



INRA



Utilisation de l'analyse de sensibilité pour juger de la pertinence d'un modèle de dissipation de la chaleur chez la vache laitière

Mathieu David

Master 2 statistiques des entreprises 2011/2012,

Stage de fin d'étude,

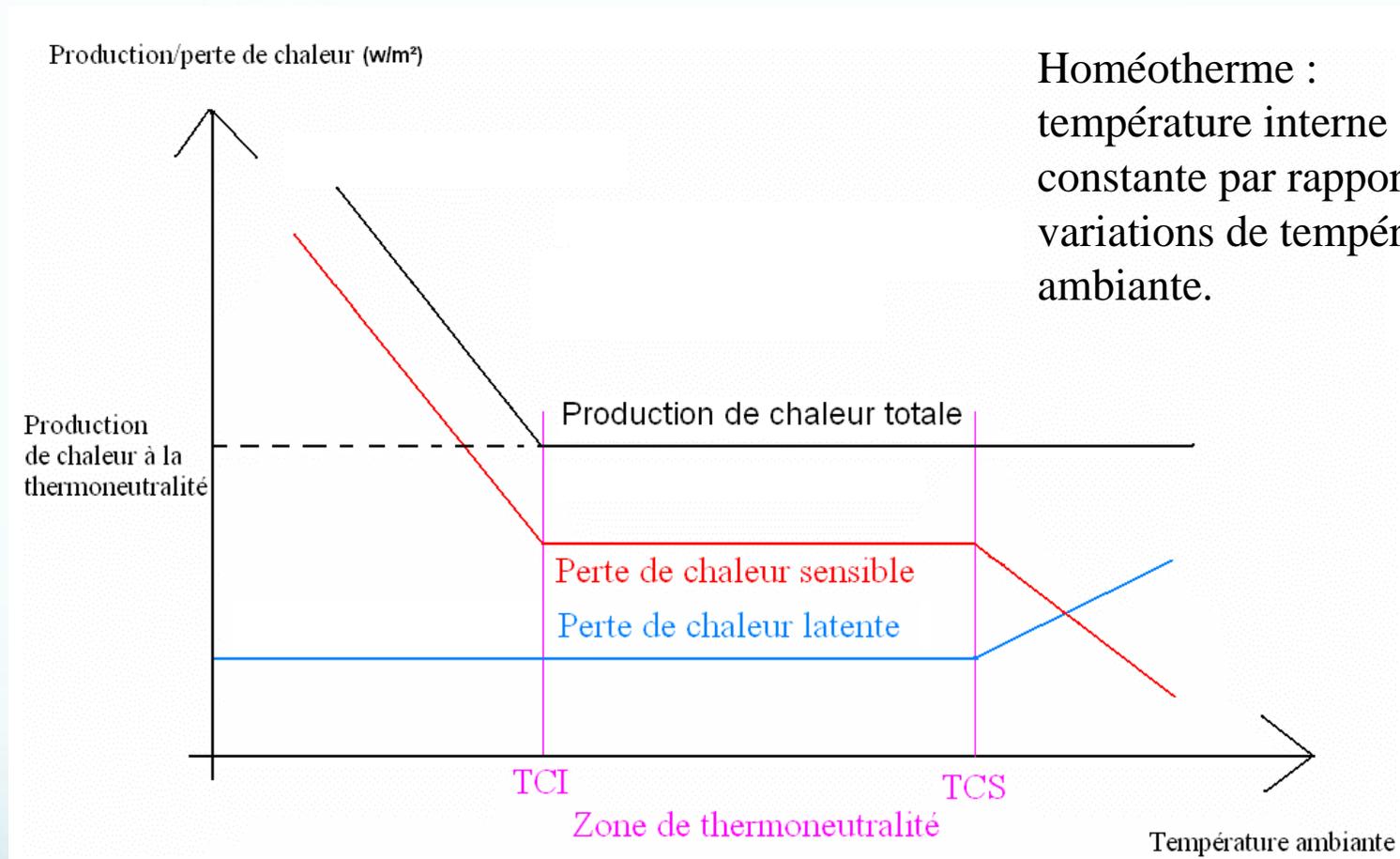
encadré par **Anne BOUDON**,

UMR 1348 INRA-Agrocampus Ouest PEGASE, Saint-Gilles Rennes.

Pourquoi un modèle modèle de dissipation de la chaleur chez les vaches laitières?

- Vache laitière = **une grande quantité de chaleur à dissiper** de part ses spécificités métaboliques :
 - ❖ cf. moindre efficacité digestive des ruminants
 - ❖ associée à de forts besoins en énergie pour une lactation et une gestation concomitantes)
- Contexte de réchauffement climatique et de forte augmentation de la demande mondiale en lait :
 - **Peut-on prédire les effets des conditions météorologiques dans des contextes de fortes chaleurs sur les performances des vaches laitières?**
- Hypothèse : Le **recours à des modèles de dissipation de la chaleur** pourrait permettre de prédire les combinaisons de performances des vaches et de contextes météorologiques pouvant poser problème.

La thermorégulation chez les animaux homéothermes.



Modèles de dissipation de la chaleur des vaches laitières = **prédiction des flux de chaleur sensible et latente** en fonction de **paramètres zootechniques** (production totale de chaleur) et de **paramètres météorologiques**.

Modèles de dissipation thermique publiés chez les animaux d'élevage.

Type de modèle	Modèles thermiques	Lieu	Nombre d'équations	Entrées modèles
Empirique	CIGR (2002)	Danemark	3	poids vif production laitière stade de gestation température ambiante
	Maia et al. (2005a, b)	Brésil	2	poids vif température ambiante
Théorique (mécaniste)	Ehrlemark et Sallvik (1996)	Suède	20	poids vif résistance des tissus température ambiante température de surface vitesse de l'air
	Turnpenny et al. (2000)	Royaume-Uni	21	6 paramètres climatiques 7 caractéristiques de l'animal
	Gebremedhin et al. (2001)	USA	30	Modèle défini pour des fortes chaleurs et des taux d'humidités importants.
	McGovern et Bruce (2000)	Royaume-Uni	47	14 paramètres
	McArthur (1987)	Royaume-Uni	49	

Choix d'un modèle mécaniste « simple »

Paramètres susceptibles de faire varier les flux de chaleur dissipée

:

Température ambiante

Température radiante

Vitesse du vent

(Humidité de l'air)

Poids vif de l'animal, ingestion, nature de l'aliment

Difficulté à tester toutes les combinaisons

Recours à un modèle mécaniste théorique

Choix du modèle de Turnpenny et al. (2000) = modèle multi-espèce, compromis simplicité/description des mécanismes

Stratégie et plan.

- i. Programmation du modèle de Turnpenny et al. (2000) sous R et confrontation des simulations du modèle aux simulations types de la publication et au schéma théorique de la thermorégulation.
- ii. Analyses de sensibilité des températures critiques supérieure et inférieure.
- iii. Confrontation des prédictions du modèle à des données expérimentales.
- iv. Analyse de sensibilité sur la perte de chaleur latente, la température corporelle et la température de peau.

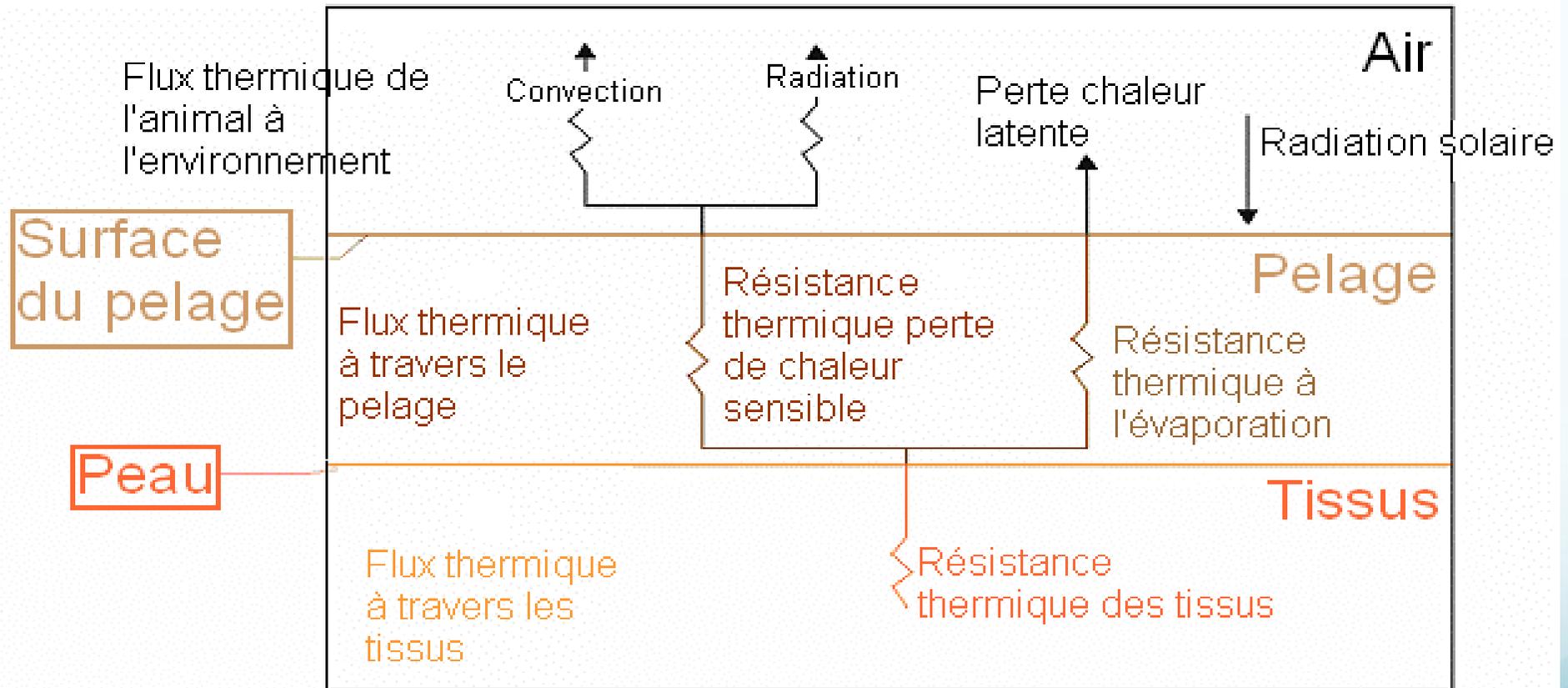
**Partie I : Programmation du
modèle de Turnpenny et al.
(2000) sous R
Confrontation aux
simulations types de la
publication et au schéma
théorique de la
thermorégulation.**

Entrées\sorties principales du modèle de Turnpenny et al. (2000).

Entrées principales.	Sorties principales.
Caractéristiques de la vache. production de chaleur à la thermoneutralité poids vif longueur du pelage	Pertes de chaleur. perte de chaleur latente perte de chaleur sensible perte de chaleur totale
Données environnementales. température ambiante température radiante vitesse du vent	Résistance. résistance des tissus
	Températures. température de peau température du corps température du pelage

Représentation schématique de la vache.

- Vache=cylindre.



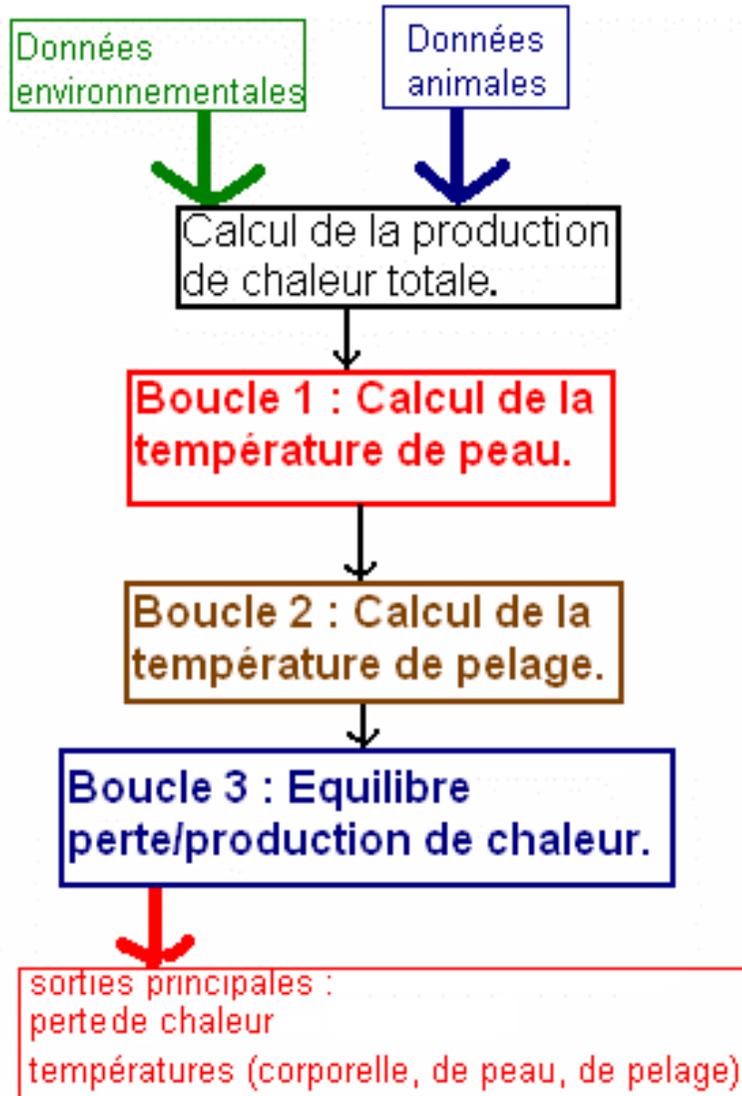
- 2 principes fondamentaux :

- Loi d'Ohm thermique.

$$G = \frac{\rho c_p \Delta T}{r} \quad (1)$$

- Pas de stockage de la chaleur entre les couches.

Algorithme du modèle de Turnpenny et al (2000).

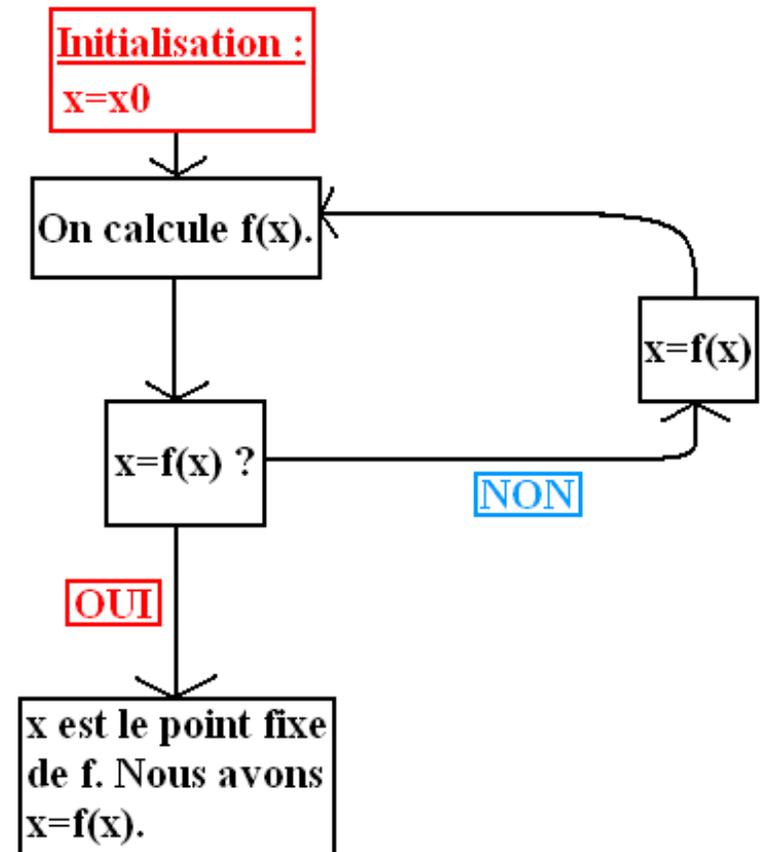


3 équations :

$$A=f(B)$$

$$B=g(C) \Rightarrow A=f(g(h(A)))$$

$$C=h(A)$$



I. Programmation Turnpenny

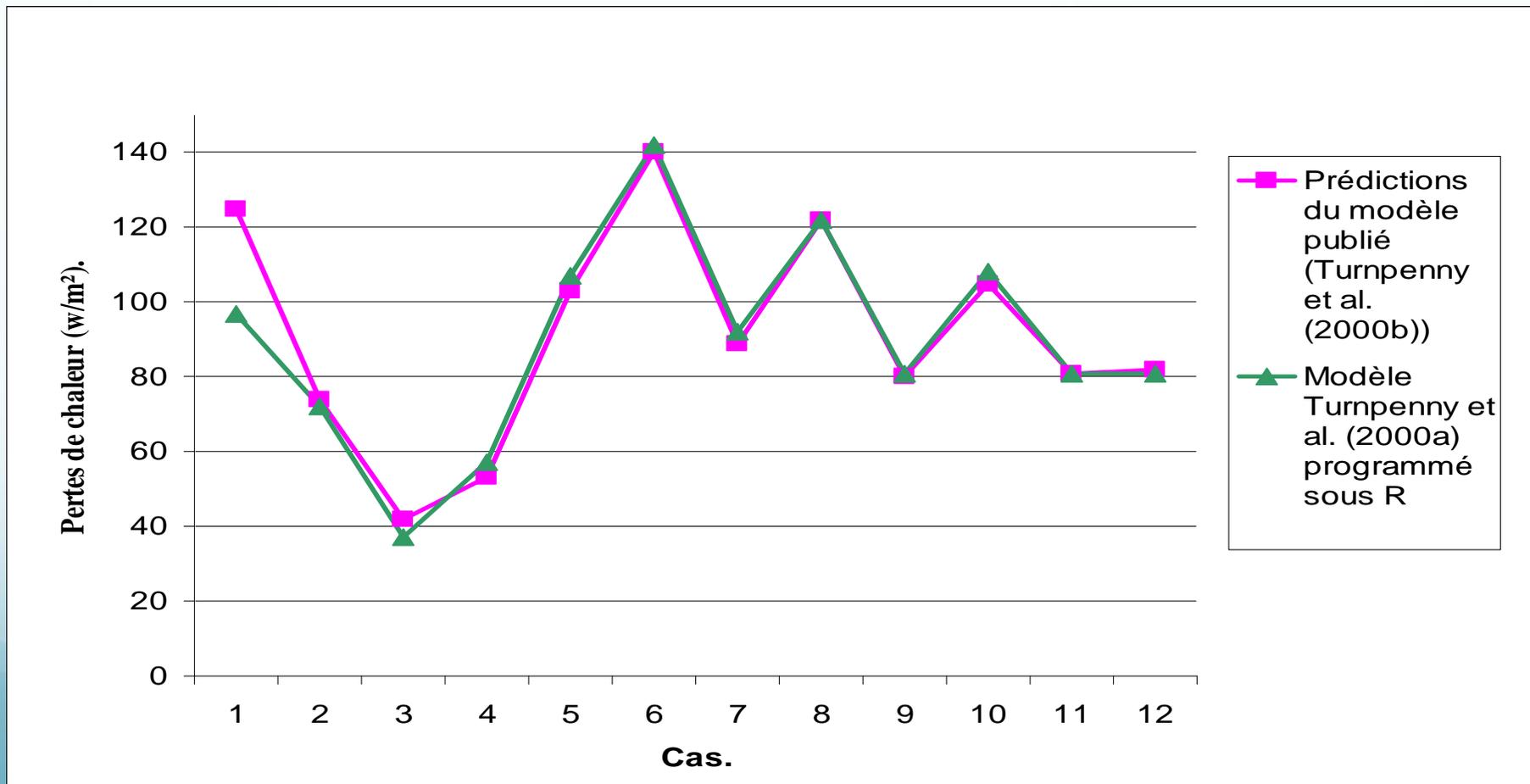
Tp.

II. Sensibilités TCI-TCS

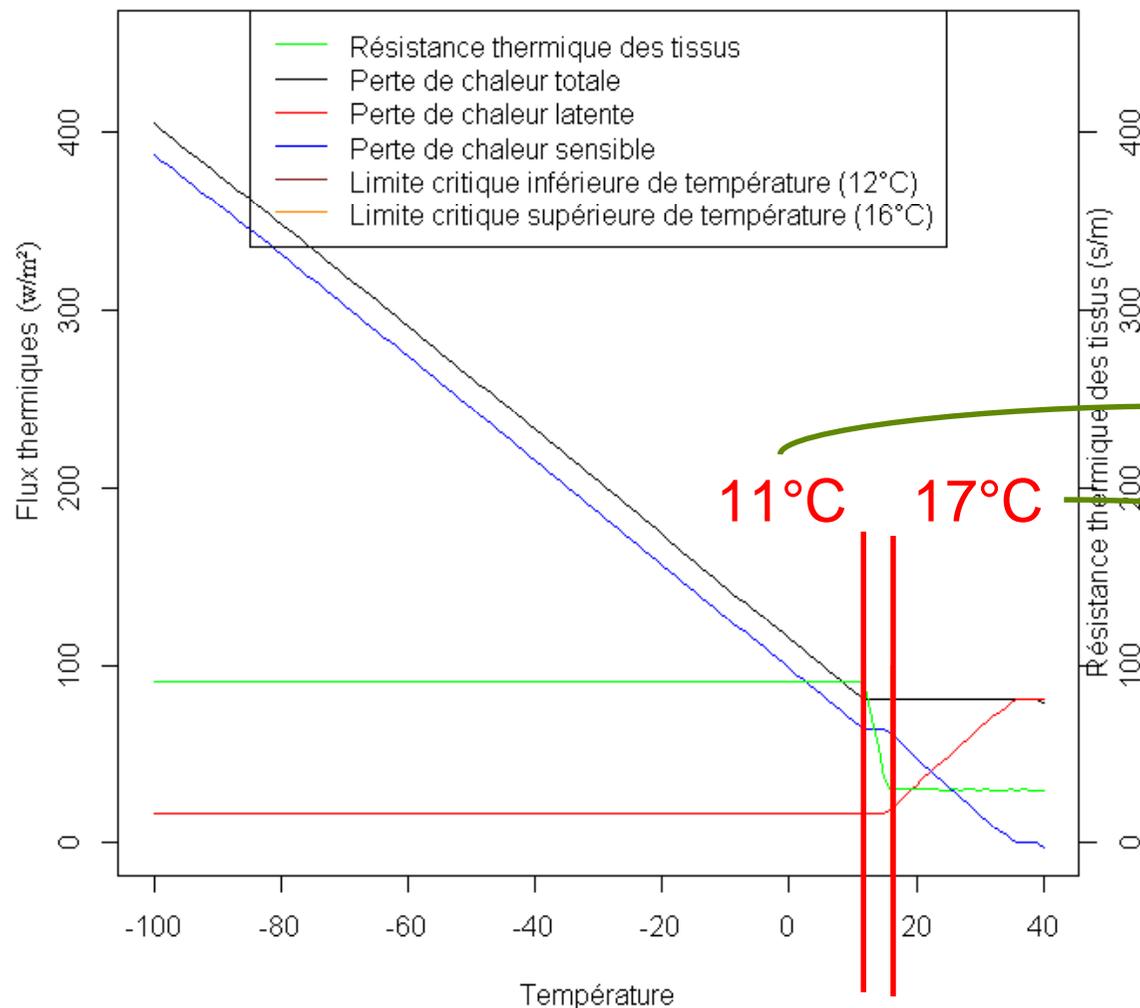
III. Confrontations données expérimentales

IV. Sensibilités Qlat, Tc,

Confrontations des prédictions du modèle programmé sous R aux prédictions des cas types de la publication de Turnpenny et al. 2000b.



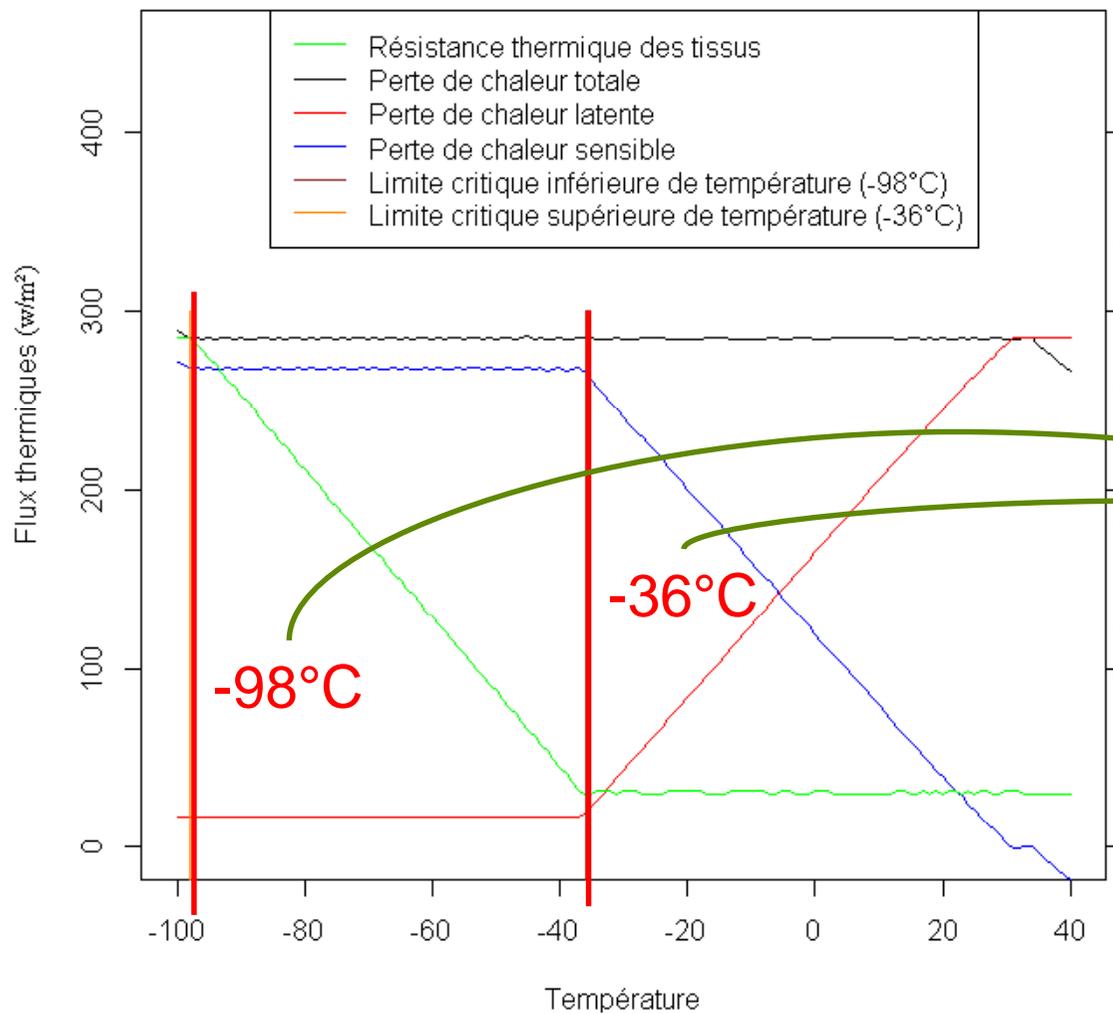
Peut-on reproduire le schéma de thermorégulation d'un veau avec le modèle de Turnpenny et al. (2000) ?



Veau de 37 kg,
 $M=81 \text{ w/m}^2$,
 $u=0,2 \text{ m/s}$.

Températures critiques inférieures et supérieures conformes à la théorie

Peut-on reproduire le schéma de thermorégulation d'une vache laitière moyenne avec le modèle de Turnpenny et al. (2000) ?

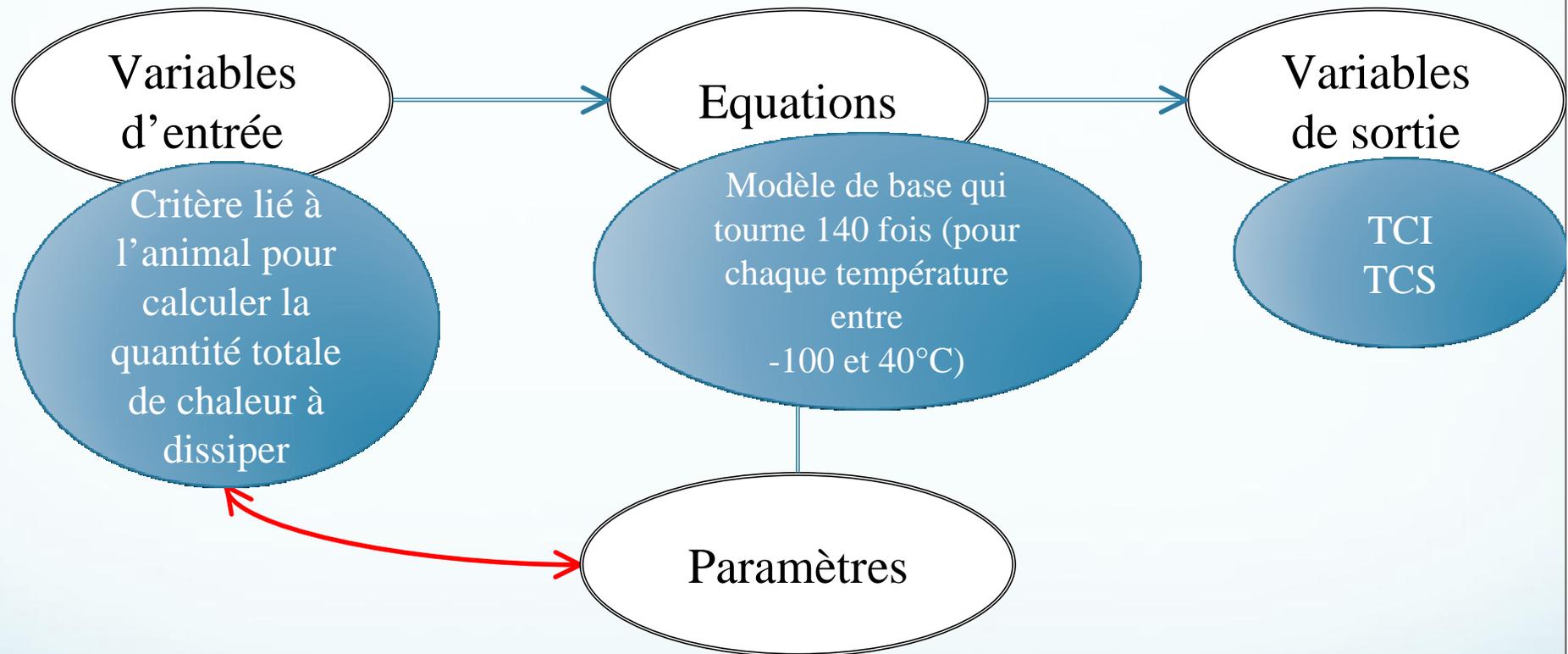


Vache de 600 kg,
 $M=285 w/m^2$ (vache
produisant 30 litres
de lait par jour),
 $u=1 m/s$.

Problème au
moins dans le
froid !!
TCI = -5 à $0^\circ C$
TCS = 20 à $25^\circ C$

Partie II : Essai de reparamétrage du modèle de Turnpenny et al. 2000 pour corriger la zone de thermoneutralité (TCI, TCS) grâce à des analyses de sensibilité.

Principe analyse de sensibilité.



Question : est-ce qu'un reparamétrage du modèle peut permettre d'obtenir un schéma théorique de thermorégulation simulé plus conforme sur vaches laitières?

Choix des paramètres inclus dans l'analyse de sensibilité

15 paramètres sélectionnés

Paramètres	Minimum	Maximum
M (w/m ²)	50	400
l (m)	0.01	0.05
Trad (°C)	-5	5
u (m/s)	0	1
coeff_surface	0.09	0.235
puissance_surface	0.46	0.67
Sb (w/m ²)	0	50
Sd (w/m ²)	0	50
rchlinit (s/m)	30	500
Rhlnit (s/m)	30	500
Rrlnit (s/m)	30	500
rsmax (s/m)	170	270
rsmin (s/m)	30	50
c' (m)	0	0.00005
p (m ⁻¹)	0	3000

Quantité de chaleur à perdre : Paramètre d'entrée inclus dans l'analyse pour comparer son poids aux paramètres réels

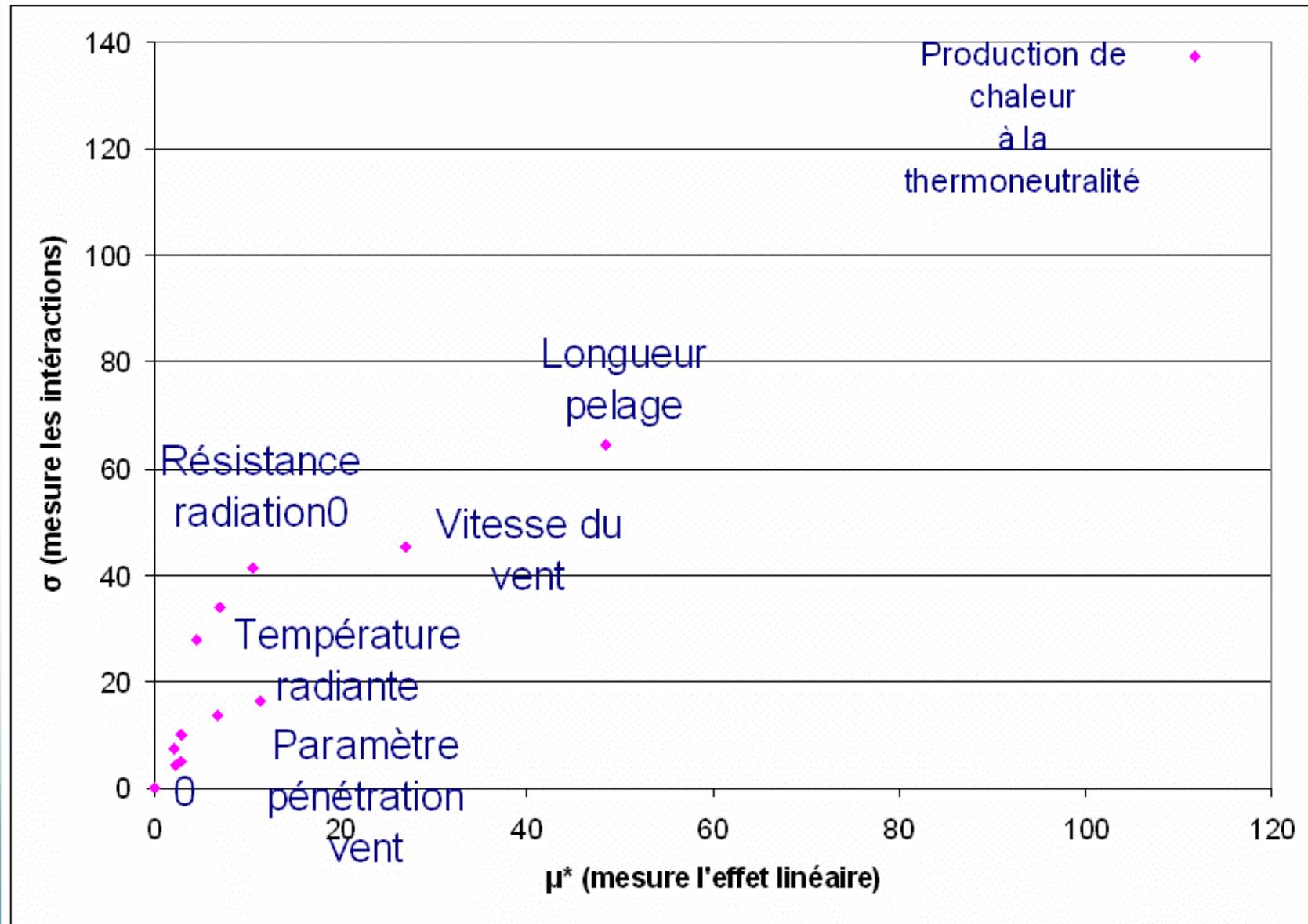
3 paramètres (variables d'entrée?) que l'on ne mesure pas toujours de façon précise

Paramètres clairs = difficilement quantifiables, valeurs issues de quelques mesures issues de la biblio ou tout à fait théoriques

Analyse de sensibilité sur la prédiction des Températures Critiques Inférieure (TCI) et Supérieure (TCS) du modèle : stratégie.

- 1 simulation = 40 secondes.
- Morris, 15 paramètres => 1 600 simulations = 18 heures.
=> 1^{er} tri dans les paramètres.
- Anova, 6 paramètres => 1458 simulations = 16 heures.
- Sobol-Saltelli => pas possible, méthode trop longue.
- Méta-modèle, 15 paramètres => 230 simulations = 2,5 heures. Anova + Sobol-Saltelli réalisées sur le méta-modèle => quelques minutes.

Méthode de Morris (100 trajectoires, Q=8).

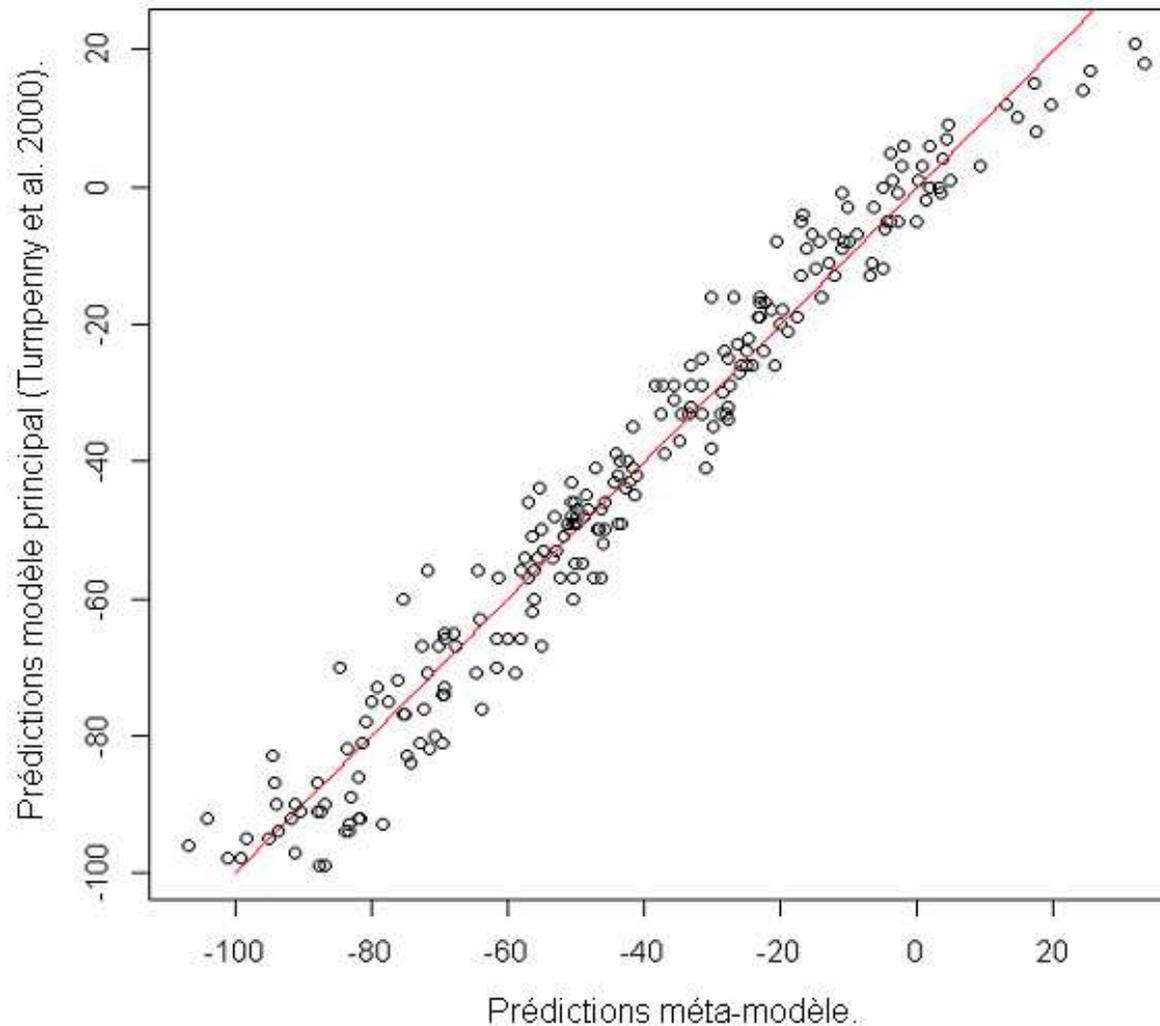


Méthode anova (3 classes, 2 répétitions).

Paramètres	ISP (effet principal)	IST (effet total)
Production de chaleur à la thermoneutralité	72,02%	72,17%
Longueur de pelage	10,46%	10,57%
Vitesse du vent	1,63%	1,98%
Paramètre décrivant la pénétration du vent dans le pelage	0,64%	0,96%
Température radiante	0,068%	0,19%
Résistance thermique par radiation	0,01%	0,07%

Méthode du méta-modèle (N=230).

- Régression linéaire classique (méthode backward sur les 15 paramètres d'origine).



TCI	
R ² ajusté	0,9679

Méthode anova (3 classes, 2 répétitions) sur le méta-modèle.

Paramètres	ISP (effet principal)	IST (effet total)
Production de chaleur à la thermoneutralité	84,03%	84,03%
Longueur de pelage	4,58%	4,58%
Vitesse du vent	0,48%	0,48%
Paramètre décrivant le flux de radiation solaire dans le pelage	0,17%	0,17%
Paramètre décrivant la pénétration du vent dans le pelage	0,10%	0,10%

Méthode Sobol-Saltelli (N-échantillons de taille 10 000, et 8 matrices (6 paramètres), 80 000 simulations du méta-modèle).

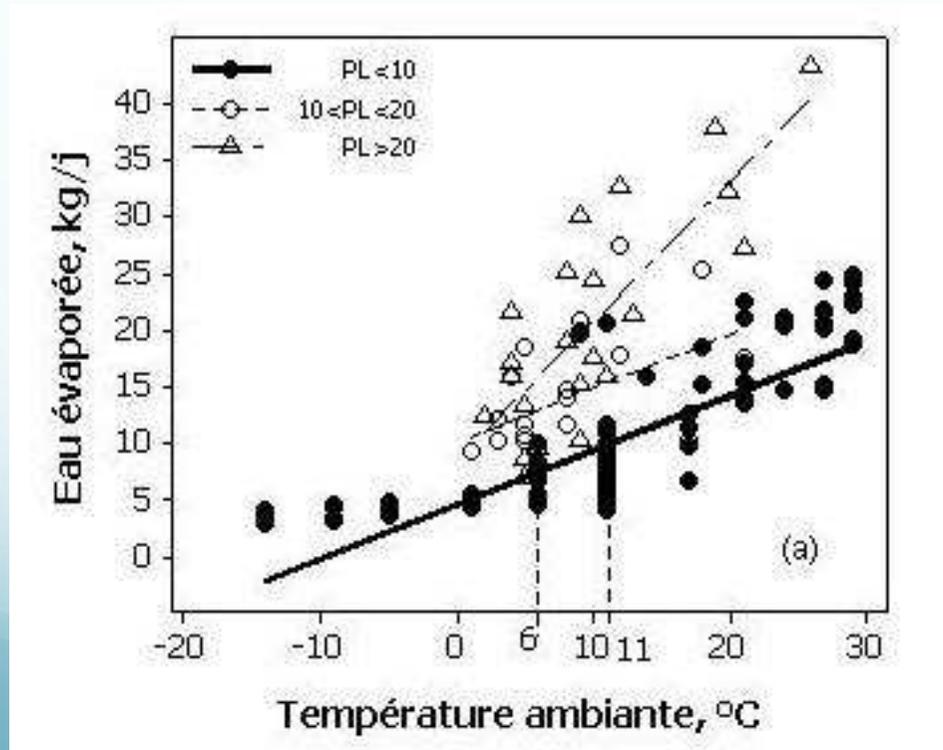
Paramètres	ISP (effet principal)	IST (effet total)
Production de chaleur à la thermoneutralité	93,89%	94,48%
Longueur de pelage	4,75%	4,86%
Vitesse du vent	0,60%	0,64%
Paramètre décrivant la pénétration du vent dans le pelage	0,36%	0,38%
Paramètre décrivant le flux de radiation solaire dans le pelage	0,35%	0,36%
Température radiante	0,30%	0,30%

Possibilité de reparamétrage du modèle de Turnpenny et al. 2000 pour corriger la zone de thermoneutralité ?

- La zone de thermoneutralité est sensible à 3 paramètres principaux :
 - La production de chaleur à la thermoneutralité (ISP = 72,02%).
 - La longueur de pelage (ISP = 10,46%).
 - La vitesse du vent (ISP = 1,63%).
- 3 paramètres mesurables => pas d'incertitude.
- Zone de thermoneutralité très peu sensible aux autres paramètres difficiles à mesurer (paramètre de pénétrabilité du vent dans le pelage, initialisations des résistances thermiques...).
- **Impossible de reparamétrer le modèle pour corriger la zone de thermoneutralité.**

Mais ... la théorie est-elle tout à fait représentative de la réalité?

Température critique supérieure souvent établie sur des critères de fréquence respiratoire ou de température rectale et peu sur des mesures de pertes de chaleur latente.



Mesures en chambres respiratoires sur des vaches en lactation :

Augmentation continue des pertes de chaleur latente dès 0°C, d'autant plus nette que la production laitière est élevée.

Partie III : Confrontation des prédictions du modèle aux données expérimentales.

Présentation de la base de donnée.

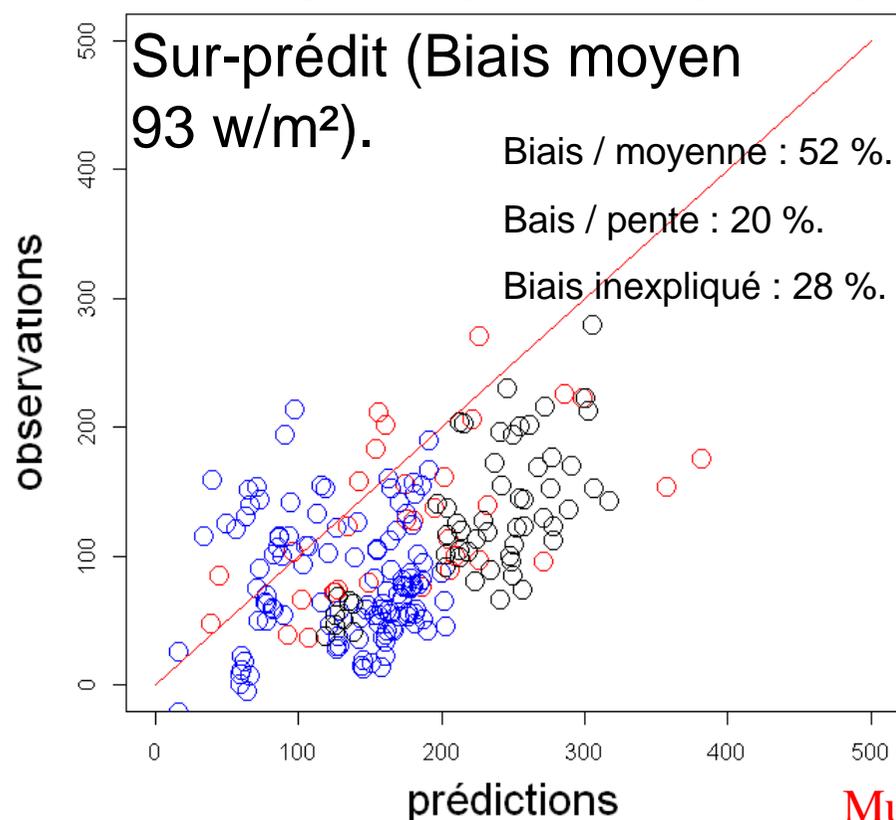
- 211 observations (3 sous-bases).
 - Multi-publi (33 moyennes de lots d'individus).
 - Méju1983-2003 (122 données individuelles).
 - Khelil2012 (56 données individuelles).
- Variables :
 - Eau évaporée, donc perte de chaleur latente (1 L = 2 500 KJ=2 500 KW/S).
 - Température ambiante moyenne journalière.
 - Production de chaleur à la thermoneutralité.
 - Poids vif.

	Minimum	Moyenne	Maximum
Perte de chaleur latente (w/m²)	6,4	100,3	279,4
Température ambiante (°C)	0,0	18,4	36,0
Production de chaleur à la thermoneutralité (w/m²)	127,8	244,2	383,2
Poids vif (kg)	473,0	653,4	907,0

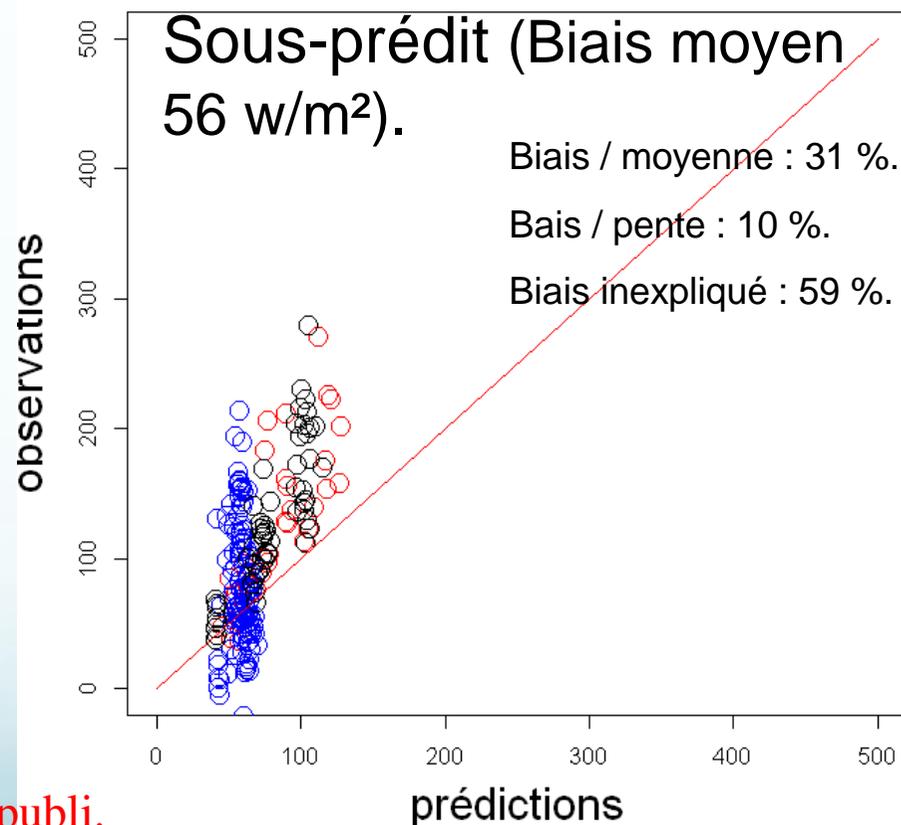
Turnpenny et al. 2000/CIGR 2002 : perte de chaleur latente.

Valeur moyenne observée : 100 w/m².

Turnpenny et al. (2000)



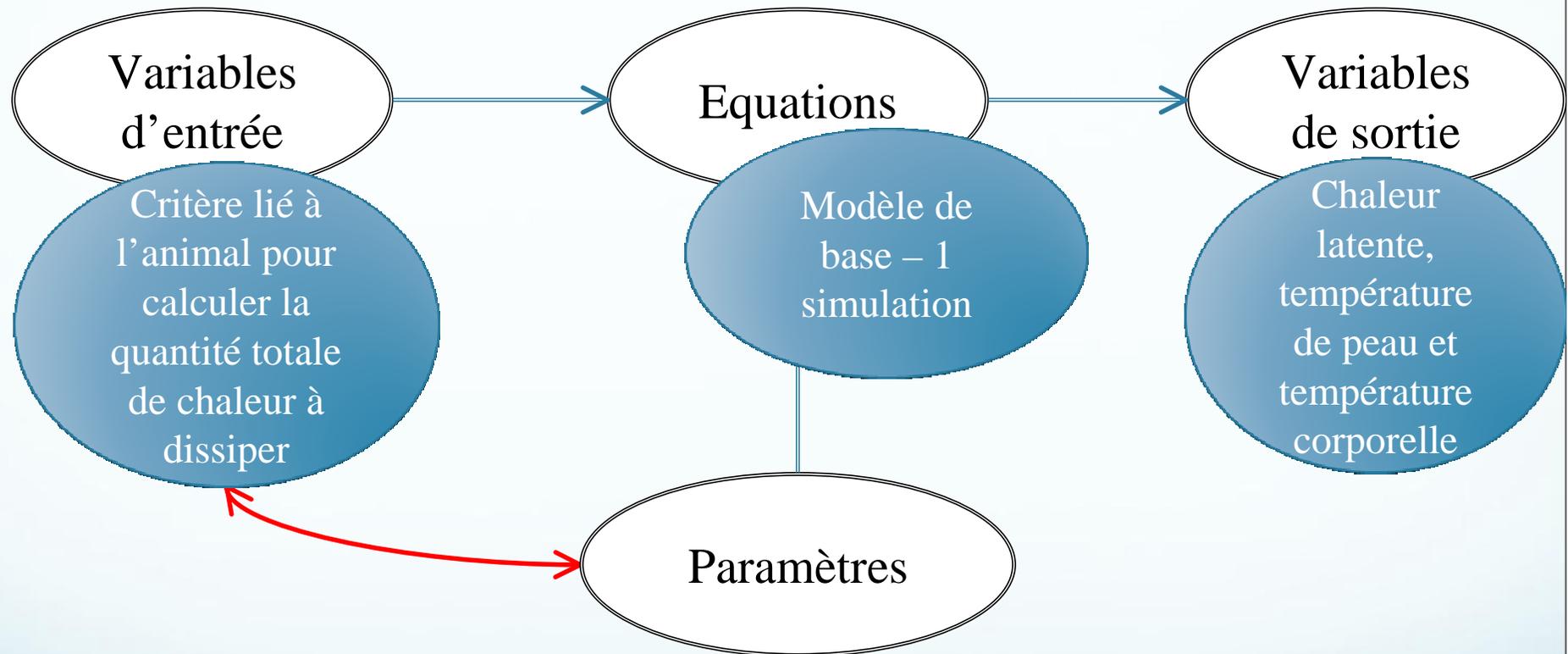
CIGR (2002)



Multi-publi.
Méju1983-2003.
Khelil2012.

Partie IV : Analyse de sensibilité sur la perte de chaleur latente (E), la température de peau (Ts) et la température corporelle (Tb).

Principe analyse de sensibilité.



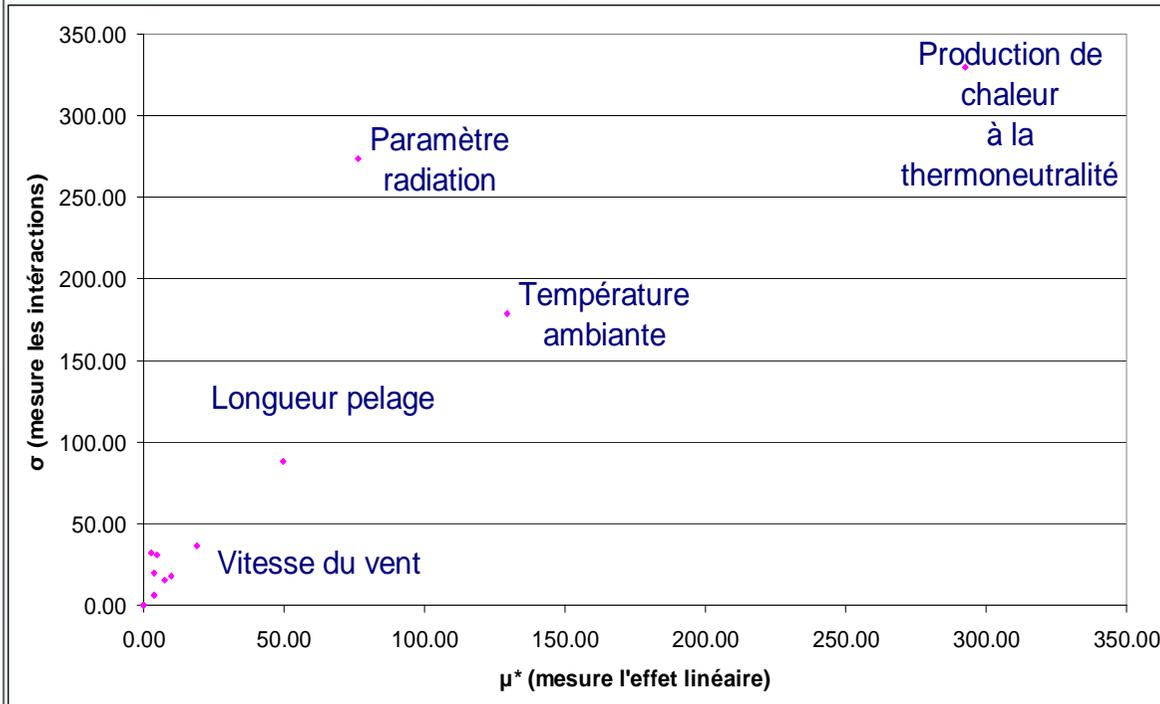
Question : Quels sont les paramètres sur lesquels on doit jouer en priorité pour calibrer le modèle pour des vaches laitières ?

Choix des paramètres inclus dans l'analyse de sensibilité

15 paramètres sélectionnés

Paramètres	Minimum	Maximum
M (w/m ²)	50	400
l (m)	0.01	0.05
Tamb (°C)	-40	40
u (m/s)	0	1
coeff_surface	0.09	0.235
puissance_surface	0.46	0.67
Sb (w/m ²)	0	50
Sd (w/m ²)	0	50
rchlinit (s/m)	30	500
Rhlnit (s/m)	30	500
Rrlnit (s/m)	30	500
rsmax (s/m)	170	270
rsmin (s/m)	30	50
c' (m)	0	0.00005
p (m ⁻¹)	0	3000

Perte de chaleur latente.

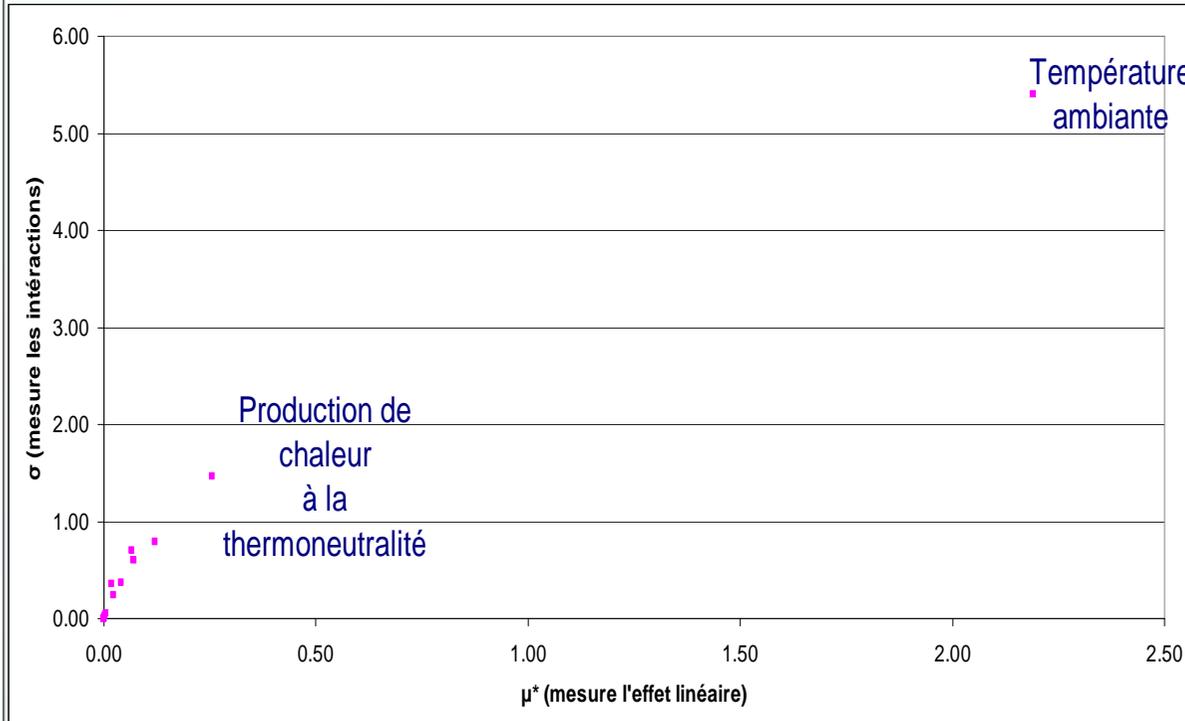


Graphique de Morris (N=500).

Indices de sensibilités par la méthode anova (3 classes par paramètres, 2 répétitions).

Paramètres	ISP (effet principal)	IST (effet total)
Production de chaleur à la thermoneutralité	66,37%	67,95%
Température ambiante	15,58%	17,32%
Longueur de pelage	1,74%	2,45%
Vitesse du vent	0,23%	0,36%
Paramètre décrivant les transferts thermiques par radiation dans le pelage	0,06%	0,12%

Température corporelle.

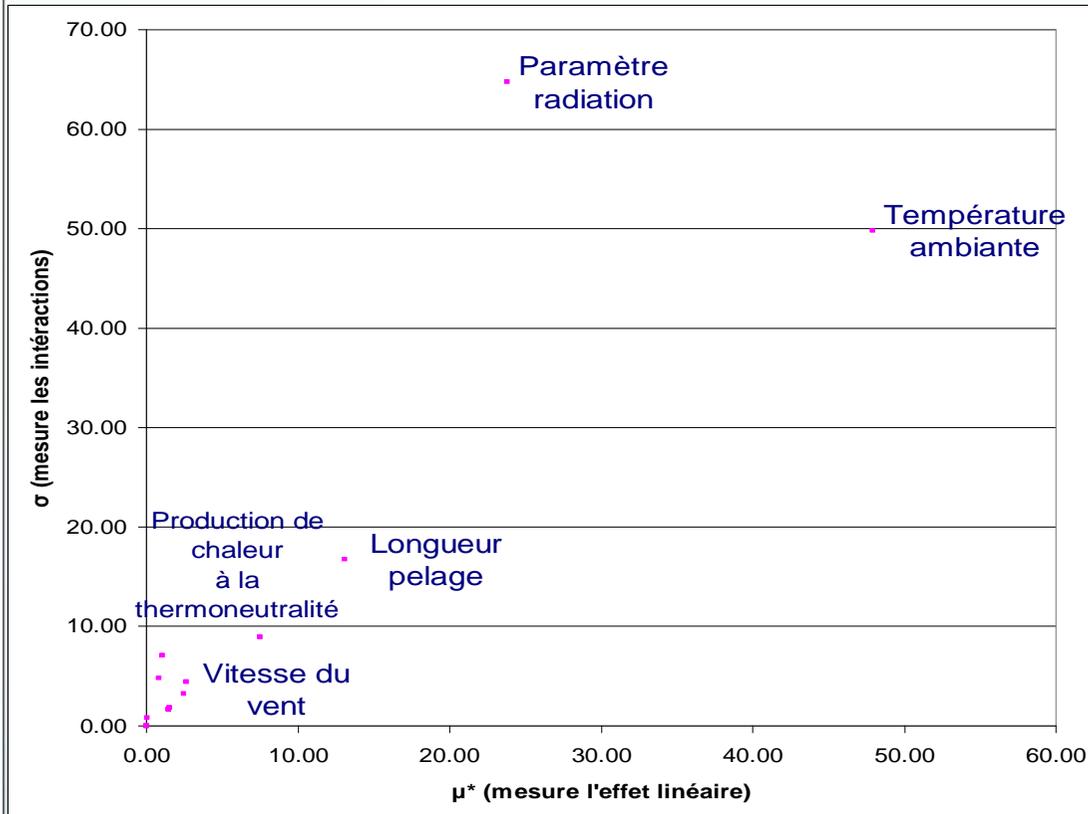


Graphique de Morris (N=500).

Indices de sensibilités par la méthode anova (3 classes par paramètres, 2 répétitions).

Paramètres	ISP (effet principal)	IST (effet total)
Température ambiante	11,20%	13,81%
Production de chaleur à la thermoneutralité	1,59%	4,06%

Température de peau.



Graphique de Morris (N=500).

Indices de sensibilités par la méthode anova (3 classes par paramètres, 2 répétitions).

Paramètres	ISP (effet principal)	IST (effet total)
Température ambiante	78,57%	79,49%
Longueur de pelage	5,85%	6,69%
Production de chaleur à la thermoneutralité	2,05%	2,27%
Paramètre décrivant les transferts thermiques par radiation dans le pelage	0,20%	0,28%
Vitesse du vent	0,02%	0,23%

Conclusion.

- Un premier exercice d'analyses de sensibilité :
 - Morris permet d'effectuer un 1^{er} tri dans les paramètres.
 - Résultats similaires entre les différentes méthodes (anova, Sobol-Saltelli, méta-modèle).
 - Méthode du méta-modèle plus intéressante, lorsque le modèle principal est long à s'exécuter (temps de calcul global = 2,5 heures, contre 34 heures pour l'analyse de sensibilité sur le modèle principal pour la TCI et la TCS).

- Sur le modèle de Turnpenny et al. (2000) :
 - Ce modèle tel que publié ne permet pas de simuler les pertes de chaleur d'une vache en situation froide.
 - En situation chaude, les prédictions ne sont pas tout à fait conforme au schéma théorique de thermorégulation mais cela peut avoir du sens si on se réfère à des données expérimentales
 - Le modèle sur-prédit perte de chaleur latente => en moyenne modèle du CIGR (2002) meilleur.
- Perspectives :
 - Ce modèle est conçu pour décrire des phénomènes de dissipation de chaleur instantanés et nous l'avons appliqué sur des moyennes journalières. Idée = intégrer les pertes de chaleur sur une journée en prenant en compte les possibilités de stockage transitoire de chaleur corporelle par les vaches laitières?