

Etude de la tolérance à la chaleur des bovins par l'étude des interactions entre génotype et indice température-humidité sur la production et la santé de la mamelle en race Montbéliarde

VINET A. (1), MATTALIA S. (2), VALLEE R. (2), BERTRAND C. (3), BERTUZZI P. (4), CUYABANO B.C.D. (1), BOICHARD D. (1)

(1) Université Paris Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR1313 GABI, Domaine de Vilvert, 78350 Jouy-en-Josas, France

(2) Institut de l'Elevage, UMT eBIS, 75012 Paris, France

(3) INRAE, US310 CTIG, Domaine de Vilvert, 78350 Jouy-en-Josas, France

(4) INRAE, US1116 AGROCLIM, Domaine de Saint Paul, 84914 Avignon, France

RESUME- L'objectif de cette étude était d'estimer l'effet de l'indice température-humidité (THI) et l'ampleur des interactions entre le génotype et le THI sur les caractères de production laitière et le score de cellules somatiques en race Montbéliarde. Les contrôles laitiers élémentaires de première et deuxième lactations collectés entre 2016 à 2020 ont été associés au THI moyen des trois jours précédant le jour de contrôle dans la commune de l'exploitation. Au total, 446 717 contrôles laitiers de 55 650 vaches en première lactation et 457 516 contrôles de 58 229 vaches en deuxième lactation ont été analysés. L'évaluation de l'effet moyen du THI, estimé à l'aide d'un modèle mixte animal, a montré que le THI permettant les performances optimales est variable selon le caractère considéré mais qu'il est toujours inférieur ou égal à 55 (soit 12-13°C). Les réponses individuelles au THI ont été estimées par des modèles de normes de réaction basés sur des régressions aléatoires. Quel que soit le rang et le stade de la lactation, les corrélations génétiques entre un même caractère à différents THI sont supérieures à 0,80 et la plupart sont supérieures à 0,90, ce qui suggère que les interactions génétique-THI sont faibles pour les caractères de production et de santé de la mamelle. Néanmoins, les trajectoires des valeurs génétiques montrent quelques reclassements en condition de stress thermique (THI élevé), indiquant que certains animaux seraient plus adaptés que d'autres à produire malgré des températures élevées.

Heat tolerance and genotype by temperature-humidity index interactions on milk production and udder health traits in Montbeliarde cows

VINET A. (1), MATTALIA S. (2), VALLEE R. (2), BERTRAND C. (3), BERTUZZI P. (4), CUYABANO B.C.D. (1), BOICHARD D. (1)

(1) Université Paris Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR1313 GABI, Domaine de Vilvert, 78350 Jouy-en-Josas, France

SUMMARY - This study aimed to estimate the effect of temperature-humidity index (THI) and the magnitude of genotype-by-THI interactions on milk production traits and on somatic cell score in Montbéliarde cows. Test-day records from first and second lactations from 2016 to 2020 were associated with the average THI of the three days before the test-day record. A total of 446,717 test-day records from 55,650 cows in first lactation and 457,516 test-day records from 58,229 cows in second lactation were analyzed. The evaluation of the average effect of THI, estimated with an animal mixed model, indicated that the THI allowing optimal performances varies according to the trait considered but is always equal or lower than 55 (ie ~ 12-13°C). Individual responses to THI were estimated with random regression models. Regardless of parity and stage of lactation, genetic correlations between the same trait at different THI are greater than 0.80 and most are above 0.90, suggesting that genotype-by-THI interactions are weak for production and for udder health traits. Nevertheless, the trajectories of the breeding value show some re-rankings under heat stress conditions (high THI), indicating that some animals would be more adapted than others to produce despite high temperatures.

INTRODUCTION

Le réchauffement climatique a et aura des conséquences négatives importantes sur l'élevage notamment au travers l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur. Les vaches laitières en lactation génèrent une charge thermique interne métabolique importante en raison des fermentations ruminales et ce phénomène est exacerbé lorsque la température de l'environnement auquel les animaux sont exposés augmente. Lorsque la température corporelle augmente la productivité, le bien-être et la santé des vaches sont altérés (West, 2003 ; Lees et al., 2019). Pour faire face au changement climatique, qui représente une menace réelle de nouvelles augmentations des températures et de l'apparition de vagues de chaleur, les animaux devront être tolérants au stress thermique tout en maintenant un bon niveau de production. Dans ce contexte de scénario environnemental difficile pour les productions animales, deux approches de phénotypage sont envisageables pour sélectionner la tolérance à la chaleur. La première consiste à mesurer des

paramètres physiologiques, tels que la température corporelle ou la réponse hormonale à la chaleur, ou des indicateurs comportementaux de stress thermique, tels que la fréquence respiratoire, le halètement ou la transpiration. Bien que ces mesures fournissent des informations précises sur le début du stress thermique, elles sont difficiles et souvent coûteuses à mesurer à grande échelle à généraliser, et leur déploiement à grande échelle pour créer une population de référence de plusieurs milliers d'animaux pour la sélection génomique est complexe, même avec les technologies de capteurs actuellement en développement. La deuxième approche pour quantifier le stress thermique est basée sur des mesures indirectes, grâce à l'analyse des performances des animaux soumis à une gamme de conditions météorologiques. Les bovins affichent un potentiel génétique maximal de production avec des coûts physiologiques minimaux dans leur zone de thermoneutralité. Ainsi, lorsque la température ambiante dépasse cette zone de thermoneutralité, les animaux dépensent de l'énergie pour maintenir une température corporelle normale, induisant un stress thermique, et altérant

ainsi leurs performances (Becker et al., 2020). Simultanément, ils diminuent leur ingestion pour réduire la production interne de chaleur. Par conséquent, la réponse du niveau de performances aux conditions météorologiques est une mesure du stress thermique. Plusieurs indices combinant des variables météorologiques (températures, humidité, rayonnement solaire ou vitesse du vent) ont été évalués comme prédicteurs potentiels du stress thermique (Bohmanova et al., 2007 ; Hammami et al., 2013). L'indice température-humidité (THI) proposé par le National Research Council (1971) est aujourd'hui largement utilisé en recherche bovine. Le THI dépend principalement de la température, mais comme une humidité élevée accentue les effets des températures élevées et basses, le THI est aussi fonction de l'humidité relative. Il est calculé selon la formule suivante :

$$THI = (1,8 \times T + 32) - (0,55 - 0,0055 \times RH) \times (1,8 \times T - 26)$$

T étant la température moyenne sur 24 heures (Celsius) et RH l'humidité relative moyenne sur 24 heures (%).

Cette étude a deux objectifs. Le premier est d'estimer la réponse des performances de production et de santé de la mamelle aux variations de THI chez les vaches Montbéliardes. Le second objectif est d'estimer les interactions entre génotype et THI, permettant ainsi d'identifier les animaux les plus adaptés pour faire face aux hausses de températures attendues.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. DONNEES

Les performances et les informations généalogiques utilisées dans cette étude proviennent de la base de données zootechnique nationale française. Les performances retenues ont été sélectionnées à partir des enregistrements des jours de contrôle de la première (L1) et de la deuxième (L2) lactation des vaches Montbéliarde de cinq régions françaises (Franche-Comté, Rhône-Alpes, Auvergne, Bretagne et Pays-de-Loire), recueillis entre août 2016 et décembre 2020. Les phénotypes analysés sont la production laitière (LAIT), le taux butyreux (TB), le taux protéique (TP), la quantité de matière grasse (MG) et de matière protéique (MP) du lait ainsi que le score de cellules somatiques (SCS) obtenu par transformation logarithmique de la concentration en cellules somatiques (CCS) ($SCS = \log_2(CCS/100\ 000) + 3$). Seuls les animaux de parents connus et dont l'âge au vêlage se situe entre 23 et 42 mois pour les primipares (L1) et entre 35 et 60 mois pour la deuxième lactation (L2) ont été retenus. La durée de lactation analysée a été limitée à 305 jours. Au total, 446 717 contrôles effectués sur 55 650 vaches en L1 et 457 516 contrôles effectués sur 58 229 vaches en L2 ont été sélectionnés aléatoirement sur le dernier chiffre du numéro d'élevage dans l'ensemble de la population, pour des raisons calculatoires liées au modèle utilisé.

Les données météorologiques ont été fournies par la base de données Safran de Météo-France. Cette base de données contient des valeurs quotidiennes de température et d'humidité estimées pour chaque carré d'une grille de 9892 carrés de 8x8km.

Les bases de données de performances et de météorologie ont été fusionnées grâce au code postal de chaque ferme et les enregistrements des jours de contrôle ont été associés à la moyenne du THI sur trois jours (le jour du contrôle et les 2 jours précédents).

1.2. MODELES STATISTIQUES

1.2.1. Effet du THI sur les performances

Le modèle statistique considéré pour l'ensemble des caractères est un modèle mixte incluant l'effet fixe du THI pour

estimer son effet moyen sur l'ensemble des femelles. Le modèle inclut également les effets fixes du groupe de contemporaines (= défini par la combinaison du troupeau et de l'année de production), le stade de lactation, l'âge au vêlage et le stade de gestation et les effets aléatoires de la valeur génétique et de l'effet d'environnement permanent de la vache. Les effets génétiques sont estimés à l'aide de trois générations de pedigree.

1.2.2. Interactions génotype-THI

Pour ces secondes analyses, la valeur génétique de la vache n'est plus supposée constante, mais elle peut varier selon le THI. A chaque valeur de THI correspond un caractère différent, avec sa variabilité génétique propre et son héritabilité. Sous cette hypothèse, une corrélation génétique inférieure à 1 pour le même phénotype exprimé à différents THI révèle d'éventuelles interactions génotype x THI. Pour modéliser ces trajectoires de valeurs génétiques, nous utilisons un modèle de normes de réaction, à régressions aléatoires. En pratique, la valeur génétique de l'individu *i* à THI=*t* est modélisée comme une combinaison de 4 valeurs génétiques propres à *i* (et indépendantes de *t*), pondérées par des coefficients (ou covariables) fonction de *t* (et indépendants de *i*). Comme les contrôles laitiers évoluent aussi en fonction du stade de lactation (Leclerc et al., 2009 ; Druet et al., 2003), la valeur génétique de *i* dépend aussi de covariables fonction du stade de lactation. Au final, les covariables de l'effet génétique ont été modélisées par des polynômes de Legendre incluant : une constante modélisant le niveau génétique moyen, quels que soient le THI et le stade de lactation, deux polynômes de degré 1 et 2 du stade de lactation et trois polynômes de degrés 1, 2 et 3 du THI. L'effet d'environnement permanent de la vache est modélisé de la même façon. Ce modèle permet donc d'estimer les valeurs génétiques des animaux pour chaque valeur de THI et de stade de lactation.

Ce modèle comprend aussi des effets fixés du groupe de contemporaines défini par la combinaison troupeau x jour de contrôle, du stade de lactation, de l'âge au vêlage et du stade de gestation.

2. RESULTATS

Les performances utilisées dans cette étude sont décrites dans tableau 1. Les THI moyens associés à ces performances varient de 18 (soit une température moyenne quotidienne de -12 à -10°C) à 78 (soit une température moyenne quotidienne de +28 à +29°C), avec un THI moyen de 50 (soit une température moyenne quotidienne de +7 à +10°C).

	Parité 1	Parité 2
Nombre de femelles	55 650	58 229
Nombre de contrôles	446 717	457 516
LAIT (kg/j)	21,2 (5,1)	24,4 (6,7)
TB (‰)	38,6 (5,2)	38,8 (5,7)
TP (‰)	33,3 (3,0)	33,6 (3,3)
MG (g/l)	811 (202)	938 (259)
MP (g/l)	702 (171)	813 (213)
SCS	2,41 (1,68)	2,23 (1,79)

Tableau 1 Statistiques descriptives des jeux de données utilisés : nombre de vaches, de contrôles laitiers et moyennes et écarts-types (entre parenthèses) de la production laitière (LAIT), des taux butyreux (TB) et protéiques (TP), des quantités de matière grasse (MG) et de protéines (MP) et du score de cellules somatiques (SCS) par parité.

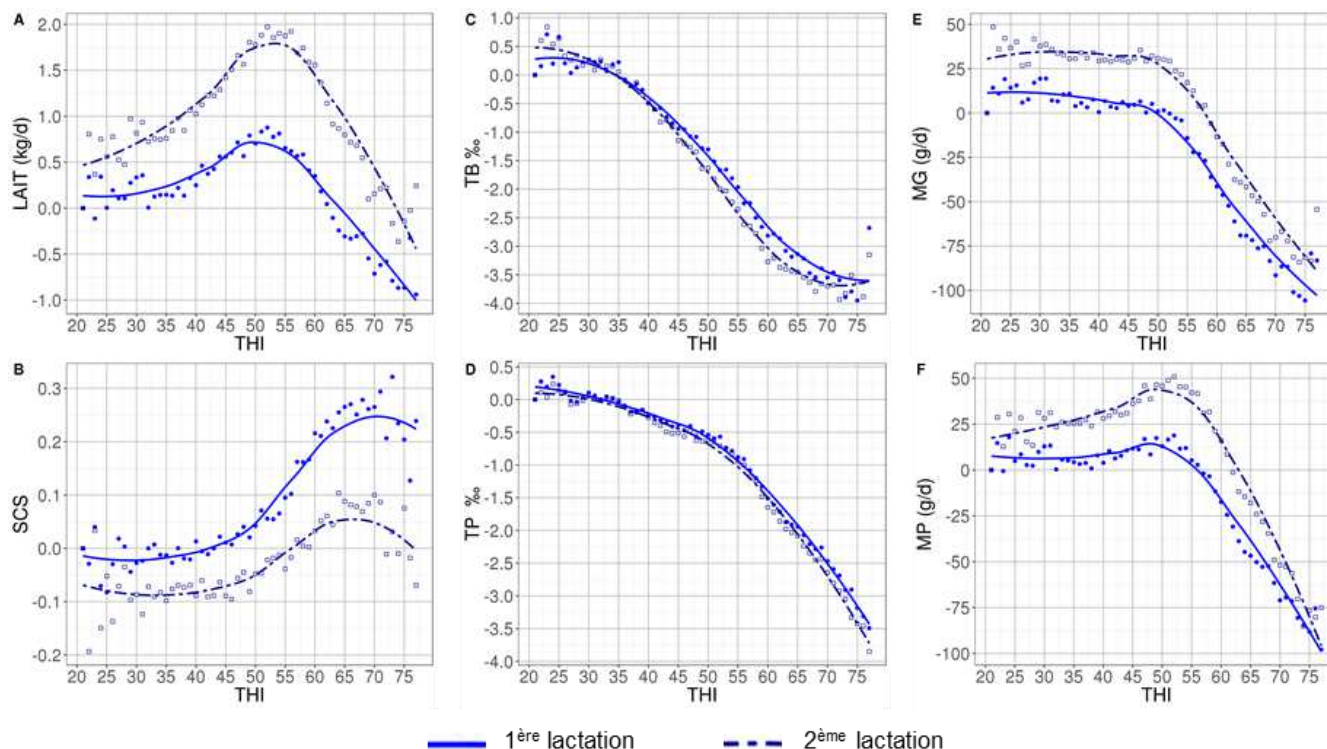


Figure 1 Effets moyens du THI sur (A) la quantité de lait produite ; (B) le score de cellules somatiques ; (C) les taux butyreux et (D) protéique ; (E) les quantités de matières grasses et (F) de protéines au cours de la première (ligne pleine) et de la deuxième (ligne pointillée) lactation.

2.1. EFFET DU THI SUR LES PERFORMANCES

L'effet moyen de chaque classe de THI est présenté dans la figure 1. Alors que l'ensemble des 6 caractères présentent un effet du stress de chaleur, seules les quantités de lait et de protéines sont sensibles au stress de froid. Ainsi, LAIT et MP sont optimales dans l'intervalle de THI 47-55, c'est-à-dire lorsque la température moyenne se situe entre 5 et 13°C. Pour les autres caractères, la diminution des performances est observée pour un THI supérieur à 50 (+7 à +10°C) pour MG et pour un THI supérieur à 35 (-2,5 à +2°C) pour les taux. Les SCS quant à eux augmentent à partir d'un THI de 45 (+3 à +7°C).

La baisse des quantités et des taux estimée entre les conditions de THI optimales et les conditions de stress thermiques importants (THI>70) montre un impact très similaire du stress thermique entre parités. Cette baisse est comprise entre -7 % pour la production moyenne quotidienne de lait et de -11,5 % à -13,8 % pour les quantités de matières. Pour le SCS, l'effet du stress thermique est plus important chez les primipares (+10,3 % du SCS moyen) que chez les vaches en deuxième lactation (+4,8 % du SCS moyen).

2.2. INTERACTIONS GENOTYPE-THI

Seules les interactions entre génotype et THI seront commentées dans cet article, les interactions entre génotype et stade de lactation ont fait l'objet d'autres communications aux journées 3R (Leclerc et al., 2009).

La majorité des corrélations génétiques entre THI estimées intra-caractère, parité et stade de lactation sont supérieures à 0,90. Aucune corrélation génétique inférieure à 0,90 n'a été estimée pour les taux et le SCS en 1^{ère} lactation. D'une manière générale, les corrélations les plus faibles sont rarement inférieures à 0,80 et concernent toujours des corrélations entre THI extrêmes. Les corrélations génétiques les plus faibles ont été estimées pour la MP, tant en L1 qu'en L2, et sont toutes supérieures à 0,75. Pour tous les caractères, la corrélation génétique estimée entre le THI de 40 et le THI 70 (stress thermique) est plus faible en L2 qu'en L1, et dans la plupart des cas, elle a tendance à augmenter avec le stade de lactation, comme le montre le tableau 2.

Même si les interactions génotype-THI sont faibles, elles permettent une légère variabilité dans la réponse individuelle au stress thermique. Une illustration de cette variabilité de la tolérance à la chaleur est donnée dans la figure 2 qui présente l'évolution des valeurs génétiques de la production de lait en première lactation le long du gradient THI de huit taureaux ayant au moins 500 filles avec des performances dans notre jeu de données. Bien que le classement des taureaux soit assez stable entre les THI 20 et 60, au-delà de cette zone des reclassements se produisent. Ainsi, à THI élevés, les valeurs génétiques estimées de certains taureaux chutent dans le classement (pentes négatives) tandis que d'autres ont tendance à monter avec l'augmentation du THI (pentes positives).

	LAIT		TB		TP		MG		MP		SCS	
Stade (j)	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
60	0,974	0,948	0,948	0,925	0,960	0,957	0,972	0,939	0,964	0,935	0,979	0,905
150	0,977	0,952	0,972	0,951	0,970	0,967	0,974	0,949	0,973	0,943	0,977	0,925
240	0,978	0,968	0,979	0,962	0,975	0,976	0,978	0,972	0,980	0,972	0,977	0,937

Tableau 2 Corrélations génétiques des caractères LAIT, TB, TP, MG, MP, et SCS entre les conditions THI=40 et THI=70 à différents stades (60j, 150j et 240j) et rang de lactation (L1 ou L2).

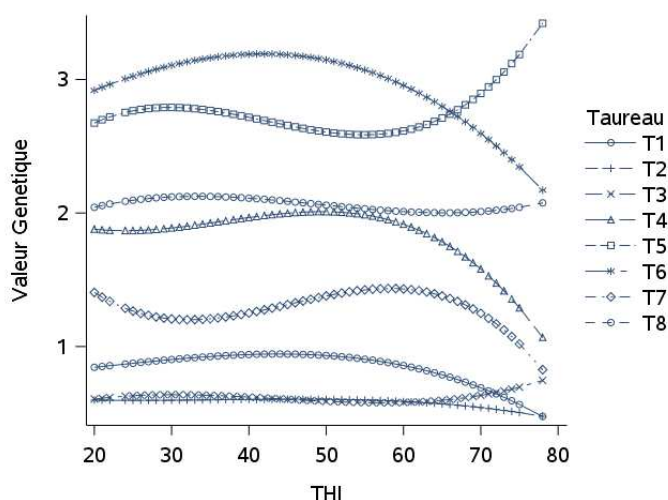


Figure 2 Evolution des valeurs génétiques prédites pour les différents valeurs de THI pour la quantité de lait en première lactation et à 150 jours de lactation de 8 taureaux (T1-T8) avec au moins 500 filles avec performances dans notre jeu de données.

	LAIT	TB	TP	MG	MP	SCS
L1	-0,27	-0,53	-0,29	-0,67	-0,50	+0,64
L2	-0,46	-0,87	-0,45	-0,47	-0,51	+0,33

Tableau 3 Corrélations génétiques entre les pentes des valeurs génétiques à THI=70 et les valeurs génétiques à THI=50 et au stade de lactation=150j.

La pente à THI=70 peut être interprétée comme la sensibilité des descendance de taureaux au stress thermique. Les corrélations génétiques entre les pentes des valeurs génétiques à THI=70 et les valeurs génétiques à THI moyen (THI=50, condition environnementale moyenne actuellement selon notre jeu de données) ont été estimées afin de prédire l'impact de la sélection actuelle sur la sensibilité au stress thermique. Elles sont présentées dans le tableau 3. Pour les caractères de production, ces corrélations sont négatives, donc défavorables, indiquant que les animaux ayant à THI moyen les valeurs génétiques les plus élevées sont aussi ceux qui ont les pentes les plus négatives en condition de stress thermique. La corrélation est positive pour le SCS, montrant que les animaux les plus sensibles à THI moyen ont une sensibilité encore accrue comparativement aux autres animaux en cas de stress thermique. Ces corrélations entre valeurs génétiques à THI moyen et pente des valeurs génétiques en conditions de stress de chaleur sont modérées (environ - 0,3 pour LAIT et TP en L1 et + 0,33 pour SCS en L2) à élevées (- 0,87 pour TB en L1).

3. DISCUSSION

Notre étude a pour objectif d'estimer l'effet du THI sur les caractères de production et de santé de la mamelle en race, et d'identifier les interactions génotype-THI en race Montbéliarde. A notre connaissance, cette étude est la première pour cette race, ainsi que la première à croiser les informations quotidiennes de THI avec la base de données nationales française. Nous avons donc comparé nos résultats à ceux obtenus dans d'autres races à haut potentiel laitier, connues pour être moins adaptées à la chaleur que les races tropicales (revue dans Kadzere et al., 2002). Il existe de grandes différences dans les seuils de stress thermique entre les races (Bryant et al., 2007a ; Dikmen et Hansen, 2009 ; Gaughan et al., 2008), les caractères étudiés (Bernabucci et al., 2014 ; Bryant et al., 2007a ; Campos et al., 2022 ; Carabaño et al., 2014, 2016 ; Maggiolino et al., 2020) et les régions climatiques (Carabaño et al., 2016). Il est important de garder ces

éléments à l'esprit lors de la comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature.

3.1. EFFET DU THI SUR LES PERFORMANCES

Nos résultats montrent que le THI optimal en race Montbéliarde élevée en France est plus faible que celui généralement constaté chez les vaches laitières hautes productrices, le plus souvent compris entre 60 et 78 pour la quantité de lait selon les régions d'élevage, Allemagne (Brügemann et al., 2012), Espagne (Carabaño et al., 2014), Etats-Unis (Bohmanova et al., 2007) ou Italie (Bernabucci et al., 2014). Cependant, un certain nombre d'éléments expliquent la sensibilité des vaches laitières françaises à des THI plus faibles. D'une part, le fait que la majorité des études sur les vaches laitières à fort potentiel laitier concerne des femelles élevées de manière intensive en bâtiments clos, avec parfois des systèmes de refroidissement. Dans ces études la température extérieure utilisée pour le calcul du THI ne reflète pas la température réellement ressentie par les animaux en bâtiment, alors que la plupart des vaches Montbéliardes françaises pâturent au printemps et en été, ou sont dans des bâtiments partiellement ouverts et sont donc plus exposées aux fortes chaleurs. D'autre part, la majeure partie de ces études sont réalisées dans des régions où la température moyenne est nettement supérieure à celles observées dans les régions d'élevage de la Montbéliarde française, ce qui permet probablement aux animaux de s'acclimater à des températures plus chaudes dès le jeune âge mais aussi progressivement au cours de l'année (Carabaño et al., 2016). Le THI moyen dans notre jeu de données révèle que les conditions environnementales les plus fréquemment rencontrées correspondent à un THI de 50 (50% des données sont enregistrées à des THI compris entre 41 et 59 et des températures moyennes sur 24 heures comprises entre 4,1 et 15,3°C). Ces conditions environnementales les plus fréquentes sont aussi celles dans lesquelles les animaux sont sélectionnés. Il n'est donc pas étonnant que les Montbéliardes élevées en France, rarement en bâtiments totalement clos, aient été indirectement sélectionnées pour produire dans les conditions les plus fréquemment rencontrées en France. Par ailleurs le THI 70, estimé dans de nombreuses études comme marquant le début du déclin des performances des vaches laitières, est un THI extrême pour les vaches françaises. En effet, un THI de 70 correspond à une température moyenne comprise entre 22 et 24° Celsius (soit environ 30° au maximum), et seulement 3% des performances de production laitière des Montbéliardes sont collectées à un THI supérieur ou égal à 70 (3,2 % en L1 et 3,1 % en L2).

3.2. INTERACTIONS GENOTYPE-THI

Intra-stade et rang de lactation, les corrélations génétiques très élevées entre les diverses conditions de THI sont en accord avec les résultats de plusieurs études menées en race Holstein (Brügemann et al., 2011, Cheruiyot et al., 2020). Les interactions entre génotype et THI sont donc faibles, il y a peu de variabilité dans la réponse individuelle aux différents THI (c'est-à-dire peu de reclassements des valeurs génétiques des animaux le long du gradient THI) et la sélection d'animaux plus tolérants à la chaleur n'en sera que plus complexe. En effet la baisse moyenne de production avec l'élévation du THI pourra difficilement être compensée par la sélection d'animaux maintenant mieux leur production que la moyenne. Cependant, l'étude de l'évolution des valeurs génétiques montre que, même si ces interactions sont faibles, il existe une variabilité génétique des animaux dans leur réponse au stress de chaleur. Cela se traduit par un déclin des performances plus ou moins marqué selon les animaux. Il est important de rappeler que les animaux dont les pentes de valeurs génétiques sont positives à THI élevés ne voient pas leur production augmenter en cas de stress thermique, mais diminuer moins que les autres. Il s'agit là de classement entre animaux à un THI donné. Certains animaux voient leur classement augmenter alors que d'autres le voient diminuer

mais phénotypiquement, tous ont une diminution de production lorsque la température augmente (figure 1).

CONCLUSION

Notre étude montre que même si les interactions génotype-THI sont faibles, en termes de production et de santé de la mamelle les animaux ne réagissent pas tous de la même manière aux températures externes élevées. La prise en compte d'un index de tolérance à la chaleur dans la sélection des bovins serait donc tout à fait pertinente pour anticiper l'augmentation prévue des températures. Des travaux complémentaires sont toutefois nécessaires pour comprendre ce qui se cache réellement derrière la baisse de production accrue pour les animaux à haut potentiel en cas de chaleurs fortes. La baisse est d'autant plus forte que le potentiel génétique de l'animal est élevé, comme le traduisent les corrélations génétiques entre la pente à THI élevé et le niveau de production à THI moyen. On peut penser que ce phénomène traduit une plus forte sensibilité au stress de chaleur des animaux les plus productifs. Cependant, on ne peut écarter l'hypothèse d'un mécanisme de protection des animaux qui, en cas de stress de chaleur, diminueraient drastiquement leur ingestion et donc leur production afin de diminuer la production de chaleur due aux fermentations ruminales particulièrement importantes lorsque la production est élevée.

En revanche pour ce qui concerne la quantité de cellules somatiques dans le lait notre étude montre que le stress de chaleur a plutôt un rôle d'amplificateur de la sensibilité aux mammites. Les animaux déjà sensibles à THI moyen étant encore plus sensibles lorsque les températures extérieures augmentent. Cette aggravation de la sensibilité des animaux doit être considérée au plus vite dans les schémas de sélection.

Ce projet a reçu le soutien financier du programme Horizon 2020 de l'Union Européenne pour la recherche et l'innovation sous le n°101000226 (projet Rumigen), et d'APIS-GENE à travers le projet CAICALOR. Rumigen fait partie d'EuroFAANG (<https://eurofaang.eu>).

Les données climatiques SAFRAN proviennent de Météo-France et ont été téléchargées via la plateforme SICLIMA développée par AgroClim-INRAE.

Becker, C.A., Collier, R.J., Stone, A.E. 2020. J Dairy Sci., 103, 6751-6770
Bernabucci, U., Biffani, S., Buggiotti, L., Vitali, A., Lacetera, N., Nardone, A. 2014. J Dairy Sci., 97, 471-486
Bohmanova, J., Misztal, I., Cole, J.B. 2007. J Dairy Sci., 90, 1947-1956
Brügemann, K., Gernand, E., Von Borstel, U.U., König, S. 2011. J Dairy Sci., 94, 4129-4139
Brügemann, K., Gernand, E., Von Borstel, U.K., König, S. 2012. Arch Tierz., 55, 13-24.
Bryant, J.R., Lopez-Villalobos, N., Pryce, J.E., Holmes, C.W., Johnson, D.L. 2007. N Z J Agric Res, 50, 327-338
Campos, I.L., Chud, T.C.S., Oliveira, H.R., Baes, C.F., Canovas, A., Schenkel, F.S. 2022. Can J Anim Sci., 102, 368-381
Carabaño, M.J., Bachagha, K., Ramon, M., Diaz, C. 2014. J Dairy Sci., 97, 7889-7904.
Carabaño, M.J., Logar, B., Bormann, J., Minet, J., Vanrobays, M.L., Diaz, C., Tychon, B., Gengler, N., Hammami, H. 2016. J Dairy Sci., 99, 3798-3814
Cheruiyot, E.K., Nguyen, T.T.T., Haile-Mariam, M., Cocks, B.G., Abdelsayed, M., Pryce, J.E. 2020. J Dairy Sci., 103, 2460-2476
Dikmen, S., Hansen, P.J. 2009. J Dairy Sci., 92, 109-116

Druet, T., Jaffrezic, F., Boichard, D., Ducrocq, V. 2003. J Dairy Sci., 86, 2480-2490
Gaughan, J.B., Mader, T.L., Holt, S.M., Lisle, A. 2008. J Dairy Sci., 86, 226-234
Hammami, H., Bormann, J., M'hamdi, N., Montaldo, H.H., Gengler, N. 2013. J Dairy Sci., 96, 1844-1855
Kadzere, C.T., Murphy, M.R., Silanikove, N., Maltz, E. 2002. Livest Prod Sci., 77, 59-91
Leclerc, H., Barbat-Leterrier, A., Ducrocq, V. 2009. 16èmes Renc. Rech. Ruminants, Paris, 16, 291-294
Lees, A.M., Sejian, V., Wallage, A.L., Steel, C.C., Mader, T.L., Lees, J.C., Gaughan, J.B. 2019. Animals, 9, 322
Maggiolino, A., Dahl, G.E., Bartolomeo, N., Bernabucci, U., Vitali, A., Serio, G., Cassandro, M., Centoducati, G., Santus, E., De Palo, P. 2020. J Dairy Sci., 103, 8541-8553
National Research Council, 1971. In Nat. Acad. Sci., A guide to environmental research on animals. Washington.
West, J.W. 2003. J Dairy Sci., 86, 2131-2144