

Construction et validation d'un modèle de prédiction des besoins en eau des vaches laitières incluant l'effet de la température ambiante

BOUDON A. (1, 2), KHELIL-ARFA H. (1, 2), THOMAS-MOREL M. (2), BANVILLE M. (2), PHAM T.H.V. (2), MENARD J.L. (3), BRUNSCHWIG P. (3), HUNEAU T. (4), COUTANT S. (5), LAMY J.M. (5), FAVERDIN P. (1, 2)

(1) INRA, UMR 1348 PEGASE, 35590 Saint-Gilles, France

(2) Agrocampus Ouest, UMR 1348 PEGASE, 35000 Rennes, France

(3) Institut de l'Élevage, 9 rue André Brouard, 49000 Angers, France

(4) Chambre d'Agriculture de Loire Atlantique, Ferme expérimentale de Derval, La Touche, 44590 Derval, France

(5) Chambre d'Agriculture du Maine et Loire, 14 avenue Joxé, 49006 Angers Cedex 01

RESUME

L'objectif de cette étude a été de proposer, et de confronter à des données observées, un modèle de prédiction des besoins en eau d'abreuvement des vaches laitières en fonction de leur niveau de production, de leur ration et de la température ambiante. Deux expérimentations ont montré que lorsque la température ambiante augmente, l'eau perdue par évaporation pour la thermorégulation est entièrement compensée par une augmentation des quantités d'eau bue, lorsque ces deux flux sont rapportés à la matière sèche ingérée. Ce résultat a permis de bâtir un modèle de prédiction de l'eau bue en sommant une équation de prédiction de l'eau bue développée à la thermoneutralité et une équation destinée à simuler les pertes de chaleur latente lorsque la température augmente au-delà de la thermoneutralité. Ce modèle est capable de prendre en compte des variables explicatives liées à la ration, à l'individu et à la température ambiante. Sur les 3 jeux de données utilisés pour évaluer ce modèle, les erreurs moyennes de prédiction de l'eau bue ont été comprises entre 15,2 et 25,0% de la moyenne du flux observé.

Construction and validation of a predictive model for water requirement of dairy cows including the ambient temperature effect

BOUDON A. (1, 2), KHELIL-ARFA H. (1, 2), THOMAS-MOREL M. (2), BANVILLE M. (2), PHAM T.H.V. (2), MENARD J.L. (3), BRUNSCHWIG P. (3), HUNEAU T. (4), COUTANT S. (5), LAMY J.M. (5), FAVERDIN P. (1, 2)

(1) INRA, UMR 1348 PEGASE, 35590 Saint-Gilles, France

SUMMARY

The objective of this study was to build a predictive model for water requirements of dairy cows according to their production level, the nature of the diet and ambient temperature, and to confront the predictions to the observed data. Two experiments consisted of measuring input and output water flows of 8 dairy cows. These experiments showed that the increase in evaporated water for thermoregulation was totally compensated for by an increase in free water intake when both flows were divided by dry matter intake. This result allows the building of a predictive model for free water intake by summing a predictive equation of free water intake developed in thermoneutral conditions and a predictive equation aimed at predicting the latent heat losses. On the three data sets used to test the model, the mean prediction errors of free water intake were comprised between 12.9 and 15.5 kg/j.

INTRODUCTION

En France, l'élevage bovin consomme environ 38% de l'eau utilisée par l'agriculture hors irrigation et environ 75% de cette eau est destinée à l'abreuvement des animaux (Carteau et al., 2009). Une spécificité des ruminants est d'ingérer des fourrages dont la teneur en matière sèche est très variable, ce qui a pour conséquence une forte variabilité des quantités d'eau consommée par jour, de quelques litres à plus de 120 l/j pour une vache laitière en production (Khelil-Arfa et al., 2012). Une meilleure prédiction des besoins en eau des troupeaux laitiers pourrait permettre des économies d'eau notamment par une meilleure détection des fuites sur les réseaux enterrés, constituer un moyen de vérification que les apports en eau des vaches sont suffisants notamment dans les contextes les plus chauds et enfin alimenter des analyses de type « cycle de vie » dans les élevages laitiers. Les équations développées par Khelil-Arfa et al. (2012) permettent de prédire les quantités d'eau bue en fonction de la ration et du niveau de production des vaches laitières mais elles ne prennent pas en compte l'effet des conditions météorologiques et en particulier de la température ambiante. Les besoins en eau des animaux homéothermes, comme les

bovins, augmentent de façon exponentielle lorsque la température ambiante dépasse le seuil à partir duquel la production de chaleur ne peut plus être entièrement libérée par voie sensible (Yousef, 1987). Certaines des équations de prédiction des besoins en eau des vaches laitières publiées dans la littérature incluent des paramètres prédictifs météorologiques. Cependant ces paramètres sont souvent inclus par des approches empiriques par régression multiple, ce qui peut limiter leur extrapolation à d'autres systèmes de production ou contextes climatiques que ceux dans lesquels elles ont été établies, notamment du fait de corrélations partielles entre les variables météorologiques et les autres variables prédictives du modèle se référant par exemple au stade de lactation des vaches. L'objectif de cette communication est de proposer un modèle de prédiction des besoins en eau des vaches laitières capables de prendre en compte la ration, l'animal et les conditions météorologiques, transposable entre sites géographiques.

1. RELATION ENTRE EAU BUE ET EAU EVAPOREE

Une première étape de ce travail a été de quantifier expérimentalement l'effet d'une augmentation de la

température sur l'ensemble des flux d'eau entrant ou sortant à l'échelle d'une vache laitière. L'objectif était plus précisément de quantifier les répercussions d'une augmentation de l'eau évaporée sur les autres flux du bilan hydrique de l'animal.

1.1. MATERIEL ET METHODES

Deux essais ont été conduits à la ferme expérimentale de Méjusse (INRA, 35650 Le Rheu) en 2010 afin de quantifier les flux d'eau entrants et sortants de vaches laitières soumises à des conditions de température ambiante variable. Dans l'essai 1, 4 vaches Prim'Holstein en lactation et 4 vaches Prim'Holstein tarées ont été soumises à deux régimes de température (15 ou 28°C) constants sur la journée, croisés avec deux niveaux de complémentation sodée (0,3 vs 0,6 % MS). Ces traitements ont été comparés selon deux carrés latins 4x4 avec des périodes expérimentales de 15 jours. Dans l'essai 2, 4 vaches Prim'Holstein en début de lactation (73 jours de lactation en début d'essai) et 4 vaches Prim'Holstein en milieu de lactation (156 jours de lactation en début d'essai) ont été soumises à 3 régimes de température ambiante (15°C température constante sur la journée, 28°C température constante sur la journée, 12 heures à 35°C et 12 heures à 20°C). Ces régimes ont été comparés 2 à 2 au cours de 3 périodes expérimentales de 15 jours selon un schéma en inversion. Les régimes 15°C et '28°C constant' ont été comparés en période 1 (P1), les régimes '28°C variable' et 15°C ont été comparés en P2 et les régimes '28°C constant' et '28°C variable' ont été comparés en P3. Chaque période était entrecoupée de 15 jours à 15°C. Du fait d'une rémanence nette de l'effet des régimes à 28°C (constant et variable), ceux-ci ont été qualifiés de plus en 'occurrence 1' s'ils apparaissaient pour la première fois dans le schéma ou en 'occurrence 2' pour la seconde fois, ce qui a conduit à la définition au final de 5 traitements. Sur les 2 essais, au cours des 3 derniers jours de chaque période, des bilans de flux d'eau entrants et sortants ont été réalisés chaque jour grâce à des pesées et échantillonnages répétés de l'ingéré, de l'eau bue, de l'urine, des fèces et du lait. Le flux d'eau évaporée a été calculé comme la différence entre tous ces flux et la production d'eau métabolique calculée à 0,15 g/kcal d'extra chaleur (Vermorel, communication personnelle). Les vaches étaient alimentées *ad libitum* sauf dans l'essai 1 où les vaches tarées étaient restreintes à 14 kg MS, soit deux fois leur besoin en énergie. Les résultats ont été analysés par essai par analyse de variance avec un modèle statistique prenant en compte les effets (fixes) du traitement et de la période et les effets aléatoires des vaches.

1.2. RESULTATS

Dans les deux essais, l'augmentation de la température ambiante s'est traduit par une nette augmentation de la quantité d'eau évaporée (+14,4 l/j dans l'essai 1 Erreur Standard de la Différence (ESD) = 3,69, +12,3 l/j dans l'essai 2, ESD = 3,60) quel que soit le stade physiologique des vaches. Dans l'essai 1 sur les vaches tarées, cette augmentation de l'eau évaporée a entièrement été compensée par une augmentation des quantités d'eau bue (+14,4 l/j). Pour les vaches en lactation, l'augmentation des quantités d'eau bue lorsque la température a augmenté a été moindre que celle de l'eau évaporée dans l'essai 1 (+8,8 l/j) et les quantités d'eau bue ont même diminué dans l'essai 2 (-5,0 l/j). Dans ce cas, le maintien de l'équilibre hydrique s'est traduit par une diminution des pertes d'eau par voie fécale (-8,6 l/j dans l'essai 1, ESD = 2,29 et -16,8 l/j dans l'essai 2 ESD = 6,87). Ces baisses des pertes d'eau fécale sont à rapprocher de la nette diminution de la matière sèche ingérée (MSI) chez les vaches en lactation lorsque la température a augmenté (-2,4 kg/j dans l'essai 1 et -5 kg/j dans l'essai 2). Lorsque tous les flux d'eau ont été rapportés à la quantité de MSI dans les deux essais, les quantités d'eau bue ont clairement augmenté avec la température dans les deux

essais sur les vaches en lactation (de 3,5 à 4,6 l/kg MSI, SEM = 0,12 dans l'essai 1 et de 4,7 à 5,8 l/kg MSI, SEM = 5,77 dans l'essai 2).

Tableau 1 : Effet de la température et de la supplémentation en sodium sur la MSI et les flux d'eau à l'échelle de l'individu dans l'essai1 (ESM = Erreur standard de la moyenne).

(l/j)	Stade	15°C		28°C		ESM
		Na-	Na+	Na-	Na+	
MSI (kg/j)	Lact.	20,9	21,4	18,6	19	0,47
	Tarie	13,8	13,9	13,8	13,9	
Eau bue	Lact.	74,2	80,0	82,8	89,0	2,57
	Tarie	25,4	29,3	40,8	42,6	
Eau alim	Lact.	30,7	31,1	27,4	27,4	0,63
	Tarie	20,7	20,5	20,7	20,5	
Eau lait	Lact.	27,4	26,3	25,0	25,6	1,19
Eau urine	Lact.	15,4	20,1	16,3	24,5	1,26
	Tarie	11,8	15,2	11,4	16,2	
Eau fécale	Lact.	47,7	47,7	40,0	38,3	1,62
	Tarie	23,6	23,4	24,4	23,0	
Evaporation	Lact.	19,0	21,3	35,8	34,3	2,61
	Tarie	15,0	15,0	30,2	27,6	

Tableau 2 : Effet de la dynamique de température journalière sur la MSI et les flux d'eau à l'échelle de l'individu dans l'essai 2 (ESM = Erreur standard de la moyenne, Occ1 et 2 = occurrence du traitement, Déb = Début de lactation, Mil = Milieu de lactation).

(l/j)	St.	15°C	28°C constante		28°C variable		ESM
			Occ1	Occ2	Occ1	Occ2	
MSI (kg/j)	Déb.	23,6	21,1	19,0	19,8	14,5	1,51
	Mil.	21,1	18,1	13,6	17,3	15,9	
Eau bue	Déb.	112,0	115,6	107,7	120,5	93,2	7,52
	Mil.	99,0	95,6	73,8	100,2	93,4	
Eau alim	Déb.	29,6	25,7	20,2	24,0	17,8	2,17
	Mil.	26,6	22,4	16,6	21,7	18,8	
Eau lait	Déb.	32,8	32,4	23,2	27,4	22,1	1,82
	Mil.	24,7	22,3	18,3	23,0	19,0	
Eau urine	Déb.	27,5	24,5	26,4	23,3	22,0	2,42
	Mil.	25,8	23,9	20,2	22,8	22,2	
Eau fèces	Déb.	58,0	48,2	43,4	45,0	35,5	4,86
	Mil.	52,3	41,5	25,8	34,6	32,7	
Evap.	Déb.	30,5	47,8	35,5	49,1	40,2	5,09
	Mil.	27,7	35,4	34,5	46,2	42,2	

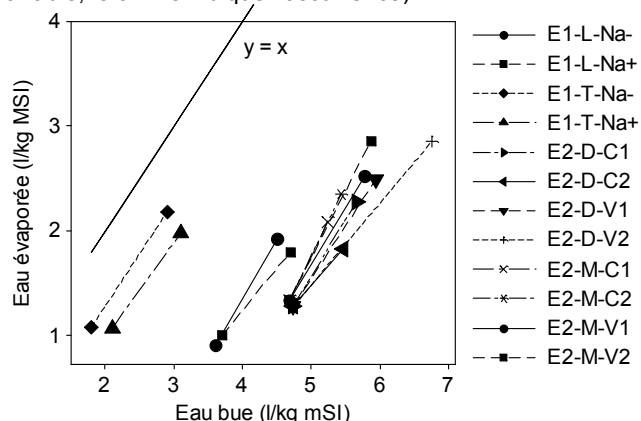
Ces augmentations n'ont pas été significativement différentes de celles observées sur l'eau évaporée rapportée à la MSI (Figure 1). Il a pu être calculé que :

$$EB27=0.972 (EB15+\Delta Evap) +0.128 \quad [1]$$

(R² = 0,97, origine et pente non significativement différentes de 0 et 1 respectivement) où EB27 est l'eau bue mesurée à 27°C et EB15+ΔEvap est la somme de l'eau bue mesurée à 15°C et de la différence d'évaporation entre 27 et 15°C (en l/kg MSI).

Ceci signifie que l'ingestion en eau de vaches laitières en situation de température ambiante élevée peut être prédite à partir d'une prédiction de l'évaporation d'eau, grâce à un des multiples modèles de chaleur latente publiés, et d'une estimation de leur ingestion en eau en condition de thermoneutralité, sous réserve cependant d'estimer la matière sèche ingérée.

Figure 1 : Relation entre l'eau bue et évaporée rapportée à la MSI lorsque la température ambiante augmente (chaque symbole représente une comparaison entre un traitement de forte température et son témoin à la thermoneutralité ; E1 ou 2 = Essai 1 ou 2, L= lactation, T= Tarie, D= début lactation, M= milieu de lactation, C et V=température constante ou variable, le chiffre indique l'occurrence).



2. UTILISATION DE LA RELATION EAU BUE-EAU EVAPOREE POUR LA CONSTRUCTION DU MODELE DE PREDICTION DE L'EAU BUE

2.1. MATERIELS ET METHODES

2.1.1. Le modèle

Le modèle développé pour prédire les besoins en eau des vaches laitières en situation de température variable s'appuie sur les équations de prédictions publiées par Khelil-Arfa et al. (2012) en situation de thermoneutralité auxquelles les équations développées par Maia et al. (2005a, b) ont été ajoutées pour prédire les besoins en eau pour compenser l'évaporation nécessaire à la thermorégulation. Nous nous sommes appuyés sur l'équation de Khelil-Arfa (2011) :

$$pEBTN = 0,83 \%MS + 3,22 MSI + 0,92 PL - 0,28 \%Conc + 0,037 * PV - 77,6 \quad [2]$$

où pEBTN est la quantité d'eau bue prédite à la thermoneutralité (kg/j), %MS est la teneur en matière sèche de la ration (g/100 g), MSI est la matière sèche ingérée (kg/j), PL est la production laitière (kg/j), %Conc est la proportion de concentré dans la ration (g/100 g) et PV est le poids vif (kg).

Les équations de Maia et al (2005a, b) ont été obtenues par la mesure directe du flux d'évaporation sur des vaches laitières grâce à des mesures d'échange gazeux au niveau de la peau dans des conditions de températures ambiantes variées. Les prédictions de chaleur latente de Maia et al. (2005a, b) ont été converties en eau évaporée en considérant que 1 litre d'eau évaporée permettait la perte 2500 kJ de chaleur latente (Monteith et Unsworth, 2008).

$$pEE(Ta) \text{ (kg/j)} = [85,18 \times \exp((Ta-24,92)/7,96) + 2,253 \times \exp((Ta-12,022)/6,794) * 0,14 * PV^{0,57} * 86,4] / 2500 \quad [3]$$

où pEE(Ta) est la quantité d'eau évaporée prédite (kg/j), Ta est la température ambiante moyenne journalière (°C) et PV est le poids vif (kg).

Si on considère que la température à partir de laquelle, l'augmentation de l'évaporation d'eau devient nécessaire à la thermorégulation des vaches est de 15°C (Maia et al. 2005a, b), ce qui correspond d'ailleurs aux conditions d'ambiance dans lesquelles les équations de Khelil-Arfa ont été développées, on parvient au modèle suivant :

$$\begin{aligned} \text{Si } Ta < 15^\circ\text{C, } pEB(Ta) &= pEBTN, \\ \text{Si } Ta > 15^\circ\text{C, } pEB(Ta) &= pEBTN(Ta) + pEE(Ta) - pEE(15) \quad [4] \end{aligned}$$

où pEB(Ta) est la quantité d'eau bue prédite à la température Ta, pEBTN(Ta) est l'eau bue estimée à la thermoneutralité avec une MSI observée ou cohérente en situation de forte température et pEE la prédiction d'eau évaporée (eq. [3]).

2.1.2. Les bases de données de validation

Les prédictions du modèle [4] ont été évaluées sur 3 jeux de données. Le premier rassemble les 56 mesures individuelles de bilan eau obtenues lors des essais 1 et 2. Le second jeu de données rassemble 89 mesures d'eau bue obtenues sur des lots expérimentaux et publiées dans la littérature. Les références des publications rassemblées et les gammes de variation des principales variables renseignées ont été données par Khelil-Arfa et al. (2012). Le dernier jeu de données comportait 1143 données journalières d'ingestion d'eau sur des lots de vaches laitières obtenues dans les ferme expérimentales de Derval et des Trinottières dans le cadre du programme n°8109 « Maîtrise des consommations d'eau en élevage » financé par le Ministère de l'Agriculture (CASDAR) et FranceAgriMer. Sur ce dernier jeu de données, seule la confrontation du modèle aux données des Trinottières sera présentée dans cette communication. Ce jeu de données comportait 301 données, obtenues sur un lot de 60 vaches, dont la production laitière moyenne était comprise 22,8 et 39,8 kg/j, dans des conditions de températures moyennes journalières en bâtiment comprises entre - 2 et 27°C.

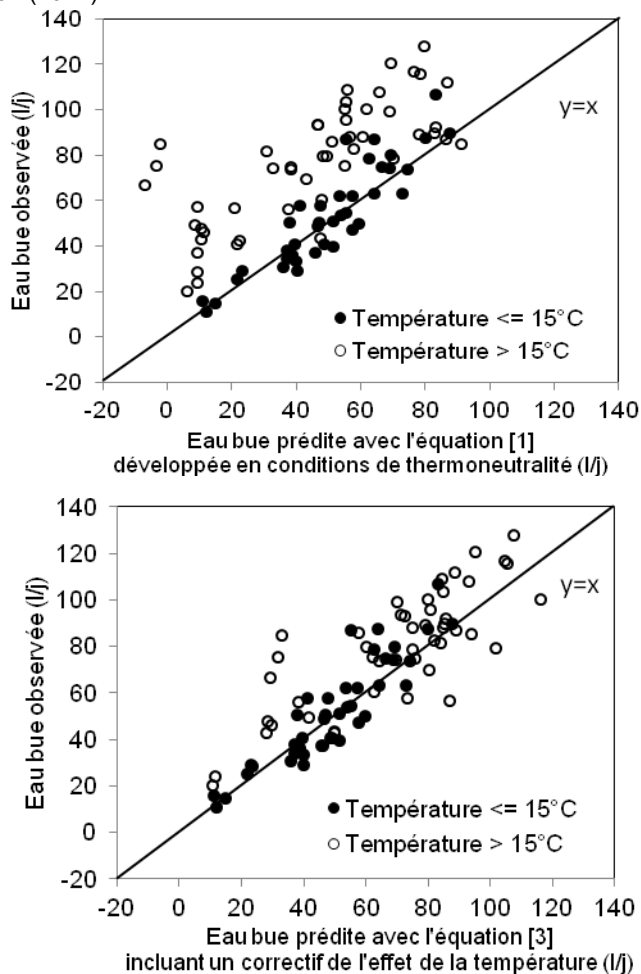
Les prédictions des équations [2] et [4], impliquant l'équation [3], ont été confrontées aux valeurs observées par régression linéaire. L'erreur moyenne de prédiction (EMP) a été calculée comme la racine carrée de la moyenne des carrés des écarts entre les valeurs observées et prédites. La moyenne des carrés des écarts a également été décomposée selon les formules de Bibby et Toutenburg (1977). L'EMP relative a été définie comme le ratio entre l'erreur moyenne de prédiction et la moyenne des valeurs observées.

2.2. RESULTATS

L'application de l'équation [2] sur les données des essais 1 et 2 a conduit à une EMP de 27,9 l, la plus grande partie de cette erreur ayant été expliquée par un biais à la moyenne (répartition de l'erreur : 73,2% sur un biais/moyenne, 2,4% sur un biais/pente et 24,4% sur le biais non expliqué). La prise en compte pour les conditions de forte température des pertes d'eau par évaporation, à travers l'utilisation de l'équation [4] a sensiblement réduit l'EMP, qui a été alors de 13,9 l (EMP relative de 18,1%) et la part de l'erreur expliquée par un biais par rapport à la moyenne qui a chuté à 39,7%.

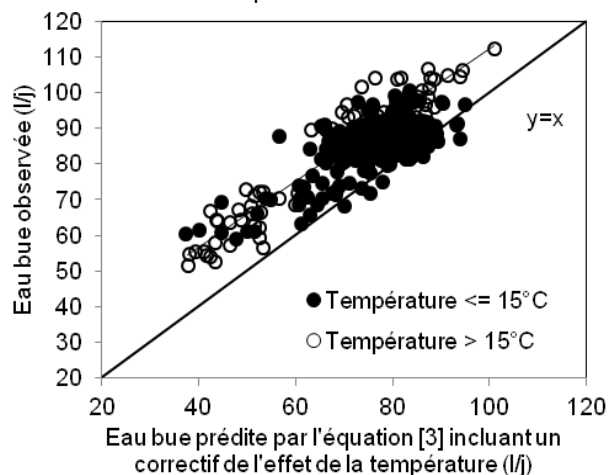
L'application de l'équation [2] sur le jeu de données issu de la littérature (Figure 2) a conduit à une EMP de 29,0 kg, la plus grande partie de cette erreur ayant été expliquée par un biais à la moyenne (45,2% de l'erreur sur un biais/moyenne). La prise en compte pour les conditions de forte température des pertes d'eau par évaporation (eq. [4]) a réduit l'EMP à 15,4 kg (EMP relative de 25,0%), et la part de l'erreur expliquée par un biais par rapport à la moyenne n'est plus que de 17,7%.

Figure 2 : Confrontation entre les données d'eau bue prédites par les modèles [2] et [4] et observées sur le jeu de données issus de la littérature et décrit par Khelil-Arfa et al. (2011).



Sur le jeu de données issu des Trinottières, (figure 3) l'équation [4] conduit à une EMP de 12,9 kg (EMP relative de 15,2%). Bien que cette équation soit conçue pour prendre en compte les conditions de température élevée, la plus grande partie de l'erreur observée a été expliquée par un biais à la moyenne élevé de 67,4% de l'erreur de prédiction. Ce biais a été à 10,4 l, soit 12,3% de la moyenne observée.

Figure 3 : Confrontation entre les données d'eau bue prédites par les modèles et observées sur les données collectées à la ferme expérimentale des Trinottières.



3. DISCUSSION

Sur les 3 jeux de données testés, l'erreur de prédiction du modèle proposé a été comprise entre 15 et 25% des valeurs observées. Les prédictions ont été plus précises sur les jeux de données issus des essais 1 et 2 ou de la ferme des Trinottières. Une raison peut être que ces données ont été obtenues sur des vaches Prim'Hostein acclimatées à des conditions tempérées alors que les données issues de la littérature comporte une proportion significative de vaches laitières d'autres races ou de génotypes plus anciens, ainsi que des données obtenues en zones tropicales sèches.

Plusieurs pistes peuvent être évoquées pour expliquer la surestimation de 12 à 13% de l'eau bue sur la ferme expérimentale des Trinottières. La première est que ces données incluaient une pratique régulière (et recommandée) de nettoyage des abreuvoirs dont les pertes associées n'ont pas été retirées à la consommation. Une autre raison, susceptible de peser largement sur les mesures d'eau bue est que les abreuvoirs des Trinottières étaient des bacs à niveau constant, à la différence des abreuvoirs utilisés pour les mesures individuelles en expérimentation (essai 1 et 2 et bases issue de la littérature) qui sont plutôt des abreuvoirs bols à palette. La bibliographie cite des cas où des vaches en lactation pouvaient consommer jusqu'à de 30 à 50% d'eau en plus lorsque la surface de l'abreuvoir était doublée (Pinheiro Machado Filhoa et al., 2004), sans que l'on ne sache précisément si l'eau consommée en plus est gaspillée en éclaboussures ou réellement consommée. Pour ces raisons, il semble recommandable d'ajouter une marge de sécurité de 15% si le modèle proposé dans cette publication doit être utilisé pour des prédictions en ferme.

Il est certain que le modèle présenté dans cette communication requiert de connaître assez précisément un certain nombre de paramètres de la ration. Cependant, le correctif de l'effet de la température peut tout à fait être utilisé sur d'autres modèles plus simples obtenus dans des conditions de thermoneutralité (Khelil-Arfa et al., 2012).

CONCLUSION

La prise en compte de l'effet de la température sur les prédictions de consommation d'eau des vaches laitières par l'estimation des pertes d'eau par évaporation sous forme de chaleur latente a permis une nette amélioration des performances de prédiction d'un modèle initialement paramétré sur des données obtenues à la thermoneutralité. Le modèle présenté dans cette communication peut tout à fait être utilisé pour prédire les besoins en eau d'abreuvement de vaches laitières, à condition cependant de prévoir une marge de sécurité pour des abreuvoirs collectifs à niveau.

Les auteurs remercient le département PHASE de l'INRA pour leur financement à travers un CI dédié et Systali.

Bibby Toutenburg, 1977. Prediction and improved estimation in linear models. Wiley & sons, Chichester, UK.

Carteau B., Kerner S., Aubert C., Blondin G., Espagnol S., Massabie P., Ménard J.L., Soing P., Bonneau J., 2010. CASDAR Gestion Durable des Ressources en Eau. APCA, ACTA, 20 p.

Khelil-Arfa, H., Boudon, A., Maxin, G., Favardin, P. 2012. Animal 6, 1662-1676.

Maia, A.S.C., DaSilva, R.G., Battiston Loureiro, C.M., 2005a. Int. J. Biometeorol., 49, 332-336.

Maia, A.S.C., DaSilva, R.G., Battiston Loureiro, C.M., 2005a. Int. J. Biometeorol., 50, 17-22.

Monteith, J.L., Unsworth, M.H., 2008. Principles of environmental physics. Elsevier - Academic Press, USA, UK.

Pinheiro Machado Filhoa, L.C., Teixeira, D.L., Weary, D.M., von Keyserlingk, M.A.G., Hötzel, M.J. 2004. Applied Animal Behaviour Science 89, 185-193

Yousef, M.K., 1987. In: JOHNSON H.D. (Editor), Bioclimatology and the adaptation of livestock. Elsevier Science Publishing Company, Inc., USA. 17-31.