. La pression actuelle de la vapeur d'eau est fonction de l'humidité relative et de la pression de la vapeur d'eau à saturation (ASAE STANDARDS, 1987).

$$P_{act} = P_{sat} HR \quad (2.26)$$

2.3.3 Rapport d'humidité (μ)

Le rapport d'humidité est le nombre de kilogrammes d'eau par kilogramme d'air sec. Il se calcule de la façon suivante (Rite, 2001) :

$$\mu = \frac{0,62198 P_{act}}{P_{atm} - P_{act}} \quad (2.27)$$

2.3.4 Énergie d'évaporation de l'eau à saturation (h_{fg})

L'énergie d'évaporation de l'eau à saturation est en fait l'énergie nécessaire, en kilojoule, pour évaporer un kilogramme d'eau à la température ambiante. Cette propriété de l'air humide est calculée de la façon suivante (ASAE STANDARDS, 1987) :

$$0^\circ\text{C} \leq T_a \leq 65^\circ\text{C}$$

$$h_{fg} = 2\,502\,535,259 - 2\,385,764\,24 T_a \quad (2.28)$$

2.3.5 Densité de l'air (ρ)

La densité de l'air ambiante est fonction de l'humidité relative, de la température ainsi que de la pression atmosphérique. Elle est calculée de la façon suivante (ASAE STANDARDS, 1987) :

$$-17,7^{\circ}C \leq T_a \leq 260^{\circ}C$$

$$\rho = \frac{P_{atm} - P_{act}}{287 T_a} \quad (2.29)$$

2.3.6 Enthalpie (H)

L'enthalpie de l'air humide peut se calculer de deux façons différentes, l'une développée par l'ASAE (équation 2.30) et l'autre par Rite (2001) (équation 2.31) :

Pour $0^{\circ}C < T_a < 100^{\circ}C$

$$H = \left(\frac{1006,9254 T_a + 4186,8 \mu T_{\phi} + 1875,6864 \mu (T_a - T_{\phi}) + \mu (2502535,259 - 2385,76424 T_a)}{1000} \right) \quad (2.30)$$

$$H = 1,006 (T_a) + \mu (2501 + 1,805 T_a) \quad (2.31)$$

CHAPITRE 3

CALCUL DE LA TEMPÉRATURE AMBIANTE TOTALE EFFECTIVE (EAT_t)

3.1 Introduction à la température ambiante totale effective

Une fois les données sur la production de chaleurs totale, latente et sensible obtenues par le biais de la modélisation, une régression multiple basée sur le modèle de Tzschentke et Nichelmann (2000) est effectuée en utilisant le logiciel *Statgraphics Plus 5.0*. À l'aide de ce nouveau modèle, il est alors possible de concevoir le nouvel indice de confort selon l'outil mathématique développé par Tzchentke et Nichelmann (2000). Cependant, comme il y a beaucoup de données à traiter et d'opérations mathématiques à effectuer, un programme en langage *Matlab* fut écrit afin d'accélérer le traitement des données. Dans leurs travaux, les auteurs ont appliqué le concept de température ambiante totale effective à des poules pondeuses, des dindes et des canards musqués.

Afin d'expliquer comment les auteurs calculent la valeur EAT_t , les données de Tzchentke et Nichelmann (2000) sont utilisées afin de mieux comprendre l'approche suggérée. Dans cet exemple, la température ambiante totale effective sera développée pour des dindes âgées entre 10 et 50 jours. Dans leur modèle, la production de chaleur est fonction de l'âge, de la température ambiante et de la vitesse de l'air. Les valeurs de ces variables sont situées respectivement entre 10 et 50 jours, 5 et 40 °C ainsi que 0,2 et 1,2 m.s⁻¹.

3.2 1^{ière} étape

La première étape consiste à développer une équation empirique par régression multiple. Donc, en utilisant la fonction *Non-linear Regression* dans le logiciel *Statgraphics Plus 5.0* et les données provenant de la balance thermique et d'humidité, il est possible d'obtenir une équation empirique qui fait la relation entre la chaleur totale (q_{totale}), l'âge

(A), la température ambiante (T_a) et la vitesse de l'air (v). La chaleur totale est la variable dépendante tandis que la température ambiante, l'humidité relative, la vitesse de l'air et l'âge sont des variables indépendantes. Dans le cadre de l'exemple, considérons l'équation empirique (équation 3.1) développée par Tzchentke et Nichelmann (2000).

$$q_{totale} = b_0 T_a^3 + b_1 T_a^2 + b_2 T_a + b_3 v + b_4 \log(v) + b_5 A + b_6 A^{-1} + b_7 T_a A^{-1} + b_8 T_a \log(v) + b_9 \quad (3.1)$$

Ensuite, à partir de cette équation, on construit le tableau IV dans lequel on calcule les nouvelles valeurs de la chaleur totale pour différentes températures, vitesses de l'air et âges.

Tableau IV

Chaleur totale (W) pour différents âges et conditions environnementales calculées à l'aide de l'équation 3.1

v (m.s ⁻¹)	T _a (°C)	Âge (jours)				
		10	20	30	40	50
0,2	5	19,26	14,76	12,93	11,76	10,86
	10	17,49	13,33	11,61	10,50	9,64
	15	15,63	11,82	10,21	9,16	8,33
	20	13,85	10,38	8,89	7,89	7,10
	25	12,31	9,18	7,81	6,87	6,10
	30	11,17	8,39	7,12	6,24	5,51
	35	10,59	8,15	7,00	6,18	5,48
	40	10,74	8,64	7,60	6,83	6,17
0,5	5	21,83	17,37	15,50	14,34	13,43
	10	19,78	15,63	13,91	12,80	11,93
	15	17,65	13,84	12,23	11,18	10,35
	20	15,59	12,13	10,63	9,64	8,84
	25	13,78	10,65	9,28	8,34	7,57
	30	12,37	9,58	8,32	7,44	6,71
	35	11,51	9,07	7,92	7,10	6,40
	40	11,38	9,28	8,25	7,48	6,82

Tableau IV (suite)

1,2	5	23,25	18,75	16,92	15,75	14,85
	10	20,93	16,78	15,06	13,95	13,08
	15	18,54	14,72	13,12	12,07	11,20
	20	16,22	12,75	11,26	10,26	9,46
	25	14,14	11,01	9,64	8,70	7,93
	30	12,46	9,68	8,42	7,53	6,80
	35	11,35	8,90	7,76	6,93	6,24
	40	10,95	8,85	7,82	7,05	6,39

(Tirée de Tzchentke et Nichelmann, 2000)

3.3 2^{ème} étape

Ensuite, pour chaque tranche d'âge et de vitesse de l'air, on trouve la température ambiante où la production de chaleur totale est minimale (valeurs en caractères gras dans le tableau IV). Il s'agit de la température thermoneutre (Thermoneutral Temperature, TNT). Le tableau V fait une synthèse de toutes les températures thermoneutres ainsi que la chaleur totale dans chaque cas (Q_{TNT}).

Tableau V

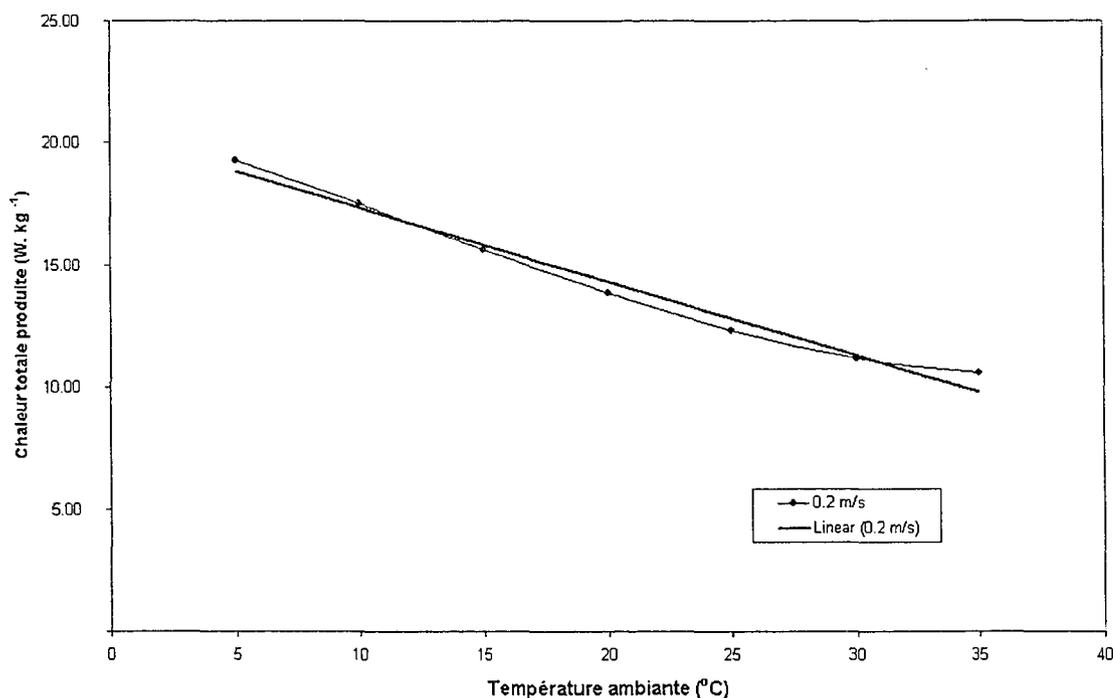
Température thermoneutre (°C) et chaleur totale (W) pour chaque groupe d'âge et vitesse de l'air

v m.s ⁻¹	0,2		0,5		1,2	
Âge jours	TNT °C	Q_{TNT} W	TNT °C	Q_{TNT} W	TNT °C	Q_{TNT} W
10	35	10,59	40	11,38	40	10,95
20	35	8,15	35	9,07	40	8,80
30	35	7,00	35	7,92	35	7,76
40	35	6,18	35	7,10	35	6,90
50	35	5,48	35	6,40	35	6,24

(Tirée de Tzchentke et Nichelmann, 2000)

3.4 3^{ème} étape

La troisième étape consiste à faire une régression linéaire de la forme $y = b.x + a$ en utilisant les valeurs de la chaleur totale pour toutes les températures ambiantes inférieures ou égales à la température thermoneutre. On effectue ces régressions linéaires afin d'obtenir les paramètres de la droite qui décrivent linéairement la production de chaleur totale pour toutes températures ambiantes égales ou inférieures à la température thermoneutre et ce pour chaque groupe d'âge et de vitesse de l'air. Le graphique 10 illustre un exemple de régression linéaire pour un âge de 10 jours et pour une vitesse de l'air de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$. Ce graphique a été développé à partir des données en italique dans le tableau IV. Le tableau VI fait un résumé des paramètres pour toutes les droites calculées; la pente (b), la constante (a) et le degré de linéarité (R^2).



$$R^2 = 0,9789$$

$$q_{\text{totale}} = -0,2998 T_a + 20,3243$$

Graphique 10 Régression linéaire pour une dinde âgée de 10 jours et une vitesse de l'air de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$
(Tirée de Tzchentke et Nichelmann, 2000)

Tableau VI

Paramètres des régressions linéaires pour chaque groupe d'âge et vitesse de l'air

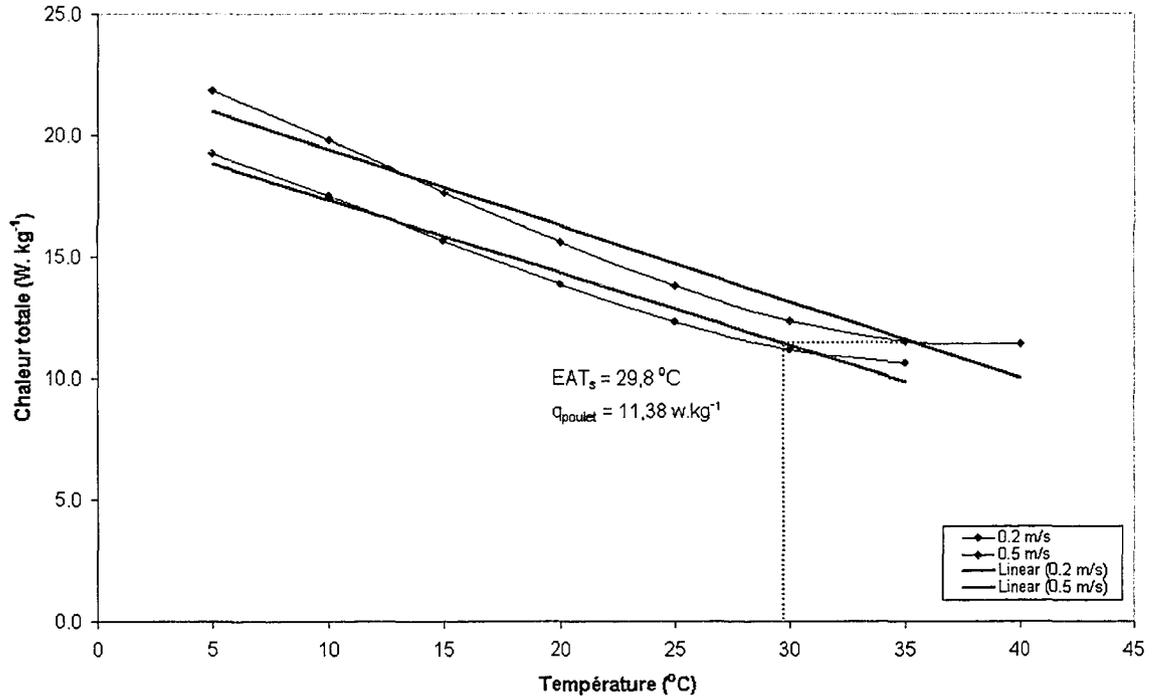
v m.s ⁻¹	Âge jours	a	b	R ²
0,2	10	20,3200	-0,2998	0,98
	20	15,4800	-0,2311	0,96
	30	13,5343	-0,2084	0,98
	40	12,3071	-0,1968	0,95
	50	11,3786	-0,1902	0,95
0,5	10	22,5657	-0,3146	0,96
	20	18,3343	-0,2864	0,98
	30	16,3800	-0,2634	0,97
	40	15,1600	-0,2520	0,97
	50	14,2200	-0,2451	0,97
1,2	10	24,2471	-0,3674	0,97
	20	19,4064	-0,2990	0,95
	30	18,0600	-0,3160	0,95
	40	16,8371	-0,3048	0,98
	50	15,8971	-0,2978	0,98

(Tirée de Tzchentke et Nichelmann, 2000)

3.5 4^{ème} étape

Ensuite, il est nécessaire de calculer le seuil de température effective (Effective Threshold Temperature, EAT_s). Premièrement, il faut trouver la quantité de chaleur produite (q_{poulet}) pour une température thermoneutre (TNT) et un certain âge (A), alors que la vitesse de l'air (v) est de 0,5 m.s⁻¹ ou 1,2 m.s⁻¹ (TABLEAU IV). Par exemple, la chaleur totale libérée par une dinde âgée de 10 jours alors que la vitesse de l'air est de 0,5 m.s⁻¹ et pour une température thermoneutre de 40°C, est de 11,38 W.kg⁻¹. Connaissant la valeur de production de chaleur alors que la vitesse de l'air est de 0,5 m.s⁻¹ et dans des conditions de thermoneutralité, on doit ensuite trouver la température pour laquelle la dinde libérera la même quantité de chaleur, alors que la

vitesse de l'air est de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$. Dans cet exemple, le seuil de température effective est $29,8 \text{ }^\circ\text{C}$.



Graphique 11 Seuil de température effective pour une dinde âgée de 10 jours et des vitesses de l'air de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ et $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ (Tirée de Tzchentke et Nichelmann, 2000)

Mathématiquement, ceci revient à trouver la valeur de EAT_s dans l'équation 3.2. Puisqu'on trouve la valeur de la température ambiante pour une vitesse de l'air de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ donnant la même quantité de chaleur totale alors que la vitesse de l'air est de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ et que la température est thermoneutre.

$$EAT_s = \frac{Q_{TNT} - a_{0,2}^A}{b_{0,2}^A} \quad (3.2)$$

Ainsi, en remplaçant par les valeurs appropriées dans la régression linéaire pour une vitesse de l'air de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ (Graphique 10), on obtient;

$$EATs = \frac{11,38-20,3243}{-0,2998} = 29,8^{\circ}C$$

Afin d'être en mesure de calculer l'augmentation de chaleur totale lorsque la vitesse de l'air est augmentée de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ ou même à $1,2 \text{ m.s}^{-1}$ pour une température autre que la température thermoneutre, les auteurs calculent le quotient des pentes selon l'équation 3.3. Le tableau VII présente toutes les valeurs de EATs et de C pour les vitesses de l'air de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ et $1,2 \text{ m.s}^{-1}$.

$$C = \frac{b_v^A}{b_{0,2}^A} \quad (3.3)$$

$$C = \frac{-0,3146}{-0,2998} = 1,05$$

Tableau VII

Valeur de EAT_s et de C pour des groupes d'âge et vitesse de l'air autre que le point de référence

v (m.s ⁻¹) Âge (jours)	0,5		1,2	
	EATs	c	EATs	C
10	29,8	1,05	31,3	1,23
20	27,7	1,24	28,9	1,29
30	26,9	1,26	27,7	1,52
40	26,5	1,28	27,5	1,55
50	26,2	1,29	27,0	1,57

(Tirée de Tzchentke et Nichelmann, 2000)

3.6 5^{ème} étape

Une fois les valeurs de EATs, TNT et C obtenues, il est possible de calculer avec l'équation 3.4 la valeur de la température ambiante totale effective (EAT_t) en fonction de

la température ambiante, et ce, pour différentes vitesses de l'air et groupe d'âge. Le tableau VIII fait un résumé des valeurs de EAT_t selon la température ambiante, l'âge et de la vitesse de l'air.

$$EAT_t = EAT_s - (TNT - T_a)C \quad (3.4)$$

Par exemple, si une dinde âgée de 20 jours est confrontée à une température de 5 °C et une vitesse de l'air de 0,5 m.s⁻¹, elle ressentira la même sensation thermique que si elle était confrontée à une température de -9,5 °C et une vitesse de l'air de 0,2 m.s⁻¹.

Tableau VIII

Valeur de EAT_t en fonction de la température ambiante, de l'âge et de la vitesse de l'air

v (m.s ⁻¹)	Âge (jours)	Température (°C)							
		5	10	15	20	25	30	35	40
0,5	10	-7,00	-1,70	3,60	8,80	14,40	19,30	24,60	29,80
	20	-9,50	3,30	2,90	9,10	15,30	21,50	27,70	33,90
	30	-10,90	4,60	1,70	8,00	14,30	20,60	26,90	33,20
	40	-11,90	-5,50	0,90	7,30	13,70	20,10	26,50	32,90
	50	-12,50	-6,10	0,40	6,80	13,30	19,80	26,20	32,60
1,2	10	-11,80	-5,60	0,60	6,70	12,80	19,00	25,20	31,30
	20	-16,40	-10,00	-3,60	2,90	9,40	15,80	22,20	28,70
	30	-17,90	-10,30	-2,70	4,90	12,50	20,10	27,70	35,30
	40	-18,90	-11,20	-3,50	4,20	11,90	19,60	27,30	35,00
	50	-20,10	-12,20	-4,40	3,40	11,30	19,20	27,00	34,80

(Tirée de Tzchentke et Nichelmann, 2000)

CHAPITRE 4

CONCEPTION DE L'EXPÉRIMENTATION

4.1 Description générale du bâtiment

L'acquisition des données s'est effectuée à St-Jean-de-Matha, dans la région de Joliette, dans un des bâtiments d'élevage du producteur avicole Yvon Landreville. Le bâtiment fut construit à l'automne 2003 et l'ensemble des équipements servant à l'élevage des poulets de chair est neuf. Le poulailler du producteur est équipé d'un système de contrôle environnemental *Momentum*, vendu et installé par *Excel Technologies*. Avec l'autorisation du producteur et l'expertise de l'équipe de chez *Excel Technologies*, il a été possible de recueillir des données dans le cadre de ce projet de recherche entre le 31 mars 2005 et le 5 mai 2005, avec l'aide du système de contrôle environnemental *Momentum*. Le lecteur est invité à consulter les photographies du site et des équipements de production pour mieux visualiser l'installation dans son ensemble (Annexe, photographies du site expérimental, photographies 1 et 2).

Ce poulailler, d'une longueur de 69,97 m (229' 7'') et d'une largeur de 11,27 m (37'), a été construit sur deux étages. Les hauteurs des murs du 1^{ier} et 2^{ième} étages sont respectivement de 2,45 m (8' ½'') et 2,235 m (7' 4''). La structure du poulailler est en acier, il n'y a donc pas de colonne en bois supportant le plafond et le plancher sur la surface d'élevage. Dans le cadre de ce projet, l'acquisition des données n'a été faite que sur le 2^{ième} étage, car l'instrumentation complète du poulailler aurait demandée un investissement fort considérable ainsi que des modifications majeures au bâtiment.

La résistance thermique équivalente théorique ($R_{\text{équi. théorique}}$) des trois murs extérieurs est de $4,70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$. Le mur donnant sur l'entrée a une résistance thermique équivalente théorique de $0,46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$. Quant au plafond et au plancher, ils ont respectivement

une résistance thermique équivalente théorique de $9,69 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ et de $0,68 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$. Les résistances thermiques équivalentes théoriques des périmètres extérieur et intérieur sont de $4,80 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ et $0,85 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ respectivement. Les périmètres extérieur et intérieur sont en fait des sections du bâtiment dans le bas des murs qui sont plus isolées, puisqu'il s'agit d'une feuille de contre-plaqué de 12,7 mm (1/2") ajoutée afin de renforcer les murs. De plus, par sa résistance thermique, la feuille de contre-plaqué diminue les échanges de chaleur au niveau des oiseaux. Le plan 1 (Annexe, plans du site expérimental) montre les différents matériaux utilisés pour les murs extérieurs, le plafond et le plancher. Le chapitre 6 explique en détail comment sont calculés les résistances équivalentes de chacune des surfaces du bâtiment.

Dans le bâtiment du producteur, les éleveuses, les ventilateurs, les vis à moulée, les soigneurs, les gicleurs, les lumières et les entrées d'air sont tous contrôlés par l'automate *Momentum*. En plus de contrôler tous ces équipements lorsqu'ils sont en mode automatique, le *Momentum* peut être utilisé pour faire de l'acquisition de données en enregistrant le temps de marche, la vitesse, le degré d'ouverture ou l'intensité de chacune des pièces d'équipements. Le *Momentum* est équipé de capteurs de température et d'humidité qui lui permettent de prendre des décisions afin de contrôler les conditions environnementales à l'intérieur de la salle d'élevage.

4.2 Système de contrôle et d'acquisition de données Momentum

Le système de contrôle et d'acquisition des données *Momentum* est constitué de quatre éléments. Tout d'abord, une armoire en acier de 0,91 m par 1,22 m et d'une profondeur de 0,32 m (Annexe, photographies du site expérimental, photographie 3) dans lequel on retrouve un automate programmable (*Modicon Momentum, 171 CCC 960 30, Schneider Electric, Paris, France*) alimenté par trois blocs d'alimentation (*170 CPS 111 00*) convertissant le $110 \text{ V}_{\text{ac}}$ en 24 V_{dc} . Trois adaptateurs de communication Interbus (*170 INT 110 00*) permettent à un module de 16 sorties digitales (*170 ADO 340 00*) et à deux modules de 32 sorties digitales (*170 ADO 350 00*) 0-24V chacun de communiquer

avec le processeur *Momentum*. Interbus est en fait un protocole de communication série développé par *Schneider Electric* permettant aux modules d'être connectés en série tout en communiquant avec le processeur. Un autre adaptateur de communication Interbus est utilisé afin d'assurer la communication entre un module de 16 entrées digitales (*170 ADI 340 00*) 0-24V, et le *Momentum*. Les entrées et les sorties analogiques sont assurées par deux cartes d'entrées analogiques (*XL 001 INP 11*, *Excel Technologies*, *Joliette Canada*), ayant 4 entrées analogiques 0-5V et 12 entrées analogiques dédiées aux sondes de température, ainsi qu'une carte de 4 sorties analogiques (*XL 001 OUT 11*) 0-5V. Un adaptateur de communication port série RS 485 (*172 JNN 210 32*) est connecté au *Momentum* afin d'assurer la communication entre les cartes analogiques et le *Momentum*.

Ensuite, pour permettre au producteur de configurer les paramètres du système tel que désirés, une interface basée sur un écran tactile LCD (*MMI-720*, *Kessler-Ellis Products*, *Eatontown, USA*) avec un protocole de communication série RS-232 est reliée à un pont Modbus Ethernet (*174 CEV 300 10*). Le pont Modbus Ethernet, qui permet de convertir le protocole de communication RS-232 en Ethernet, est connecté à un interrupteur Ethernet D-link 10/100 Mbs (*D-link DSS-5+*, *D-link*, *Fountain valley, USA*), qui est lui-même connecté au *Momentum*. L'ordinateur personnel du producteur est connecté à l'interrupteur D-link par un câble réseau installé sous terre. De cette façon, il est possible de changer la configuration des paramètres à l'intérieur du bâtiment de production à l'aide du logiciel *Agri-link* installé sur un PC, PIII 500 HZ dans le bureau du producteur, situé à plus de 50 mètres du bâtiment d'élevage.

Le deuxième élément du système est l'ensemble des modules de contrôle. Les modules de contrôle permettent au producteur de mettre les équipements contrôlés par le *Momentum* en modes arrêt, manuel ou automatique (Annexe, photographies du site expérimental, photographies 4 et 5). Lorsque les modules sont en mode automatique, l'automate active et désactive les équipements selon les consignes reçues. Le mode arrêt

est utilisé lorsque les équipements ne doivent pas fonctionner. Le mode manuel est utilisé lorsque le producteur souhaite mettre en marche ou mettre en arrêt un équipement sans avoir à utiliser l'automate.

Il y a différents types de module de contrôle. Il y a un module « tout ou rien » (on/off) pour les gicleurs (XL 601 TOR 02), trois pour les éleveuses (XL 001 TOR 01), trois pour les vis des soigneurs (XL 401 TOR 02), un pour les vis des silos (XL 501 TOR 02), et dix pour les ventilateurs 24 050F et 36 050 F (XL 201 TOR 02). Les trois groupes d'entrées d'air sont contrôlés par trois modules de contrôle (XL 101 TOR 01). Les cartes « tout ou rien » utilisent des relais (24 V_{cc}, 120 V_{ac}, 240 V_{ac}) pour activer ou désactiver les pièces d'équipement connectées au module de contrôle.

Il y a deux modules variables pour le contrôle de l'éclairage (XL 001 VAR 01) et cinq modules variables (XL 001 VAR 02) pour les ventilateurs 16 021F et 16 032F. Les cartes électroniques à l'intérieur des modules variables permettent de faire varier le voltage transmis aux lumières ou aux moteurs électriques des ventilateurs.

Le troisième élément du *Momentum* est constitué de l'ensemble des sondes de température et d'humidité permettant au *Momentum* d'observer tout changement au niveau des conditions d'élevage. Pour contrôler l'environnement de production au 2^{ème} étage, le *Momentum* utilise quatre capteurs de température et un capteur d'humidité relative (Annexe, photographies du site expérimental, photographie 8) à l'intérieur du bâtiment d'élevage, un capteur de température dans l'entrée d'air, ainsi qu'un capteur de température à l'extérieur du bâtiment. Par contre, pour procéder à l'acquisition des données, une balance automatisée (Annexe, photographies du site expérimental, photographie 6), onze capteurs de températures, six capteurs de pressions statiques (Annexe, photographies du site expérimental, photographie 7), deux capteurs de vitesse de l'air, un capteur d'humidité relative extérieur furent installés (Annexe, plans du site expérimental, plan 3), ainsi qu'une station météorologique (Annexe, photographies du

site expérimental, photographie 9). Tous les capteurs sont reliés à l'automate par un module de 16 entrées analogiques (170 AAI 140 00) de *Schneider Electric* ainsi qu'une carte XL 001 INP11.

Finalement, le dernier élément du système est le logiciel *Agri-link*. Ce logiciel développé par *Excel Technologie* permet de changer les consignes de température, d'humidité et de ventilation du système *Momentum* à partir d'un ordinateur. Le logiciel a été installé sur l'ordinateur personnel du producteur. Ensuite, afin d'archiver tous les paramètres sélectionnés, il a été nécessaire de créer un programme qui permet d'archiver les données à intervalle de plus ou moins 10 minutes. Afin de minimiser les déplacements sur le site de production, le transfert de données entre le serveur d'Excel Technologies et l'ordinateur du producteur s'effectue automatiquement de façon hebdomadaire, à l'aide d'un modem 56k. Une fois les données sur le serveur, elles sont classées de façon à faciliter le traitement. Ensuite, les données archivées sont emmagasinées sur le serveur de *Excel Technologies* et elles sont accessibles via *DynIP (DynIP for Home, CanWeb Internet Services Ltd., Sarnia, Canada)*.

4.3 Lobby

Le lobby est l'endroit où sont installés l'automate programmable *Momentum* ainsi que les nombreuses boîtes de contrôle (Annexe, photographies du site expérimental, photographie 5) servant à mettre en mode manuel ou automatique les différents équipements dans la chambre d'élevage. Le lobby permet de faire la transition entre l'accès à la chambre d'élevage et l'extérieur du bâtiment avicole afin de minimiser le stress chez les poulets durant l'élevage.

4.4 Chambre d'élevage

Sur chaque étage, la superficie disponible à l'élevage de poulet de grain est de 741,84 m², soit 11,27m (37') par 65,79m (215' 10'). La chambre d'élevage est de forme rectangulaire. Durant toute la durée de l'élevage, les poulets ne quittent jamais cet

endroit. Les conditions d'élevage à l'intérieur de cette salle sont entièrement contrôlées par le système de contrôle environnemental *Momentum*.

4.5 Conditions d'élevage

Tous les poussins sont des femelles Cobb x Cobb initialement âgées de 24 heures et d'un poids moyen de 50 grammes. Les oiseaux ont accès à la moulée et à l'eau *ad libitum* tout au long de l'élevage. Au début de l'élevage, des copeaux de bois sont étendus sur toute la surface du plancher d'élevage. L'épaisseur moyenne de la litière est d'environ 2,54 cm (1"). La moulée de départ est une ration spéciale à 17% de protéines (*starting ration*); il y a aussi durant l'élevage une ration de croissance et une ration de finition.

Initialement, la consigne de température est de 28,3 °C (83 °F) et la consigne d'humidité relative est de 50 %. Les oiseaux morts sont enlevés chaque jour et comptabilisés sur une feuille afin de garder un compte exact du nombre d'oiseaux en tout temps. Durant les quatre premiers jours de l'élevage, les trois rangées de lumières sont continuellement allumées à leur intensité maximum. Ensuite, un cycle lumineux diminuant graduellement les heures de clarté est programmé. Finalement, les consignes de conditions environnementales à l'intérieur du bâtiment sont gérées par Y. Landreville, un producteur avicole ayant plus de 20 ans d'expérience dans le domaine.

4.6 Équipement de contrôle

Tel que mentionné plus haut, l'acquisition des données est effectuée à l'aide du système de contrôle *Momentum*, du logiciel développé pour faire de l'acquisition de données pour ce projet et de l'ordinateur personnel du producteur. Toutes les pièces d'équipements détaillées dans les prochaines sections sont contrôlées par le *Momentum*. La stratégie de contrôle, élaborée par Excel Technologies et implantée à l'intérieur du *Momentum*, permet de contrôler l'environnement à l'intérieur du poulailler ainsi que toute autre pièce d'équipement nécessaire à l'élevage commercial du poulet de chair. L'écran tactile composé de menus et de sous-menus permet d'accéder aux différentes

fonctions offertes par le *Momentum*. À l'aide de cet écran, l'utilisateur peut y configurer tous les paramètres lui permettant de contrôler les conditions d'élevage à l'intérieur du bâtiment ainsi que tout l'équipement asservi par l'automate programmable.

L'emplacement exact de tout l'équipement de contrôle dans le bâtiment est illustré sur les plans 4, 5 et 6 en annexe (Annexe, plans du site expérimental). En ajoutant des capteurs additionnels, il a été nécessaire de leur attribuer des adresses dans l'automate afin d'être en mesure d'archiver les nouvelles données. Ainsi, après avoir effectué quelques modifications mineures dans l'algorithme du *Momentum*, il est désormais possible de faire l'acquisition de données en milieu de production commercial.

Il est important de noter que le logiciel d'archivage ne permet pas d'enregistrer des données à une fréquence constante, puisque l'archivage des données est la dernière priorité de l'automate. L'archivage est donc effectué seulement après que l'automate ait effectué ses routines de lecture et de contrôle. Cependant, le temps nécessaire pour effectuer les routines de contrôle dépend des corrections devant être apportées pour maintenir les conditions d'élevage. Pour remédier à ce problème le temps entre deux prises de données, soit la période d'échantillonnage, est enregistré.

L'énergie libérée par les différentes pièces d'équipement sera calculée selon leur temps de marche. Connaissant l'énergie produite par chaque pièce d'équipement et la période d'échantillonnage, il est possible de calculer le taux de production de chaleur pendant la période d'échantillonnage. Ainsi, pour déterminer la production de chaleur totale des poulets de chair, l'énergie totale libérée en kilojoule par les poulets est tout d'abord calculée. Ensuite, sachant le temps qui s'est écoulé entre deux acquisitions de données, il est possible de calculer le taux moyen avec lequel la chaleur est dissipée en kilowatts.

4.6.1 Unités de chauffage au propane

Lorsque la température ambiante se situe en-dessous de la consigne choisie par le producteur, les éleveuses (unités de chauffage) sont activées par l'automate programmable. Les huit éleveuses sont divisées en trois groupes, chacun des groupes est contrôlé par un module tout ou rien. Les trois modules de contrôle dédiés au chauffage sont situés dans le lobby et permettent d'activer les éleveuses en modes automatique, arrêt ou manuel. Chaque module est connecté à une sortie digitales (0-24V). Lorsque le module de contrôle est en mode automatique, l'automate programmable active et désactive le relais selon si l'éleveuse doit être activée ou non.

Le plan 6 (Annexe, plans du site expérimental) montre l'emplacement des huit éleveuses radiantes au propane (Annexe, photographies du site expérimental, photographie 10) d'une capacité de 11,7 kW (40 000 BTU/heure) chacune. Les éleveuses sont situées à une distance de 3,68 m des entrées d'air. Les éleveuses sont des *Shen Glow High Efficiency* fabriquées par *Shenandoah (Shen Glow High Efficiency, Shenandoah, Anderson, USA)*. Les temps de marche de chacun des groupes d'éleveuses sont enregistrés par l'automate *Momentum*.

4.6.2 Lumières

Afin d'assurer un éclairage uniforme sur tout l'étage, trois rangées de 21 ampoules sont fixées au plafond. Ces ampoules incandescentes espacées de 3,0 m (10') en moyenne, ont une puissance de 100 watts et une efficacité variant entre 10% et 31% selon leur intensité. L'efficacité des lumières, à différentes intensités, fut déterminée dans les locaux d'*Excel Technologies* en utilisant un calorimètre. En mode automatique, les rangées à l'extrême gauche et à l'extrême droite sont contrôlées par l'automate et dans ce cas, il y a 10 ampoules sur 21 qui sont fonctionnelles par rangée. Durant les premiers jours de l'élevage, les vingt et une lumières des trois rangées sont allumées en tout temps. Il n'est donc pas nécessaire d'enregistrer leur temps de marche. Par la suite, les deux rangées de lumières contrôlées par le *Momentum* sont activées selon des cycles

lumineux préprogrammés par le producteur. Chacun des deux modules variables contrôlant l'intensité des deux rangées de lumières est connecté à une sortie analogique (0-5V) du *Momentum*. Le temps de marche et l'intensité de chaque rangée de lumière sont enregistrés par le *Momentum*

4.6.3 Eau

Afin de minimiser les pertes et les dégâts d'eau, trois lignes d'eau ayant 311 tétines chacune assurent les besoins en eau des poulets. Des régulateurs de pression sur chaque ligne maintiennent la pression à l'intérieur de la ligne d'eau entre 1,379 kPa (0.2 psi) et 3,448 kPa (0.5 psi). La consommation quotidienne d'eau en litres est enregistrée par le *Momentum*. Le plan 5 (Annexe, plans du site expérimental) montre l'emplacement des lignes d'eau à l'intérieur du bâtiment.

4.6.4 Moulée

La moulée est fournie par deux vis sans fin opérées par un moteur électrique de 1 hp chacune. Ces vis amènent la moulée du silo à l'extérieur du bâtiment jusqu'aux trois lignes de soigneurs. Afin que les 83 cloches à moulée le long de chaque ligne soient approvisionnés uniformément, une autre vis sans fin (soigneur) opérée par un moteur de 1/3 hp distribue la moulée entre les cloches. Les spécifications des moteurs sont jointes en annexe (Spécification des moteurs électriques). L'apport de moulée est contrôlé par un capteur de proximité capacitif, qui active les vis à l'intérieur et à l'extérieur aussitôt que le niveau de moulée dans le réservoir ou dans la ligne de soigneurs est sous le niveau permis par le producteur. Ce mécanisme assure que les poulets ne manquent jamais de nourriture. Les vis à moulée et les soigneurs sont connectés au *Momentum* via des modules de sorties numériques (0-24V). Les temps de marches des soigneurs et des vis à moulée sont enregistrés par le *Momentum*. Le plan 5 montre l'emplacement des soigneurs à l'intérieur du bâtiment (Annexe, plans du site expérimental).

4.6.5 Ventilateurs

La ventilation est assurée par un total de 15 ventilateurs installés tel que montré sur le plan 4 (Annexe, plans du site expérimental). Tous les ventilateurs ont été assemblés par *Les Équipements Modernes*. Ces ventilateurs de modèle *Vista* sont opérés par des moteurs FHP 1/4, 1/3 ou 1/2 de Leeson (*Leeson Canada, Mississauga, Canada*). Les ventilateurs 16 021F et 16 032F à vitesse variable ont un diamètre de 38,4 cm (16’’). La vitesse de ces ventilateurs est contrôlée par le *Momentum* via les cartes de sorties analogiques. Pour chaque ventilateur, un module de contrôle permet de mettre le ventilateur en modes automatique, manuel ou arrêt. Étant donné que les trois ventilateurs 16 021F (Annexe, photographies du site expérimental, photographie 11) et les deux ventilateurs 16 032F sont à vitesse variable, leurs modules de contrôle sont équipés d’un potentiomètre qui permet d’ajuster manuellement la vitesse du ventilateur. Les modules de contrôle des ventilateurs à vitesse variable sont connectés aux sorties analogiques de l’automate (0-5V). De plus, des thermostats de secours sont branchés aux ventilateurs variables afin d’assurer un minimum de ventilation en cas de défaillance du système *Momentum*.

Les six ventilateurs 24 050F et les quatre ventilateurs 36 050F ont respectivement des diamètres de 61,0 cm (24’’) et 91,4 cm (36’’). Ces ventilateurs sont connectés à des modules de contrôle tout ou rien, qui sont à leur tour connectés au *Momentum* via les sorties digitales, puisque ces ventilateurs peuvent être en état de marche ou d’arrêt.

Le temps de marche de chaque ventilateur est enregistré ainsi que leur vitesse en pourcentage, dans le cas des ventilateurs variables.

4.6.6 Entrées d’air

Afin de contrôler les débits d’air entrant, des panneaux en polyuréthane et en plastique sont activés par des treuils électriques et des systèmes de poulies (Annexe, photographies du site expérimental, photographie 12). Ce mécanisme permet de faire

varier l'ouverture intérieure de l'entrée d'air dans le but d'augmenter ou de diminuer la vitesse de l'air entrant. Les plans 2, 4 et 6 (Annexe, plans du site expérimental) montrent les dimensions des entrées d'air et les emplacements des treuils électriques. Dans le bâtiment du producteur, il y a 10 entrées d'air, cependant ces entrées ne sont pas toutes opérées indépendamment par le *Momentum*. En partant du mur Est, les trois premières entrées d'air sont opérées par le même treuil électrique. Un deuxième treuil électrique commande les entrées d'air 4, 5, 6 et 7. Finalement, un troisième treuil contrôle les entrées d'air 8, 9 et 10. Les entrées d'air ont une ouverture maximale de 25,4 cm (10''). Chaque groupe d'entrées d'air est contrôlé par une sortie digitales (0-24V) du *Momentum*. C'est par le biais des entrées analogiques que le *Momentum* vérifie si les entrées d'air ont atteint le degré d'ouverture demandé. Finalement, l'ouverture de chaque groupe d'entrées d'air est enregistrée ainsi que le temps de marche de chaque treuil électrique.

4.6.7 Gicleurs

Lors des chaudes journées d'été, les brumisateurs sont activés afin de réduire la température ambiante sur le plancher d'élevage. Le brumisateur est une ligne d'eau, ayant 51 gicleurs au total, fixés au plafond à 0,9 m (3') des entrées d'air. Chaque gicleur a un débit de 4,53 L.hre⁻¹ (1,2GalUS.hre⁻¹). La pression au début de la ligne d'eau est de 6895 kPa (1000 psi). Le module de contrôle des gicleurs est connecté à une sortie numérique (0-24V) de l'automate. En enregistrant le temps de marche des gicleurs, il est possible de calculer combien de kilogrammes d'eau sont ajoutés dans l'air. L'emplacement des gicleurs est montré sur le plan 5 (Annexe, plans du site expérimental).

4.7 Instrumentation

Puisque le système de contrôle environnemental *Momentum* installé chez le producteur a été installé lors de la construction du bâtiment, il y a déjà, au 2^{ième} étage, quatre sondes de température dans la salle d'élevage, une sonde de température extérieure, une sonde

de température dans l'entrée d'air et une sonde d'humidité intérieure. Pour effectuer une balance thermique, il a été nécessaire d'installer des capteurs supplémentaires afin de récolter les données nécessaires (Annexe, plans du site expérimental, plan 3). Tous les fils de communication reliant les capteurs installés dans le bâtiment du producteur aux modules d'entrées analogiques et aux cartes d'entrées analogiques sont passés dans du tuyau de PVC afin de les protéger de l'environnement corrosif et humide. De plus, afin de minimiser les risques d'interférence, les câbles de puissance et les fils de communication sont passés dans différents tuyaux. À chaque point stratégique où un capteur doit être installé, une boîte de jonction fut installée (Annexe, photographies du site expérimental, photographie 7). Tout le filage utilisé pour connecter les capteurs est du fil à quatre brins de grosseur 22, torsadé et avec gaine en paire.

4.7.1 Capteurs de température

Initialement, il y avait quatre capteurs de température permettant au *Momentum* de contrôler l'environnement. Afin d'être en mesure d'effectuer une balance thermique, neuf autres capteurs de température furent ajoutés dans la section du bâtiment réservée à l'élevage. Les capteurs de température utilisent la puce électronique DS18B20 de chez Dallas Instrument (*DS18B20, Maxim/Dallas Semiconductor, Sunnyvale, USA*). Ce thermomètre numérique a une précision de $\pm 0,5$ °C entre -10 et 85 °C. Au total, il y a 13 capteurs de température servant à l'acquisition des données. Les neuf autres capteurs furent installés dans le bâtiment tel que montré au plan 3 (Annexe, plans du site expérimental). À chaque point stratégique, il y a une boîte de jonction d'où sortent trois capteurs de température. De façon à enregistrer le gradient de température en hauteur et sur le long du bâtiment, les capteurs sont installés à trois hauteurs différentes à chaque boîte de jonction. À chaque point stratégique, il y a un capteur à 30,5 cm (12'') du plancher, un à 71,1 cm (28'') du plafond et un directement sur le plafond. Finalement, trois autres capteurs furent installés à l'extérieur du bâtiment, dans le grenier et dans le lobby. L'ajout de ces 12 capteurs additionnels permet de déterminer le gradient de

température entre les murs, le plafond, le plancher, le 1er étage et l'extérieur. L'ajout de ces capteurs a nécessité l'installation d'une carte d'entrée analogique (XL 001 INP 11).

4.7.2 Capteurs d'humidité relative

Les capteurs d'humidité utilisés proviennent de chez *JLC International, New Britain, USA*. Le capteur d'humidité intérieur est le modèle *EE20 F2A22 (0-5V)*. Une sonde d'humidité additionnelle (*EE20 F3A22, 0-10V*) fut installée à l'extérieur du bâtiment. Afin de protéger la sonde d'humidité extérieure contre les intempéries, le circuit électronique fut installé dans un boîtier de plastique certifié NEMA résistant aux infiltrations d'eau et à la poussière. De plus, du silicone fut ajouté par précaution. Ces capteurs permettront aussi de calculer les propriétés psychrométriques de l'air ambiant. Ce type de capteur a une précision de $\pm 2 \%$ et il est fonctionnel dans un environnement où l'humidité varie entre 0 et 100 %.

4.7.3 Capteurs de vitesse de l'air

Afin de mesurer la vitesse de l'air au niveau des oiseaux, deux capteurs de vitesse d'air furent installés tel que montré sur le plan 3 (Annexe, plans du site expérimental). Ce sont des capteurs de vitesse d'air omnidirectionnels (*AVS-11-24D-0-P-2-2-9-1, 0-10V*) qui proviennent de chez *Accusense, Cambridge Instrument, Shirley, USA*. Ces capteurs peuvent lire des vitesses de l'air allant jusqu'à 5 m.s^{-1} avec une précision $\pm 0,25 \text{ m.s}^{-1}$ pour une température entre $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Chaque capteur est directement relié à l'automate via une entrée analogique.

4.7.4 Capteurs de pression statique

Six capteurs de pression statique furent installés pour mesurer la pression statique créée par les ventilateurs variables. Deux de ces capteurs proviennent de chez *Modus, Northboro, USA (T10-0102B)* et peuvent mesurer une différence de pression statique variant entre $-248,8 \text{ Pa}$ et $+248,8 \text{ Pa}$ ($-1,0$ et $+1,0$ pouce d'eau) avec une précision de $\pm 1\%$. Les quatre autres capteurs proviennent de chez *AutoTran inc, Eden Prairie, USA*

(4 capteurs du modèle 860D-00 et 1 capteur du modèle 860D-30). Ces capteurs ayant une sortie de 1-5V (Annexe, photographies du site expérimental, photographie 7) ou de 4-20ma peuvent mesurer une différence de pression statique variant entre 0,0 Pa et 497,6 Pa (0,0 et 2,0 pouces d'eau), avec une précision de $\pm 1\%$. Les capteurs ont été installés dans des boîtes de plastique hermétiques les protégeant de l'eau et de la poussière. Ces capteurs de pression statique sont connectés à des entrées analogiques et ils sont utilisés dans le but de calculer le débit de ventilation ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) de chaque ventilateur. De plus, ils permettent de mesurer les variations de pression statique le long du bâtiment.

4.7.5 Balance

Dans le cadre de ce projet, une balance automatisée a été développée afin de mesurer en continue l'évolution du poids des poulets tout au long de l'élevage. La balance (plans du site expérimental, plan 8) utilise une cellule de charge (*STL-50, AmCells, Carlsbad, USA*). Pour mesurer le poids moyen des poulets, un algorithme a dû être développé afin de filtrer les erreurs de lecture et obtenir des valeurs de poids moyen qui suivent l'évolution des poids tels qu'indiqué par les chartes de croissance publié par la CO-OP. La balance transmet une sortie 0-10V à l'automate. Cette balance a une capacité de 17,3 kg (38 lbs) et une précision de $\pm 0,005$ kg. La balance est située au milieu de la surface d'élevage tel que montré sur le plan 3 (Annexe, plans du site expérimental). Le poids moyen est enregistré quotidiennement par le *Momentum*.

4.7.6 Station météorologique

La direction et la vitesse du vent extérieur sont enregistrées par une station météorologique de *AAG Electronica, Laredo, USA* (TAI8515 1-Wire Weather Instrument Kit V3.0). La station météorologique (Annexe, photographies du site expérimental, photographie 9) fut installée sur le toit du bureau du producteur à plus de 9,1 m (30') du sol et à une distance d'environ 50 m (164') du site expérimental. Puisqu'une partie importante de ce projet consiste à quantifier l'impact de la vitesse de

l'air au plancher sur la production de chaleur totale du poulet de grain et que lors de leurs travaux, Wheeler, et *al.* (2003) ont mentionné que le vent extérieur influence la distribution d'air, l'utilisation d'une station météo pourra certainement aider à expliquer certains phénomènes lors de l'analyse des données. La station météorologique est connectée à l'ordinateur personnel du producteur par le port série. Le logiciel Weather 3.3 est installé sur ce même ordinateur et permet d'enregistrer la vitesse et la direction du vent à toutes les minutes.

CHAPITRE 5

ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DE L'ISOLATION D'UN BÂTIMENT AVICOLE

Dans le modèle mathématique présenté dans le chapitre 2, les pertes thermiques du bâtiment sont considérées. Cependant, pour évaluer les pertes thermiques du bâtiment en continu, il est nécessaire de connaître les différents matériaux utilisés pour la structure ainsi que pour l'isolation du bâtiment.

5.1 Transfert de chaleur par conduction

Théoriquement, pour évaluer les pertes thermiques du bâtiment, il est nécessaire de considérer chacune des surfaces où il est possible d'avoir un gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur de la salle d'élevage. Dans notre cas, les surfaces qui nous intéressent sont le plafond, le plancher, la porte, le mur intérieur donnant sur le vestibule ainsi que les portes et les murs donnant sur l'extérieur. Pour chacune des surfaces, il est assumé que le transfert de chaleur est en régime permanent tout au long de chacune des périodes d'échantillonnage et qu'il ne se fait que dans une direction, soit de l'intérieur vers l'extérieur, puisqu'il fait toujours plus chaud à l'intérieur qu'à l'extérieur du bâtiment (Figure 7).

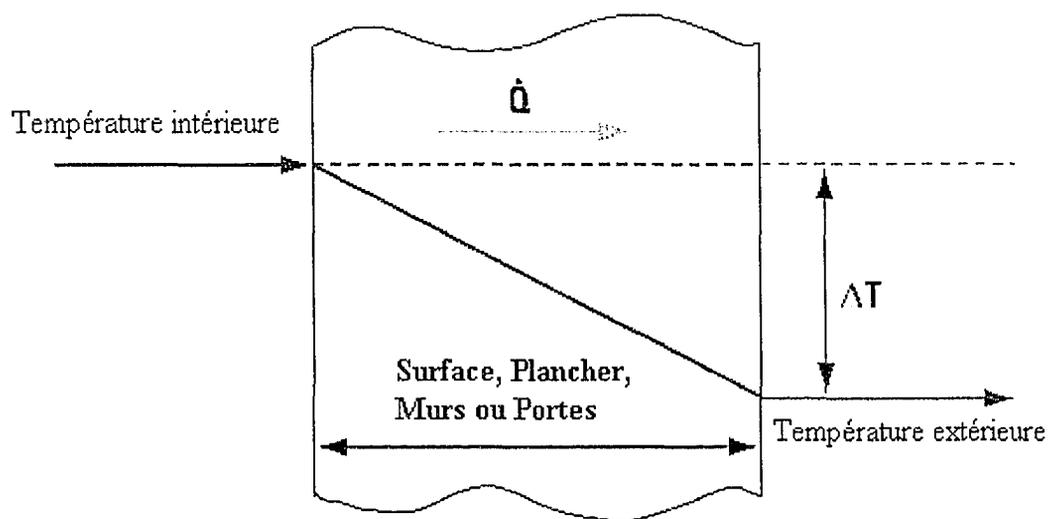


Figure 7 Transfert de chaleur par conduction
(Adapté de http://www.spiraxsarco.com/learn/default.asp?redirect=html/2_5_01.htm)

Pour calculer le transfert de chaleur en régime permanent au travers d'une surface solide, on utilise la loi de conduction de Fourier.

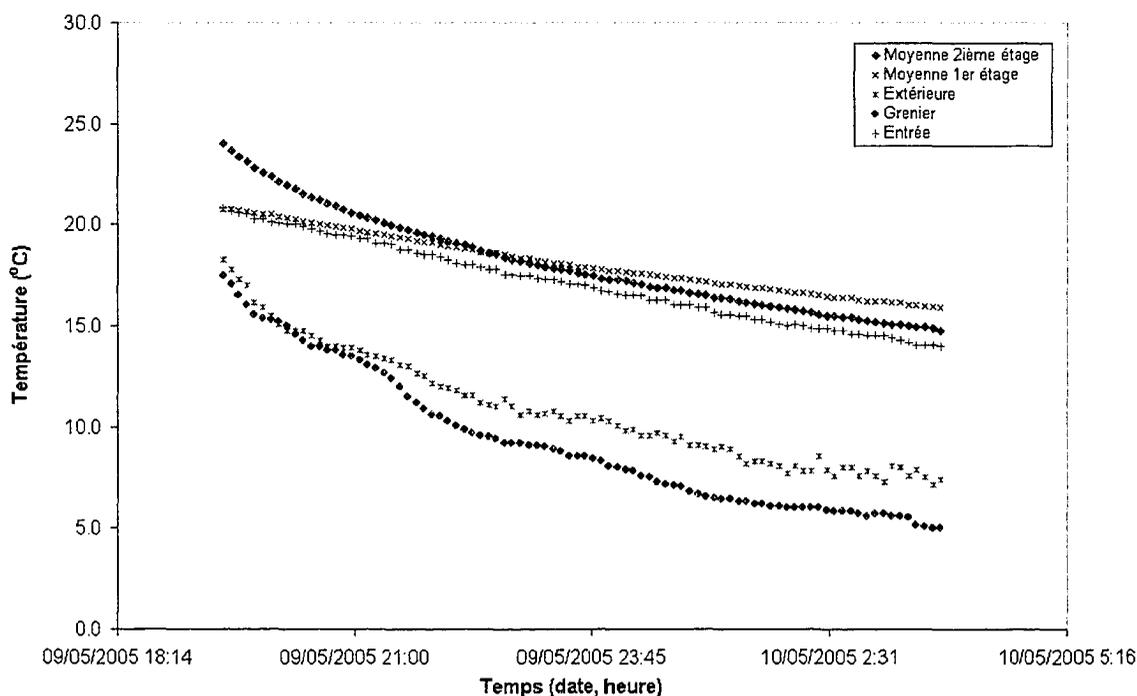
$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} = -A \frac{(T_2 - T_1)}{R} \quad (5.1)$$

La résistance thermique équivalente des surfaces est calculée théoriquement ($R_{\text{équi. théorique}}$) selon la méthode expliquée dans Roll (2000). Cependant, afin d'obtenir la résistance thermique équivalente des surfaces, il faut connaître la résistance thermique de chacun des matériaux composant ces surfaces. Dans ce projet, les valeurs théoriques des résistances thermiques des différents matériaux utilisés pour la structure et l'isolation du bâtiment proviennent de Howell et al. (2001), Ramsey (2000), Vitonne (1996), Midwest Plan Service Structures and Environment Handbook (1983) et Stamper et Koral (1979). La valeur théorique de la résistance thermique de chacun des matériaux est présentée en annexe (Résistances thermiques théoriques des matériaux).

Cependant, ces valeurs de résistances thermiques sont purement théoriques, et afin de vérifier si ces valeurs sont exactes, une méthode a été développée afin de vérifier leur représentativité.

5.2 Démarche expérimentale

Pour évaluer les pertes thermiques du bâtiment au 2^e étage, la salle d'élevage est préchauffée à l'aide des unités de chauffage au propane jusqu'à une température prédéfinie. Une fois cette température atteinte, le système de chauffage est mis en arrêt. Le système d'acquisition de donnée se charge alors d'enregistrer toutes les valeurs mesurées par les différentes sondes de température (Graphique 12) ainsi que l'humidité relative intérieure.



Graphique 12 Températures extérieures et intérieures lorsque le système de chauffage est en arrêt
(Données du 9 et 10 mai 2005)

Dans le cadre de cette expérience, l'hypothèse suivante est posée : toute l'énergie contenue dans l'air à l'intérieur du bâtiment d'élevage est évacuée soit par infiltration ou par la structure du bâtiment (équation 5.2).

$$E_{air_{T_2}} - E_{air_{T_1}} = q_{bâtiment} \quad (5.2)$$

Donc, en mesurant la température moyenne et l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment, il est possible de calculer l'enthalpie de l'air (H). De plus, connaissant la densité (ρ), le volume d'air (V) ainsi que l'enthalpie de l'air, nous pouvons en déduire l'énergie totale contenue dans le volume de l'air (E) à l'intérieur de la salle d'élevage. Tel que mentionné, cette perte d'énergie dans le temps est attribuable aux infiltrations d'air et aux pertes thermiques du bâtiment ($q_{bâtiment}$). Donc, si la variation du contenu en énergie du volume d'air dans le temps n'est pas égale à la perte d'énergie, calculée théoriquement à partir des valeurs de résistances thermiques publiées dans différents ouvrages de référence, alors il faut réajuster les différentes valeurs de résistances thermiques équivalentes ($R_{équi. ajustées}$) de façon à ce que la variation du contenu en énergie de l'air et la perte d'énergie par le bâtiment soient égales (équation 5.3).

$$\rho * V * (H_2 - H_1) = \sum_{i=1}^{10} \frac{A_i * (T_{int.} - T_{ext. i})}{R_{équivalent i}} \quad (5.3)$$

Pour procéder à cette expérience, il est impératif qu'aucun animal ne soit présent à l'intérieur de la salle d'élevage et que la salle d'élevage soit nettoyée auparavant, car la litière est une source considérable de chaleur qui est difficilement quantifiable. De plus, il est important de s'assurer que personne n'entre dans la salle d'élevage lors de l'expérience, car l'ouverture d'une porte ou l'activation d'une pièce d'équipement pourrait fausser les résultats. Puisque le projet s'effectue seulement sur le 2^e étage, ce test fut conduit seulement au 2^e étage du bâtiment avicole. De plus, afin de s'assurer que

la température et l'humidité relative à l'intérieur de la salle d'élevage soient homogènes, trois brasseurs d'air de 19'' sont utilisés afin d'uniformiser les conditions ambiantes. Ensuite, avant de commencer l'expérience, on doit s'assurer que les points énumérés ci-après ont été vérifiés.

5.2.1 1^{er} étage

- a. mettre les sondes de température directement sur le plafond;
- b. mettre toutes les pièces d'équipement en arrêt (chauffage y compris);
- c. mettre en mode manuel tous les ventilateurs variables à une vitesse de 60% afin que la température au premier étage soit uniforme;
- d. fermer toutes les entrées d'air et les portes.

5.2.2 2^{ème} étage

- a. fermer toutes les entrées d'air et les portes;
- b. mettre tous les équipements en arrêt et le chauffage en automatique;
- c. ajuster les sondes de température situées au point A, B et C du plan 3 (Annexe, plans du site expérimental), à 10'' du plancher (plancher), à 28'' du plafond (milieu) et directement sur le plafond (plafond);
- d. installer les 3 brasseurs d'air aux extrémités et au centre du bâtiment pour assurer que la température est uniforme dans toute la salle d'élevage;
- e. s'assurer que chacune des unités de chauffage au propane est fonctionnelle;
- f. vérifier que les capteurs d'humidité relative intérieure et extérieure sont fonctionnels.

5.2.3 Système d'acquisition de données

- a. s'assurer que le système d'acquisition de données et la station météo sont fonctionnels;
- b. mettre le temps d'échantillonnage du système d'acquisition de données à 5 minutes;

- c. noter les conditions météorologiques actuelles (jour, nuit, soleil, présence de nuages, etc.).

5.2.4 Gestion du système de chauffage

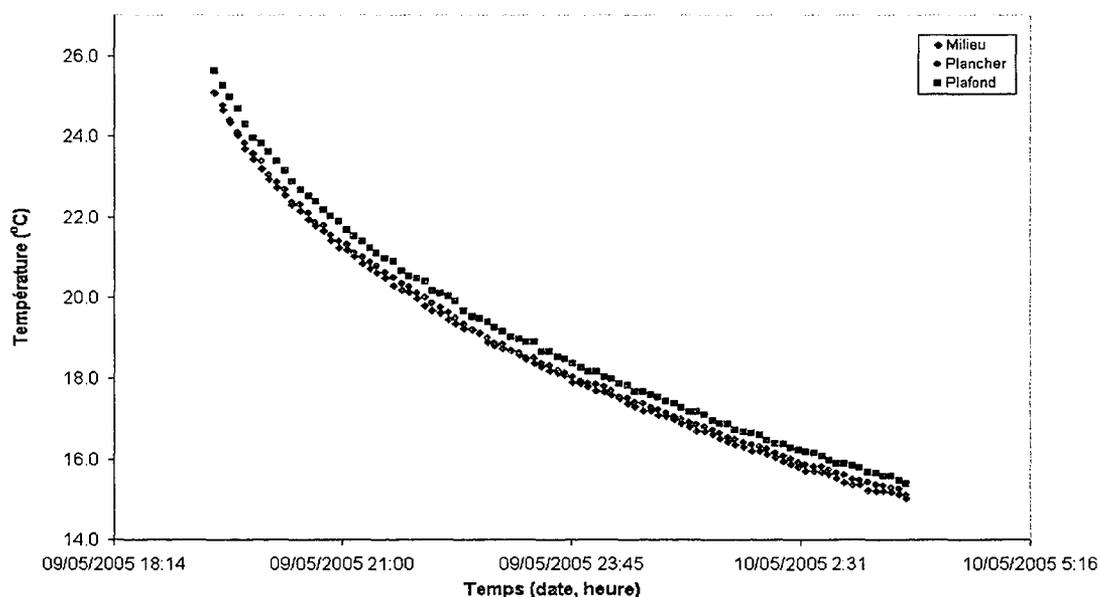
- a. noter la température moyenne à l'intérieur du bâtiment;
- b. ajuster la consigne de température 5,6 °C (10°F) en deça de la température moyenne à l'intérieur du bâtiment;
- c. une fois que la température moyenne a atteint la consigne, attendre 15 minutes avant de mettre en arrêt le chauffage;
- d. mettre le système de chauffage en mode « Arrêt »;
- e. éteindre les unités de chauffage complètement (enlever le pilote);
- f. observer les conditions météorologiques (nuages, soleil, vent);
- g. une fois que la température ambiante s'est stabilisée avec les conditions climatiques extérieures, on recommence à l'étape a.

5.3 Discussion et interprétations des résultats

Lors de l'analyse des données, celles archivées durant les trente premières minutes ne sont pas analysées, car les unités de chauffage continuent à libérer de la chaleur par radiation même si elles ne sont plus en marche. De plus, le bâtiment a la capacité d'emmagasinier la chaleur et de retarder le transfert de chaleur (ASHRAE, 2003). Donc, bien que les unités de chauffage soient éteintes, il est possible d'observer une augmentation de la température, car les parois du bâtiment peuvent tout de même libérer de la chaleur.

Le graphique 13 semble indiquer que la température au plafond est supérieure à la température du plancher et à la température à la mi-hauteur. En effectuant une simple analyse statistique sur les données, on remarque que la différence moyenne entre la température du plafond et la température ambiante moyenne au 2^{ième} étage est de 0,4 °C. De plus, les différences moyennes de température entre le plafond et la mi-hauteur ainsi

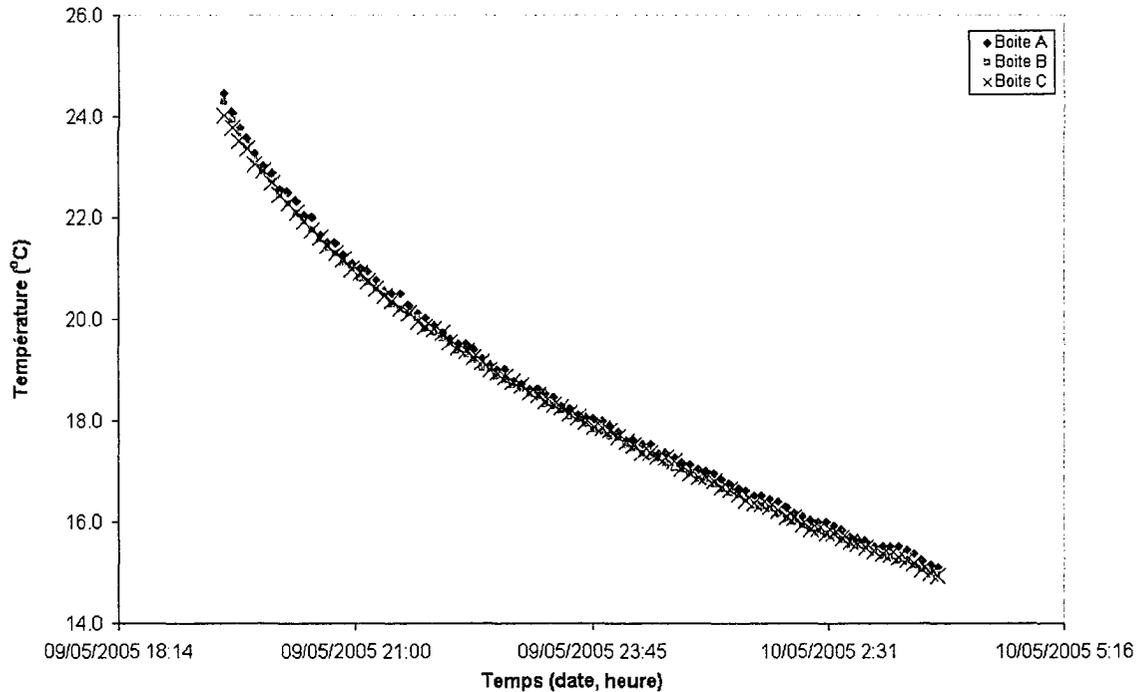
que le plafond et le plancher sont respectivement de $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ces différences sont inférieures à la précision des capteurs, donc on peut affirmer qu'il n'y a statistiquement aucune différence entre la température du plafond et à la mi-hauteur, du plafond et du plancher ainsi que du plafond et de la température moyenne au 2^{ième} étage, ou du moins que cette différence est négligeable. Il est intéressant de noter que les différences maximales entre la température du plafond et la température moyenne du 2^{ième} étage, la température à la mi-hauteur et la température du plancher sont respectivement de $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ces valeurs maximales nous font constater qu'il y a bel et bien eu un gradient de température entre le plafond et le plancher au cours de l'expérience. Par contre, ces valeurs maximales ont été enregistrées dans l'heure suivant le début de l'expérience. Donc, si l'expérience doit être répétée, il est fortement suggéré d'attendre une heure au lieu de trente minutes afin de s'assurer que les températures soient homogènes sur toute la surface d'élevage.



Graphique 13 Variations de températures en hauteur
(Données du 9 et 10 mai 2005)

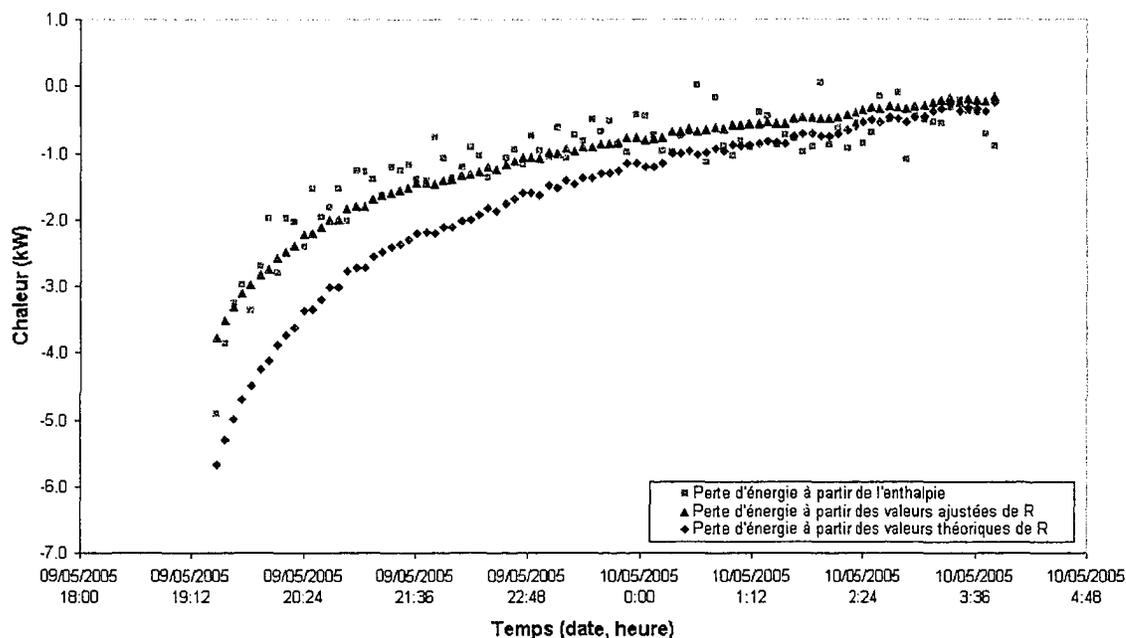
On observe au graphique 14 qu'il y a très peu de différence entre les températures moyennes enregistrées aux endroits A, B et C. Après analyse, les différences moyennes

entre les températures des boîtes A, B et C et la température ambiante moyenne du 2^{ème} étage sont respectivement de 0,1 °C, 0,2 °C et 0,1 °C. Donc, on peut affirmer que la température est uniforme sur toute la longueur du bâtiment puisque cette variation de température est plus petite que l'erreur de précision des capteurs de température.



Graphique 14 Variation de température sur la longueur du bâtiment
(Données du 9 et 10 mai 2005)

Le graphique 15 présente les pertes d'énergie calculées selon $R_{\text{équi. théorique}}$, $R_{\text{équi. ajustées}}$ et l'enthalpie de l'air. Initialement, on observe que la perte d'énergie par enthalpie est moins grande que la perte d'énergie calculée théoriquement à partir des résistances thermiques. Ensuite, on remarque que la perte d'énergie par enthalpie et la perte d'énergie calculée à partir de $R_{\text{équi. théorique}}$ convergent environ 5 heures après que le système de chauffage soit complètement éteint.



Graphique 15 Diminutions d'enthalpie et perte thermique du bâtiment
(Données du 9 et 10 mai 2005)

Malgré cette différence, on voit clairement que les deux méthodes utilisées pour calculer les pertes thermiques du bâtiment donnent des résultats semblables, car dans les deux cas, la perte d'énergie du bâtiment pourrait être modélisée par un système de premier ordre. La différence marquée au début de l'expérience entre la perte d'énergie par enthalpie et celle calculée à partir des valeurs de résistance théoriques peut s'expliquer par le fait qu'une erreur au niveau de R , alors que le gradient de température est élevé, aura beaucoup plus d'impact sur le calcul de l'énergie perdue par le bâtiment que pour un faible gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur. Cette constatation confirme qu'il est nécessaire de réajuster les valeurs de résistances thermiques équivalentes de chacune des surfaces.

Puisque l'utilisation de valeurs théoriques de résistances thermiques des matériaux entraîne une surestimation de l'énergie perdue par le bâtiment, nous devons réajuster à la hausse la valeur de chacune des résistances équivalentes. Afin de respecter les ordres de grandeurs entre les résistances thermiques équivalentes de chacune des surfaces

considérées, les valeurs théoriques furent toutes corrigées par un même facteur. Pour cette expérience, il s'est avéré qu'en augmentant de 39% les résistances équivalentes de chacune des surfaces, la chaleur perdue par le bâtiment à partir de ces nouvelles valeurs est presque égale, à tout moment, à la diminution d'enthalpie dans le temps (Graphique 15). Par contre, il est évident que s'il avait été possible de mesurer expérimentalement le transfert de chaleur à travers chacune des surfaces, il aurait été possible d'ajuster indépendamment la valeur de résistance équivalente de chacune de celles-ci. Les nouvelles valeurs de résistances équivalentes sont résumées dans le tableau IX.

Tableau IX

Résistances équivalentes théoriques et ajustées

Surfaces	Aire	Résistance	Résistance Équivalente
	m ²	Équivalente Théorique m ² °C.W ⁻¹	Ajustée m ² °C.W ⁻¹
Mur extérieur (Ouest)	24,01	4,700	6,533
Mur extérieur (Nord)	104,62	4,700	6,533
Mur extérieur (Sudt)	138,39	4,700	6,533
Mur intérieur (Est)	22,60	0,585	0,813
Plafond	721,79	9,690	13,469
Plancher	721,79	0,677	0,941
Porte intérieur	1,93	0,845	1,175
Porte extérieur	15,56	0,756	1,050
Périmètre extérieur	23,39	4,799	6,670
Périmètre intérieur	22,25	0,459	0,638

Il est important de noter que la vitesse du vent lors de l'expérience peut influencer les résultats. Il est suggéré de répéter cette expérience pour différentes vitesses de vent afin d'évaluer l'effet de ce facteur sur les pertes thermiques du bâtiment. Par exemple, par

vent fort, la conséquence sera d'augmenter les pertes thermiques du bâtiment par convection. Ce test a été effectué au printemps, par contre la résistance thermique du film d'air sur le bâtiment n'est pas identique en hiver ($R = 0,030$) et en été ($R = 0,044$) (Howell et al., 2001). Il est recommandé de conduire ce test à différentes saisons afin de bien quantifier les pertes thermiques associées au bâtiment.

5.4 Conclusion

Le besoin de corriger de façon non négligeable l'ensemble des valeurs de $R_{\text{équi. théorique}}$ peut nous amener à penser que les valeurs théoriques des résistances thermiques des matériaux que l'on retrouve dans les différents ouvrages de référence tels que ASHRAE Fundamentals (2001), Ramsey (2000), Vitonne (1996), Midwest Plan Service Structures and Environment Handbook (1983), Stamper et Koral (1979) ne sont plus représentatives de la réalité. Il est possible que les progrès technologiques dans la science des matériaux fassent en sorte que ceux-ci soient beaucoup plus performants qu'il y a 20 ans. Étant donné que l'efficacité des matériaux isolants diminue avec l'âge, l'humidité, la densité, la moisissure et le travail des parois, il est suggéré de réévaluer expérimentalement dans quelques années l'isolation du bâtiment afin de réduire les sources d'erreurs associées aux pertes thermiques d'un bâtiment.

CHAPITRE 6

MÉTHODOLOGIE POUR ÉVALUER LE DÉBIT DE VENTILATION EN CONTINU

À la suite de l'analyse des données récoltées lors du mois de novembre 2004, il a été conclu que la chaleur produite par les poulets était surévaluée. Cette surestimation a été possiblement causée par une mauvaise évaluation du débit de ventilation. Donc, afin de corriger les résultats et les prochaines données à venir, une méthodologie de calibration fiable des ventilateurs a été développée. Cette méthodologie permet d'évaluer le débit de ventilation en tout temps et avec précision.

6.1 Description des installations

Afin d'être en mesure de bien évaluer le débit de ventilation en continu de chacun des ventilateurs, chaque type de ventilateur fut testé dans une tuyère. Le plan détaillé du tunnel de ventilation se trouve en annexe (plans du site expérimental, plan 7). Dans le cadre de ce projet, certains ventilateurs (16 021F et 16 032F) ont un contrôleur variable (XL 001 VAR 02) tandis que d'autres (24 050F et 36 050F) ont un contrôleur «tout ou rien» (XL 201 TOR 02). La méthode décrite ci-dessous explique comment développer un modèle mathématique permettant de calculer le débit de ventilation en fonction de la pression statique et du voltage RMS du ventilateur. Cette méthode peut être appliquée tant aux ventilateurs ayant un contrôleur à vitesse variable qu'aux ventilateurs ayant un contrôleur « tout ou rien ».

Les débits ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) des ventilateurs avec contrôleurs variables furent déterminés pour des pressions statiques positives et négatives situées entre -24,8 Pa et + 24,8 Pa (- 0,1'' et + 0,1'' d'eau), puisque la majeure partie des valeurs observées expérimentalement se situaient dans ce voisinage et ce pour des vitesses de fonctionnement entre 40 % et

100 %. En théorie, la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment doit être positive, cependant les lectures obtenues des capteurs de pression statique le long du bâtiment ont montré que le différentiel de pression statique entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment peut être positif ou négatif dépendamment de la direction du vent ainsi que de sa vitesse. La station météorologique installée à 50 m du bâtiment d'élevage avicole révèle que la direction générale du vent est nord-ouest. À partir des informations contenues dans ASHRAE (Carter et Wilson, 2001) sur les patrons d'écoulement d'air pour des bâtiments où la hauteur est trois fois moins grande que la longueur, un vent venant du Nord-Ouest, dans le cas du bâtiment faisant l'objet de notre étude, induira une pression négative sur certains murs du bâtiment, ce qui explique les valeurs négatives obtenues par les capteurs de pressions statiques. La raison pour laquelle les ventilateurs ne sont pas testés pour des vitesses de fonctionnement inférieures à 40 % est due au fait qu'en deçà de 40 %, une pression statique positive élevée fera en sorte que le débit de ventilation deviendra pratiquement nul.

Puisque le tunnel de ventilation de la compagnie *Les Équipements Modernes* a été bâti pour tester des ventilateurs de 16'' à 24'' et ce, pour des pressions statiques positives, nous avons dû créer artificiellement une différence de pression négative, pour tester les ventilateurs. Pour ce faire, un ventilateur de 24'' fut installé à l'extrémité du tunnel, dans l'entrée d'air. Ce ventilateur a comme rôle de forcer de l'air dans le tunnel et ainsi créer un différentiel de pression statique négatif. Afin de pouvoir varier le différentiel de pression statique, un contrôleur variable permet de modifier la vitesse du ventilateur de 24''. Lors des tests pour des différentiels de pression statique positifs, des tissus très minces furent utilisés pour obstruer l'entrée d'air de la tuyère, entraînant ainsi une augmentation de la différence de pression statique et une diminution de la vitesse de l'air.

6.2 Expérimentation

Tous les tests sur les ventilateurs furent effectués dans la tuyère de la compagnie *Les Équipements Modernes*. Pour les ventilateurs ayant un contrôleur XLVAR 001 sur le site de production, le débit d'air fut mesuré pour différentes vitesses de fonctionnement du ventilateur ainsi que différentes pressions statiques. Lors des tests, la tension fournie par Hydro-Québec pouvait varier d'une journée à l'autre et la consommation électrique des bâtiments voisins à la chambre de test affectait le voltage RMS du moteur même si la consigne de vitesse (en pourcentage) demeurait constante. Donc, afin d'obtenir un modèle mathématique précis, le voltage RMS du ventilateur a été considéré comme un des paramètres au lieu de la consigne de vitesse. À la suite de cette décision, une courbe de ventilation a été développée pour chacun des contrôleurs variables utilisés sur le site de production. Cette courbe permet de calculer le voltage RMS du moteur en fonction de la consigne de vitesse ($V_{\%}$) envoyée par l'automate. Pour différentes consignes de vitesse allant entre 40 % et 100 %, le voltage RMS fut mesuré sur chaque contrôleur, et ce, pour des intervalles de 5 %. À partir de ces données, une expression polynomiale du 3^{ième} degré a été développée pour chaque contrôleur variable (équation 6.1). Le tableau X dresse un résumé des équations développées pour chacun des contrôleurs variables afin d'évaluer le voltage RMS à partir de la consigne de vitesse envoyée par l'automate.

$$V_{rms} = \alpha * V_{\%}^3 + \beta * V_{\%}^2 + \chi * V_{\%} + \delta \quad (6.1)$$

Tableau X

Coefficients de l'équation 6.1

Ventilateur		R ²	α	β	χ	δ
Type	#					
16 021 F	2	0,9946	0,0008	-0,1228	7,3482	-33,2612
16 021	8	0,9942	0,0008	-0,1315	7,8998	-46,3547
	14	0,9906	0,0005	-0,0678	3,4299	54,8205

Tableau X (suite)

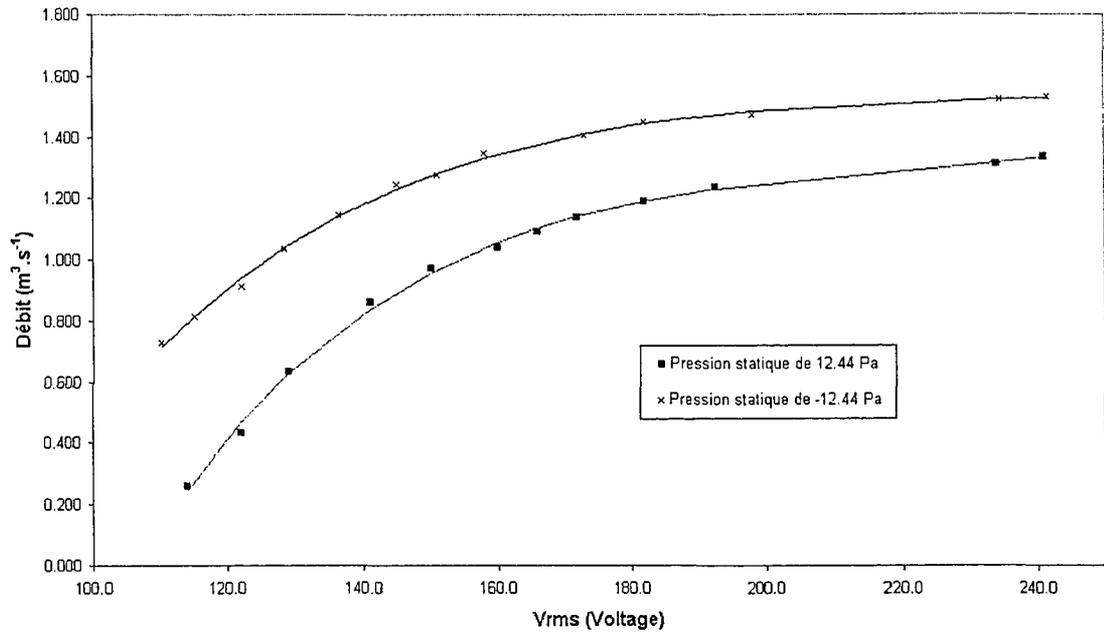
16 032 F	5	0,9936	0,0008	-0,1373	8,2587	-52,5736
	11	0,9940	0,0007	-0,1155	6,8204	-25,9080

Lors des tests dans la tuyère, le voltage RMS, l'ampérage RMS, la puissance électrique envoyée au moteur, la puissance apparente et le facteur de puissance furent mesurés à l'aide d'un multimètre (*Fluke Model 39 Power Meter*). La vitesse de l'air et la différence de pression statique furent mesurées avec un système d'acquisition de données (ADM-870, Shortridge instrument).

6.3 Discussion et interprétation des résultats

Au graphique 16, on observe l'effet induit par un changement de vitesse du ventilateur advenant le cas où le différentiel de pression statique est maintenu constant. Dans ce cas-ci, le débit de ventilation peut être décrit par une équation non linéaire (équation 6.2), où les paramètres a , b , c et d sont des constantes plus grandes que zéro. On voit qu'entre $110 V_{rms}$ et $150 V_{rms}$, le débit de ventilation est proportionnel au voltage RMS. Cependant, au-delà d'une valeur de $150 V_{rms}$, le débit de ventilation varie de façon logarithmique et ce jusqu'à $240 V_{rms}$. Peu importe si la pression statique est positive ou bien négative, on observe la même tendance. Par contre, pour une pression statique négative, on remarque que la courbe est décalée vers le haut, indiquant ainsi un plus grand débit d'air.

$$Débit = a * \ln(V_{rms}) + b * V_{rms}^2 - c * V_{rms} - d \quad (6.2)$$



$$R_{12,44}^2 = 0,9980 \quad R_{-12,44}^2 = 0,9981$$

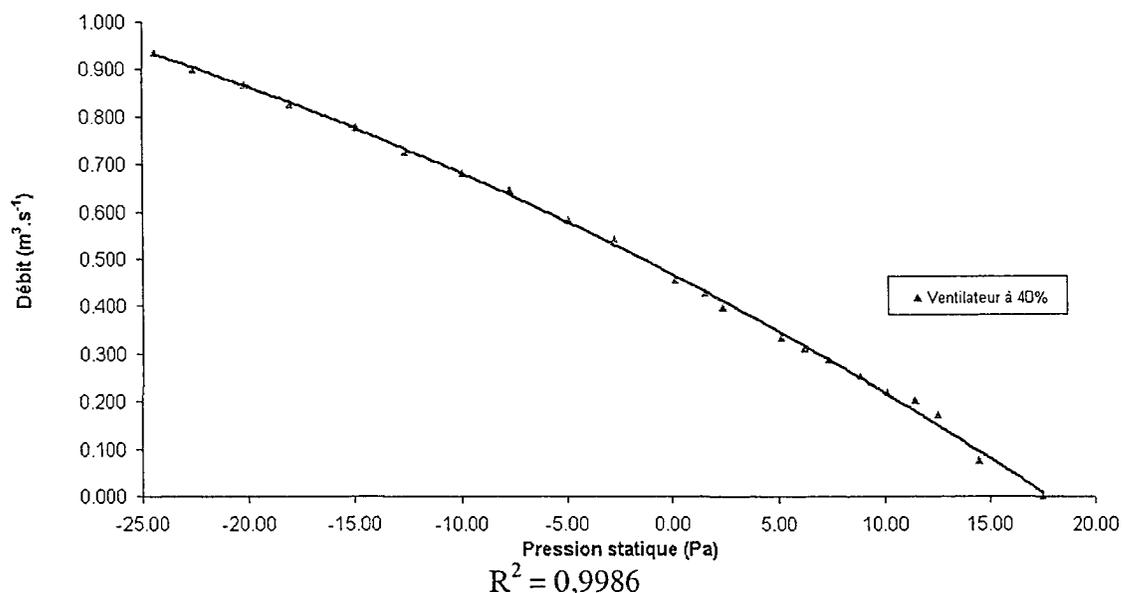
Graphique 16 Débit en fonction du voltage RMS pour un ventilateur Vista 16021 F

$$Débit_{12,44} = 14,3752 * \ln(V_{rms}) + 0,0001 * V_{rms}^2 - 0,1293 * V_{rms} - 55,0400 \quad (6.3)$$

$$Débit_{-12,44} = 7,9176 * \ln(V_{rms}) + 0,0001 * V_{rms}^2 - 0,0651 * V_{rms} - 30,1674 \quad (6.4)$$

Au partir du graphique 17, on observe que le débit de ventilation peut être exprimé par une équation polynomiale du 2^{ième} degré alors que la vitesse est constante et que seul le différentiel de pression statique (Pa) est changé. Dans l'équation 6.5, les paramètres a, b et c sont tous plus grands que zéro.

$$Débit = -a * (\Delta p)^2 - b * (\Delta p) + c \quad (6.5)$$



Graphique 17 Débit en fonction de la pression statique pour un ventilateur Vista 16021F fonctionnant à 40% ($V_{rms} = 110$) de sa vitesse maximale.

$$\text{Débit} = -0,000173 * (\Delta p)^2 - 0,023251 * \Delta p + 0,468400 \quad (6.6)$$

À l'aide des données présentées dans ces deux graphiques, une équation non linéaire décrivant le débit de ventilation en fonction de la pression statique et du voltage RMS fut obtenue (équation 6.7). À l'aide du logiciel *Statgraphics plus*, les données recueillies lors des tests dans le tunnel de ventilation furent analysées statistiquement pour les ventilateurs 16 021F, 16 032F et 24 050F. À la suite de cette analyse, les valeurs des paramètres a, b, c, d, e, et f furent déterminées ainsi que l'erreur quadratique moyenne pour chacun des modèles. Afin de vérifier s'il est possible d'améliorer la précision du modèle, des modèles basés seulement sur des valeurs de pressions négatives et, ou positive furent développés. Le tableau XXI (Annexe, Évaluation du débit de ventilation en continu) fait une synthèse des différents modèles pour les trois types de ventilateurs testés dans la tuyère de la compagnie les *Équipements Modernes*. Les valeurs retournées par ces modèles sont en mètres cube par seconde ($m^3.s^{-1}$).

$$\text{Débit} = a*(V_{rms})^2 + b*(V_{rms}) + c*\ln(V_{rms}) + d*\Delta p^2 + e*\Delta p + f \quad (6.7)$$

Dans ce tableau, on remarque que dans le cas des ventilateurs 16 021F et 16 032F, un modèle mathématique incluant toutes les valeurs de pression statique entre -24,8 Pa et + 24,8 Pa (- 0,1'' et + 0,1'' d'eau) est moins précis qu'un modèle développé seulement à partir des valeurs de pressions statiques positives ou négatives. Pour les ventilateurs 16 021F et 16 032F, on voit que le modèle est moins précis pour des pressions statiques négatives que positives. Ceci peut s'expliquer par le fait que le tunnel de ventilation n'a pas été conçu initialement pour des pressions négatives. C'est pour cette raison qu'un ventilateur 24 050F a dû être placé à l'avant du tunnel afin de créer une pression statique négative. Cependant, ce genre de montage crée beaucoup plus de turbulences dans l'air, qui à leur tour affectent les lectures obtenues via les capteurs de pression statique et de vitesse de l'air, entraînant du même coup un modèle mathématique moins précis. Donc, pour les ventilateurs 16 021F, un modèle a été développé strictement pour les pressions négatives ($R^2 = 0,9788$) et un autre strictement pour les pressions positives ($R^2 = 0,9898$), puisque cette approche est plus précise qu'un modèle tenant compte des pressions à la fois positives et négatives ($R^2 = 0,9668$). Le même traitement a été appliqué aux ventilateurs 16 032F, soit un modèle pour des pressions positives ($R^2 = 0,9907$) et un modèle pour des pressions négatives ($R^2 = 0,9763$).

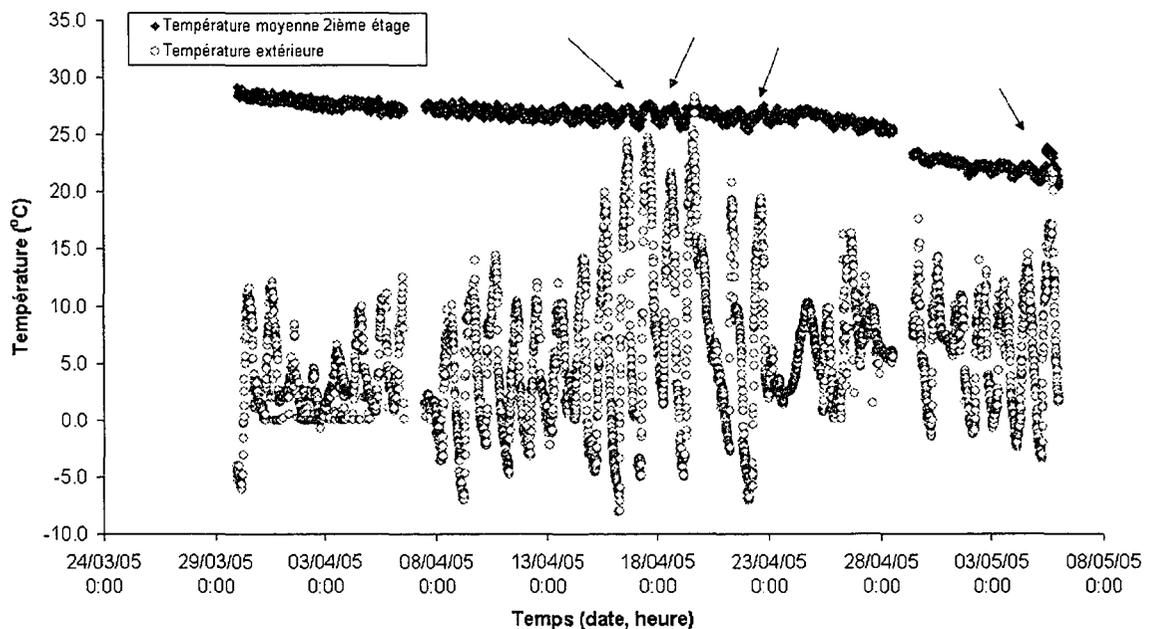
Pour le ventilateur 24 050F, ayant un contrôleur « tout ou rien », un polynôme du 3^{ième} ordre est suffisamment précis ($R^2 = 98,57$) pour estimer le débit de ventilation. En conclusion, avec l'aide d'un capteur de pression statique et connaissant la vitesse de fonctionnement du ventilateur, il est possible d'évaluer en continu le débit de ventilation avec un intervalle de confiance de 95%, pour un voltage RMS se situant entre 108 et 240 V_{rms} (une vitesse entre 40% et 100%) et une différence de pression statique variant entre - 24,88 Pa et + 24,88 Pa (- 0,1 à + 0,1 '' d'eau).

CHAPITRE 7

DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

7.1 Évolution des conditions d'élevage

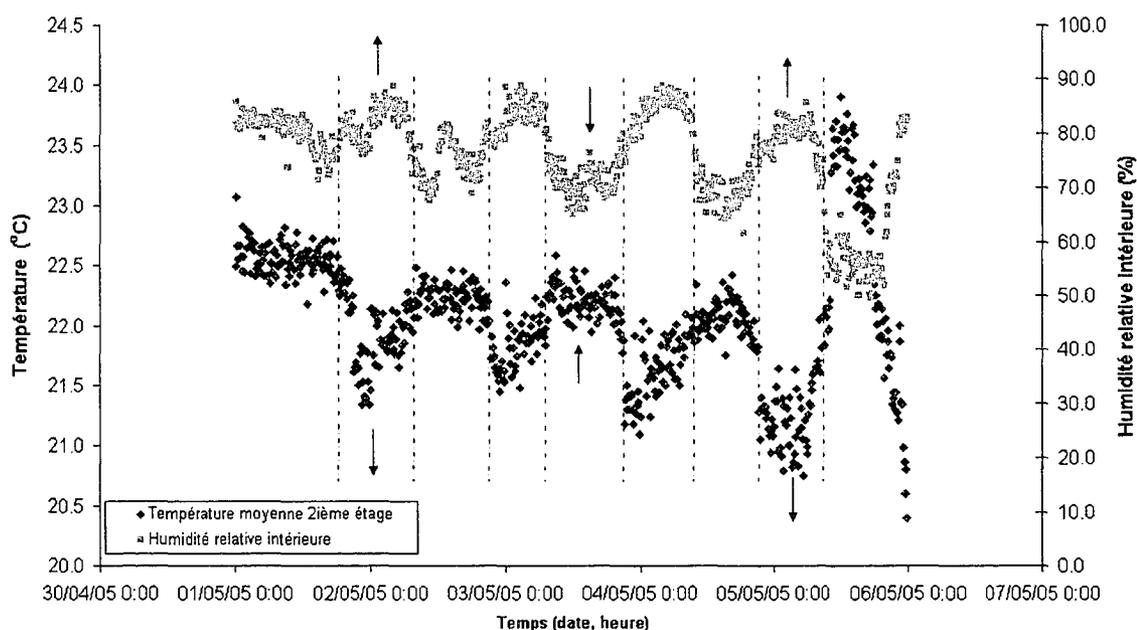
Le graphique 18 présente les différentes conditions climatiques extérieures durant le mois d'avril 2005. À partir de ce graphique, on observe que les augmentations cycliques de la température extérieure engendrent des augmentations cycliques de la température moyenne intérieure. On note aussi que la consigne de température diminue à mesure que les poulets vieillissent.



Graphique 18 Évolution des températures intérieures et extérieures pour le mois d'avril 2005

Le graphique 19 présente les changements de température et d'humidité relative à l'intérieur du bâtiment avicole entre le 1^{er} et le 5 mai 2005. À l'aide de ce graphique, on note qu'une augmentation de la température implique une diminution de l'humidité

relative et vice versa. On observe aussi que lorsque la température moyenne atteint un sommet, l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment est au minimum et on constate que la température et l'humidité relative sont deux paramètres liés. L'interaction entre ces deux paramètres rend plus complexe le contrôle de l'environnement de production. Lors de journées ensoleillées, on note une augmentation de la température extérieure et une diminution de l'humidité relative extérieure. Cette augmentation de la température de l'air extérieure combinée à l'activité des poulets entraîne une augmentation de la température moyenne à l'intérieur du bâtiment.

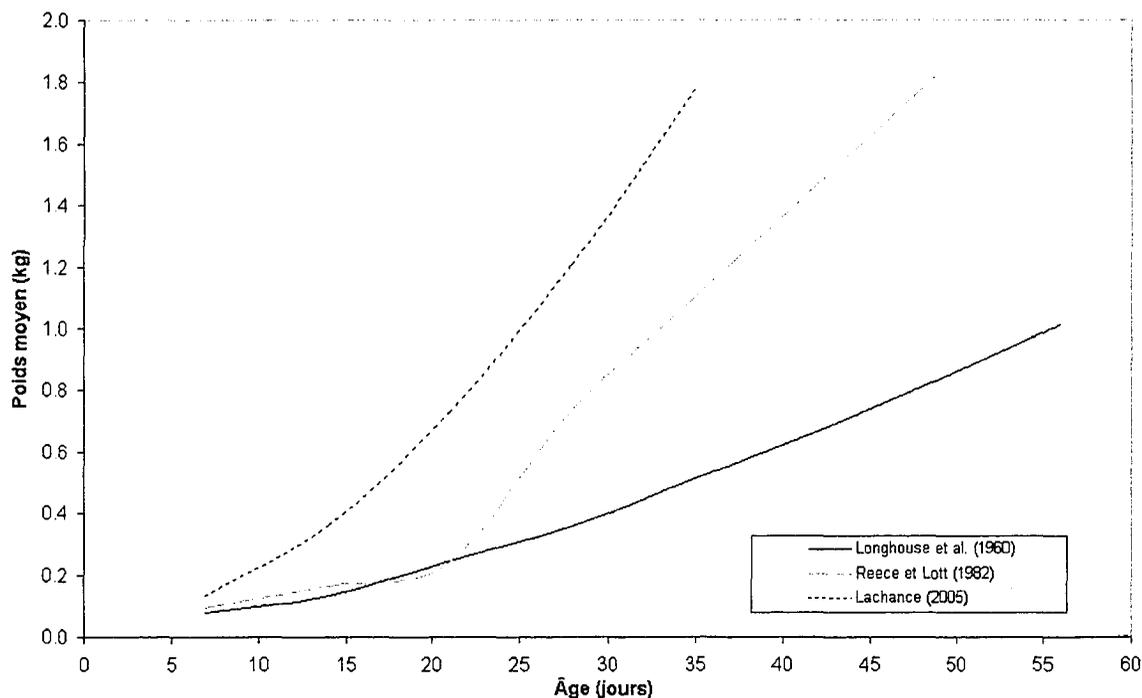


Graphique 19 Conditions d'élevage entre le 1^{er} et 5 mai 2005

7.2 Croissance des poulets

Le graphique 20 présente la croissance du troupeau de poulets étudié dans le cadre de ce projet et des données publiées par Reece et Lott (1982b) ainsi que Longhouse et al. (1960). Nous observons une augmentation du taux de croissance au fil des ans. Cette augmentation du taux de croissance confirme ce que plusieurs chercheurs ont déjà avancé, soit que la sélection génétique ainsi que l'amélioration des conditions d'élevage permettent aux poulets de croître beaucoup plus rapidement qu'autrefois. Cette

augmentation au niveau de la croissance entraîne inévitablement une augmentation de la production de chaleur.

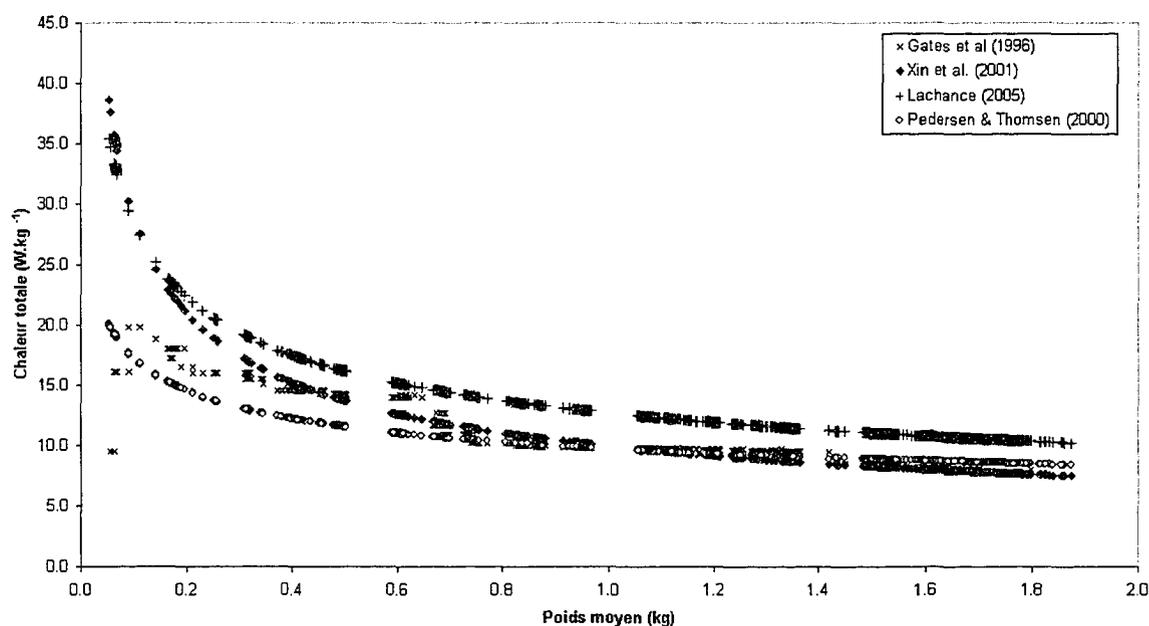


Graphique 20 Croissance des poulets en 1960, 1982 et 2005
(Adapté de Longhouse et al., 1960; Reece et Lott, 1982b;
données de Lachance entre mars et mai 2005)

7.3 Effets du poids sur la production de chaleur totale

Le graphique 21 présente les différents modèles prédisant la production de chaleur en fonction du poids du poulet. On observe que le modèle développé à partir des données obtenues entre les mois de mars et mai 2005 prédit une plus grande production de chaleur que les modèles cités dans la littérature. Cette tendance peut s'expliquer par le fait que la sélection génétique effectuée par les compagnies telles que Ross et Cobb pour produire des poulets performants engendre inévitablement une croissance accrue augmentant du même coup la production de chaleur. Puisque les modèles publiés datent de plusieurs années (Annexe, Équation de production de chaleur et d'humidité), il est tout à fait raisonnable de croire que la production de chaleur ait augmenté depuis, tel

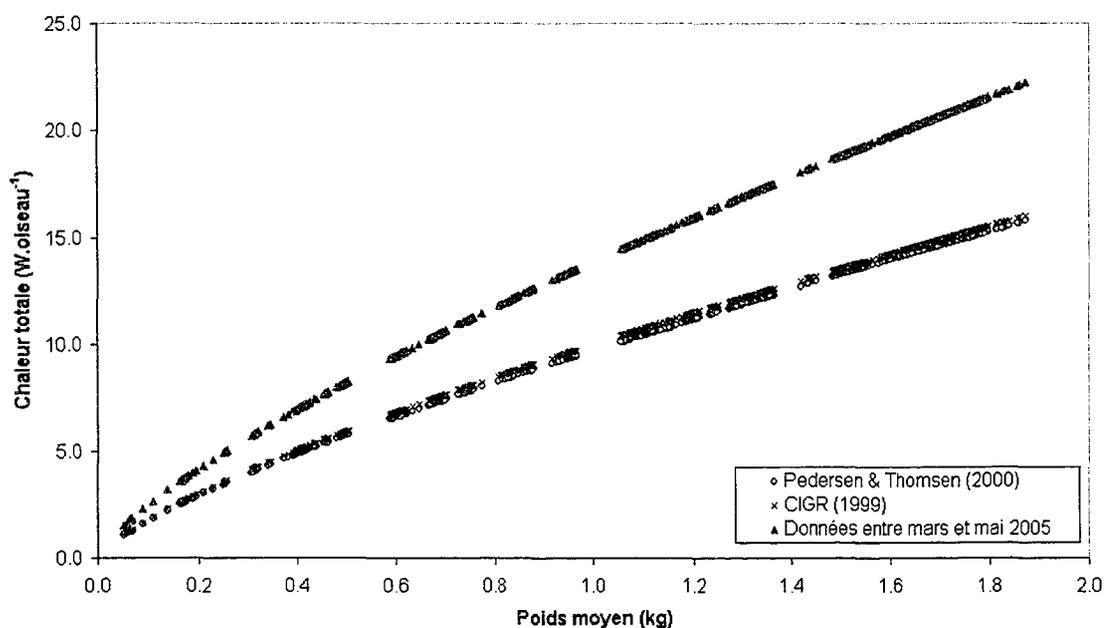
qu'il a été mentionné par plusieurs auteurs (Xin et al., 2001; Gates et al., 1996; Reece et Lott, 1982b). De plus, il est important de noter que les données de Xin et al. (2001) et Gates et al. (1996) ont été récoltées dans des bâtiments avicoles aux États-Unis alors que ceux de Pedersen & Thomsen (2000) proviennent du Danemark. Or, les conditions d'élevage sont différentes au Québec, par rapport aux États-Unis et au Danemark. Par exemple, au Danemark la production avicole se fait sur de la paille et aux États-Unis la litière est composée de copeaux de bois qui ne sont retirés qu'une fois par année, tandis qu'au Québec la litière est composée de copeaux de bois qui sont enlevés après chaque élevage.



Graphique 21 Chaleur totale en fonction du poids selon différents modèles
(Adapté de données de Lachance entre mars et mai 2005;
Xin et al, 2001; Pedersen et Thomsen, 2000; Gates et al, 1996)

Le graphique 22 présente un autre modèle qui nous permet d'obtenir la production de chaleur par poulet en fonction de leur poids. Le modèle développé par la CIGR (1999) et celui développé dans le cadre de ce projet permettent d'estimer la production de chaleur par poulet en fonction du poids, tandis que ceux développés par Pedersen et Thomsen (2000) intègrent la température moyenne à l'intérieur de la salle d'élevage. Les valeurs

calculées à partir du modèle de Pedersen et Thomsen (2000) ont été corrigées de façon à ce que la chaleur produite par la litière en fin d'élevage ne soit pas incluse dans la chaleur produite par le poulet. Or, dans le cadre de ce projet, les données obtenues tiennent compte de l'énergie et de l'humidité produites par la litière, donc il est tout à fait plausible de croire qu'une certaine partie de l'augmentation de chaleur mesurée dans le cadre de ce projet soit due à la chaleur provenant de la litière. Les modèles de la CIGR (1999) et de Pedersen et Thomsen (2000) sont semblables, car ces deux modèles sont issus des mêmes données récoltées entre 1996 et 1997. Puisque ces données ont déjà plus de 8 ans, il est fort possible que la production de chaleur ait augmentée depuis (Chepete et Xin, 2001).



Graphique 22 Chaleur produite par oiseau en fonction du poids et de la température ambiante
(Adapté de CIGR, 1999; Pedersen et Thomsen, 2000; Données de Lachance entre mars et mai 2005)

7.4 Précision du modèle

Afin d'être en mesure d'estimer la précision des données expérimentales recueillies entre les mois de mars et mai 2005, une étude de sensibilité fut conduite. Puisque la

qualité des données sur la production de chaleur dépend à la base des valeurs mesurées à l'aide des différents capteurs de température, d'humidité relative, de pression statique et du poids moyen de l'ensemble des poulets tel qu'indiqué par la balance, la précision de ces capteurs peut influencer les résultats de production de chaleur obtenus à partir du modèle des échanges thermiques et d'humidité.

Dans la littérature, certains auteurs mentionnent qu'il est difficile de mesurer la chaleur produite par des poulets étant âgés de moins de trois semaines puisque ceux-ci libèrent très peu de chaleur (Xin et al., 2001). Cependant, en vieillissant, les poulets produisent de plus en plus de chaleur et il devient alors plus facile de mesurer cette production. Ainsi, il est logique d'affirmer que la précision des données change en fonction de l'âge des poulets.

Sachant que les capteurs de température ont une précision de $\pm 0,5$ °C, que la précision des capteurs d'humidité relative est de $\pm 2\%$, que les capteurs de pression statique sont précis à $\pm 4,98$ Pa (0,02 pouce d'eau) et que la balance a une précision \pm de 0,005 kg, les valeurs mesurées par ces capteurs furent corrigées de façon à obtenir le maximum et le minimum théorique de chaleur pouvant être produite par les poulets tout au long de l'élevage.

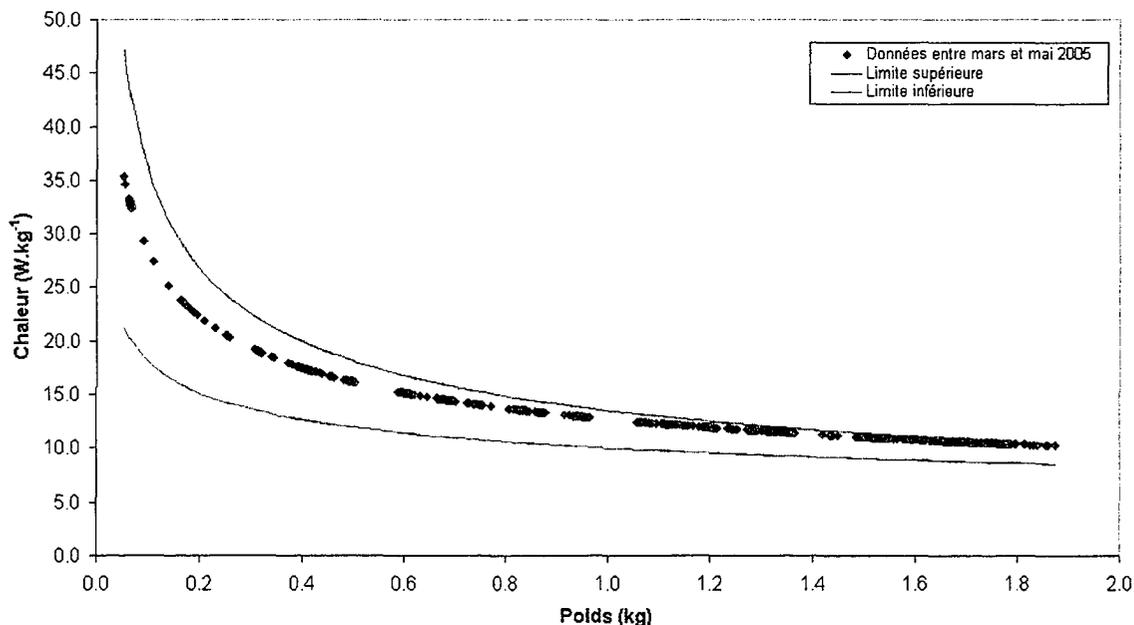
Pour obtenir une production de chaleur maximale, les valeurs des capteurs de température à l'extérieur de la salle d'élevage sont corrigées de $- 0,5$ °C, tandis les capteurs à l'intérieur sont corrigés de $+ 0,5$ °C. Le capteur d'humidité relative à l'intérieur est corrigé de $+ 2\%$ et celui à l'extérieur est corrigé de $- 2\%$. Tous les capteurs de pression statique ont été corrigés de $- 4,98$ Pa (0,02 pouce d'eau). Le poids moyen évalué par la balance est corrigé de $- 0,005$ kg. Le tableau XI résume les différentes corrections apportées aux données pour déterminer les limites de productions de chaleurs maximale et minimale selon les données recueillies expérimentalement.

Tableau XI

Corrections apportées aux différents capteurs

Type de capteur	Valeurs de correction	
	Maximale	Minimale
Température intérieure	+ 0,5 °C	- 0,5 °C
Température extérieure	- 0,5 °C	+ 0,5 °C
Humidité relative intérieure	+ 2 %	- 2 %
Humidité relative extérieure	- 2 %	+ 2 %
Pression statique	- 4,98 Pa	+ 4,98 Pa
Poids moyen	- 0,005 kg	+ 0,005 kg

Une fois les valeurs minimales et maximales de production de chaleur pour la durée totale de l'élevage calculées, il est possible de construire un modèle du type $Q = a \cdot M^b$ pour calculer les productions minimale (Q_{\min}) et maximale de chaleur (Q_{\max}) en fonction de la masse. En comparant le modèle calculé à partir des données expérimentales à ceux provenant des minimums et maximums de production de chaleur, on obtient la limite inférieure et supérieure du modèle expérimental (Graphique 23). De cette façon, on obtient un indice très conservateur du niveau de précision de l'approche expérimentale, et ce, tout au long de l'élevage.



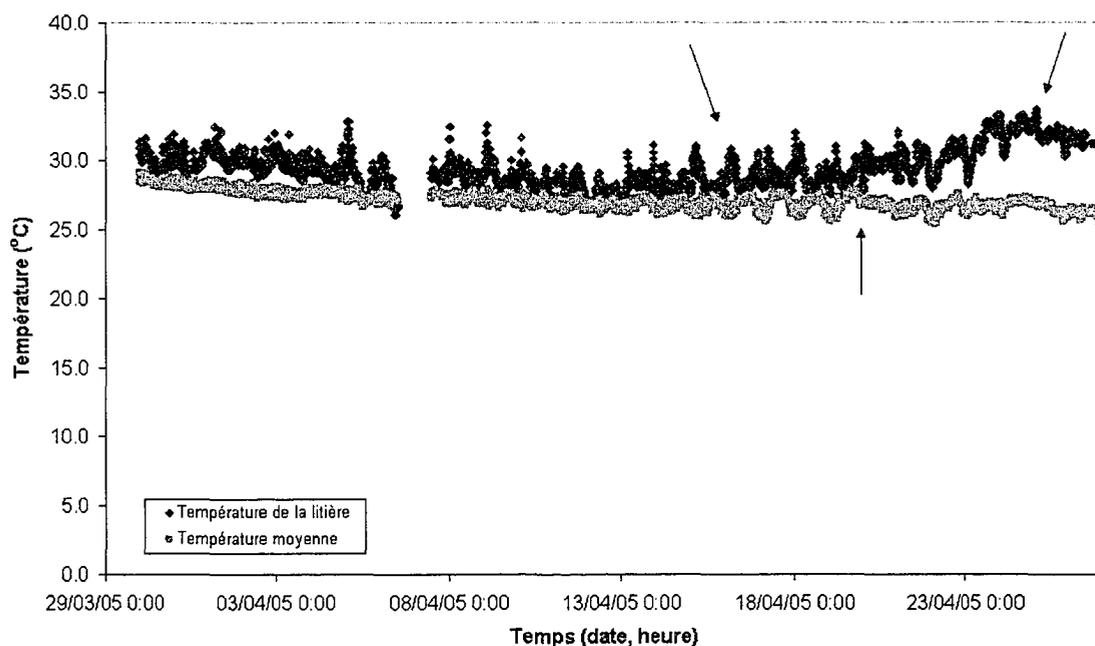
Graphique 23 Chaleur totale produite en fonction de la masse
 $Q_{\text{totale}} = 12.7082 * M^{(-0.347715)}$

Tel que mentionné précédemment, la production de chaleur pour les jeunes poulets est peu élevée par rapport aux différentes sources de chaleur à l'intérieur du bâtiment (par exemple les unités de chauffage au propane) et par conséquent, cette quantité de chaleur est difficilement mesurable. Ainsi, à ce stade de la production, une petite imprécision au niveau de la lecture des capteurs engendre des erreurs considérables au niveau de la production de chaleur calculée à partir du modèle des échanges thermique et d'humidité.

On observe au graphique 23 que l'erreur sur la balance thermique et d'humidité diminue lorsque le poids des poulets augmente. Étant donné que la quantité de chaleur libérée par l'ensemble des poulets devient de plus en plus élevée, l'imprécision des capteurs à ce niveau devient de plus en plus négligeable. Ces observations confirment l'hypothèse émise précédemment.

7.5 Influence de la litière sur la production de chaleur totale

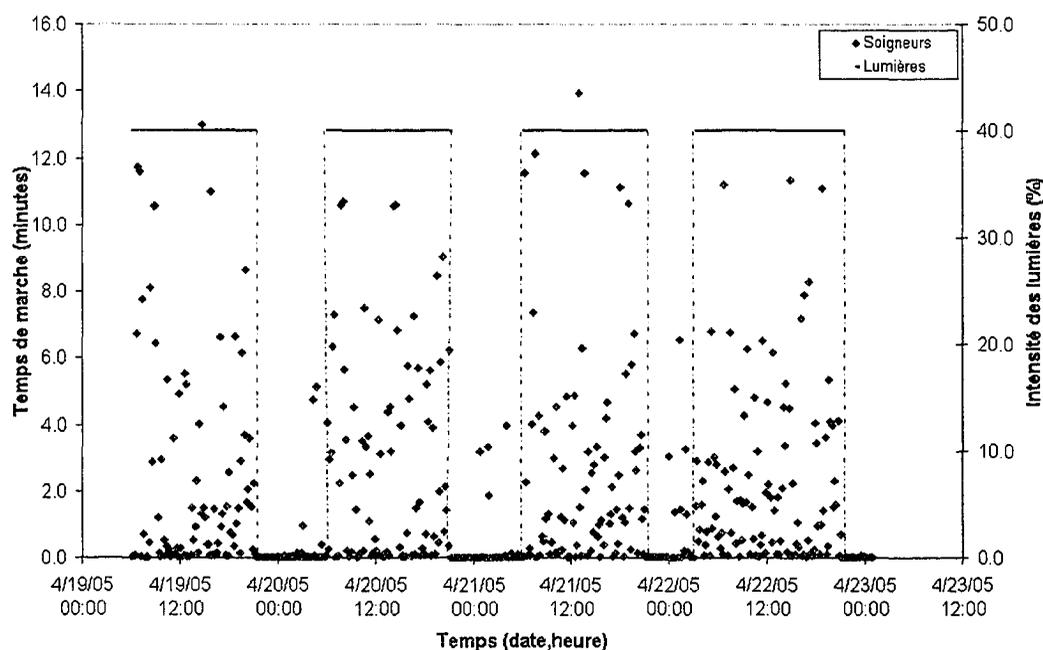
En observant le graphique 24, on remarque qu'environ trois semaines après le début de l'élevage, la température de la litière commence à augmenter significativement. Cette augmentation de température s'explique par le fait que le processus de décomposition aérobie de la litière est amorcé. Lors de la décomposition aérobie, il y a une augmentation de température et une production de chaleur, libérant du même coup une quantité non négligeable de dioxyde de carbone (CO_2) et d'eau. En chauffant, la litière évapore son eau qui contribue par la suite à augmenter l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment. Parallèlement, la densité animale sur la surface d'élevage augmente le degré de compaction de la litière et contribue à créer des galettes qui empêchent l'oxygène de pénétrer dans la litière. Lorsque ce phénomène se produit, une réaction anaérobie est amorcée, ralentissant la décomposition et libérant de l'ammoniaque si la litière est humide. Le graphique 24 montre que la température de la litière est en moyenne supérieure de 5,5 °C (10 °F) à la température ambiante.



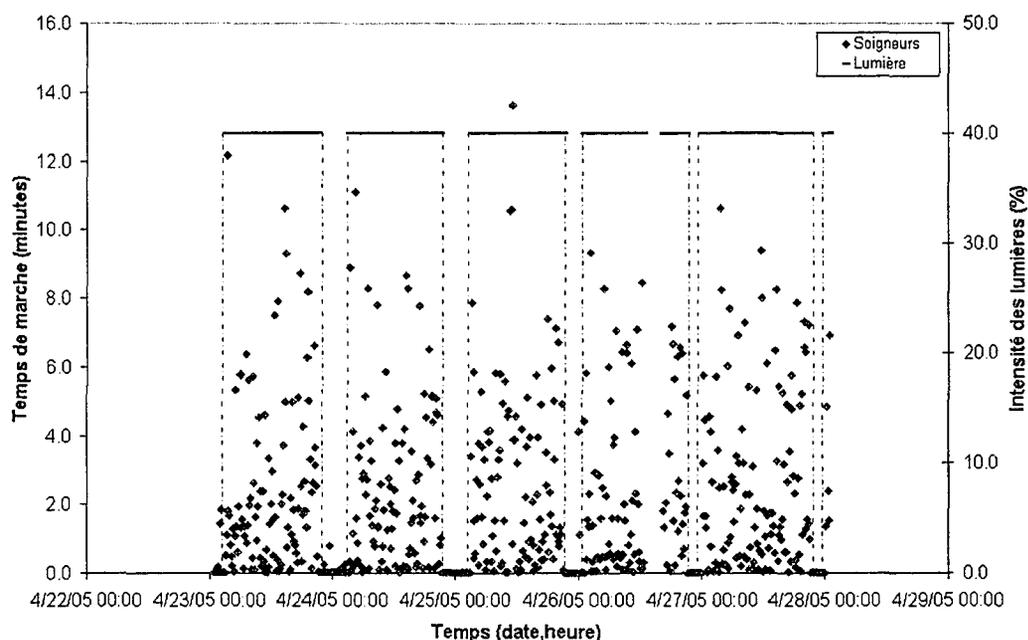
Graphique 24 Température de la litière comparée à la température moyenne intérieure

7.6 Influence de l'intensité lumineuse sur l'activité animale

En observant le site expérimental, nous constatons que l'augmentation de l'intensité lumineuse a pour effet d'encourager l'activité chez les poulets. Ceux-ci mangent plus et sont beaucoup plus actifs que lorsque les lumières sont éteintes. Il a même été remarqué que lorsque les lumières sont soudainement éteintes, les poulets se couchent par terre très peu de temps après et cessent pratiquement toute activité. Les graphiques 25 et 26 montrent que les soigneurs sont opérationnels beaucoup plus souvent lorsque les lumières sont allumées.



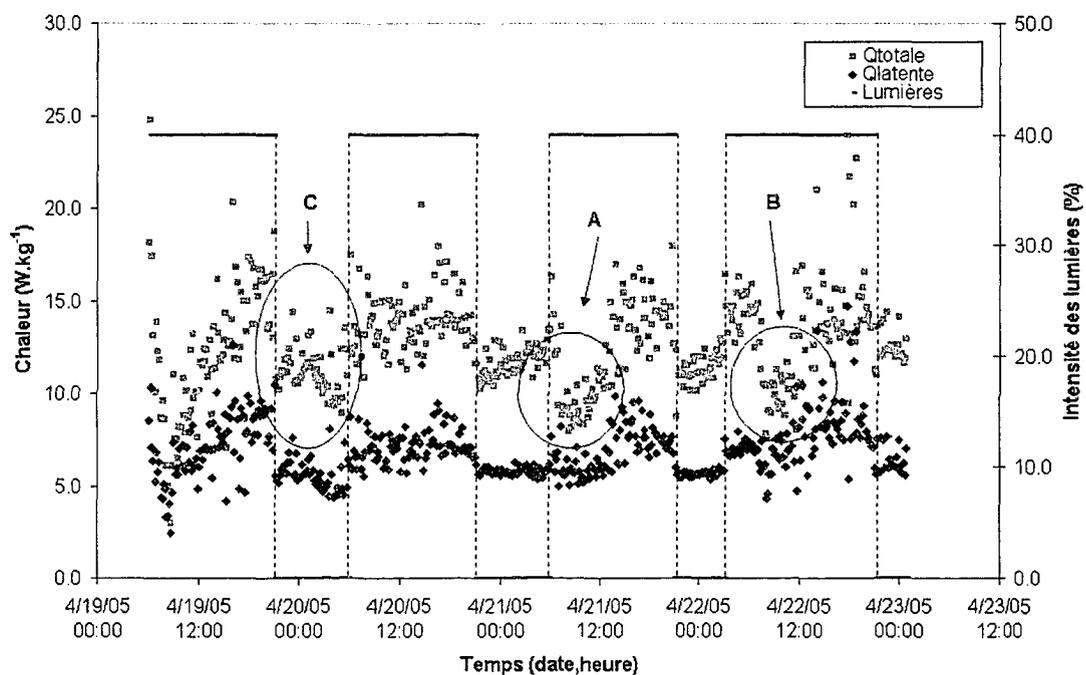
Graphique 25 Temps de marche total des trois soigneurs en fonction de la photopériode pour des poulets âgés entre 22 et 25 jours



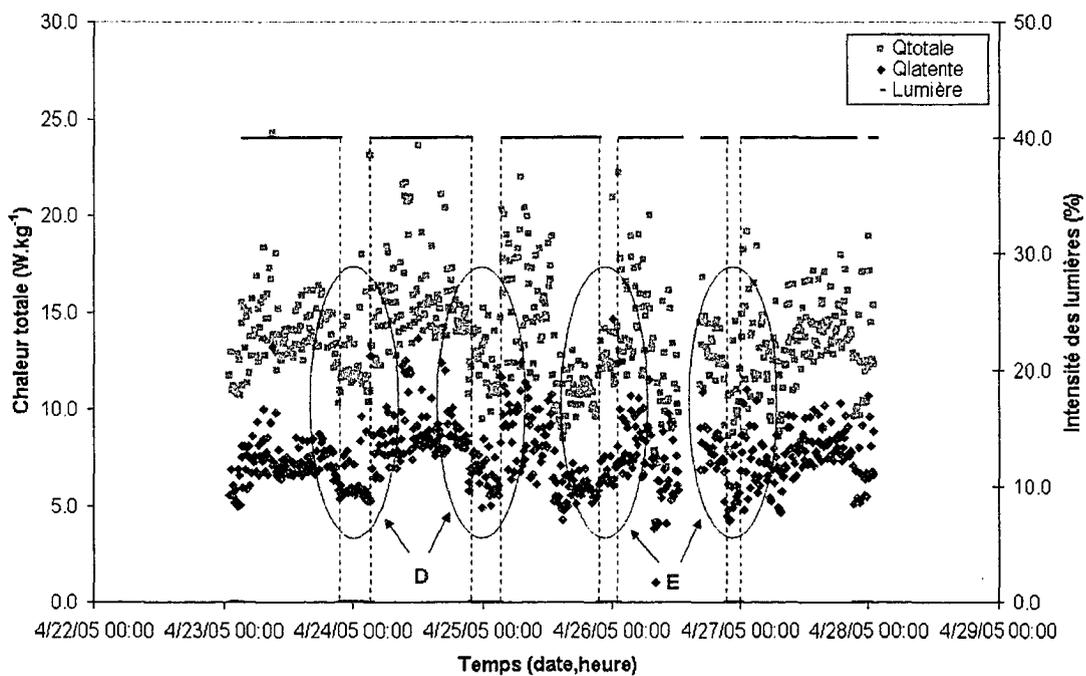
Graphique 26 Temps de marche total des trois soigneurs en fonction de la photopériode pour des poulets âgés entre 26 et 30 jours

7.7 Influence de l'intensité lumineuse sur la production de chaleur

Selon un des modèles statistiques développés par Xin et al. (2001) utilisant la température ambiante et l'intensité de l'éclairage, lorsque les lumières sont éteintes, la production de chaleur totale diminue de 18% comparée à une situation où les lumières sont à leur intensité maximale et ce pour une même température. Les graphiques 27 et 28 présentent des données expérimentales qui sont en accord avec le modèle de Xin et al. (2001). Ces données montrent clairement l'effet de l'intensité lumineuse sur la production de chaleur et ce, pour différents âges. Considérant que la consigne de température est maintenue constante au cours d'une même journée de production, on constate que lorsque les lumières sont éteintes, les productions de chaleur totale et latente diminuent dramatiquement (Points C, D et E).

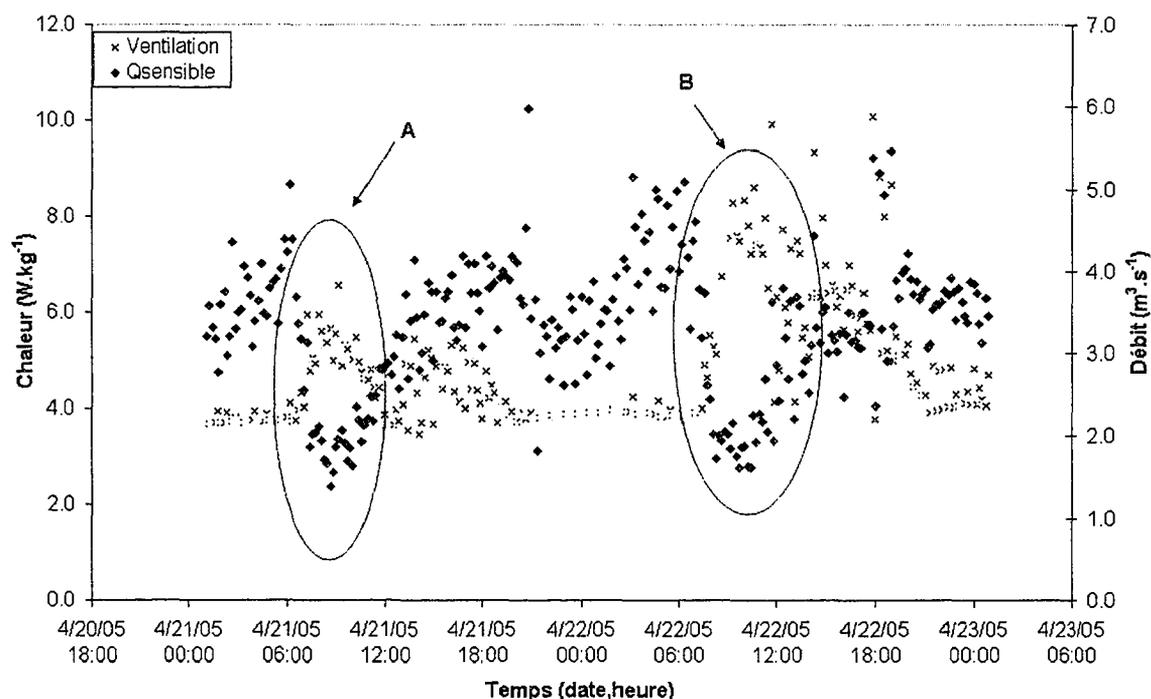


Graphique 27 Production de chaleur dans le temps et intensité des lumières pour des poulets âgés entre 22 et 25 jours.



Graphique 28 Production de chaleur dans le temps et intensité des lumières pour des poulets âgés entre 26 et 30 jours.

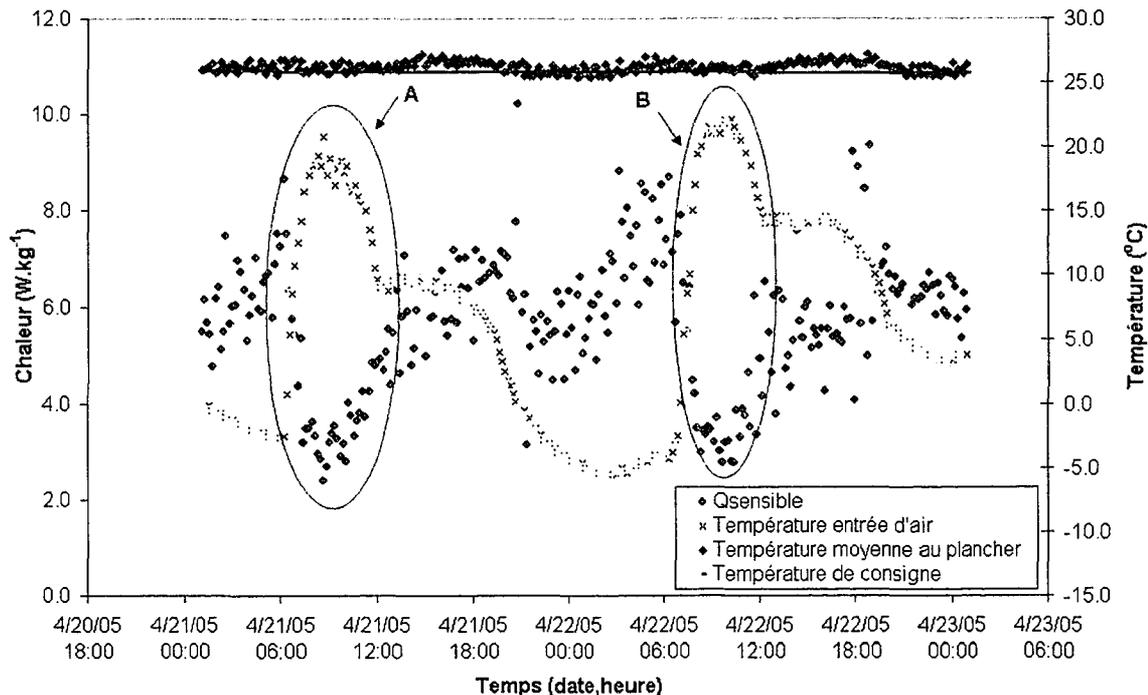
Par contre, en analysant plus en détail le graphique 27, on observe aux points A et B que la production de chaleur totale chute dans la journée tandis que la production de chaleur latente augmente sensiblement dû à l'activité des poulets, même si l'intensité lumineuse est maintenue constante à 40%. Les points A et B (Graphique 27) montrent que la baisse de production de chaleur totale est attribuable à une diminution de la chaleur sensible, puisque la chaleur latente augmente toujours dès que les lumières sont allumées. Dans les deux cas où une diminution de la production de chaleur sensible est détectée, on note une augmentation du débit de ventilation (Graphique 29) et de la température de l'entrée d'air (Graphique 30), alors que la température intérieure demeure relativement constante (Graphique 30). Les deux journées présentées dans le graphique 27 (points A et B) sont similaires, soit une matinée ensoleillée où la température maximale est atteinte en avant-midi (Graphique 30). Ensuite, la température dans l'entrée d'air diminue en après-midi signifiant fort probablement un ennuagement du ciel.



Graphique 29 Variation du débit de ventilation et de la chaleur sensible pour des poulets âgés de 24 et 25 jours

À partir du graphique 29, on constate aux points A et B que le débit de ventilation augmente au même moment que la température dans l'entrée d'air atteint 10°C (50 °F) (Graphique 30). Ceci s'explique par le fait que le contrôleur augmente le débit de ventilation lorsque la température de l'entrée d'air atteint une certaine limite, soit 10°C (50 °F) dans ce cas-ci. Si le débit de ventilation était demeuré constant, l'augmentation de température de l'entrée d'air aurait entraîné une augmentation de la température intérieure. Or, lors des journées du 21 et 22 avril, on constate qu'il y a respectivement une augmentation de température de l'ordre de 18,0 °C et 22,0 °C dans l'entrée d'air entre 6h00 et 12h00. Par contre, l'augmentation de la température dans l'entrée d'air n'a pas affecté la température intérieure puisque les 21 et 22 avril 2005 le débit de ventilation a été augmenté de 2,18 m³.s⁻¹ à 3,82 m³.s⁻¹ et de 2,25 m³.s⁻¹ à 5,78 m³.s⁻¹ pour compenser le changement au niveau des conditions climatiques extérieures. Les 21 et 22 avril 2005, l'augmentation de température au niveau de l'entrée d'air a réduit le gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur de 55% et 66% respectivement. La forte diminution du gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment associée à une température constante à l'intérieur, implique une diminution au niveau de la production de chaleur sensible, bien que le débit de ventilation fut augmenté.

Ensuite, en après-midi entre 12h00 et 18h00 et ce pour les deux journées, on constate que la température dans l'entrée d'air est inférieure à celle de l'avant-midi. Cependant, on note une augmentation au niveau de la température ambiante (Graphique 30) ainsi que du débit de ventilation (Graphique 29). L'augmentation du débit de ventilation se justifie par le fait que le *Momentum* a détecté une augmentation de la température ambiante à l'intérieur du bâtiment. Donc, pour corriger cette augmentation de température, le débit de ventilation a été augmenté. Cette augmentation de la température ambiante combinée à une augmentation du débit de ventilation indique une hausse au niveau de la production de chaleur sensible (Graphique 30).



Graphique 30 Variations de température et de chaleur sensible pour des poulets âgés de 24 et 25 jours

Il est plausible d'expliquer les variations au niveau de la production de chaleur sensible en avant-midi par le fait que les poulets n'ont presque pas mangé durant la nuit (0h00 à 6h00). Donc, bien que le système de ventilation soit activé pour compenser l'augmentation de température dans l'entrée d'air et que l'intensité lumineuse soit augmentée, les poulets ne libèrent pas plus de chaleur sensible, car ils n'ont à peu près pas besoin d'évacuer de l'énergie hors de leur organisme afin de maintenir leur équilibre thermique.

Par la suite, l'augmentation de l'intensité lumineuse a pour effet d'encourager les poulets à manger. Alors, quelques heures après que les poulets aient mangé et que la moulée soit digérée, soit en après-midi entre 12h00 et 18h00, c'est à ce moment qu'ils ont le plus grand besoin de dégager de la chaleur, car ils ont ingéré une grande quantité d'énergie et ils doivent maintenir leur équilibre thermique. L'augmentation de la température intérieure alors que la température extérieure est demeurée stable en après-

midi peut être due à une augmentation de la production de chaleur sensible (Graphique 30). Donc, il est acceptable de proposer que les données des 21 et 22 avril 2005 montrent un effet de décalage au niveau de la production de chaleur causée par la consommation alimentaire.

Pour les données récoltées entre les 20 et 30 avril 2005, la production de chaleur et la température moyenne, pour chacune des photopériodes sont affichées dans le tableau XXII (Annexe, effet de l'intensité lumineuse). Le tableau XXII montre la production de chaleur alors que les lumières sont à 40% de leur intensité, soit environ 5 lux, ainsi que la production de chaleur lorsque les lumières sont complètement éteintes. Dans ce tableau, on observe que la production de chaleur moyenne diminue de 1 à 23% lorsque que les lumières sont éteintes en comparaison à la situation où ces mêmes lumières sont à 40% de leur intensité maximale. Lors de leurs expériences, Xin et al. (1996) ont observé que la production de chaleur totale des poulets à la noirceur peut être entre 24 et 26% inférieure à la chaleur totale produite lorsque les lumières sont allumées. De plus, on remarque que la température ambiante moyenne est moins élevée une fois que les lumières sont éteintes. En éteignant les lumières, il est possible de diminuer la température ambiante moyenne de 0,6 à 2,5 % sans même avoir à changer la consigne de température.

Ceci s'explique ainsi : en éteignant les lumières, les poulets cessent de bouger et de manger, donc ils libèrent moins de chaleur. La diminution de chaleur latente est due au fait que la diminution d'activité entraîne une diminution du rythme respiratoire (Aerts et al., 2003, 1997), impliquant du même coup une diminution de l'humidité libérée par les poulets.

7.8 Effet de la température sur la production de chaleur

Basé sur les travaux de Tzschentke et al. (1986, 1996, 2001), Wiernusz (1998) et sur le guide de nutrition Cobb, il est permis de croire que la production de chaleur totale en

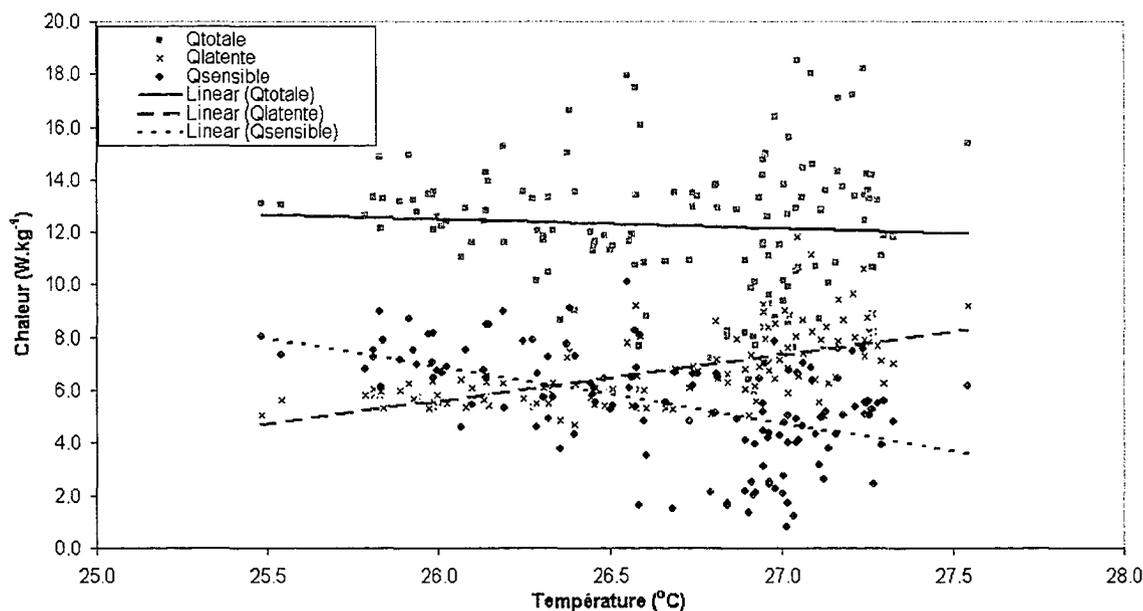
fonction de la température ambiante suit une trajectoire parabolique la plupart du temps. Pour une vitesse de l'air constante, la production de chaleur sensible diminue linéairement lorsque la température ambiante diminue (Tzschentke et al., 1996). Ce phénomène s'explique par le fait que plus la température ambiante augmente, plus elle se rapproche de la température de la surface du poulet, diminuant ainsi le gradient de température responsable des échanges de chaleur sensible. Par contre, si la température ambiante dépasse le seuil critique de 37,8 °C (Timmons et al. , 1993), la production de chaleur sensible devient négative, car le gradient de température est inversé alors le poulet gagne de la chaleur sensible. À ce moment, la production de chaleur totale commence à augmenter (Jurkschat et al., 1986; Nichelmann et al., 1986) puisque le poulet doit évacuer de son système l'énergie ingérée à partir de la moulée, l'énergie gagnée sous forme sensible et l'énergie associée au coût métabolique de la respiration (Wiernusz, 1998; Teeter et Belay, 1996). En pratique, ce genre de situation peut être observé en été lors des canicules du mois de juillet alors que le système de ventilation, étant à sa capacité maximale, ne suffit plus à maintenir la température ambiante égale à la consigne.

Bien qu'il y ait eu quelques journées chaudes durant la période où furent récoltées les données, les conditions extérieures n'ont jamais été assez élevées pour provoquer un état de stress thermique chez les poulets. De plus, la température ambiante n'a jamais atteint 37,8 °C, donc il ne nous a pas été possible d'obtenir des valeurs de production de chaleur sensible négatives. Ensuite, les données ont été récoltées à l'intérieur d'un bâtiment avicole commercial durant les mois de mars, avril et mai 2005, il est donc difficile d'obtenir de grandes variations de conditions d'élevage, puisque les systèmes de ventilation et de chauffage ont toujours eu la capacité de s'adapter aux conditions extérieures. De plus, le but du système de contrôle *Momentum* est d'éviter ce genre de situation. Néanmoins, il sera possible d'observer des conditions d'élevages extrême lors des journées chaudes et humides de l'été 2005.

Durant l'élevage, le débit de ventilation est peu élevé, donc la vitesse de l'air au plancher est très faible. Il peut arriver que lorsque la température augmente au deçà de la consigne, le débit de ventilation soit augmenté pour corriger la température. Au début de l'élevage, la température est principalement contrôlée par les unités de chauffage et le débit de ventilation est à son minimum. Mais au fur et à mesure que les poulets vieillissent, la température de consigne diminue et le débit minimal augmente pour évacuer une partie de l'humidité et contrôler la qualité de l'air. Alors, la température devient principalement contrôlée par le système de ventilation. Donc, en augmentant le débit de ventilation au-dessus du seuil minimum, ceci a pour effet d'augmenter la vitesse de l'air au niveau du plancher et favoriser les échanges de chaleur sensible. On peut affirmer que la chaleur totale produite par les poulets âgés entre 1 et 18 jours nous donne un excellent indice du confort des poulets lorsque la vitesse de l'air au sol est pratiquement nulle, et que seules la température et l'humidité relative varient. Entre 19 et 38 jours, l'augmentation du débit de ventilation pour maintenir la température a pour effet d'induire un courant d'air au niveau des poulets. Donc, pour étudier l'effet de la température sur la production de chaleur, il est nécessaire d'analyser les données alors que le débit de ventilation demeure constant. Afin d'obtenir des données alors que la vitesse de l'air au sol est minimale, il est nécessaire de récolter des données durant l'hiver alors que le débit de ventilation est maintenu au minimum.

Le graphique 31 nous présente un poulet dans sa zone de confort alors que la consigne est de 26,1 °C. Au cours de cette journée, on observe une température moyenne (26,7°C) légèrement au dessus de la consigne, le débit de ventilation moyen est de 3,1 m³.s⁻¹ et la déviation standard moyenne est de 0,74 m³.s⁻¹, alors que le débit de ventilation minimal est de 2,0 m³.s⁻¹. On peut donc prétendre que la vitesse de l'air au niveau du sol était très faible. Cependant, même si le débit de ventilation a été augmenté jusqu'à un maximum de 5,4 m³.s⁻¹, ce n'était pas suffisant pour diminuer la température ambiante, car la température intérieure a atteint un maximum de 27,5°C.

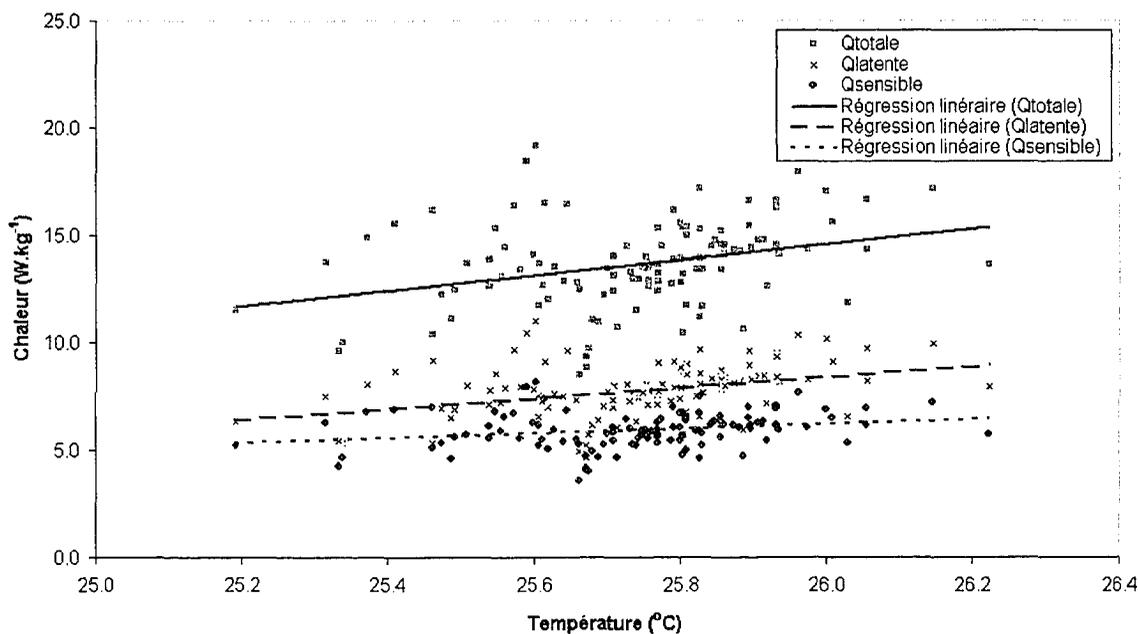
Néanmoins, à partir du graphique 31, on observe une tendance indiquant que lorsque la température est augmentée, la production de chaleur totale demeure relativement constante, car la pente de la régression linéaire (Q_{totale}) est faible, soit $-0,36$. La régression linéaire de la production de chaleur latente (Q_{latente}) donne une pente positive ($1,77$). On constate aussi que la chaleur libérée sous forme sensible diminue, car la pente de la régression linéaire (Q_{sensible}) est négative ($-2,13$). En étudiant la variation du débit de ventilation dans la journée, on peut affirmer que celui-ci est demeuré relativement constant, donc la diminution de chaleur sensible est attribuable à une augmentation de la température ambiante, car le gradient de température entre l'air ambiant et la température à la surface du poulet a diminué. Si le débit de ventilation avait été plus élevé, il est possible qu'une augmentation de la température ambiante n'ait pas impliqué une diminution de la chaleur sensible, puisqu'en augmentant le débit de ventilation, on augmente la vitesse de l'air au sol favorisant ainsi les échanges de chaleur par convection. De cette façon, la diminution du gradient de température aurait été compensée par une augmentation de la vitesse de l'air.



Graphique 31 Production de chaleurs totale, latente et sensible en fonction de la température pour un poulet âgé de 21 jours

Lorsque la vitesse de l'air est maintenue constante et que la température augmente, le poulet doit libérer plus de chaleur sous forme latente pour maintenir son équilibre thermique, puisqu'il libère moins de chaleur sensible. Ainsi, en étant en mesure de s'adapter aux conditions d'élevage sans même avoir à augmenter sa production de chaleur totale, on pourrait interpréter ce graphique comme étant un exemple de conditions d'élevage où le poulet se trouve dans sa zone de confort. Ces tendances sont conformes à la théorie voulant que la chaleur sensible diminue et que la chaleur latente augmente lorsque la température ambiante augmente. Cependant, ces données ne sont valables que pour des poulets de chair âgés de 21 jours pesant 0,680 kg en moyenne et pour des températures se situant entre 25,5 °C et 27,5 °C.

Le graphique 32 présente l'effet possible d'une température trop élevée sur la production de chaleur. Puisque les données ont été récoltées pendant que le *Momentum* est en mode chauffage, la température est contrôlée par les unités de chauffage au propane pendant que le système de ventilation fonctionne de manière à assurer un changement d'air minimum. Par contre, le débit de ventilation est augmenté si la température ambiante dépasse un certain seuil. Il est intéressant de noter que la consigne est de 24,2 °C durant cette journée, cependant on constate au graphique 32 que la température moyenne au niveau des poulets est 1 à 2 °C au-delà de la consigne.



Graphique 32 Production de chaleurs totale, latente et sensible en fonction de la température pour des poulets âgés de 30 jours

En effectuant une régression linéaire pour la production de chaleur totale, on obtient une pente de 3,6. Donc, contrairement au graphique 31, on constate que la température a un effet beaucoup plus important sur la production de chaleur totale et ce même si la température varie très peu au cours de la journée. La régression linéaire effectuée sur les données de production de chaleur latente est conforme à la théorie voulant que plus la température augmente, plus le poulet libérera de la chaleur sous forme latente, puisque la pente de la régression linéaire est de 2,5. Cependant, la tendance observée au niveau de la production de chaleur sensible va à l'encontre de ce qui a déjà été rapporté dans la littérature puisque la pente de la régression linéaire pour la production sensible est de 1,08.

Sachant que le débit de ventilation moyen au cours de cette journée est de $4,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et que la déviation standard moyenne est de $0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ alors que le débit minimal est de $2,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, on peut affirmer que le débit de ventilation était suffisamment élevé tout au long de la journée pour provoquer un courant d'air au niveau du sol. Donc, afin de compenser pour une température ambiante légèrement élevée, l'augmentation de la

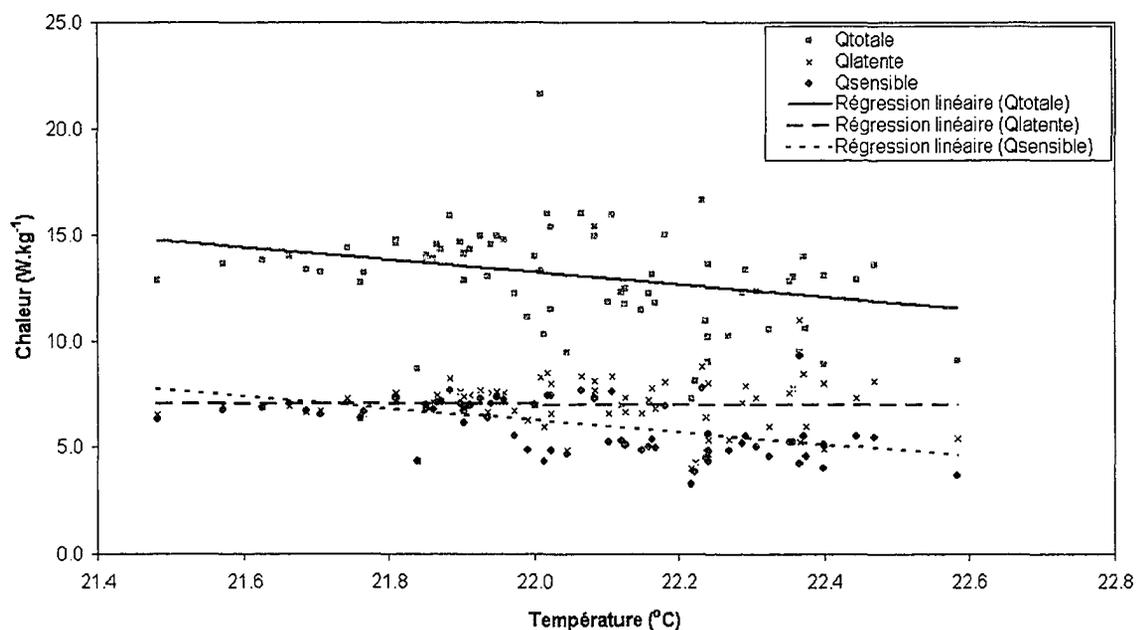
vitesse de l'air a eu pour effet d'augmenter les échanges de chaleur par convection, augmentant du même coup la production de chaleur sensible. Encore une fois, il est difficile de conclure définitivement sur l'effet de la température sur la production de chaleur, puisque la température varie très peu au cours d'une même journée (25,2 °C à 26,2 °C). De plus, si elle s'éloigne de la consigne, le débit de ventilation augmentera les échanges d'air pour corriger la situation. Donc, la vitesse de l'air au niveau du sol est rarement constante. Le graphique 32 est valable pour des poulets âgés de 30 jours pesant en moyenne 1,30 kg.

Finalement, sachant que la température au niveau des poulets a été au-delà de la consigne durant la journée entière, il est possible de croire que les poulets ont eu légèrement chaud, puisqu'en théorie, une augmentation de la production de chaleur peut être due à des conditions d'élevage trop chaudes (Jurkschat et al., 1986; Tzschentke et al., 1986).

Il est important de mentionner que pour comprendre l'effet de la température sur la production de chaleurs totale, latente et sensible, certains chercheurs ont utilisé des températures de 15,6 °C, 21,1 °C et 26,7°C (Reece et Lott, 1982a), 35 °C, 38 °C et 41 °C (Simmons et al., 1997) et 5 °C à 40 °C (Jurkschat et al., 1986; Tzschentke et al., 1986). Alors, il est évident que pour des températures extrêmes, il est plus facile de voir la relation entre la température et les productions de chaleurs, que si la température ne varie que de 1 à 2 °C au cours d'une même journée et que la vitesse de l'air demeure constante.

Le graphique 33 présente des données qui suivent les tendances observées dans la littérature (Xin et al., 2001; Simmons et al., 1997; Jurkschat et al., 1986; Longhouse et al., 1960) démontrant que pour une température ambiante sous la température thermoneutre, une augmentation de la température ambiante entraîne une diminution des chaleurs totale et sensible. Il est important de noter que ces tendances sont observées sur

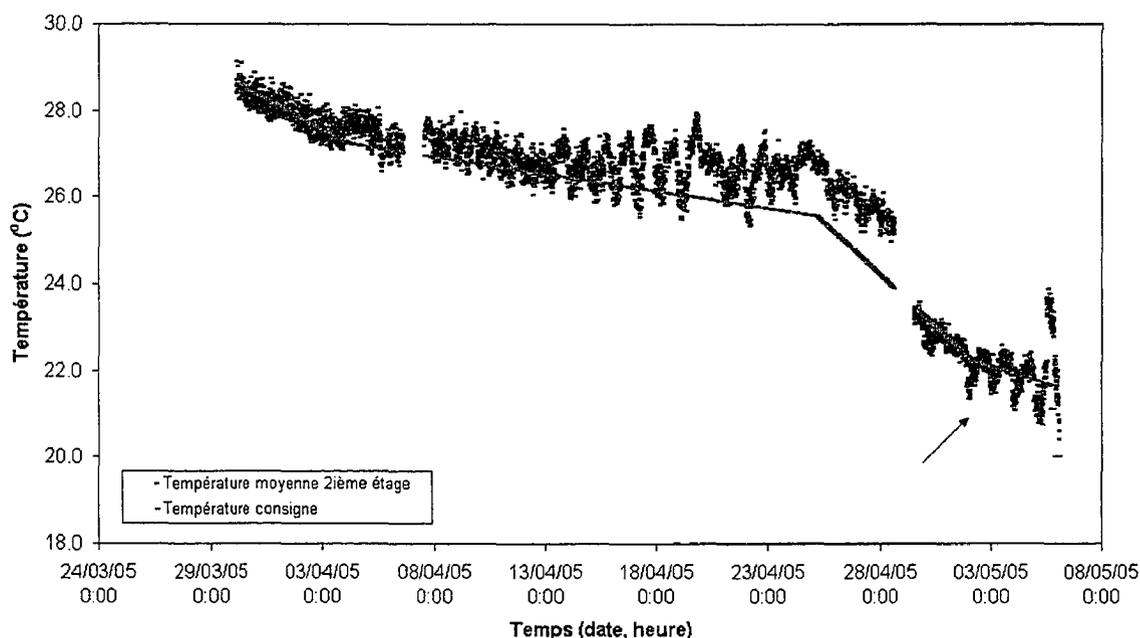
une très petite échelle puisque la température ambiante varie de 1,1°C au plus au cours d'une même journée. La régression linéaire (Q_{totale}) montre que la production de chaleur totale augmente lorsque la température diminue car la pente de la régression est de -2,9. Les pentes des régressions linéaires des chaleurs latente ($Q_{latente}$) et sensible ($Q_{sensible}$) sont respectivement de 0,0 et - 2,9. Au graphique 33, on remarque que les poulets semblent avoir froid, car une baisse de la température entraîne une augmentation de la production de chaleurs totale et sensible Tzchentke et al. (1986,1996), alors que la production de chaleur latente n'est pas affectée par une baisse de température (Scott, 1983) sous la température thermoneutre. De plus, la température moyenne au cours de cette journée est de 22 °C alors que la consigne est de 22,2 °C.



Graphique 33 Production de chaleurs totale, latente et sensible en fonction de la température pour des poulets âgés de 36 jours ayant un poids moyen de 1,67 kg

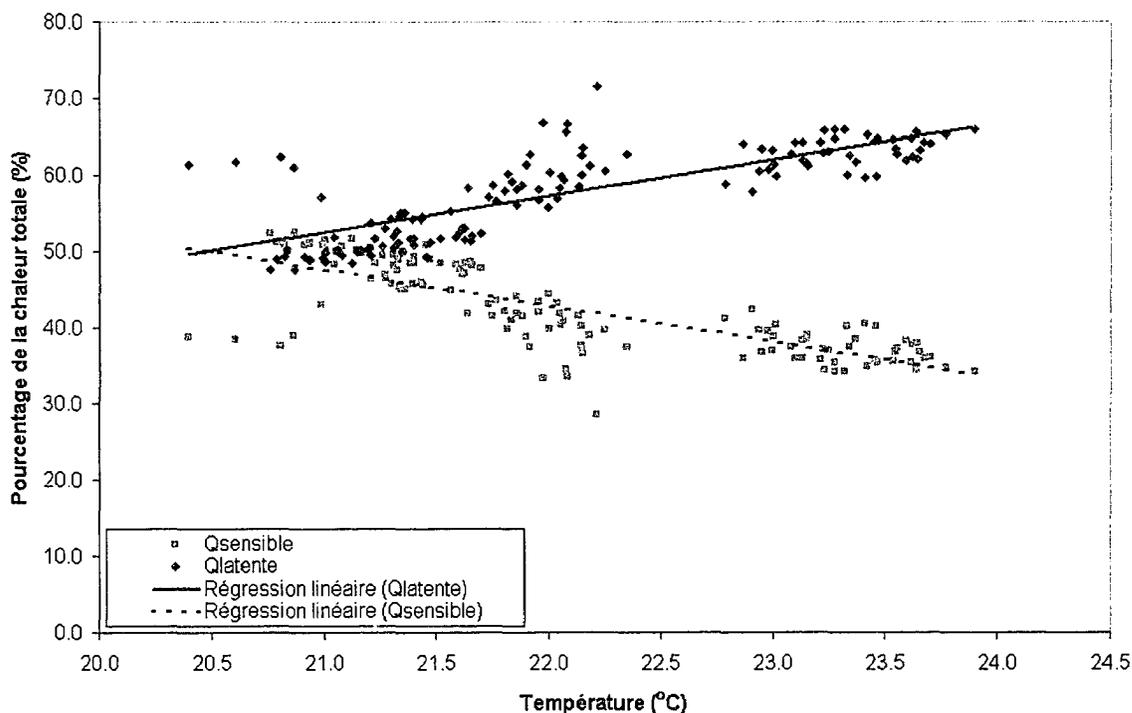
Étant donné que le système *Momentum* est en mode chauffage, celui-ci s'assure que la température moyenne à l'intérieur de la salle d'élevage n'est jamais inférieure à la consigne. Le graphique 34 montre que la température ambiante moyenne au 2^{ème} étage est généralement égale ou supérieure à la consigne. Donc, les conditions d'élevage ont

été gérées de façon adéquate par le *Momentum*, car il a empêché que les conditions d'élevage soient telles que les poulets tombent en état de stress thermique. Cependant, on constate au graphique 34 que la température moyenne a diminué sous la consigne à plusieurs reprises vers la fin de l'élevage. Donc, c'est pour cette raison qu'il est acceptable de proposer que les poulets aient eu froid lorsqu'ils étaient âgés de 36 jours, le 3 mai 2005.



Graphique 34 Consigne et moyenne de température pour les données entre le 31 mars et 5 mai 2005

Le graphique 35 montre que pour une consigne de température de 20,9 °C, une augmentation de la température implique bel et bien une augmentation de la proportion de chaleur latente au détriment de la chaleur sensible telle qu'observée par Longhouse et al. (1960).



Graphique 35 Pourcentage de la chaleur totale sous formes latente et sensible pour un poulet âgé de 38 jours ayant un poids moyen de 1,85 kg

Il est important de noter que ces données ont été récoltées dans un bâtiment avicole commercial équipé d'un contrôleur d'environnement de production *Momentum*, et que ce contrôleur était en mode chauffage alors la température à l'intérieur du bâtiment varie très peu au cours d'une même journée puisque cette dernière est étroitement contrôlée, d'où la difficulté d'observer la relation entre la température et les chaleurs totale, latente et sensible. Par contre, en été, la température ambiante à l'intérieur est plus influencée par les fluctuations de la température extérieure. Donc, les nuits fraîches et les journées chaudes en été feront varier les conditions environnementales à l'intérieur du bâtiment de façon considérable. De plus, l'augmentation du débit de ventilation en été, qui permet de contrôler la température intérieure, permettra d'observer l'effet de la vitesse d'air sur la production de chaleurs totale, latente et sensible.

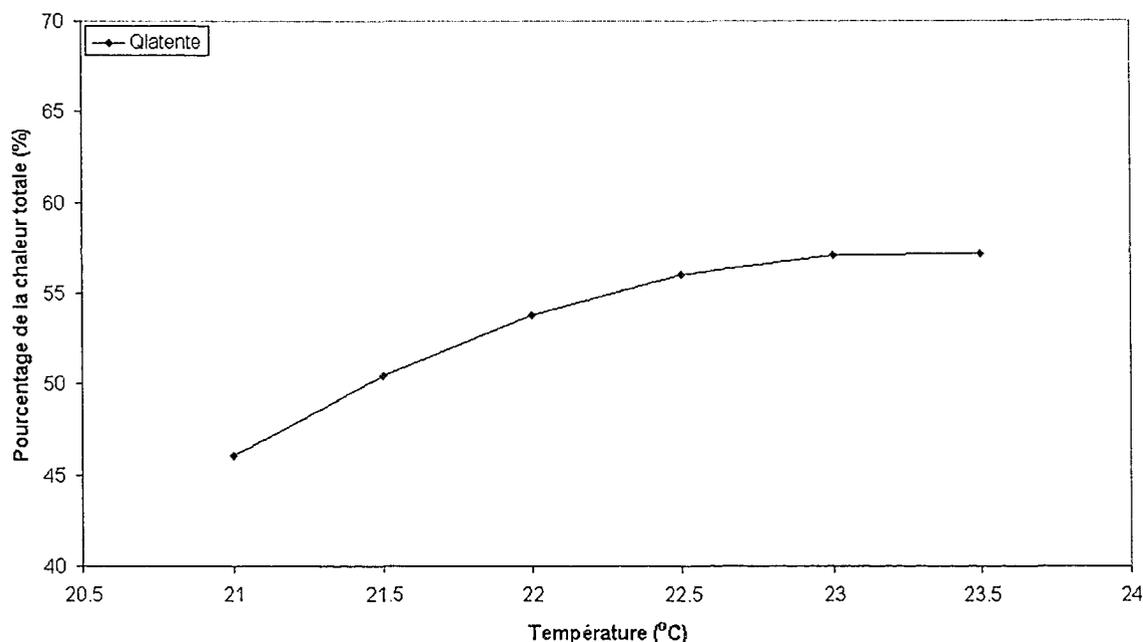
7.9 Effet de l'humidité sur la production de chaleur

Les données récoltées dans le cadre de ce projet ont permis de développer un modèle mathématique (équation 7.1) exprimant le pourcentage de chaleur latente produite en fonction de la température et de l'humidité relative semblable à celui publié par Xin et al. (2001). Les performances du modèle développé dans le cadre de ce projet sont comparables à celui développé par Xin et al. (2001) avec des coefficients R^2 de 0.598 et 0.627 respectivement. Étant donné que les données récoltées proviennent d'un seul élevage, entre le 31 mars et le 5 mai 2005, le modèle développé n'est applicable que pour des températures entre 21,0 °C et 23,5 °C (consigne de 22,5°C), une humidité relative entre 65% et 90% et un poids de 1,52kg.

$$\%Q_{latente} = -440,786 + 43,507 * T^2 - 0,894 * T + 0,394 * RH \quad (7.1)$$

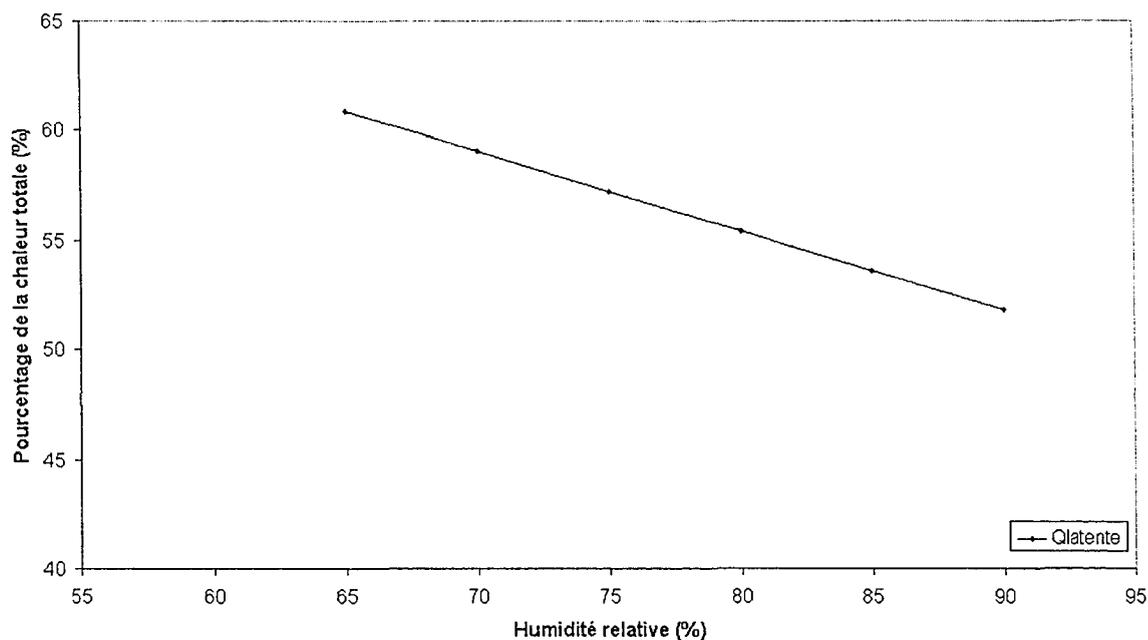
On observe au graphique 36 qu'une augmentation de la température ambiante de l'ordre de 2°C pour une humidité relative de 75% a pour effet d'augmenter de 10% la proportion de chaleur produite sous forme latente. Cette situation est tout à fait normale, puisqu'advenant une augmentation de la température, le poulet augmente son rythme respiratoire de manière à évacuer de l'eau de son organisme afin de maintenir son équilibre thermique. De plus, on remarque que pour des températures plus élevées, la production de chaleur latente semble atteindre un plateau. En fait, il serait plus logique d'observer une augmentation de la chaleur latente en fonction de la température tel qu'observée par Xin et al. (2001), au lieu d'un plateau. Ceci peut être expliqué par le fait que les données ont été récoltées lors d'une saison où la température à l'intérieur du bâtiment est bien contrôlée, donc il y a peu de données pour des températures très basses ou très élevées, d'où la présence d'un plateau. C'est en acquérant des données durant l'été qu'il sera possible de développer des modèles plus robustes à partir desquels on peut calculer la proportion de chaleur latente en fonction de la température, de

l'humidité relative et du poids et ce sur une plus grande plage de températures et d'humidités relatives.



Graphique 36 Chaleur latente en fonction de la température

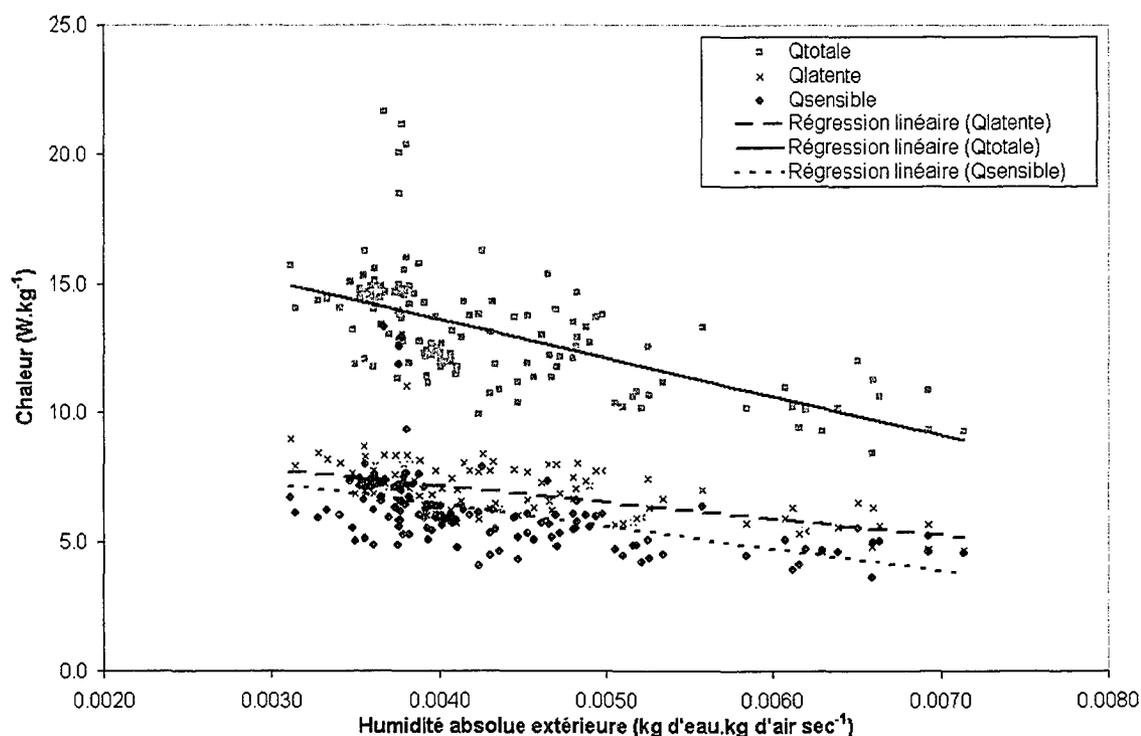
Du graphique 37, on observe que pour une température de 23,1°C, une augmentation de l'humidité relative de 70% à 85 % entraîne une diminution de l'ordre de 6% de la production de chaleur latente comparativement à une diminution de 5% observée par Xin et al. (2001). Cette situation est normale, car à température constante, plus il y a d'eau dans l'air extérieur, plus les poulets sont limités dans leur capacité à libérer de la chaleur latente, étant donné que l'air est plus proche de son degré de saturation. Il est important de noter que puisque les données ont été récoltées entre mars et mai 2005, les conditions climatiques extérieures font en sorte que l'air contient peu d'humidité, car la température est basse. Donc, bien que l'humidité relative extérieure soit élevée, lorsque l'air extérieur entre dans le bâtiment, il est mélangé à de l'air chaud, pouvant contenir beaucoup plus d'eau que l'air extérieur. Donc, si les poulets ont trop chaud ils ne sont pas limités à libérer de la chaleur sous forme latente.



Graphique 37 Chaleur latente en fonction de l'humidité relative

Les tendances observées au graphique 38 montrent qu'une augmentation de la quantité d'eau dans le système, soit par une augmentation de l'humidité relative à température constante, une augmentation de température alors que l'humidité relative est constante, ou bien une augmentation à la fois de la température et de l'humidité relative, implique une diminution de chaleurs totale et latente telle que prévu par la théorie. Comme il a été expliqué précédemment, l'ajout d'eau dans la salle d'élevage limite la capacité des poulets à libérer de la chaleur latente. Lors des journées d'été où la température et l'humidité relative extérieures sont élevées, la chaleur sensible est difficilement libérée par les poulets du à la température de l'air. Les poulets doivent alors libérer de la chaleur sous forme latente. Cependant, l'air entrant dans le bâtiment contient plus d'eau, alors la capacité de l'air à absorber l'humidité produite par les poulets est réduite. De plus, si ces conditions persistent pendant toute une journée, le soir quand l'air est saturé d'humidité et que le soleil se couche, la température diminue rapidement et entraîne une augmentation de l'humidité relative extérieure. Une diminution de la température réduit la capacité de l'air à contenir de l'eau et l'augmentation de l'humidité relative limite la

quantité d'eau pouvant être évaporée dans l'air. En étant limités par la quantité d'eau qui peut être évacuée hors de leur organisme, les poulets ne peuvent pas libérer leur surplus d'énergie sous forme de chaleur latente. Alors, leur température corporelle augmentera, car ils ne peuvent pas maintenir leur équilibre thermique par rapport à leur environnement. De longues périodes de stress dues à ces conditions d'élevage résultent en l'épuisement ainsi que la mort des poulets due à un coup de chaleur.



Graphique 38 Effet de l'humidité absolue extérieure sur la production de chaleur totale, latente et sensible pour un poulet âgé de 35 jours ayant un poids moyen de 1,6 kg.

Le graphique 38 montre qu'une augmentation de l'humidité absolue implique une diminution de la chaleur sensible. Selon la théorie, l'ajout d'eau dans le système ne devrait pas affecter la production de chaleur sensible. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que le système de contrôle *Momentum* était en mode chauffage, donc celui-ci avait pour consigne de maintenir une température stable sans se préoccuper de l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment tout en maintenant une ventilation minimale

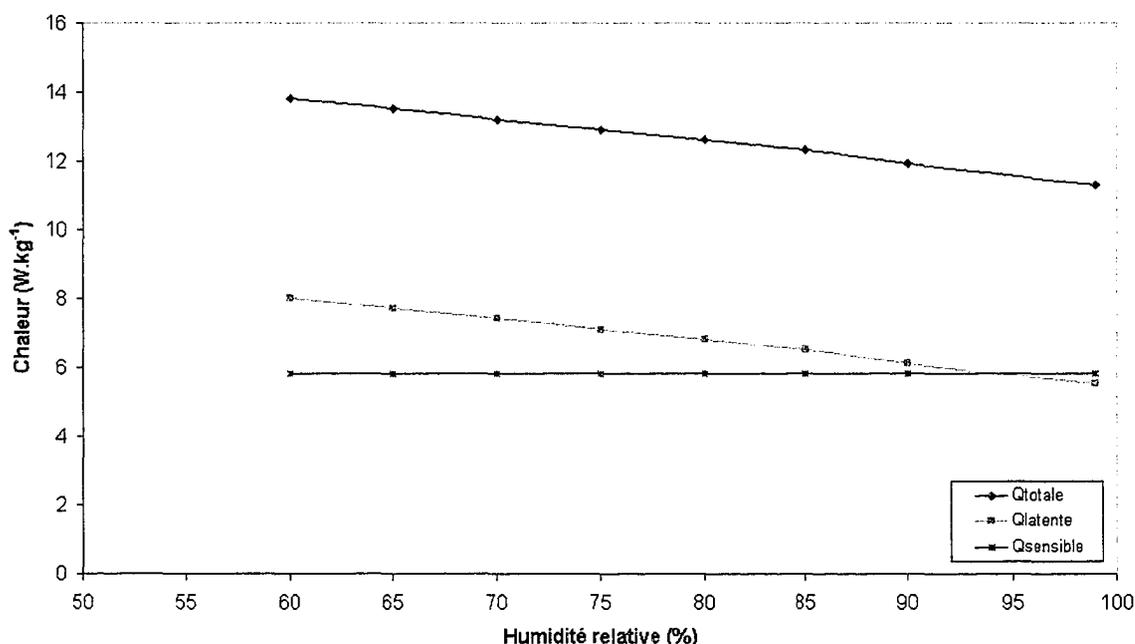
afin d'assurer un apport suffisant en oxygène et une qualité d'air adéquate. C'est pourquoi l'humidité relative intérieure varie beaucoup au cours d'une même journée alors que la température reste stable.

À ce stade, il est important de se rappeler que le modèle mathématique des échanges thermiques et d'humidité développé dans le cadre de ce projet est en fait une balance calorimétrique indirecte qui permet de calculer la chaleur sensible produite par les poulets à partir de la chaleur produite par différentes sources (système de chauffage, moteurs électriques, lumières) et pertes d'énergie (système de ventilation et bâtiment) dans le système. C'est principalement à partir du temps de fonctionnement de chacun des équipements qu'il est possible d'en déduire l'énergie produite ou évacuée.

Étant donné que le système est en mode chauffage durant la saison froide, le débit de ventilation est maintenu au minimum. Alors, il y a une quantité minimale d'eau qui est évacuée du système. Cependant, la quantité d'eau évacuée du système est inférieure à la quantité d'eau produite par les poulets, donc il y a une augmentation de l'humidité relative, car la température est maintenue constante. Sachant qu'une masse d'air humide nécessite beaucoup plus d'énergie qu'une masse d'air sec pour être maintenue à la même température, on constate alors que le système de chauffage est une source de chaleur artificielle qui sert à chauffer l'eau contenue dans l'air afin de maintenir la température ambiante constante.

Puisque le débit de ventilation et la température restent inchangés alors que le système de chauffage fonctionne, ceci implique mathématiquement une diminution de la production de chaleur sensible par le poulet. Si la chaleur sensible libérée par le poulet était calculée directement à partir de la température à la surface de son corps, il est probable qu'une augmentation de la quantité de l'eau dans l'air n'affecterait pas les échanges par convection, conduction et radiation si la température demeure constante.

À partir des conditions climatiques simulées à l'aide du modèle d'échange thermique et d'humidité, le graphique 39 confirme l'explication donnée plus haut, car si la température et l'humidité relative intérieures sont maintenues constantes, alors on observe que l'humidité relative n'a aucun effet sur la production de chaleur sensible, alors que les chaleurs totale et latente diminuent lorsque l'humidité relative augmente. En pratique, pour observer ce phénomène, il est nécessaire d'obtenir des valeurs de production de chaleurs totale, latente et sensible pour des températures extérieures plus élevées que la normale entre 25°C et 35°C et une humidité relative extérieure entre 70 et 90%. De cette façon, seul le système de ventilation sera utilisé pour maintenir la température et l'humidité relative à un niveau adéquat.



Graphique 39 Démonstration de l'effet de l'humidité relative sur le modèle mathématique

7.10 Effet de la vitesse de l'air sur la production de chaleur

Bien que l'un des objectifs de ce projet soit de quantifier l'effet de la vitesse de l'air sur la production de chaleurs totale, latente et sensible, des délais et un bris d'équipement ont empêché l'archivage des vitesses de l'air au niveau du plancher durant l'élevage. Les

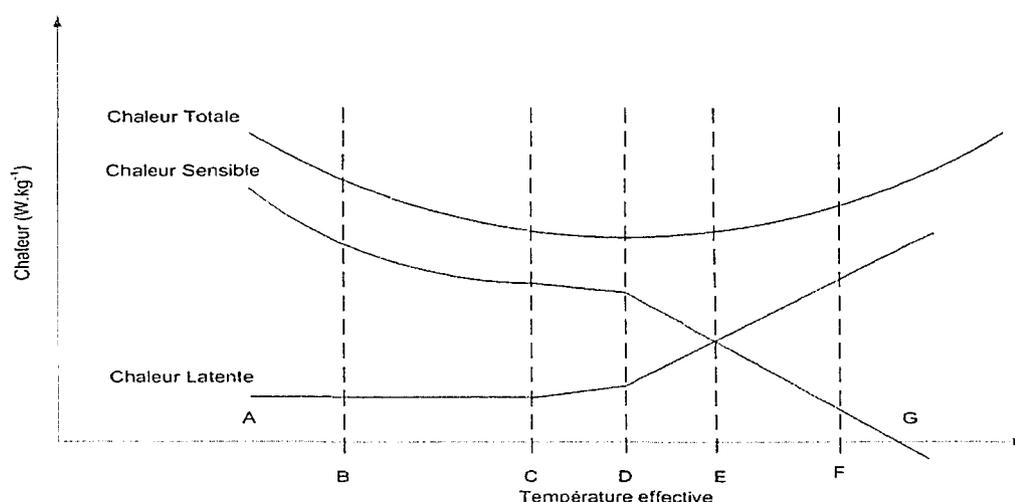
capteurs de vitesse d'air disponibles sur le marché sont encore trop dispendieux pour être implantés à grande échelle dans l'industrie. De plus, les technologies telles que la thermoanémométrie rendent le capteur trop fragile puisque celui-ci est appelé à opérer dans des conditions extrêmes (humidité relative élevée et poussière). Donc, il est proposé d'étudier l'effet du débit de ventilation sur la production de chaleur au lieu de la vitesse de l'air au sol. Or, la majorité des données ont été récoltées alors que le débit de ventilation est à son minimum afin d'assurer une bonne qualité de l'air. Alors, il n'est pas possible jusqu'à maintenant de vérifier l'influence du débit de ventilation sur la production de chaleurs totale, latente et sensible. Par contre, en continuant d'acquérir des données durant l'été sur le site expérimental, il sera possible de vérifier l'influence du débit de ventilation vers la fin de l'été. Étant donné que les capteurs de vitesse d'air ne sont pas assez robustes pour mesurer la vitesse de l'air au niveau du sol pendant l'élevage, il serait plus simple d'utiliser les capteurs pour calibrer le système de ventilation. Il suffirait d'étudier la vitesse de l'air à certains points stratégiques et de vérifier l'influence du débit de ventilation et de la position des panneaux des entrées d'air sur la vitesse de l'air au sol. Ensuite, une relation mathématique serait développée afin de prédire la vitesse au sol en fonction du débit et de l'ouverture des entrées d'air.

7.11 Stratégie de contrôle environnemental

Le but ultime de la stratégie de contrôle proposée est d'optimiser la chaleur devant être évacuée de l'organisme des poulets, selon l'énergie consommée. Connaissant les proportions de chaleurs sensible et latente qui sont libérées par le poulet, la stratégie de contrôle sera en mesure de maximiser la production de chaleur sensible et ainsi minimiser la production de chaleur latente tout en s'assurant qu'aucun stress n'est causé à l'animal. En minimisant la chaleur latente, le poulet ne gaspille pas son énergie à tenter d'évacuer le surplus d'énergie de son organisme par la respiration afin de maintenir son équilibre thermique. Donc, en favorisant la perte d'énergie sous forme sensible, le poulet n'a aucun effort à fournir afin de maintenir son équilibre thermique. Par conséquent, l'indice de conversion alimentaire s'en trouvera amélioré. Idéalement, la production de

chaleurs totale, latente et sensible devrait toujours se situer dans la zone C-D (Graphique 40).

C'est en se basant sur le graphique 40 que les principes de base de la stratégie de contrôle, basés sur le concept de température effective et proposés dans le cadre de ce projet, sont expliqués. À la suite de l'hypothèse émise par Tzschentke et al (2000), si des poulets de même poids sont confrontés à des conditions environnementales différentes (température, humidité relative et vitesse de l'air) les menant à produire la même quantité de chaleur, alors on peut affirmer qu'ils ressentent la même température effective. Maintenant que nous sommes en mesure d'évaluer les productions de chaleurs totale, latente et sensible des poulets et que nous comprenons l'effet de certains paramètres sur la production de chaleur, il est possible de développer une nouvelle approche de contrôle environnemental. Il est important de noter que la production de chaleur animale tient compte de plusieurs paramètres difficiles à mesurer (vitesse de l'air, densité animale, race, diète alimentaire, emplumement, etc.) et qui sont présentement ignorés par la majorité des contrôleurs sur le marché.



Graphique 40 Production de chaleur en fonction de la température effective
(Adapté de Scott, 1983)

Si une très faible augmentation de la chaleur totale, une augmentation de la chaleur latente ainsi qu'une diminution de la chaleur sensible sont détectées (Zone D-E) simultanément, le système de ventilation devrait être activé. En activant le système de ventilation, on permet à la température de diminuer alors que l'augmentation de la vitesse de l'air au niveau du poulet encouragera la production de chaleur sensible. Même si l'activation du système de ventilation entraîne une diminution de l'humidité à l'intérieur du système, ceci n'affectera pas directement la production de chaleur latente, puisqu'en favorisant la chaleur sensible, le poulet ajustera sa production de chaleur latente en conséquence. Pour avoir un bon contrôle au niveau des échanges convectifs, il est impératif que les entrées d'air soient gérées de manière à permettre que la vitesse de l'air au niveau des poulets soit évaluée et bien contrôlée.

Ensuite, si la production de chaleur totale et latente continue d'augmenter, que la chaleur sensible diminue à un point tel que la production de chaleur latente est supérieure à la chaleur sensible (Zone E-G) et que le système de ventilation est à son débit maximal, alors l'activation des brumisateurs peut s'avérer nécessaire (Point E). Il est important de noter que si l'air extérieur est chaud et très humide, la mise en marche de brumisateurs n'est pas très efficace. Par exemple, lors d'une journée où la température et l'humidité relative extérieures sont respectivement de 30 °C et 70% et que les conditions intérieures sont de 33 °C et 80%, alors l'activation des gicleurs jusqu'à ce que l'humidité relative intérieure atteigne 90% engendrera une baisse de la température ambiante de seulement 1,5 °C. Il est important de se rappeler qu'une humidité relative élevée doit être évitée à tout prix, car les conditions de la litière vont se détériorer très rapidement et ces conditions contribuent à la production d'ammoniaque et de champignons. Deuxièmement, la mise en marche des brumisateurs contribue à saturer l'air d'eau, ce qui a pour effet de limiter la production de chaleur latente des poulets. Dans ce genre de situation, les poulets peuvent facilement se retrouver en état de stress hyperthermique, même si la température à l'intérieur diminue sensiblement, car ils n'ont aucun moyen

pour réguler leur métabolisme autrement qu'en diminuant leur consommation alimentaire (Teeter et Belay, 1996).

Donc, advenant le cas d'une journée chaude et humide où la production de chaleurs totale, latente et sensible se situent dans la zone E-F, il peut-être plus avantageux de diminuer temporairement l'intensité des lumières dans le bâtiment afin de réduire l'activité animale et la consommation de moulée. De plus, en diminuant l'activité à l'intérieur du bâtiment, la production de chaleur sera moins grande que lorsque les poulets sont actifs. En dernier recours, il est même suggéré de restreindre l'accès à la moulée (Zone F-G) pour en minimiser l'ingestion et la production de chaleur tel que suggéré par Wiermusz et Teeter (1993). Cependant, en ajoutant l'accès à la moulée comme paramètre de contrôle, on doit rappeler que l'application de cette mesure de correction doit être effectuée trois heures avant un stress hyperthermique pour que les conséquences soient ressenties (Teeter et Belay, 1996). Donc, l'intégration de l'accès à la moulée comme paramètre de contrôle afin de réduire le stress hyperthermique pourrait être une option avantageuse dans un contrôleur utilisant les conditions climatiques dans une stratégie de contrôle prédictive.

Advenant le cas où la production de chaleur totale diminue sous le point F, les restrictions sur la moulée et l'intensité lumineuse pourraient être levées, ce qui aurait pour effet d'encourager l'activité animale à l'intérieur du bâtiment. Ensuite, l'arrêt des brumisateurs peut être envisagé (Point E). Puisque la mise en marche des brumisateurs a augmenté l'humidité relative intérieure et réduit la capacité des poulets à libérer de la chaleur sous forme latente, il est primordial de continuer de ventiler tant que les conditions climatiques extérieures le permettent afin de rétablir l'humidité relative sous un seuil acceptable (60-70%) et de maintenir les conditions d'élevage à un niveau idéal (Zone C-D).

Si une forte augmentation de la production de chaleurs totale et sensible ainsi qu'une diminution de la température ambiante sont détectées sans qu'il y ait pour autant une diminution ou une augmentation de la chaleur latente, il est nécessaire d'activer le système de chauffage tout en réduisant le débit de ventilation à son minimum pour évacuer les gaz nocifs et les poussières. Les entrées d'air doivent être opérées de façon à maintenir un différentiel de pression statique élevé (7,46 à 24,48 Pa) afin que la vitesse de l'air frais soit assez élevée pour lui permettre de se réchauffer avant de tomber au niveau des poulets ainsi que d'assurer un bon mélange d'air.

CONCLUSIONS

À la suite de l'analyse des résultats obtenus sur les productions de chaleurs totale, latente et sensible dérivés à l'aide du modèle mathématique développé dans le cadre de ce projet, on peut affirmer que le modèle proposé est valide. C'est en utilisant les concepts de balances thermique et d'humidité que les quantités de chaleurs totale, latente et sensible produites par les poulets ont été calculées. Ce modèle a été validé à l'aide de l'équipement que l'on retrouve traditionnellement sur des sites de production avicole commerciaux (soigneurs, ventilateurs, entrées d'air, lumières, unités de chauffage et brumisateurs) ainsi que d'un automate programmable *Momentum*, qui fut converti en système d'acquisition de données pour les besoins de ce projet.

L'influence de certains paramètres d'élevage (humidité absolue, masse et intensité lumineuse) sur la production de chaleurs totale, latente et sensible a été démontrée. Bien qu'une partie des données récoltées jusqu'à présent permet d'observer certaines tendances quant à la production de chaleurs totale et latente, il en est autrement pour la production de chaleur sensible due à un manque de données (températures et vitesses d'air). Les données récoltées permettent de confirmer ce que plusieurs ont déjà avancé, soit que les données concernant la production de chaleur des poulets doivent être constamment mises à jour étant donné la sélection génétique effectuée par des compagnies telles que Cobb et Ross.

De plus, pour parvenir à des résultats sur la production de chaleur comparables à ceux présentés dans la littérature, il est nécessaire d'être en mesure d'évaluer le débit de ventilation avec précision. C'est pourquoi, une méthodologie permettant de développer des modèles mathématiques pour différents types de ventilateurs est proposée à la suite de ce projet.

La vitesse de l'air fut étudiée durant l'expérience, cependant la fragilité des capteurs utilisés rend leur implantation en industrie impossible à ce jour. Afin qu'ils soient implantés en industrie, les capteurs devront être à prix plus abordables et beaucoup plus robustes.

Ensuite, il a été montré que les valeurs des résistances thermiques des matériaux d'isolation que l'on retrouve dans les différents ouvrages de référence ne reflètent pas la réalité. Bien que le bâtiment où se déroule l'expérience ne soit âgé que de 2 ans, il a été montré que la résistance équivalente de chacune des surfaces, calculée théoriquement, est en moyenne 40% inférieure à celles obtenues expérimentalement. Étant donné que la performance des matériaux de construction est appelée à diminuer avec le temps, il pourrait s'avérer nécessaire de réévaluer l'efficacité de l'isolation du bâtiment d'ici quelques années.

Les bases d'une stratégie de contrôle utilisant la production de chaleurs totale, latente et sensible ont été proposées. Cette nouvelle stratégie pourrait se montrer innovatrice puisqu'elle tient compte indirectement de plusieurs paramètres d'élevage (race, sexe, masse, vitesse de l'air, emplumement, entassement, etc.) qui ne sont pas considérés dans les contrôleurs disponibles sur le marché. En utilisant le principe de température effective, il est désormais possible d'évaluer objectivement le confort des poulets en situation d'élevage commercial sans qu'aucune modification majeure du bâtiment ne soit requise.

Finalement, il est intéressant de mentionner que ce type de stratégie de contrôle environnemental ouvre la porte à des applications utilisant des concepts d'intelligence artificielle tels que des réseaux de neurones (Lacey et al, 2000), des systèmes experts ou bien de la logique floue (Padhila et al, 2001). Pour faire suite à ce mémoire, l'application de l'intelligence artificielle ainsi que le développement d'une stratégie de contrôle seront étudiés dans le cadre de mon doctorat.

RECOMMANDATIONS

Avant d'implanter le modèle mathématique proposé dans un autre bâtiment avicole commercial, il est important d'obtenir toutes les spécifications des équipements à l'intérieur des salles d'élevage. De plus, il est nécessaire d'effectuer les tests de calibration nécessaires pour évaluer les caractéristiques du bâtiment (ventilation et isolation).

Afin de s'assurer de la robustesse des balances thermique et d'humidité, il est nécessaire de continuer l'acquisition des données durant la saison chaude pour confirmer l'influence de certains paramètres, tels que la température et la vitesse de l'air, sur les différentes formes de production de chaleur.

L'ajout de capteurs de vitesse d'air dans la salle d'élevage est une option très intéressante, mais les technologies offertes jusqu'à maintenant ne sont pas adéquates, car elles font en sorte que le capteur n'est pas suffisamment robuste et abordable pour être implanté de façon permanente en milieu de production. Par contre, le développement d'un capteur de vitesse d'air adapté aux conditions d'élevage extrêmes pourrait s'avérer bénéfique pour l'industrie avicole.

Finalement, une partie de la production de chaleur produite par les poulets est due au compostage de la litière. Cette chaleur est encore difficile à quantifier, cependant une étude visant à comprendre l'impact de la température et de l'humidité sur la production de chaleur de la litière permettrait de développer un modèle mathématique beaucoup plus précis que celui proposé.

L'implantation d'une stratégie de contrôle jumelée à une forme d'intelligence artificielle dans un contrôleur commercial peut être très complexe, étant donné la quantité de

données, d'informations, la diversité des actions pouvant être prises et leurs influences sur la production de chaleur. De plus, des analyses approfondies doivent être faites avant d'appliquer la bonne mesure corrective, alors la puissance de calcul requise peut s'avérer importante et très coûteuse. Donc, il peut être nécessaire de développer de nouvelles composantes électroniques afin qu'une telle stratégie de contrôle soit implantée dans un contrôleur.

L'utilisation d'un outil de télécommunication (téléphone, câble, cellulaire), afin de récolter des données en continu et de centraliser l'information pourrait être très utile pour développer une nouvelle stratégie de contrôle. De plus, un serveur pourrait fournir la puissance de calcul nécessaire à l'implantation d'une stratégie de contrôle environnemental basée sur des concepts d'intelligence artificielle. L'ajout d'un serveur afin de centraliser l'information peut aussi jouer le rôle de support aux contrôleurs locaux situés dans les bâtiments avicoles. Cette architecture, qui est en fait un système distribué, permettrait de contrôler à distance les conditions d'élevage à l'intérieur des bâtiments, ainsi que de superviser les contrôleurs locaux en charge de chacun des bâtiments.

ANNEXE 1

Évaluation du confort chez l'être humain

Tableau XII

Nom	Équations	Sources
Température du globe à bulbe humide (WBGT)	$0,7 * T_w + 0,2 * T_g + 0,1 * T_a$	Peters, 1991
Indice de stress thermique (HSI)	$E_{req} * E_{max}^{-1} * 100$	Bernard et Hanna, 1988
Index de stress environnemental (ESI)	$0,63 * T_a - 0,03 * H.R + 0,002 * SR + 0,0054 * (T_a * H.R) - 0,073 * (0,1 + SR)^{-1}$	Moran et al., 2001
Facteur humidex	$T_a + \frac{5(e-10)}{9}$	Météomédia, 2003
Refroidissement éolien (T_{ress})	$13,12 + 0,6215 * T_a - 11,37 * V^{0,16} + 0,3965 * T_a * V^{0,16}$	Environnement Canada, 2001

ANNEXE 2

Équations de production de chaleur et d'humidité

Tableau XIII

Type	Équations
THP (W)	$9,84M^{0.75}(4*10^{-5}(20-T_a)^3 + 1)$
LHP (W)	$0,83*THP(0,8 - 1,85*10^{-7}(T_a + 10)^4)$
SHP (W)	THP-LHP

Source : Pedersen & Thomsen (2000)

Tableau XIV

Type	Équations	Conditions	Applications
SHP	$K \exp^{(-6,5194+2,9186x-0,24162x^2)}$	$3 \leq x \leq 5$	Pour toutes températures x = âge en jours SHP et LHP sont en Btu (hr.lb) ⁻¹ si K = 1 et en W.kg ⁻¹ si K = 0,64631
SHP	$K \exp^{(18662+0,054213x-0,00161x^2)}$	$6 \leq x \leq 19$	
LHP	$K(-42,961 + 27,415x - 2,84344x^2)$	$2 \leq x \leq 5$	
LHP	$K(36,424 - 2,8998x + 0,08676x^2)$	$6 \leq x \leq 15$	
LH	$K(15,812 - 0,22611x)$	$16 \leq x \leq 19$	
SHP	$K(38,612 - 2,6224x + 0,072047x^2 - 0,00066x^3)$	$20 \leq x \leq 41$	T = 15,6 °C x = âge en jours SHP et LHP sont en Btu (hr.lb) ⁻¹ si K = 1 et en W.kg ⁻¹ si K = 0,64631
SHP	6,717K	$42 \leq x \leq 48$	
LHP	$K(22,285 - 0,78279x + 0,011503x^2 - 0,000038x^3)$	$20 \leq x \leq 43$	
LHP	6,87K	$44 \leq x \leq 48$	
SHP	$K(36,070 - 2,3107x + 0,058862x^2 - 0,00051x^3)$	$20 \leq x \leq 39$	Pour T _a = 21,1 °C x = âge en jours SHP et LHP sont en Btu (hr.lb) ⁻¹ si K = 1 et en W.kg ⁻¹ si K = 0,64631
SHP	5,220K	$40 \leq x \leq 48$	
LHP	$K(11,221 + 0,40495x - 0,02727x^2 + 0,000353x^3)$	$20 \leq x \leq 43$	
LHP	6,278K	$44 \leq x \leq 48$	

Tableau XIV (suite)

SHP	$5,0K$	$20 \leq x \leq 23$	Pour $T_a = 26,7 \text{ }^\circ\text{C}$ $x = \text{\AA}ge \text{ en jours}$ SHP et LHP sont en Btu (hr.lb)^{-1} si $K = 1$ et en W.kg^{-1} si $K =$ $0,64631$
SHP	$K(20,094 - 0,70318x + 0,015182x^2 - 0,000108x^3)$	$24 \leq x \leq 48$	
LHP	$K(20,094 - 0,70318x + 0,015182x^2 - 0,000108x^3)$	$20 \leq x \leq 42$	
LHP	$9,340K$	$43 \leq x \leq 48$	

Source : Gates et al. (1996)

Tableau XV

Type	Équations	Conditions	Applications
SHP	$9,851 \log(x) - 0,0043x^2 - 0,869$	$2 \leq x \leq 28$	$x = \text{âge en jours}$
LHP	$8,6 + 3,4x - 0,009x^2 - 0,04x^3 + 0,0019x^4$	$x < 13$	SHP et LHP sont en Btu (hr.lb) ⁻¹
LHP	$30,8 - 1,1x + 0,0005x^3$	$x \geq 13$	
MP	$0,005x^2 + 0,24x + 0,29$	$x \leq 7$	
MP	$0,00061x^3 - 0,021x^2 + 0,42x + 0,23$	$x > 7$	
SHP	$20,3 - 0,0247M + 1,498M^2 * 10^{-5} - 2,95M^3 * 10^{-9} + 2,2M^4 * 10^{-14}$	$500 \leq M \leq 2000$	Pour $T_a = 15,6 \text{ }^\circ\text{C}$ M = masse en grammes SHP et LHP sont en Btu (hr.lb) ⁻¹
LHP	$33,6 - 0,0605M + 5,455M^2 * 10^{-5} - 2,21M^3 * 10^{-8} + 3,29M^4 * 10^{-12}$		
SHP	$15,9 - 0,0143M + 4,96M^2 * 10^{-6} - 1,02M^2 * 10^{-9} - 6,47M^2 * 10^{-13}$	$500 \leq M \leq 2000$	Pour $T_a = 21,1 \text{ }^\circ\text{C}$ M = masse en grammes SHP et LHP sont en Btu (hr.lb) ⁻¹
LHP	$25,8 - 0,0382M + 3,752M^2 * 10^{-5} - 1,9M^2 * 10^{-8} + 3,69M^4 * 10^{-12}$		
SHP	$5,0K$	$500 \leq M \leq 2000$	Pour $T_a = 26,7 \text{ }^\circ\text{C}$ M=masse en grammes SHP et LHP sont en Btu (hr.lb) ⁻¹
LHP	$13 - 0,0034M + 4,57M^2 * 10^{-7} + 1,74M^2 * 10^{-10}$		

Source: Reece & Lott (1982b) et Reece & Lott (1982c)

Tableau XVI

Type	Équation	Conditions	Applications
SHP	$28,57 - 40,02M$	$0,1 \leq M \leq 0,3$	Pour $T_a = 28,9 \text{ }^\circ\text{C}$
LHP	$2,43 + 9,42M$		M = masse en livres SHP et LHP sont en Btu (hr.lb)^{-1}
SHP	$17,95 - 4,30M$	$0,7 \leq M \leq 1,7$	Pour $T_a = 25,0 \text{ }^\circ\text{C}$
LHP	$4,89 - 1,07M$		M = masse en livres SHP et LHP sont en Btu (hr.lb)^{-1}
SHP	$14,53 - 1,60M$	$2,1 \leq M \leq 4,4$	Pour $T_a = 19,4 \text{ }^\circ\text{C}$
LHP	$4,45 - 0,67M$		M = masse en livres SHP et LHP sont en Btu (hr.lb)^{-1}

Source : Longhouse et al (1968)

Tableau XVII

Type	Équation	Conditions	Applications
THP	$58,37 - 23,10 \log(x)$	Durant le jour $29 \leq x \leq 90$	Pour $T_a = 18,3 \text{ }^\circ\text{C}$ $x = \text{âge en jours}$ SHP et LHP sont en Btu (hr.lb)^{-1}
	$53,14 - 22,10 \log(x)$	Durant la nuit	
SHP	$33,38 - 14,04 \log(x)$	Durant le jour	
	$35,23 - 15,84 \log(x)$	Durant la nuit	
LHP	$25,12 - 9,13 \log(x)$	Durant le jour	
	$18,17 - 6,31 \log(x)$	Durant la nuit	
THP	$34,20 - 10,90 \log(x)$	Durant la nuit	Pour $T_a = 29,4 \text{ }^\circ\text{C}$ $x = \text{âge en jours}$ SHP et LHP sont en Btu (hr.lb)^{-1}
	$31,95 - 10,97 \log(x)$	Durant le jour	
SHP	$13,23 - 4,44 \log(x)$	Durant la nuit	
	$13,60 - 5,00 \log(x)$	Durant le jour	
LHP	$21,34 - 6,67 \log(x)$	Durant la nuit	
	$17,80 - 5,63 \log(x)$	Durant le jour	

Source : Ota et Garver (1958) tirée de Chepete et Xin (2001)

ANNEXE 3

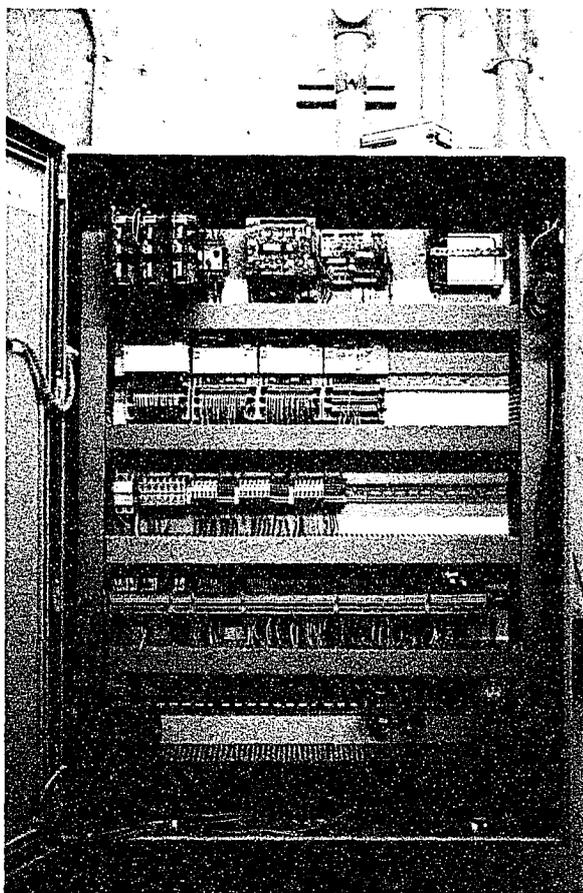
Photographies du site expérimental



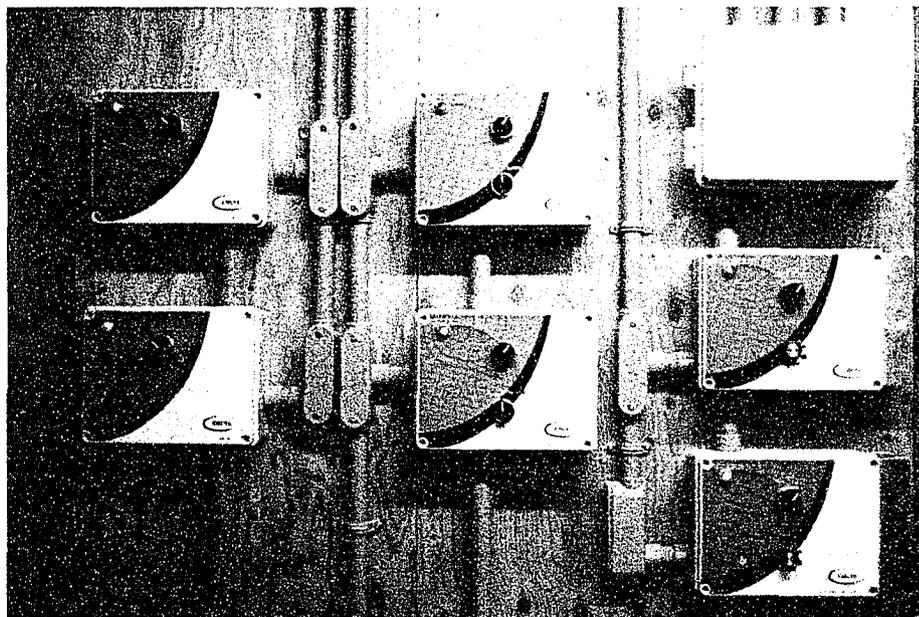
Photographie 1 Site Expérimental à St-Jean de Matha



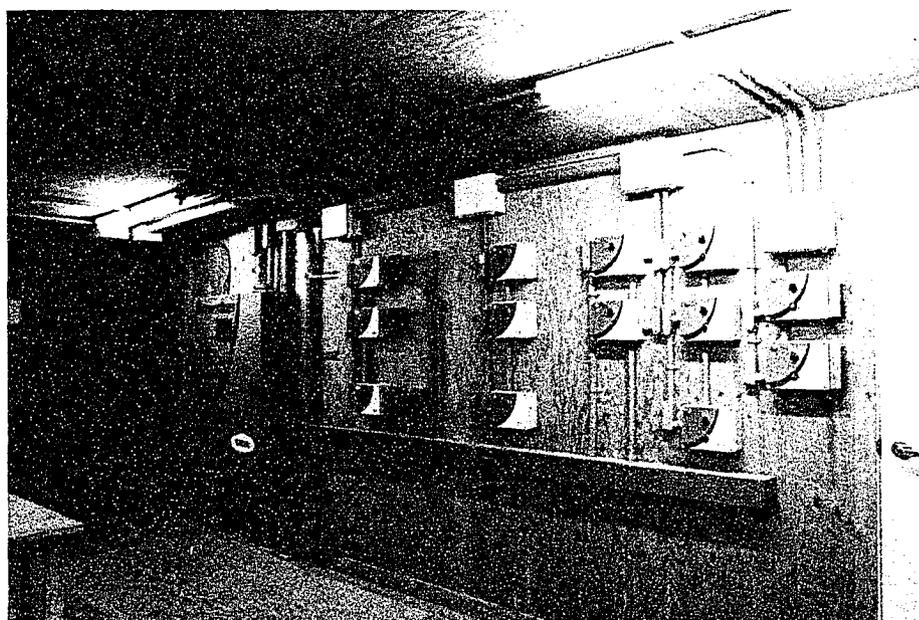
Photographie 2 Plancher d'élevage du site expérimental



Photographie 3 Automate programmable *Momentum* avec les cartes d'entrées et de sortie analogues et digitales



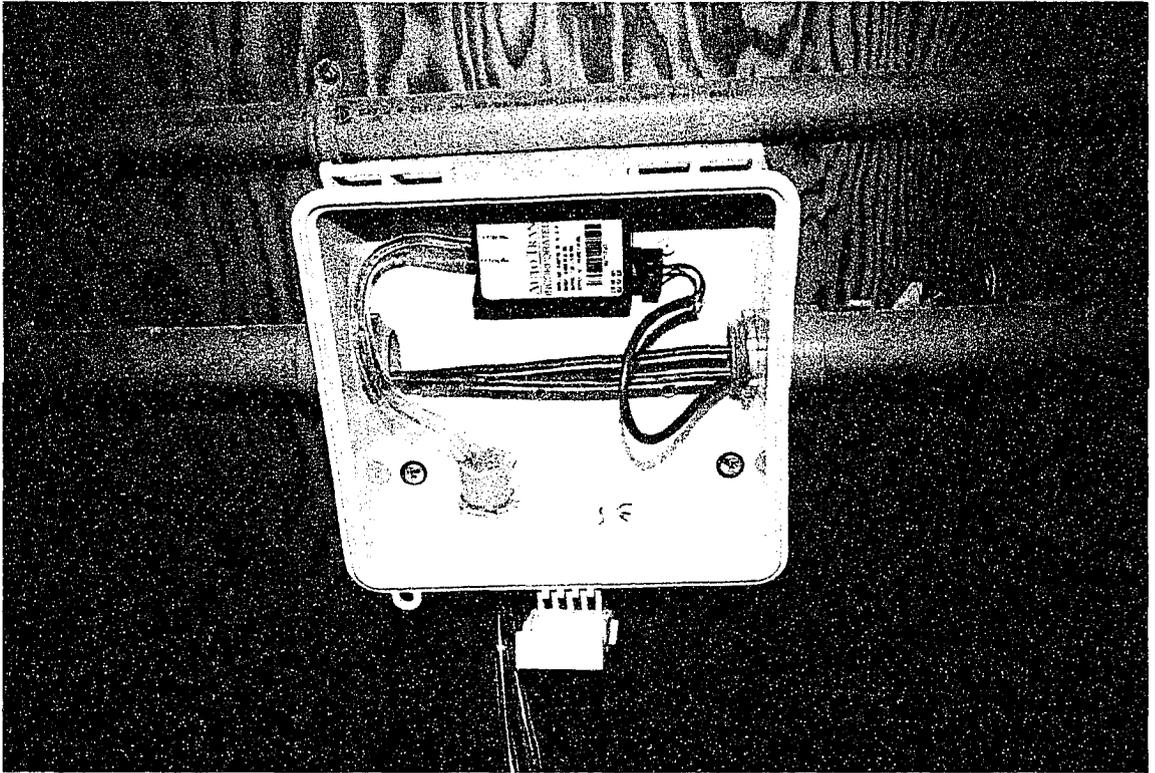
Photographie 4 Boîtes de contrôle XL 501 TOR 02, XL 101 TOR 01, XL 001 VAR 01



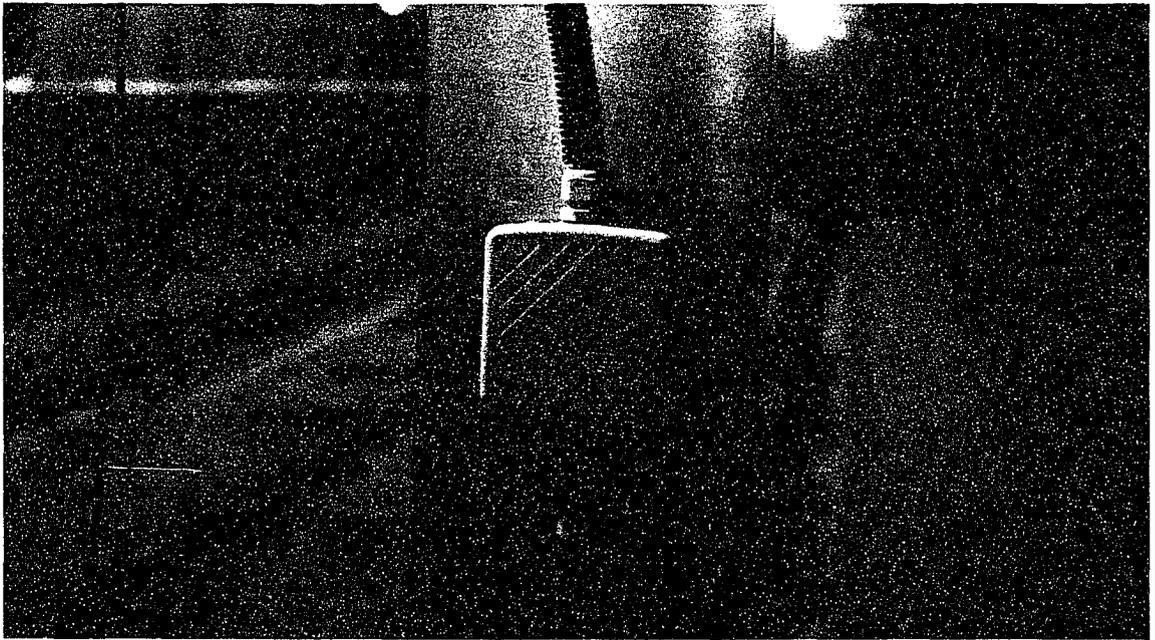
Photographie 5 Transition entre la chambre d'élevage et l'extérieur



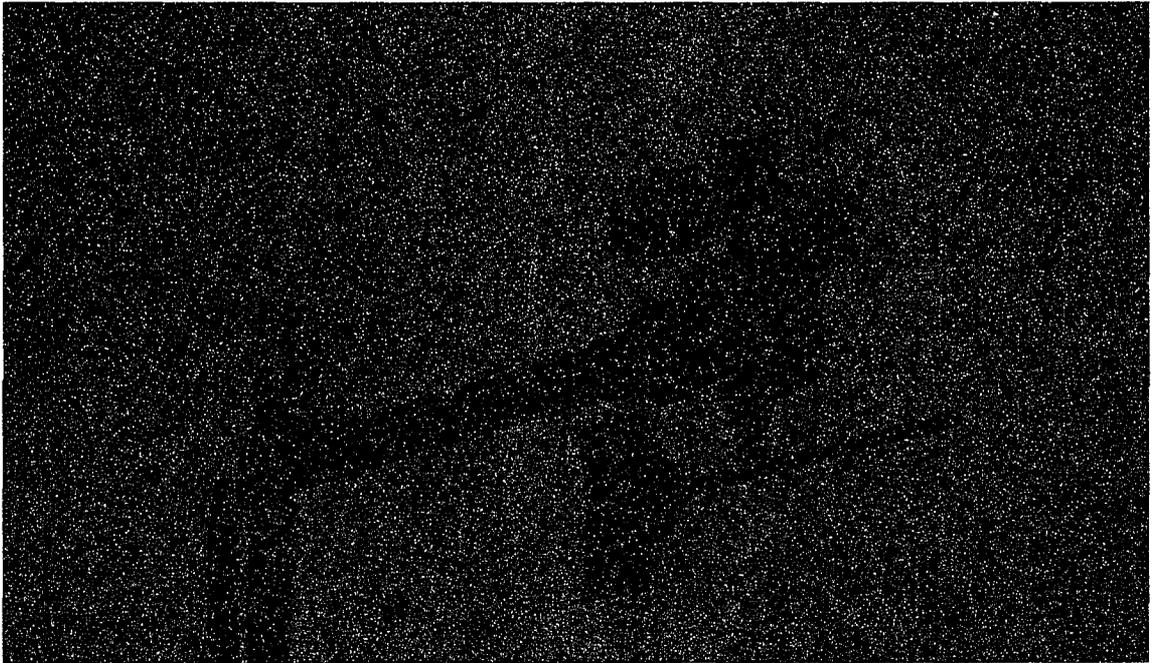
Photographie 6 Balance automatisée



Photographie 7 Capteur de pression statique 1-5V



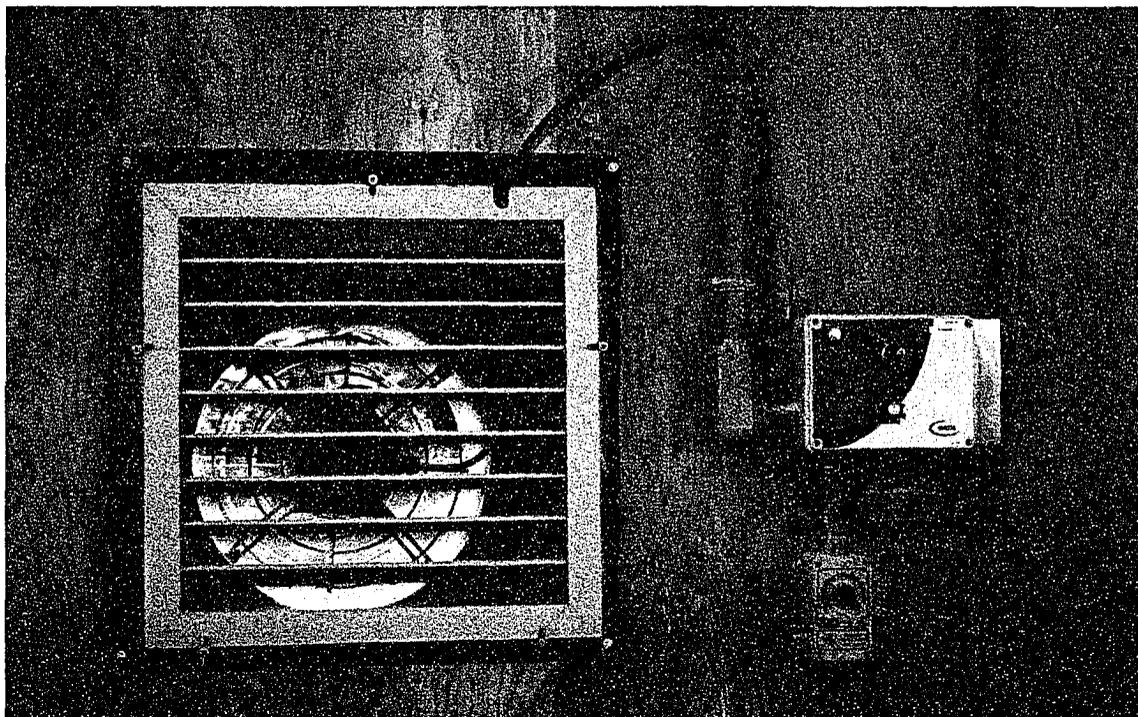
Photographie 8 Capteur d'humidité relative



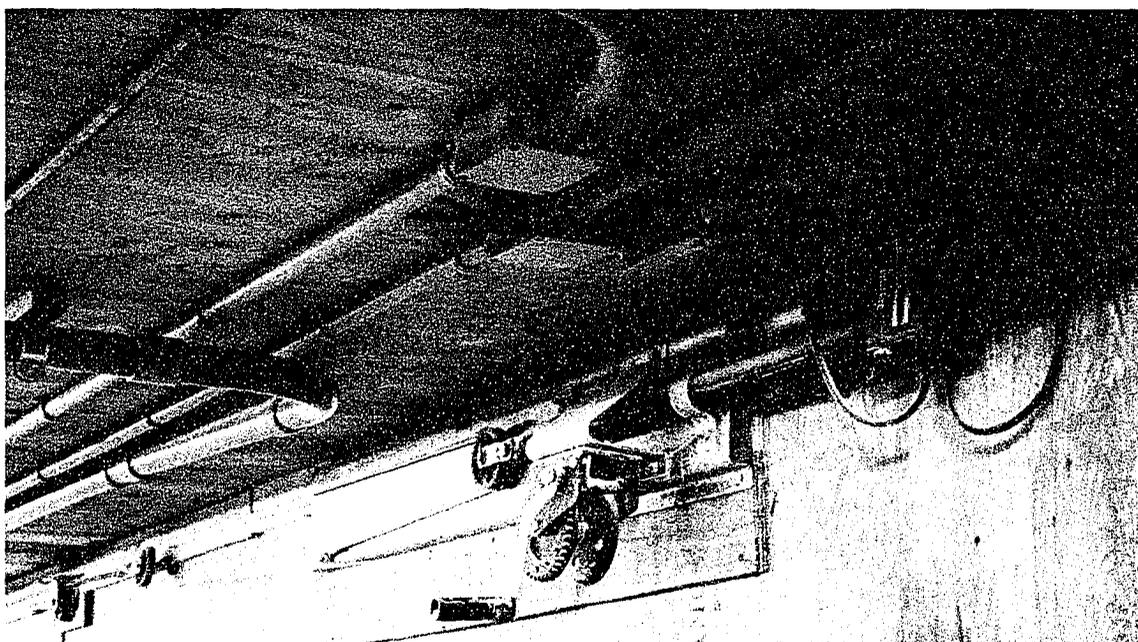
Photographie 9 Station météorologique



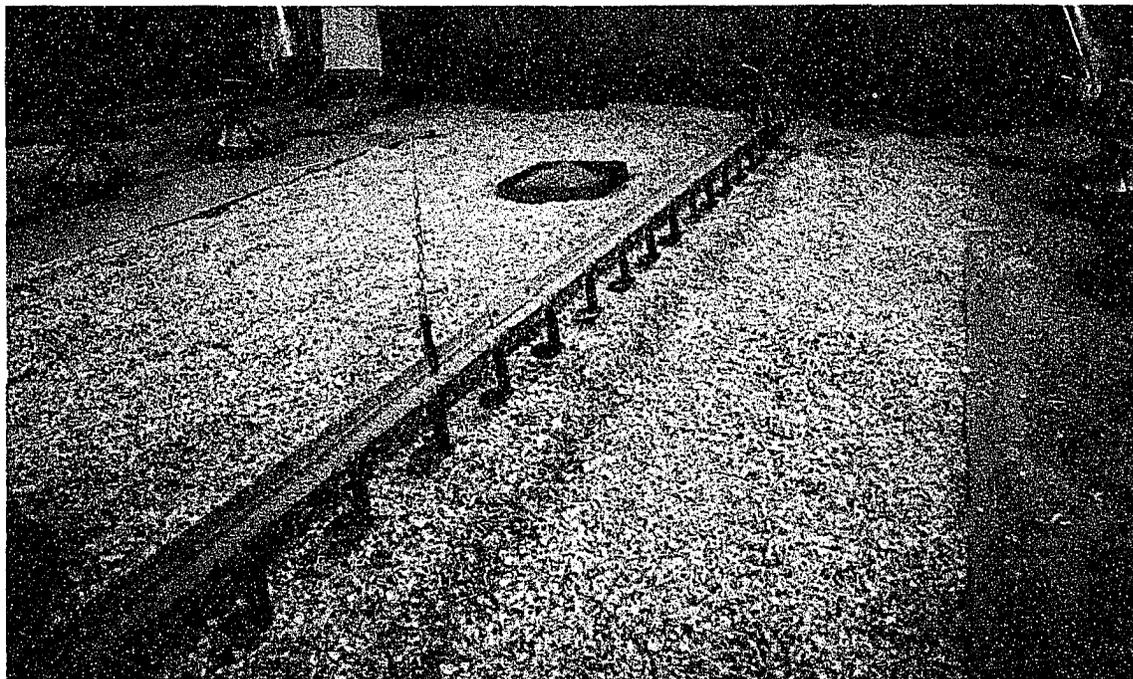
Photographie 10 Éleveuse et système d'éclairage



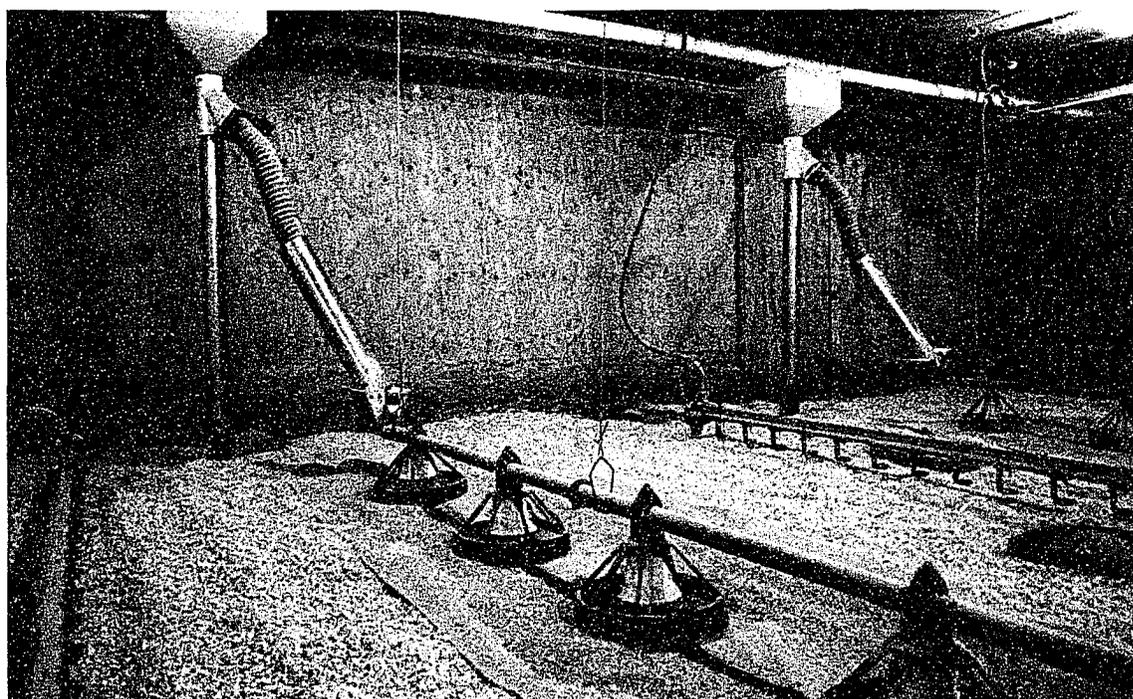
Photographie 11 Ventilateur #2 en marche



Photographie 12 Treuil électrique contrôlant l'ouverture et la fermeture des entrées d'air



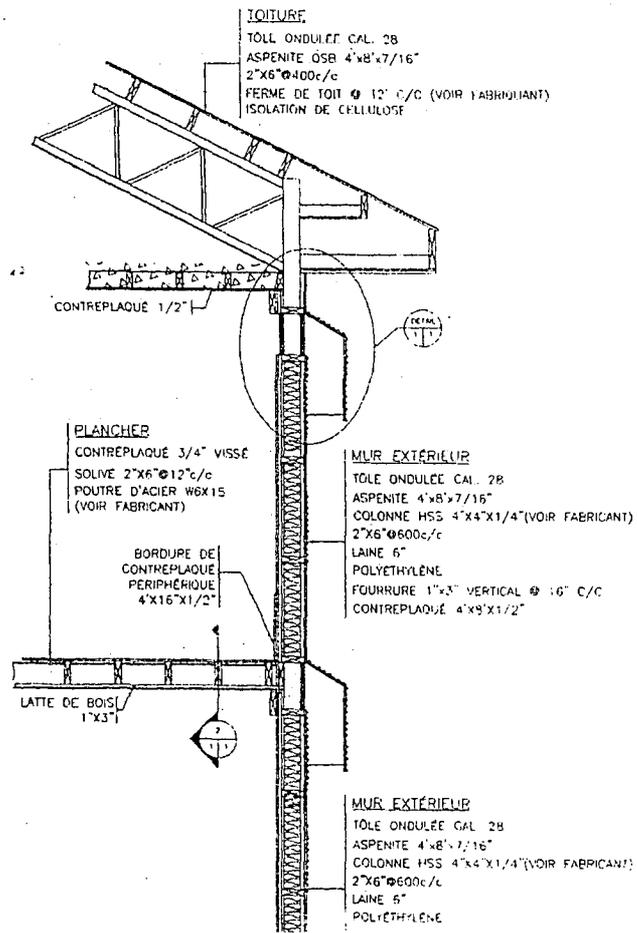
Photographie 13 Abreuvoir à becs



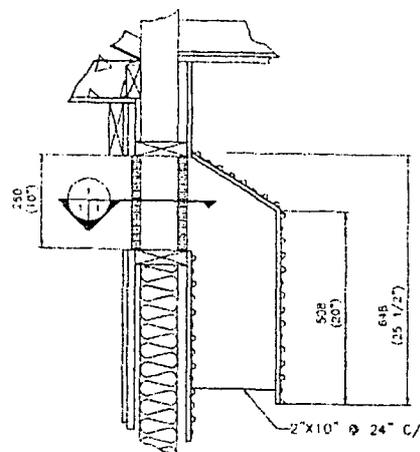
Photographie 14 Soigneurs et cloches à moulée

ANNEXE 4

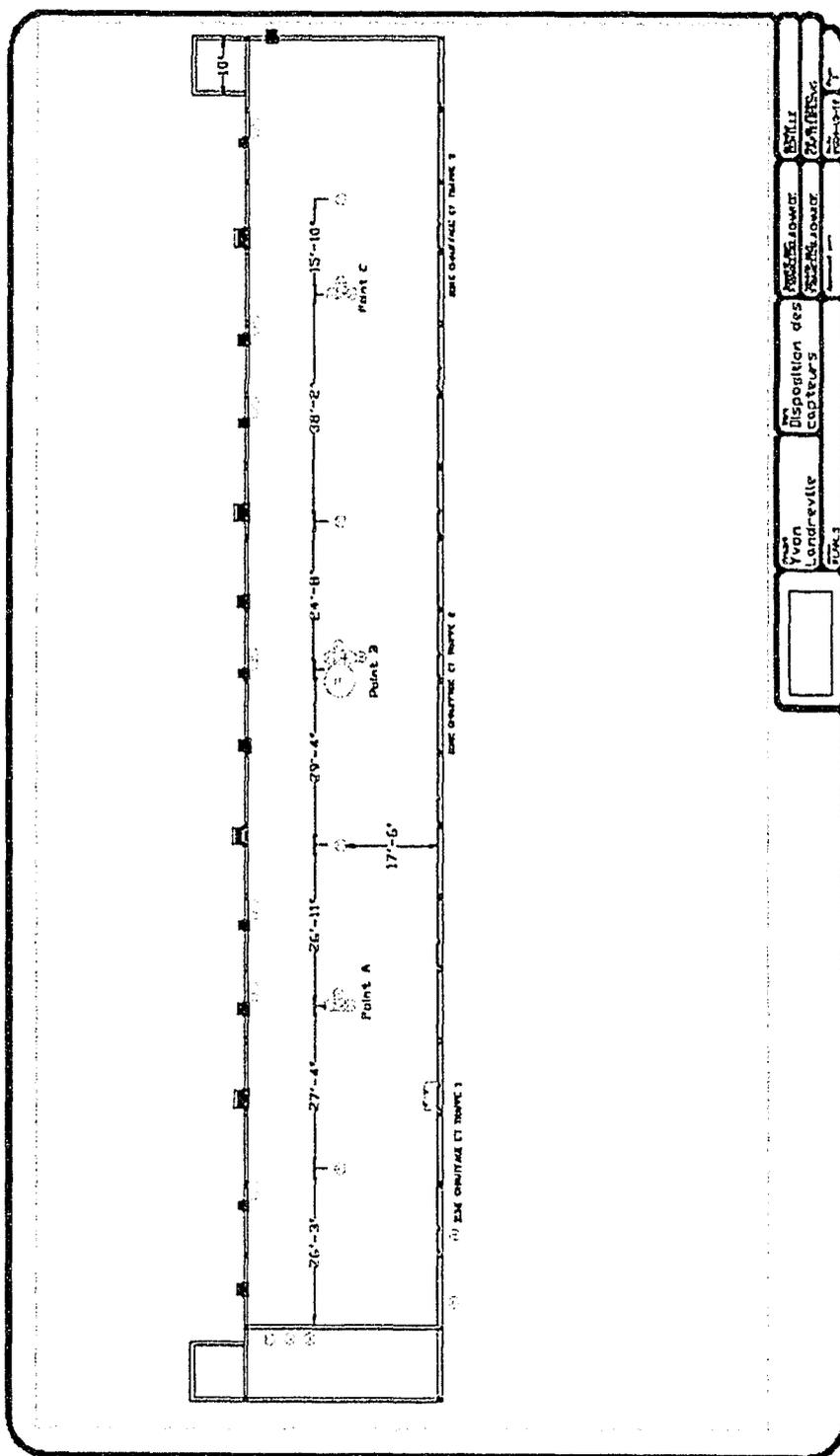
Plans du site expérimental



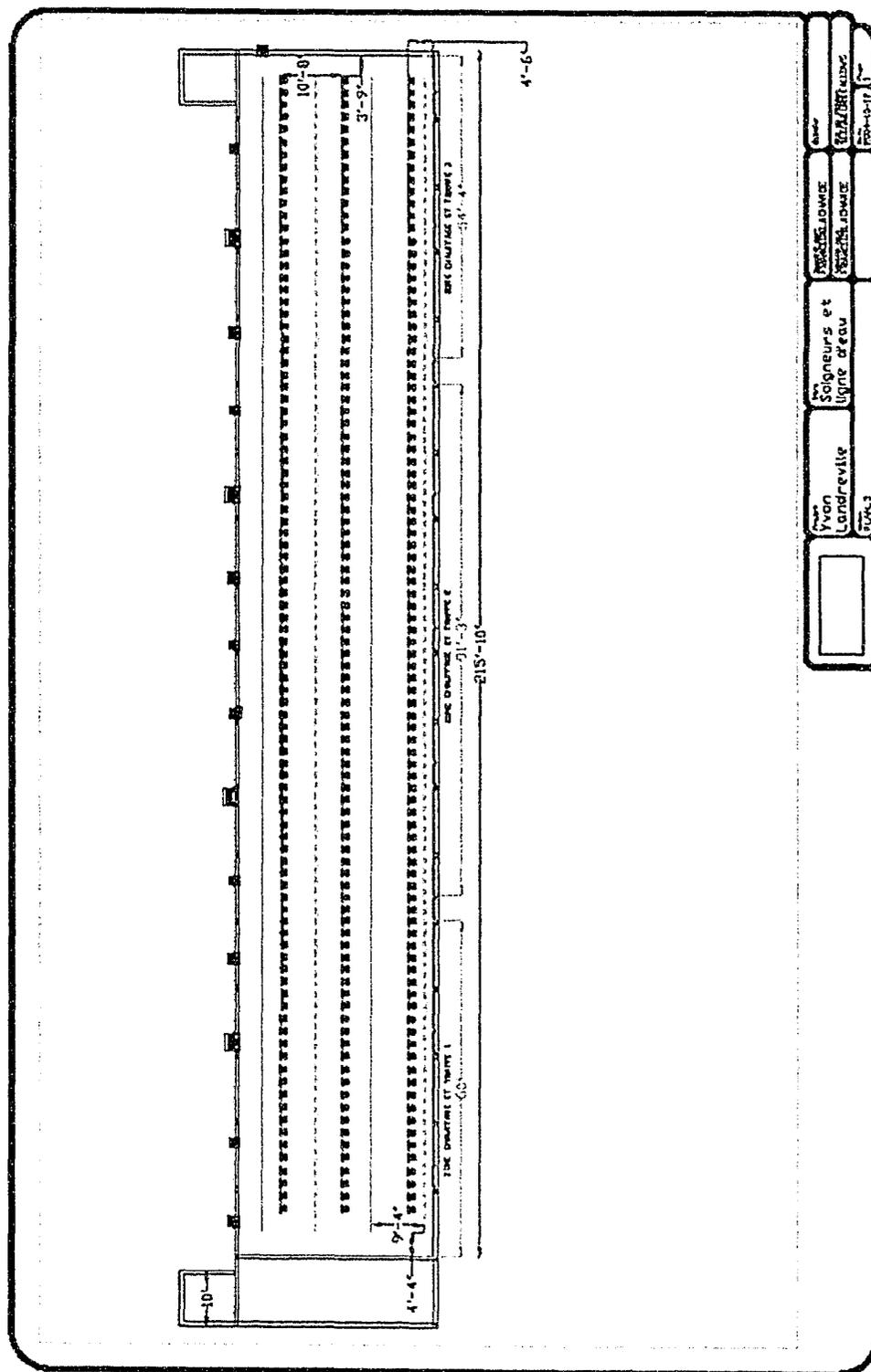
Plan 1 Coupe du mur du 2^{ième} étage



Plan 2 Profil des entrées d'air

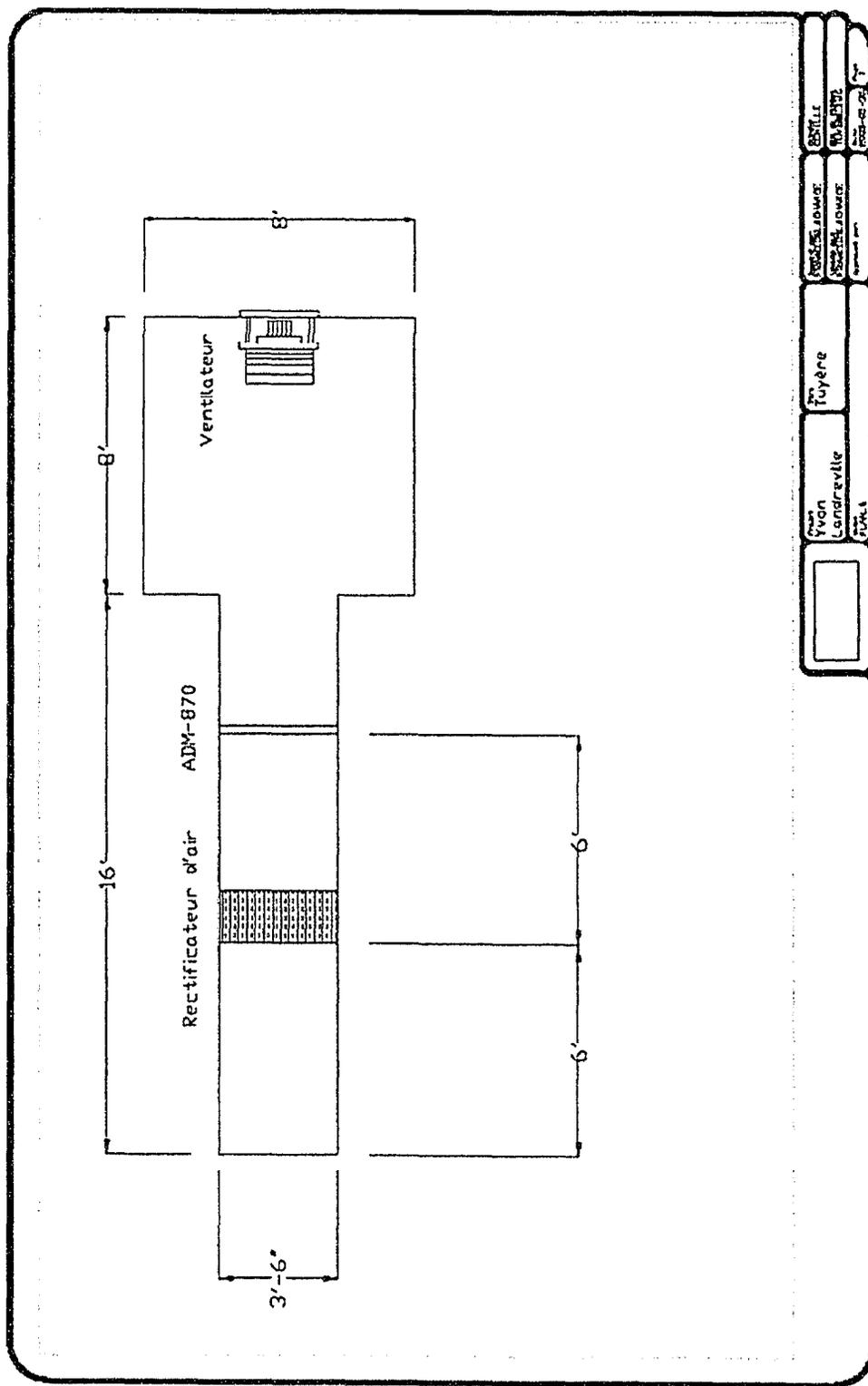


Plan 3 Disposition des capteurs



	M. de Lundreville 1724-3	Soigneurs et ligne d'eau	1724-3 1724-3	1724-3 1724-3
	1724-3	1724-3	1724-3	1724-3

Plan 5 Emplacement des soigneurs et des lignes d'eau



Plan 7 Dimensions de la tuyère

ANNEXE 5

Systeme de fichier .xls pour l'analyse de données

Afin de diminuer le temps nécessaire à l'analyse des données, plusieurs documents maîtres furent programmés dans le chiffrier *Microsoft Excel*. Une fois que ces feuilles de calcul furent programmées, il ne reste plus qu'à mettre à jour les liens auxquels se réfèrent les documents maîtres et les associer à leurs fichiers respectifs contenant les données devant être analysées. La hiérarchie des différents documents maîtres pour le mois d'avril 2005 est illustrée à la

figure 1.

Fichier *Archives*

Dans ce fichier, toutes les valeurs des variables retournées par le *Momentum* sont archivées. En tout, il y a 78 variables qui sont archivées à un intervalle de 10,5 minutes. Un fichier d'archives contient toutes les valeurs archivées durant un mois.

Fichiers *Données*

Tous les fichiers dont le titre commence par *Données* sont utilisés pour transformer en information les valeurs archivées dans le fichier *Archives*. À partir du fichier *Données*, le temps de marche des moteurs électriques et de tout autre pièce d'équipement à l'intérieur de la salle d'élevage est calculé. De plus, les valeurs retournées par les capteurs de température et de pression statique sont en mesure impériale, donc il est nécessaire de les convertir en système international (SI) afin de travailler avec les bonnes unités. Ce fichier permet ensuite d'associer les valeurs retournées par chaque capteur à sa pièce d'équipement respective. Pour alléger la taille de ce fichier, les données sont regroupées en bloc de 5 jours;

1^{er} au 5^{ième} jour;

6^{ième} au 10^{ième} jour;

11^{ième} au 15^{ième} jour;

16^{ième} au 20^{ième} jour;

21^{ième} au 25^{ième} jour;

26^{ième} au 31^{ième} jour.

Fichiers *Traitement des Données*

À partir des spécifications des équipements et du bâtiment, ainsi que de l'information contenue dans les fichiers *Données*, la production de chaleur totale, chaleur sensible et chaleur latente est calculée selon le modèle mathématique développé dans le chapitre 2. Étant donné que la taille d'un fichier *Traitement des Données* peut atteindre 20 mégabits après seulement 5 jours d'archivage, alors les fichiers *Traitement des données* sont divisés en bloc de 5 jours tout comme les fichiers *Données*.

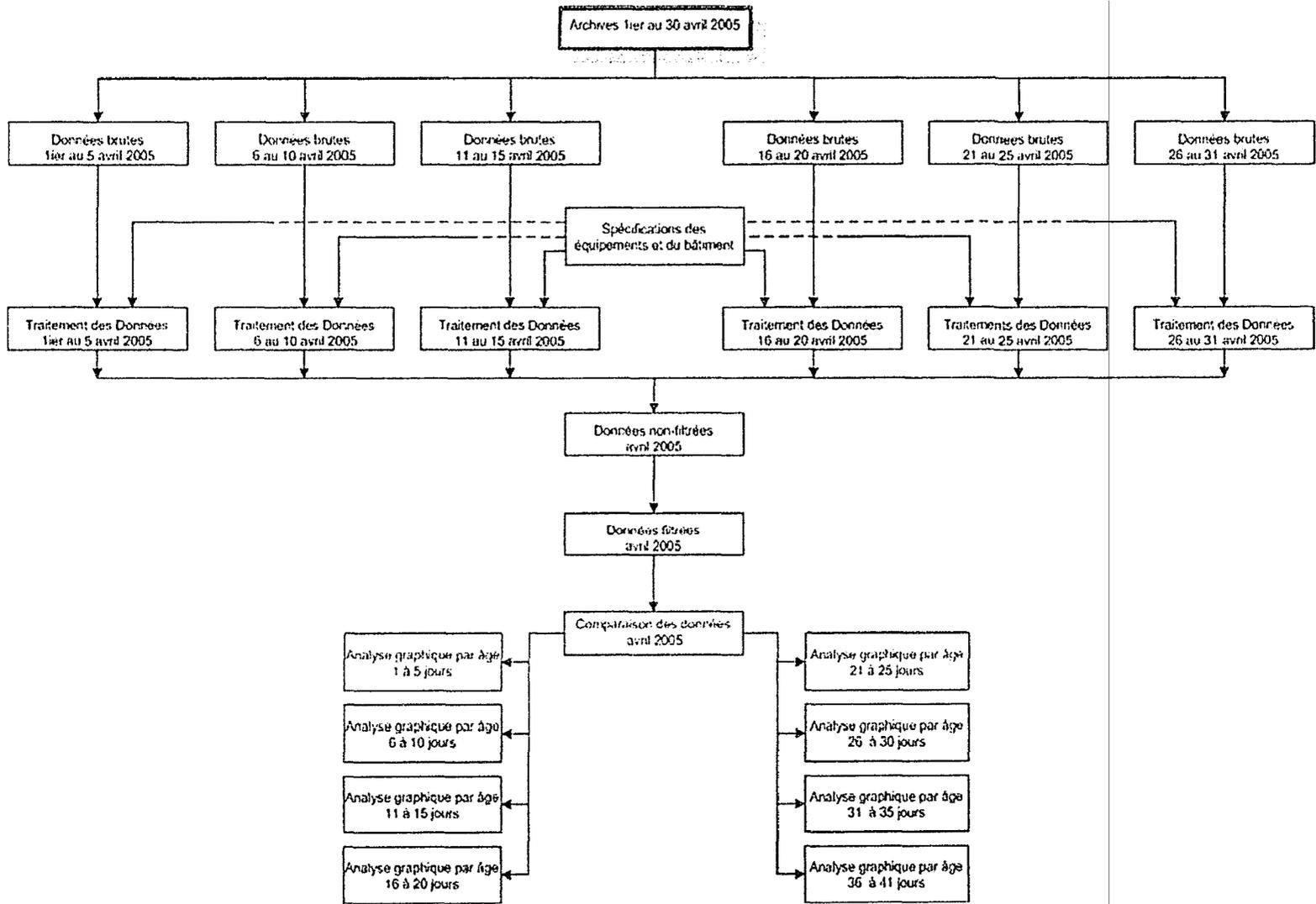
Fichier *Connaissances non filtrées*

Afin d'être en mesure d'analyser les six fichiers traitement des données produits chaque mois et de les comparer entre eux, les informations les plus importantes de chacun des fichiers *Traitement des Données* sont exportés dans un seul et unique fichier *Données non filtrées* afin de centraliser toutes ces nouvelles connaissances.

Fichier *Connaissances filtrées*

Avant d'analyser ces connaissances, il est important de filtrer les résultats biaisés dus à des valeurs erronées retournées dû à des erreurs de lecture provenant des capteurs. Donc, dans ce fichier, les valeurs de production de chaleur issue de valeurs erronées ne sont pas tenues en ligne de compte dans l'analyse.

Figure 8 Hiérarchie des fichiers d'analyse



ANNEXE 6

Spécification des moteurs électriques

Tableau XVIII

Moteur (soigneurs)		
Force	0,33	hp
Vitesse	1725	rpm
Voltage	115/208-230	v
Courant	5,8/2,7-2,7	A
Efficacité	0.61	%
Chaleur libérée	0,10	kwatt

Tableau XIX

Moteur (vis a moulée)		
Force	1	hp
Vitesse	1725	rpm
Voltage	115/208-230	v
Courant	12,8/6,5-6,4	A
Efficacité	0.74	%
Chaleur libérée	0.19	kwatt

ANNEXE 7

Résistances thermiques théoriques des matériaux

Tableau XX

Type d'isolation	Résistance Thermique m.2 oC.W-1	Épaisseur cm
Mur extérieur	4,700	-
Surface extérieure (vent été 24 km/h)	0,030	-
Aspenite (4'x8'x7/16')	0,144	1,11
2"x6" @ 600 c	1,183	15,24
Laine 6"	3,910	15,24
Polyéthylène	0,000	-
Fourrure 1"x3"	0,166	2,54
espace d'air 1"	0,126	2,54
contre-plaqué (4'x8'x1/2")	0,110	1,27
Surf. intérieure (mur vertical, vent horizontal)	0,120	-
Mur intérieur (grainerie)	0,585	-
Surf. intérieure (mur vertical, vent horizontal)	0,120	-
contre-plaqué (4'x8'x1/2")	0,110	1,27
espace d'air 1"	0,126	2,54
contre-plaqué (4'x8'x1/2")	0,110	1,27
Surf. intérieure (mur vertical, vent horizontal)	0,120	-

Tableau XX (suite)

Plafond (2ième étage)	9,690	-
Cellulose	9,153	33,02
Polyéthylène	0,000	0,00
2"x6" @ 600 cc	1,183	15,24
contre-plaqué (4'x8'x1/2")	0,110	1,27
Surf. intérieure (mur horizontal, vent vers le haut)	0,190	-
Plancher (2ième étage)	0,677	-
contre-plaqué (4'x8'x3/4")	0,165	1,91
solive 2"x6" @ 12" cc	1,183	15,24
Latte de bois (1"x3")	0,166	2,54
Surf. intérieure (mur horizontal, vent vertical)	0,110	-
Porte intérieure	0,845	-
Surf. intérieure (mur vertical, vent horizontal)	0,120	-
Porte int.	0,606	4,45
Surf. intérieure (mur vertical, vent horizontal)	0,120	-
Porte extérieure	0,756	-
Surface extérieure (vent été 24 km/h)	0,030	-
Porte ext.	0,606	5,08
Surf. intérieure (mur vertical, vent horizontal)	0,120	-
Périmètre extérieur	4,799	-
Surface extérieure (vent été 24 km/h)	0,030	-
Aspenite (4'x8'x7/16')	0,144	1,11
Laine 6"	3,910	15,24
Polyéthylène	0,000	0,00
Fourrure 1"x3"	0,166	2,54
espace d'air 1"	0,210	2,54

Tableau XX (suite)

contre-plaqué (4'x8'x1/2")	0,110	1,27
contre-plaqué (4'x16" x1/2")	0,110	1,27
Surf. intérieure (mur vertical, vent horizontal)	0,120	-
Périmètre intérieur	0,459	-
Surf. intérieure (mur vertical, vent horizontal)	0,120	-
contre-plaqué (4'x8'x1/2")	0,110	1,27
contre-plaqué (4'x16" x1/2")	0,110	1,27
Surf. intérieure (mur vertical, vent horizontal)	0,120	-

ANNEXE 8

Évaluation du débit de ventilation en continu

Tableau XXI

Ventilateur	Domaine de validité		R ²	Coefficient					
	Pression positive	Pression négative		a	b	c	d	e	f
16021 F	X	X	0,9668	7,50329	0,00005	-0,05346	-0,00009	-0,01343	-29,48290
	X		0,9898	6,54424	0,00002	-0,03668	0,00011	-0,01904	-26,53320
		X	0,9788	6,52552	0,00004	-0,04791	0,00011	-0,00725	-25,32380
16 032 F	X	X	0,9618	5,75906	0,00002	-0,03278	-0,00007	-0,14698	-23,04530
	X		0,9907	9,22350	0,0000	-0,06637	-0,00013	-0,01942	-36,26720
		X	0,9763	4,89216	0,00001	-0,02657	0,00000	-0,01185	-19,48670
24 050 F	X	X	0,9857	0,00000	0,00000	0,00000	0,00018	-0,02421	3,08948

ANNEXE 9

Effet de l'intensité lumineuse

Tableau XXII

Temps			Intensité lumineuse	Production de chaleur			Température		
				Moyenne	Différence		Moyenne	Différence	
Date jj :mm :aa	Jours de production	Heure hh :mm	%	W/kg	%	Absolue	°C	%	Absolue
19 avril, 2005	22	6:04	40	12.2			27.2		
19 avril, 2005	22	21:03	0	11.4	-7.0	-0.9	26.8	-1.5	-0.4
20 avril, 2005	23	6:02	40	13.9			26.8		
20 avril, 2005	23	21:01	0	11.7	-16.4	-2.3	26.2	-2.1	-0.6
21 avril, 2005	24	6:01	40	12.3			26.6		
21 avril, 2005	24	21:00	0	11.4	-7.5	-0.9	25.8	-3.2	-0.8
22 avril, 2005	25	3:10	40	13.5			26.7		
22 avril, 2005	25	21:10	0	12.1	-10.0	-1.3	26.3	-1.7	-0.5
23 avril, 2005	26	3:10	40	14.2			26.6		
23 avril, 2005	26	21:10	0	12.3	-13.5	-1.9	26.4	-1.0	-0.3
24 avril, 2005	27	3:10	40	15.7			26.9		
24 avril, 2005	27	21:10	0	12.3	-21.7	-3.4	26.8	-0.6	-0.2

Tableau XXII (suite)

25 avril, 2005	28	3:10	40	13.7			26.5		
					-7.5	-1.0		-2.1	-0.6
25 avril, 2005	28	21:10	0	12.6			25.9		
26 avril, 2005	29	1:04	40	13.2			26.2		
					-22.7	-3.0		-1.9	-0.5
26 avril, 2005	29	21:02	0	10.2			25.7		
27 avril, 2005	30	0:02	40	13.6			25.7		
					-10.0	-1.4		-1.2	-0.3
27 avril, 2005	30	21:02	0	12.3			25.4		
29 avril, 2005	32	11:15	40	11.7			23.2		
					-1.3	-0.2		-2.5	-0.6
29 avril, 2005	32	21:09	0	11.6	12.4		22.6		
30 avril, 2005	33	0:00	40	12.4			22.8		
					-15.6	-1.9		-1.1	-0.3
30 avril, 2005	33	21:03	0	10.5			22.6		

BIBLIOGRAPHIE

- Aerts, J.-M., Wathes, C. M., & Berckmans, D. (2003). Dynamic Data-based Modelling of Heat Production and Growth of Broiler Chickens : Development of an Integrated Management System. *Biosystems Engineering*, 84(3), 257-266.
- Aerts, J.-M., Berckmans, D., Saevels, P., & Goedseels, V. (1997). Model-based Prediction Responses of Broiler Chickens to Variations in the Micro-environment as a Basis for Climate Control. *American Society of Agricultural Engineers*, 2, pp.942-947.
- ASAE. (1987). Psychometric Data.
- ASAE. (2001). Design of Ventilation Systems for Poultry and Livestock Shelters (No. EP270.5 DEC01).
- Avipro-Coq Performances. (1997). COOP.
- Bernard, T. E., & Hanna, W. M. (1988). Environmental effects on WBGT and HSI using a computer simulation. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 3(2), 103-113.
- Bligh, J., & Johnson, K. G. (1973). Glossary terms for thermal physiology. *Journal of Applied Physiologie*, 36, p. 941-961.
- Bottcher, R. W., Pardue, S. L., Brake, J. T., Driggers, L. B., Jacobson, B. M., Baughman, G. R., et al. (1992). Thermography for evaluating thermal comfort of poultry. *American Society of Agricultural Engineers*, 92, pp.10.
- Brown-Brandl, T. M., Beck, M. M., Shulte, D. D., & DeShazer, J. A. (1997). Temperature Humidity Index for growing Tom Turkeys. *Transaction of the ASAE*, 40(1), pp. 203-209.
- Brown-Brandl, T. M., Yanagi, T., Xin, H., Gates, R. S., Bucklin, R. A., & Ross, G. S. (2003). A new telemetry system for measuring core body temperature in livestock and poultry. *Applied Engineering in Agriculture*, 19(5), pp.583-589.
- Buffington, D. E., Collazo-Arocho, A., Canton, G. H., Pitt, D., Thatcher, W. W., & Collier, R. J. (1981). Black Globe-Humidity Index (BGHI) as comfort Equation for Dairy Cows. *Transaction of the ASAE*, pp. 711-714.

- Burmeister, A., Jurkschat, M., & Nichelmann, M. (1986). Influence of stocking density on the heat balance in the domestic fowl (*Gallus domesticus*). *Journal of Thermal Biology*, 11(2), 117-120.
- Butcher, G. D., & Miles, R. (1996). *Heat Stress Management in Broilers* : Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- Chepete, H. J., & Xin, H. (2001). *Heat and Moisture Production of Poultry and Their Housing Systems - A Literature Review*. Paper presented at the 6th International Symposium, Louisville, Kentucky, USA.
- Cobb. (2005). Broiler Nutrition Guide. *CIGR Handbook*. (Vol. II)(1999). American Society of Agricultural Engineers.
- Fennir, M. A., Landry, J. A., & Raghavan, G. S. V. (2003). Respiration rate of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) measured in a two-bin research scale storage facility, usgin heat and moisture balance and gas analysis techniques. *Canadian Biosystems Engineering*, 45, pp.9.
- Flood, C. A., Koon, J. L., Trumbull, R. D., & Brewer, R. N. (1992). Broiler Growth Data : 1986-1991. *Transaction of the ASAE*, 35(2), 703-709.
- Furlan, R. L., Macari, M., Secato, E. R., & Guerreiro, J. R. (2000). Air velocity and exposure time to ventilation affect body surface and rectal temperature of broiler chickens. *Journal of Applied Poultry Research*, 9, 1-5.
- Gates, R. S., Overhults, D. G., & Zhang, S. H. (1996). Minimum ventilation for modern broiler facilities. *Transaction of the ASAE*, 39(3), 1135-1144.
- Howell, R. H., Sauer, H. J., & Coad, W. J. (2001). Thermal and Water Vapor Transmission Data. In ASHRAE (Ed.), *Fundamentals*. Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Insulation and Vapor Barriers. (1983). In M. P. Service (Ed.), *Structures and Environment Handbook* (11th ed.). Ames, Iowa : Midwest Plan Service.
- Jurkschat, M., Burmeister, A., Nichelmann, M., & Thomas, E. (1986). A mathematical equation to describe the influence of age, wind speed and ambient temperature on heat production in Turkeys (*Meleagris gallopavo*). *Journal of Thermal Biology*, 11(2), 105-108.

- Kettlewell, P. J., Mitchell, M. A., & Meeks, I. R. (1997). An implantable radio-telemetry system for remote monitoring of heart rate and deep body temperature in poultry. *Computers and Electronics in Agriculture*, *17*, pp.161-175.
- Kristensen, H. H., & Wathes, C. M. (2000). Ammonia and poultry welfare : a review. *World's Poultry Science Journal*, *56*, 235-245.
- Lacey, B., Hamrita, T. K., Lacy, M. P., Van Wicklen, G. L., & Czarick, M. (2000a). Monitoring Deep Body Temperature responses of broilers using biotelemetry. *Journal of Applied Poultry Research*, *9*, p.6-12.
- Lacey, B., Hamrita, T. K., Lacy, M. P., & Van Wicklen, G. L. (2000b). Assessment of Poultry Deep Body Temperature Responses to Ambient Temperature and Relative Humidity Using an On-line Telemetry System. *Transaction of the ASAE*, *43*(3), pp.717-721.
- Lacey, B., Hamrita, T. K., & McClendon, R. (2000c). Feasibility of using neural networks for real-time prediction of poultry deep body temperature responses to stressful changes in ambient temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, *16*(3), pp. 303-308.
- Longhouse, A. D., Ota, H., & Ashby, W. (1960). Heat and Moisture Design Data for Poultry Housing. *Agricultural Engineering*, p.567-576.
- Lott, B. D., Simmons, J. D., & May, J. D. (1998). Air velocity and High temperature Effects on broiler performance. *Poultry Science*, *77*, 391-393.
- Malheiros, R. D., & Moraes, V. M. B. (2000). Environmental Temperature and cloacal and surface temperatures of broiler chicks in first week post-hatch. *Journal of Applied Poultry Research*, *9*, 111-117.
- Markarian, N. R. (2001). Environmental control of vegetable storage environments. McGill, Montreal.
- May, J. D., Lott, B. D., & Simmons, J. D. (1997). Water consumption by broilers in high cyclic temperatures : bell vs. nipple waterers. *Poultry Science*, *76*, pp. 944-947.
- Mitchell, M. A. (1985). Effects of air velocity and convective and radiant heat transfer from domestic fowls at environmental temperatures of 20 and 30 C. *Br. Poultry Science*, *26*(p. 413-423).

- Moran, D. S., Pandolf, K. B., Shapiro, Y., Heled, Y., Shani, Y., Mathew, W. T., et al. (2001). An environmental stress index (ESI) as a substitute for the wet bulb globe temperature (WBGT). *Journal of Thermal Biology*, 26(4-5), 427-431.
- Moran, D. S., Pandolf, K. B., Shapiro, Y., Laor, A., Heled, Y., & Gonzalez, R. R. (2003). Evaluation of the environmental stress index for physiological variables. *Journal of Thermal Biology*, 28(1), 43-49.
- Nichelmann, M., Baranyiova, E., & Goll; B. Tzschentke, R. (1986a). Influence of feather cover on heat balance in laying hens (*Gallus domesticus*). *Journal of Thermal Biology*, 11(2), 121-126.
- Nichelmann, M., Baranyiova, E., & Tzschentke, B. (1986b). Thermoregulatory heat production in laying hybrids hens - summit metabolism. *Acta Vet. Brno*, 55, p.247-261.
- Padhila, A. S., Farret, F. A., & Popov, V. A. (2001). *Neurofuzzy controller in Automated Climatization for Poultry Houses*. Paper presented at the The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
- Pedersen, S., & Thomsen, M. G. (2000). Heat and Moisture Production for Broilers on Straw Bedding. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75, 177-187.
- Peters, H. (1991). Evaluating the heat stress indices recommended by ISO. *Int J Indust Ergonomics*, 7(1), 1-9.
- Proudfoot, F. G., Hamilton, R. M. G., DeWitt, W. F., & Jansen, H. N. (1991). *L'élevage du poulet et du dindon à griller au Canada*. Ottawa.
- Ramsey, C. G. (2000). *Architectural Graphic standards* : John Wiley & sons, inc.
- Reece, F. N., & Lott, B. D. (1982a). The Effect of Environmental Temperature on Sensible and Latent Heat Production of Broiler Chickens. *Poultry Science*, 61, pp. 1590-1593.
- Reece, F. N., & Lott, B. D. (1982b). Heat and Moisture Production of Broiler Chickens During Brooding. *Poultry Science*, 61, pp. 661-666.
- Richards, S. A. (1977). The influence of loss of plumage on temperature regulation in laying hens. *journal of Agricultural Science*, 89, pp.393-398.
- Rite, R. (2001). Psychometrics. In ASHRAE (Ed.), *Fundamentals*. Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Rolle, K. C. (2000). *Heat and Mass Transfer*. Upper Saddle River : Prentice Hall.

- Scott, N. R., DeShazer, J. A., & Roller, W. L. (1983). Effects of the Thermal and Gaseous Environment on Livestock. In M. A. Hellickson & J. N. Walker (Eds.), *Ventilation of Agricultural Structures* (pp. pp.372). St. Joseph, Michigan : American Society of Agricultural Engineers.
- Segura, J., Feddes, J., & Zuidhof, M. (2002). *Reducing Thermal stress in broiler chickens by diurnal and nocturnal cooling*. Paper presented at the CSAE/SCGR AIC 2002 Meeting, Saskatoon, Saskatchewan.
- Simmons, J. D., Lott, B. D., & May, J. D. (1997). Heat loss from broiler chickens subjected to various air speeds and ambient temperatures. *Applied Engineering in Agriculture*, 13(5), 665-669.
- Shur-Gain, B. T. Ventilation & Environmental control for maximum broiler chicken production (No. #840). Columbus, Ohio.
- Stamper, E., & Koral, R. L. (1979). *Handbook of Air Conditionning Heating and Ventilating* (3rd ed.). New York.
- Tao, X., & Xin, H. (2003). *Temperature-Humidity-Velocity Index for Market-size Broilers*. Paper presented at the 2003 ASAE Annual International Meeting.
- Teeter, R. G., & Belay, T. (1996). Broiler Management during acute heat stress. *Animal Feed Science and Technology*, 58, pp.127-142.
- Timmons, M. B., Gates, R. S., Bottcher, R. W., Carter, A., Brake, J. T., & Wineland, M. J. (1995). Simulation Analysis of a New Temperature Control Method for Poultry Housing. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 62, pp.237-245.
- Timmons, M. B., & Hillman, P. E. (1993). *Partional heat losses in heat stress poultry as affected by wind speed*. Paper presented at the Livestock Environment IV. 4th International symposium, Coventry.
- Tzschentke, B., & Nichelmann, M. (2000). Influence of the age and wind speed on total effective ambient temperature in three poultry species (gallus domesticus, cairina moschata, meleagris gallopavo). *Arch. Geflugelk*, 64(1), 1-8.
- Tzschentke, B., & Nichelmann, M. (1986). The influence of wind speed on heat production in laying hybrids (Gallus domesticus) of different ages at various relative humidities. *Journal of Thermal Biology*, 11(2), 109-113.

- Tzschentke, B., Nichelmann, M., & Postel, T. (1996). Effect of ambient temperature, age and wind speed on the thermal balance of layer-strain fowls. *Br. Poultry Science*, 37, pp.501-520.
- Vitonne, R. (1996). *Bâtir - Manuel de la Construction*. Lausanne.
- Wheeler, E. F., Zajackowski, J. L., & Sabeh, N. C. (2003). Field Evaluation of Temperature and Velocity Uniformity in Tunnel and Conventiional Ventilation Broiler houses. *Applied Engineering in Agriculture*, 19(3), p. 367-377.
- Wiernusz, C. (1998). Nutritional Therapies to Optimize Poultry Production during High Humidity and Ambient Temperature Exposure.
- Wiermusz, C. J., & Teeter, R. G. (1993). Feeding Effects on Broiler Thermobalance during Thermoneutral and High Ambient Temperature Exposure. *Poultry Science*, 72, p. 1917-1924.
- Xin, H., Berry, I. L., Tabler, G. T., & Costello, T. A. (2001). Heat and moisture production of poultry and their housing systems : broilers. *Transaction of the ASAE*, 44(6), 1851-1857.
- Xin, H., Sell, H. J., & Ahn, D. U. (1996). Effects of light and darkness on heat and moisture production of broilers. *Transactions of the ASAE*, 36(6), p.2255-2258.
- Xin, H., & Shao, B. (2002). *Real-time Assessment of Swine Thermal Comfort by Computer Vision*. Paper presented at the Proceedings of the World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, Brazil.
- Yahav, S., Straschnow, A., Vax, E., Razpakovski, V., & Shinder, D. (2001). Air velocity alters broiler performance under harsh environmental conditions. *Poultry Science*, 80, 724-726.
- Zhang, Y. (1998). *La ventilation des porcheries et autres bâtiments d'élevage*. Saskatoon.