

Le croisement entre races bovines laitières : intérêts et limites pour des ateliers en race pure Prim'Holstein ?

Charlotte DEZETTER¹, Didier BOICHARD², Nathalie BAREILLE³, Bénédicte GRIMARD⁴, Pascale LE MEZEC⁵,
Vincent DUCROcq²

¹URSE, École Supérieure d'Agricultures, Université Bretagne Loire, 55 rue Rabelais, BP 30748, 49007, Angers Cedex, France

²GABI, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 78350, Jouy-en-Josas, France

³BIOEPAR, INRA, Oniris, Université Bretagne Loire, 44307, Nantes, France

⁴ENVA, UMR1198 Biologie du Développement et Reproduction, 94700, Maisons-Alfort, France

⁵Institut de l'Élevage, Département de Génétique, 149 rue de Bercy, 75012, Paris, France

Courriel : c.dezetter@groupe-esa.com

■ La robustesse des vaches Prim'Holstein s'est dégradée ces dernières décennies alors que le croisement entre races laitières permettrait *a priori* de l'améliorer. En dépit de ses intérêts sur les effets génétiques, la pratique du croisement entre races bovines laitières est peu répandue en France sans doute à cause d'une méconnaissance de ses bénéfices technico-économiques à moyen/long terme. De plus, l'hétérogénéité phénotypique qu'entraîne le croisement peut être un frein à son utilisation. Afin de prendre en toute connaissance de cause une éventuelle décision de passer tout un troupeau de race pure Prim'Holstein en croisement, les éleveurs doivent connaître les avantages et contraintes liés au croisement en fonction de leur type d'atelier laitier.

Introduction

L'augmentation de la consanguinité (Mattalia *et al.*, 2006 ; Sewalem *et al.*, 2006) et la dégradation concomitante des caractères fonctionnels en race pure Holstein ont remis en question les stratégies de sélection génétique. Les caractères fonctionnels peuvent être améliorés par la sélection en race pure. Toutefois, leur faible héritabilité et leur corrélation négative avec les caractères de production ne facilitent pas cette amélioration. Même si la sélection génomique, à la fois sur les mâles et les femelles, apporte une amélioration conjointe significative de ces caractères (Ducrocq, 2010), en fonction des choix effectués par les éleveurs, le progrès génétique sur les caractères fonction-

nels pourrait rester relativement lent. Le croisement pourrait *a priori* être une solution rapide et efficace pour limiter la consanguinité et améliorer les caractères fonctionnels. En effet, il permet à la fois de bénéficier des avantages de la sélection dans des races différentes par complémentarité et additivité et des effets d'hétérosis existants entre ces races (Bidanel, 1992).

Bien que la théorie du croisement et son intérêt pour la production laitière aient été discutés il y a déjà plus de 25 ans par Swan et Kinghorn (1992), le développement du croisement entre races bovines laitières dans les pays laitiers développés est resté très marginal, à l'exception notable de la Nouvelle-Zélande (Lopez-Villalobos *et al.*, 2000a ;

Dairy NZ et LIC, 2018). Ceci s'explique en partie par la supériorité de la race Holstein pour la production laitière ainsi que par l'attachement des éleveurs à la notion de race (Weigel et Barlass, 2003 ; Phocas *et al.*, 2017). Plus particulièrement en France, l'élevage en race pure facilite la gestion de la conduite des troupeaux (reproduction, alimentation...) qui restent de taille moyenne (Phocas *et al.*, 2017). Par ailleurs, l'évaluation génétique reste intra-race sans calcul d'index pour les vaches issues de croisement. Il est donc difficile pour les inséminateurs et les éleveurs de raisonner leurs accouplements en croisement.

Dans les élevages laitiers Prim'Holstein en race pure, les inséminations en croisement laitier ne repré-

sentaient que 1,5 % des inséminations artificielles premières en 2015 (Benoit et Le Mezec, 2016). Ces inséminations étaient essentiellement des inséminations en retour, la fréquence des IA en croisement passant de 0,16 % en 1^{re} insémination à 6,51 % en 4^e insémination. Le croisement laitier semble donc utilisé plutôt pour résoudre des problèmes de fertilité ponctuels et individuels de non réussite à l'insémination plutôt que pour disposer de génotypes différents. On note toutefois un intérêt croissant pour le croisement entre races laitières en France. Entre 2005 et 2010, le nombre de femelles de 0-4 ans issues de croisement a augmenté de 33 % (Bougouin et Le Mezec, 2010). Les veaux croisés (issus de parents de 2 races différentes) représentaient 24 % des naissances sur la campagne 2016-2017 en élevage laitier (mais seulement 16 % chez les vaches Prim'Holstein, données reproscope 2018, <http://www.reproscope.fr>).

Comparé à l'achat de femelles ou d'embryons, le croisement d'absorption est la méthode la moins onéreuse pour changer de race. C'est toutefois un processus long qui nécessite au moins trois générations (la procréation des F1 et deux croisements en retour pour disposer d'animaux 7/8 de la race d'absorption). Ce type de croisement correspond à la majorité des pratiques de croisement actuellement observées (en 3^e génération, 32 % des vaches croisées sont issues de croisement d'absorption, Le Mezec, 2012). Toutefois, dans un troupeau donné, ce n'est qu'une pratique transitoire amenée à disparaître une fois le changement de race réalisé. Nous ne la développerons pas davantage dans cet article.

Le croisement alternatif ou rotatif entre races laitières est une solution à envisager dans certains systèmes pour améliorer rapidement les caractères fonctionnels tout en maintenant un niveau de production et de qualité de lait suffisant. Les programmes actuellement les plus développés utilisent des femelles croisées et des mâles de race pure. Ainsi, lorsque deux races seulement sont utilisées, on alterne la race du mâle à chaque génération. Lorsque trois races ou plus sont utili-

Tableau 1. Génotype des animaux croisés au cours des générations successives, en cas de croisement rotatif à 2, 3 ou 4 races.

Génération	2 races (R1-R2)	3 races (R1-R2-R3)	4 races (R1-R2-R3-R4)
G1 (= F1)	1/2 – 1/2	1/2 – 1/2 – 0	1/2 – 1/2 – 0 – 0
G2	1/4 – 3/4	1/4 – 1/4 – 1/2	1/4 – 1/4 – 1/2 – 0
G3	5/8 – 3/8	5/8 – 1/8 – 1/4	1/8 – 1/8 – 1/4 – 1/2
G4	5/16 – 11/16	5/16 – 9/16 – 1/8	9/16 – 1/16 – 1/8 – 1/4
G5	21/32 – 11/32	5/32 – 9/32 – 9/16	9/32 – 17/32 – 1/16 – 1/8
...			
Gn	2/3 – 1/3	4/7 – 1/7 – 2/7	8/15 – 1/15 – 2/15 – 4/15
Gn + 1	1/3 – 2/3	2/7 – 4/7 – 1/7	4/15 – 8/15 – 1/15 – 2/15
Gn + 2	2/3 – 1/3	1/7 – 2/7 – 4/7	2/15 – 4/15 – 8/15 – 1/15
Gn + 3	1/3 – 2/3	4/7 – 1/7 – 2/7	1/15 – 2/15 – 4/15 – 8/15

sées, on parle de croisement rotatif. Le **tableau 1** présente le génotype des produits, qui diffère à chaque génération (on ne tend donc jamais vers l'équilibre). La race du père utilisé en dernier est la race qui contribue le plus, à hauteur de 67, 57, et 53 % dans les croisements entre 2, 3, et 4 races, respectivement. Le génotype de chaque animal est composé pour la partie paternelle de la dernière race utilisée, et, pour la partie maternelle, d'un patchwork du génome des races utilisées lors des générations précédentes de croisement, celle du père étant d'autant plus faiblement représentée que le nombre de races utilisées dans le croisement est élevé. Cette situation assure une hétérozygotie maximale du génome et donc une composante d'hétérosis maximale.

L'absence d'indexation pour les individus issus de croisement est un frein au développement de cette pratique. Cette indexation n'est possible que si l'on évalue les écarts génétiques existant entre les races utilisées pour le croisement et si on estime les effets d'hétérosis des individus issus de croisement. Or le type, le nombre et le sens de rotation (race du père et race de la mère) des races impliquées dans le croisement est très variable. Il est

donc important de comprendre les différents modèles d'évaluation génétique mis en place dans les études sur le croisement pour pouvoir analyser les résultats obtenus. La première partie de l'article a pour objectif d'expliquer les mécanismes génétiques, en lien avec les modèles d'évaluation génétiques utilisés, et biologiques à l'échelle des individus qui sont à l'origine des écarts de performances observés entre des individus de race pure et des individus issus de croisement.

Il est important de noter qu'un troupeau de vaches laitières est composé d'individus de plusieurs générations successives. Dans un troupeau constitué de vaches issues de croisement, le génotype des vaches de générations successives est donc très différent. Chaque individu et chaque génération exprimant des effets génétiques additifs et non-additifs variables, il est important de quantifier les conséquences zootechniques et économiques de l'introduction du croisement à l'échelle d'un troupeau laitier. Les deuxièmes et troisièmes parties de l'article ont pour objectif de faire le point sur l'utilisation du croisement en France ainsi que sur l'intérêt technico-économique d'introduire du croisement laitier en fonction de la situation initiale de l'atelier laitier

en termes de performances de production, de reproduction et de santé.

1. Les atouts du croisement entre races laitières

■ 1.1. Bénéficiaire de la complémentarité entre les races bovines laitières

L'existence d'un grand nombre de races bovines laitières présentant des performances variables sur de multiples caractères de production et fonctionnels permet d'envisager des gains par complémentarité d'aptitudes *via* le croisement entre deux ou trois de ces races. La partie génétique de la performance d'un animal croisé dépend de trois composantes distinctes : la contribution additive moyenne de chacune des races constitutives ; la valeur génétique additive individuelle intra race ; l'effet spécifique du croisement. Prédire la valeur d'un animal revient donc à prédire ces trois composantes. Il convient de noter que si les valeurs additives raciales et individuelles se transmettent du parent au produit de façon simple, l'effet du croisement sur l'hétérosis dépend de la composition raciale du croisement. Les effets génétiques du croisement vont donc dépendre de la valeur intrinsèque de chaque parent et du type de croisement réalisé.

a. Estimer les effets génétiques additifs du croisement entre races

La valeur additive moyenne d'un individu issu de croisement correspond à la somme des valeurs de chaque race, pondérées par leur proportion respective dans son génotype (Willham et Pollak, 1985 ; Bidanel, 1992 ; Swan et Kinghorn, 1992). Cette valeur additive dépend des races impliquées dans le croisement. Pour estimer la valeur génétique additive d'un croisement, il faut donc estimer les effets de chaque race qui contribuent à des proportions différentes à la performance des individus issus de croisement. Ces effets peuvent être estimés par régression linéaire à l'aide d'un modèle du type (Wall *et al.*, 2005 ; Dechow *et al.*, 2007 ; De Haas *et al.*, 2013) :

$$y_j = \mu + \sum \text{effets fixes} + \sum c_{ij} r_i + e_j \quad [1]$$

Avec
 y_j la performance de la vache j ,
 \sum effets fixes les effets non-génétiques propres au caractère évalué (troupeau, année, rang de vêlage, saison...),
 $\sum c_{ij} r_i$ la composante de la valeur additive de la vache issue de croisement j ,
 c_{ij} la proportion estimée de gènes de la race pure i dans le génotype croisé,
 r_i est la moyenne des effets additifs de la race i ,
 e_j l'effet résiduel du modèle.

En cas de données répétées (par vache, par famille de père...), le modèle peut également inclure des effets aléatoires (environnement permanent de la vache p_j , famille de père) pour prendre en compte la structure des données. Toutefois, ce type de modèle n'inclut pas la valeur génétique de l'animal lui-même intra race et suppose donc que les animaux sont représentatifs de leur race et qu'il n'y a pas d'évolution génétique au cours du temps. Il ne prend donc pas en compte la valeur génétique intra-race des reproducteurs choisis. Ce type de modèle est donc insuffisant pour évaluer la valeur génétique de chaque individu issu de croisement.

Les généticiens privilégient plutôt des modèles reflétant la structure réelle des populations (par exemple, la structuration familiale et le processus de sélection au cours du temps) en ajoutant la valeur génétique a_j intra race comme effet aléatoire dans le modèle. La structuration des données est prise en compte par l'intermédiaire de la matrice de parenté \mathbf{A} entre individus, la distribution des valeurs génétiques étant supposée connue : $a \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{A} \sigma_a^2)$. Le modèle est alors :

$$y_j = \mu + \sum \text{effets fixes} + \sum c_{ij} r_i + a_j + e_j \quad [2]$$

Avec
 y_j la performance de la vache j ,
 μ la moyenne des performances de la population de référence choisie,
 \sum effets fixes les effets non-génétiques propres au caractère évalué (troupeau, année, rang de vêlage, saison...),
 $\sum c_{ij} r_i$ la composante de la valeur additive de la vache issue de croisement j ,
 c_{ij} la proportion estimée de gènes de la race pure i dans le génotype croisé,

r_i est la moyenne des effets additifs de la race i ,
 a_j la valeur génétique intra-race de la vache j ,
 e_j l'effet résiduel du modèle.

Cette approche est préférable à la précédente car elle fournit des estimations non biaisées des différences entre races, et on en déduit la valeur génétique additive de chaque individu de la façon suivante :

$$\hat{g}_j = \sum c_{ij} \hat{r}_i + \hat{a}_j.$$

Pour des raisons calculatoires, les généticiens utilisent souvent le modèle équivalent de Quaas (1988) qui intègre les différences entre races dans les valeurs génétiques estimées \mathbf{g} , dont la distribution *a priori* est $\mathbf{g} \sim N(\mathbf{C}\mathbf{r}, \mathbf{A} \sigma_a^2)$, avec \mathbf{C} la matrice reflétant la composition raciale des individus (VanRaden *et al.*, 2007 ; Dezetter *et al.*, 2015).

Le modèle s'écrit alors :

$$y_j = \mu + \sum \text{effets fixes} + g_j + e_j \quad [3]$$

Il est important de noter que les modèles [2] et [3] sont équivalents et fournissent donc les mêmes estimations de \mathbf{g} , valeurs génétiques additives dans un contexte multiracial et en croisement.

b. Des écarts d'origine génétique entre les races permettant un gain par complémentarité

La race Holstein est supérieure pour les caractères de quantités de lait, de matière grasse et de matière protéique aux races Jersiaise, Brune, Rouge danoise, Montbéliarde et Normande (VanRaden *et al.*, 2007 ; Norberg *et al.*, 2014 ; Dezetter *et al.*, 2015). Ces races sont quant à elles génétiquement supérieures pour les caractères de fertilité. Concernant le score en cellules somatiques, les races Brune, Rouge danoise et Montbéliarde sont génétiquement moins susceptibles et les races Normande et Jersiaise plus susceptibles que la race Holstein. Ces écarts entre races laissent présager d'une bonne complémentarité entre elles. Des écarts génétiques additifs de 950 kg de lait (lactations de 305 j

en équivalent adulte) et de - 12 points de taux de conception ont été estimés par Dezetter *et al.* (2015) entre les races Prim'Holstein et Montbéliarde. Selon l'équation 1, la valeur génétique additive moyenne des vaches F1 issues de ce croisement serait donc supérieure de 475 kg de lait et inférieure de 6 points de taux de conception à celle de vaches de race pure Montbéliarde. Les vaches F1 maintiennent donc un niveau de production de lait supérieur à la Montbéliarde tout en ayant un potentiel génétique de reproduction nettement supérieur à celui la Prim'Holstein.

Il est difficile d'avoir une vision globale des écarts génétiques entre races sur tous les caractères. En effet, en France, les races sont évaluées séparément avec une base de référence pour le calcul des index propre à chaque race. Il n'est donc pas possible d'estimer l'écart génétique entre races française en faisant la différence des moyennes génétiques. Il faudrait mettre en place un modèle d'évaluation génétique multiraciale. Ces modèles sont utilisés en routine aux États-Unis (Olson *et al.*, 2012) et en Nouvelle Zélande (Harris et Johnson, 2010), avec prise en compte ou non des individus issus de croisement. Dans ces pays où l'évaluation génétique est multiraciale, la définition des caractères peut être différente de celle retenue en France. Par exemple, en Nouvelle Zélande, le caractère de fertilité correspond à la proportion de vaches qui vêlent dans les 42 premiers jours de la période de vêlage (Dairy NZ, 2009), alors qu'en France, l'index de fertilité est un caractère binaire qui correspond à la réussite ou non à chacune des trois IA suivant le vêlage. Il faut également noter que dans ces pays, les races évaluées, en particulier la Jersiaise, ne sont pas ou peu représentées sur le territoire français.

Les modèles décrits dans cette partie permettent d'estimer les différences génétiques entre races pour les caractères d'intérêt et donc de favoriser les croisements qui sont les plus complémentaires. Ils permettent également, dans un schéma de croisement utilisant des taureaux de race pure, de prendre en compte les écarts génétiques existant entre reproducteurs intra-race.

En revanche, ils sont incomplets car ils ne prennent pas en compte les effets génétiques non-additifs qui sont maximisés par le croisement.

■ 1.2. Exploiter les effets génétiques non-additifs

a. Estimer les effets génétiques non-additifs du croisement entre races

On définit l'effet d'hétérosis comme la différence entre la performance moyenne de la population issue du croisement de première génération et la performance moyenne des deux populations parentales (Shull, 1948 ; Bidanel, 1992). Cet écart de performances, souvent favorable, s'explique essentiellement par des effets non additifs de dominance et/ou d'épistasie. Les effets de dominance sont générés par des interactions génétiques intra-locus, tandis que les effets épistatiques sont causés par des interactions entre loci. De manière générale, les effets de dominance représentent la part la plus importante des interactions (Swan and Kinghorn, 1992). Si la majorité des loci agissant sur les caractères ont un déterminisme dominant (donc non strictement additif), alors l'animal croisé qui maximise le taux d'hétérozygotie maximise aussi le nombre de loci aux effets favorables par rapport aux races le constituant.

Les races pures ayant été sélectionnées pendant un temps long, elles ont accumulé et maintenu des interactions favorables entre certains gènes. Les effets épistatiques en race pure sont donc favorables à l'expression du caractère dans le milieu de sélection (figure 1). Comme il s'agit d'une composante raciale, les effets épistatiques détruits lors de la recombinaison méiotique sont immédiatement reconstitués lors d'un accouplement intra race. À l'inverse, lors d'un accouplement impliquant un individu croisé, ces interactions positives détruites par la recombinaison méiotique ne sont que partiellement reconstituées (uniquement entre gènes hérités de la même race). Cette perte, dite « effet de recombinaison épistatique », se traduit par une diminution de la performance observée par rapport à

la performance attendue en ne tenant compte que des effets additifs et de dominance. La figure 1 représente les effets de dominance et d'épistasie pour deux races homozygotes au niveau de deux loci indépendants. L'effet d'hétérosis maximal est exprimé par les vaches F1 pour lesquelles les deux copies de chaque locus ont des origines raciales différentes. En moyenne, les vaches issues d'un croisement en retour, dont la composition raciale est $\frac{3}{4}$ de la race A et $\frac{1}{4}$ de la race B, n'expriment plus que 50 % de l'effet d'hétérosis observé chez les vaches F1, et vont exprimer 25 % de pertes par recombinaison suite à la rupture d'interactions favorables entre les deux loci.

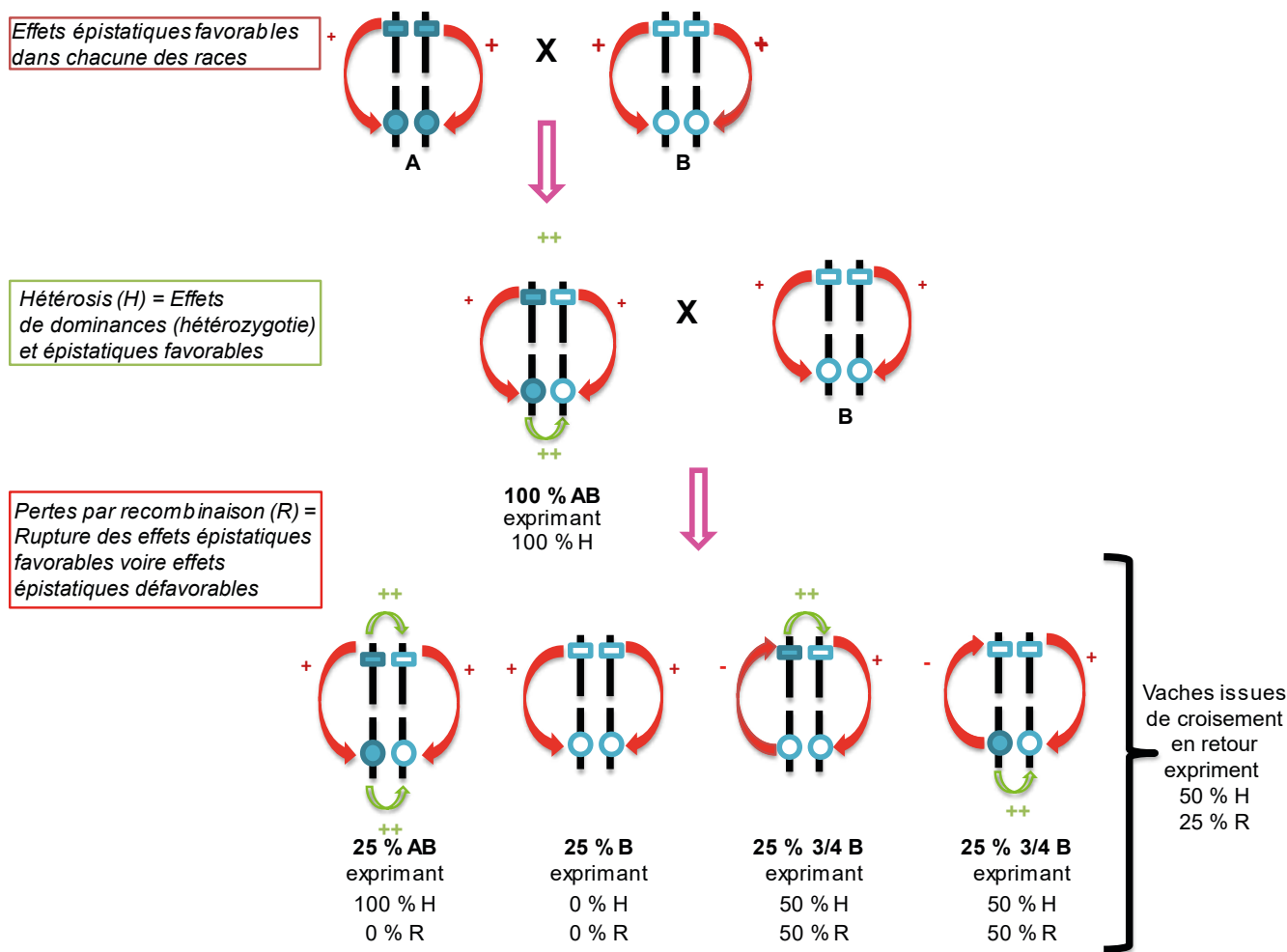
Par conséquent, on définit des coefficients d'expression de la fraction de l'hétérosis (H) et de pertes par recombinaison (R) exprimée par chaque vache de la façon suivante (Dechow *et al.*, 2007) :

$$H = 1 - \sum s_i d_i \text{ et } R = 1 - \frac{\sum (s_i^2 + d_i^2)}{2} \quad [4]$$

Avec
 s_i les proportions de gènes de la race i du père,
 d_i les proportions de gènes de la race i de la mère de la vache considérée.

Sous l'hypothèse du modèle de dominance, les programmes de croisement alternatifs (Bidanel, 1992) permettent de bénéficier de 67 % (selon l'équation 4) de l'hétérosis exprimé par les vaches issues de croisement de première génération (F1). Les programmes de croisement rotatifs entre 3 races bénéficient quant à eux de 86 % de l'hétérosis exprimé par les F1. L'inclusion d'une 4^e race permettrait de bénéficier de 93 % de cet hétérosis. En revanche, cela compliquerait grandement la gestion des accouplements, allongerait encore le cycle et le faible gain sur le maintien de l'hétérosis ne serait intéressant que si la 4^e race est du même niveau génétique pour l'ISU que les 3 autres races choisies (Sørensen *et al.*, 2008). En effet, la complémentarité entre les races et les caractères à améliorer sur les animaux du troupeau initial sont à prendre en considération dans le choix des races utilisées en croisement (Sørensen *et al.*, 2008).

Figure 1. Schéma explicatif de la théorie de l'expression des effets non-additifs pour deux loci indépendants.



Les caractères d'intérêt en production laitière dépendant d'un grand nombre de loci, la décomposition des effets non-additifs s'avère vite complexe. Par conséquent, les estimations des paramètres génétiques liés au croisement s'arrêtent souvent à l'effet d'hétérosis exprimé par les F1. Quelques études ont également estimé des effets globaux de pertes par recombinaison en utilisant des modèles de régression multiple (Wall *et al.*, 2005 ; Dechow *et al.*, 2007 ; VanRaden *et al.*, 2007 ; Dezetter *et al.*, 2015). Les modèles [1'] (sans valeur génétique additive individuelle) et [3'] (avec valeur génétique individuelle) introduisent donc, en plus des effets d'environnement et des effets génétiques additifs, des effets génétiques non additifs, hétérosis et pertes de recombinaison épistatiques, modélisés par régression :

$$y_j = \mu + \Sigma \text{ effets fixes} + \Sigma c_{ij}r_i + \beta_2 \times H + \beta_3 \times R + e_j \quad [1']$$

$$y_j = \mu + \Sigma \text{ effets fixes} + g_j + p_j + \beta_2 \times H + \beta_3 \times R + e_j \quad [3']$$

Avec
 y_j la performance de la vache j ,
 μ la moyenne des performances de la population de référence choisie,
 Σ effets fixes les effets non-génétiques propres au caractère évalué (troupeau, année, rang de vêlage, saison...),
 $\Sigma c_{ij}r_i$ la composante de la valeur additive de la vache issue de croisement j ,
 c_{ij} la proportion estimée de gènes de la race pure i dans le génotype croisé,
 r_i est la moyenne des effets additifs de la race i ,
 g_j l'estimation de la valeur génétique de la vache j ,
 p_j l'effet d'environnement permanent de la vache j ,
 β_2 le coefficient de régression sur l'effet d'hétérosis (H),
 β_3 le coefficient de régression sur l'effet des pertes par recombinaison (R),

e_j l'effet résiduel du modèle.

Il faut cependant noter que lorsque les estimations sont réalisées à partir des bases de données nationales, elles sont sujettes au choix des éleveurs et pourraient donc être biaisées par des accouplements non aléatoires. Il convient donc d'être prudent dans l'interprétation de ces effets. À l'heure actuelle en France, les modèles d'évaluation inter-race et incluant les vaches issues de croisement ne sont développés que dans un cadre de recherche et non pour l'évaluation génétique en routine des individus. Le modèle d'évaluation génétique français considère chaque race indépendamment les unes des autres. Par conséquent les index des animaux évalués ne sont comparables qu'au sein de la même race et les individus issus de croisement n'ont pas d'index et ne rentrent pas dans le schéma de sélection.

b. Des effets d'hétérosis favorables et des pertes par recombinaison limitées

Une grande variabilité existe en fonction des races et du dispositif expérimental mis en place pour estimer ces effets génétiques liés au croisement. En règle générale, l'effet d'hétérosis pour un caractère est favorable et d'autant plus important que son héritabilité est faible et que les populations parentales sont génétiquement éloignées (Lynch et Walsh, 1998). Pour les caractères de production (quantités de lait, de matière grasse et de matière protéique), les effets d'hétérosis sont d'environ 5 à 6 % de la moyenne parentale, tandis qu'ils peuvent être supérieurs à 10 % pour les caractères fonctionnels tels que la fertilité. Les estimations d'effets d'hétérosis sur les caractères de santé sont très variables, pouvant être non significatives, défavorables ou favorables (tableau 2).

L'effet d'hétérosis d'un croisement entre deux races peut différer selon le sens du croisement, témoignant d'un effet maternel significatif (Ahlborn-Breier et Hohenboken, 1991 ; Jönsson, 2015). Les estimations des effets maternels sur les caractères laitiers en croisement avec la race Holstein sont assez variables : Robison *et al.* (1981) les estiment en faveur de la race Holstein tandis que Wolf *et al.* (2005) et Konstantinov *et al.* (2006) les estiment négatifs pour les croisements issus de mères Holstein. Il semblerait cependant que, pour les caractères de production, lorsque l'effet d'hétérosis est plus important pour un type de F1 (par exemple issu de mère Holstein et d'un père Rouge suédois), l'effet inverse est observé pour les caractères de fertilité. Ceci pourrait s'expliquer par des mécanismes épigénétiques (Singh *et al.*, 2011). Ainsi, les conditions d'élevage de la mère pourraient être responsables d'effets épigénétiques sur le fœtus se traduisant par une expression différente des effets d'hétérosis selon la race maternelle.

Le rang de lactation pourrait également avoir une influence sur l'effet d'hétérosis exprimé par les F1, mais les conclusions varient d'une étude à

l'autre. Pour les caractères de quantité de lait et de matière utile, VanRaden et Sanders (2003) et Jönsson (2015) ont estimé des effets d'hétérosis plus importants en 1^{re} lactation que pour les lactations suivantes. En revanche, les effets d'hétérosis estimés par Dechow *et al.* (2007) et Dezetter *et al.* (2015) augmentent avec le rang de lactation. Pour les caractères de fertilité, l'effet du rang de lactation sur les estimations d'hétérosis est moins marqué. Il existe cependant un biais important puisqu'un certain nombre d'animaux sont réformés dès la 1^{re} lactation suite à de mauvaises performances de production, de reproduction ou de santé.

Concernant les trois grandes races françaises, les effets d'hétérosis combinés aux écarts génétiques additifs entre races montrent que les vaches F1 issues du croisement entre Prim'Holstein et Montbéliarde ont un potentiel identique aux vaches de race pure Prim'Holstein pour la quantité de lait (figure 2). Grâce à un effet d'hétérosis relativement important, les vaches F1 issues du croisement entre Prim'Holstein et Normande n'expriment qu'un écart de - 500 kg sur leur potentiel laitier par rapport aux vaches Prim'Holstein. Pour les taux de matière utile, les effets d'hétérosis sont très faibles, voire négligeables, et seul l'écart génétique entre les races explique le meilleur potentiel des vaches F1 issues de croisement par rapport aux vaches Prim'Holstein. De même pour le Score Cellulaire du lait (SCS), l'effet d'hétérosis est négligeable et le potentiel génétique des vaches F1 dépend de l'écart génétique entre les races pures. En revanche, en combinant effet additif et effet d'hétérosis, les vaches F1 issues des croisements entre Prim'Holstein et Montbéliarde ou Prim'Holstein et Normande expriment un potentiel supérieur aux vaches Prim'Holstein de + 10 points de taux de conception.

Les pertes par recombinaison sur les animaux de 2^e génération de croisement sont majoritairement défavorables pour la quantité de lait (Wall *et al.*, 2005 ; Dechow *et al.*, 2007 ; De Haas *et al.*, 2013 ; Dezetter *et al.*, 2015). Pour les caractères de fertilité, Wall

et al. (2005) et De Haas *et al.* (2013) ont estimé des pertes par recombinaison favorables (ce ne sont donc pas des « pertes ») sur l'intervalle vêlage-vêlage, c'est-à-dire une réduction de l'intervalle vêlage-vêlage supplémentaire par rapport aux effets additifs et d'hétérosis. Le caractère intervalle vêlage-vêlage présente cependant l'inconvénient de ne prendre en considération que les performances des vaches ayant revêlé, les performances des vaches restées infertiles n'étant pas prises en compte. En revanche Dechow *et al.* (2007) et Dezetter *et al.* (2015) ont estimé des pertes par recombinaison défavorables sur l'intervalle vêlage - dernière insémination et le taux de conception, respectivement. Cumulées avec la perte progressive de l'expression des effets d'hétérosis, ces pertes viennent réduire la supériorité des individus issus de croisements avancés. En raison du nombre réduit d'individus issus de 2^e génération de croisement dans la population analysée, les estimations de ces pertes par recombinaison sont statistiquement non significatives. Il faut cependant garder en tête qu'elles existent et qu'elles contribuent sans doute à expliquer pourquoi les performances des individus issus de croisements de 2^e génération et plus sont inférieures à celles attendues.

■ 1.3. Conséquences sur les performances zootechniques des vaches

Les vaches de race Holstein ont toujours une production de lait supérieure aux vaches F1 (figure 3). Cet écart varie de 130 kg de lait à plus de 1 500 kg de lait sur des lactations de 305 jours. En revanche, les vaches issues de croisement ont en général de meilleurs taux de matière utile que les vaches de race Holstein (Auldist *et al.*, 2007 ; Waurich, 2007 (cité dans Freyer *et al.*, 2008) ; Fischer *et al.*, 2008 ; Walsh *et al.*, 2007 ; Vance *et al.*, 2013 ; Dezetter *et al.*, 2015 ; Hazel *et al.*, 2017). Cet écart est surtout en faveur des croisements avec la race Jersiaise (de + 0,3 à + 0,8 g/kg de TB et de + 0,15 à + 0,35 g/kg de TP) ou avec la race Normande (+ 0,2 g/kg de TB et de + 0,1 g/kg de TP). Il faut cependant prendre en compte que les croisements

Tableau 2. Hétérosis (en écart à la moyenne des parents) pour la production (lait, matière grasse (MG), matière protéique (MP)), la fertilité, la santé de la mamelle (Score en Cellules Somatique (SCS) et mammites), la longévité et la mortalité.

Auteurs	Nb vaches	% vaches croisées	Croisements ¹	Hétérosis (% par rapport à la moyenne des parents)				
				Lait	MP	Fertilité ²	SCS	Longévité ³
VanRaden et Sanders, 2003 ; VanRaden <i>et al.</i> , 2004	92 471	7,9 %	Divers	3,4	4,1	7,0 ^a	0,7	1,2 ^g
Wall <i>et al.</i> , 2005	408 847	< 25 %	FR	1,4		- 0,4 ^b - 1,3 ^c - 1,5 ^d		
Dechow <i>et al.</i> , 2007	6 439	13,6 %	BS	5,0	5,6	- 8,0 ^e	- 7,8	
Waurich, 2007 cité dans Freyer <i>et al.</i> , 2008	28 591	1,6 %	JE	6,3	6,7	- 4,6 ^d	1,6	2,4^h
Freyer <i>et al.</i> , 2008	NP	NP	BS	5,0	5,3	9,0 ^b		9,0 ⁱ
Begley <i>et al.</i> , 2010	3 316	19,9 %	FR	2,1	1,7		0,1	
			RN	2,1	3,0		- 0,2	
Lopez-Villalobos et Spelman, 2010	53 419	NP	JE	5,0	6,4		- 0,4	
Penasa <i>et al.</i> , 2010	416 640	18,3 %	FR	3,4	3,4	- 0,3 ^b		
			JE	6,9	7,5	- 0,5 ^b		
			MO	6,5	6,1	- 2,7 ^b		
Norberg <i>et al.</i> , 2014	56 242	44,8 %	RD		2,4	- 2,1 ^c	- 0,3	
			JE		4,7	- 3,8 ^c	- 0,7	
Dezetter <i>et al.</i> , 2015	52 902	13,3 %	MO	6,0	5,7	- 3,4 ^c 6,5 ^e	- 1,4	
	55 741	13,5 %	NO	6,1	5,6	- 6,7 ^c 4,5 ^e	- 1,1	
Jönsson, 2015 ⁴	2 676 286	5 %	SRB	1,6 à 3,7	1,3 à 3,5	- 0,5 à - 2,6 ^b - 0,1 à - 4,2 ^c - 2,1 à - 3,4 ^d	- 2,0 à 2,7	12,3 à 13 ^j 4,5 à 4,6 ^g
Clasen <i>et al.</i> , 2017	73 741	NP	RD, JE					- 0,7 à 1,2 ^k 4,1 à 5,7 ^l 6,2 à 8,5 ^m

Les hétérosis en gras sont des effets défavorables. NP = non précisé (certains effectifs n'étaient pas précisés dans les publications).

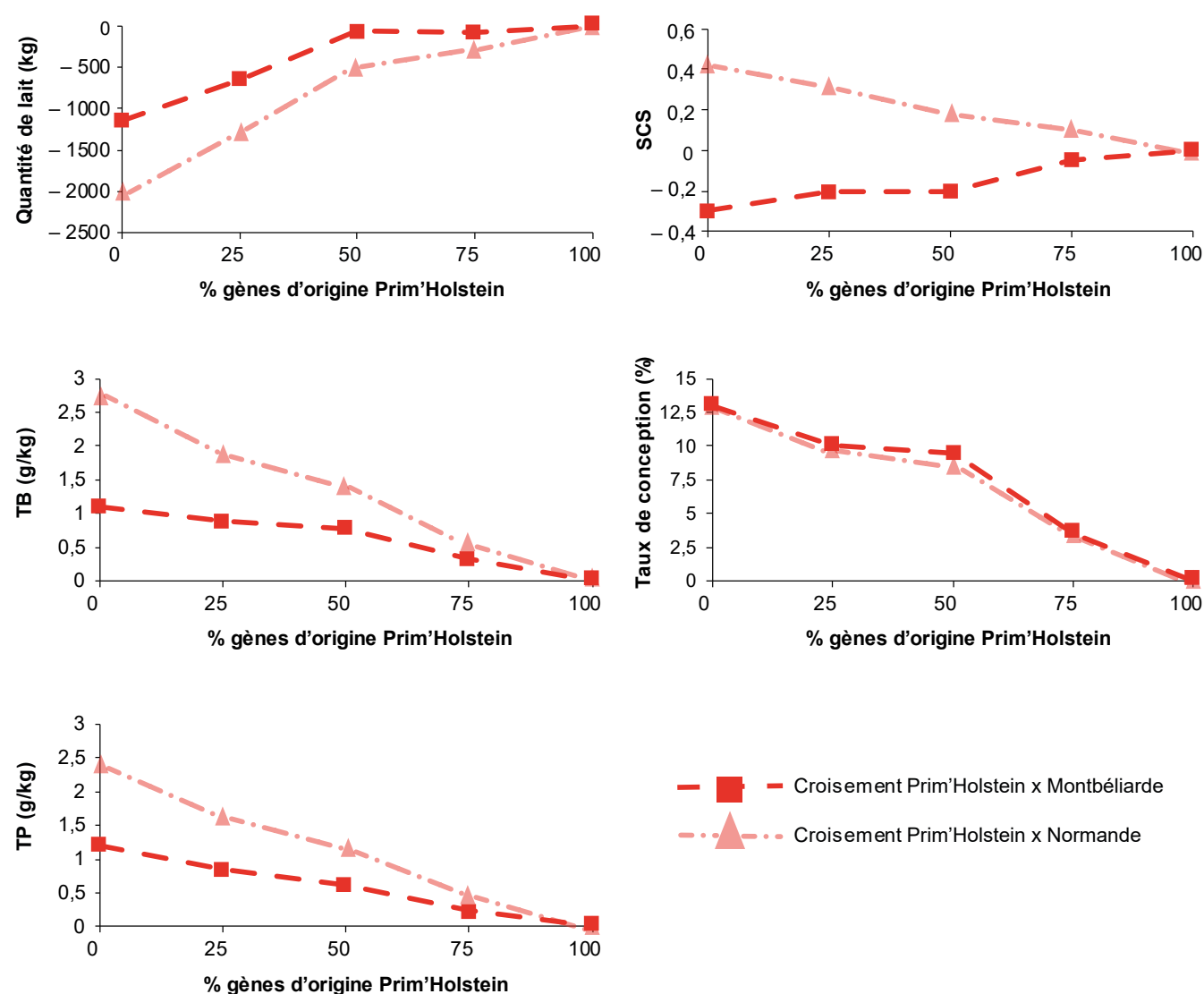
¹ Races utilisées en croisement avec la race Holstein : JE = Jersey, Divers = Plus de 4 races mises en jeu, FR = Frisonne, BS = Brune Suisse, RN = Rouge Norvégienne, MO = Montbéliarde, RD = Rouge Danoise, NO = Normande, SRB = Rouge suédoise.

² Les caractères de fertilité étudiés dans ces études sont : (a) le taux de gestation des filles, (b) l'intervalle vêlage-vêlage, (c) l'intervalle vêlage-1^{re} insémination, (d) Nombre d'inséminations, (e) Intervalle vêlage-insémination fécondante, (f) le taux de conception estimé sur les 3 premières IA.

³ La longévité est définie dans les études comme : (g) Taux de survie entre la 1^{re} et la 2^e lactation, (h) Taux de réforme en 1^{re} lactation, (i) Durée de la carrière de l'animal en nombre de lactation, (j) Pourcentage de vache ayant eu au moins 3 lactations, (k) Nombre de jours entre le premier vêlage et la fin de la 1^{re} lactation ou réforme (maximum 365 j), (l) Nombre de jours entre le 1^{er} vêlage et la fin de la 3^e lactation ou réforme (maximum 1 095 jours), (m) Nombre de jours entre le 1^{er} vêlage et la fin de la 5^e lactation ou réforme (maximum 1 825 jours).

⁴ Les estimations des effets d'hétérosis par Jönsson (2015) ont été effectuées selon le sens du croisement (mère Holstein suédoise et père Rouge suédoise ou mère rouge suédoise et père Holstein suédoise) et du rang de lactation (rang 1 à 3).

Figure 2. Potentiel génétique des vaches issues de croisement en écart aux vaches de race Prim'Holstein en fonction du % de gènes Prim'Holstein pour les croisements avec les races Montbéliarde et Normande, pour les caractères de production laitière (quantité de lait, taux de matière utile TB et TP), le score en cellules somatiques (SCS) et le taux de conception sur 3 inséminations.



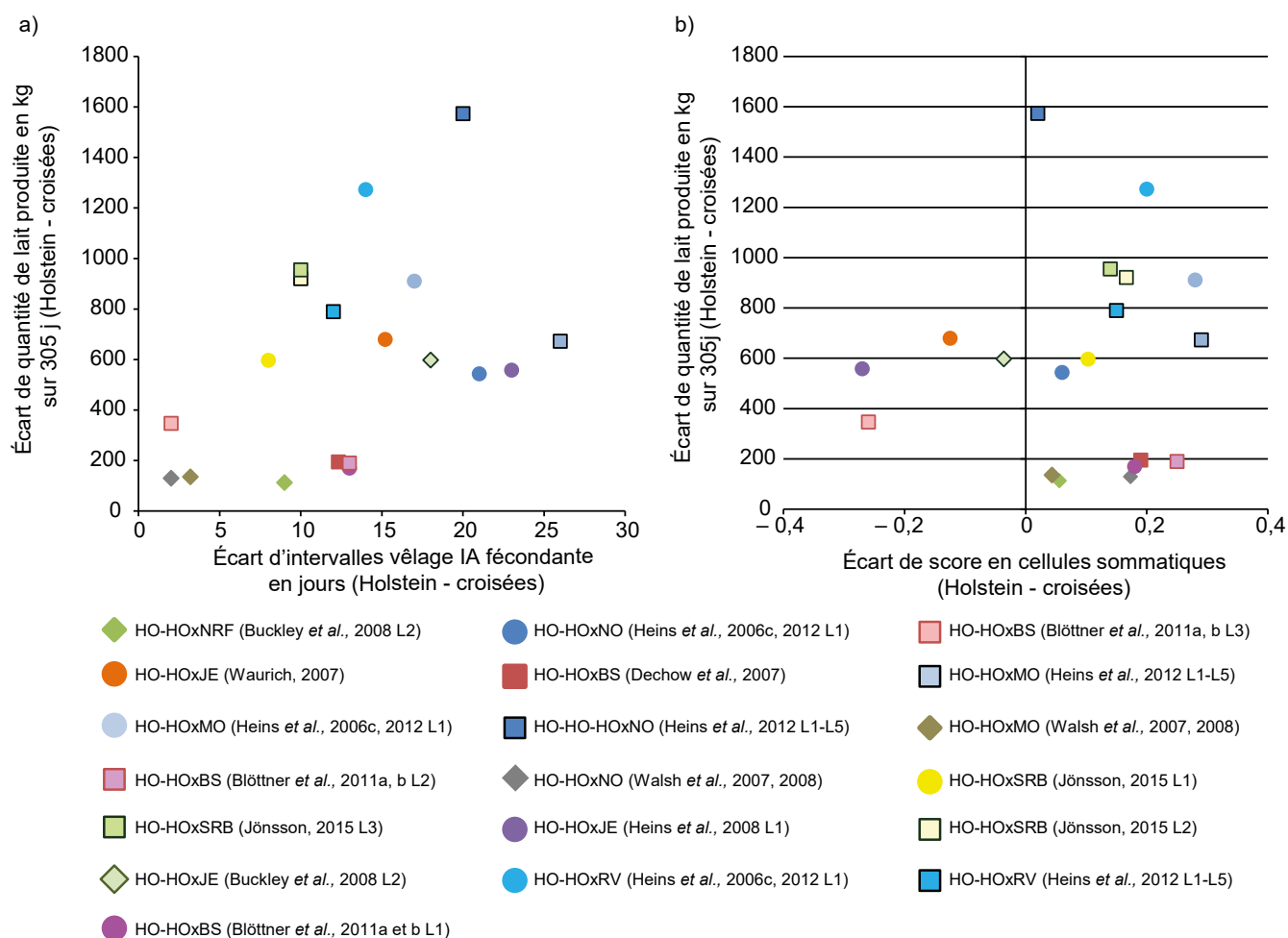
étudiés sont très variables d'une étude à l'autre, que les moyennes comparées ne sont pas toujours de même nature (brutes ou corrigées des autres effets), et que les performances comparées peuvent être des premières, des deuxièmes lactations, ou des lactations 1 à 3 confondues. Il est donc difficile d'estimer le risque de perte en lait à partir de la bibliographie pour un système d'élevage donné.

Les vaches F1 ont presque toujours démontré de meilleures performances de reproduction que les vaches Holstein dans la littérature (figure 3). L'intervalle vêlage – insémination fécondante a ainsi été plus

court de 2 à 27 jours pour les vaches issues de croisement par rapport aux vaches Holstein, la diminution étant supérieure à 20 jours pour la moitié des comparaisons rapportées par la bibliographie. Ceci s'accompagne d'un taux de conception en 1^{re} IA plus élevé pour les vaches F1 que pour les vaches de race Holstein (de + 8 à + 25 points ; Heins *et al.*, 2006b ; Auld *et al.*, 2007 ; Buckley *et al.*, 2008 ; Vance *et al.*, 2013). Les effets du croisement sur la santé (Brown *et al.*, 2012 ; Vance *et al.*, 2013 ; Rinell et Heringstad, 2018) et la longévité des vaches (Heins *et al.*, 2006b ; Heins *et al.*, 2012 ; Clasen *et al.*, 2017), ainsi que sur la mortalité des veaux (Heins *et al.*, 2006a ;

Olson *et al.*, 2009 ; Jönsson, 2015 ; Hazel *et al.*, 2017) ont été peu étudiés, excepté en ce qui concerne la santé de la mamelle. Cependant, celle-ci n'a été principalement caractérisée que par la mesure du SCS. Sur ce critère, les études ont rarement montré d'effet significatif en faveur du croisement (figure 3). Toutefois, le SCS n'est qu'un indicateur indirect de la sensibilité aux mammites cliniques (Rupp et Boichard, 2003). Dans les quelques études portant sur les mammites cliniques, l'incidence semble légèrement plus faible pour les vaches F1 mais cet écart est rarement significatif (Begley *et al.*, 2009 ; Prendiville *et al.*, 2010 ; Heins *et al.*, 2011). La probabilité de

Figure 3. Écarts de quantité de lait moyenne¹ en fonction de l'écart de l'intervalle vêlage-insémination fécondante moyen (a) et de l'écart de score en cellules somatiques moyen² (b) des vaches de race Holstein comparées aux vaches issues de croisement obtenus dans différentes études.



¹ Les quantités de lait moyennes présentées dans ce graphique sont des quantités de lait réelles pour 305 j ou des quantités de lait en équivalent adulte pour 305 j. Selon les études, les vaches considérées étaient en 1^{re} lactation (L1), en deuxième lactation (L2), en 3^e lactation (L3) ou plusieurs lactations confondues.

² Le score en cellules somatiques a été calculé dans les différentes études selon la formule suivante : Score en cellules somatiques = \log_2 (compte en cellules somatiques/100 000) + 3.

réforme en 1^{re} lactation est plus faible pour les vaches issues de croisement que pour les vaches de race Holstein et l'écart semble s'accroître avec l'avancement de la carrière. En dépit d'une productivité plus faible en quantité de matière, l'amélioration des caractères fonctionnels semble contribuer à l'allongement de la carrière des individus F1 par rapport aux individus de race Holstein.

Ces résultats sont issus d'études réalisées dans des conditions très différentes, ce qui pose le problème de la validité de leur comparaison afin d'en tirer des conclusions au niveau purement génétique. Les essais mis en place après les années 2000 ont été majoritairement réalisés dans des

conditions d'élevage variables, pour la moitié d'entre eux dans des exploitations laitières permettant des niveaux de production élevés, soit dans des exploitations laitières économes, très herbagères avec des vêlages groupés. Enfin, les études sont hétérogènes concernant les races utilisées dans les croisements avec la race Holstein et les indicateurs utilisés pour caractériser la production, la fertilité et la santé. De plus, dans la majorité des études présentées dans ce paragraphe, la comparaison entre les individus issus de croisement et les individus de races pures est uniquement phénotypique, sans possibilité d'identifier la part génétique additive et non-additive de celle liée à l'environnement expliquant les différences observées.

2. Place du croisement entre races bovines laitières dans le contexte français

À partir des données des inséminations artificielles et des données du contrôle laitier, des premiers éléments sur l'utilisation du croisement entre races laitières par les éleveurs français ont pu être mis en évidence (Bougouin et Le Mezec, 2010 ; Dezetter et al., 2013). De 2002 à 2012, période durant laquelle le croisement laitier était peu répandu, sur une population de 20 078 cheptels adhérents au contrôle laitier, disposant de plus de 30 vaches par troupeau dont plus de 80 % étaient inséminées (> 2/3 des vaches du troupeau de race Holstein

en 2002), les IA de croisement laitier n'ont représenté que 1,6 % ($n = 222\,497$) des IA totales ($n = 13\,859\,818$). Parmi les races laitières des taureaux utilisés pour inséminer les vaches Holstein en croisement, la race Montbéliarde était la plus représentée (43 %), suivie des races Normande et Brune (15 et 10 %, respectivement). Certaines races locales telles que la Vosgienne ou la Bretonne Pie-Noir ont été également bien représentées (9 % chacune), notamment en raison d'une meilleure réussite des IA. Les races Simmental Française et Pie-Rouge ont représenté respectivement 5 et 4 % des IA enregistrées sur les vaches Holstein avec une autre race laitière. Enfin, les autres races laitières, telles que l'Abondance, la Tarentaise, la Jersiaise, la Rouge Flamande ou des races étrangères étaient peu représentées. Ces inséminations en croisement sont majoritairement réalisées sur des vaches Holstein hautes productrices, ainsi que sur des vaches en 4^e lactation et plus et à partir de la 4^e IA après vêlage. Les IA en croisement sont également plus fréquentes dans les troupeaux de faible niveau de production laitière par vache, notamment pour la 1^{re} IA après vêlage. La taille du troupeau n'affecte pas la décision d'inséminer ou non en croisement.

À partir de ces bases de données, 305 troupeaux dans lesquels plus de 10 % des vaches Holstein ont été inséminées en croisement sur au moins 2 années après 2002 ont été identifiés. Dans 87 de ces troupeaux sur les 305, le croisement laitier a été utilisé comme une étape de transition pour changer de race. Dans des troupeaux (43), les éleveurs sont retournés à la race Holstein après 1, 2 ou 3 générations de croisement. Les déterminants de ce retour ne sont pas connus aujourd'hui et pourraient faire l'objet d'une étude ultérieure. Dans 124 troupeaux, nous n'avons pas été en mesure d'identifier une stratégie de croisement claire, soit parce que le croisement a été implanté récemment et nous ne savons pas ce qui sera fait des génisses qui en sont issues, soit parce que les races de taureaux utilisés pour inséminer les génisses et vaches F1 étaient très variées dans un même troupeau. Enfin, seuls 51 troupeaux ont clairement été identifiés comme ayant mis

en place une stratégie de croisement rotatif entre trois races, essentiellement entre les races Holstein, Montbéliarde et Brune ou Holstein, Montbéliarde et Rouge Scandinave.

Dans une autre étude (Beaumard, 2010), 79 éleveurs ont été enquêtés. Parmi eux, 75 éleveurs pratiquaient le croisement laitier en 2010, c'est-à-dire avaient plus de 10 % de leurs vaches issues de croisement, et 4 avaient pratiqué le croisement mais n'en faisaient plus en 2010. Environ 55 % des éleveurs faisaient du croisement d'absorption, 12 % avaient mis en place un schéma de croisement rotatif et 25 % avaient un schéma de croisement indéterminé. Les raisons invoquées pour la mise en place du croisement étaient la recherche d'animaux plus robustes (37 % des éleveurs), l'amélioration des caractères fonctionnels (32 % des éleveurs) et l'amélioration de la valorisation bouchère (35 % des éleveurs). Les systèmes de production de ces éleveurs ont été caractérisés en quatre classes différenciées essentiellement par la part de prairie dans la SFP et l'autonomie alimentaire. Cette étude a montré qu'il n'y a pas de lien entre le type de système de production et la stratégie de croisement mise en place. Ce qui signifie que le croisement rotatif a été mis en place aussi bien dans des systèmes très pâturants et à bas intrants que dans des systèmes peu pâturants et à fort intrants. Lors de cette enquête, la question du degré de satisfaction pour le croisement a été posée. Le niveau moyen de satisfaction des éleveurs était de 7,8/10 pour les vaches F1 et de 7,7/10 pour les vaches croisées de deuxième génération. Cependant, 24 % des éleveurs ont jugé ne pas avoir assez de recul sur les performances de leurs vaches pour pouvoir noter leur satisfaction. Une grande partie des éleveurs interrogés ont surtout mis en avant le manque d'information disponible et le regard négatif des conseillers sur le croisement à cette époque. Ces résultats se confirment avec l'étude de Basset (2016 ; cité dans Quénon, 2017), où 17 éleveurs pratiquant le croisement laitier ont été enquêtés. Trois groupes ont pu être identifiés avec des stratégies d'implantation du croisement

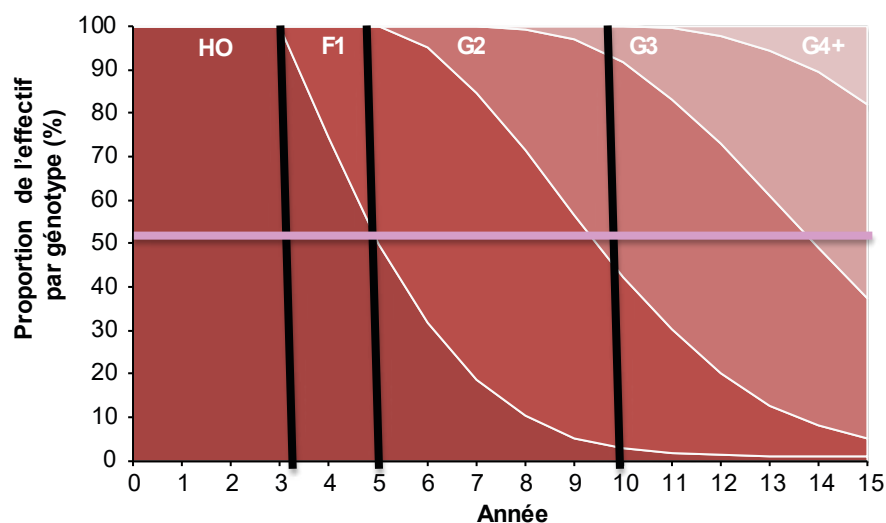
différentes, de la rupture avec l'ancien système pour passer rapidement à 100 % de vaches issues de croisement à une mise en place du croisement à la marge et selon un pilotage non stabilisé (Quénon *et al.*, 2018). Dans ce dernier groupe, le croisement ne constitue pas à long terme un levier stratégique d'intérêt ce qui peut conduire à l'arrêt de cette pratique et au retour à la race pure facilité par le peu d'animaux croisés présents dans le troupeau.

Ces différentes études montrent que l'introduction du croisement peut être choisie pour différentes raisons. Le croisement peut être mise en place pour résoudre des problèmes de fertilité ou de santé tout en maintenant un bon niveau de production laitière, sans forcément de remise en question du système de production. Il peut également être mis en place en lien fort avec un changement profond du système fourrager et de l'organisation du travail, souvent en direction de systèmes plus extensifs et à bas intrants. La suite de cette synthèse fait le point sur les intérêts technico-économiques d'introduire du croisement dans un troupeau initialement en race pure Prim'Holstein en fonction du système initial.

3. Intérêt technico-économique de l'introduction du croisement dans des ateliers laitiers français en race pure Prim'Holstein

Encore aujourd'hui, la plupart des études sur le croisement s'arrêtent à la comparaison entre les vaches de race pure et les vaches F1. Or l'introduction d'une stratégie de croisement continu ne peut pas s'arrêter à la première génération et a pour objectif de conserver des femelles croisées issues de différentes générations. Des études simulant l'introduction du croisement sur 100 % des vaches Holstein du troupeau ont montré que la proportion de vaches de race pure Prim'Holstein dans le troupeau ne diminuait qu'au bout de 3 ans avec l'hypothèse d'un âge au 1^{er} vêlage de 29 mois (figure 4). Cinq ans après

Figure 4. Résultats d'une simulation sur 15 ans montrant l'évolution de la composition raciale d'un troupeau suite à l'introduction d'une stratégie de croisement rotatif à 3 voies sur 100 % des femelles Prim'Holstein en année 1 : proportions de vaches de race pure Prim'Holstein (HO), issues de 1^{re} (F1), 2^e (G2), 3^e (G3) et 4^e génération et plus (G4+) de croisement.



les premières inséminations en croisement, le troupeau est constitué de 50 % de vaches de race pure Prim'Holstein et de 50 % de vaches F1. Après 10 ans, la composition du troupeau est 3 % de vaches Prim'Holstein, 40 % de vaches F1, 49 % de vaches de 2^e génération de croisement et 8 % de vaches de 3^e génération de croisement. Enfin, au bout de 15 ans, le troupeau se compose de 5 % de vaches F1, 32 % de vaches de 2^e génération de croisement, 44 % de vaches de 3^e génération de croisement et 18 % de vaches de 4^e génération et plus de croisement. Plusieurs générations de croisement sont donc contemporaines dans le troupeau et ont donc des caractéristiques génétiques et phénotypiques différentes. De plus, à partir de la 2^e génération de croisement, l'hétérogénéité entre les individus augmente en fonction des fractions de gènes transmis par le parent issu de croisement. Cette diversité s'observe premièrement au niveau de la morphologie des individus et peut avoir pour conséquence des difficultés à valoriser les produits issus du croisement en dehors de l'auto-renouvellement (Basset, 2016 ; cité dans Quénon, 2017), la gestion du logement (taille des logettes), la gestion de la traite (taille des manchons de la machine à traire), la gestion d'animaux avec des tempéraments différents pouvant entraîner de la compétition à l'auge par exemple, etc.

De plus, la gestion des accouplements peut s'avérer compliquée notamment en raison de l'absence d'index pour les vaches issues de croisement. Il est donc indispensable de quantifier les intérêts du croisement afin que les éleveurs français puissent estimer les intérêts technico-économiques de cette pratique dans leur système d'élevage.

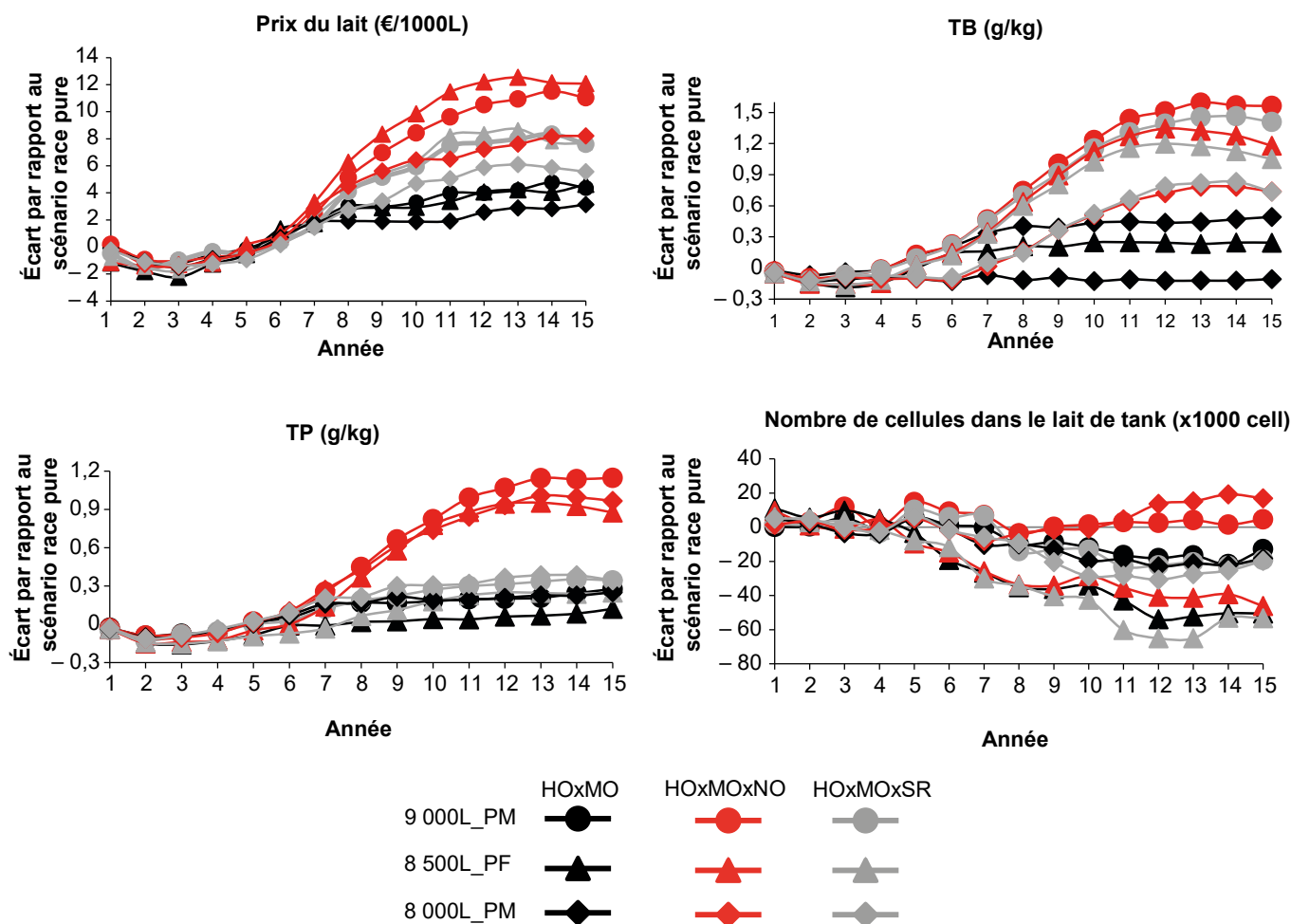
Nous avons à ce jour très peu de recul sur les performances technico-économiques des ateliers pratiquant le croisement laitier, que ce soit pendant la période de transition, où vaches de race pure et premières générations de croisées sont contemporaines, ou en régime de croisière. Afin d'objectiver l'intérêt technico-économique d'introduire du croisement laitier dans un troupeau initialement en race pure Prim'Holstein à court, moyen et long termes, les résultats travaux de simulation qui ont été menés au cours d'une thèse d'Université portant sur ce sujet sont présentés ci-dessous (Dezetter, 2015 ; après ces travaux Dezetter *et al.*, 2017). Les simulations ont été réalisées sur une période de 15 ans suivant la première année d'insémination en croisement des vaches Holstein. Le modèle dynamique individu-centré, mécaniste et stochastique utilisé dans cette étude a permis de prendre en compte les effets génétiques additifs et non-additifs sur les performances des animaux.

Trois schémas de croisement continu et rotatifs ont été simulés et évalués sur ces 15 années : Holstein x Montbéliarde (HOxMO), Holstein x Montbéliarde x Normande (HOxMOxNO) et Holstein x Montbéliarde x Rouge Scandinave (HOxMOxSR). Les effets de ces stratégies ont été étudiés dans trois ateliers différents : un atelier avec un niveau de production initial de 9 000 L/vache/an et une prévalence moyenne des troubles de la santé et de la reproduction (9 000 L_PM) ; un atelier avec un niveau de production initial de 8 500 L/vache/an et une prévalence forte des troubles de la santé et de la reproduction (8 500 L_PF) ; et un atelier avec un niveau de production initial de 8 000 L/vache/an et une prévalence moyenne des troubles de la santé et de la reproduction (8 000 L_PM). Les ateliers se composaient initialement de 120 vaches de race pure Prim'Holstein, cet effectif étant maintenu tout au long des 15 années de simulation. Pour les ateliers 9 000 L_PM et 8 500 L_PF, le choix des taureaux s'est fait parmi les 10 meilleurs taureaux sur l'index lait de 2013 dans chacune des races. Pour l'atelier 8 000 L_PM, le choix des taureaux s'est fait parmi les 10 meilleurs taureaux sur l'ISU de 2013 dans chacune des races. Le choix de ces ateliers reposait sur les hypothèses suivantes : i) le croisement est plus intéressant dans des troupeaux à faible niveau de productivité qu'à fort niveau de productivité et ii) à niveau de productivité élevée, le croisement est plus intéressant lorsque la prévalence des troubles de santé et de reproduction est forte. Lors de cette thèse, un quatrième atelier a été testé (niveau de production initial de 7 000 L en vêlages groupés) mais le modèle n'a pas très bien répondu sur la partie vêlages groupés. Ces résultats sont présentés dans le manuscrit de thèse mais n'ont pas été communiqués. L'intérêt du croisement pour des systèmes très extensifs et bas intrants sera discuté à part des résultats de simulations.

■ 3.1. Une valorisation monétaire du litre de lait essentiellement liée à une augmentation des taux de matière utile

Quel que soit l'atelier initial, le prix du lait est équivalent, voire légèrement

Figure 5. Écart de prix du lait, de Taux Butyreux (TB), de Taux Protéique (TP) et de nombre de cellules dans le lait de tank des scénarii en croisement¹ par rapport au scénario en race pure Prim'Holstein dans les différents ateliers laitiers².



¹ Stratégies d'accouplement : HO = race pure Holstein, HOxMO = croisement alternatif Holstein et Montbéliarde, HOxMOxNO = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Normande, HOxMOxRS = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Rouge Scandinave.

² 9 000 L_PM : atelier initial de 120 vaches avec un niveau de production initial de 9 000 L/vache/an et une prévalence moyenne des troubles de la santé et de la reproduction, 8 500 L_PF : atelier initial de 120 vaches avec un niveau de production initial de 8 500 L/vache/an et une prévalence forte des troubles de la santé et de la reproduction forte, 8 000 L_PM : atelier initial de 120 vaches avec un niveau de production initial de 8 000 L/vache/an et une prévalence moyenne des troubles de la santé et de la reproduction.

ment inférieur, sur les 5 premières années avec les stratégies d'accouplement en croisement par rapport à la race pure. Sur cette période, les vaches Prim'Holstein du troupeau initial sont encore majoritaires dans le troupeau (figure 5), le potentiel génétique est donc le même indépendamment de la stratégie d'accouplement (en race pure ou en croisement). Ce prix légèrement inférieur avec les stratégies d'accouplement en croisement s'explique par des niveaux de TB et de TP inférieurs à la race pure. En effet, dès la 1^{re} année, les vaches Prim'Holstein sont inséminées avec des semences de taureaux de race Montbéliarde. La réussite à l'IA étant meilleure qu'en race

pure, cela entraîne des lactations plus courtes, donc un stade de lactation moyen sur l'année moins élevé qu'en race pure et des taux de matière utile plus faibles.

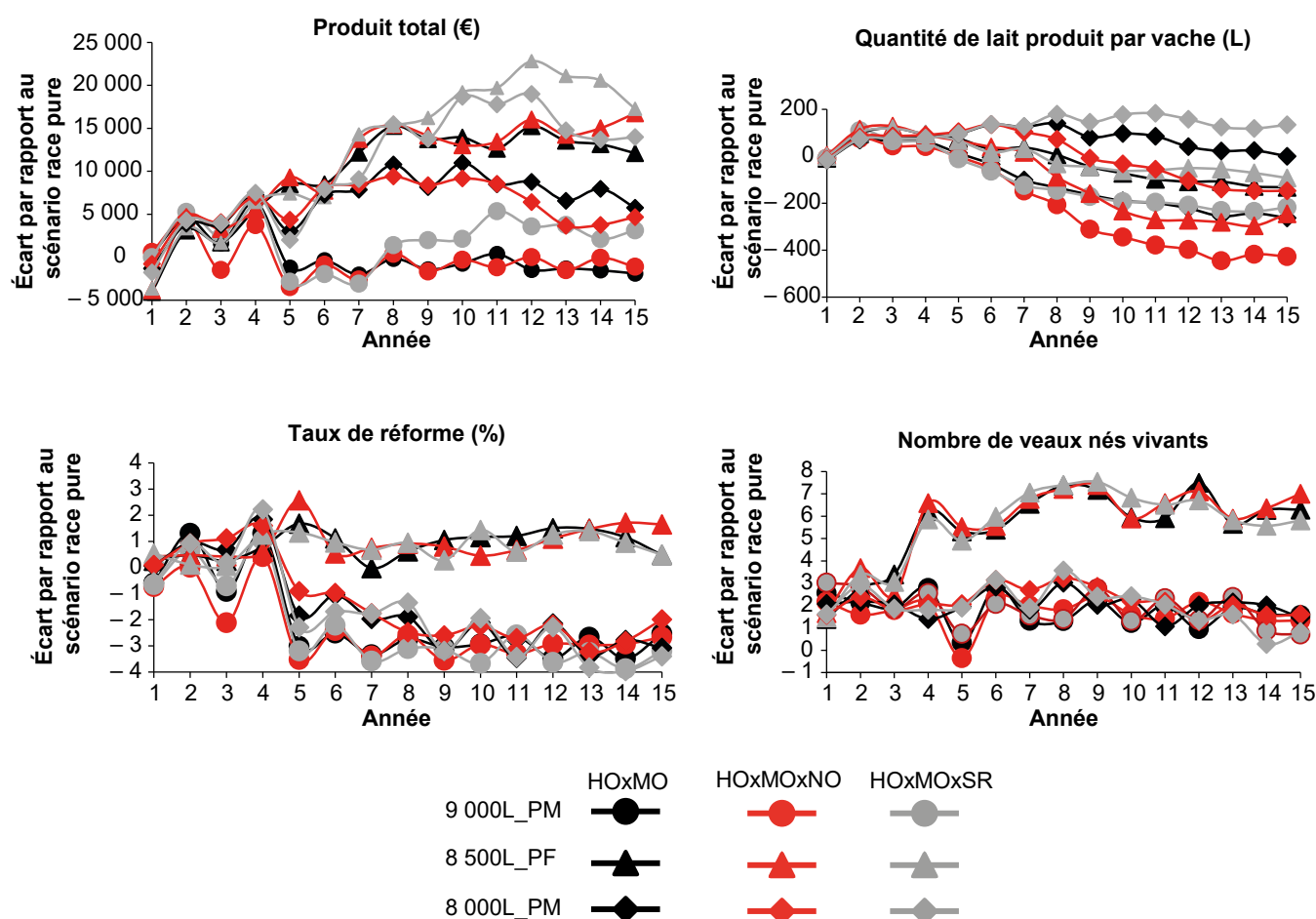
Après l'année 5, la valorisation du prix du lait est plus importante dans les ateliers 8 500 L_PF et 9 000 L_PM que dans l'atelier 8 000 L_PM. Ceci s'explique en partie par le choix de sélection des taureaux dans ces ateliers qui accentue les écarts additifs entre races pour les taux de matière utile. Une diminution du taux cellulaire du tank accompagnée d'une diminution des pénalités sur le prix du lait sont également observées dans l'atelier 8 500 L_PF. Cette

valorisation du prix du lait est particulièrement prononcée pour la stratégie d'accouplement HOxMOxNO.

■ 3.2. Une évolution des produits totaux de l'atelier très variable en fonction des situations initiales

Dans les ateliers 9 000 L_PM et 8 500 L_PF, la quantité de lait produit par vache et donc par atelier est plus faible avec les stratégies en croisement, surtout pour la stratégie HOxMOxNO. Dans l'atelier 9 000 L_PM, la plus-value aux 1 000 L de lait et du produit viande suite aux croisements avec des races

Figure 6. Écart de produit total, de quantité de lait produit par vache et par an, du taux de réforme et du nombre de veaux nés vivants des scénarii en croisement¹ par rapport au scénario en race pure Prim'Holstein dans les différents ateliers laitiers².



¹ Stratégies d'accouplement : HO = race pure Holstein, HOxMO = croisement alternatif Holstein et Montbéliarde, HOxMOxNO = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Normande, HOxMOxRS = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Rouge Scandinave.

² 9 000 L_PM : atelier initial de 120 vaches avec un niveau de production initial de 9 000 L/vache/an et une prévalence moyenne des troubles de la santé et de la reproduction, 8 500 L_PF : atelier initial de 120 vaches avec un niveau de production initial de 8 500 L/vache/an et une prévalence forte des troubles de la santé et de la reproduction forte, 8 000 L_PM : atelier initial de 120 vaches avec un niveau de production initial de 8 000 L/vache/an et une prévalence moyenne des troubles de la santé et de la reproduction.

mixtes (MO et NO) compense à peine la perte de volume produit à nombre de vaches identique. Dans l'atelier 8 500 L_PM, le produit total est plus important avec les stratégies en croisement en raison d'un produit viande plus important. Cette augmentation du produit viande s'explique à la fois par un prix des animaux plus élevé, par un niveau de réforme légèrement supérieur et par un nombre de veaux nés vivants supérieur. En revanche dans l'atelier 8 000 L_PM, les vaches issues des croisements HOxMO et HOxMOxSR produisent légèrement plus que les vaches de race pure Holstein. Ceci s'explique en partie par le choix de sélection des taureaux qui a conduit, pour la quantité de lait, à un écart génétique moindre entre les races, auquel s'ajoute l'effet d'hétérosis

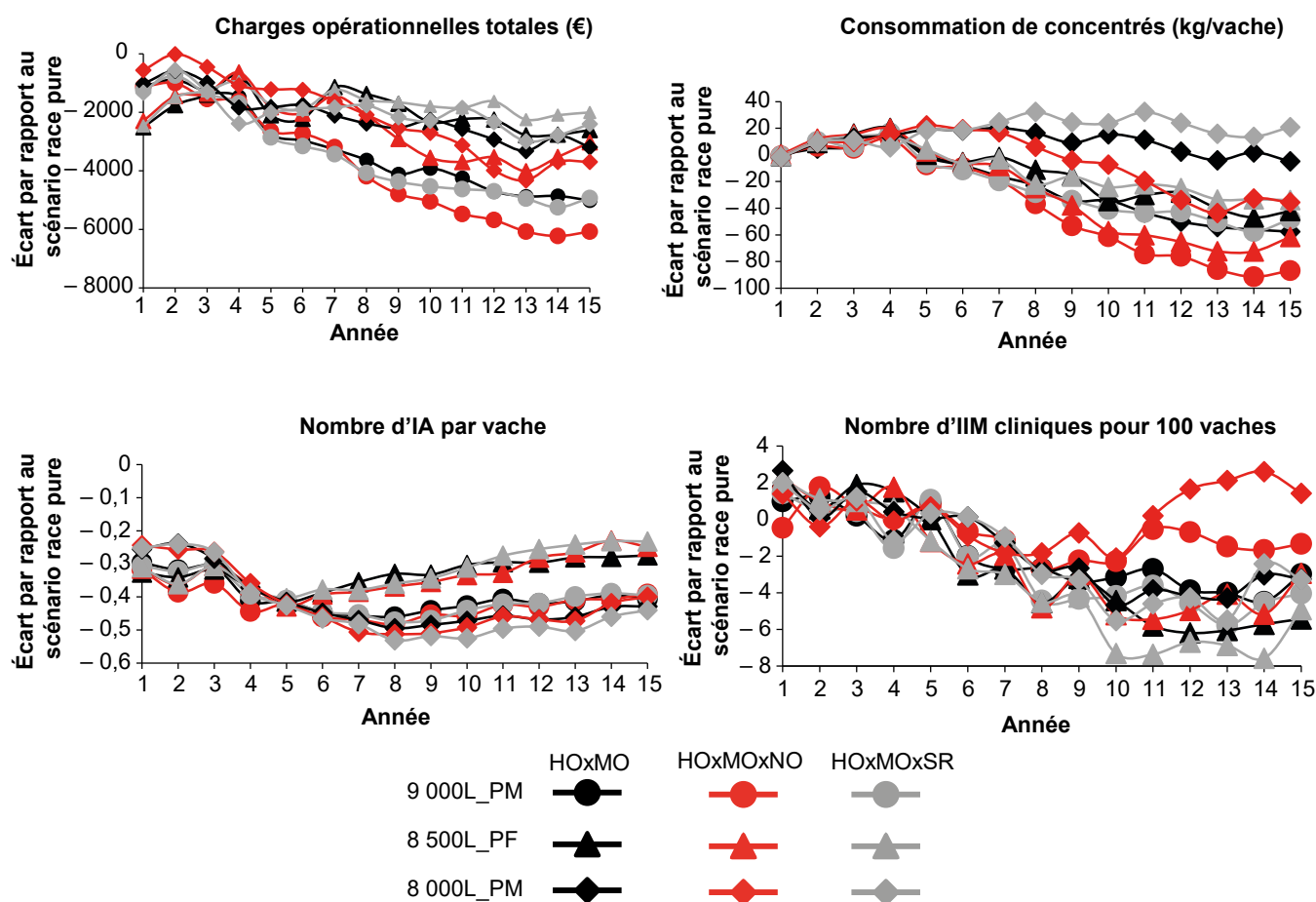
favorable sur ce caractère. Par conséquent, le produit total est supérieur avec les stratégies en croisement.

■ 3.3. Une diminution des charges opérationnelles expliquée par une amélioration des performances de reproduction et de santé

Dans tous les ateliers, les nombres d'IA et d'Infections Intra-Mammaires (IIM) cliniques sont plus faibles avec les stratégies en croisement, ce qui diminue les coûts de traitement. Ces écarts s'expliquent essentiellement par les effets génétiques additifs inter-races. La réussite à l'IA est bien meilleure avec les stratégies en croisement en

comparaison à la race pure, avec un écart de près de 10 points du taux de conception. Dans l'atelier 9 000 L_PM, à la diminution des coûts de traitement s'ajoute également une diminution des charges d'alimentation, la consommation de concentré par vache et par an étant plus faible avec les stratégies en croisement. En effet, les vaches de croisement et particulièrement pour la stratégie HOxMOxNO produisent moins de lait et consomment moins de concentrés. La même ration de base est distribuée à toutes les vaches indépendamment de leur génotype, du concentré de production étant ensuite ajouté en fonction de l'écart entre le volume de lait produit par la vache et le volume de lait permis par la ration de base. Cet écart étant plus faible pour les vaches

Figure 7. Écart de charges opérationnelles totales, de consommation de concentrés par vache par an, du nombre d'Inséminations Artificielles (IA) par vache et du nombre d'Infections Intra-Mammaires (IIM) cliniques pour 100 vaches des scénarii en croisement¹ par rapport au scénario en race pure Prim'Holstein dans les différents ateliers laitiers².



¹ Stratégies d'accouplement : HO = race pure Holstein, HOxMO = croisement alternatif Holstein et Montbéliarde, HOxMOxNO = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Normande, HOxMOxRS = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Rouge Scandinave.

² 9 000 L_PM : atelier initial de 120 vaches avec un niveau de production initial de 9 000 L/vache/an et une prévalence moyenne des troubles de la santé et de la reproduction, 8 500 L_PF : atelier initial de 120 vaches avec un niveau de production initial de 8 500 L/vache/an et une prévalence forte des troubles de la santé et de la reproduction, 8 000 L_PM : atelier initial de 120 vaches avec un niveau de production initial de 8 000 L/vache/an et une prévalence moyenne des troubles de la santé et de la reproduction.

issues de croisement, leur consommation de concentré de production diminue. Ceci suppose donc que l'efficacité alimentaire est identique pour toutes les vaches indépendamment de leur type génétique.

Une analyse de sensibilité a été effectuée sur le prix de base du lait et sur le prix des concentrés (Dezetter *et al.*, 2017). Dans un cas, le prix de base du lait a été diminué de 20 % tout en gardant la même plus-value sur les taux et le prix des concentrés a été augmenté de 20 % (contexte économique défavorable). Dans le deuxième cas, un contexte économique favorable a été testé, en augmentant de 20 % le prix du lait et en diminuant de 20 %

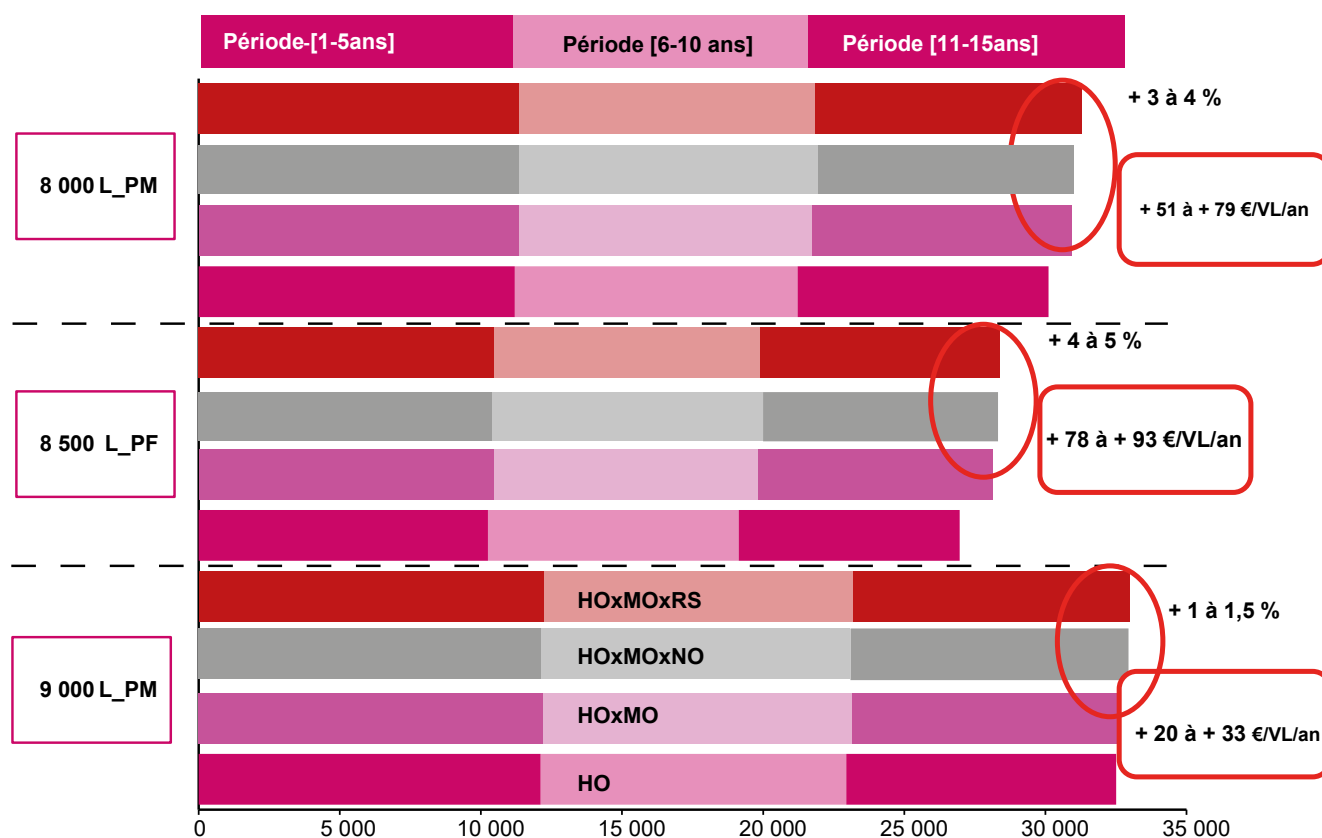
le prix des concentrés. Globalement les écarts de marge brute obtenue en valeur absolue entre les scénarios de croisement et les scénarios en race pure sont du même ordre de grandeur. En revanche, en valeur relative, ils sont plus importants en contexte défavorable que favorable puisque la marge brute du scénario en race pure est plus faible en contexte défavorable qu'en contexte favorable. Le poids économique de l'augmentation des grammes différentiels de TB et TP est plus important lorsque le prix de base du lait est faible, les scénarios en croisement qui améliorent ces taux de matières utiles s'en sortent économiquement mieux que les scénarios qui pénalisent ces taux de matières utiles.

■ 3.4. Une amélioration des performances technico-économiques plus ou moins importante en fonction des situations initiales

a. Intérêt du croisement dans des ateliers à haut potentiel de production et sans troubles majeurs de la reproduction et de la santé

Les résultats de la simulation montrent que la marge brute est relativement similaire entre les différentes stratégies d'accouplement (figure 8). Ceci s'explique essentiellement par une diminution du produit total lié à une diminution de la quantité de lait produit par vache et par an. En effet, en race pure, la sélection des

Figure 8. Marge brute (sans coût de fourrages) par vache laitière actualisée et cumulée sur les 15 années de simulations pour les quatre stratégies d'accouplement¹ et dans les trois ateliers laitiers initiaux².



Marge brute en euros par vache laitière actualisée et cumulée sur les trois périodes identifiées

¹ Stratégies d'accouplement : HO = race pure Holstein, HOxMO = croisement alternatif Holstein et Montbéliarde, HOxMOxRS = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Rouge Scandinave.

² 9 000 L_PM : atelier initial de 120 vaches avec un niveau de production initial de 9 000 L/vache/an et une prévalence moyenne des troubles de la santé et de la reproduction, 8 500 L_PF : atelier initial de 120 vaches avec un niveau de production initial de 8 500 L/vache/an et une prévalence forte des troubles de la santé et de la reproduction forte, 8 000 L_PM : atelier initial de 120 vaches avec un niveau de production initial de 8 000 L/vache/an et une prévalence moyenne des troubles de la santé et de la reproduction.

taureaux sur l'index lait couplé au progrès génétique espéré sur ce caractère a permis d'augmenter de plus de 800 L la quantité de lait produite par vache et par an. En tenant compte des écarts entre races, l'augmentation de la quantité de lait a été d'environ 500 L dans les scénarios en croisement. L'augmentation des taux de matière utile et l'amélioration des performances de reproduction et de santé n'ont pas permis de compenser économiquement le manque de volume de lait produit. Dans ces ateliers à haut niveau de production et sans troubles majeurs de santé et de reproduction, les vaches de race Holstein apparaissent bien adaptées. Il faut toutefois noter que le nombre d'interventions moyen par vache en année 15 de la simulation est de 6,1 dans le scénario en race pure Prim'Holstein et de 5,6 dans les scénarios en croisement. Dans le cas d'un troupeau

de 120 vaches, l'amélioration des performances de reproduction et de santé par le croisement permet de diminuer de 60 le nombre d'interventions par an. À raison d'¼ heure par intervention et d'une rémunération horaire d'1,5 SMIC, le gain économique serait de 225 € par an pour un troupeau de 120 vaches.

b. Intérêt du croisement dans des ateliers à haut potentiel de production mais avec une prévalence forte des troubles de la reproduction et de la santé

Dans ce type d'atelier, le potentiel des vaches du troupeau initial est identique à celui de l'atelier précédent. Cependant, la prévalence forte des troubles de la reproduction et de santé pénalise la production effective des

vaches. Dans ce cas, l'introduction du croisement a permis une augmentation de la marge brute cumulée et actualisée de + 1,5 % les 5 premières années, de + 5,4 % entre la 5^e et la 10^e année et de + 6 à + 8 % entre la 10^e et la 15^e année (figure 8). Cet écart de marge brute en faveur des scénarios en croisement s'explique par une nette amélioration des performances de santé et de reproduction qui réduit le manque de lait produit à terme par vache croisée par rapport aux vaches Holstein. Couplé à une augmentation des taux de matière utile, ceci permet d'observer une amélioration du produit total de l'atelier. De plus, le nombre d'interventions moyen par vache en année 15 de la simulation est de 7,1 dans le scénario en race pure Prim'Holstein et de 6,8 dans les scénarios en croisement. Cette diminution plus faible que dans l'atelier

précédent peut paraître surprenante. Elle s'explique par le fait que le stade de lactation moyen des troupeaux en croisement est de 10 j inférieur à celui du troupeau en race pure. Dans l'atelier précédent, la différence n'était que de 5 j. Par conséquent sur une année, le nombre de vaches vêlant et devant être de nouveau inséminées est plus important dans cet atelier que dans l'atelier précédent. Pour ces éleveurs visant un niveau de production élevé mais faisant face à une prévalence élevée des troubles de reproduction et de santé, l'introduction du croisement apparaît comme une solution très intéressante, notamment dans le cas où des verrous d'ordre structurel empêchent une remise en cause de la conduite.

c. Intérêt du croisement dans des ateliers à potentiel de production moyen et sans troubles majeurs de la reproduction et de la santé

Dans des ateliers de ce type, le potentiel des vaches du troupeau initial est plus faible sur le caractère quantité de lait mais plus élevé pour les caractères TB, TP, fertilité et santé de la mamelle. De plus les taureaux choisis pour les accouplements ont été sélectionnés sur l'index de synthèse global (l'ISU) aussi bien en race pure qu'en croisement. L'ISU en race Prim'Holstein accordant une place assez forte aux caractères fonctionnels (40 % pour la santé de la mamelle et la reproduction), le niveau génétique des taureaux Prim'Holstein sur ces caractères est plutôt élevé. Par conséquent, même en race pure, le nombre d'IA par vache et par an a diminué de 0,4 sur les 15 années de simulation. De même, les taux de matière utile dans le scénario en race pure restent relativement bons (autour de 40,4 g/kg de TB et 32,8 g/kg de TP sur les 15 années de simulations).

Dans cet atelier, l'introduction du croisement a permis une augmentation de la marge brute cumulée et actualisée de + 1,1 % les 5 premières années, de + 3,8 % entre la 5^e et la 10^e année et de + 3,0 à + 3,6 % entre la 10^e et la 15^e année (figure 8). Cet écart de marge brute en faveur des scénarios en croisement s'explique par une légère croissance du volume livré suite à l'augmentation de la quantité de lait

produit par vache et par an et par une amélioration des performances de reproduction et de santé de la mamelle. En revanche, l'amélioration des taux reste marginale surtout pour le scénario de croisement HOxMO. Dans cet atelier, le nombre d'interventions moyen par vache en année 15 de la simulation est de 6 dans le scénario en race pure Prim'Holstein et de 5,5 dans les scénarios en croisement.

d. Quel type de croisement introduire et dans quel atelier ?

Dans tous les ateliers, l'introduction du croisement a contribué à améliorer les performances de reproduction et ceci dès la première année. Pour la production laitière, dans l'atelier à potentiel de production moyen et sans troubles majeurs de la reproduction et de la santé, l'hétérosis a permis de compenser la perte de niveau génétique sur la quantité de lait introduite par le croisement avec des races moins productives que la Prim'Holstein. En revanche, dans des ateliers plus productifs, l'hétérosis n'a pas suffi à compenser, sur la durée, cette diminution du niveau génétique des vaches issues de croisement. Dans ces ateliers, en comparaison avec la stratégie en race pure Holstein, les stratégies en croisement alternatif HOxMO et en croisement rotatif HOxMOxRS ont entraîné les mêmes écarts sur la quantité de lait alors que dans l'atelier moins productif 8 000 L_{PM}, la stratégie HOxMOxRS a entraîné l'écart le plus important. L'apport de sang Holstein dès la 2^e génération de croisement a donc compensé la perte d'expression de l'hétérosis chez les vaches G2 pour le caractère de quantité de lait. Cependant, au niveau des performances économiques, quelques soient les systèmes initiaux, la stratégie d'accouplement HOxMOxRS a été la plus avantageuse par rapport à la stratégie d'accouplement en race pure Holstein.

Avec un effectif de vaches maintenu constant dans le temps, l'intérêt technico-économique de l'introduction du croisement a été d'autant plus intéressant que les troubles de reproduction et de santé du troupeau étaient importants, à conduite équivalente. Cet intérêt a aussi été d'autant plus fort que les objectifs de productivité laitière par

vache étaient plus faibles, c'est-à-dire en dessous de 9 000 L de lait produit par vache et par an. Les mêmes scénarios ont été testés mais cette fois-ci en maintenant le volume de lait livré constant et en permettant une évolution des effectifs. Pour cette stratégie, l'intérêt du croisement a été plus important avec des écarts de marge brute allant jusqu'à + 1 3 €/1 000 L/an. En dépit d'un nombre plus important de vaches dans les scénarios en croisement pour produire le même volume de lait, surtout dans les ateliers très productifs, l'augmentation des taux de matières utiles a été économiquement plus intéressante et a largement compensé l'augmentation des charges d'alimentation et de frais d'élevage.

■ 3.5. Intérêts technico-économiques du croisement dans des ateliers très extensifs

Nous ne pouvons recenser que très peu d'informations sur les performances technico-économiques du croisement dans les systèmes extensifs. En effet, le choix d'introduire du croisement dans ces systèmes est souvent lié à une remise en question du système initial et à une non-compatibilité de la Prim'Holstein présente initialement dans ces systèmes. La comparaison entre les deux types d'animaux est donc assez difficile car il est difficile d'objectiver ce qui est dû au changement de génétique et ce qui est dû au changement d'organisation du système. C'est le cas, par exemple, de l'étude portant sur 25 éleveurs suivis par la Chambre d'Agriculture de Bretagne (Pallier *et al.*, 2017). Les croisements ont débuté en 2010 sur tout ou partie du troupeau. Deux types de croisement rotatif sont privilégiés par ces éleveurs, le croisement Prim'Holstein x Jersiaise x Montbéliarde et le croisement Prim'Holstein x Rouge scandinave x Montbéliarde. En parallèle, le système de production a été profondément modifié avec une réduction de la part de maïs dans la SFP (8 % de la SFP) et de la complémentation (235 kg de concentrés par vache et par an). La majorité de ces exploitations se sont aujourd'hui converties à l'agriculture biologique. Les troupeaux de ces éleveurs ne sont pas encore en régime

de croisière. Cependant, des premiers résultats sur les F1 et les vaches de deuxième génération comparées aux vaches de race pure Prim'Holstein ont montré une très forte hétérogénéité des résultats entre vaches du même génotype. En termes de résultats économique, l'écart de marge brute de l'atelier lait entre 2010 (début de l'introduction du croisement) et 2016 (6 ans après l'introduction du croisement) est de + 44 €/1 000 L. Il faut cependant rester prudent sur l'interprétation de ces résultats car l'introduction du croisement a été concomitante à des changements de système et notamment à la conversion en agriculture biologique.

À l'international, des études néo-zélandaise (Lopez-Villalobos *et al.*, 2000b) et irlandaise (Prendiville *et al.*, 2011) présentent les résultats de modélisation de l'intérêt technico-économique du croisement Holstein x Jersiaise en comparaison à la race pure Holstein. Dans ces deux études, le croisement augmente la rentabilité de l'atelier avec une différence de 28 \$ néo-zélandais/vache/an de marge nette, dans la première étude, et une différence de 0,37 €/kg de lait dans la deuxième étude. Il faut toutefois noter que le contexte économique et les systèmes d'élevage de ces études sont différents de ceux observés en France, avec une conduite très intensive de l'herbe même si la conduite des animaux se rapprochent des systèmes d'élevage extensifs français. Cependant, ces résultats laissent présager d'un intérêt potentiel du croisement pour des systèmes d'élevage basés sur l'herbe et le pâturage et en vêlages groupés.

Conclusions et principales perspectives

À l'exception de la Nouvelle Zélande, le croisement entre races laitières est aujourd'hui une stratégie marginale dans la majorité des exploitations bovines laitières des pays développés, et c'est particulièrement le cas en France. D'après l'analyse des bases de données sur les inséminations, la majorité des éleveurs français ayant engagé des stratégies ou des essais d'opportunité de croisement entre races laitières

dans des troupeaux Holstein l'ont fait sur une faible proportion du troupeau et sur une durée souvent limitée. Ceci tend à indiquer des hésitations et des revirements fréquents. Cependant, le besoin de corriger la dégradation des caractères fonctionnels observée chez les vaches de race Holstein, tout comme la recherche de la meilleure valorisation du litre de lait, ainsi que la volonté d'un niveau accru de sécurisation du résultat économique de l'activité, soulèvent la question de l'intérêt de l'introduction d'une stratégie de croisement entre races laitières comme levier pour agir dans ces directions. Les évaluations génétiques des individus issus de croisement en comparaison aux animaux de race pure ont mis en évidence des effets d'hétérosis souvent significatifs et favorables, du moins pour la production laitière et la fertilité. Ces effets s'ajoutent à l'intérêt de la complémentarité d'aptitudes entre deux ou trois races.

En France, des travaux de modélisation-simulation ont notamment permis de documenter quantitativement et dans le temps les améliorations obtenues sur les taux de matière utile et la sur la fertilité et la santé de la mamelle. Ceci a ensuite permis d'évaluer l'impact des stratégies de croisement sur la marge brute par vache-année ou par 1 000 L de lait livrés dans différentes situations d'élevage. L'intérêt du croisement s'est révélé positif dans des ateliers de race Holstein avec une prévalence élevée des troubles de santé et de reproduction, mais également dans des ateliers avec une prévalence plus modérée de ces troubles et un niveau de production intermédiaire. Même si ces résultats ne sont pas totalement généralisables, compte tenu des choix faits sur les ateliers simulés, ils permettent tout d'abord de mettre en évidence que l'intérêt du croisement va dépendre du contexte de l'exploitation et des opportunités existantes. En effet, dans les résultats de simulation présentés dans ce papier, le nombre de vaches ou le volume livré est fixe sur les 15 ans. Dans le premier cas, l'introduction du croisement s'est accompagnée d'une diminution du volume livré et dans l'autre d'une augmentation de l'effectif. Or dans la réalité les éleveurs ajustent plus ou moins leur système d'exploitation et ont plus

ou moins de marge de manœuvre en fonction de la capacité de leur bâtiment, de la main d'œuvre disponible ou de la souplesse de leur contrat de livraison avec leur laiterie. Cette capacité à s'ajuster à des variabilités de production ou de taille du troupeau doit être prise en compte pour décider ou non d'introduire le croisement. Un autre exemple d'opportunité d'introduction du croisement pour les éleveurs est la possibilité de développer un atelier complémentaire d'engraissement de taurillons ou une activité de transformation fromagère. En effet, les valeurs bouchères des races Montbéliarde et Normande sont plus importantes que celle de la race Holstein, et les effets d'hétérosis sur la croissance et les caractéristiques de la carcasse pourraient être importants (Long, 1980 ; Williams *et al.*, 2010). De plus, les stratégies de croisement testées ont toutes les trois contribué à améliorer le TB et le TP. Enfin, il est important de rappeler que l'introduction du croisement n'est pas irréversible. En cas de non-satisfaction, un retour à un atelier en race pure Holstein ou autre, bien que prenant du temps, est toujours possible.

Le développement du croisement dans le paysage laitier français fait toutefois face à des freins majeurs. Le discours des entreprises de sélection aux éleveurs, même s'il a tendance à évoluer, était jusqu'à présent assez centré sur les scénarios d'élevage en race pure. De plus, l'organisation de l'élevage laitier français est très centrée sur la race pure avec des résultats du contrôle laitier par race, la reconnaissance des éleveurs lors des concours raciaux, l'existence de produits gastronomiques et d'AOC dont le cahier des charges impose certaines races pures, etc. Par ailleurs, les évaluations génétiques nationales (classiques ou génomiques) sont intra-race et ne sont pas directement comparables entre races. Elles ne prennent pas en compte les vaches issues de croisement et aucun index (classique ou génomique) n'est disponible pour les vaches issues de croisement. Les outils techniques proposés pour le conseil, en particulier les conseils d'accouplement, sont inadaptés pour le croisement. La composition raciale des vaches issues de croisement n'est pas fournie, ce qui est un obstacle supplémentaire

au calcul d'indicateurs intra troupeau. Aucun logiciel d'accouplement élaboré n'est proposé, permettant de suivre un objectif ou de compenser des défauts.

Le croisement entre races laitières apparaît donc plus comme un levier d'action pour mieux adapter ses animaux à son système d'exploitation avec la possibilité de faire évoluer rapidement et son système et la diversité des types génétiques dans la direction que l'on souhaite. Dans un contexte d'évolution de l'agriculture vers l'agroécologie, le croisement apparaît

comme un outil intéressant et adaptable à différents systèmes d'élevage car ne se focalisant pas uniquement sur un type génétique. Afin de mieux connaître et mieux adapter la stratégie de croisement à chaque système d'élevage, la recherche et les études pour produire de nouvelles références doivent se poursuivre.

Remerciements

Cette synthèse a été écrite suite à des travaux sur le croisement entre races

bovines laitières menés en collaboration avec l'UMR BIOEPAR-INRA-Oniris, l'Unité de recherche sur les systèmes d'élevages de l'ESA d'Angers et l'Entreprise PASS' à Roulans. Une partie de ces travaux ont été réalisés en collaboration avec l'UMR GABI INRA-AgroParisTech et le Département de génétique de l'IDEELE. Cette synthèse n'aurait pas pu avoir lieu sans le concours d'Henri Seegers. Sa confiance et son exigence ont été déterminantes au succès de ces travaux et de cette synthèse. Un grand merci, nous espérons que tu profites pleinement de ta retraite au calme et au soleil.

Références

- Ahlborn-Breier G., Hohenboken W.D., 1991. Additive and nonadditive genetic effects on milk production in dairy cattle: evidence for major individual heterosis. *J. Dairy Sci.*, 74, 592-602.
- Auldust M.J., Pyman M.F.S., Grainger C., Macmillan K.L., 2007. Comparative Reproductive Performance and Early Lactation Productivity of Jersey × Holstein Cows in Predominantly Holstein Herds in a Pasture-Based Dairying System. *J. Dairy Sci.*, 90, 4856-4862.
- Beumard D., 2010. Current trends of the crossbreeding use within French dairy farms. Mémoire de fin d'étude, ESA, Angers, France.
- Begley N., Buckley F., Pierce K.M., Fahey A.G., Mallard B.A., 2009. Differences in udder health and immune response traits of Holstein-Friesians, Norwegian Reds, and their crosses in second lactation. *J. Dairy Sci.*, 92, 749-757.
- Begley N., Buckley F., Pierce K., Evans R., 2010. Breed difference and heterosis estimates for milk production and udder health among Holstein, Friesian and Norwegian Red dairy cattle. *Adv. Anim. Biosc.*, 1, 341-341.
- Benoit M., Le Mezec P., 2016. Génomique, sexe, croisement : impacts sur la conduite du troupeau. 3^e édition de la conférence Grand Angle Lait, Paris, France. Accessible sur : <http://idele.fr/presse/publication/idelesolr/recommends/genomique-sexe-croisement-impact-sur-les-conduites-du-troupeau-laitier.html>
- Bidanel J.P., 1992. La gestion des populations: Comment exploiter la variabilité génétique entre races: du croisement simple à la souche synthétique. In : Numéro Hors-série, Éléments de génétique quantitative et application aux populations animales. Bibé B., Bonaïti B., Elsen J.M., Guérin G., Mallard J., Minvielle F., De Mondini L., Mulsant P., De Rochambeau H., Farce M.H., 1992. (Éds), INRA Prod. Anim., 249-254.
- Blöttner S., Heins B., Wensch-Dorendorf M., Hansen L., Swalve H., 2011a. Brown Swiss × Holstein crossbreds compared with pure Holsteins for calving traits, body weight, backfat thickness, fertility, and body measurements. *J. Dairy Sci.*, 94, 1058-1068.
- Blöttner S., Heins B., Wensch-Dorendorf M., Hansen L., Swalve H., 2011b. Short communication: A comparison between purebred Holstein and Brown Swiss × Holstein cows for milk production, somatic cell score, milking speed, and udder measurements in the first 3 lactations. *J. Dairy Sci.*, 94, 5212-5216.
- Bougouin M.H., Le Mezec P., 2010. Le croisement entre races laitières en France vu par les bases de données. *Renc. Rech. Rum.*, 17, 146.
- Brown K.L., Cassell B.G., McGilliard M.L., Hanigan M.D., Gwazdauskas F.C., 2012. Hormones, metabolites, and reproduction in Holsteins, Jerseys, and their crosses. *J. Dairy Sci.*, 95, 698-707.
- Buckley F., Begley N., Prendiville R., Evans R., Cromie A., 2008. Crossbreeding the dairy herd—a real alternative. *Irish Grassland Assoc. J.*, 42, 5-17.
- Clasen J.B., Norberg E., Madsen P., Pedersen J., Kargo M., 2017. Estimation of genetic parameters and heterosis for longevity in crossbred Danish dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 100, 6337-6342.
- Dairy NZ, 2009. Your index your animal evaluation system second edition. Accessible sur : https://www.dairynz.co.nz/media/581307/Your_Index_Your_AE_System.pdf
- Dairy NZ et LIC, 2018. New Zealand Dairy Statistics 2017-2018. Accessible sur : file:///C:/Users/c.dezetter/Downloads/NZ_DAIRY_STATISTICS_2017-18-WEB-10_OCT.pdf
- Dechow C.D., Rogers G.W., Cooper J.B., Phelps M.I., Mosholder A.L., 2007. Milk, Fat, Protein, Somatic Cell Score, and Days Open Among Holstein, Brown Swiss, and Their Crosses. *J. Dairy Sci.*, 90, 3542-3549.
- De Haas Y., Smolders E., Hoorneman J., Nauta W., Veerkamp R., 2013. Suitability of cross-bred cows for organic farms based on cross-breeding effects on production and functional traits. *Animal*, 7, 655-665.
- Dezetter C., 2015. Évaluation de l'intérêt du croisement entre races bovines laitières. Thèse de l'école doctorale Biologie-santé Nantes Angers, LUNAM, France. <http://www.theses.fr/s163135>.
- Dezetter C., Côrtes C., Lechartier C., Le Mezec P., Mattalia-Elie S., Seegers H., 2013. Crossbreeding in French Holstein farms. 64th EAAP, 665. Accessible sur : http://old.eaap.org/Previous_Annual_Meetings/2013Nantes/Papers/Published/S58_06.pdf
- Dezetter C., Leclerc H., Mattalia S., Barbat A., Boichard D., Ducrocq V., 2015. Inbreeding and crossbreeding parameters for production and fertility traits in Holstein, Montbéliarde, and Normande cows. *J. Dairy Sci.*, 98, 4904-4913.
- Dezetter C., Bareille N., Billon D., Côrtes C., Lechartier C., Seegers H., 2017. Changes in animal performance and profitability of Holstein dairy operations after introduction of crossbreeding with Montbéliarde, Normande, and Scandinavian Red. *J. Dairy Sci.*, 100, 8239-8264.
- Ducrocq V., 2010. Sustainable dairy cattle breeding: illusion or reality. 9th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Leipzig, Allemagne, 1-8.
- Fischer B., Haacker W., Blum H., Bähge T., Rodenbeck D., Helm L., Riemann E., Andert G., Franke G., Heckenberger G., Engelhard T., Blöttner S., Fahr R.D., Swalve H.H., 2008. Frisches Blut gewünscht? Ausgewählte Ergebnisse des Kreuzungsversuches Braunvieh × Deutsche Holstein in Iden., Tag des Milchviehhalters in Sachsen-Anhalt.
- Freyer G., König S., Fischer B., Bergfeld U., Cassell B.G., 2008. Invited Review: Crossbreeding in Dairy Cattle From a German Perspective of the Past and Today. *J. Dairy Sci.*, 91, 3725-3743.
- Harris B.L., Johnson D.L., 2010. Genomic predictions for New Zealand dairy bulls and integration with national genetic evaluation. *J. Dairy Sci.*, 93, 1243-1252.
- Hazel A.R., Heins B.J., Hansen L.B., 2017. Production and calving traits of Montbéliarde × Holstein and Viking Red × Holstein cows compared with pure

- Holstein cows during first lactation in 8 commercial dairy herds. *J. Dairy Sci.*, 100, 4139-4149.
- Heins B.J., Hansen L.B., Seykora A.J., 2006a. Calving Difficulty and Stillbirths of Pure Holsteins versus Crossbreds of Holstein with Normande, Montbeliarde, and Scandinavian Red. *J. Dairy Sci.*, 89, 2805-2810.
- Heins B.J., Hansen L.B., Seykora A.J., 2006b. Fertility and survival of pure Holsteins versus crossbreds of Holstein with Normande, Montbeliarde, and Scandinavian Red. *J. Dairy Sci.*, 89, 4944-4951.
- Heins B.J., Hansen L.B., Seykora A.J., 2006c. Production of Pure Holsteins Versus Crossbreds of Holstein with Normande, Montbeliarde, and Scandinavian Red. *J. Dairy Sci.*, 89, 2799-2804.
- Heins B.J., Hansen L.B., Seykora A.J., Johnson D.G., Linn J.G., Romano J.E., Hazel A.R., 2008. Crossbreds of Jersey× Holstein compared with pure Holsteins for production, fertility, and body and udder measurements during first lactation. *J. Dairy Sci.*, 91, 1270-1278.
- Heins B.J., Hansen L.B., Seykora A.J., Hazel A.R., Johnson D.G., Linn J.G., 2011. Short communication: Jersey × Holstein crossbreds compared with pure Holsteins for production, mastitis, and body measurements during the first 3 lactations. *J. Dairy Sci.*, 94, 501-506.
- Heins B.J., Hansen L.B., De Vries A., 2012. Survival, lifetime production, and profitability of Normande × Holstein, Montbeliarde × Holstein, and Scandinavian Red × Holstein crossbreds versus pure Holsteins. *J. Dairy Sci.*, 95, 1011-1021.
- Jönsson R., 2015. Estimation of heterosis and performance of crossbred Swedish dairy cows. Master thesis, Department of Animal Breeding and Genetics, Uppsala, Sweden.
- Konstantinov K.V., Beard K.T., Goddard M.E., 2006. Estimation of additive and non-additive genetic effects on production traits and somatic cell scores in crosses among Holstein-Friesian, Jersey and Australian Red cattle. 8th World Congr. Genet. Appl. Livest. Prod., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, 1-2. <http://www.wcgalp.org/system/files/proceedings/2006/estimation-additive-and-non-additive-genetic-effects-production-traits-and-somatic-cell-scores.pdf>
- Le Mezec P., 2012. Le croisement laitier en France. Travaux issus du CasDAR Génésys, Institut de l'Élevage, Paris, France. http://idele.fr/no_cache/recherche/publication/idelesolr/recommends/le-croisement-laitier-en-france.html
- Long C.R., 1980. Crossbreeding for beef production: Experimental results. *J. Anim. Sci.*, 51, 1197-1223.
- Lopez-Villalobos N., Garrick D.J., Holmes C.W., Blair H.T., Spelman R.J., 2000a. Effects of selection and crossbreeding strategies on industry profit in the New Zealand dairy industry. *J. Dairy Sci.*, 83, 164-172.
- Lopez-Villalobos N., Garrick D.J., Holmes C.W., Blair H.T., Spelman R.J., 2000b. Profitabilities of some mating systems for dairy herds in New Zealand. *J. Dairy Sci.*, 83:144-153.
- Lopez-Villalobos N., Spelman R.J., 2010. Estimation of genetic and crossbreeding parameters for clinical mastitis, somatic cell score and daily yields of milk, fat and protein in new zealand dairy cattle. 9th World Congr. Genet. Appl. Livest. Prod., Leizig, Allemagne.
- Lynch M., Walsh B., 1998. Genetics and analysis of quantitative traits. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, MA, USA, 971p.
- Mattalia S., Barbat A., Danchin-Burge C., Brochard M., Le Mézec P., Minéry S., Jansen G., Van Doormaal B., Verrier E., 2006. La variabilité génétique des huit principales races bovines laitières françaises: quelles évolutions, quelles comparaisons internationales? *Renc. Rech. Rum.*, 13, 239-246.
- Norberg E., Sørensen L.H., Byskov K., Kargo M., 2014. Heterosis and Breed Effects for Milk Production, Udder Health and Fertility in Danish Herds applying Systematic Crossbreeding. 10th World Congr. Genet. Appl. Livest. Prod., Vancouver, Canada. <http://www.wcgalp.org/proceedings/2014/heterosis-and-breed-effects-milk-production-udder-health-and-fertility-danish-herds>
- Olson K.M., Cassell B.G., McAllister A.J., Washburn S.P., 2009. Dystocia, stillbirth, gestation length, and birth weight in Holstein, Jersey, and reciprocal crosses from a planned experiment. *J. Dairy Sci.*, 92, 6167-6175.
- Olson K.M., VanRaden P.M., Tooker M.E., 2012. Multibreed genomic evaluations using purebred Holsteins, Jerseys, and Brown Swiss. *J. Dairy Sci.*, 95, 5378-5383.
- Pallier I., Trou G., Briend, A., Pape C., 2017. Dossier : Croisement de races laitières, effet de mode ou opportunité? *Terra*, 21-27.
- Penasa M., López-Villalobos N., Evans R., Cromie A., Dal Zotto R., Cassandro M., 2010. Crossbreeding effects on milk yield traits and calving interval in spring-calving dairy cows. *J. Anim. Breed. Genet.*, 127, 300-307.
- Phocas F., Belloc C., Bidanel J., Delaby L., Dourmad J., Dumont B., Ezanno P., Fortun-Lamothe L., Foucras G., Frappat B., Gonzalez-Garcia E., Hazard D., Larzul C., Lubac S., Mignon-Grasteau S., Moreno-Romieux C., Tixier-Boichard M., Brochard M., 2017. Quels programmes d'amélioration génétique des animaux pour des systèmes d'élevage agro-écologiques? *INRA Prod. Anim.*, 30, 31-46.
- Prendville R., Pierce K., Buckley F., 2010. A comparison between Holstein-Friesian and Jersey dairy cows and their F 1 cross with regard to milk yield, somatic cell score, mastitis, and milking characteristics under grazing conditions. *J. Dairy Sci.*, 93, 2741-2750.
- Prendville R., Shalloo L., Pierce K.M., Buckley F., 2011. Comparative performance and economic appraisal of Holstein-Friesian, Jersey and Jersey×Holstein-Friesian cows under seasonal pasture-based management. *Irish J. Agricult. Food Res.*, 50, 123-140.
- Quaas R.L., 1988. Additive genetic model with groups and relationships. *J. Dairy Sci.*, 71, 91-98.
- Quénon J., 2017. Le croisement entre races laitières : pour quelles raisons et comment ? Avec quels résultats ? <https://www.psd-r-occitanie.fr/content/download/5208/50713/version/1/file/Transition-systemes-bovins-lait-PSDR-ATARI-JQuenon-2018.pdf>
- Quénon J., Ollion E., Basset M., Magne M.A., 2018. Pourquoi et comment les éleveurs bovins lait adoptent-ils le croisement laitier ? *Renc. Rech. Rum.*, 24.
- Rinell E., Heringstad B., 2018. The effects of crossbreeding with Norwegian Red dairy cattle on common postpartum diseases, fertility and body condition score. *Animal*, 1-8.
- Robison O.W., McDaniel B.T., Rincon E.J., 1981. Estimation of Direct and Maternal Additive and Heterotic Effects from Crossbreeding Experiments in Animals. *J. Anim. Sci.*, 52, 44-50.
- Rupp R., Boichard D., 2003. Genetics of resistance to mastitis in dairy cattle. *Vet. Res.*, 34, 671-688.
- Sewalem A., Kistemaker G., Miglior F., Van Doormaal B., 2006. Analysis of inbreeding and its relationship with functional longevity in Canadian dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 89, 2210-2216.
- Shull G.H., 1948. What Is "Heterosis"? *Genetics*, 33, 439-446.
- Singh K., Molenaar A.J., Swanson K.M., Gudex B., Arias J.A., Erdman R.A., Stelwagen K., 2011. Epigenetics: a possible role in acute and transgenerational regulation of dairy cow milk production. *Animal*, 6, 375-381.
- Sørensen M.K., Norberg E., Pedersen J., Christensen L.G., 2008. Invited Review: Crossbreeding in Dairy Cattle: A Danish Perspective. *J. Dairy Sci.*, 91, 4116-4128.
- Swan A.A., Kinghorn B.P., 1992. Evaluation and exploitation of crossbreeding in dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 75, 624-639.
- Vance E.R., Ferris C.P., Elliott C.T., Hartley H.M., Kilpatrick D.J., 2013. Comparison of the performance of Holstein-Friesian and Jersey× Holstein-Friesian crossbred dairy cows within three contrasting grassland-based systems of milk production. *Livest. Sci.*, 151, 66-79.
- VanRaden P.M., Sanders A.H., 2003. Economic Merit of Crossbred and Purebred US Dairy Cattle. *J. Dairy Sci.*, 86, 1036-1044.
- VanRaden P.M., Tooker M.E., Cole J.B., 2004. Heterosis and breed differences for daughter pregnancy rate of crossbred dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 87, 284.
- VanRaden P.M., Tooker M.E., Cole J.B., Wiggans G.R., Megonigal J.H., 2007. Genetic Evaluations for Mixed-Breed Populations. *J. Dairy Sci.*, 90, 2434-2441.
- Wall E., Brotherstone S., Kearney J.F., Woolliams J.A., Coffey M.P., 2005. Impact of Nonadditive Genetic Effects in the Estimation of Breeding Values for Fertility and Correlated Traits. *J. Dairy Sci.*, 88, 376-385.
- Walsh S., Buckley F., Berry D.P., Rath M., Pierce K., Byrne N., Dillon P., 2007. Effects of Breed, Feeding System, and Parity on Udder Health and Milking Characteristics. *J. Dairy Sci.*, 90, 5767-5779.

Walsh S., Buckley F., Pierce K., Byrne N., Patton J., Dillon P., 2008. Effects of breed and feeding system on milk production, body weight, body condition score, reproductive performance, and postpartum ovarian function. *J. Dairy Sci.*, 91, 4401-4413.

Waurich B., 2007. Einkreuzungseffekte von Jersey-Vatertieren auf die sächsische Holsteinpopulation für

Produktions- und Sekundärmerkmale. Georg-August-Universität, Göttingen, Allemagne.

Weigel K.A., Barlass K.A., 2003. Results of a producer survey regarding crossbreeding on US dairy farms. *J. Dairy Sci.*, 86, 4148-4154.

Willham R.L., Pollak E., 1985. Theory of Heterosis. *J. Dairy Sci.*, 68, 2411-2417.

Williams J.L., Aguilar I., Rekaya R., Bertrand J.K., 2010. Estimation of breed and heterosis effects for growth and carcass traits in cattle using published crossbreeding studies. *J. Anim. Sci.*, 88, 460-466.

Wolf J., Zavadilova L., Némcová E., 2005. Non-additive effects on milk production in Czech dairy cows. *J. Anim. Breed. Genet.*, 122, 332-339.

Résumé

Dans certains ateliers, la robustesse des vaches de race pure Prim'Holstein, se traduisant par leur capacité à maintenir à la fois de bonnes performances de reproduction, de santé et de production, se trouve dégradée. Ceci peut avoir des répercussions techniques et économiques négatives importantes. Le croisement entre races laitières pourrait être une voie d'amélioration. Or, à l'exception notable de la Nouvelle Zélande, le croisement laitier reste très marginal dans les pays développés. Ce constat pourrait s'expliquer en partie par un manque de connaissances sur les avantages et inconvénients du croisement. L'objectif de cette synthèse est de faire le point sur les connaissances actuelles autour du croisement laitier. Le croisement permet de bénéficier des effets génétiques additifs de la sélection intra-race mais également des effets génétiques non-additifs. Ces effets sont généralement favorables et augmentent le potentiel génétique des individus issus de croisement. Ainsi les vaches issues de croisement de première génération entre Prim'Holstein et Montbéliarde ont un niveau génétique quasiment équivalent à la Prim'Holstein pour la quantité de lait et à la Montbéliarde pour le taux de conception. L'intérêt technico-économique d'introduire du croisement laitier dans un atelier initialement en race Prim'Holstein dépend de la situation initiale de cet atelier. Lorsque la productivité des vaches Prim'Holstein est élevée et que les performances de reproduction et de santé sont correctes, l'intérêt du croisement semble nul. En revanche dans des ateliers à productivité élevée, mais faisant face à des situations de reproduction et de santé dégradées, le croisement permet d'augmenter de 5 % la marge brute de l'atelier. Pour des niveaux de productivité plus modérés, l'intérêt économique est moindre (+ 3 à 4 % de marge brute), mais la robustesse des vaches apparaît améliorée.

Abstract

Dairy crossbreeding: Pros and cons for Holsteindairy systems

In some dairy systems, robustness of pure Holstein cows, which can be defined as their ability to maintain good reproductive, health and production performance, has decreased. This may result in poor animal performance and profitability. Dairy crossbreeding might be a way to improve it. However, crossbreeding has not been widely used for dairy cattle breeding in developed countries except in New Zealand. One explanation is the lack of knowledge on the pros and cons of dairy crossbreeding. The aim of this paper is to review the literature on dairy crossbreeding. One advantage of crossbreeding is to benefit both additive and non-additive genetic effects. Several scientific studies report a positive influence of heterosis, especially on functional traits. Hence, the first generation of crossbred cows between Holstein and Montbéliarde reached almost the genetic level of Holstein cows for milk production and the genetic level of Montbéliarde cows for conception rate. Changes in animal performance and profitability after crossbreeding introduction depended on the initial situation of dairy farms. In high milk-yielding herds with low prevalence of reproduction and health disorders, the introduction of crossbreeding was not more profitable than pure Holstein mating. However, in high milk-yielding herds with high prevalence of disorders, crossbreeding increased margin over variable costs up to 5 % compared to pure mating. In moderate milk-yielding herds, profitability advantage of crossbreeding was smaller but robustness of cows was improved.

DEZETTER C., BOICHARD D., BAREILLE N., GRIMARD B., LE MEZEC P., DUCROCQ V., Le croisement entre races bovines laitières : intérêts et limites pour des ateliers en race pure Prim'Holstein. *INRA Prod. Anim.*, 32, 359-378.

<https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.3.2575>