



**HAL**  
open science

## Modélisation des flux d'énergie directe et indirecte pour les bâtiments des filières porcine et avicole

M. Marcon, P. Massabie, G. Amand, Paul Robin, D. Chevalier, Florian Kergourlay, C. Nicolas, A. Keita

### ► To cite this version:

M. Marcon, P. Massabie, G. Amand, Paul Robin, D. Chevalier, et al.. Modélisation des flux d'énergie directe et indirecte pour les bâtiments des filières porcine et avicole. Innovations Agronomiques, 2017, 55, pp.55-70. 10.15454/1.5137756085038162E12 . hal-01607541

**HAL Id: hal-01607541**

**<https://hal.science/hal-01607541>**

Submitted on 26 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## **Modélisation des flux d'énergie directe et indirecte pour les bâtiments des filières porcine et avicole**

**Marcon M.<sup>1</sup>, Massabie P.<sup>1</sup>, Amand G.<sup>2</sup>, Robin P.<sup>3</sup>, Chevalier D.<sup>4</sup>, Kergourlay F.<sup>5</sup>, Nicolas C.<sup>6</sup>, Keita A.<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> IFIP-institut du porc, La motte au Vicomte BP 35104, 35651 Le Rheu CEDEX

<sup>2</sup> ITAVI, 41 rue de Beaucemaine, 22440 Ploufragan

<sup>3</sup> INRA UMR 1069 SAS, 65 rue de St-Brieux, CS 84215, 35042 Rennes CEDEX

<sup>4</sup> Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire, 9 rue André Brouard, BP 70510, 49105 Angers CDEX 02

<sup>5</sup> Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, 5 allée de Sully, 29322 Quimper CEDEX

<sup>6</sup> Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, rue Jean Monnet, 29834 Carhaix CEDEX

<sup>7</sup> Anses-Site de Ploufragan-Plouzané, 41 rue de Beaucemaine, BP 53, 22440 Ploufragan

Correspondance : michel.marcon@ifip.asso.fr

### **Résumé**

Dans les élevages de porcs et de volailles dits « hors-sol », les consommations d'énergies directes sont, par nature, dépendantes des échanges thermiques entre les bâtiments et leur environnement, eux-mêmes conditionnés par la gestion de l'ambiance. L'impact de ces conditions d'ambiance sur les performances est par ailleurs bien connu au travers de nombreuses publications au cours des vingt dernières années. Il est donc apparu possible et pertinent de réaliser un outil d'aide au conseil basé sur un modèle dynamique (MEDIBATE). L'objectif de ce modèle est de prédire les consommations d'énergie occasionnées par le chauffage et la ventilation des bâtiments porcins et avicole, en relation avec des variables d'action comme les caractéristiques de la salle (isolation...), les équipements (chauffage, ventilation), la gestion de l'ambiance (températures de consigne...) et les animaux (type, nombre, stade). Les flux d'énergie indirects sont estimés à partir de la prédiction de la consommation moyenne journalière d'aliments, en tenant compte du poids vif des animaux et de la température ambiante. L'intégration future d'un bilan économique dans ce modèle permettra d'évaluer le résultat de la mise en œuvre de différents choix techniques.

**Mots-clés** : Energie, bâtiment porcin, bâtiment avicole, modélisation, bilan thermique, outil d'aide à la décision

### **Abstract: Dynamic model of direct and indirect energy exchanges in pig and poultry barns for field decision support**

In pig and poultry farms, direct consumption of energy depends on thermal exchanges between indoor and outdoor, which are related to the rules of air parameters management in the rooms. Besides, the impact of indoor conditions is well known through an extensive literature over the last twenty years. Therefore, it appeared possible and consistent to support field advice by designing a tool based on a dynamic model (called MEDIBATE). This model represents and predicts at barn room level the energy balance impacted by 'action levers' such as room characteristics (insulation) and equipment (heating, ventilation), climate control management (temperature driving) and animals (number, status). Indirect energy is calculated through the prediction of daily feed intake, considering the effect of both the live weight and ambient temperature. Finally, economic calculations will be included into the model to allow the comparison of different housing designs and management strategies.

**Keywords**: Energy, pig barns, poultry barns, model, thermal balance, decision support tool

## 1. Introduction

Comme tous les autres secteurs d'activité, le monde de l'élevage doit être en mesure de faire évoluer ses pratiques pour limiter le recours aux énergies fossiles, en limitant à la fois ses consommations d'énergie directes mais aussi indirectes (Cf. définition 3.2.1 et 3.3.1). Le pilotage des conditions d'ambiance (température, humidité, concentration en différents gaz) dans les bâtiments d'élevage « hors-sol » est à cet égard un levier déterminant. Leur optimisation dans différents contextes (climat, qualité des bâtiments, automatismes disponibles, type d'animal) constitue l'enjeu du projet MEDIBATE. A l'échelle du système complexe que représentent les bâtiments d'élevage porcin et avicole, l'ambition est de modéliser les flux d'énergie en intégrant les connaissances disponibles en matière de bioclimatologie (échanges thermiques animal / bâtiment / milieu et leurs déterminants) et de consommations d'énergie. Il s'agit in fine de proposer aux acteurs un outil opérationnel pour l'aide à la décision.

Le projet a reposé sur un partenariat entre l'IFIP, l'ITAVI, l'INRA, les Chambres d'agriculture régionales de Bretagne et des Pays de la Loire et l'ANSES. D'un point de vue opérationnel, cette étude avait pour objectifs :

- de compléter l'outil national de diagnostic énergétique des exploitations Dia'Terre® en développant un outil plus spécialisé ;
- d'améliorer les modèles existants par la prise en compte des interactions entre les différents flux d'énergie directe et indirecte ;
- de permettre la simulation et la quantification précise des économies d'énergie réalisables au niveau des bâtiments d'élevage « hors-sol » ;

In fine, il s'agit de développer un outil d'aide à la décision pour faciliter la mise en place de leviers d'action en faveur des économies d'énergie. L'idée étant d'évaluer rapidement et précisément différents scénarios d'investissements comme par exemple de répondre aux questions suivantes : est-il plus rentable d'installer un échangeur air/air, une pompe à chaleur ou d'améliorer l'isolation de mon bâtiment ? Est-ce qu'il est économiquement profitable de chauffer mes engraisements pour économiser de l'aliment ? Quelle augmentation de ma consommation d'énergie va entraîner un renouvellement d'air plus élevé ? Comment évoluent mes besoins de ventilation et de chauffage si je baisse ma densité animale ?

## 2. Outils d'aide à la décision énergétique : les enjeux

En comparaison de modèles existants, plus partiels ou spécialisés comme des outils traitant de la concentration en ammoniac dans les salles (Dourmad et al., 2008), ou encore trop complets comme ceux à l'échelle de l'exploitation (Chardon et al., 2012), le projet d'outil MEDIBATE vise à proposer un outil de diagnostic global à l'échelle du bâtiment, prenant en compte les interactions entre les différents paramètres/flux, ce qui limite les possibles incohérences dans le conseil, tout en réduisant le nombre de diagnostics à faire par l'éleveur.

En effet, dans l'éventail des outils et modèles existants, ceux proposant une analyse combinée des flux d'énergie directs et indirects sont peu nombreux, et utilisent des ratios moyens pour de nombreux paramètres (taille, performances techniques, conduite, équipements...) ce qui limite la spécificité de l'analyse. Il est alors difficile d'évaluer précisément l'impact de la mise en œuvre d'un levier d'action donné sur l'amélioration du bilan énergétique et environnemental de l'exploitation. À titre d'exemple, un diagnostic basé sur les consommations d'énergie directes uniquement tendrait à conseiller de limiter l'utilisation du chauffage pour réaliser des économies d'énergie alors qu'un diagnostic des conditions d'ambiance suggérerait, à l'inverse, d'augmenter le chauffage pour maintenir la température de confort des animaux et réduire l'indice de consommation alimentaire (l'aliment étant la première source de

dépense d'énergie indirecte). D'autres modèles comme celui proposé par Montel et al. (2000) ont également inspiré ce travail.

A *contrario*, les modèles plus complets sont souvent :

- complexes d'utilisation en raison de leur large champ d'application (porcs, vaches laitières, cultures et pâturage pour Mélodie par exemple) et/ou de leur conception pour un usage de recherche et non de diagnostic terrain,
- peu précis (car non spécialisés) pour des exploitations incluant un atelier « hors-sol », siège de l'essentiel des consommations d'énergie de l'exploitation et qui requiert donc une analyse fine et spécifique.

Cet outil constituera un complément utile dans les élevages porcins et avicoles à ces outils de diagnostic plus globaux, comme Dia'Terre.

De plus, aucun outil existant ne propose un bilan économique complet du plan d'action associé aux résultats du diagnostic, ce qui est capital pour les éleveurs, particulièrement dans le contexte actuel.

L'enjeu du projet est donc de produire un outil de simulation adapté au diagnostic et à l'aide à la décision dans les ateliers spécialisés porcins ou avicoles. Cela suppose :

- d'introduire un bilan économique afin de valider le plan d'action élaboré à l'issue du diagnostic ;
- de prendre en compte les échanges d'énergie (directs et indirects) de façon dynamique pour rendre compte de la variabilité temporelle des couples conditions climatiques/réponse du bâtiment (selon notamment les rythmes thermiques : nyctéméral ou saisonnier, ...). De fait, le simulateur dynamique des échanges doit prendre en compte les caractéristiques des bâtiments agissant sur les flux d'énergie : volume, agencement, équipements, dimension des ouvrants, types de parois, sols, isolation, ventilation, chauffage....
- d'exploiter les données collectées à partir des usages individuels de l'outil pour consolider un référentiel collectif. La création d'une base de données associée à cet outil fournira des informations dont l'analyse permettra d'adapter les outils d'aide à la décision. Enfin, cet outil permettra d'alimenter des travaux plus prospectifs de recherche-développement sur l'incidence du climat et de son évolution, les choix de conception de bâtiments futurs (matériaux, équipements...), l'incidence de diverses réglementations, engagées ou possibles (surfaces, litière, chargement...).

À l'échelle d'ateliers qui constituent en eux-mêmes des systèmes complexes, cette approche spécialisée permettra un conseil ciblé et la mise en œuvre d'un plan d'action, en cohérence avec le diagnostic global d'exploitation. Suite à la phase de diagnostic, cet outil permettra une évaluation spécifique du gain permis par un changement de pratique ou la mise en place d'équipements, comme, par exemple l'évaluation de l'incidence de la mise en place d'un échangeur de chaleur pour préchauffer l'air des salles de post-sevrage en élevage porcine ou de la salle d'élevage en bâtiment avicole, en analysant la quantité d'énergie directe économisée (chauffage) mais également la réduction des consommations d'énergie indirectes (amélioration de l'indice de consommation de l'aliment).

### **3. Construction du modèle via la modélisation des consommations d'énergies directes et indirectes**

#### **3.1. Des ressources déjà existantes**

Les flux d'énergie dans les élevages de porcs et de volailles ont été abordés par de nombreux travaux, à différents niveaux de précision ou d'échelle (animal, bâtiment, exploitation). Les publications de la commission internationale du Génie rural (CIGR, 1984-1992) ont précisé les échanges thermodynamiques des bâtiments et les productions de chaleur par les animaux. Les principes de la

physique sur les échanges thermiques (Diu et al. 2007) permettent de modéliser en grande partie les échanges thermiques entre les bâtiments et l'extérieur. La modélisation, telle qu'utilisée dans ce projet, prend ses sources dans le modèle Mélodie (Dourmad et al. 2008) qui propose une représentation générale des flux d'éléments (N, P, K, C) et des gaz à effet de serre (GES) des exploitations ainsi que dans le modèle Moldavi pour la filière avicole (Méda, 2011).

Le programme Mélodie a permis de développer un outil de simulation évolué (modèle de simulation dynamique, programmé en langage orienté objet), plus adapté cependant à l'analyse de questions de recherche (simulation de l'impact de différents scénarios) qu'à une utilisation en situation réelle d'élevage pour le diagnostic et le conseil individuel (pas d'interface ergonomique pour le paramétrage, plusieurs heures sont nécessaires pour son fonctionnement). D'autres projets ont également conduit à la production de modèles spécialisés comme StaldVent (logiciel d'origine Danoise) qui modélise les consommations de chauffage et de ventilation pour une salle spécialisée d'élevage porcin. Enfin, des outils plus globaux, moins apparentés à des modèles qu'à un ensemble organisé de grilles d'analyse à dire d'experts des impacts environnementaux de l'exploitation, tel l'outil Dia'terre (proposé par l'ADEME en 2009), permettent de produire un diagnostic à l'échelle de l'exploitation (quelles que soient ses productions).

En production avicole, l'outil CALORSTA, développé par l'INRA (UMR-SAS) en collaboration avec l'ITAVI en 2004, permet de dimensionner le refroidissement évaporatif, l'isolation et la ventilation maximum d'un bâtiment en tenant compte des caractéristiques thermiques et géométriques de celui-ci ainsi que du climat et des différents apports de chaleurs sensible<sup>1</sup> et latente<sup>2</sup> (animaux, chauffage, litière, air entrant, abreuvement, ...). Ce dernier outil a évolué depuis, en intégrant la possibilité de gérer une base de données pour une prise en compte de l'énergie thermique dans les bâtiments.

De plus, de nombreux résultats d'essais fournissent des informations (principalement dans la filière porcine) quant à l'évolution des performances des animaux selon les conditions bioclimatiques. Ainsi, Massabie et al en 2003 et en 2006 présentaient les écarts de performances en fonction de la température ambiante des salles en engraissement et de la densité animale.

Ainsi, les données, documents et ressources disponibles sur les flux d'énergie dans les bâtiments d'élevage ont constitué une base solide et indispensable pour la création du modèle.

### *3.2. Modélisation des consommations d'énergie directes*

#### **3.2.1 Définition et origine des consommations d'énergie directes**

L'énergie directe (aussi appelée énergie finale) consommée par un élevage est définie comme l'énergie dégradée définitivement par une installation ou un équipement. Par exemple, l'énergie directe électrique sera celle utilisée pour les besoins en force motrice des ventilateurs ou pour les radiants électriques. L'énergie directe est celle qui est facturée à l'exploitant (kWh électrique, kg de gaz, litre de fioul).

#### **3.2.2 Principaux postes de consommation d'énergie directe**

En élevage « hors-sol », quatre pôles principaux sont à l'origine de la consommation d'énergie directe : (1) le chauffage, (2) la ventilation, (3) l'éclairage et (4) les automates de distribution des aliments. Les consommations d'énergie pour les postes (3) et (4) peuvent facilement être appréhendées par le calcul du temps de fonctionnement des équipements, multiplié par leur puissance. En revanche, la ventilation et le chauffage sont généralement régulés par un système de gestion électronique. Il est donc difficile pour l'éleveur de connaître le couple (temps de fonctionnement-puissance) nécessaire pour évaluer les dépenses énergétiques.

---

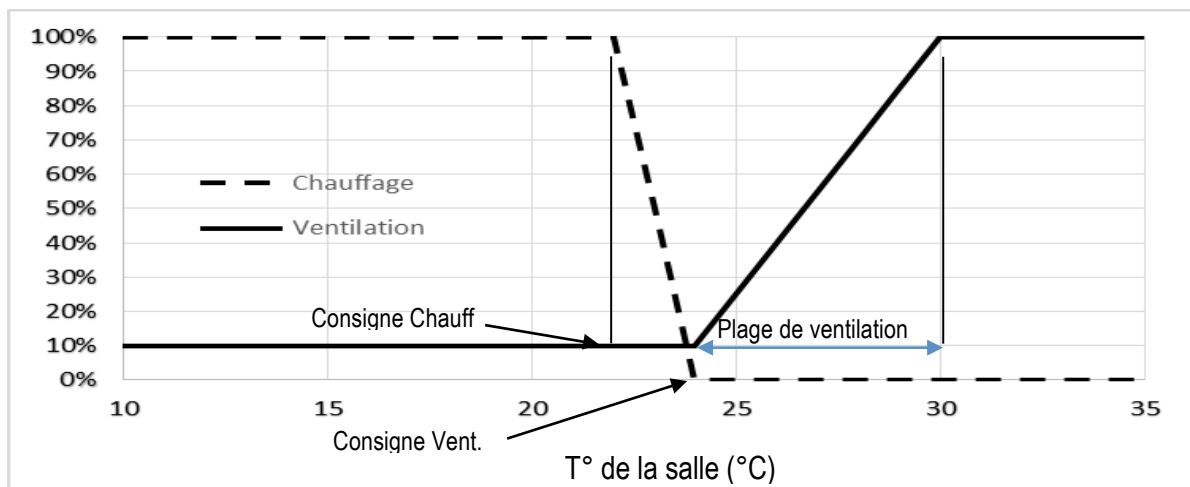
<sup>1</sup> Chaleur sensible : quantité de chaleur produite par l'animal et utilisée pour élever la température de son environnement (air, sol, parois, toiture)

<sup>2</sup> Chaleur latente : quantité de chaleur produite par l'animal et utilisée pour un changement d'état comme le passage de l'eau sous forme liquide à de la vapeur d'eau (évaporation).

### 3.2.3 Régulation du chauffage et de la ventilation

#### Les cas des élevages porcins

La ventilation et le chauffage des salles d'élevage suivent une évolution linéaire entre un minimum et un maximum correspondant aux bornes d'une plage de température. Une description générale de l'évolution du chauffage et de la ventilation est présentée à la figure 1. Le chauffage est à son niveau maximum (généralement 100% de la puissance disponible) lorsque la température de la salle est inférieure à une valeur seuil dite « consigne de chauffage ». Le chauffage est réduit jusqu'à un minimum (généralement 0%) lorsque la température de la salle dépasse un second seuil dit « consigne de ventilation ». Au-delà de cette valeur, la ventilation (jusqu'à son régime minimal) s'accroît en intensité (linéairement avec la température) pour atteindre son maximum lorsque la température atteint ou dépasse le maximum de la « plage de ventilation ».



**Figure 1** : Représentation du fonctionnement de la régulation du chauffage et de la ventilation

Le modèle MEDIBATE reproduit le fonctionnement de cette régulation pour déterminer les consommations d'énergie directe de chauffage et de ventilation. Or, comme le montre la Figure 1, le fonctionnement du couple ventilation/chauffage est piloté par la température de la salle ; la construction du modèle MEDIBATE s'articule donc autour d'un bilan thermique permettant de déterminer de façon dynamique (en continu) la température de la salle.

#### Les cas des élevages avicoles

En élevage avicole, le principe de fonctionnement est similaire. La principale différence vient de ce que dans la même salle les animaux arrivent au stade « poussins de 1 jour » et partent lorsqu'ils ont atteint le poids d'abattage. En conséquence, les valeurs des consignes de température sont différentes (32 et 35°C contre 28 à 24°C en porcs) tout comme les besoins de ventilation varient dans un rapport de 1 à 200 entre le stade « endothermique » où le bâtiment doit être chauffé et le stade « exothermique » où la chaleur émise par les volailles doit être évacuée pour rester dans la plage de température de confort des animaux (en élevage porcine les besoins varient de 3 à 35 m<sup>3</sup>/h/animal). Une économie d'énergie directe est réalisée en période de chauffage (via les échangeurs de chaleur qui permettent de préchauffer l'air entrant avec la chaleur de l'air sortant) mais une surconsommation est inévitable en période exothermique causée par une ventilation accrue. En outre, le vide sanitaire avant l'arrivée des animaux est plus long qu'en élevage de porcs et induit donc un refroidissement du bâtiment, notamment du sol, qui est variable en fonction des saisons et de la durée du vide, et qui doit être compensé par une période de préchauffage du bâtiment très consommatrice d'énergie. Enfin, dans la majorité du parc de bâtiments français, le chauffage est apporté par des systèmes de combustion à

l'intérieur du bâtiment (radiants, aérothermes), qui génèrent des gaz de combustion ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) à évacuer et donc un besoin supplémentaire de ventilation.

### 3.2.4 Schéma général de MEDIBATE

#### Logiciel utilisé

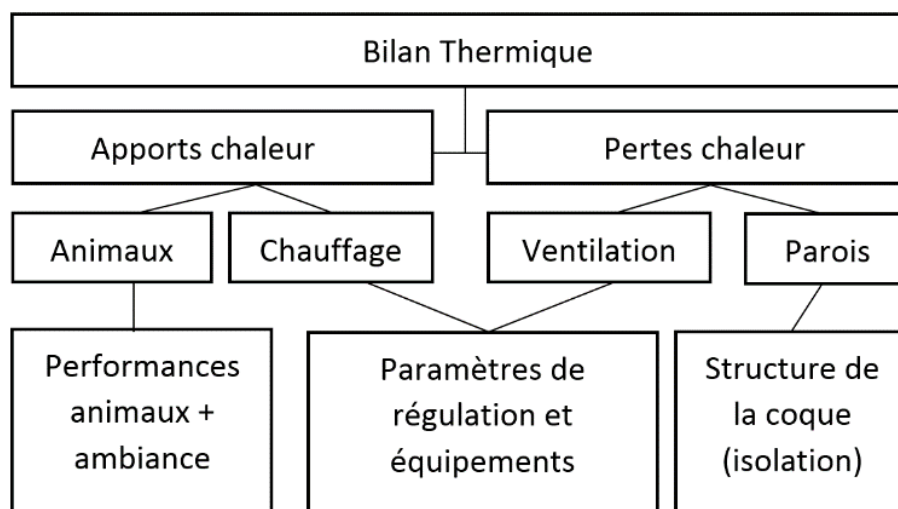
Le logiciel Vensim® (Vensim® DSS for Windows Version 5.11A, et version 6.3 Ventana Systems) a été choisi pour sa capacité à traiter un grand nombre d'opérations très rapidement et de manière dynamique (la variable « temps » étant intégrée). La réalisation d'interfaces utilisateur en Windows form® utilise le moteur de calcul développé sur Vensim® et permet la réalisation d'un outil ergonomique pour un applicatif de terrain capable de donner des résultats instantanés.

Le caractère dynamique du modèle (par l'intégration de la dimension temporelle) donne par ailleurs la possibilité de prendre en compte finement l'incidence du climat et de sa variabilité :

- A court terme, variabilité (pour le diagnostic), à travers ses rythmes (journalier voire saisonnier) qui complexifient les choix d'optimum (la moyenne des résultats instantanés, constituant la réalité, pouvant différer sensiblement du résultat simplement établi sur la base de niveaux moyens des paramètres d'entrée). Par exemple, une température moyenne journalière de  $15^\circ\text{C}$  cache en réalité de températures instantanées oscillant entre  $8^\circ\text{C}$  et  $20^\circ\text{C}$ . Or, pour des porcs de 30 kg avec  $15^\circ\text{C}$  extérieur en moyenne on pourrait conclure qu'il n'y a pas eu besoin de chauffage alors qu'en réalité aux heures les plus froides le chauffage a bien fonctionné.
- A long terme : cela peut permettre d'identifier des solutions préventives lors de la conception des futurs systèmes d'élevage par une analyse plus prospective de scénarios incluant des évolutions climatiques (par exemple, l'impact du réchauffement climatique sur le bilan énergétique des élevages « hors-sol »).

#### Architecture de MEDIBATE

MEDIBATE est un modèle dynamique qui repose sur un bilan thermique (Figure 2) lui-même dépendant des paramètres de fonctionnement des boîtiers électroniques de régulation de l'ambiance (Figure 1) (température de consigne, plage de chauffage, plage de ventilation, décalage de consignes, prise en compte éventuelle de la teneur en  $\text{CO}_2$  et de l'hygrométrie intérieure et du climat extérieur dans le choix des débits de ventilation (Aubert et al., 1997 ; Amand et al., 1998)).



**Figure 2** : Architecture globale de l'outil

Un bilan thermique est établi à chaque pas de temps. Un pas de temps très court est nécessaire pour retranscrire de manière réaliste les réactions du système de régulation qui opère en continu. Il doit être inférieur au temps de renouvellement du volume d'air de la salle d'élevage (maximal lorsque les

températures sont les plus hautes), donc inférieur à 1 minute en été et en fin de lot.

Dans le modèle MEDIBATE : Bilan Thermique ( $B_t$ ) = Apports de Chaleur – Pertes Thermiques (Tableau 1).

Les apports de chaleur ont deux origines : (1) le chauffage dont la quantité d'énergie apportée à un instant « t » est directement dépendante du pourcentage de chauffage, lui-même calculé à partir des paramètres de régulation des équipements (Figure 1 ; Amand et al., 1998) et de la puissance totale du chauffage, (2) la production de chaleur sensible des animaux, estimée ici en s'appuyant sur des équations proposées par Ström dans le groupe de travail de la Commission Internationale du Génie Rural (CIGR) en 1984 et complétée par la CIGR en 1992 et 2002. En élevage avicole, les paramètres de ces équations sont modulés en fonction de la croissance des animaux. On constate en effet une diminution de la production de chaleur lorsque la croissance est moins rapide. L'éclairage est pris en compte en élevage avicole car il peut contribuer faiblement à l'apport d'énergie mais surtout, la production de chaleur des animaux en période diurne est supérieure à celle en période nocturne (Galvet et al., 2011).

Les teneurs en CO<sub>2</sub> et d'hygrométrie ont également été prises en compte afin de faciliter le calibrage des paramètres de performance technique propres à chaque exploitation (voir paragraphe 3.3.2). La production de CO<sub>2</sub> par les animaux est estimée sur la base du coefficient de 0,185 (L CO<sub>2</sub>/h)/W chaleur totale (CIGR, 2002). L'hygrométrie dans le bâtiment est estimée à partir de la production de chaleur latente (vapeur d'eau).

Les pertes de chaleur prises en compte dans le modèle sont également de deux types (Tableau 1) : (1) les pertes par les parois de la salle (chaleur sensible seulement) et (2) les pertes occasionnées par le renouvellement de l'air (chaleur sensible et latente). Ces pertes ont été calculées à partir des principes de base de la thermodynamique (Diu et al., 2007).

Ce bilan détermine un déficit ou un excédent de chaleur pour le pas de temps précédent. Les conséquences de ce bilan sur la température de la salle au temps t ( $t_{salle_t}$ ) sont alors données par l'équation suivante :

$$t_{salle_t} = t_{salle_{t-30}} + \frac{B_t}{Cv_{salle}/Vsalle}$$

où  $t_{salle_{t-30}}$  est la température de la salle au temps "t + la valeur du pas de temps",  $Cv_{salle}$  est la chaleur volumique de l'air et  $V_{salle}$  le volume de la salle.

Ainsi, la température de la salle à un instant t dépend directement de la température de cette salle à l'instant t-30 et du bilan thermique.

### 3.2.5 Eléments de simplification de MEDIBATE

Le modèle MEDIBATE ayant comme finalité le développement d'un outil opérationnel de terrain, il était nécessaire de réduire le plus possible la quantité d'informations à collecter tout en maximisant la précision de la prédiction des consommations d'énergie par le modèle.

Cet objectif a entraîné plusieurs simplifications du calcul du bilan thermique. Ainsi, pour le modèle porcin les pertes thermiques par les parois ont été réduites à celles des seules parois donnant sur l'extérieur. A titre d'exemple, une salle de post-sevrage de 200 places chauffée à 28°C avec une température extérieure de 0°C perd en moyenne 9520 Wh par la ventilation, 298 Wh par les murs en contact avec l'extérieur et seulement 57 Wh par les murs contigus à une salle d'engraissement ou de post-sevrage, ce qui a justifié de négliger les échanges thermiques entre deux salles contiguës

Par souci de simplification, le modèle MEDIBATE considère une répartition de la production de chaleur des animaux parfaitement uniforme sur les 86400 secondes d'une journée. Par exemple, la production de chaleur totale d'un porc charcutier est considérée comme identique pour chaque seconde d'une



même journée, quel que soit son niveau d'activité. Enfin, le stockage d'énergie dans les murs et les sols n'a pas été pris en compte dans le modèle.

Postes du bilan	Equation utilisée dans MEDIBATE Porc	Equation utilisée dans MEDIBATE Avicole
Bilan thermique sensible $B_t$ , W	$B_t = App_A + App_C - P_p - P_v$	$B_t = App_A + App_C - P_p - P_v$
Apport de chaleur par les animaux $App_A$ , W	$App_A = Ch_{sens}$ $Ch_{sens} = Ch_{tot} \times [0,8 - 1,85 \times 10^{-7} \times (t+10)^4]$ $Ch_{tot} = 29 \times (P+2)^{0,5} - 40$ $t$ = température de la salle, °C $P$ = poids des animaux, kg $Ch_{sens}$ = chaleur sensible, W $Ch_{tot}$ = chaleur total, W	$App_A = Ch_{sens}$ $Ch_{tot} = 10,62 \times (P)^{0,75} \times 1,1$ Le coefficient 1,1 est destiné à tenir compte de l'apport de chaleur par la litière $Ch_{sens} = Ch_{tot} \times [0,8 - 1,85 \times 10^{-7} \times (t+10)^4]$ Cette équation étant valide au voisinage de 20°C, nous considérons qu'en début de lot ( $t = 30^\circ\text{C}$ , la part sensible est égale à 65%) $Ch_{lat} = Ch_{tot} - Ch_{sens}$ $t$ = température de la salle, °C $P$ = poids des animaux, kg/animal $Ch_{tot}$ = chaleur totale, W $Ch_{lat}$ = chaleur latente, W $Ch_{sens}$ = chaleur sensible, W
Apport de chaleur par le chauffage $App_C$ , W	$App_C = Prop_c \times \text{Puissance installée}$ $Prop_c = (C_c - t) \times ((Max_c - Min_c) / Pla_c)$ $C_c$ = consigne de chauffage, °C $Prop_c$ = proportion de chauffage, % $Max_c$ = maximum de chauffage, °C $Min_c$ = minimum de chauffage, °C $Pla_c$ = plage de chauffage, °C	$App_C = (C_c - t) \times (U \times S + C_v \times D) - Ch_{sens}$ $Prop_c = App_C / \text{Puissance installée}$ $C_c$ = consigne de chauffage, °C $Prop_c$ = proportion de chauffage, %
Pertes thermiques par les parois $P_p$ , W	$P_p = U \times S \times \Delta(t)$ $U$ = déperdition thermique surfacique, $W/m^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $S$ = surface déperditive, $m^2$ $\Delta(t)$ = différence de température intérieure/extérieure	$P_p = U \times S \times \Delta(t)$ $U$ = déperdition thermique surfacique, $W/m^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $S$ = surface déperditive, $m^2$ $\Delta(t)$ = différence de température intérieure/extérieure
Pertes thermiques par la ventilation $P_v$ , W	$P_v = C_v \times D \times \Delta(t)$ $C_v$ = chaleur volumique de l'air, $W/m^3 \cdot ^\circ\text{C}$ $D$ = débit d'air, $m^3/h$	$P_v = C_v \times D \times \Delta(t)$ $C_v$ = chaleur volumique de l'air, $W/m^3 \cdot ^\circ\text{C}$ $D$ = débit d'air, $m^3/h$

**Tableau 1 :** Equations du bilan thermique dans MEDIBATE

Le modèle spécifique à l'élevage avicole comporte également plusieurs simplifications. Les spécificités des élevages en ventilation naturelle n'ont pas été prises en compte dans cette première version, comme par exemple la sensibilité du débit d'air aux effets de vent et à l'étanchéité du bâtiment. L'efficacité des systèmes de chauffage, en lien notamment avec l'état des brûleurs de gaz, n'a pas non plus été prise en compte : on a donc considéré que la puissance installée et le rendement thermique de la combustion correspondaient à ceux des équipements neufs. Concernant la gestion des animaux et

de la litière, la maîtrise des circuits d'air et de la vitesse d'air dans le bâtiment influence la répartition de la production de chaleur totale par les animaux et la litière entre chaleur sensible et latente. Plus la vitesse d'air est élevée et plus la chaleur latente émise par la litière augmente. Ce qui a pour effet de réduire la part de chaleur latente produite par les animaux. La prise en compte de ce phénomène a dû être négligée en considérant une répartition identique car la connaissance des vitesses d'air au niveau de la litière nécessite la parfaite maîtrise de la mécanique des fluides et la modélisation 3D du bâtiment diagnostiqué.

### 3.3. Modélisation des consommations d'énergie indirectes

#### 3.3.1 Définition de l'énergie indirecte

L'énergie indirecte correspond à l'énergie dépensée au cours des processus de production de l'ensemble des intrants du système étudié. Ici, les sources notables de consommations d'énergie indirecte sont l'alimentation des animaux et les produits vétérinaires.

Les niveaux de dépenses en énergie indirecte sont obtenus par des analyses de cycle de vie (ACV). Dans le cadre du développement du modèle MEDIBATE, nous nous sommes intéressés uniquement à l'aliment puisqu'il représente à lui seul plus 94 % des consommations d'énergie indirecte d'un élevage de porc (Colomb et al., 2014).

L'ambiance conditionne en grande partie les performances techniques des animaux. Ainsi, selon la température de la salle ou le taux d'humidité relative les animaux vont plus ou moins bien valoriser l'énergie alimentaire. L'objectif de l'intégration de l'énergie indirecte à travers les consommations d'aliment est de pouvoir évaluer l'incidence des paramètres de gestion de l'ambiance, et donc des consommations d'énergie directe, sur les performances techniques des animaux, et donc les consommations d'énergie indirecte. Par exemple, conseiller à un éleveur de chauffer moins peut dégrader l'indice de consommation d'aliment et donc finalement générer une perte économique supérieure au gain sur la facture d'électricité.

#### 3.3.2 Prise en compte des consommations d'aliment

##### Les cas des élevages porcins

Les consommations d'aliment dans le modèle MEDIBATE sont calculées à partir de la consommation moyenne journalière (CMJ) ou de la Consommation Moyenne Journalière par Seconde (CMJS), soit  $CMJS = CMJ/86400$ .

Pour le porc à l'engrais, de nombreux travaux ont été réalisés et montrent une relation de type curvilinéaire entre l'ingestion alimentaire et la température ambiante. En 1983, une équation est proposée par Nienaber et Leroy-Hahn (1983) pour une gamme de températures (T) de 5 à 30°C.

$$CMJ = 1520 + 10,6 \times PV + 54,6 \times T - 2,6 \times T^2$$

(avec CMJ en g/j, PV = poids vif en kg, et T en °C)

Quiniou et al. (1998) proposent, pour une gamme de températures plus restreinte, une équation qui intègre une interaction entre le poids vif et la température : plus les animaux sont lourds, plus l'effet de la température est important.

$$CMJ = -3885 + 279 \times T - 5,2 \times T^2 + 97 \times PV - 0,3 \times PV^2 - 1,6 \times T \times PV$$

(avec CMJ en g/j, PV en kg et T en °C)

Quiniou et al. (2000) proposent une nouvelle équation qui réduit l'impact de la température pour les animaux lourds.

$$CMJ = -1264 + 117 \times T - 2,40 \times T^2 + 73,6 \times PV - 0,26 \times PV^2 - 0,95 \times T \times PV$$

(avec CMJ en g/j, PV en kg et T en °C)

D'autres travaux prennent en compte la composition alimentaire et en particulier la teneur en énergie de l'aliment pour affiner les équations de prédiction. Pour le modèle MEDIBATE, ce niveau de précision n'a pas été retenu, car il demande une description fine de la composition des aliments rendant difficile l'usage du modèle en élevage.

La température ambiante impacte également l'efficacité alimentaire. Lorsque le porc est placé à une température inférieure à la plage de thermoneutralité, une partie de l'énergie ingérée est mobilisée pour le maintien de la température corporelle et l'efficacité alimentaire s'en trouve dégradée.

L'indice de consommation (IC) peut être prédit en fonction du poids de l'animal. L'équation proposée par Quiniou et al. (2004) pour le porc en croissance est la suivante :

$$IC = 1,479 + 0,016 \times PV$$

(avec IC en kg/kg et PV en kg)

Pour tenir compte de l'effet de la température sur l'IC chez le porc à l'engrais, il a été retenu, d'après les travaux de Massabie et al. (1996), une détérioration de l'efficacité alimentaire pour des valeurs inférieures à 28 °C (selon une loi polynomiale d'ordre 2). Ainsi, la valeur calculée de l'IC est augmentée du coefficient correcteur calculé selon l'équation suivante :

$$Corr = 0,0009 \times (28 - T)^2 + 0,0052 \times (28 - T) + 0,0061$$

$$IC = (1,479 + 0,016 \times PV) + Corr$$

(avec T en °C)

Le gain de poids vif (GMQ) est déterminé à partir de l'indice de consommation et de la consommation d'aliment et permet de calculer le PV au pas de temps suivant.

Pour l'élevage porcin, lorsque le modèle MEDIBATE simule le fonctionnement d'une salle, l'IC, la CMJ, le GMQ, et le poids d'abattage sont calculés sur la base des équations précédentes. Mais un décalage est observé entre le potentiel calculé par le modèle MEDIBATE et les performances techniques réelles de l'élevage. Or, le poids des animaux étant la base de calcul de leur production de chaleur, les éléments de performances techniques doivent être au plus près de la réalité pour obtenir une estimation satisfaisante du bilan d'énergie. Pour ce faire, deux coefficients de correction ont été introduits dans le modèle ; (1) une correction sur la CMJS et (2) une correction sur l'IC.

Le coefficient de correction de la CMJS ( $\alpha$ ) est égal au rapport entre la CMJS réelle (celle renseignée par l'éleveur) et la CMJS simulée. De même, le coefficient de correction de l'IC ( $\beta$ ) est calculé en multipliant le GMQ simulé par  $\alpha$  et en divisant le résultat par le GMQ (30-115 kg) réel renseigné par l'utilisateur.

Ces corrections nécessitent donc une double itération du modèle : la première pour obtenir la CMJS et le GMQ simulés et la seconde pour établir le bilan définitif en appliquant les coefficients calculés  $\alpha$  et  $\beta$  afin de respecter les performances techniques réelles de l'élevage.

### **Les cas des élevages avicoles**

En élevage avicole, deux séries d'expérimentations ont été réalisées pour actualiser les connaissances relatives à l'influence des pratiques d'élevage (densité animale, température ambiante) sur les performances zootechniques des poulets de chair (Keita et al., 2015). Une diminution faible de la température de consigne en début de lot, durant la période de consommation maximale d'énergie thermique, entraîne une augmentation de la mortalité des poulets. Ce levier d'économie d'énergie est donc à éviter.

Nous avons étudié trois densités différentes, chez des poulets de souche Ross PM3 conduits dans trois salles différentes pilotées séparément pour obtenir des conditions d'ambiance similaires : 15 (groupe à faible densité FD), 21 (groupe MD) et 26 (groupe HD) animaux par m<sup>2</sup>. Le chargement final correspond à 28,0 - 37,6 et 44,0 kg/ m<sup>2</sup> respectivement pour les groupes FD, MD et HD (Tableau 2). Le chargement

final du groupe HD était au-delà des 42 kg/ m<sup>2</sup> maximum exigés par la Directive 2007/43/CE. Les animaux, de même âge, ont été mis en place et abattus simultanément. Les paramètres suivants ont été mesurés : lésions corporelles (pododermatites), mortalité, performances (poids moyen, indice de consommation), paramètres de stress (physiologique et oxydatif), rejets environnementaux (quantité et composition du fumier), consommations de gaz propane (pour le chauffage des bâtiments). Le poids moyen final est d'autant plus élevé que la densité est faible : respectivement 1956g, 1875g et 1801g dans les groupes FD, MD et HD. Aucune différence significative n'a été notée entre les trois groupes concernant l'indice de consommation. La différence de poids s'explique de ce fait par la consommation d'aliment : 3101 g par animal dans le groupe FD contre respectivement 2941 g et 2908 g dans les groupes MD et HD. La consommation de gaz propane est de 36, 33 et 29 m<sup>3</sup> respectivement dans les groupes FD, MD et HD. Ce résultat s'explique par le fait que plus il y a d'animaux par unité de surface, moins les besoins de chauffage sont importants en raison de la chaleur produite par les animaux. Le taux de mortalité est, quant à lui, significativement plus élevé pour les animaux du groupe HD (6,0%) que dans les deux autres groupes (4,4%). Il a été noté significativement moins de pododermatites dans le groupe FD (score de 1,6 sur 3) que dans les groupes MD (1,9) et HD (2,1). Le groupe HD excrète dans le fumier respectivement 3,5% et 33% plus d'azote par kg de poids vif en comparaison avec les groupes MD et FD. Par ailleurs, ce groupe HD excrète respectivement 9,6% et 36% plus de phosphore par kg de poids vif en comparaison avec les groupes MD et FD.

Postes du bilan	FD	MD	HD
Densité (nb poussins par m <sup>2</sup> )	15	21	26
Surface d'élevage (m <sup>2</sup> )	288	288	288
Durée d'élevage (jours)	32	32	32
Quantité de propane consommée (kg/salle)	165,0	151,3	133,0
Poids (n = 400/groupe) en g/poulet			
Poids J1	52,6	53,3	52,8
Poids J11	390,8 <sup>a</sup>	390,3 <sup>a</sup>	374,6 <sup>b</sup>
Poids J21	1062,3 <sup>a</sup>	1068,7 <sup>a</sup>	1034,5 <sup>b</sup>
Poids J28	1575,5 <sup>a</sup>	1561,9 <sup>a</sup>	1472,2 <sup>b</sup>
Poids J32	1956,7 <sup>a</sup>	1875,6 <sup>b</sup>	1801,2 <sup>c</sup>
Indice de Consommation (kg aliment/kg poids vif)	1,676	1,673	1,694
Mortalité (%)	4,4	4,4	6,0
Azote fumier (g N/kg poids vif)	17,9	23,1	23,9
Phosphore fumier (g P/kg poids vif)	9,2	11,4	12,5
Valorisation des poulets (€/salle)	7869	10402	11847
Charges variables (€/salle)	6422	8439	9950
Charges de structure (€/salle)	1429	1429	1429
Solde net (€/m <sup>2</sup> )	0,06	1,85	1,62

**Tableau 2** : Effets de la densité animale sur les performances zootechniques, la consommation de propane, la composition du fumier, les résultats économiques.

Un calcul économique montre un gain net (charges variables et charges de structure déduites de la valorisation des poulets, détails donnés par Keita et al., 2015) de 0,06 - 1,85 et 1,62 euros par m<sup>2</sup>/lot, respectivement pour les groupes FD, MD et HD. Ces résultats sont faibles dans tous les groupes, ce qui s'explique par le fait que les références considérées portent sur un bâtiment neuf, donc avec des charges élevées. Ainsi le lot à densité élevée conduit à une diminution de la consommation d'aliment et de gaz mais aussi à une mortalité accrue, une légère dégradation de l'état des pattes, une croissance limitée en fin de croissance de la bande. Dans les conditions de cette étude, le meilleur compromis pour

cette durée d'élevage, en tenant compte des consommations d'énergie, de l'économie, du bien-être animal, des rejets environnementaux est la densité à 21 poulets/m<sup>2</sup> (groupe MD).

#### 4. Informatisation du modèle

Dans le cadre du projet, l'informatisation du modèle a été réalisée dans le cas porcin. Pour la filière avicole, seule une version « Excel » est disponible, en raison de la plus faible disponibilité d'information en aviculture

Le modèle brut a été développé sur Vensim®. Il est donc possible, dès lors que la maîtrise de l'outil Vensim est acquise, d'utiliser le modèle porcin ou avicole. Une version gratuite de Vensim est disponible et permet une diffusion au plus grand nombre.

##### 4.1. Outil porcin

Un outil a spécifiquement été développé par le service informatique de l'IFIP pour rendre plus ergonomique le paramétrage de l'outil (Figure 3).

L'utilisateur saisit le type d'élevage, la taille de l'élevage, les performances techniques GTTT-GTE pour chaque stade physiologique, les coûts d'énergie et les coûts alimentaires. Ensuite, l'utilisateur choisit la forme générale du bâtiment et le nombre de salles. Il positionne ensuite les salles les unes par rapport aux autres. Puis, les données spécifiques à la salle sélectionnée sont remplies comme sa taille, le type de murs, s'il y a des fenêtres, des portes, le nombre d'animaux présent, les réglages du boîtier de régulation de l'ambiance. Enfin, l'outil prévoit une fenêtre pour sélectionner le type de levier d'action que l'utilisateur souhaite activer pour effectuer une simulation de consommation énergétique.

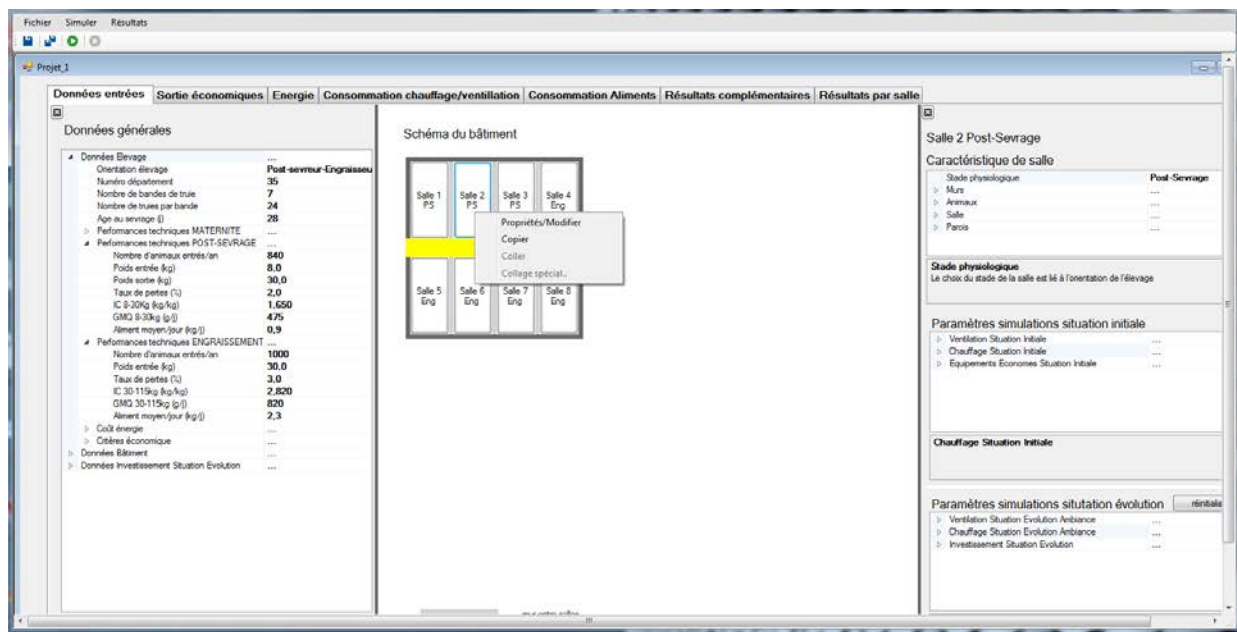


Figure 3 : Capture d'écran de l'outil MEDIBATE porcin

Une fois la simulation réalisée, cinq onglets de résultats sont disponibles :

1. L'onglet « Energie » présente la répartition des consommations par stade physiologique avant et après levier d'action et il présente également la puissance moyenne requise sur les 100 heures de l'année les plus consommatrices. L'objectif est alors de voir l'adéquation entre l'abonnement EDF et la situation de l'élevage.

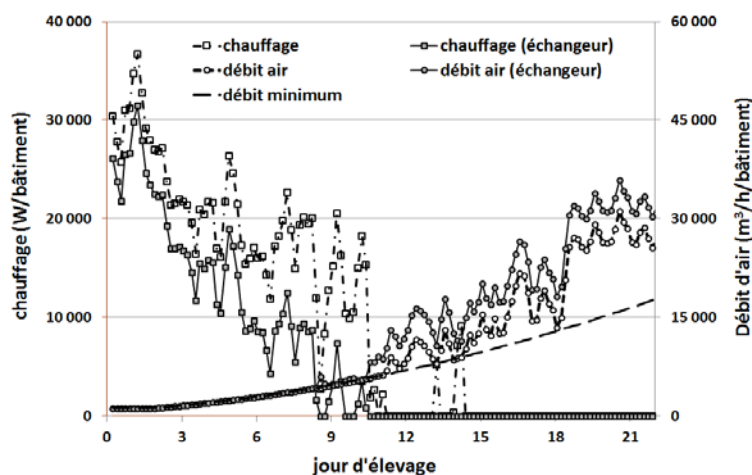
2. L'onglet « Consommation chauffage/ventilation » compare l'énergie consommée en kWh/animal pour chaque stade physiologique avant et après levier d'action. La présentation est graphique et permet à l'utilisateur de voir immédiatement l'impact du levier d'action sur les consommations énergétiques de l'élevage.
3. L'onglet « Aliment » compare l'évolution des consommations d'aliment
4. L'onglet « Résultats complémentaires » permet d'avoir des éléments plus précis sur les calculs économiques intermédiaires réalisés pour avoir la synthèse, ainsi qu'un récapitulatif des éléments saisis par stade physiologique, les performances techniques des animaux avant/après simulation ou encore les tableaux de références pour les consommations d'énergie.
5. L'onglet « Résultats par salle » permet de sélectionner l'une des salles présentes dans le bâtiment et d'afficher la courbe de température, le taux d'humidité et les consommations instantanée de chauffage et de ventilation.

L'outil permet de créer et d'enregistrer des simulations ce qui permet ensuite de charger une simulation déjà réalisée, de la modifier, de la dupliquer, de créer un nouveau projet, etc.

#### 4.2. Outil avicole

Pour illustrer les potentialités de l'outil, nous choisissons ici de présenter les résultats d'un cas de modélisation avicole qui a permis d'analyser les interactions entre mode de chauffage, débit de ventilation minimum, climat, animaux et leurs conséquences sur l'hygrométrie, la concentration en CO<sub>2</sub>, les consommations de gaz et d'électricité. Un scénario moyen de climat, bâtiment, performances zootechniques a été choisi pour analyser les conséquences de différents choix de débit minimum, isolation du bâtiment, présence d'échangeurs-récupérateurs de chaleur (ERC).

La Figure 4 illustre l'effet de la présence d'un ERC de dimension moyenne (débit recommandé de 10m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup> performances thermiques moyennes). On constate l'importance d'un calcul des bilans thermiques au pas horaire. Entre les jours 8 et 15, le chauffage s'arrête en fin de période diurne et le débit de ventilation du bâtiment dépasse le débit minimum. Cela correspond à la période où le bâtiment est endothermique la nuit et exothermique le jour. La puissance de chauffage est sensiblement réduite dans le bâtiment avec ERC. Cette baisse de chauffage a pour conséquence une diminution de la teneur en CO<sub>2</sub> et de l'hygrométrie dans l'ambiance pour le même réglage de débit minimum.



**Figure 4 :** Effet de la présence d'un échangeur récupérateur de chaleur ; carrés : chauffage ; cercles : débit d'air ; tirets : bâtiment sans échangeur ; trait continu : bâtiment avec échangeur. On constate que la présence d'un échangeur a pour conséquence de : (i) diminuer la consommation de chauffage (phase endothermique) ; (ii) augmenter le besoin de débit d'air pour évacuer la chaleur produite par les animaux (phase exothermique) ; (iii) avancer le début de la phase exothermique (période de chauffage plus courte).

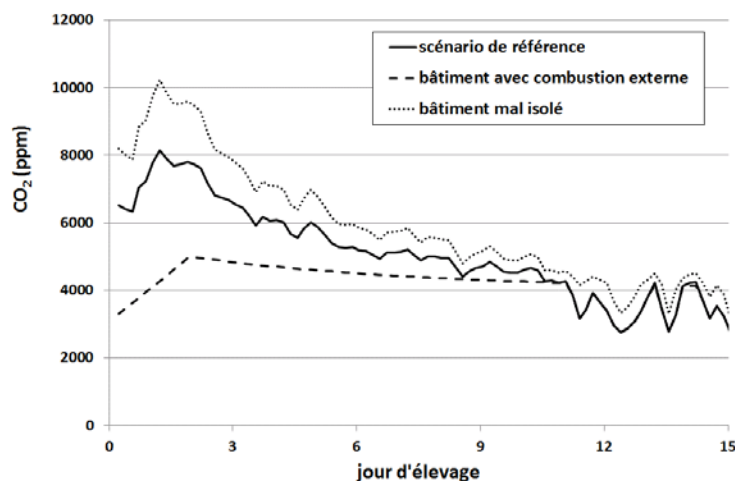
Concernant la teneur en CO<sub>2</sub>, la Figure 5 montre que la teneur en CO<sub>2</sub> augmente lorsque l'isolation du bâtiment diminue en raison d'un besoin de chauffage accru. Avec un débit d'air minimum voisin de 0,6 m<sup>3</sup>/h.kg poids vif (valeur recommandée il y a quelques années par l'ANSES) il paraît difficile d'atteindre les 3000 ppm de CO<sub>2</sub> exigés aujourd'hui par la réglementation, y compris lorsque la

combustion est placée à l'extérieur du bâtiment. Une augmentation des valeurs de débit minimum recommandées paraît indispensable.

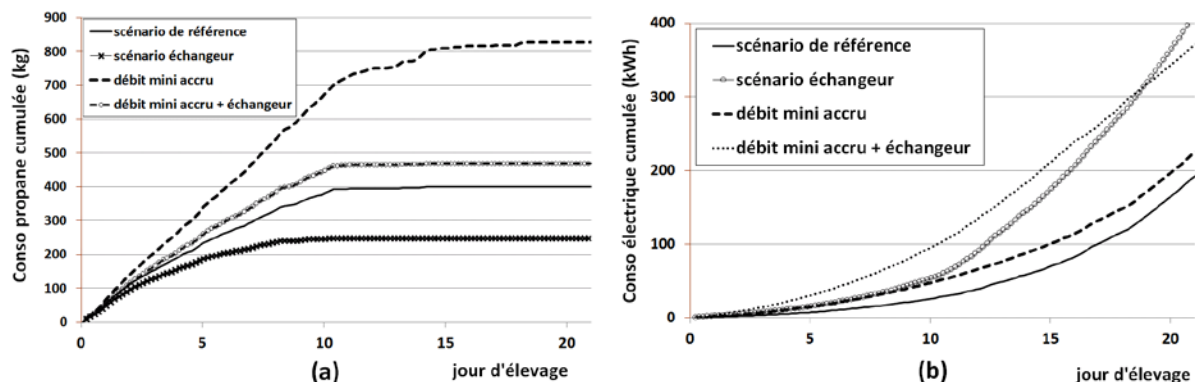
La Figure 6 montre que l'augmentation du débit d'air minimum entraîne une augmentation des consommations de gaz et d'électricité par rapport au scénario de référence. Ces augmentations de consommation d'énergie directe sont limitées lorsque le bâtiment est équipé d'un ERC et que l'on combine la ventilation par l'ERC et la ventilation par les extracteurs durant la période où la production de chaleur par les animaux prend progressivement le relais de l'apport de chaleur par le chauffage.

Durant les premiers jours, le doublement du débit d'air conduit à une augmentation de la consommation de gaz qui reste faible compte tenu du faible poids des poulets et de leur faible besoin de ventilation (Figure 6a). Cette augmentation devient en revanche importante dès la deuxième semaine d'élevage mais elle peut être compensée par la présence des ERC.

La présence des ERC génère une augmentation de la consommation électrique (Figure 6b). Ceux-ci ne sont utiles que dans la période endothermique. Toutefois, au cours de la deuxième semaine, le bâtiment est exothermique avec des ERC mais endothermique sans (Figure 4). Leur arrêt au cours de cette période conduirait à une consommation de chauffage. En revanche, lorsque la ventilation par les ERC est arrêtée progressivement et remplacée par les extracteurs d'air à mesure que les animaux grandissent, l'augmentation de la consommation électrique reste limitée et la consommation de gaz est réduite.



**Figure 5** : Evolution de la teneur en CO<sub>2</sub> selon divers scénarios ; on constate qu'une baisse d'isolation conduit à une augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> ; la mise en œuvre des recommandations de débit minimum « classiques » ne permet pas de descendre sous le seuil de 3000 ppm de CO<sub>2</sub> en début de lot, y compris lorsque le bâtiment est chauffé avec une combustion externe à l'élevage.



**Figure 6** : Consommation d'énergie (a : propane ; b : électricité) selon divers scénarios durant les trois premières semaines d'un lot ; l'augmentation du débit minimum (tirets) augmente à la fois les consommations d'électricité et de gaz par rapport au scénario de référence (trait continu) ; l'ajout d'ERC (cercles) permet de réduire la

consommation de gaz mais augmente la consommation électrique ; lorsque la ventilation par les ERC est remplacée progressivement par les extracteurs, la surconsommation électrique s'arrête au cours de la troisième semaine.

## 5. Conclusion

Un modèle a été développé d'une part en production porcine, d'autre part en production avicole dans la perspective de diffuser aux conseillers en élevage des outils d'aide à la décision concernant la gestion de l'énergie directe et indirecte. Ces outils sont destinés à faciliter le choix des investissements ainsi que les réglages des équipements de ventilation et chauffage. Pour l'outil Avicole, il doit encore être couplé à une évaluation économique étant donné la fragilité économique actuelle d'un grand nombre d'ateliers de production.

Dans le domaine porcin, MEDIBATE a été testé sur des jeux de données issus des stations expérimentales des partenaires du projet. Avec un écart moyen entre les températures moyennes simulées et mesurées de 0,28°C, MEDIBATE s'avère capable de reproduire de manière fiable l'évolution des conditions d'ambiance à l'intérieur d'une salle. La température étant intrinsèquement liée aux dépenses de chauffage et de ventilation, le modèle est également fiable dans ses prédictions de consommation énergétique. La diffusion de l'outil est maintenant en cours pour appuyer les conseillers dans leur travail sur le thème de l'énergie.

Dans le domaine avicole, différents scénarios ont été comparés en fonction de l'isolation et de la ventilation du bâtiment. Ils montrent l'intérêt des échangeurs-récupérateurs de chaleur pour à la fois réduire les consommations d'énergie thermique et la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'ambiance. Les perspectives sont de diffuser une version aux conseillers et éleveurs et d'étendre la modélisation à d'autres productions.

## Références bibliographiques

- ADEME, 2006. Utilisation rationnelle de l'énergie dans les bâtiments d'élevage [Rapport d'étude], Edition ADEME, 566p.
- Amand G., Aubert C., Balaine L., Valancony H., Renault P., 1998. La gestion technique des bâtiments avicoles. Hors-série Sciences et Techniques Avicoles. Ed ITAVI / CNEVA, 70 p.
- Aubert C., Balaine L., Amand G., Blevin F., Guillou M., Morcel G., Renault P., Valancony H., 1997. La maîtrise de l'ambiance dans les bâtiments avicoles. Hors-série Sciences et Techniques Avicoles. Ed ITAVI / CNEVA, 68 p.
- Bartussek H., Chirstiaens J., Pedersen S., De La Farge B., Wolfermann H.F., Chiappini U., Brandsma C., Lilleng H., Sallvik K., Rist M., Bruce J., Hahn L., Debruyckere M., Pratelli G., 1984. CIGR: Report of Working group on climatization of animal houses. Aberdeen, 72p.
- Bartussek H., Chirstiaens J., Sallvik K., Rist M., Bruce J., Deshazer J., Pedersen S., Wolfermann H.F., Chiappini U., Van Ouwerkerk E., Lilleng H., 1992. CIGR : 2nd Report of Working group on climatization of animal houses. Aberdeen, 147 p.
- Calvet S., Estellés F., Cambra-López M., Torres A.G., Van den Weghe H.F.A., 2011. The influence of broiler activity, growth rate, and litter on carbon dioxide balances for the determination of ventilation flow rates in broiler production. Poultry Science 90, 2449–2458.
- Chardon X., Rigolot C., Baratte C., Espagnol S., Raison C., Martin-Clouaire R., Rellier J.-P., Le Gall A., Dourmad J.-Y., Piquemal B., Leterme P., Paillat J.-M., Delaby L., Garcia F., Peyraud J.-L., Poupa J.-C., Morvan T., Faverdin P., 2012. MELODIE: a whole-farm model to study the dynamics of nutrients in dairy and pig farms with crops. Animal 6, 1711-1721.
- CIGR, 2002. Climatization of Animal Houses - Heat and moisture production at animal and house levels. Editors: Pedersen, S. & Sällvik, K. ISBN 87-88976-60-2. www.agrsci.dk/jbt/spe/CIGRreport. 46p.



Diu B., Guthmann C., Lederer D., Roulet B., 2007. Thermodynamique. Hermann, 720 p.

Dourmad J.Y., Moset-Hernandez V., Espagnol S., Hassouna M., Rigolot C., 2008. Modélisation dynamique de l'émission et de la concentration d'ammoniac dans un bâtiment d'engraissement de porcs. Journées de la Recherche Porcine 40, 267-268.

Keïta A., Tavares M., Robin P., Amand G., Nicolas C., Chevalier D., 2015. Etude de différentes densités chez le poulet : effets sur les performances, le bien-être et les aspects environnementaux. Onzièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours, les 25 et 26 mars 2015, 6p.

Méda B., 2011. Une approche dynamique des flux d'éléments et d'énergie des ateliers de production avicole avec ou sans parcours : conception et application du modèle MOLDAVI. Thèse de doctorat, Université Européenne de Bretagne, Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage, Rennes, France. 238 p.

Montel B., Van Milgen J., Paboeuf F., Dourmad J.-Y., 2000. Construction d'un modèle de simulation des performances zootechniques et des rejets azotés d'une bande de porcs charcutiers, Journées de la Recherche Porcine 32, 51-58.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)