

L8502

MODÉLISATION DES PHÉNOMÈNES THERMIQUES DES BÂTIMENTS D'ÉLEVAGES DE PORCS

P. MARCHAL, H. SINOQUET, J.-J. DESTENAY.

*CEMAGREF. (Division Technique et Economie des Exploitations d'Élevage Porcin
et des Élevages Industriels) - 17, avenue du Cucillé. - 35016 RENNES*

INTRODUCTION :

La température et l'hygrométrie internes d'un bâtiment d'élevage sans animaux dépend essentiellement du climat extérieur et des caractéristiques thermophysiques des parois. Pour permettre au zootechnicien de quantifier le comportement thermique d'une porcherie, c'est-à-dire son aptitude à maintenir une ambiance optimale, la division TEEPEI du CEMAGREF a conçu à partir d'un modèle théorique (WUCHNER, 1983) un logiciel fonctionnant sur micro-ordinateur.

Ce modèle informatique de transfert thermique est capable de simuler l'évolution des conditions climatiques intérieures en fonction des facteurs climatiques extérieurs et des paramètres propres au bâtiment. Grâce à ce modèle, il est possible de faire varier à volonté tous les paramètres thermophysiques du bâtiment, son orientation, l'inclinaison et la couleur de ses parois.

Parmi les différentes réponses climatiques internes obtenues avec ses simulations successives, le technicien peut choisir la plus favorable ; elle correspond à des caractéristiques thermophysiques précises pour une région donnée.

A - PRÉSENTATION DU MODÈLE

1) Principale de la modélisation

Le principal but du modèle est de déterminer l'évolution des paramètres climatiques de l'ambiance interne d'un bâtiment d'élevage quelconque en fonction du temps.

a - Le modèle

Le modèle fonctionne à partir de deux types de données, les caractéristiques du bâtiment et les facteurs climatiques externes (WUCHNER, 1983).

• Les caractéristiques définies pour chaque bâtiment étudié sont :

- les paramètres thermophysiques (conductivités thermiques, masses volumiques et chaleurs spécifiques des constituants des parois, émissivité des parois externes.)
- les paramètres indiquant la position du bâtiment (latitude, inclinaison et orientation de chaque paroi).
- les dimensions (longueur, largeur, épaisseur) de toutes les parois et des surfaces vitrées.

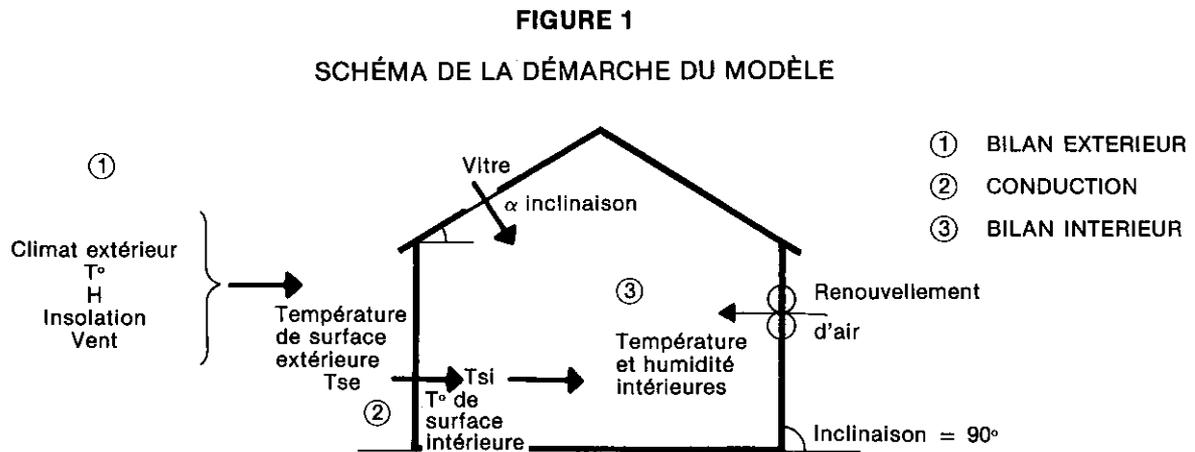
- Les facteurs climatiques externes mesurés à chaque pas de temps sont la température et l'hygrométrie externes, le rayonnement solaire global, la vitesse et la direction du vent.

En utilisant ces données, le modèle calcule la valeur des facteurs climatiques internes pour chaque pas de temps, soit 15 mn.

2) Méthodes de calcul

La résolution se fait par une méthode de bilan. Un bilan est fait au niveau de chaque paroi, à chaque pas de temps.

Le premier groupe d'équation constitue le bilan extérieur. C'est une équation du quatrième degré dont la solution est la température de surface extérieure de chaque paroi. Le deuxième groupe modélise la propagation de la chaleur à travers chacune des parois et calcule leurs températures de surface intérieure. Le troisième groupe constitue le bilan intérieur. Sa résolution détermine le couple humidité et température intérieures (figure 1).



2.1 Bilan extérieur

Le but de ce bilan est de calculer la valeur de la température de surface externe d'une paroi quelconque du bâtiment. Ce bilan est une équation mathématique établie en égalisant, au niveau de la paroi, pertes (convection au niveau de la paroi, émission de la paroi) et apports (rayonnement atmosphérique, rayonnement solaire, chaleur stockée ou perdue par la paroi).

Le bilan extérieur au niveau d'une paroi opaque doit être nul : on doit vérifier l'égalité :

$$\text{APPORTS} + \text{STOCKAGE} = \text{PERTES}$$

$$\varepsilon_p \cdot R_g + \varepsilon' \cdot R_a + Q' = \varepsilon' \sigma T_{se}^4 + \alpha (T_{se} - T_a)$$

↑ Rayonnement global reçu par la paroi ↑ Rayonnement atmosphérique reçu par la paroi ↑ Chaleur stockée ↑ Emission de la paroi ↑ Convection au niveau de la paroi

Avec : ϵ_p = émissivité de la paroi (courte longueur d'onde)
 ϵ' = émissivité de la paroi (grande longueur d'onde)
 R_a = rayonnement atmosphérique reçu par la paroi W/m^2
 R_g = rayonnement global reçu par la paroi W/m^2
 Q' = flux de chaleur réchauffant ou refroidissant un centimètre de la paroi W/m^2
 T_e = température extérieure
 T_{so} = température de surface extérieure
 α = coefficient de $W/m^2 \text{ } ^\circ C$.

La résolution de cette équation permet d'obtenir la température de surface externe T_{se} (t).

2.2. Détermination des températures de surfaces intérieures des parois opaques.

Nous avons déterminé dans le paragraphe précédent les températures de surfaces extérieures des parois. Ce paragraphe propose l'étude de la propagation de la chaleur dans le mur qui aura pour but de déterminer une température de surface intérieure (T_{si}). Il s'agit donc de résoudre l'équation de la chaleur :

$$\frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

Avec : λ = conductivité thermique en $W/m \cdot ^\circ C$
 ρ = masse volumique en kg/m^3
 c = chaleur massique en $J/kg \cdot ^\circ C$.
 x = épaisseur de la paroi

Les solutions analytiques de cette équation sont lourdes à manipuler. Nous ferons donc appel à une méthode graphique de résolution que nous appliquerons ensuite à une méthode numérique, en vue de l'utilisation de l'outil informatique (WUCHNER, 1983).

Le principe de propagation de la chaleur à l'intérieur de la paroi par petits éléments finis qui a été choisi consiste en une division de ce mur en tranches successives d'épaisseur Δx . La quantité de chaleur qui traverse l'interface ($n - 1, n$) durant Δt est :

$$\Delta Q_1 = \frac{\lambda}{\Delta x} (T_{n-1} - T_n) S \Delta t$$

De même, la quantité de chaleur traversant l'interface ($n, n + 1$) est :

$$\Delta Q_2 = \frac{\lambda}{\Delta x} (T_n - T_{n+1}) S \Delta t$$

Ainsi, la différence de chaleur ($\Delta Q_1 - \Delta Q_2$) s'accumule dans la couche n et provoque une variation de température de cette couche. Donc, on détermine $T_n^{t+\Delta t}$ à partir de l'équation :

$$\Delta Q_3 = \Delta Q_2 - \Delta Q_1 = mc (\Delta T_n)^{t+\Delta t} = \rho S \cdot \Delta x C (\Delta T_n)^{t+\Delta t}$$

Pour obtenir un temps d'exécution du programme informatique raisonnable, nous avons choisi de ramener le mur multicouche à un mur à une seule couche dont l'épaisseur, la conductivité thermique et la capacité de stockage de la chaleur, sont identiques à celles du mur multicouche.

2.3. Bilan intérieur

A partir des températures de surface, on détermine le couple (température intérieure, humidité intérieure).

A chaque pas de temps, les apports (ou les pertes) sont constitués par :

- le flux convectif au niveau des parois (Q) et au niveau du sol (Q sol).
- les apports par les fenêtres par transmittance (Q t), par absorption (Qabs) et par conduction.

La résolution informatique de ce bilan revient à se déplacer sur la diagramme de l'air humide. En effet les apports (ou les pertes de chaleur et de vapeur d'eau) modifient l'état enthalpique de l'air.

Pour ce nouvel état enthalpique, on détermine la température et l'humidité internes en utilisant les relations liant l'enthalpie massique et le rapport de mélange à ces caractéristiques.

2.4. Conclusion

L'évolution des paramètres climatiques intérieurs est maintenant connue pour un bâtiment dont les paramètres thermophysiques, l'orientation et l'inclinaison des parois sont données et pour des conditions climatiques extérieures déterminées.

B - RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Le programme de simulation théorique a été testé sur de véritables bâtiments d'élevage afin de caler le modèle par rapport aux phénomènes réellement observés.

1) Matériels

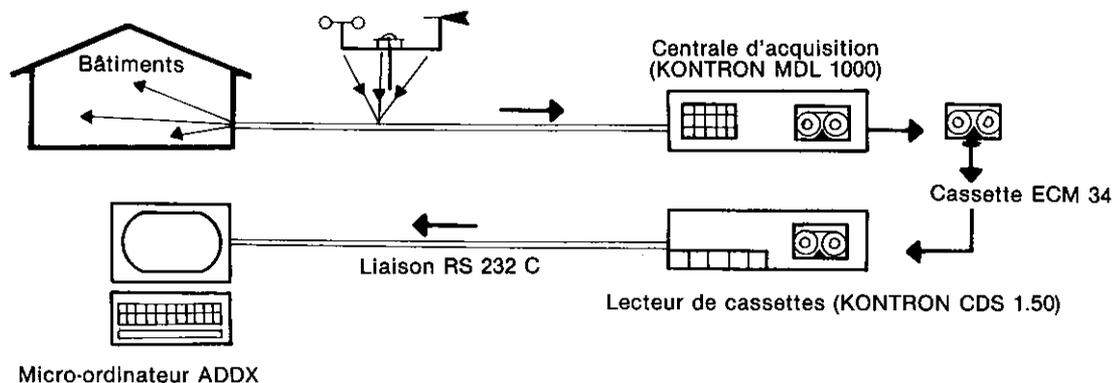
1.1. La chaîne d'acquisition de données

Avant d'entreprendre le calage, il est nécessaire de constituer les fichiers de données climatiques utilisés par le modèle. Le CEMAGREF de Rennes (division TEEPEI) a conçu et réalisé une chaîne d'acquisition de données (cf. figure 2) comprenant trois éléments :

- a) Les capteurs mesurant les paramètres suivants :
 - les paramètres climatiques extérieurs (température, hygrométrie, direction et force du vent, rayonnement global).
 - les paramètres intérieurs (température, hygrométrie).
 - les paramètres auxiliaires (températures).
- b) La centrale de mesures collecte, à intervalle de temps défini, les mesures provenant des capteurs et les stocke sur une cassette.
- c) Le lecteur de cassettes associé à un programme d'interface transfère les données de la cassette sur un fichier de microordinateur.

Cette chaîne d'acquisition de données peut être utilisée pour les études sur la maîtrise de l'ambiance dans les bâtiments d'élevage.

FIGURE 2
LA CHAÎNE D'ACQUISITION DE DONNÉES



1.2. Les bâtiments étudiés

Le modèle a pu être testé sur 3 porcheries en vide sanitaire et non ventilées. Cela a été réalisé, en période estivale, par 5 séries de mesures de 4 à 7 jours et portant sur 19 variables.

Les pièces étudiées sont des salles de bâtiments naisseurs et plus particulièrement des salles de maternité. La configuration de ces salles est la suivante :

- la longueur de la salle correspond à la largeur du bâtiment,
- les parois extérieures sont composées d'un soubassement en maçonnerie sur lequel s'élèvent des panneaux sandwich du type amiante-ciment/polystyrène.
- la toiture à faible pente (15 à 20°) est composée de plaques rigides (type amiante-ciment) sous lesquelles sont accrochés des panneaux isolants.
- le sol est soit :
 - plein, en béton ; dallage sur terre-plein ou plancher sur vide sanitaire.
 - composé par du caillebotis en béton.

2) Principaux résultats

Les courbes réalisées, à partir des données climatiques mesurées, permettent d'analyser le comportement thermique des bâtiments, et plus particulièrement les relations entre la température externe et la température interne.

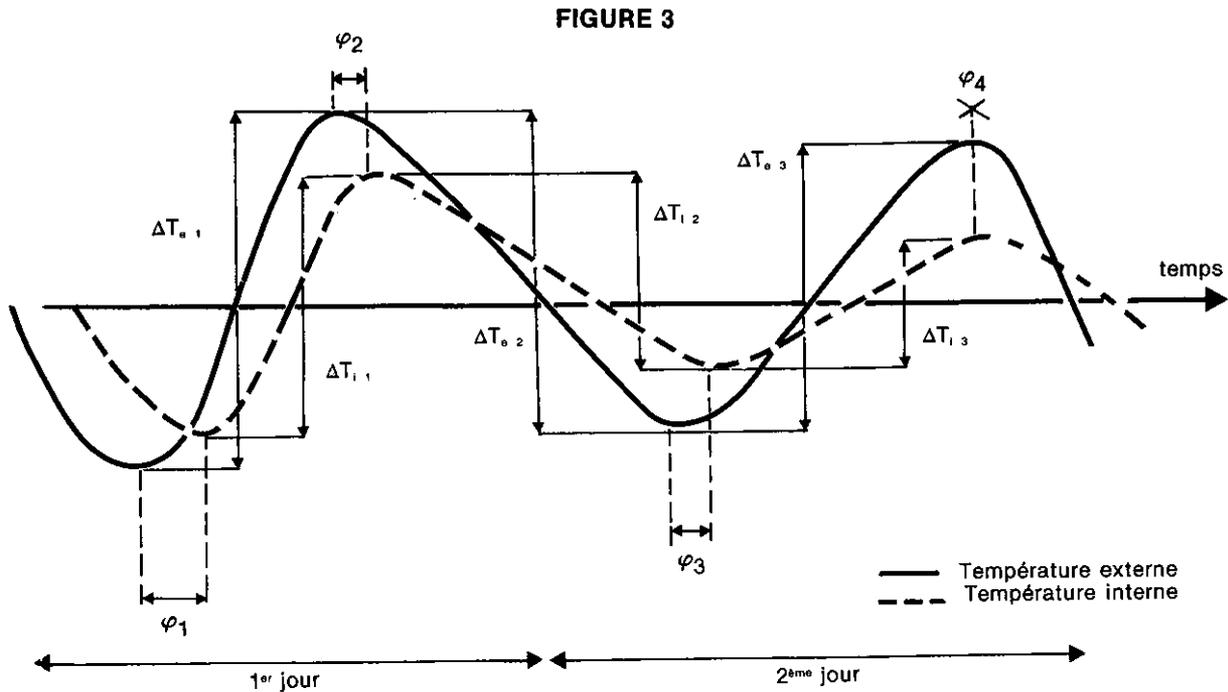
2.1. Allure générale des courbes de température

Les courbes de température mesurée (externe ou interne) ressemblent à des sinusoides de période de 24 heures. Cependant, l'amplitude et la position dans le temps extrêmes sont variables. La phase de réchauffement est plus courte, et la répartition de réchauffement/durée de refroidissement est environ 44 %-56 %. Ce déséquilibre entraîne une dissymétrie au niveau de la courbe.

2.2. Relation entre la température externe et la température interne

a) Les relations entre température externe et température interne s'expriment généralement en termes de facteur d'amortissement et déphasage. Le facteur d'amortissement est égal au rapport des amplitudes ($\Delta T_i / \Delta T_e$) et le déphasage correspond à l'intervalle de temps séparant les 2 courbes. L'exemple suivant montre que sur n jours d'observations, il est possible de définir $2n - 1$ facteurs d'amortissement et $2n$ déphasages (figure 3).

Dans le cas de sinusoïdes parfaites, les F_i et les ϑ_i seraient rigoureusement égaux ; mais pour les courbes réelles, nous ne pouvons parler que de facteur d'amortissement et déphasages moyens (tableau 1).



ΔT_e : amplitude de température externe.

ΔT_i : amplitude de température interne.

φ : déphasage

F : facteur d'amortisseur $F_i = \frac{\Delta T_{ii}}{\Delta T_{ei}}$

TABLEAU 1

FACTEURS D'AMORTISSEMENT ET DÉPHASAGES MOYENS CALCULÉS
À PARTIR DES OBSERVATIONS

	Facteur d'amortissement			Déphasage au niveau des maximums (heures)			Déphasage au niveau des minimums (heures)		
	Moyenne \bar{x}	Ecart-type σ	Coeff. variat. σ/\bar{x}	Moyenne \bar{x}	Ecart-type σ	Coeff. variat. σ/\bar{x}	Moyenne \bar{x}	Ecart-type σ	Coeff. variat. σ/\bar{x}
Le Rheu 1	0,450	0,044	0,10	0,75	0,60	0,80	1,42	0,47	0,33
Caulnes 1	0,312	0,063	0,20	3,37	1,37	0,41	0,95	0,33	0,35
Le Rheu 2	0,383	0,051	0,13	1,25	0,55	0,44	2,53	1,52	0,60
Pontivy 1	0,318	0,072	0,23	1,67	0,70	0,42	2,55	2,28	0,89
Le Rheu 3	0,333	0,030	0,09	1,45	1,18	0,81	2,28	0,57	0,25

b) Pour les amplitudes, une relation de la forme $\Delta T_i = a \cdot \Delta T_e + b$ semble être vérifiée.

Le Rheu 1 : $\Delta T_i = 0,346 \Delta T_e + 1,213$ ($r = 0,947$)

Caulnes 1 : $\Delta T_i = 0,501 \Delta T_e - 2,296$ ($r = 0,876$)

Le Rheu 2 : $\Delta T_i = 0,438 \Delta T_e - 0,626$ ($r = 0,948$)

Pontivy 1 : $\Delta T_i = 0,525 \Delta T_e - 2,381$ ($r = 0,994$)

Le Rheu 3 : $\Delta T_i = 0,354 \Delta T_e - 0,273$ ($r = 0,977$)

Le terme constant peut s'expliquer par la présence des pièces adjacentes et par le renouvellement d'air : le signe négatif serait dû à l'effet des pièces adjacentes qui atténuerait l'effet de la température extérieure.

c) Les valeurs moyennes (calculées entre le minimum et le maximum) pour chaque couple de courbes de température externe et interne, ne sont pas égales ; en effet, les valeurs prises par les maximums sont plus proches l'une de l'autre que celles prises par les minimums.

TABLEAU 2
MOYENNE DES COURBES DE TEMPÉRATURES EXTERNE ET INTERNE (en °C).

Série	Température externe	Température interne
Le Rheu 1	17,1	21,2
Caulnes 1	15,4	22,0
Le Rheu 2	19,2	26,0
Pontivy 1	20,2	24,1
Le Rheu 3	19,8	24,4

La durée de réchauffement et la réaction aux températures élevées sont beaucoup plus rapides ; ceci montre que les bâtiments sont plus sensibles au réchauffement diurne qu'au refroidissement nocturne. Le facteur déterminant est sans aucun doute le rayonnement solaire.

3) Calage du modèle

Ce calage doit permettre de faire coïncider les températures internes simulées et mesurées.

3.1. Méthode

Le principe retenu est la détermination pour chaque étude d'une combinaison de paramètres optimisée ; elle s'effectue en deux étapes : premièrement, l'analyse de l'effet de la variation d'un paramètre sur le résultat final ; deuxièmement, la détermination de la relation entre les valeurs « réelles » et optimisées des paramètres.

a) Analyse de l'effet de la variation d'un paramètre.

L'influence de chaque paramètre sur la simulation a été déterminée, alors que les autres paramètres étaient fixés. Ceci revient à considérer que les effets de chacun des paramètres sur la température interne simulée sont indépendants. Cette hypothèse n'est pas vérifiée, mais la méthode permet d'approcher de manière satisfaisante la valeur optimale des paramètres.

Nous avons vu qu'il était difficile de définir la position relative de 2 courbes de températures par les seules notions de facteur d'amortissement et déphasage. Jusqu'alors, chaque courbe de température a été définie par la valeur et la position dans le temps de ses extrema. De même la position relative de deux courbes peut être représentée par les écarts de températures et les déphasages entre les extrêmes correspondants des deux courbes. Cependant, ces valeurs caractérisant la position relative des deux courbes sont assez nombreuses (4 par journée). C'est pourquoi nous avons décidé de ne retenir que 4 valeurs caractéristiques :

- l'écart moyen de température au niveau des maximums.
- l'écart moyen de température au niveau des minimums.
- le déphasage moyen au niveau des maximums.
- le déphasage moyen au niveau des minimums.

Ces critères de comparaison des courbes sont représentatifs dans la mesure où les écarts

ont toujours lieu dans le même sens et ne présentent pas trop de différences les uns par rapport aux autres.

Par analogie avec la régression linéaire, on peut considérer que le modèle doit permettre d'expliquer la variation de température à l'intérieur de la pièce étudiée.

La quantité :

$1 - \frac{\sum (T \text{ mesurée} - T \text{ modélisé})^2}{\sum (T \text{ mesurée} - T \text{ mesurée})^2}$ correspond à la variation relative de température expliquée par le modèle.

b) Relation entre les valeurs réelles et optimisées des paramètres.

Le 2^e objectif est la détermination d'une relation entre la valeur « réelle » d'un paramètre et la valeur « optimisée » qui permet la superposition des courbes simulées et mesurées.

En effet, la simulation aura le déroulement suivant :

Lecture des paramètres → Valeur optimisée = f (valeur réelle) → Simulation avec les valeurs optimisées.
(valeur réelle)

Ceci permet donc d'obtenir une bonne prédiction des températures internes, tout en introduisant dans le modèle les valeurs « réelles » des caractéristiques thermiques du bâtiment.

3.2. Influence de la variation des paramètres sur le résultat fourni par le modèle.

L'influence de chaque paramètre a été étudiée séparément, c'est-à-dire les autres étant fixés, et a permis de discerner :

- les paramètres dont la variation influence beaucoup le résultat fourni par le modèle. Ces paramètres sont dits « fortement inertes ». Ils comprennent l'émissivité petites longueurs d'onde, la conductivité thermique des parois et le taux de renouvellement d'air parasite.
- les paramètres dont la variation a peu d'effet sur le résultat de la simulation. Ces paramètres à faible inertie sont l'émissivité à grandes longueurs d'onde (infra-rouge) $\epsilon_i R$, la conductivité thermique du sol (λ_{sol}), l'épaisseur du matériau réchauffé au cours du bilan extérieur (EPREF).

TABLEAU 3

VARIATION ENGENDRÉE SUR LES VALEURS CARACTÉRISTIQUES DE LA COURBE DE TEMPÉRATURE INTERNE SIMULÉE

Paramètre x	Δx	ΔT_{max}	ΔT_{min}	$\varphi (T_{max})$	$\varphi (T_{min})$
1° Paramètres à forte inertie					
Emissivité visible : ϵ_{vis}	0,1	1,00 °C	0,12 °C	- 8 mn	- 8 mn
Conductivité parois : λ_p	0,01W.m ₋₁ .°C ₋₁	0,71 °C	-0,26 °C	- 23 mn	- 24 mn
Renouvellement d'air parasite RAP	0,5 volume/heure	-0,24 °C	-0,42 °C	- 10 mn	- 31 mn
2° Paramètre à faibles inertie					
Emissivité infrarouge : $\epsilon_i R$	0,05	-0,14 °C	-0,03 °C	0 mn	0 mn
Épaisseur réchauffée : EPREF	1 cm	-0,25 °C	-0,33 °C	+ 12 mn	+ 15 mn
Conductivité sol : λ_{sol}	0,25W.m ₋₁ .°C ₋₁	+0,01 °C	-0,06 °C	+ 1 mn	0 mn

Lors du calage, seuls les paramètres à forte inertie permettent de moduler la courbe de températures internes de manière appréciable. C'est pourquoi nous n'envisagerons l'optimisation que pour ces paramètres ; les paramètres à faible inertie étant fixés à leur valeur « réelle ».

3.3. Optimisation des paramètres

– Plusieurs simulations sont effectuées pour chaque bâtiment, et ont permis de déterminer la courbe simulée pour laquelle la superposition avec la courbe observée était la meilleure. A partir de cette courbe et du tableau 3, nous pouvons déterminer théoriquement la combinaison de paramètres optimisés permettant de réduire à zéro les écarts moyens de température, et les déphasages entre les courbes de température interne simulée et observée.

La combinaison optimale obtenue pour les paramètres fortement inertes du bâtiment de Rheu 1 est :

- émissivité visible : 0,4
- conductivité des parois $0,03\text{W.m}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$.

– Seule la valeur optimisée de l'émissivité visible (0,4) est différente de sa valeur réelle (0,6). Pour les autres paramètres, valeur réelle et valeur optimisée sont identiques.

3.4. Précision du modèle

Dans le cas où les mesures climatiques sont bonnes et les caractéristiques du bâtiment bien connues, le modèle permet d'expliquer au minimum entre 70 et 75 % de la variation totale de température interne.

Il apparaît possible d'obtenir des résultats meilleurs en affinant l'optimisation des paramètres et en utilisant une méthode de calcul plus précise du transfert thermique à travers les parois.

Dans une présentation différente, cette modélisation CWMS 1 permet la prévision de la température et de l'amplitude des températures moyennes à l'intérieur du bâtiment étudié. Le tableau suivant donne ces valeurs moyennes réelles et simulées, pour chaque série de mesures.

TABLEAU 4
COMPARAISON DES VALEURS RÉELLES ET SIMULÉES DES TEMPÉRATURES
ET AMPLITUDES MOYENNES, POUR CHAQUE SÉRIE DE MESURE.

	Températ. réelle moyenne (°C)	Températ. simulée moyenne (°C)	Ecart (Ts – Tr) (°C)	Amplitude réelle moyenne (°C)	Amplitude simulée moyenne (°C)	Ecart relatif $\frac{As - AR}{AR}$ %
Le Rheu 1	19,54	20,02	0,48	5,63	7,03	24,90
Caulnes 1	20,24	20,40	0,16	4,09	3,71	9,30
Le Rheu 2	21,63	21,23	-0,40	5,01	6,46	28,90
Pontivy 1	22,50	21,69	-0,81	4,42	5,24	18,60
Le Rheu 3	21,99	22,13	-0,14	5,39	7,13	32,30

CONCLUSION

La constitution d'un modèle de transfert thermique dans les bâtiments d'élevage, et la vérification, sur le terrain, de la validité des résultats obtenus par ce modèle, a permis au CEMA-GREF :

- de disposer d'un OUTIL (CWMS1) pour déterminer, à partir des données climatiques d'une région et des caractéristiques d'un bâtiment à construire, la variation de la température interne ; ce programme informatique permet ainsi de définir les paramètres optimaux pour une région donnée.
- de créer une CHAÎNE D'ACQUISITION automatique des principaux paramètres caractérisant l'ambiance de tout bâtiment d'élevage construit.
- d'autoriser la construction ultérieure d'un deuxième programme informatique (CWMS2) définissant les variations de température interne d'un bâtiment en tenant compte du climat régional, des caractéristiques du bâtiment, mais aussi du type de ventilation et des animaux en place.

Une fois terminé, ces modèles fourniront un moyen objectif pour juger des qualités thermiques d'un bâtiment d'élevage de porcs et pour conseiller les éleveurs.

BIBLIOGRAPHIE

- COSAR P., 1982. Transmission de la chaleur. Données numériques. *TECHNIQUE DE L'INGÉNIEUR* : mécanique et chaleur. Fiche B 96.
- COUILLARD D., 1982. Problèmes de régime transitoire appliqués au chauffage et au conditionnement des locaux. *TECHNIQUE DE L'INGÉNIEUR*. Fiche B 240.
- D.T.U., 1975. Règles « TH ». Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, éd., Paris.
- GUILBOT A., 1971. Processus d'optimisation en quatre étapes appliqué à la recherche des paramètres des modèles déterministes. Laboratoire d'hydrologie mathématique.
- KREITH F., 1967. Transmission de la chaleur et thermodynamique. Masson. éd., Paris, 270 p.
- SINOQUET H., 1984. Mise au point d'un modèle de comportement thermique de bâtiments d'élevages de porcs. Mémoire, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes.
- TRICAUD J.-F., 1978. Atlas énergétique du rayonnement solaire pour la France. Pyc. éd., Paris, 278 p.
- WUCHNER A., 1983. Essai de modélisation des phénomènes thermiques au sein d'un bâtiment d'élevage de porcs. Mémoire, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes.