Thèse de Doctorat

Charlotte DEZETTER

Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur d'Oniris - l'École Nationale Vétérinaire Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes-Atlantique
sous le label de L'Université Nantes Angers Le Mans

École doctorale : *Biologie-Santé Nantes-Angers*

Discipline : *Biologie de l'environnement, des populations, écologie*
Spécialité : *Sciences animales*
Unité de recherche : *UMR Oniris-INRA 1300 Biologie, épidémiologie et analyse de risque en santé animale*

Soutenue le *06 Octobre 2015*

Evaluation de l'intérêt du croisement entre races bovines laitières

JURY

Rapporteurs :	**Catherine DISENHAUS**, Professeur, AgroCampus Ouest, Rennes **Jean-Pierre BIDANEL**, Directeur de recherche, INRA, Jouy-en-Josas
Examinateurs :	**Gilles BRUNSCHWIG,** Professeur, VetAgro Sup, Clermont Ferrand **François BEAUDEAU**, Professeur, Oniris, Nantes **Vincent DUCROCQ**, Directeur de recherche, INRA, Jouy-en-Josas
Directeur de Thèse :	**Henri SEEGERS**, Directeur de recherche, INRA Angers-Nantes

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je voudrais remercier Sophie Mattalia et Pascale Le Mezec qui lors d'une pause-café m'ont parlé pour la première fois de cette thèse et sans qui je n'aurais jamais postulé pour ce travail qui m'a tant apporté. Merci aussi pour votre disponibilité et votre soutien tout au long de ces 3 ans.

Un grand merci à Henri Seegers pour m'avoir fait confiance, pour m'avoir toujours poussée à m'améliorer et pour l'immense richesse des connaissances que tu m'as apporté. J'espère que tu es satisfait du travail accompli autant que je le suis. Ces 3 années ont été très enrichissantes sur le plan professionnel et personnel et tu y as grandement contribué. Merci infiniment pour ta confiance.

Merci à Tristan Gaiffe pour m'avoir fait confiance et m'avoir confié ce travail. J'espère que les résultats sont à la hauteur de tes attentes.

Un immense merci à Vincent Ducrocq et Didier Boichard pour tout le temps que vous m'avez accordé, notamment dans la rédaction de l'article. Merci pour cette année à Jouy en Josas qui a été extrêmement enrichissante. J'espère sincèrement que cette fin de thèse ne sera pas la fin de notre collaboration. Merci également à Hélène Leclerc et à Anne Barbat pour votre aide et votre contribution à ce travail.

Merci à Nathalie Bareille. Discuter avec toi est toujours une immense source d'idées et de connaissances. Grâce à toi j'ai pu appréhender un peu plus sereinement le simulateur et en percer ses secrets ! Merci pour tous tes conseils et tes recommandations. Travailler avec toi a été un réel plaisir.

Merci à Didier Billon pour tout le temps que tu m'as consacré. Sans toi je ne serais jamais arrivé à me sortir des difficultés du simulateur. Profites bien de ta retraite, tu l'as bien mérité ! Merci aussi à Anne Lehebel et Nadine Brisseau pour ne pas m'avoir chassé de leur bureau même quand je râlais trop après le simulateur ! Merci pour tous ces moments de pause qui ont permis de relâcher la pression.

Merci à Cyril Lechartier pour m'avoir tant aidé sur la rédaction de la thèse. J'ai beaucoup appris grâce à toi. Merci pour toutes les discussions hors travail sur la musique et la cuisine. Merci pour ta bonne humeur et ta disponibilité. Merci à Cristiano pour avoir accepté l'encadrement ESA de cette thèse rendant sa réalisation possible.

Merci à toute l'équipe ESA, Justine, Claire, Hélène, Yannick, Sébastien pour m'avoir si bien intégrée dans votre équipe, pour toutes les discussions en pauses café et au repas. Merci à Timothée pour avoir partagé mon bureau et avoir réussi à me supporter même quand je râlais après mon ordinateur.

Merci à Roseline Verdy pour ton efficacité pour répondre à toutes mes questions administratives. Merci surtout pour ta bonne humeur.

Merci à toute l'équipe du bâtiment 211 de Jouy en Josas pour votre accueil et pour m'avoir fait sentir comme l'une d'entre vous tout au long de l'année passée à vos côtés. Spéciale dédicace à Chris, Pauline, Romain, Thierry et Alexis pour les sorties au baradoz et pour toutes nos franches rigolades. Merci à Aurélia, Ludo et toute l'équipe de badminton, nos séances du midi me manque trop.

Merci à toute l'équipe de BioEpar pour m'avoir toujours considéré comme un membre permanent de l'équipe et avoir rendu plus que supportable les aller-retour Angers-Nantes.

Merci à tous les membres de mon jury pour avoir accepté de consacrer du temps et un regard critique sur ce travail. Merci également aux membres de mon comité de thèse, Bénédicte Grimard, Luc Delaby et Didier Boichard, ainsi qu'à Benoit Rubin pour vos nombreux conseils et remarques toujours très constructifs.

REMERCIEMENTS

Merci à mes parents, qui bien qu'ils n'aient jamais compris ma passion des vaches plutôt que des chevaux, m'ont toujours soutenu et encouragé. Vous êtes le plus beau modèle que j'ai jamais eu, je vous aime très fort.

Enfin merci à Romain. Merci d'avoir accepté que je chamboule notre vie à ce point. Merci d'avoir accepté tous les déménagements (je m'en veux encore de t'avoir mis à la rue lorsque je suis partie à Angers), tous les weekends travaillés, tous les aller-retour entre Paris et Angers et tous les moments de stress. Merci d'avoir été là et de m'apporter tant de bonheur. A la suite de notre aventure. Je t'aime.

CADRE GENERAL DES TRAVAUX

Structures de recherche partenaires du projet

- Unité Mixte de Recherche INRA-Oniris Bio-agression, Epidémiologie et Analyse de Risque en Santé Animale (UMR BioEpAR), Nantes
- Unité de Recherche sur les Systèmes d'Elevage (URSE) du Groupe ESA, Angers
- Unité Mixte de Recherche INRA-AgroParisTech Génétique Animale et Biologie Intégrative (UMR GABI), Jouy-en-Josas, & Département Génétique et Phénotypes de l'Institut de l'Elevage (DGP Idele), Paris et Jouy-en-Josas

Partenaire financeur

PASS', Roulans

Etablissement portant la gestion

Groupe ESA, Unité de Recherche sur les Systèmes d'Elevage (URSE), Angers

Etablissement d'inscription pour la délivrance du doctorat

Oniris (École Nationale Vétérinaire Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes-Atlantique)
sous le label de L'Université Nantes Angers Le Mans et dans le cadre de l'École doctorale : Biologie-Santé Nantes-Angers

Participants à l'encadrement et au pilotage

- Henri Seegers (Directeur de thèse) et Nathalie Bareille (UMR BioEpAR)
- Cristiano Cortes et Cyril Lechartier (URSE)
- Vincent Ducrocq et Didier Boichard (UMR GABI)
- Pascale Le Mezec Sophie Mattalia (DGP Idele)
- Tristan Gaiffe (PASS')

Autres membres du comité de thèse

- Bénédicte Grimard (UMR INRA-ENVA BDR Maisons-Alfort)
- Luc Delaby (UMR INRA-Agrocampus Ouest PEGASE, Rennes)
- Benoît Rubin (Département Économies des filières et de l'exploitation de l'Institut de l'Elevage)

Table des matières

Chapitre 1 : Introduction générale 17
1. Contexte et objectif général du travail de recherche 17
2. Etat des connaissances et besoin de recherche sur l'intérêt de l'introduction du croisement entre races laitières dans des ateliers en race Holstein 23
3. Formulation de la problématique de l'évaluation de l'intérêt de l'introduction du croisement entre races laitières dans des ateliers en race pure Holstein 27
4. Approche par modélisation-simulation pour évaluer l'intérêt de l'introduction du croisement entre races laitières dans des troupeaux initialement en race Holstein 29
5. Objectifs détaillés et contenu de la thèse 33

Chapitre 2 : Caractérisation des pratiques de croisement entre races laitières dans les ateliers laitiers français……. 35
1. Description des inséminations artificielles des vaches de race Holstein avec des taureaux laitiers 35
1.1. Matériel et méthode 35
1.2. Résultats 39
1.3. Implication de ces résultats pour décrire les pratiques de croisement dans des troupeaux d'intérêt 41
2. Article 'Dairy Crossbreeding in French Holstein Herds' 43
2.1. Introduction 45
2.2. Material and methods 45
2.3. Results 51
2.4. Discussion 59
2.5. Conclusion 61
2.6. Acknowledgements 61
2.7. References 63

Chapitre 3 : Estimation des effets de la consanguinité et du croisement pour les caractères de production et de reproduction chez les vaches de race Prim'Holstein, Montbéliarde et Normande 67
1. INTRODUCTION 69
2. MATERIALS AND METHODS 71
2.1. Data 71
2.2. Inbreeding, Specific Heterosis, and Recombination Loss Coefficients 71
2.3. Model 73
3. RESULTS 75
3.1. Raw Performance 75
3.2. Inbreeding Effects 77
3.3. Crossbreeding Parameters 79
4. DISCUSSION 81
5. CONCLUSIONS 87
6. ACKNOWLEDGMENTS 89
7. REFERENCES 89

Chapitre 4 : Modélisation des fonctions biologiques des vaches, des décisions dans la conduite du troupeau et des performances technico-économiques d'un atelier de bovins laitiers 95
1. Présentation du simulateur 95
2. Modélisation des décisions d'accouplement 97
3. Modélisation des fonctions biologiques 101
3.1. Reproduction 101
3.2. Valeur génétique et phénotype associé 103
3.3. Production 107
3.4. Troubles de santé : les infections intra-mammaires (IIM) 109
3.5. Autres troubles de santé et de reproduction 111
4. Modélisation de la gestion des effectifs : réforme et renouvellement 113
4.1. Réforme 113
4.2. Renouvellement 115

4.3. Achat 115
5. Modélisation des plans de distribution des aliments 117
6. Modélisation de la gestion de du volume à produire 119
6.1. Gestion du volume à livrer 119
6.2. Prévision de réalisation du volume à livrer et réaction d'adaptation 119
6.3. Seuil de CCST 119
7. Modélisation des résultats économiques 121
7.1. Calcul des produits 121
7.2. Calcul des charges 121

Chapitre 5 : Evaluation de l'intérêt technico-économique du croisement entre races laitières par simulations 123
1. Matériel et méthode 123
1.1. Définition des protocoles de simulation 123
1.2. Paramétrage des protocoles de simulation 129
1.3. Exécution des plans de simulation 139
1.4. Analyse des résultats 139
2. Résultats 143
2.1. Evolution de la composition génotypique des troupeaux en stratégie d'accouplement de croisement, pendant la simulation 143
2.2. Performances zootechniques moyennes des vaches pour les quatre stratégies d'accouplement en fonction de l'atelier initial 145
2.3. Robustesse des vaches en fonction de la stratégie d'accouplement et de l'atelier 151
2.4. Performances économiques des ateliers en fonction des stratégies d'accouplement pour le niveau de prix relatifs de 2014 153
2.5. Performances économiques des ateliers en fonction des stratégies d'accouplement pour les différents niveaux de prix relatifs 163
3. Discussion 165
4. Conclusion 175

Chapitre 6 : Discussion générale 177
1. Atouts et limites des options de modélisation mécaniste relativement détaillée 177
2. Choix de plans de simulation sur des protocoles contrastés 183
3. Variabilité de l'intérêt technico-économique du croisement entre races laitières 185
4. Besoins et opportunités d'amélioration des connaissances 193
5. Implications pratiques, notamment pour le conseil aux éleveurs. 197

Chapitre 7 : Conclusion générale 199

Références bibliographiques 203

Annexe A: Publication et communications 215

Annexe B : Modélisation du risque d'occurrence des infections intra-mammaires en l'absence de prévention 217

Annexe C : Performances zootechniques moyennes annuelles des ateliers d'effectif constant de 60 vaches présentes-année selon la stratégie d'accouplement 218

Annexe D : Performances économiques moyennes annuelles des ateliers d'effectif constant de 60 vaches présentes-année selon la stratégie d'accouplement 220

Annexe E : Marge brute annuelle moyenne non actualisée (en €) des ateliers selon la stratégie d'accouplement223C:\Users\c.dezetter\Documents\Rédaction thèse\Dernière version des chapitres\thèse_mise en page

Liste des Tableaux

Tableau 1-1. Héritabilité (diagonale) et corrélation génétique entre quelques caractères laitiers et fonctionnels en race Prim'Holstein (INRA-GABI, Institut de l'Elevage, 2015) 19
Tableau 1-2. Performances sur quelques caractères de production et de santé de la mamelle (Institut de l'Elevage et FCEL, 2013) et de fertilité (INRA-GABI, Institut de l'Elevage, 2015) 19
Tableau 1-3. 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 mortinatalité 20
Tableau 1-4. Description du matériel et méthode de 22 études sur le croisement laitier dont la fin de collecte des données est après 2000 26
Tableau 2-1. Odds ratios ajustés pour l'interaction entre la production laitière sur 305 jours de la vache inséminée relativement au troupeau et à la campagne d'IA et l'occurrence d'une IAC. 38
Tableau 2-2. Odds ratios ajustés pour l'interaction entre la parité de la vache de race Holstein inséminée et l'occurrence d'une IAC selon le rang de l'IA dans une lactation (1ère IA vs 4ème IA et plus). 38
Tableau 2-3. Odds ratio ajustés pour l'interaction entre le niveau moyen de production laitière du troupeau et l'occurrence d'une IAC selon le rang de l'IA dans une lactation (1ère IA vs 4ème IA et plus). 40
Tableau 2-4. Odds ratio ajustés pour l'interaction entre la périodicité des vêlages des troupeaux et l'occurrence d'une IAC selon le rang de l'IA dans une lactation (1ère IA vs 4ème IA et plus). 40
Tableau 2-5. Number of pure Holstein, first generation (F1) crossbred and second generation (F2) crossbred cows and the corresponding numbers of AI and lactation records collected in herds where 10% of Holstein cows were cross-bred at first service at least for two 50
Tableau 2-6. Correlations between vectors1 of the principal component analysis (PCA) and variables describing crossbreeding strategies from characteristics of Holstein cows chosen to be cross-bred2, characteristics of non-Holstein bulls mated to Holstein cows3, and breed of F1 crossbreds service bulls....50
Tableau 2-7. Means (SD) of descriptors for crossbreeding strategy clusters identified for herds where 10% of Holstein cows were cross-bred at first service at least for two breeding campaigns. 50
Tableau 2-8. Summary of crossbreeding strategies for herds where at least 10% of Holstein cows were cross-bred at first service at least for two breeding campaigns. 58
Tableau 3-1. Number of cows, lactation records and artificial insemination (AI) records, means of production and fertility traits in the two sub-populations of purebred cows[1] 74
Tableau 3-2. Number of cows, lactation records and artificial insemination (AI) records, means of production and fertility traits in the two sub-populations of cows recorded in herds with at least three crossbred cows. 76
Tableau 3-3. Effect of 1% increase of inbreeding on 305days milk, fat and protein yields, fat and protein content, somatic cell score (SCS), conception rate (CR[1]) and days to first service (DFS) in absolute terms and expressed as percentage of the phenotypic mean (in parentheses) by breed 78
Tableau 3-4. Genetic breed differences estimated from a dataset with all purebred cows *vs* from a dataset including purebred and crossbred herdmate cows....80
Tableau 3-5. Heterosis and recombination loss estimates (SE) for 305-d milk, fat and protein yields, conception rate (CR[1]) and days to first service (DFS) for the Holstein × Montbéliarde sub-population (HO × MO) and the Holstein × Normande sub-population (HO × NO). 80
Tableau 4-1. Variables d'état fixes décrivant chaque individu représenté dans le troupeau simulé 98
Tableau 4-2. Variables d'état décrivant chaque individu représenté dans le troupeau simulé pour le cycle de reproduction en cours 99
Tableau 4-3. Corrélations génétiques, d'environnement permanent et résiduelles pour les caractères de quantité de lait (lait), de TB, de TP, de fertilité (FER) et de mammites cliniques (MACL)....104
Tableau 5-1 – Variances génétiques, d'environnement permanent et résiduelles utilisées pour modéliser les valeurs génétiques et les niveaux adultes des individus simulés en race Holstein (A. Barbat, communication personnelle) 128

Tableau 5-2. Progrès génétique annuel et écarts entre races appliqués aux index des taureaux utilisés pour les inséminations et hétérosis appliqués aux vaches issues de croisement[1]. 128
Tableau 5-3. Paramètres individuels de la fertilité/fécondité des vaches 130
Tableau 5-4. Principaux paramètres individuels de la santé des vaches 131
Tableau 5-5. Principaux paramètres liés à la conduite des différents ateliers (1/2).....132
Tableau 5-6. Principaux paramètres liés à la conduite des différents ateliers (2/2).....133
Tableau 5-7. Moyenne des index pour la quantité de lait, le TB, le TP, la fertilité et les mammites cliniques des 10 taureaux des trois catégories de choix possibles 133
Tableau 5-8. Les principales caractéristiques des quatre ateliers initiaux.....134
Tableau 5-9. Principaux paramètres économiques.....136
Tableau 5-10. Volume livré cumulé moyen en litres sur les trois périodes de changement de composition génotypique des troupeaux en croisement pour les quatre stratégies d'accouplement dans les quatre ateliers d'effectif constant de 120 vaches.....154
Tableau 5-11. Produit total cumulé (€) sur 15 ans et ses différentes composantes pour les quatre stratégies d'accouplement dans les quatre ateliers initiaux de 120 vaches sur tout l'horizon de simulation 156
Tableau 5-12. Charges opérationnelles totales cumulées (€) sur 15 ans et ses différentes composantes pour les quatre stratégies d'accouplement dans les quatre ateliers initiaux de 120 vaches 157
Tableau 5-13. Moyennes et écart-type (ET) entre répétitions des marges brutes actualisées (€) cumulées sur 15 ans des ateliers initiaux de 120 vaches pour un mode de gestion de l'effectif de vache ou de l'objectif de livraison pour les stratégies d'accouplement en croisement en comparaison à la race pure...160
Tableau 5-14. Produits, charges opérationnelles et marges brutes actualisées (€) cumulées sur 15 ans des ateliers initiaux 8M et 9M de 120 vaches pour les stratégies d'accouplement en croisement en comparaison à la race pure pour différents niveaux de prix relatifs 162

Liste des Figures

Figure 1-1. Ecart de production (kg/j) et écart de fertilité (Days open) entre les vaches primipares (○), multipares (Δ) ou toutes parités confondues (□) de race Holstein et issues de croisement de première génération 22
Figure 1-2. Ecart de production (kg/j) et écart de score en cellules somatiques (SCS) entre les vaches primipares (○), multipares (Δ) ou toutes parités confondues (□) de race Holstein et issues de croisement de première génération 22
Figure 1-3. Production laitière moyenne journalière de vaches primipares (○) et multipares (□) selon leur type génétique en fonction de la dernière année de collecte des données des 21 publications 24
Figure 1-4. Places respectives des processus de modélisation et de simulation (Seegers *et al.*, 1999)..... 28
Figure 1-5. Schéma général simplifié du simulateur ECOMAST développé par l'UMR INRA-Oniris BioEpAR (Hortet, 2000; Robert-Briand, 2006) 28
Figure 2-1. Description des étapes d'inclusion/exclusion des troupeaux composant la population d'étude de la description des inséminations sur les vaches de race Holstein 36
Figure 2-2. Races des taureaux d'insémination autre que Holstein utilisé pour inséminer des vaches de race Holstein..... 38
Figure 2-3. Map of matings in 33 herds of crossbreeding strategy cluster 1* based on the pedigree and 957 service records of 414 second generation crossbreds (F2)..... 52
Figure 2-4. Map of matings in 54 herds of crossbreeding strategy cluster 2* based on the pedigree and 876 service records of 414 second generation crossbreds (F2)..... 54
Figure 2-5. Map of matings in 51 herds of cluster crossbreeding strategy 3* based on the pedigree and 1677 service records of 801 second generation crossbreds (F2)..... 55
Figure 2-6. Map of matings in 31 herds of cluster crossbreeding strategy 4* based on the pedigree and 624 service records of 343 second generation crossbreds (F2)..... 56
Figure 2-7. Map of matings in 43 herds of cluster crossbreeding strategy 5* based on the pedigree and 382 service records of 183 second generation crossbreds (F2)..... 57
Figure 3-1. Inbreeding trend computed assuming unknown parents unrelated and non inbred (▲) or assuming unknown parents as inbred as their contemporaries and related accordingly (◆) for Holstein (a), Montbéliarde (b) and Normande (c) cows and their ancestors 78
Figure 4-1. Schéma de l'organisation générale du simulateur ECOMAST explicité dans la suite du chapitre 96
Figure 4-2. Schéma de l'organisation en modules du simulateur ECOMAST et représentation des interactions entre ces modules..... 96
Figure 4-3. Modélisation du choix de la race des taureaux d'insémination en fonction du génotype des vaches dans les schémas en croisement alternatif et rotatif trois races..... 100
Figure 4-4. Représentation des événements survenant lors du cycle de reproduction d'un individu 102
Figure 4-5. Probabilité minimale et maximale de réussite à l'insémination artificielle (IA) en fonction du stade de lactation et de la production laitière journalière..... 102
Figure 4-6. Exemples de modélisation de la production laitière journalière (PLJ) réalisée pour différents rangs de lactation et différents potentiels adulte 305 jours à partir d'une courbe de Wood et des différents effets limitants[1] survenant au cours de la lactation 108
Figure 4-7. Principe général de mise en jeu des décisions d'adaptation à l'objectif de volume à produire..... 118
Figure 5-1. Description des protocoles simulés pour les quatre éléments de scénarios..... 124
Figure 5-2. Composition génotypique du troupeau: effectif de vaches en lactation pour chaque type génétique en début de campagne selon l'atelier initial sur tout l'horizon de simulation..... 142
Figure 5-3. Performances de production[1] des vaches pour les quatre stratégies d'accouplement dans les quatre ateliers d'effectif de 120 vaches constant sur tout l'horizon de simulation 146

Figure 5-4. Performances de reproduction et de santé de la mamelle[1] des vaches pour les quatre stratégies d'accouplement dans les quatre ateliers d'effectif de 120 vaches constant sur tout l'horizon de simulation 148
Figure 5-5. Moyennes annuelles de la proportion de vaches en 4ème lactation et plus et du nombre de traitements[1] par vache présente-année pour les quatre stratégies d'accouplement dans les quatre ateliers d'effectif de 120 vaches constant sur tout l'horizon de simulation 150
Figure 5-6. Nombre moyen de vaches présentes par année de simulation pour les quatre stratégies d'accouplement dans les ateliers 8M, 9M et 8,5M de 120 vaches initialement avec un objectif de livraison constant sur tout l'horizon de simulation 152
Figure 5-7. Ecart du prix de vente annuel du lait (en euros pour 1000 litres) des stratégies d'accouplement en croisement en référence à la stratégie en race pure Holstein dans les quatre ateliers de 120 vaches initialement avec un effectif constant ou un objectif de livraison constant sur tout l'horizon de simulation 154

Liste des abréviations

CCSLT : Concentration en cellules sommatiques du lait de tank

F1 = vache ou génisse issue de 1ère génération de croisement

G2 = vache ou génisse issue de 2ème génération de croisement

G3 = vache ou génisse issue de 3ème génération de croisement

G4+ = vache ou génisse issue de 4ème génération de croisement et plus

HO = race Holstein

IA = Insémination artificielle

IIM = Infection intra-mammaire

IIMc = Infection intra-mammaire clinique

IVIA1 = Intervalle vêlage – 1ère insémination

IVIAF = Intervalle vêlage – insémination fécondante

$IVIAF_{AMV}$ = Intervalle vêlage – insémination fécondante annuel moyen par vache

MO = race Montbéliarde

Nb_{AM} trt = Compteur annuel du nombre d'interventions sur les vaches hors alimentation et traite

NO = race Normande

PL = Production laitière

PL_{AMV} = Production laitière moyenne par vache présente-année

RS = race Rouge Scandinave

TB = Taux butyreux

TB_{AML} = Taux butyreux annuel moyen du lait commercialisé

TP = Taux protéique

TP_{AML} = Taux protéique annuel moyen du lait commercialisé

$TRIA_{AM}$ = Taux de réussite annuel moyen des inséminations

TS = troubles de la santé autre qu'infection intra-mammaire

VL_{4+} = Vaches laitières en 4ème lactation et plus

VLP = Vache présente-année

Chapitre 1 : Introduction générale

1. Contexte et objectif général du travail de recherche

Dans la plupart des pays développés, la sélection appliquée aux races laitières a, pendant plusieurs décennies, privilégié la quantité de lait produite par vache au cours d'un cycle de lactation. Ceci a été tout particulièrement le cas pour la race Holstein. La production en 305 jours a ainsi augmenté de plus de 100 kg/vache/an aux Etats-Unis et en France depuis 1970 (Verrier *et al.*, 2010; Institut de l'Elevage and France Conseil Elevage, 2015; USDA, 2015). Pour atteindre ce rythme de progrès génétique annuel (Hansen, 2000; Verrier *et al.*, 2010), le nombre total de pères à taureaux a été drastiquement diminué, ce qui a entrainé une augmentation de la consanguinité sur cette même période (Mattalia *et al.*, 2006; Sewalem *et al.*, 2006). En parallèle, une dégradation des taux de matières utiles, notamment du taux butyreux (TB) (Verrier *et al.*, 2010), ainsi que des caractères fonctionnels, notamment la fertilité (Lucy, 2001) et la santé (Ingvartsen *et al.*, 2003; Sørensen *et al.*, 2006), des vaches de race Holstein a été observée. Ainsi, les troubles de reproduction et de santé de la mamelle sont aujourd'hui les premières causes de réforme des vaches laitières avant même un niveau de production non satisfaisant (Pinedo *et al.*, 2010; Ahlman *et al.*, 2011). Or, la réforme d'une vache potentiellement productive représente un manque à gagner important pour l'éleveur, contrairement à la réforme d'une vache dotée d'un trop faible niveau de production (De Vries, 2013). Par conséquent, le besoin de sélectionner des animaux robustes, définis par Sauvant et Martin (2010) comme pouvant s'adapter aux différents systèmes d'élevage en conservant à la fois un bon niveau de production et de bonnes aptitudes fonctionnelles, devient un enjeu primordial.

Les performances des vaches Holstein pour les caractères fonctionnels peuvent notamment être améliorées par la sélection en race pure. Toutefois, ils sont dans l'ensemble faiblement héritables, donc plus difficiles à sélectionner que les caractères de production (Tableau 1-1). De plus, la corrélation négative entre les caractères fonctionnels et la quantité de lait ne facilite pas leur amélioration conjointe. Par conséquent, pour améliorer les caractères fonctionnels, les organismes de sélection en race Holstein ont modifié les index de synthèse pour leur donner plus d'importance aux dépens des caractères de production (Miglior *et al.*, 2005; Minery *et al.*, 2008). Même si la sélection génomique, à la fois sur les mâles et les femelles (Ducrocq, 2010), permet de rester optimiste sur une amélioration conjointe de ces caractères, le progrès génétique sur les caractères fonctionnels pourrait rester relativement lent (Goddard, 2009).

Tableau 1-1. Héritabilité (diagonale) et corrélation génétique entre quelques caractères laitiers et fonctionnels en race Prim'Holstein (INRA-GABI, Institut de l'Elevage, 2015)

Caractère	Lait	TB	TP	MACL	FER	IVIA1
Quantité de lait	0,3					
TB	-0,4	0,5				
TP	-0,4	0,6	0,5			
MA	0,4	-0,1	-0,1	0,02		
FER	-0,3	0,1	0,1	-0,24	0,02	
IVIA1	0,4	-0,1	-0,1	0,23	-0,16	0,06

MACL : Mammites cliniques, FER : Fertilité vache

Tableau 1-2. Performances sur quelques caractères de production et de santé de la mamelle (Institut de l'Elevage et FCEL, 2013) et de fertilité (INRA-GABI, Institut de l'Elevage, 2015)

Caractères	Prim'Holstein	Montbéliarde	Normande
Quantité de lait (kg)	7905	6305	5766
TB (g/kg)	38,7	38,6	41,9
TP (g/kg)	31,1	32,4	34,1
% de lactations dont l'ensemble des contrôles est <300 000 cellules/ml	41,6	48,3	37,1
Taux de réussite IAT vaches (%)	36,8	47,9	43,5

Tableau 1-3. 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 mortinatalité

Auteur	Pays	Croisements étudiés[1]	Nb vaches	% vaches croisées	Hétérosis (% par rapport à la moyenne des parents)							
					Lait	MG	MP	Fertilité[2]	SCS	Mammites	Longévité[3]	Mortinatalité
Van der Werf et De Boer, 1988	NLD	FR	92 333	75%	2,3	2,6	2,4					
Pedersen et Christensen, 1989	DK	FR RD FA	1018	81%	0,8 9,2 3,5	1,3 8,6 2,6	1,0 9,0 4,0					
Christensen et Pedersen, 1988 cité dans Sørensen *et al.*, 2008	DK	FR, RD, FA	1018	81%				**-0,9**[a] **+0,9**[b] -23[c]		**0,1**	9,5[i]	-2,4 (direct), **+2,4**(maternel)
Touchberry, 1992	USA	GU	519	55%	8,0	8,5	4,7	**3,3**[d] **1,0**[e] **12,8**[b]			24,5[j]	
Harris *et al.*, 1996; Harris *et al.*, 2000	NZ	JE AYR	8 900 000	NP	4,1 1,8	4,3 1,8	4,2 1,9	6,8[f]			4,7[k] 2,6[k]	
VanRaden et Sanders, 2003	USA	Divers	92 471	7,9%	3,4	4,4	4,1		0,7		1,2[k]	
VanRaden *et al.*, 2004	USA	Divers	92 471	7,9%				7,0[g]				
Wall *et al.*, 2005	UK	FR	408 847	<25%	1,4			-0,4[d] -1,3[e] -1,5[b]				
Dechow *et al.*, 2007	USA	BS	6439	13,6%	5,0	7,3	5,6	-8,0[h]	-7,8			
Waurich, 2007	GER	JE	28591	1,6%	6,3	4,6	6,7	-4,6[b]	**1,6**		**2,4**[l]	
Freyer *et al.*, 2008	GER	BS	NP	NP	5,0	5,0	5,3	9,0[d]			9,0[m]	
Begley *et al.*, 2010	IRL	FR NR	3316	19,9%	2,1 2,1	0,4 2,5	1,7 3,0		**0,1** -0,2			
Lopez-Villalobos et Spelman, 2010	NZ	JE	53 419	NP	5,0	7,4	6,4		-0,4	-10,7		
Penasa *et al.*, 2010	IRL	FR JE MO	416 640	18,3%	3,4 6,9 6,5	3,9 9,8 6,6	3,4 7,5 6,1	-0,3[d] -0,5[d] -2,7[d]				
Norberg *et al.*, 2014	DK	RD JE	56 242	44,8%			2,4 4,7	-2,1[e] -3,8[e]	-0,3 -0,7			

Les hétérosis en gras sont des effets défavorables

NLD = Pays Bas, DK = Danemark, USA = Etats Unis, NZ = Nouvelle Zélande, UK = Royaume Uni, GER = Allemagne, IRL = Irlande.

NP = non précisé (certains effectifs n'étaient pas préciser dans le matériel et méthode des publications)

[1]Races utilisées pour croiser avec la race Holstein : Divers = Plus de 4 races mises en jeu, FR= Frisonne, RD= Rouge Danoise, FA=Ayrshire Finlandaise, GU=Guernsey, JE=Jersey, AYR=Ayrshire, BS=Brune Suisse, NR= Rouge Norvégienne, MO=Montbéliarde

[2] Les caractères de fertilités étudiés dans ces études sont : (a) Taux de réussite IA1, (b) Nombre d'inséminations, (c) Intervalle IA1-IAF, (d) Intervalle vêlage-vêlage, (e) Intervalle vêlage-IA1, (f) Pourcentage de vaches gestantes à la fin de la période de reproduction, (g) Taux de gestation des filles et (h) Days open

[3] La longévité est définie dans les études comme : (i) Pourcentage de vache ayant eu au moins 3 lactations, (j) Pourcentage de vache ayant vêlé une 2ème fois, (k) Taux de survie entre la 1ère et la 2ème lactation, (l) Taux de réforme en 1ère lactation et (m) Durée de la carrière de l'animal en nombre de lactation

Pour améliorer rapidement les caractères fonctionnels des animaux tout en maintenant de bonnes performances de production et bénéficier d'une plus grande variabilité génétique, le croisement entre races laitières est une piste à explorer. D'une part, il permet de bénéficier des avantages de la sélection dans deux races différentes (Bidanel, 1992). Ainsi, en France, les différences de performances sur les caractères de production et les caractères fonctionnels entre les trois principales races laitières laissent présager d'un gain possible par complémentarité d'aptitudes par le croisement entre deux ou trois de ces races (Tableau 1-2). D'autre part, il permet de bénéficier d'un effet d'hétérosis. Cet effet correspond à 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). En règle générale, l'effet d'hétérosis pour un caractère est favorable et d'autant plus important que les populations parentales sont génétiquement éloignées et que son héritabilité est faible (Lynch and Walsh, 1998), ce qui est le cas des caractères fonctionnels en bovins laitiers (Tableaux 1-1 et 1-3).

A l'exception notable de la Nouvelle Zélande, le croisement entre races laitières est cependant une pratique marginale dans les pays laitiers développés, ce qui s'explique principalement par les avantages de la race Holstein pour la production laitière (Young, 1984 cité dans VanRaden and Sanders, 2003) et par l'influence historique des éleveurs et des associations de races (Weigel and Barlass, 2003). En France, la pratique du croisement laitier ne représente que 1,79% des inséminations artificielles (IA) dans les races laitières (Beaumard, 2010; Bougouin, 2010). Ce constat pourrait s'expliquer par un défaut d'intérêt de la part des éleveurs pour le croisement entre races laitières, voire même, plus en amont, par un manque de connaissances disponibles sur les avantages et inconvénients de l'introduction du croisement laitier dans un troupeau de race pure Holstein. En effet, l'introduction du croisement étant une décision stratégique sur le long terme pour l'éleveur, une analyse des conséquences de cet investissement à court, moyen et long terme sur la rentabilité de l'entreprise, ainsi que sur le temps et les conditions de travail de l'éleveur, est primordiale (Gaudin *et al.*, 2011). Nous pouvons aussi émettre l'hypothèse que l'introduction du croisement entre races laitières ne pourrait présenter d'intérêt que pour certains types d'ateliers en race Holstein. Cet intérêt pourrait être plus ou moins marqué en fonction *(1)* de la conduite de l'atelier, ainsi que des performances de production, de reproduction et de santé du troupeau initialement en race pure, *(2)* de la taille de l'atelier et *(3)* du contexte économique. La diversité des ateliers laitiers français (Perrot *et al.*, 2014) et la volatilité annoncée des prix agricoles (Perrot *et al.*, 2011) incitent à acquérir des connaissances sur l'intérêt du croisement dans différents types d'ateliers laitiers et différents contextes économiques.

L'objectif général de la thèse est d'évaluer l'intérêt du croisement entre races bovines laitières, en France, dans différents ateliers et différents contextes économiques.

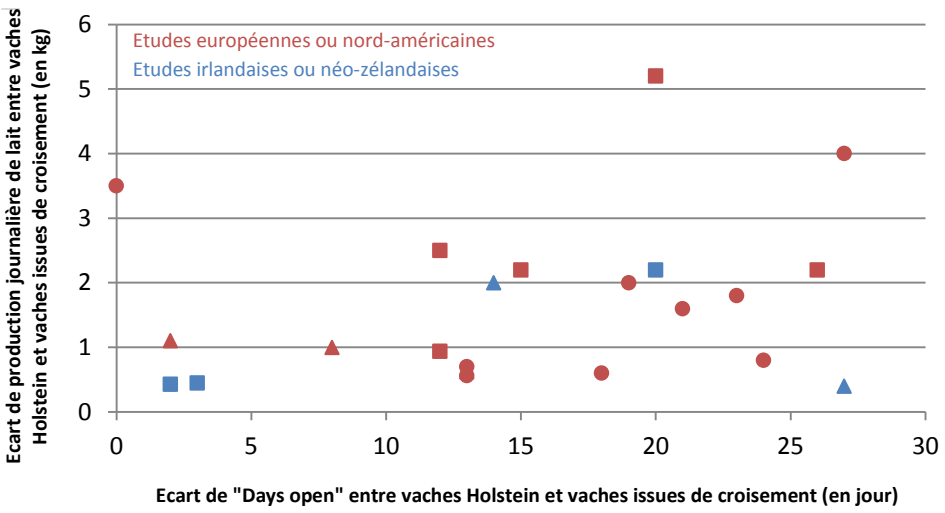


Figure 1-1. Ecart de production (kg/j) et écart de fertilité (Days open) entre les vaches primipares (○), multipares (Δ) ou toutes parités confondues (□) de race Holstein et issues de croisement de première génération

Les résultats sont issus de (McDowell and McDaniel, 1968a; Touchberry, 1992; Heins et al., 2006b, c; Auldist et al., 2007; Brade et al., 2007; Dechow et al., 2007; Waurich, 2007; Buckley et al., 2008; Fischer et al., 2008; Heins et al., 2008; Walsh et al., 2008; Blöttner et al., 2011a; Blöttner et al., 2011b; Heins and Hansen, 2012). Lorsque les résultats sur la production laitière étaient pour des lactations 305 jours, la production laitière journalière moyenne a été estimée en divisant le résultat par 305. Dans la publication de Buckley et al. ***(2008)****, la variable jours ouverts a été estimé à partir de leur résultats sur l'intervalle vêlage insémination fécondante et sur le pourcentage de vaches non gravides à la fin de la période de reproduction selon l'équation : DO = (100-%vaches non gravides x IVIAF moyen + %vaches non gravides x 300)/100. L'hypothèse d'un intervalle vêlage réforme de 300 jours en moyenne pour les vaches non gravides a été faite. Dans la publication de Auldist et al.* ***(2007)****, la variable nombre de jours ouverts a été estimé à partir de leur résultats le pourcentage de vaches gestantes à 6 semaines, à 12 semaines et le pourcentage de vaches non gravides à la fin de la période de reproduction de 17 semaines selon l'équation : DO = (%vaches gravides à 6 semaines x 21 + (%vaches gravides à 12 semaines - %vaches gravides à 6 semaines) x 70 + (100 - %vaches non gravides - % vaches gravides à 12 semaines) x 110 + % vaches non gravides x 300)/100. L'hypothèse d'un intervalle vêlage réforme de 300 jours en moyenne pour les vaches non gravides ainsi que d'IVIAF correspondant à la moitié de la période concernée ont été faites.*

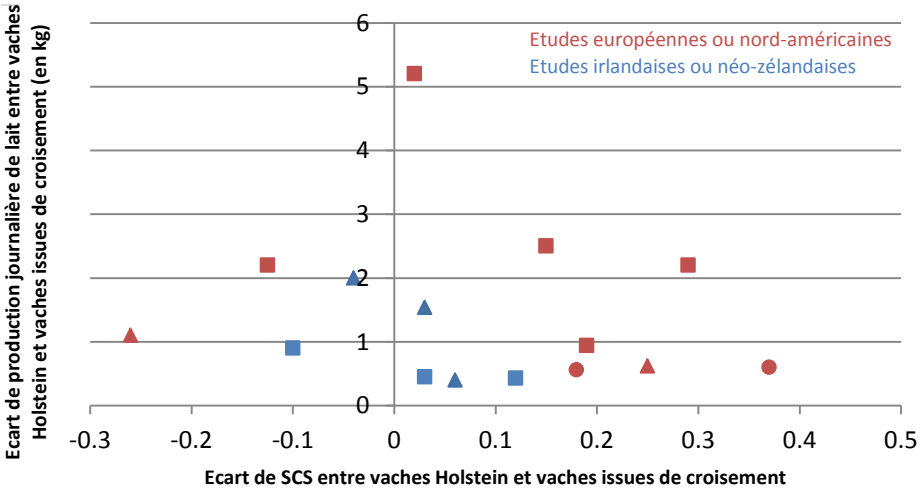


Figure 1-2. Ecart de production (kg/j) et écart de score en cellules somatiques (SCS) entre les vaches primipares (○), multipares (Δ) ou toutes parités confondues (□) de race Holstein et issues de croisement de première génération

Les résultats sont issus de(Dechow et al., 2007; Walsh et al., 2007; Buckley et al., 2008; Fischer et al., 2008; Begley et al., 2009b; Prendiville et al., 2010; Blöttner et al., 2011a; Heins and Hansen, 2012). Lorsque les résultats sur la production laitière étaient pour des lactations 305 jours, la production laitière journalière moyenne a été estimée en divisant le résultat par 305.

2. Etat des connaissances et besoin de recherche sur l'intérêt de l'introduction du croisement entre races laitières dans des ateliers en race Holstein

Les vaches issues de croisement de première génération ont presque toujours démontré de meilleures performances de reproduction que les vaches Holstein dans 12 études publiées dans la littérature (Figure 1-1). Le nombre de jours ouverts[1] 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 littérature. Cette supériorité a souvent été associée à une diminution des performances de production laitière (de 0,02 à 5,2 kg de lait par jour selon les études). Cette diminution a cependant été non significative dans 35% des comparaisons réalisées. Les effets du croisement sur la santé, la morphologie et la longévité des vaches, ainsi que sur la mortalité des veaux ont été peu étudiés, excepté sur la santé de la mamelle (Tableau 1-4). Cependant, celle-ci n'a été principalement caractérisée que par le score logarithmique de concentration en cellules somatiques du lait pour une lactation (SCS). Sur ce critère, les études ont rarement montré d'effet significatif en faveur du croisement (Figure 1-2). Toutefois, le SCS n'est qu'un indicateur indirect de la sensibilité aux mammites cliniques (Rupp and Boichard, 2003). Dans les rares études portant sur cette pathologie (Buckley *et al.*, 2008; Begley *et al.*, 2009b; Prendiville *et al.*, 2010; Heins *et al.*, 2011), Buckley *et al.* (2008) et Heins *et al.* (2011) ont mis en évidence une différence significative du nombre de mammites cliniques en faveur des animaux issus de croisement en référence à la race Holstein. Une diminution de la probabilité de réforme a été mise en évidence en faveur des vaches issues de croisement par rapport aux vaches de race Holstein dans de grands troupeaux texans (Pinedo *et al.*, 2014).

Ces résultats sont issus d'études réalisées dans des conditions très différentes, ce qui pose le problème de la validité de leur comparaison. D'une part, les résultats des études des années 60-70, mêmes si elles sont très complètes en termes de caractères étudiés, ne peuvent pas être comparés directement aux résultats des études plus récentes notamment en raison du progrès réalisé sur la production laitière en race Holstein (Figure 1-3 variation flèche 1). D'autre part, les essais mis en place après les années 2000 ont été majoritairement réalisés dans deux situations très différentes en termes de conditions d'élevage, à savoir soit dans des exploitations laitières avec des niveaux de production élevés pour la moitié d'entre eux, soit en Irlande dans des exploitations laitières très herbagères avec des vêlages groupés (Figure 1-3 variation flèche 2). Enfin, les études sont hétérogènes pour *(1)* les races utilisées dans les croisements avec la race Holstein (Figure 1-3 variation couleur) et *(2)* les indicateurs utilisés pour caractériser la production, la fertilité et la santé.

[1] Nombre de jours ouverts = $\frac{\text{Intervalle vêlage−conception pour les vaches gravides+Intervalle vêlage−jour actuel pour les vaches non gravides}}{\text{Nombre de vaches du troupeau mises ou susceptibles d'être mises à la reproduction}}$

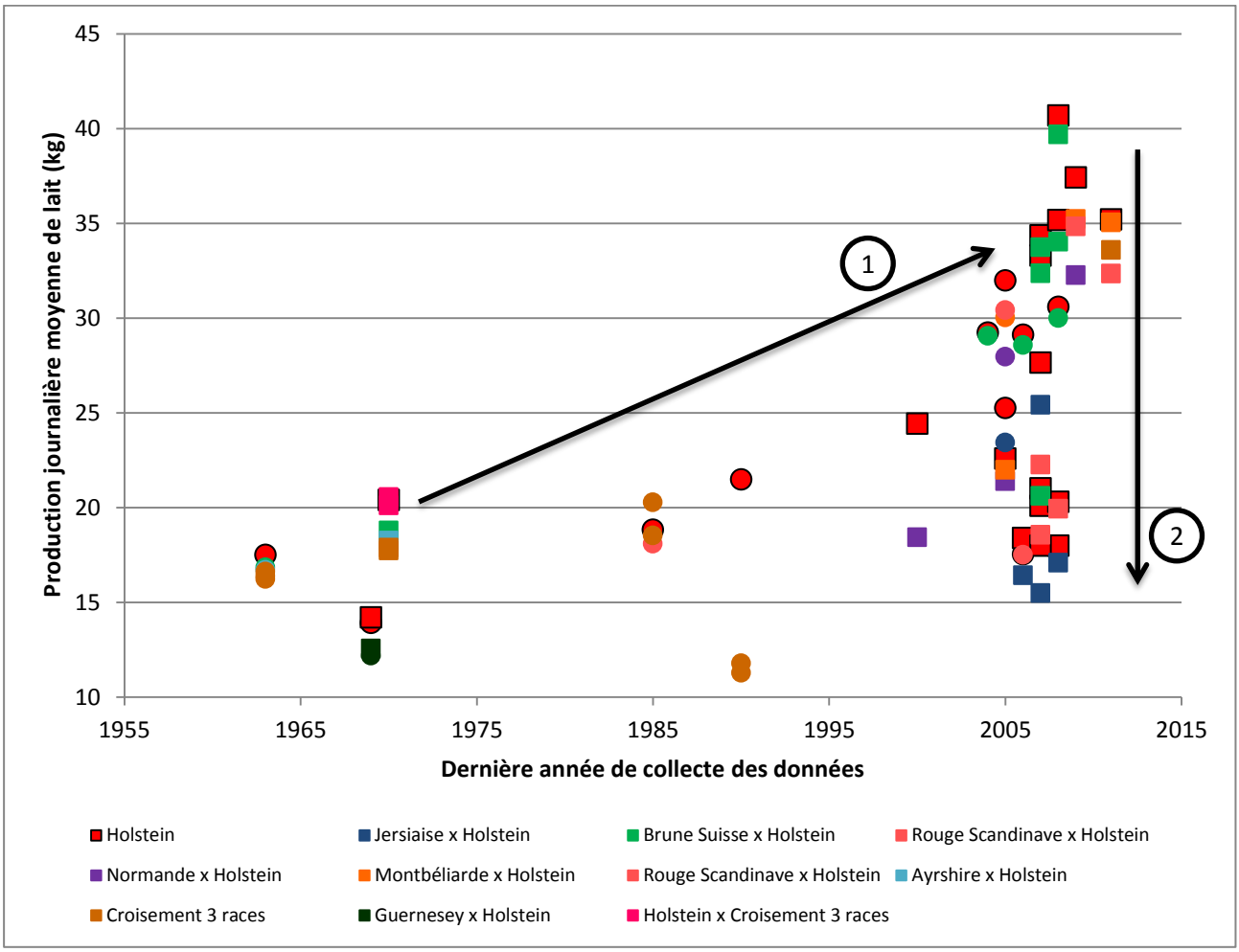


Figure 1-3. Production laitière moyenne journalière de vaches primipares (○) et multipares (□) selon leur type génétique en fonction de la dernière année de collecte des données des 21 publications

Les publications utilisées pour ce graphique sont : (McDowell and McDaniel, 1968a; Pearson *et al.*, 1977; Pedersen and Christensen, 1989; Panicke and Freyer, 1992; Touchberry, 1992; Heins *et al.*, 2006c; Begley *et al.*, 2007; Dechow *et al.*, 2007; Swalve, 2007; Walsh *et al.*, 2007; Waurich, 2007; Buckley *et al.*, 2008; Fischer *et al.*, 2008; Heins *et al.*, 2008; Begley *et al.*, 2009b; Prendiville *et al.*, 2010; Blöttner *et al.*, 2011a; Malchiodi *et al.*, 2011; Prendiville *et al.*, 2011; Heins and Hansen, 2012; Roetta, 2012).

Par exemple, la fertilité peut notamment être évaluée au travers de l'intervalle vêlage-première IA, et/ou du nombre de jours ouverts, et/ou de l'intervalle vêlage-vêlage, et/ou du taux de réussite à la première IA et/ou du nombre de vaches non gravides à la fin de la période de reproduction. Par ailleurs, très peu de résultats des études sur les effets du croisement entre races laitières sont transposables aux ateliers laitiers français car *(1)* les conditions d'élevage sont peu représentatives de celles rencontrées en France aujourd'hui, *(2)* peu d'études ont concerné les croisements de la race Holstein avec des races françaises comme la Montbéliarde ou la Normande (Tableau 1-4) et *(3)* les taureaux des races Montbéliarde et Normande utilisés dans ces études sont peu nombreux et n'étaient pas représentatifs de la variabilité existante au sein du pool de taureaux français (Heins *et al.*, 2006c; Heins *et al.*, 2010). Les études récentes sur le croisement laitier ont porté essentiellement sur les performances techniques des animaux mais rarement sur les performances technico-économiques des ateliers laitiers (Tableau 1-4). Les résultats issus de l'étude de Heins *et al.* (2012), obtenus à partir de faibles effectifs dans des contextes particuliers, ne sont pas suffisamment robustes pour conclure sur l'intérêt technico-économique du croisement laitier, particulièrement pour la France. De plus, l'obtention de ces résultats nécessite un déroulement des études sur de nombreuses années. Par exemple, l'étude réalisée aux Etats-Unis par Heins et al., qui a été initialisée en 2002, a donné lieu à publication des premiers résultats de la première génération en 2006 (Heins *et al.*, 2006b, c, a), puis des résultats complets de la première génération en 2012 (Heins and Hansen, 2012; Heins *et al.*, 2012), les résultats sur les premières lactations de la deuxième génération n'étant toujours pas publiés à l'heure actuelle. En Nouvelle Zélande, la comparaison, par une approche de modélisation-simulation, de troupeaux avec des stratégies en croisement ayant déjà atteint l'état d'équilibre et de troupeaux en race pure a conclu à un avantage économique des stratégies en croisement (Lopez-Villalobos *et al.*, 2000). Cet avantage est essentiellement permis par une augmentation du TB par rapport à la race Holstein. Ce résultat est aussi quasi-impossible à extrapoler directement aux conditions françaises.

Tableau 1-4. Description du matériel et méthode de 22 études sur le croisement laitier dont la fin de collecte des données est après 2000

Références	Pays	Croisements étudiés[1]	Nb vaches	% vaches croisées	Comparaison phénotypique	Estimation génétique	Critères étudiés								
							Prod.	Repro.	STMA	ST autre	Vêlage/Morti.	Morpho.	Veaux	Survie/Long.	Eco.
VanRaden et Sanders,2003	USA	Plus de 4 races	92 471	7,9%		x	x		x						x
VanRaden *et al.*, 2004	USA	Plus de 4 races	92 471	7,9%		x		x							
Wall *et al.*, 2005	UK	FR	408 847	<25%		x	x	x							
Heins *et al.*, 2006c	USA	MO, NO, NR	1447	73,7%	x		x								
Heins *et al.*, 2006b	USA	MO, NO, NR	2327 (survie) 1551 (repro)	68,8% (survie) 65,4% (repro)	x			x						x	
Heins *et al.*, 2006a	USA	BS, MO, NO,NR	5634 (veaux) 2213 (vaches)	88% (veaux) 55,6% (vaches)	x						x				
Heins et Hansen, 2012	USA	MO, NO, NR	1491	72,1%	x		x	x	x						
Heins *et al.*, 2012	USA	MO, NO, NR	1491	72,1%	x		x							x	x
Heins *et al.*, 2008; Heins *et al.*, 2011 ,	USA	JE	149	51%	x		x	x	x			x			
Heins *et al.*, 2010	USA	MO, (HOxJE)xMO	415 (veaux) 337 (vaches)	33,3% (veaux) 52,5% (vaches)	x						x				
Hazel *et al.*, 2014	USA	MO, (HOxJE)xMO	313	47,9%	x		x	x	x			x		x	
Auldist *et al.*, 2007	NZ	JE	378	33,3%	x		x	x							
Bryant *et al.*, 2007	NZ	JE	184 288	NP		x	x								
Dechow *et al.*, 2007	USA	BS	6439	13,6%	x	x	x	x	x						
Waurich, 2007	GER	JE	28591	1,6%	x	x	x	x	x		x			x	
Swalve, 2007	GER	BS, NR	586	35,2%	x		x	x	x					x	
Swalve, 2007	GER	BS	95	52,6%	x		x	x	x					x	
Fischer *et al.*, 2008	GER	BS	95	52,6	x		x	x		x		x			
Blöttner *et al.*, 2011a	GER	BS	105	52,4%	x		x		x			x			
Blöttner *et al.*, 2011b	GER	BS	106	51,9%	x			x			x	x			
Walsh *et al.*, 2007	IRL	MO, NO	1486	15,9%	x	x	x		x						
Walsh *et al.*, 2008	IRL	MO, NO	1486	15,9%	x	x	x	x							
Begley *et al.*, 2007	IRL	NR	1327	22%	x		x	x	x						
Buckley *et al.*, 2008	IRL	NR	3316	19,9%	x		x	x	x					x	
Begley *et al.*, 2009b	IRL	NR	648	25,8%	x		x		x	x					
Begley *et al.*, 2010	IRL	NR	3316	19,9%		x	x		x						
Buckley *et al.*, 2008	IRL	JE	87	33,3%	x		x	x	x					x	
Prendiville *et al.*, 2009	IRL	JE	110	33,6%	x		x								
Prendiville *et al.*, 2010	IRL	JE	162	30,2%	x		x		x						
Prendiville *et al.*, 2011	IRL	JE	110	33,6%	x		x								
Begley *et al.*, 2009a	CA	NR	135	49,6%	x								x		
Penasa *et al.*, 2010	IRL	FR, JE, MO	416 640	18,3%		x	x	x							
Lopez-Villalobos et Spelman, 2010	NZ	JE	53 419	NP		x	x	x							
Schaeffer *et al.*, 2011	CA	BS, JE, NR	175 348	3%		x	x	x			x	x			
Malchiodi *et al.*, 2011	ITA	NR, MO, (HOxNR)xMO	542	20,7%	x		x	x	x						
Cartwright *et al.*, 2012	CA	NR	162	54,3%	x			x		x			x	x	
De Haas *et al.*, 2013	NLD	Plus de 4 races	15396	11,6%		x	x	x	x						
Dhakal *et al.*, 2012	USA	JE	1231	74%	x	x					x		x		
Mendonça *et al.*, 2014	USA	MO	104	50%	x			x		x					
Norberg *et al.*, 2014	DK	NR, JE	56 242	44,8%	x	x	x	x	x						
Pinedo *et al.*, 2014	USA	JE	>50 000	6%	x									x	

Prod. = Production, Repro. = Reproduction, STMA = santé de la mamelle (mammites et/ou score en cellules somatiques), ST autre = autre caractère de santé, Vêlage/Morti. = Facilité de vêlage et mortinatalité, Morpho. = Morphologie, Veaux = croissance et santé des veaux et génisses, Survie/Long. = Survie (à différents stades) et longévité des vaches, Eco. = Economie(profitabilité).

USA = Etats Unis, UK = Royaume Uni, NZ = Nouvelle Zélande, GER = Allemagne, IRL = Irlande, CA = Canada, NLD = Pays Bas, DK = Danemark.

[1]Races utilisées en croisement avec la race Holstein : FR = Frisonne, MO = Montbéliarde, NO = Normande, NR = Rouge nordique (danoise, suédoise et/ou norvégienne), BS = Brune Suisse, JE = Jersiaise.

NP = non précisé (certains effectifs n'étaient pas précisés dans le matériel et méthode des publications

3. Formulation de la problématique de l'évaluation de l'intérêt de l'introduction du croisement entre races laitières dans des ateliers en race pure Holstein

Au-delà des limites liées aux effectifs et aux délais d'obtention des résultats, une comparaison rigoureuse des performances technico-économiques obtenues avec ou sans l'introduction du croisement entre races laitière implique une homogénéité des ateliers entre lesquels la comparaison est réalisée. Ceci nécessite donc que la structure générale de ces ateliers, les grands choix de bâtiments et d'équipements, le système fourrager et les grandes options de la conduite de l'alimentation et de la reproduction soient identiques. Cependant, dans la « vraie vie », ceci s'avère extrêmement délicat étant donné la diversité des pratiques en élevage et la disparition du troupeau de référence en race pure lors de l'introduction du croisement entre races laitières.

Une approche par modélisation-simulation, bien que reposant sur une représentation partielle de la réalité, permettrait de comparer plus facilement et rapidement les performances technico-économiques sur le long terme d'un même atelier laitier dans lequel serait introduit ou non le croisement selon différentes modalités. Une telle approche permettrait également d'évaluer les intérêts technico-économiques du croisement dans différents types d'ateliers.

L'évaluation à conduire pour atteindre l'objectif général de thèse demande aussi à ne pas créer des biais en confondant l'introduction du croisement avec des changements significatifs de l'outil de production et des charges de structure. Le plus naturel est alors de les fixer. Il s'en suit que le critère d'utilité économique pour la comparaison, nécessaire et suffisant, peut ne considérer que la somme des produits bruts et celle des charges opérationnelles de l'atelier et être ainsi de type marge brute. Ce critère présente en outre l'avantage d'être un outil facile d'utilisation et connu de tous les acteurs du monde agricole permettant de comparer les résultats dans le temps et dans l'espace entre des ateliers similaires (Gaudin *et al.*, 2011).

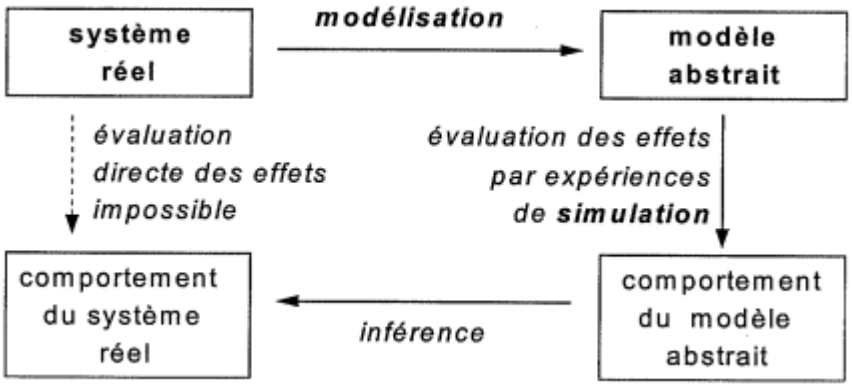


Figure 1-4. Places respectives des processus de modélisation et de simulation (Seegers *et al.*, 1999)

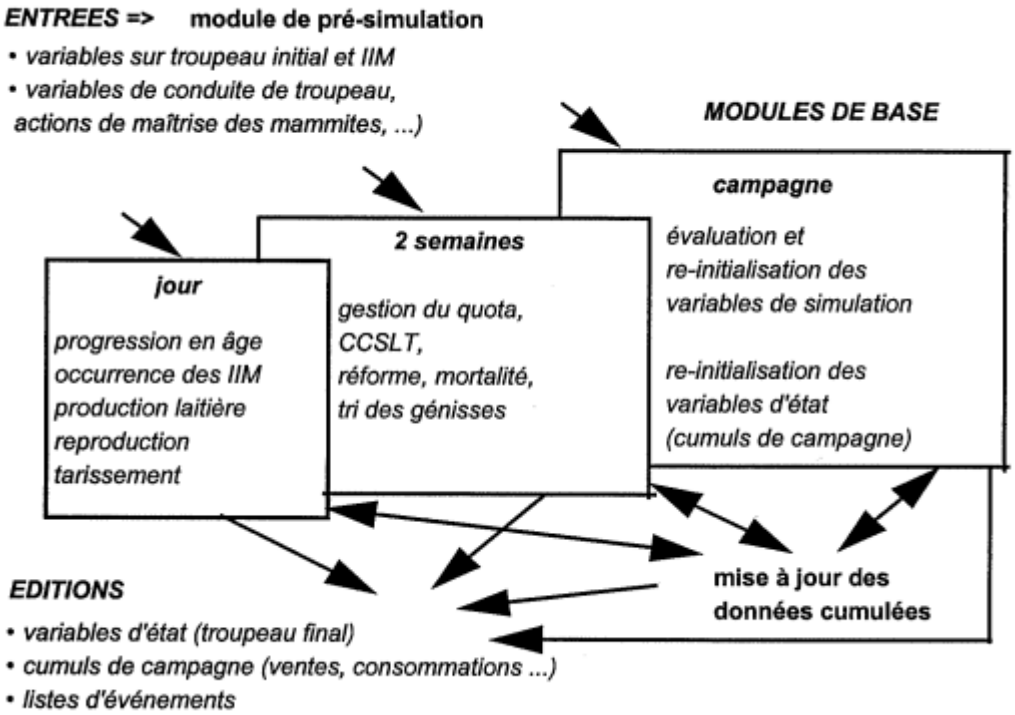


Figure 1-5. Schéma général simplifié du simulateur ECOMAST développé par l'UMR INRA-Oniris BioEpAR (Hortet, 2000; Robert-Briand, 2006)

IIM = Infections intra-mammaires, CCSLT = Concentration en cellules somatiques du lait de tank

4. Approche par modélisation-simulation pour évaluer l'intérêt de l'introduction du croisement entre races laitières dans des troupeaux initialement en race Holstein

Sur notre question de recherche, la simulation nécessite de disposer d'un modèle du fonctionnement d'un atelier de bovins laitiers (Figure 1-4). La voie des modèles bioéconomiques appliqués à l'échelle de l'atelier de production a été largement explorée par la recherche sur les systèmes d'élevage par les nutritionnistes et les généticiens (Dijkhuizen *et al.*, 1986; Sørensen *et al.*, 1992; Jalvingh *et al.*, 1993). Les modèles d'optimisation, généralement construits sur des équations mathématiques supposent une rationalité complète dans la prise de décision et visent à déterminer la valeur des paramètres choisis qui permettent d'optimiser un objectif donné. En revanche, les modèles de simulation du fonctionnement de troupeau admettent implicitement l'impossibilité d'exprimer la totalité des objectifs et contraintes et cherchent à tester l'impact de différentes pratiques d'élevage sur le troupeau et sa production (modèle de la décision de Simon, 1986). Ces modèles sont presque toujours des modèles dynamiques à évènements discrets. En effet, une approche statique, correspondant à la comparaison de l'état de départ avec l'état d'arrivée, ne permettrait pas d'étudier les phases de transition qui font pourtant partie de la question de l'étude du fonctionnement du troupeau. Le pas de temps majoritairement utilisé est le jour, notamment pour modéliser la production laitière (Puillet *et al.*, 2010). Dans ces modèles, les animaux sont représentés soit par des classes d'animaux caractérisées par leur effectif et les descripteurs d'un animal moyen, soit individuellement. Les modèles représentant les animaux en classes peuvent être déterministes et reposent généralement sur une programmation linéaire du type Chaîne de Markov (Kristensen, 1987; Lopez-Villalobos *et al.*, 2000). Les modèles individu-centrés présentent l'intérêt de représenter plus finement le troupeau que les modèles en classes, et notamment de pouvoir intégrer la diversité des individus et la variabilité de leur réponses biologiques (Puillet *et al.*, 2010). Toutefois, pour une représentation à l'échelle de la vache, le recours à un modèle en partie stochastique s'impose, au moins en ce qui concerne la modélisation des processus liés à la reproduction (Dijkhuizen *et al.*, 1986; Marsh *et al.*, 1987; Brun-Lafleur *et al.*, 2013).

Un modèle individu-centré, dynamique et mécaniste serait donc pertinent pour réaliser des simulations permettant d'évaluer l'intérêt technico-économique du croisement dans l'atelier formé sur un troupeau laitier. En effet, dans le cas de notre étude, les différences entre les individus sont *a priori* relativement faibles et les décisions mimées sont partiellement prises en situation d'information incomplète ou imparfaite, l'éleveur ne connaissant pas au jour j la production laitière ni le statut de reproduction à venir. D'une part, un modèle individu-centré présenterait l'intérêt de représenter des différences entre les individus relativement faibles. D'autre part, un modèle dynamique permettrait de prendre en compte l'évolution du stade physiologique des vaches laitières

au cours du cycle de lactation/reproduction, qui impacte leurs réponses biologiques au cours du temps. Enfin, un modèle mécaniste, en construisant finement les étapes des différents processus, permettrait de comprendre et d'identifier les mécanismes à l'origine d'une différence potentielle de résultats entre un troupeau en race pure et un troupeau en croisement par décomposition des résultats agrégés finaux. Finalement, le modèle de fonctionnement de troupeau de bovins laitiers développé par l'UMR INRA-Oniris BioEpAR (Hortet, 2000 ; Robert-Briand, 2006 ; Figure 1-5) pourrait être utilisé pour réaliser des simulations permettant d'évaluer l'intérêt technico-économique du croisement laitier. Toutefois, pour répondre à notre question de recherche, des modifications seront à apporter.

La construction et le paramétrage d'un modèle permettant d'étudier l'intérêt du croisement laitier pour une conduite de troupeau donnée nécessite la représentation de l'élaboration des performances phénotypiques des individus à partir de leurs valeurs génétiques. Une évaluation technico-économique pertinente de l'effet du croisement n'est en effet possible que si le seul changement entre protocoles simulés correspond à l'introduction du croisement, c'est-à-dire à une modification de la génétique des animaux du troupeau. Par conséquent, une représentation d'une partie des processus permettant de déterminer la valeur génétique des individus de race pure et issus de croisement est nécessaire. Le modèle développé par l'UMR INRA-Oniris BioEpar ne représentant pas ces processus, la construction et le paramétrage d'un module de gestion des accouplements et transmission des valeurs génétiques basé sur la connaissance des écarts génétiques entre races et des effets d'hétérosis liés aux accouplements entre la race Holstein et d'autres races laitières françaises est donc indispensable. Aucune étude préexistante n'a estimé les paramètres génétiques du croisement entre la race Holstein et d'autres races laitières françaises. En effet, dans les études réalisées à l'étranger sur ces croisements (Tableau 1-4), l'absence de performances pour des vaches de race pure Montbéliarde ou Normande n'a pas permis d'estimer les paramètres génétiques et notamment les effets génétiques d'hétérosis. L'évaluation des performances des animaux issus de croisement par rapport à la race pure est donc une étape préliminaire indispensable à la modélisation.

Les scenarios de simulations peuvent être en partie construits à partir de l'identification des pratiques de croisement existant en France. Ceci permettrai *(1)* d'ancrer les simulations dans la réalité du terrain, *(2)* d'éliminer des pratiques qui apparaissent clairement vouées à l'échec et (3) de proposer des pratiques innovantes potentiellement pertinentes. A notre connaissance, aucune description précise des pratiques de croisement dans les troupeaux laitiers français n'existe. Les seules informations disponibles à l'échelle du troupeau ont été obtenues par enquêtes ciblées qui ne permettent pas d'avoir une vision globale des pratiques de croisement en France (Beaumard, 2010).

Une étude de ces pratiques au travers de bases de données telles que celles des inséminations artificielles et du contrôle laitier permettrai d'avoir une vision quasiment exhaustive des pratiques d'accouplement, donc de croisement, en exploitations laitières mais également de caractériser les performances de production et de reproduction des vaches utilisées pour le croisement.

5. Objectifs détaillés et contenu de la thèse

L'évaluation par simulations de l'intérêt technico-économique de différentes pratiques de croisement pour différents types d'ateliers laitiers français repose sur trois étapes successives préalables :

- caractériser les pratiques de croisement dans les ateliers laitiers français
- estimer les effets génétiques du croisement laitier en France
- adapter le modèle de fonctionnement de troupeau de bovins laitiers développé par l'UMR INRA-Oniris BioEpAR

Les travaux rapportés se divisent en 5 chapitres :

- Chapitre 2 : Caractérisation des pratiques du croisement entre races laitières dans les ateliers laitiers français : construction d'une typologie à partir des bases de données des inséminations artificielles et du contrôle laitier.
- Chapitre 3 : Estimation des paramètres génétiques de la consanguinité et du croisement pour les caractères de production et de reproduction chez les vaches de race Holstein, Montbéliarde et Normande : réalisation d'une évaluation génétique à partir du modèle de l'évaluation génétique français des populations de vaches de race pure Holstein, Montbéliarde et Normande et des vaches issues des croisement Holstein x Montbéliarde ou Holstein x Normande au contrôle de performance.
- Chapitre 4 : Modélisation des fonctions biologiques des vaches, des décisions dans la conduite de troupeau et des performances technico-économiques d'un atelier de bovins laitiers : présentation du modèle et des modules d'intérêt.
- Chapitre 5 : Evaluation de l'intérêt technico-économique du croisement entre races laitières par simulation : présentations des protocoles simulés, des critères évalués et des résultats obtenus.
- Chapitre 6 : Discussion générale et perspectives.

Chapitre 2 : Caractérisation des pratiques de croisement entre races laitières dans les ateliers laitiers français

Les connaissances sur le croisement entre races laitières en France se limitent quasiment à des informations statistiques sur les types génétiques les plus fréquents obtenues à partir des bases de données nationales d'identification des bovins (Bougouin, 2010; Joubel, 2012). Il ressort ainsi que le croisement laitier est mis en œuvre de façon très marginale si l'on examine globalement l'ensemble des troupeaux laitiers français. Toutefois, il est probable que, parmi les éleveurs de vaches de race Holstein qui ont mis en place le croisement entre races laitières, certains ont continué sur plusieurs années alors que d'autres sont revenus à la race Holstein. On peut également supposer que parmi les éleveurs qui ont continué à conduire des accouplements en croisement sur leur troupeau, certains se sont tourné vers le croisement d'absorption alors que d'autres ont mis en œuvre des schémas de type alternatif ou rotatif sans que des investigations aient porté sur ces pratiques. Un abord des pratiques de croisement entre races laitières à partir des informations du contrôle laitier et des IA serait relativement facile et fournirait une vision exhaustive des pratiques de croisement en France. Dans un premier temps, nous avons étudié les données d'IA dans des troupeaux majoritairement en race Holstein, puis nous nous sommes intéressés aux pratiques de croisement entre races laitières dans des troupeaux d'intérêt.

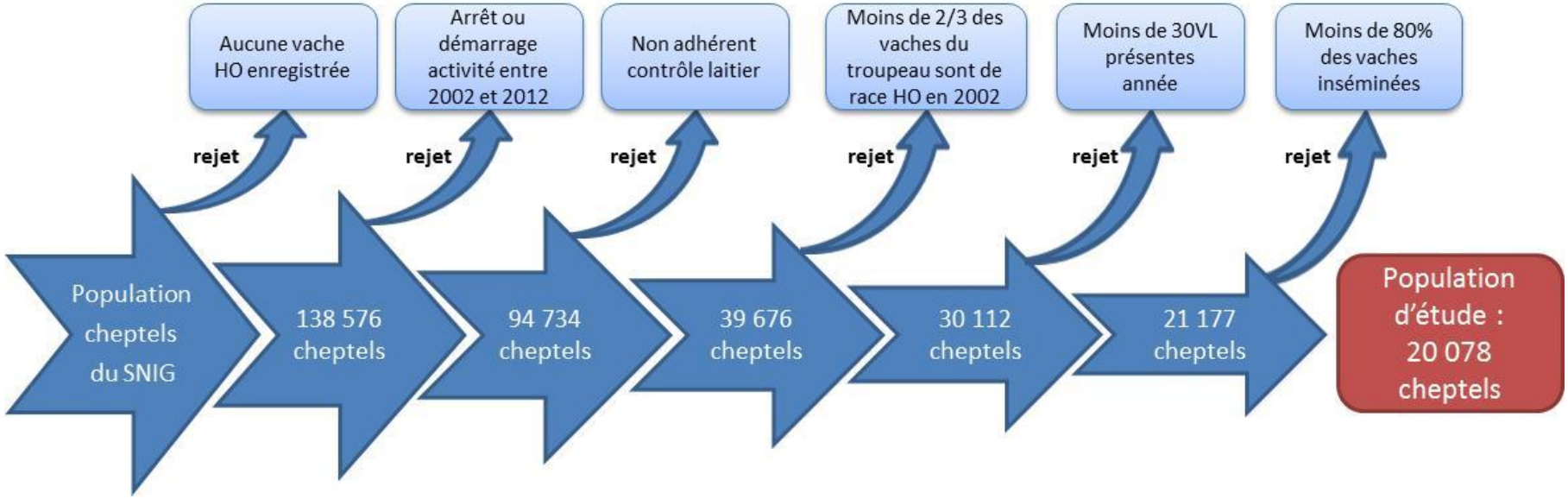
1. Description des inséminations artificielles des vaches de race Holstein avec des taureaux laitiers

1.1. Matériel et méthode

1.1.1. Sélection des données, période d'étude et population d'étude

Les données des IA de tous les troupeaux entre Juillet 2002 et Juin 2012 ont été obtenues à partir du Système d'Information Génétique français (SNIG). Chaque campagne d'IA a été définie entre le 1er Juillet de l'année n et le 30 Juin de l'année n+1. Notre période d'étude a donc comporté 10 campagnes d'IA entre Juillet 2002 et Juin 2012. La sélection des troupeaux dans notre population d'étude a reposé sur 4 critères. Les troupeaux devaient *(1)* être adhérents au contrôle laitier sur toute la durée de la période d'étude, *(2)* être composés d'au moins ⅔ de vaches de race Holstein au 1er Juillet 2002, *(3)* être composés d'au moins 30 vaches présentes en moyenne sur chaque campagne d'IA et *(4)* avoir au moins 80% des vaches avec au moins une IA enregistrée sur chaque champagne d'IA. La description des différentes étapes d'inclusion/exclusion est donnée dans la Figure 2-1.

Figure 2-1. Description des étapes d'inclusion/exclusion des troupeaux composant la population d'étude de la description des inséminations sur les vaches de race Holstein



Les troupeaux composant cette population d'étude ont ensuite été caractérisés par leur niveau moyen de production laitière (PL) sur 305 jours, leur taille et le regroupement ou non des vêlages pour chaque campagne d'IA selon les procédures suivantes :

- La taille des troupeaux a été calculée en additionnant les jours de présence de chaque vache durant la campagne d'IA considérée, puis en divisant cette somme par 365. Les troupeaux ont ensuite été classés sur la base des quartiles pour chaque campagne d'IA.
- La périodicité des vêlages a été déterminée selon l'écart-type des dates de vêlages sur une campagne d'IA. Les troupeaux ont été classés comme ayant des vêlages groupés lorsque l'écart-type était inférieur à 70 jours. Dans le cas contraire, ils ont été classés comme ayant des vêlages étalés.
- Le niveau moyen de PL sur 305 jours des troupeaux a été calculé à partir des bases de données du SNIG. Chaque lactation a été assignée à une campagne d'IA lorsque le stade de 150 jours de lactation était enregistré sur cette campagne. Les lactations de moins de 90 jours ou de plus de 450 jours n'ont pas été considérées pour le calcul de cette moyenne car jugées trop exceptionnelles.

1.1.2. Analyses des inséminations artificielles des vaches de race Holstein dans la population d'étude

Chaque IA enregistrée sur une vache de race Holstein a été caractérisée par la campagne d'IA correspondante, la race du taureau d'IA, le rang de l'IA sur la lactation considérée, le numéro de lactation et la PL 305j de la vache inséminée. Le rang des IA a été classé en 4 catégories: 1ère IA après le vêlage, 2ème IA après le vêlage, 3ème IA après le vêlage et 4ème IA et plus après le vêlage. Le numéro de lactation des vaches a été classé en 4 catégories : 1ère lactation, 2ème lactation, 3ème lactation et 4ème lactation ou plus. A partir des quartiles calculés pour chaque troupeau et chaque campagne, PL sur 305 jours des vaches a été classée en 4 catégories : PL sur 305 jours dans le premier quartile, PL sur 305 jours dans le 2ème quartile, PL sur 305 jours dans le 3ème quartile et PL sur 305 jours dans le 4ème quartile.

Une analyse descriptive des IA avec des races de taureaux laitiers autres que Holstein a d'abord été réalisée. Puis, l'analyse a porté sur l'identification du rang préférentiel de l'IA pour implanter du croisement entre races laitières, des différences de caractéristiques entre les vaches inséminées avec des taureaux de race Holstein et des vaches inséminées avec des taureaux d'une autre race laitière, ainsi que sur les caractéristiques des troupeaux dans lesquels des IA sur des vaches Holstein avec une autre race laitière ont été enregistrées. L'enregistrement d'une IA avec une autre race laitière a été considéré comme une variable binaire. Une régression logistique (SAS Institute, 2009) a été réalisée pour modéliser les interactions entre cette variable et le rang de l'IA, la parité et la PL sur 305 jours relative de la vache inséminée, ainsi que la taille, le niveau de production moyen et la périodicité des vêlages des troupeaux. Les interactions par paires ont été testées.

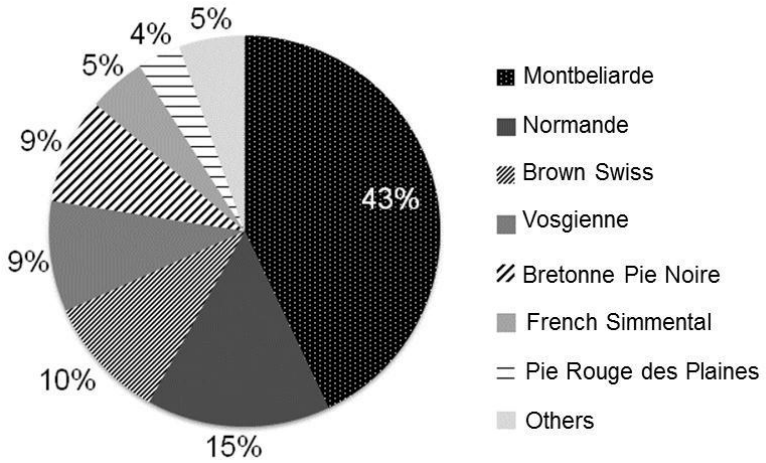


Figure 2-2. Races des taureaux d'insémination autres que Holstein utilisées pour inséminer des vaches de race Holstein.

Tableau 2-1. Odds ratios ajustés pour l'interaction entre la production laitière sur 305 jours de la vache inséminée relativement au troupeau, à la campagne d'IA et l'occurrence d'une IAC.

PL relative de la vache inséminée[1]	Nombre d'IA enregistrées	Fréquence des IAC (%)	OR ajusté (IC 95%)
Forte	3 707 565	2,04	1
Moyenne+	3 610 470	1,66	0,98 (0,97 – 0,99)
Moyenne-	3 348 370	1,40	0,96 (0,95 – 0,97)
Faible	3 193 413	1,25	0,97 (0,96 – 0,99)

IA = Insémination artificielle, IAC = Insémination artificielle avec un taureau de race laitière autre que Holstein, PL = Production laitière, OR = Odds ratios, IC = Intervalle de confiance

[1]Les PL 305 jours des vaches ont été classées pour un même troupeau et une même campagne d'IA selon les quartiles, c'est-à-dire que la classe Forte correspond aux PL classées dans le 4ème quartile pour un troupeau-campagne, la classe Moyenne+ aux PL dans le 3ème quartile, la classe Moyenne- aux PL dans le 2ème quartile et la classe Faible aux PL dans le 1er quartile.

Tableau 2-2. Odds ratios ajustés pour l'interaction entre le numéro de lactation de la vache de race Holstein inséminée et l'occurrence d'une IAC selon le rang de l'IA dans une lactation (1ère IA vs 4ème IA et plus).

Rang de l'IA	Parité	Nombre d'IA enregistrées	Fréquence des IAC (%)	OR ajusté (IC 95%)
1	1	2 748 250	0,35	1
	2	1 912 034	0,56	1,58 (1,54 – 1,63)
	3	1 191 285	0,71	1,98 (1,92 – 2,04)
	4	1 194 504	1,02	2,76 (2,69 – 2,84)
4	1	499 814	8,15	1
	2	344 917	8,72	1,06 (1,04 – 1,08)
	3	213 874	9,03	1,09 (1,07 – 1,11)
	4	236 232	10,02	1,21 (1,19 – 1,23)

IA = Insémination artificielle, IAC = Insémination artificielle avec un taureau de race laitière autre que Holstein, OR = Odds ratios, IC = Intervalle de confiance

1.2. Résultats

Au total, les enregistrements de 13 859 818 IA sur 3 451 701 vaches de race Holstein présentes dans 20 078 troupeaux ont été retenus. Dans plus de 53% des troupeaux (N=11 155), au moins une IA avec une race laitière autre que Holstein a été enregistrée entre Juilllet 2002 et Juin 2012. Cependant, les IA sur les vaches de race Holstein avec une autre race laitière n'ont représenté que 1,6% (N=222 497) de toutes les IA retenues dans notre étude. Parmi les races laitières autres que la race Holstein utilisées pour inséminer les vaches de race Holstein, la race Montbéliarde a été la plus représentée (43%), suivie des races Normande et Brune des Alpes (15% et 10%, respectivement) (Figure 2-2). Certaines races locales telles que la Vosgienne ou la Bretonne Pie Noire ont été également bien représentées (9% chacune). Les races Simmental Française et Pie Rouge des Plaines ont représenté 5% et 4%, respectivement, 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 ont été peu représentées.

Les interactions entre la PL sur 305 jours relative des vaches et les autres effets fixes ont été non significatives. Les odds ratios ont montré que les vaches de race Holstein les plus productives d'un troupeau étaient plus susceptibles d'être inséminées avec un taureau d'une autre race laitière que les vaches les moins productives du troupeau (Tableau 2-1).

Les interactions entre le rang de l'IA et la parité de la vache inséminée, entre le rang de l'IA et le niveau moyen de PL sur 305 jours du troupeau, entre le rang de l'IA et la périodicité des vêlages du troupeau ainsi qu'entre le rang de l'IA et la taille du troupeau ont été significatives. Toutefois, indépendamment des autres facteurs, les vaches Holstein ont été plus souvent inséminées avec une autre race laitière à partir de la 4ème IA après le vêlage que dès la 1ère IA après le vêlage. En raison des interactions significatives, les odds ratios pour les effets de la parité, du niveau moyen de PL sur 305 jours du troupeau et de la périodicité des vêlages dans le troupeau sont donnés pour la 1ère IA après vêlage et la 4ème IA et plus après vêlage (Tableaux 2-2, 2-3 et 2-4). Il est apparu que les vaches de race Holstein multipares sont plus souvent inséminées avec une autre race laitière que les vaches de race Holstein primipares et notamment pour la 1ère IA après vêlage (Tableau 2-2). Les IA sur vaches de race Holstein avec une autre race laitière ont été plus fréquentes dans les troupeaux de faible niveau de PL sur 305 jours, notamment pour la 1ère IA après vêlage (Tableau 2-3). L'effet de la périodicité des vêlages sur les IA sur vaches de race Holstein avec une autre race laitière a été plus contrasté avec plus de 1ère IA mais moins de 4ème IA et plus après vêlage sur vache Holstein avec une autre race laitière dans les troupeaux avec des vêlages groupés que dans les troupeaux avec des vêlages étalés (Tableau 2-4). Enfin, l'effet de la taille du troupeau a très peu impacté la fréquence des IA sur vaches Holstein avec une autre race laitière avec cependant plus d'IA avec une autre race laitière des vaches de race Holstein dans les troupeaux les plus petits à partir de la 4ème IA.

Tableau 2-3. Odds ratios ajustés pour l'interaction entre le niveau moyen de production laitière du troupeau et l'occurrence d'une IAC selon le rang de l'IA dans une lactation (1ère IA vs 4ème IA et plus).

Rang de l'IA	Niveau de production du troupeau[1]	Nombre d'IA enregistrées	Fréquence des IAC (%)	OR ajusté (IC 95%)
1	Fort	1 918 083	0,27	1
	Moyen+	1 866 763	0,40	1,45 (1,40 – 1,50)
	Moyen-	1 752 678	0,53	1,90 (1,84 – 1,97)
	Faible	1 508 549	1,27	4,55 (4,41 – 4,69)
4	Fort	423 105	7,36	1
	Moyen+	347 178	8,59	1,19 (1,17 – 1,21)
	Moyen-	297 565	9,22	1,28 (1,25 – 1,30)
	Faible	226 989	11,19	1,56 (1,54 – 1,59)

IA = Insémination artificielle, IAC = Insémination artificielle avec un taureau de race laitière autre que Holstein, OR = Odds ratios, IC = Intervalle de confiance

[1]Les niveaux de production des troupeaux ont été classés pour une même campagne d'IA selon les quartiles, c'est-à-dire que la classe Fort correspond aux troupeaux dans le 4ème quartile pour le niveau de production de la campagne, la classe Moyen+ aux troupeaux dans le 3ème quartile, la classe Moyen- aux troupeaux dans le 2ème quartile et la classe Faible aux troupeaux dans le 1er quartile.

Tableau 2-4. Odds ratios ajustés pour l'interaction entre la périodicité des vêlages des troupeaux et l'occurrence d'une IAC selon le rang de l'IA dans une lactation (1ère IA vs 4ème IA et plus).

Rang de l'IA	Périodicité des vêlages[1]	Nombre d'IA enregistrées	Fréquence des IAC (%)	OR ajusté (IC 95%)
1	Groupée	6 102 425	0,68	1
	Etalée	995 975	0,53	0,81 (0,79 – 0,83)
4	Groupée	1 231 108	6,29	1
	Etalée	143 728	8,51	1,43 (1,40 – 1,47)

IA = Insémination artificielle, IAC = Insémination artificielle avec un taureau de race laitière autre que Holstein, OR = Odds ratios, IC = Intervalle de confiance

[1]Les vêlages ont été définis comme groupés lorsque l'écart-type des dates de vêlage était inférieur à 70 jours pour une campagne

1.3. Implication de ces résultats pour décrire les pratiques de croisement dans des troupeaux d'intérêt

Les objectifs de cette première étude était de *(1)* caractériser les IA des vaches de race Holstein dans des troupeaux en race Holstein en 2002 et *(2)* d'identifier des critères permettant de discriminer les troupeaux dans lesquels une pratique de croisement entre races laitière a été mise en place de ceux dans lesquels le croisement entre races laitières est anecdotique.

Sur toute la population des troupeaux en race Holstein en 2002, les IA entre une vache Holstein et un taureau d'une autre race laitière ont été très rares et n'ont représenté que 1,6% du total des IA enregistrées sur les vaches Holstein. Cependant, dans plus de la moitié des troupeaux de notre population, au moins une IA avec une autre race laitière a été enregistrée sur toute la période d'étude. Les autres races laitières utilisées pour inséminer les vaches Holstein ont été majoritairement les deux autres grandes races françaises (Montbéliarde et Normande) mais également des races de plus petit effectif ou locales (Brune des Alpes, Vosgienne, Simmental Française, Bretonne Pie Noire). Les IA avec une autre race laitière ont été beaucoup plus fréquentes à partir de la 4ème IA après le vêlage et pour des vaches multipares. Le niveau de production laitière des vaches a finalement été peu discriminant pour les IA avec une autre race laitière par rapport aux IA en race Holstein. Les IA avec une autre race laitière ont été plus fréquentes dans les élevages avec le plus faible niveau de production moyen et dans les élevages avec des vêlages groupés. Dans une grande majorité des troupeaux, sur une campagne, moins de 10% des vaches Holstein étaient inséminées avec une autre race laitière.

A la suite de cette première étude, pour identifier des troupeaux initialement en race Holstein dans lesquels une pratique de croisement entre races laitières a été introduite, nous avons choisi comme critère discriminant la proportion de vache Holstein inséminées avec une autre race laitière dès la 1ère IA après le vêlage. En effet, il nous a semblé qu'une véritable intention, ou au moins un essai, d'introduire une pratique de croisement laitier peut être associée à l'IA des vaches Holstein avec une autre race laitière dès la 1ère IA après le vêlage couplé à une mise à la reproduction des vaches F1 nées de ces IA.

2. Article soumis 'Dairy Crossbreeding in French Holstein Herds'

Dairy Crossbreeding in French Holstein Herds

C. Dezetter[A,B,C], C. Côrtes[C], C. Lechartier[C], P. Le Mezec[D], S. Mattalia[D] and H. Seegers[B]

[A]LUNAM, Unité de Recherche Systèmes d'Élevage, École Supérieure d'Agriculture d'Angers, 55 rue Rabelais, 49007 Angers, France

[B]INRA, Oniris, UMR BIOEPAR, La Chantrerie, 44307 Nantes, France

[C]Coopex Montbéliarde, 4 rue des Epicéas, 25640 Roulans, France

[D]Institut de l'Elevage, 149 rue de Bercy, 75595 Paris, France

[A]Corresponding author: Charlotte Dezetter, 55 rue Rabelais, 49000 Angers, c.dezetter@groupe-esa.com

Summary text. Functional skills of Holstein cows have decreased while crossbreeding is known to be a way to improve them. This study aimed at describing crossbreeding strategies in French Holstein herds between 2002 and 2012. In a small pool of herds, three main crossbreeding strategies were identified: breed transition; backcrossing to Holstein; and rotational crossbreeding. Even if most of these herds were in breed transition, a recent increasing interest in rotational cross-mating requires further study to provide advice to farmers.

Abstract. Functional skills of Holstein cows decreased over last decades. However, crossbreeding is known to be a way to improve them but seems little implemented. This study aimed at describing dairy crossbreeding strategies in French Holstein herds between 2002 and 2012, from artificial insemination (AI) records. From the analysis of services on Holstein cows, we identified 305 herds with the criterion "at least 10% of Holstein cows were cross-bred at first service at least for two breeding campaigns". Five different crossbreeding strategies were identified in these herds: (1) backcrossing to Holstein with no selection on cows or on bulls identified in 14% of them; (2) breed transition with the highest ranking bulls for milk yield breeding value in 29%; (3) breed transition on the highest yielding Holstein cows in 17%; (4) rotational crossbreeding involving the Holstein, Montbéliarde, Brown Swiss and Scandivian Red breeds in 17%; and (5) breed transition with some backcrossing to Holstein on the lowest yielding Holstein cows in 23%. Even if dairy-crossbreeding was generally little used, we found a recent increase of interest in cross-rotational mating.

Key words: cattle, Holstein, dairy-crossbreeding

2.1. Introduction

In France, like in most developed countries, the Holstein breed dominates dairy production, representing today 65% of the dairy cows (Institut de l'Elevage, 2014). However, fertility and robustness of Holstein cows have decreased worldwide (Sewalem *et al.*, 2008; Walsh *et al.*, 2011) with the improvement of milk yield and the increase in inbreeding rate observed over the last decades in this breed (Mattalia *et al.*, 2006; Mc Parland *et al.*, 2007). A larger account for functional traits in total merit indices and genomic selection led to this tendency being reversed (Veerkamp and Beerda, 2007; Berglund, 2008). However, for farmers with high expectations on functional traits, dairy crossbreeding may be an alternative solution, through both additive and non-additive genetic effects such as heterosis (Sørensen *et al.*, 2008). Indeed, interest for dairy crossbreeding has clearly grown in New Zealand, where 43% of dairy cows are crossbreds (DairyNZ, 2013). Moreover, countries with a dominancy of purebreds like the United States (Heins *et al.*, 2006c), Germany (Freyer *et al.*, 2008), Denmark (Sørensen *et al.*, 2008) and Ireland (Begley *et al.*, 2007) engaged research about dairy crossbreeding.

The objectives of this study were to describe dairy crossbreeding strategies used in France from 2002 to 2012 in herds with consistent interest. Crossbreeding strategies were investigated through *(i)* characteristics of Holstein dams and sires to produce the first generation of crossbreds (F1), *(ii)* breed of service bulls mated to female F1 crossbreds, and *(iii)* breed of service bulls mated to second generation female crossbreds (F2).

2.2. Material and methods

2.2.1. Data

Artificial insemination (AI) records between July 2002 and July 2012 were extracted from the French National Genetic Information System (SNIG). Date of service, service number, bull's identification number, bull's breed, birth year and parity of the cow and herd identification number were obtained from AI records. Because most of the cows would not be old enough to be inseminated, birth years after 2010 were not taken into account. Yearly breeding campaigns were defined from 1st July of a year to 30th June of the following year. Hence, depending on their date, services were assigned to one of the ten breeding campaigns from July 2002 to June 2012. Cows were identified as pure Holstein, F1 crossbred or second generation crossbred (F2). For Holstein cows, 305-day lactation records were also extracted. For service bulls, estimated breeding values (EBV) for milk yield, milk fat content, milk protein content and conception rate were extracted from the SNIG.

2.2.2. Pre-processing of data and selection of a sub-population of herds

The objective of this pre-processing step was to identify simple criteria to define more or less consistent crossbreeding strategy in Holstein herds. Therefore, only herds where at least 80% of their cows were Holsteins on first July 2002 were retained. According to bull breed, services were defined as pure breeding, dairy crossbreeding or beef crossbreeding. Frequencies of pure breeding, dairy crossbreeding and beef crossbreeding per herd were computed. Among the 28,691,426 AI records from 6,175,930 Holstein cows in 20,063 herds, 86.7% were classified as pure breeding, 12.0% as beef crossbreeding and 1.3% as dairy crossbreeding. When we considered only first services, the proportions became 92.6% pure breeding services, 6.8% beef crossbreeding services and 0.6% dairy crossbreeding services. Indeed, Holstein cows were more often cross-bred for the first time at fourth or further service (50%) rather than at first service (27%).

The second step was to identify herds with more or less consistent crossbreeding strategy. A selection was performed based on crossbreeding occurrence at first service. Indeed, a true intention to move towards a reasoned crossbreeding strategy, or to implement a trial into such direction, can be considered as associated with crossbreeding Holstein cows at first service. To minimise circumstantial effects, we selected herds where at least 10% of Holstein cows were cross-bred at first service at least for two breeding campaigns during the study period. This threshold was chosen in order to select herds with a sufficient number of crossbred females kept for production per herd. We recorded per herd, the year when 10% of Holstein cows were cross-bred for the first time. A F1 conservation rate within herd was computed as number of F1 crossbred females with AI records divided by number of F1 crossbred females born, to verify the relevancy of the threshold chosen.

2.2.3. Variables

From lactation records, Holstein cows were ranked, within-herd, for milk yield, milk fat content and milk protein content based on quarters per breeding campaign. Then we computed percentages of cross-bred Holstein cows in the first quarter (i.e. top quarter) for milk yield, milk fat content and milk protein content as number of cross-bred Holstein cows in the first quarter divided by total number of Holstein cows in the first quarter per breeding campaign. We also computed percentage of cross-bred primiparous Holstein cows as number of cross-bred primiparous Holstein cows divided by total number of primiparous Holstein cows per breeding campaign.

Service bulls were ranked by quarters per birth year and per breed for milk yield, milk fat content, milk protein content and conception rate EBVs. Then we computed percentages of non-Holstein service bulls mated to Holstein cows in the first quarter (*i.e.* top quarter) for milk yield, milk fat content, milk protein content and conception rate EBVs as number of non-Holstein service bulls mated to Holstein cows in the first quarter divided by total number of non-Holstein bulls mated to Holstein cows.

Regarding F1 crossbred cows, we computed frequencies of services with sire's breed, Holstein breed, another dairy breed as number of F1 crossbred cows mated to a service bull respectively of the same breed as its sire, of the Holstein breed or of another dairy breed than the two previous choices divided by the number of services on F1 crossbred cows.

2.2.4. Identification of crossbreeding strategies

We identified crossbreeding strategies in three steps. First, a principal component analysis (PCA) was performed using the PRINCOMP procedure (SAS Institute, 2009). As percentages of non-Holstein bulls mated to Holstein cows in the first quarter for milk fat content, milk protein content and conception rate EBV were removed from the PCA showed very little variation, they were removed from the PCA. Therefore, variables included in this PCA were percentages of cross-bred Holstein cows in the first quarter for milk yield, milk fat content and milk protein content, percentage of cross-bred primiparous Holstein cows, percentage of non-Holstein bulls mated to Holstein cows in the first quarter for milk yield EBV, and frequencies of F1 services with the sire's breed, with the Holstein breed and with another dairy breed.

Then, a hierarchical ascending classification (HAC) using the CLUSTER procedure (SAS Institute, 2009) was performed on the principal component vectors retained from the PCA. A decision was made, prior to the analysis, to choose the number of clusters for which $R^2 > 0.70$. An ANOVA was performed on previous variables to describe identified crossbreeding-strategy clusters. We also computed average F1 conservation rate per herd and percentage of herds where 10% of Holstein cows were cross-bred for the first time after 2006 to describe these clusters.

Finally, in order to define precisely crossbreeding strategies, breeds of F2 service bulls depending on their grand sires and sires breeds were crossed with previous clusters in herds with F2 information.

Tableau 2-5. Number of pure Holstein, first generation (F1) crossbred and second generation (F2) crossbred cows and the corresponding numbers of AI and lactation records collected in herds where 10% of Holstein cows were cross-bred at first service at least for two

Genotype	Number of cows	Number of AI records	Number of lactation records
Holstein	41001	169105	88473
F1 crossbred	5149	23330	
F2 crossbred	2155	4516	

Tableau 2-6. Correlations between vectors1 of the principal component analysis (PCA) and variables describing crossbreeding strategies from characteristics of Holstein cows chosen to be cross-bred2, characteristics of non-Holstein bulls mated to Holstein cows3, and breed of F1 crossbreds service bulls.

Item	V1	V2	V3
Holstein cows cross-bred			
% cows in first quarter for milk yield	0.96	0.12	-0.03
% cows in first quarter for milk fat content	0.98	0.1	-0.04
% cows in first quarter for milk protein content	0.98	0.12	-0.04
% primiparous cows	0.95	0.14	-0.01
Non-Holstein bulls mated to Holstein cows			
% bulls in first quarter for milk yield EBV	0.09	-0.38	-0.01
Breed of F1 crossbreds' service bull			
% sire's breed	0.26	-0.91	-0.01
% Holstein breed	-0.28	0.64	-0.67
% other dairy breed	-0.09	0.53	0.82

[1]V1 = vector 1 of the PCA, V2 = vector 2 of the PCA and V3 = vector 3 of the PCA
[2]Characteristics of Holstein cows cross-bred was computed as number of cross-bred Holstein cows in the first quarter divided by total number of Holstein cows in the first quarter for milk yield, milk fat content and milk protein content
[3]Characteristics of non-Holstein bulls mated to Holstein cows was computed as number of non-Holstein bulls used in the first quarter for yield estimated breeding value (EBV) divided by total number of non-Holstein bulls used.

Tableau 2-7. Means (SD) of descriptors for crossbreeding strategy clusters identified for herds where 10% of Holstein cows were cross-bred at first service at least for two breeding campaigns.

	Crossbreeding Strategy Cluster				
Item	1	2	3	4	5
Number of herds	43	87	53	51	71
Holstein cows cross-bred [1]					
% cows in first quarter for milk yield	29 (13)^{b}	34 (16)^{b}	74 (19)^{a}	31 (15)^{b}	19 (9)^{c}
% cows in first quarter for milk fat content	26 (12)^{b}	30 (15)^{b}	72 (19)^{a}	28 (14)^{b}	16 (8)^{c}
% cows in first quarter for milk protein content	25 (12)^{b}	30 (14)^{b}	71 (20)^{a}	27 (14)^{b}	17 (7)^{c}
% primiparous cows	19 (12)^{b}	24 (16)^{b}	66 (22)^{a}	23 (15)^{b}	11 (7)^{c}
Non-Holstein bulls mated to Holstein cows					
% bulls in first quarter for yield EBV[2]	20 (32)^{b}	50 (40)^{a}	28 (38)^{b}	23 (32)^{b}	30 (34)^{b}
Breed of F1 crossbreds' service bull					
% Sire's breed	6 (10)^{c}	89 (13)^{a}	60 (32)^{b}	8 (13)^{c}	55 (26)^{b}
% Holstein breed	85 (14)^{a}	2 (4)^{d}	16 (22)^{c}	19 (18)^{bc}	26 (17)^{b}
% Other dairy breed	3 (5)^{b}	3 (6)^{b}	7 (12)^{b}	61 (25)^{a}	2 (5)^{b}
% herds where crossbreeding started after 2006	37	43	9	9	37

[a–d] Means within a row with different superscripts differ (P< 0.05)
[1]Characteristics of Holstein cows cross-bred was computed as number of cross-bred Holstein cows in the first quarter divided by total number of Holstein cows in the first quarter for milk yield, milk fat content and milk protein content
[2] Characteristics of non-Holstein bulls mated to Holstein cows was computed as number of non-Holstein bulls used in the first quarter for yield estimated breeding value (EBV) divided by total number of non-Holstein bulls used.

2.3. Results

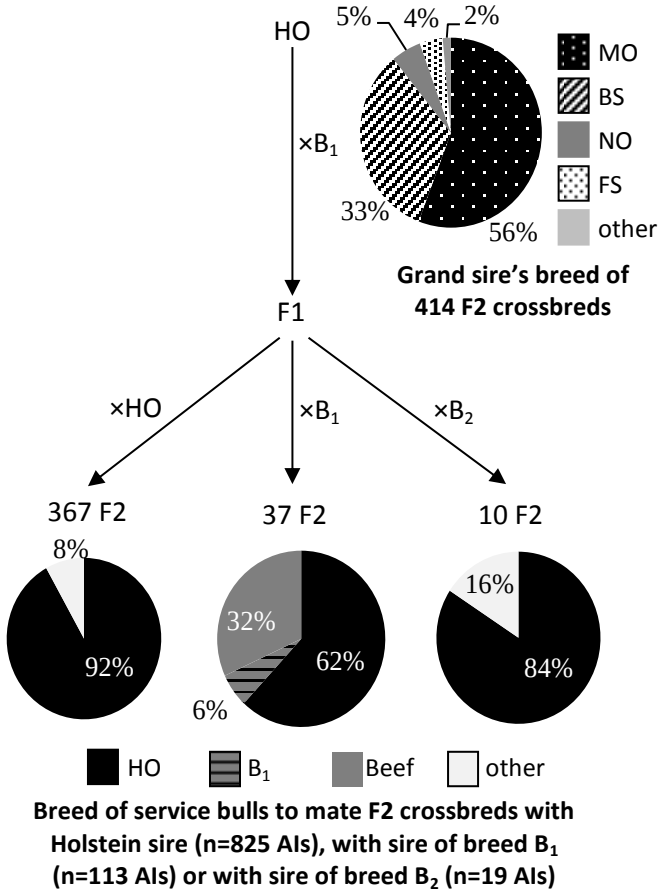
2.3.1. Crossbreeding options regarding Holstein dams and non-Holstein sires to produce F1 cows and breed of service bulls mated to F1 cows

Among the 20,063 Holstein herds, only 305 were identified to have more or less consistent crossbreeding strategy. Number of pure Holstein, F1 and F2 crossbred cows and the corresponding numbers of AI and lactation records are given in Table 2-5. We found a conservation rate of F1 crossbreds for reproduction of 75% in average with a standard deviation of 21%.

The first three vectors of the PCA had an eigenvalue superior to 1 and explained more than 80% of the variation in the respective data. According to the correlation between vectors and variables, vector 1 was related to the characteristics of cross-bred Holstein cows compared with pure-bred Holstein cows (Table 2-6). Vector 2 was related to percentage of F1 services with the sire's breed whereas vector 3 was related to percentage of F1 services with the Holstein breed and with another dairy breed. Breeding value of non-Holstein bulls mated to Holstein cows was little related to these three first vectors and mostly with the second vector.

With a R^2 equalling 0.73, we retained five clusters after the HAC. Descriptions of identified clusters for crossbreeding strategies are given in Table 2-7. The first cluster grouped 43 herds where F1 crossbreds were mainly mated with Holstein bulls. Around 25% of Holstein cows in the first quarter for milk yield, milk fat content and milk protein content and less than 20% of primiparous Holstein cows were cross-bred. The second cluster grouped 87 herds where F1 crossbreds were mainly mated with bulls of their sire breed. Around 30% of Holstein cows in the first quarter were cross-bred and high ranking non-Holstein bulls were mainly used. The third cluster grouped 53 herds where most of Holstein cows (>70%) in the first quarter for milk yield, fat content and protein content and most of primiparous cows (66%) were cross-bred. However, farmers did not choose high ranking bulls to crossbreed their high producing Holstein cows. In herds from cluster 3, F1 crossbreds were mostly mated with bulls of their sire breed (60%) but some were mated with Holstein bulls (16%). The fourth cluster grouped 51 herds where F1 crossbreds were mainly mated with bulls from a third dairy breed (61%). However 19% of F1 service bulls were Holstein. As in clusters 1 and 2, around 30% of Holstein cows in the first quarter for milk yield, milk fat content and milk protein content and 20% of primiparous cows were cross-bred. Compared with the other clusters, in 70% of herds of cluster 4, 10% of Holstein cows were cross-bred for the first time after 2006. The fifth cluster grouped 71 herds where less than 20% of Holstein cows in the first quarter for milk yield, fat content and protein content and 11% of primiparous cows were cross-bred. The choice of breed to mate F1 crossbreds was less clear than in the other clusters with in average per herd 55% of F1 service bulls of their sire breed and 26% of Holstein breed. However, F1 service bulls of another dairy breed were very little used.

Figure 2-3. Map of matings in 33 herds of crossbreeding strategy cluster 1* based on the pedigree and 957 service records of 414 second generation crossbreds (F2).



**Cluster 1 = herds where F1 crossbreds were mainly mated with Holstein bulls*
B_1 = Grand sire's dairy breed of F2 crossbred cows
B_2 = Sire's dairy breed of F2 crossbred cows
Other = service bull of beef or dairy breed
BS = Brown Swiss breed, HO = Holstein breed, MO = Montbéliarde breed, NO = Normande breed, FS = French Simmental breed
F1 = First generation crossbred
F2 = Second generation crossbred

2.3.2. Crossbreeding option regarding breed involved to produce F2 cows

Among the 305 herds of our study population, we had AI records for F2 crossbred cows in 76.7%, 62.1%, 96.2%, 60.8% and 60.6% of the herds for cluster 1, 2, 3, 4 and 5 respectively. Pedigree analysis of F2 crossbred cows showed that most crossbred cows kept for production were descended from crossbreeding between Holstein cows and Montbéliarde (> 50%) or Brown Swiss (>15%) bulls independently of the cluster. Among the 414 F2 crossbreds in herds of cluster 1, 89% had a Holstein sire. With 92% of services of F2 crossbred cows done with Holstein bulls, we confirmed a return to the Holstein breed (Figure 2-3).

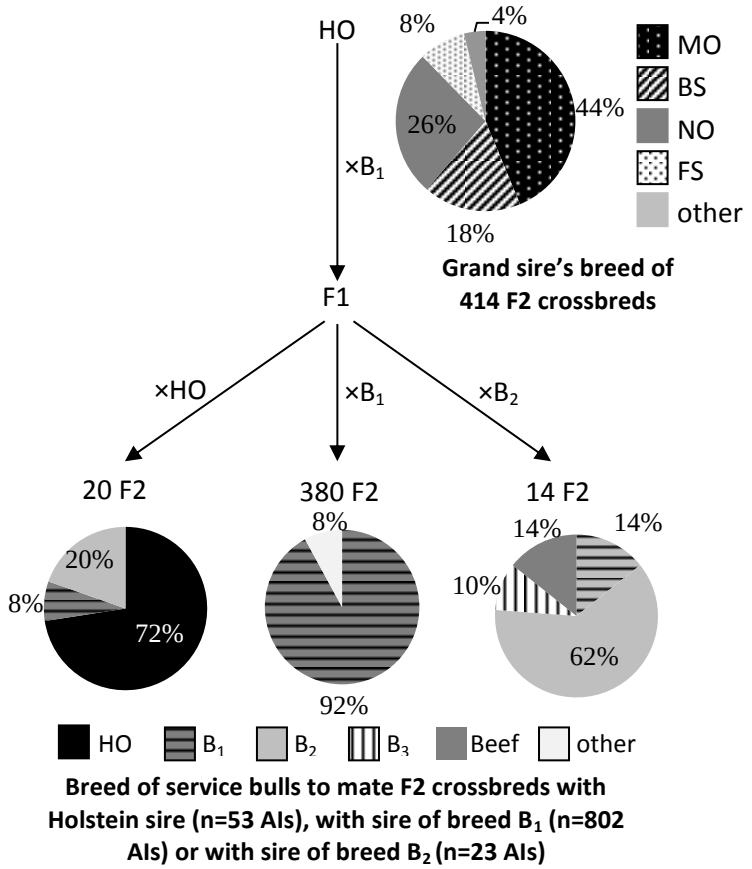
In herds of cluster 2, the Normande breed was the second most represented grand sire's breed (26%) of F2 crossbreds (Figure 2-4). Moreover, 92% of F2 crossbreds had a sire and a grand sire of the same breed and were still mated to a bull of this breed (92% of services). Based on this observation, we concluded that herds of cluster 2 were in breed transition.

Most of the 801 F2 crossbreds in herds of cluster 3 had a sire of the same breed as their grand sire (77%) and 73% of their services were still done with the same breed (Figure 2-5). Hence most herds of cluster 3 were in breed transition. However, some F2 crossbreds, with a sire and a grand sire of the same breed, were mated to Holstein bulls (17%). In herds of cluster 3, 20% of F2 crossbreds had a Holstein sire. More than half of their services were done with a Holstein bull (56%), but 18% of them were done with a bull of same breed as their grand sire breed and 18% of them with a bull of a third dairy breed. Therefore, even if breed transition was the main reason to crossbreed, some matings seemed to correspond to a two or three-breed rotational crossing.

On the one hand, 61% of the 343 F2 crossbreds in herds of cluster 4 had a sire of a third dairy breed (Figure 2-6). On the other hand, 30% of F2 crossbreds in herds of cluster 4 had a Holstein sire. But more than half of the services on these F2 crossbreds were done with a bull of a third dairy breed. F2 crossbred cows, with a Montbéliarde grand sire and a Holstein sire, were mostly mated to Scandinavian red bulls. Hence, we concluded that herds of cluster 4 engaged a three-breed rotational crossing with mostly breed combinations of Holstein × Montbéliarde × Scandinavian red or Holstein × Montbéliarde × Brown Swiss.

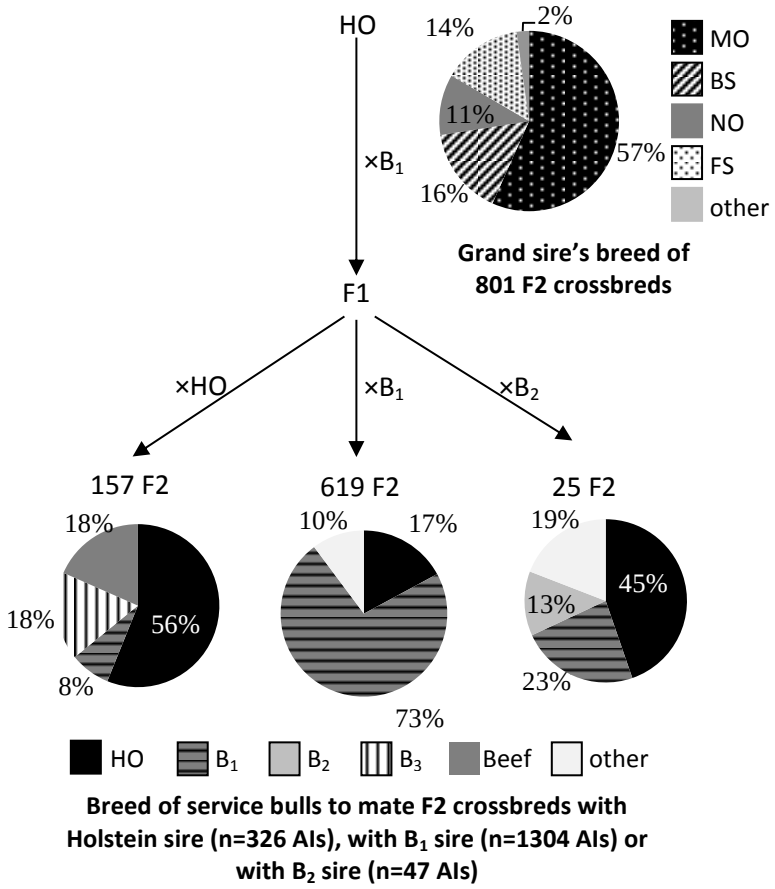
Finally, among the 183 F2 crossbreds in herds of cluster 5, 72% had a sire of the same breed as their grand sire's breed and 25% had a Holstein sire (Figure 2-7). Most of the services (73%) of F2 crossbreds with sire and grand sire of the same breed were still done with a bull of the same breed. But 20% of them were done with Holstein bulls. Moreover, F2 crossbreds with Holstein sires were mostly mated to Holstein bulls (91% of services). Therefore, we concluded that herds of cluster 5 were mainly in breed transition. However, a number of crossbreds were back-crossed to a Holstein bull.

Figure 2-4. Map of matings in 54 herds of crossbreeding strategy cluster 2* based on the pedigree and 876 service records of 414 second generation crossbreds (F2).



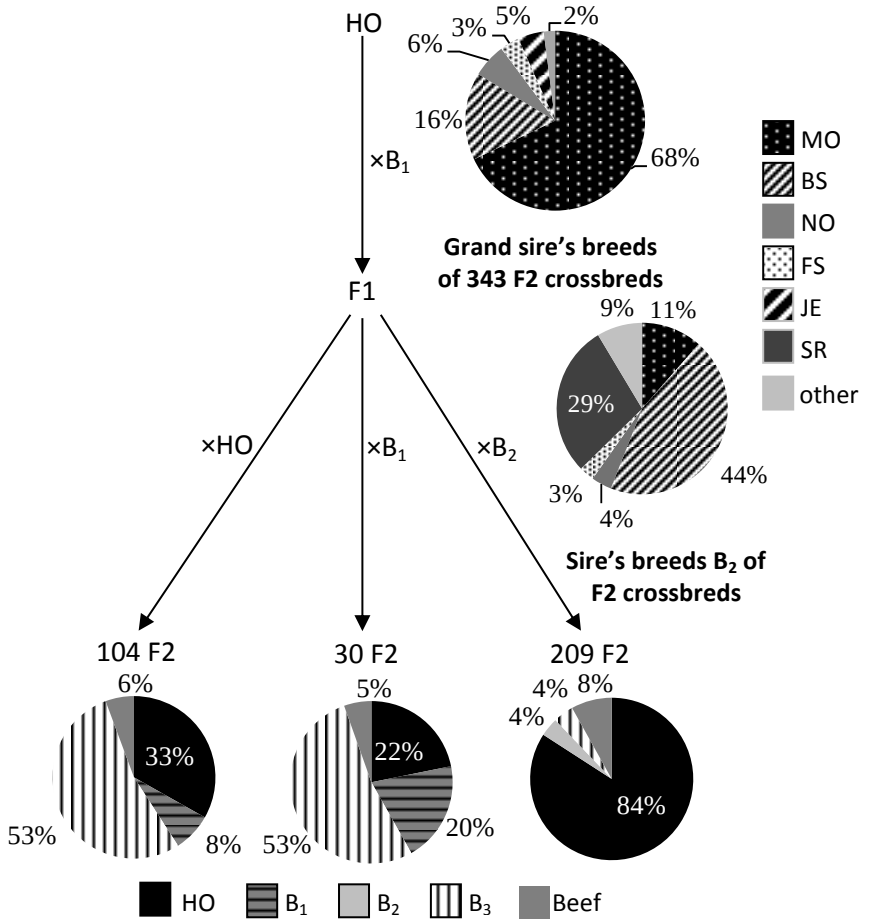
**Cluster 2 = herds where F1 crossbreds were mainly mated with bulls of their sire's breed*
B_1 = Grand sire's dairy breed of F2 crossbred cows
B_2 = Sire's dairy breed of F2 crossbred cows when differs to their grand sire's dairy breed
B_3 = F2 service bull dairy breed when differs to both their grand sire and sire's breeds
Other = service bull of beef or dairy breed
BS = Brown Swiss breed, HO = Holstein breed, MO = Montbéliarde breed, NO = Normande breed, FS = French Simmental breed
F1 = First generation crossbred
F2 = Second generation crossbred

Figure 2-5. Map of matings in 51 herds of cluster crossbreeding strategy 3* based on the pedigree and 1677 service records of 801 second generation crossbreds (F2).



**Cluster 3 = herds where F1 crossbreds were offspring of high yielding cows*
B_1 = Grand sire's dairy breed of F2 crossbred cows
B_2 = Sire's dairy breed of F2 crossbred cows when differs to their grand sire's dairy breed
B_3 = F2 service bull dairy breed when differs to both their grand sire and sire's breeds
Other = service bull of beef or dairy breed
BS = Brown Swiss breed, HO = Holstein breed, MO = Montbéliarde breed, NO = Normande breed, FS = French Simmental breed
F1 = First generation crossbred
F2 = Second generation crossbred

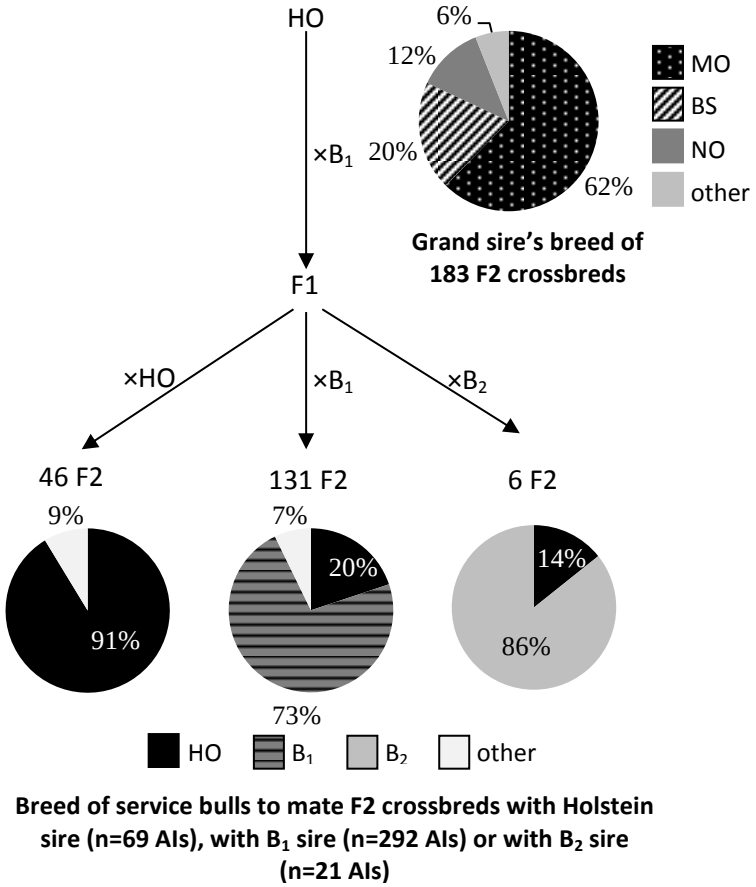
Figure 2-6. Map of matings in 31 herds of cluster crossbreeding strategy 4* based on the pedigree and 624 service records of 343 second generation crossbreds (F2).



Breed of service bulls to mate F2 crossbreds with Holstein sire (n=247 AIs), with B_1 sire (n=55 AIs) or with B_2 sire (n=322 AIs)

**Cluster 4 = herds where F1 crossbreds were mainly mated with a third dairy breed*
B_1 = Grand sire's dairy breed of F2 crossbred cows
B_2 = Sire's dairy breed of F2 crossbred cows when differs to their grand sire's dairy breed
B_3 = F2 service bull dairy breed when differs to both their grand sire and sire's breeds
Other = service bull of beef or dairy breed
BS = Brown Swiss breed, HO = Holstein breed, JE = Jersey breed, MO = Montbéliarde breed, NO = Normande breed, SR = Scandinavian Red, FS = French Simmental breed
F1 = First generation crossbred
F2 = Second generation crossbred

Figure 2-7. Map of matings in 43 herds of cluster crossbreeding strategy 5* based on the pedigree and 382 service records of 183 second generation crossbreds (F2).



**Cluster 5 = herds where F1 crossbreds were not offspring of high yielding cows*
B_1 = Grand sire's dairy breed of F2 crossbred cows
B_2 = Sire's dairy breed of F2 crossbred cows when differs to their grand sire's dairy breed
Other = service bull of beef or dairy breed
BS = Brown Swiss breed, HO = Holstein breed, MO = Montbéliarde breed, NO = Normande breed
F1 = First generation crossbred
F2 = Second generation crossbred

Tableau 2-8. Summary of crossbreeding strategies for herds where at least 10% of Holstein cows were cross-bred at first service at least for two breeding campaigns.

	Crossbreeding Strategy Cluster				
Item	1	2	3	4	5
Holstein cows cross-bred	No selection[1]	No selection	High producing	No selection	No selection
Non-Holstein bull mated to Holstein cows	No selection	High EBV yield	No selection	No selection	No selection
Crossbreeding mating plan	Backcrossing to Holstein	Breed transition	Breed transition + Some rotational crossbreeding	Three-breed rotational	Breed transition + Some backcrossing to Holstein
Breeds involved	MO, BS	MO, NO, BS	MO, BS, FS, NO	MO, BS, SR	MO, BS, NO

[1]*No selection = Farmers did not choose especially high producing cows or high ranking bulls for yield to produce F1 crossbreds.*

MO = Montbéliarde, BS = Brown Swiss, NO = Normande, FS = French Simmental, SR = Scandinavian Red

2.4. Discussion

Among the 20 063 herds in which the Holstein breed was predominant in July 2002, 305 met the threshold “at least 10% of Holstein cows cross-bred at first service at least for two breeding campaigns”. With more than 70% of the F1 females born kept for reproduction, we can affirm that these herds were obviously engaged in a quite consistent crossbreeding strategy. Moreover, despite the fact that only few herds are concerned, five different crossbreeding strategies were identified (Table 2-8).

Breed transition was the most represented crossbreeding mating plan for which we clearly identified two strategies. For the first one, dairy producers used high ranking bulls for EBV yield to start crossbreeding with Holstein cows of average production level. For the second one, they started crossbreeding on high producing and young cows mated to average ranking bulls for EBV yield. Because, in comparison with crossbreds, Holstein cows still have the best milk production (Heins *et al.*, 2006c; Dechow *et al.*, 2007), these dairy producers might compensate by selecting service bulls with very high EBV yield, or by choosing very high producing cows.

The third strategy is backcrossing to Holstein. For this strategy, farmers cross-bred Holstein cows of average production level to average ranking Montbéliarde or Brown Swiss bulls for EBV yield. Reason to cross one time and then to return to the Holstein breed could be to exploit breed superiority for fertility traits without losing milk production. Indeed, dairy producers are aware that most of the other French dairy breeds have a better fertility, with a difference >10% for conception rate to the detriment of Holstein (Barbat *et al.*, 2010).

The fourth strategy, which was the most recent one of all, is inclusion of a third breed. This probably means that dairy producers engaged towards a three-breed rotational mating plan more frequently, possibly under the influence of recent studies about crossbreeding from other countries. Indeed in theory, a three-breed rotational mating maintains 86% of the F1 heterosis and geneticists recommend its use (McAllister, 2002; Hansen *et al.*, 2005; Sørensen *et al.*, 2008). However, despite these geneticists also recommend to use high ranking bulls, we did not found a selection of bulls based on EBVs in these herds. The most chosen breeds to rotationally cross Holstein are the Montbéliarde, the Scandinavian red and the Brown Swiss. Indeed, these breeds are part of the major breeds in France (Institut de l'Elevage, 2014)and were involved in recent crossbreeding studies with the Holstein breed (Heins *et al.*, 2006c; Begley *et al.*, 2007; Dechow *et al.*, 2007; Walsh *et al.*, 2008). Possible reasons for that interest could be specific farming systems such as those based on spring calving with a grass-based diet (Walsh *et al.*, 2008) or organic production (de Haas *et al.*, 2013) where crossbred cows are more efficient than Holstein cows. Moreover, some studies in conventional farms in the USA concluded that F1 crossbreds could compete with Holstein cows regarding economic

profit because the loss of milk was compensated by the increase of fertility (McAllister, 2002; VanRaden and Sanders, 2003; Heins *et al.*, 2012).

Finally, for some herds (cluster 5), the crossbreeding strategy was less clear. Indeed, even if, in these herds, breed transition was the main purpose of crossbreeding, a significant number of crossbreds were backcrossed with Holstein bulls. Because in these herds, dairy producers started crossbreeding with average Holstein cows for production and average ranking bulls for production, we may venture the hypothesis that they observed an important loss of milk and they backcrossed to Holstein to regain sufficient production.

With the simple criterion of at least 10% of Holstein cows cross-bred at first service at least for two breeding campaigns, we were able to identify crossbreeding strategies which correspond to one of the following reasons: *(i)* to exploit the effect of heterosis, *(ii)* to exploit breed effects and complementarity, if any, *(iii)* to initiate a stage in the transition to another breed, *(iv)* to provide a base population for use in the establishment of a new breed (Shelton, 1986). However, we also tested the criterion “at least 20% of Holstein cows cross-bred at first service at least two years” and the criterion “at least 30% of Holstein cows cross-bred at first service at least two years”. Despite of an important reduction of the number of herds concerned, we found the quite-exactly same crossbreeding strategies, only more accurately expressed. However, it could be interested to refine the crossbreeding strategies identified in this study with a field survey in these herds.

2.5. Conclusion

French dairy producers used crossbreeding on Holstein cows sparingly and mostly on return services from 2002 to 2012. However, we defined a small pool of herds where dairy crossbreeding was used on a quite-high proportion of Holstein cows at first service and more than 70% of female F1 crossbreds born were kept for production. In these herds, we identified five crossbreeding strategies which can be grouped in three main families: *(i)* breed transition, *(ii)* backcrossing to Holstein, and *(iii)* rotational crossbreeding. Even if breed transition was the main reason to crossbreed Holstein cows, the three-breed rotational crossbreeding increased recently. Further research is needed to better document the results of further generations of crossbreds regarding performance and the economic benefits in different farming systems.

2.6. Acknowledgements

This study was funded by Coopex Montbéliarde (4 rue des Epicéas, 25640 Roulans, France). We are thankful to the Centre de Traitement de l’Information Génétique of INRA for providing the data used in this study and to the French Livestock Institute (Paris, France) for helping us access these data.

2.7. References

Barbat, A., Le Mezec, P., Ducrocq, V., Mattalia, S., Fritz, S., Boichard, D., Ponsart, C., Humblot, P., 2010. Female Fertility in French Dairy Breeds: Current Situation and Strategies for Improvement. Journal of Reproduction and Development 56, S15-S21.

Begley, N., Rath, M., Buckley, F., 2007. Milk production, udder health, body condition score at breeding and fertility of first lactation Holstein-Friesian, Norwegian Red and Holstein-Friesian × Norwegian Red cows on Irish dairy farms. 58th Meeting European Association for Animal Production. Wageningen Acad. Publ., Wageningen, the Netherlands, Dublin, Ireland, p. 314.

Berglund, B., 2008. Genetic Improvement of Dairy Cow Reproductive Performance. Reproduction in Domestic Animals 43, 89-95.

Bougouin, M., 2010. Le croisement entre races bovines laitières en France : premières photographies par les bases de données. Mémoire de fin d'étude. ESA-Angers.

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.

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. Journal of Dairy Science 90, 3542-3549.

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. Journal of Dairy Science 91, 3725-3743.

Hansen, L., Heins, B., Seykora, T., 2005. Is crossbreeding the answer for reproductive problems of dairy cattle. pp. 113-118.

Heins, B.J., Hansen, L.B., De Vries, A., 2012. Survival, lifetime production, and profitability of Normande × Holstein, Montbéliarde × Holstein, and Scandinavian Red × Holstein crossbreds versus pure Holsteins. Journal of Dairy Science 95, 1011-1021.

Heins, B.J., Hansen, L.B., Seykora, A.J., 2006. Production of Pure Holsteins Versus Crossbreds of Holstein with Normande, Montbeliarde, and Scandinavian Red. Journal of Dairy Science 89, 2799-2804.

Institut de l'Elevage, 2014. Chiffres clés 2013, Production bovines lait et viande.

Joubel, E., 2012. Le croisement entre races laitières en France en 2012. Mémoire de fin d'étude. ESA-Angers.

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.

Mc Parland, S., Kearney, J., Rath, M., Berry, D., 2007. Inbreeding effects on milk production, calving performance, fertility, and conformation in Irish Holstein-Friesians. Journal of Dairy Science 90, 4411-4419.

McAllister, A.J., 2002. Is Crossbreeding the Answer to Questions of Dairy Breed Utilization?1. Journal of Dairy Science 85, 2352-2357.

Sewalem, A., Miglior, F., Kistemaker, G., Sullivan, P., Van Doormaal, B., 2008. Relationship between reproduction traits and functional longevity in Canadian dairy cattle. Journal of Dairy Science 91, 1660-1668.

Shelton, M., 1986. Breed use and crossbreeding in goat production.

Sørensen, M.K., Norberg, E., Pedersen, J., Christensen, L.G., 2008. Invited Review: Crossbreeding in Dairy Cattle: A Danish Perspective. Journal of Dairy Science 91, 4116-4128.

VanRaden, P.M., Sanders, A.H., 2003. Economic Merit of Crossbred and Purebred US Dairy Cattle. Journal of Dairy Science 86, 1036-1044.

Veerkamp, R., Beerda, B., 2007. Genetics and genomics to improve fertility in high producing dairy cows. Theriogenology 68, S266-S273.

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. Journal of Dairy Science 91, 4401-4413.

Walsh, S., Williams, E., Evans, A., 2011. A review of the causes of poor fertility in high milk producing dairy cows. Animal reproduction science 123, 127-138.

Chapitre 3 : Estimation des effets de la consanguinité et du croisement pour les caractères de production et de reproduction chez les vaches de race Prim'Holstein, Montbéliarde et Normande

Inbreeding and crossbreeding parameters for production and fertility traits in Holstein, Montbéliarde, and Normande cows

C. Dezetter,*†‡1 H. Leclerc,§ S. Mattalia,§ A. Barbat,# D. Boichard,# and V. Ducrocq#

*PASS'SAS, 4 rue des Epicéas, 25640 Roulans, France

†L'Université Nantes Angers Le Mans (LUMAN), Oniris, UMR Biology, Epidemiology and Risk Analysis (BioEpAR), La Chantrerie, 44307 Nantes, France

‡Département de Productions Animales, Unité de Recherche Systèmes d'Élevage, École Supérieure d'Agriculture d'Angers ESA2, 49007 Angers, France

§Institut de l'Elevage, 149 rue de Bercy, 75595 Paris, France

#Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), UMR1313 Génétique Animale et Biologie Intégrative (GABI), 78352 Jouy-en-Josas, France

Parution : Journal of Dairy Science, 2015, 98, 4904-4913

ABSTRACT

Breed differences and nonadditive genetic effects for milk production traits, somatic cell score (SCS), conception rate (CR), and days to first service (DFS) were estimated for Holstein × Montbéliarde and Holstein × Normande crossbreds, using an animal model adapted from the French genetic evaluation and extended to across-breed analysis. Inbreeding and breed differences were estimated from all purebred recorded cows. Only records from 1,137 herds with Holstein × Montbéliarde crossbred cows and from 1,033 herds with Holstein × Normande crossbred cows were used to estimate crossbreeding parameters. In these herds, crossbred cows represented about 13% of the total number of recorded animals compared with <1% when all herds were considered. Compared with the Montbéliarde and Normande breeds, the Holstein breed was genetically superior for production [+951 kg and +2,444 kg for 305-d mature-equivalent (305ME) milk, +40 kg and +102 kg for 305ME fat, +17 kg and +54 kg for 305ME protein, respectively] and inferior for fertility traits (−12 and −9% for CR, respectively). Inbreeding depression caused loss of yield for production traits (from −32 to −41 kg of 305ME milk, −1.4 to −1.7 kg of 305ME fat, and −1.1

to −1.3 kg of 305ME protein per inbreeding percentage), a small increase in SCS (+0.001 to 0.006) and DFS (+0.12 d), and a decrease in CR (−0.27 to −0.44%). Favorable heterosis effects were found for all traits (+494 to 524 kg of 305ME milk, +21 to 22 kg of 305ME fat, +15 to 16 kg of 305ME protein, −0.05 to −0.04 SCS, +2 to 3% for CR, and −3 to 6 d of DFS), to such a point that F1 crossbreds could compete with Holstein cows for milk production while having a better fertility. However, recombination losses suggested that some F1 heterosis was lost for backcross cows.

Key words: dairy crossbreeding, production trait, functional trait, nonadditive effect

1. INTRODUCTION

A large variety of dairy breeds exist in France, with 3 main breeds, Holstein (HO), Montbéliarde (MO), and Normande (NO), representing 65, 18, and 11%, respectively, of dairy cows (Institut de l'Elevage, 2013). With genetic selection first focused on yield traits, tremendous gains in milk, fat, and protein yields have been realized, especially in the Holstein breed, worldwide. But this genetic selection on yield, combined with intensification of herd management, has negatively affected fertility (Windig *et al.*, 2005), udder health (Seegers *et al.*, 2003), longevity (Hare *et al.*, 2006), and inbreeding (Miglior *et al.*, 2005; Danchin-Burge *et al.*, 2012). Since 2001, the French total merit index has evolved to better account for functional traits, and it is hoped that genomic selection will reverse the past genetic trends (Ducrocq, 2010). However, the use of crossbred cows involving the Holstein breed may be an alternative solution (Weigel and Barlass, 2003; Sørensen *et al.*, 2008) to combine good production and fitness. In previous studies, although first-generation crossbreds (F1) tended to exhibit better functional traits and fat production than Holstein cows, the latter still had the highest milk production (Dechow *et al.*, 2007; Heins and Hansen, 2012), and crossbreeding had less influence on production traits than on functional traits (Weigel, 2007). Indeed, expected heterosis effects for fertility of around 10% of the parental mean have been reported, compared with around 3% for production traits (Sørensen *et al.*, 2008).

In France, most dairy cows are purebred animals. Consequently, nonadditive genetic effects expressed through heterosis, recombination loss, and inbreeding depression have not received much attention so far. French genetic evaluations currently consider data from different breeds separately, excluding information from crossbred cows. Although crossbreeding has remained marginal until recently, it has developed in the last 10 yr. Indeed, crossbred cows may be more profitable than cows from the parental pure breeds (McAllister, 2002; Heins *et al.*, 2012). Therefore, it is desirable to estimate nonadditive genetic parameters, in particular heterosis and recombination effects, to assess such a benefit.

The objective of this study was to estimate the genetic differences between the Holstein, Montbéliarde, and Normande breeds as well as the effects of inbreeding, heterosis, and recombination loss for milk yield traits, SCS, and fertility traits.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Data

Lactation records on 305-d mature-equivalent (305ME) milk yield, fat yield, fat content, protein yield, protein content and SCS, conception rate (CR) after AI, and days to first service (DFS) for lactation numbers 1 to 3 from 2000 to 2013 were extracted from the French National Genetic Information System. The French breeding law requires that AI are recorded and included in the national database. Hence, 100% of AI from cows with milk records (which represents 80% of the French dairy cattle) are recorded. Mature-equivalent production data were used to be consistent with the current national evaluation system, to homogenize variances across lactations, and to facilitate interpretation of within lactation number estimates of crossbreeding parameters. Mature-equivalent coefficients were constant across breeds and genotypes and depended only on parity. Following Poutous et al. (1981), multiplicative mature-equivalent factors were 1.3, 1.17, and 1.105 in first, second, and third lactations, respectively. Somatic cell count was log-transformed to SCS as follows: SCS = log2 (SCC/100,000) + 3. Conception rate was recorded as a repeated binary measure (conceived or not conceived after each of the first 3 AI). Days to first service was calculated as number of days from calving to first service. Breed proportion was computed for each cow and her parents from a total pedigree file of 173,025,861 animals of all cattle breeds existing in France. Cows with unknown parents and grandparents were removed. In this study, only cows for which the sum of breed proportions between Holstein and Montbeliarde and between Holstein and Normande breeds was equal to 1 were retained. Records from purebred, F1, and backcross cows were considered.

Four data sets were prepared. Only records from herd-year combinations with at least 10 cows were included. The first file included records from HO and MO purebred cows and the second file comprised records from HO and NO purebred cows. These 2 files were created to estimate inbreeding effects and breed differences. To analyze crossbreeding parameters, herd-year combinations with at least 3 crossbred cows were identified. The third and fourth files consisted of records of all HO and MO purebred cows and their crosses (HO × MO) on the one hand and HO and NO cows and their crosses (HO × NO) on the other hand, identified in these herds.

2.2. Inbreeding, Specific Heterosis, and Recombination Loss Coefficients

Inbreeding coefficients were computed with the Pedig software (Boichard, 2002) using the method described by VanRaden (1992), which adjusts inbreeding using an unknown-parent grouping strategy in 2 steps: first, inbreeding coefficients were computed for animals with at least 5 generations of ancestors known. Second, the inbreeding coefficients were computed for all animals,

and means of inbreeding coefficients computed on the first step were assigned to unknown ancestors born during the same period.

Coefficients for heterosis (H) and recombination (R) effects were calculated as in Dechow et al. (2007):

$$H = 1 - \Sigma sidi,$$

$$\text{and } R = 1 - \Sigma(si^2 + di^2)/2,$$

where si is the proportion of sire genes, and di is the proportion of dam genes from breed i.

2.3. Model

First, inbreeding and breed differences were jointly estimated from the first and second files. The use of all purebred cows guarantees a proper estimation of genetic trends in each breed and then a proper estimation of breed differences. The model was adapted from the French genetic evaluation:

$$Yi = \Sigma \text{ fixed effects} + \beta 1\text{–}2 \times \text{inbreeding[HO, MO, or NO]} + ai + pi + ei,$$

and

$$Vij = \Sigma \text{ fixed effects} + \beta 1\text{–}2 \times \text{inbreeding[HO, MO, or NO]} + \beta 3 \times \text{inbreeding[embryo]} + Bullj + ai + pi + ei,$$

where Yi = 305ME milk, fat, protein yields, fat content, protein content, SCS, or DFS for cow i; Vij = CR for cow i; β1–2 = linear regression coefficients on inbreeding of the cow estimated separately for the different purebreds; β3 = linear regression coefficient on inbreeding of the future progeny; Bullj = random effect of year-AI bull j depending on the breed of cow i; ai = additive genetic effect; pi = permanent environmental effect; ei = residual effect. Genetic groups were included in the additive genetic effect and were defined on the basis of breed and birth year. For production and SCS, fixed effects were herd-year and 3 effects nested within lactation number-year-region (i.e., age at calving, calving month, and dry period). For CR, fixed effects were herd-year, AI bull's breed, lactation number × DIM at insemination, month of AI-year-region, day of AI-year-region, AI technician-year, and year-lactation number. For DFS, fixed effects were calving age-lactation number, month of AI-year-region, and year-lactation number

For production traits, the linear mixed model assumed heterogeneous residual variances (Robert-Granié *et al.*, 1999) and constant variance ratios for the other random effects (i.e., constant heritability).

Breed differences and crossbreeding parameters were estimated from the third and fourth files. Again, the model was an extension of the French genetic evaluation model:

$$Yi = \Sigma \text{ fixed effects} + \beta 4 \times H + \beta 5 \times R + ai + pi + ei,$$

Tableau 3-1. Number of cows, lactation records and artificial insemination (AI) records, means of production and fertility traits in the two sub-populations of purebred cows[1]

	HO and MO purebreds		HO and NO purebreds	
Item[2]	HO purebreds	MO purebreds	HO purebreds	NO purebreds
Number of cows	6,617,000	1,047,548	6,617,000	1,000,065
Number of lactations	13,786,064	2,190,981	13,786,064	2,082,599
Milk (kg)	9,376	7,776	9,376	6,912
Fat (kg)	373	305	373	299
Protein (kg)	300	257	300	240
Fat content (%)	4.00	3.93	4.00	4.33
Protein content (%)	3.20	3.30	3.20	3.47
SCS	3.56	3.21	3.56	3.78
Number of AIs	21,548,401	3,125,578	21,548,401	3,125,578
CR (%)	38	51	38	46
DFS (d)	92	78	92	80

1HO = Holstein, MO = Montbéliarde, NO = Normande.

2CR = conception rate; DFS = days to first service.

and

$$Vij = \Sigma \text{ fixed effects} + \beta 1\text{–}2 \times \text{inbreeding[cow]} + \beta 3 \times \text{inbreeding[embryo]} + \beta 4 \times H + \beta 5 \times R + Bullj + ai + pi + ei,$$

where Yi, Vij, β1–2, β3, Bullj, ai, pi, and ei are the same as defined previously; β4 and β5 are the regression coefficients on heterosis (H) and recombination loss (R), respectively, estimated over all lactations (i.e., assuming that the effects are constant for each lactation). No additional regression on breed composition was added, because it was already accounted for in the additive effect and unknown parent groups. Indeed, as in VanRaden *et al.* (2007), unknown parent groups in the animal model were separated according to breed, pedigree path (dams of cows, sires of cows and parents of sires), origin (French or foreign), and birth year. Therefore, the model allowed a proper estimation of genetic trends

in each breed, and breed differences could be computed as differences between average additive genetic effects estimated for each breed.

The data sets were analyzed using Genekit, an inhouse genetic evaluation software (V. Ducrocq, Institut National de la Recherche Agronomique, Jouy en Josas, France; personal communication). Breed differences were estimated as the difference between breeding values of the HO and MO (and HO and NO) herdmate cows. Breed differences estimated from the first file (and the second file) were compared with breed differences estimated from the third (and the fourth) file to validate the estimations of crossbreeding parameters. Phenotypic differences were also those observed for the same cows.

For simplicity, a lower bound of crossbreeding parameters standard errors were obtained with a simplified homoskedastic model with the same fixed effects and the effect of Holstein genes percentage but without random effects.

3. RESULTS

3.1. Raw Performance

Only herds with at least 3 crossbred cows per herd-year were considered for the crossbreeding analysis. As a result, records from 1,137 herds with HO × MO crossbred cows and from 1,033 herds with HO × NO cows were analyzed. Records represented about 50% of all dairy crossbred animals, although they represented only a very small proportion of the total French HO, MO, and NO cows (Tables 3-1 and 3-2). Means for production and fertility traits of purebred cows in these herds were close to the mean population of all purebred cows. More crossbred cows were recorded in the HO × NO population than in the HO × MO population (especially 3/4 NO cows compared with 3/4 MO cows; Table 3-2). Around 85% of F1 HO × MO crossbred cows were from an HO dam and an MO sire,

Tableau 3-2. Number of cows, lactation records and artificial insemination (AI) records, means of production and fertility traits in the two sub-populations of cows recorded in herds with at least three crossbred cows.

	HO x MO file[2]								HO x NO file[3]							
Item[1]	HO	¾ HOa	¾ HOb	F1a	F1b	¾ MOa	¾ MOb	MO	HO	¾ HOc	¾ HOd	F1c	F1d	¾ NOc	¾ NOd	NO
Number of cows	36,842	880	409	4,212	732	706	98	9,023	32,166	530	445	3,557	1,599	1,300	83	16,061
Number of lactations	50,270	1,361	653	7,930	1,246	1,206	172	13,213	43,568	779	643	6,574	2,594	2,272	131	23,423
Milk (kg)	9,405	9,070	9,103	8,595	9,214	7,732	8,283	7,968	9,372	8,801	8,864	7,837	8,300	6,898	7,345	6,774
Fat (kg)	368	359	355	349	361	310	329	317	368	349	349	326	335	290	306	287
Protein (kg)	298	288	290	278	297	250	268	263	299	283	286	261	272	233	244	234
Fat content (%)	3.94	3.98	3.93	4.08	3.95	4.03	3.99	3.99	3.96	4.00	3.97	4.18	4.06	4.22	4.18	4.25
Protein content (%)	3.23	3.18	3.19	3.24	3.23	3.24	3.24	3.30	3.20	3.22	3.23	3.33	3.29	3.38	3.32	3.46
SCS	3.62	3.47	3.65	3.35	3.46	3.40	3.35	3.32	3.59	3.66	3.64	3.72	3.58	3.83	3.62	3.86
Number of AIs	126,851	2,287	1,179	12,560	2,036	2,001	329	28,659	112,226	1,553	1,114	10,655	4,013	3,514	221	47,589
CR (%)	41	45	44	52	48	52	47	51	40	44	45	48	48	46	48	48
DFS (d)	96	90	89	84	84	83	77	80	96	91	92	83	85	83	82	82

[1] CR = conception rate; DFS = days to first service.

[2] HO = Holstein, MO = Montbeliarde, ¾ HOa = (HOxMO) dam x HO sire, ¾ HOb = (MOxHO) dam x HO sire, F1a = HO dam x MO sire, F1b = MO dam x HO sire, ¾ MOa = (HOxMO) dam x MO sire, ¾ MOb = (MOxHO) dam x MO sire

[3] HO = Holstein, NO = Normande, ¾ HOc = (HOxNO) dam x HO sire, ¾ HOd = (NOxHO) dam x HO sire, F1c = HO dam x NO sire, F1d = NO dam x HO sire, ¾ NOc = (HOxNO) dam x NO sire, ¾ NOd = (NOxHO) dam x NO sire

whereas around 69% of F1 HO × NO crossbred cows were from an HO dam and an NO sire. In both files, fewer than 100 cows were from an MO × HO (or NO × HO) dam and an HO sire. Average 305ME milk, fat, and protein yields increased when the proportion of HO genes increased from 0 to 100%, except for MO backcrossed cows, which produced less milk than the others (Table 3-2). The HO × MO and HO × NO F1 crossbred cows had lower 305ME milk production than MO × HO and NO × HO F1 crossbred cows, respectively. On average, F1 crossbreds in the HO × MO data set and F1 crossbreds in the HO × NO data set had 305-d milk production 721 and 1,378 kg lower than that of purebred HO cows, respectively. Normande cows had the highest fat and protein contents (4.33 and 3.47%, respectively), whereas MO cows had slightly lower fat content but higher protein content than HO cows (3.93 vs. 4.00% and 3.30 *vs.* 3.20%, respectively). However, MO cows recorded in herds with crossbreeding had a higher fat content than HO cows recorded in herds with crossbreeding (3.99 *vs.* 3.94%). Montbéliarde cows had the lowest SCS (3.21) and NO cows had the largest SCS (3.78). All HO × MO crossbred cows had lower SCS (3.53 for all 3/4 HO cows, 3.37 for all F1, and 3.40 for all 3/4 MO cows) than HO cows (3.62). However, HO × NO crossbred cows had a higher SCS (3.65 for all 3/4 HO, 3.68 for all F1 cows, and 3.82 for all 3/4 NO cows). Both MO and NO cows had a much better CR than HO cows (51, 46, and 38%, respectively). However, HO cows recorded in herds with crossbreeding had a slightly higher CR than their average population (41% in the HO × MO file and 40% in the HO × NO file). The F1 crossbred cows had a CR close to the corresponding MO or NO purebreds (52% for HO × MO and 48% for HO × NO). These performances suggest an important heterosis effect. Average DFS was 16 d shorter for MO cows and 14 d shorter for NO cows compared with HO cows. Compared with purebred cows, DFS was intermediate for crossbred cows in the 2 populations.

3.2. Inbreeding Effects

Figure 3-1a-c represents the evolution of the average inbreeding level over time in France for HO, MO, and NO cows and their ancestors, excluding or including unknown ancestors when computing inbreeding coefficients. Each plot shows that excluding unknown ancestors led to an underestimation of the inbreeding level. Since 1990, inbreeding has dramatically increased in the 3 breeds up to 4.5 to 5% for cows born in 2009.

Estimates of inbreeding depression were unfavorable for all traits (Table 3-3). A 1% increase in inbreeding had a greater effect on milk, fat, and protein yields and a lesser effect on CR for HO cows than for MO or NO cows. However, when expressed as percentage of the phenotypic mean, inbreeding depression affected all 3 breeds in the same way. Moreover, it was higher for CR (from 0.7 to 0.9% of the mean) than for milk yield (0.4% of the mean), and was negligible for fat and protein contents, except for fat content in the Normande breed. Inbreeding had a small effect on SCS (0.2% of the mean) and on DFS (0.1% of the mean).

Figure 3-1. Inbreeding trend computed assuming unknown parents unrelated and non inbred (▲) or assuming unknown parents as inbred as their contemporaries and related accordingly (◆) for Holstein (a), Montbéliarde (b) and Normande (c) cows and their ancestors

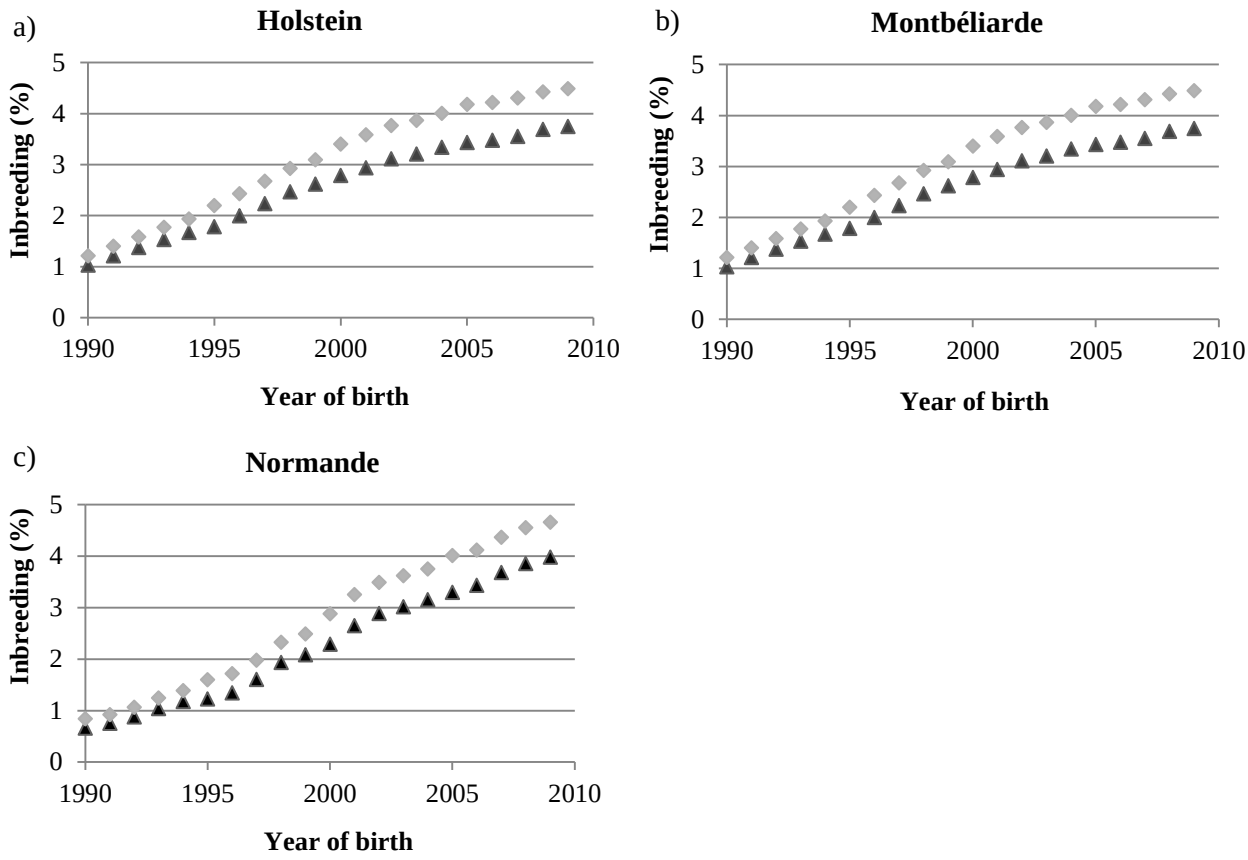


Tableau 3-3. Effect of 1% increase of inbreeding on 305days milk, fat and protein yields, fat and protein content, somatic cell score (SCS), conception rate (CR[1]) and days to first service (DFS) in absolute terms and expressed as percentage of the phenotypic mean (in parentheses) by breed

Traits	Breed		
	Holstein	Montbéliarde	Normande
Milk, kg	-41 (0.4)	-35 (0.4)	-32 (0.4)
Fat, kg	-1.7 (0.4)	-1.4 (0.4)	-1.4 (0.5)
Protein, kg	-1.3 (0.4)	-1.1 (0.4)	-1.3 (0.5)
Fat content, %	-0.0003 (0.008)	-0.00004 (0.001)	-0.001 (0.02)
Protein content, %	0.0002 (0.006)	0.0002 (0.006)	-0.0001 (0.003)
SCS	0.006 (0.2)	0.006 (0.2)	0.001 (0.3)
CR , %	-0.27 (0.7)	-0.44 (0.9)	-0.38 (0.8)
DFS, d	0.12 (0.1)	0.12 (0.1)	0.12 (0.1)

[1]CR was recorded as a repeated binary measure (conceived / not conceived after each of the first three AI)

3.3. Crossbreeding Parameters

Differences in breed estimates compared with the HO breed were larger for the NO breed than for the MO breed for production traits (Table 4). Holstein cows were superior for yields but inferior for fat and protein contents. Estimated breed differences sometimes greatly differed from the raw phenotypic means. For example, in the purebred file with HO and MO cows, the phenotypic difference between HO and MO cows was 1,600 kg for milk production when the estimated genetic difference was only 951 kg. This is explained by the unequal distribution of breeds in the different environments. For instance, MO cows are in higher proportion in more difficult and lower-producing environments. Raw differences between breeds include differences between herds and production systems, whereas estimated breed differences are obtained within herd-year and expected to be unbiased. Breed difference estimates for SCS were favorable for MO cows compared with HO cows (−0.2 SCS) but unfavorable for NO cows compared with HO cows (+0.4 SCS; Table 3-4). Both MO and NO cows were largely superior to HO cows for CR (11 and 9%, respectively; Table 3-4). Breed differences estimated from HO and MO or NO cows in herds with at least 3 crossbred cows presented some differences with those estimated from all HO, MO, and NO purebred cows, showing that the selection policy was not exactly the same between these 2 types of herds. Nevertheless, the general picture and the ranking between breeds were the same.

Heterosis estimates for production traits were favorable and similar between HO × MO and HO × NO crossbred cows (524 vs. 494 kg for 305ME milk, 22 vs. 21 kg for 305ME fat, and 16 vs. 15 kg for 305ME protein, respectively; Table 3-5). They represented around 6% of the parent breed means (computed from Table 3-2). Therefore, with the heterosis effect, F1 HO × MO crossbred cows reached the same genetic level as HO cows for production traits. A favorable heterosis effect for fat content, representing 6% of the parent breeds mean, and an unfavorable but nonsignificant recombination loss (−0.023%) were found in HO × MO crossbreds. However, a smaller heterosis effect (0.006%) but a higher recombination loss (−0.076%) were found for fat content for HO × NO crossbreds. For both HO × MO and HO × NO crossbred cows, a very small heterosis effect was found for protein content (0.001 and −0.005% respectively). Recombination losses for protein content were larger than the heterosis effect (−0.025 and −0.058%, respectively). However, Table 3-5 shows that crossbreeding effects had limited effects on contents. Heterosis estimates for SCS were very small (−0.05 SCS for HO × MO crossbreds and −0.04 SCS for HO × NO crossbreds). For SCS, a larger recombination loss was found for HO × MO crossbreds (+0.20 SCS) than for HO × NO crossbreds (+0.08 SCS). However, crossbreeding effects had limited effect on SCS (Table 3-5). For fertility traits, heterosis estimates were favorable but smaller than anticipated (Table 5). Heterosis for CR represented 6.5% (5%) of the parent breed mean in HO × MO (HO × NO) crossbred cows even though the average CR of F1 cows was 52% (48%). Recombination loss estimates were unfavorable (−5%, in

Tableau 3-4. Genetic breed differences estimated from a dataset with all purebred cows *vs* from a dataset including purebred and crossbred herdmate cows

	Files with only purebreds		HOxMO file	HOxNO file
Genetic differences	HO - MO	HO - NO	HO - MO	HO - NO
Milk (kg)	951	2444	1153	2026
Fat (kg)	40	102	37	71
Protein (kg)	17	54	28	53
Fat content (%)	-0.03	-0.27	-0.11	-0.27
Protein content (%)	-0.05	-0.11	-0.12	-0.24
SCS	0.33	-0.45	0.30	-0.43
CR (%)	-12	-9	-13	-13
DFS (d)	13	11	16	8

[1]HO = Holstein, MO = Montbeliarde, NO = Normande

Tableau 3-5. Heterosis and recombination loss estimates (SE) for 305-d milk, fat and protein yields, conception rate (CR[1]) and days to first service (DFS) for the Holstein × Montbéliarde sub-population (HO × MO) and the Holstein × Normande sub-population (HO × NO).

Estimate	Milk (kg)	Fat (kg)	Protein (kg)	Fat content (%)	Protein content (%)	SCS	CR (%)	DFS (d)
Heterosis								
HO × MO	524 (28)	22 (1.1)	16 (0.9)	0.023 (0.008)	0.001 (0.004)	-0.05 (0.026)	3 (0.7)	-3 (0.7)
HO × NO	494 (20)	21 (0.8)	15 (0.6)	0.006 (0.006)	-0.005 (0.003)	-0.04 (0.02)	2 (0.6)	-6 (1.8)
Recombination loss								
HO × MO	-183 (129)	+11 (5.2)	-7 (4.0)	-0.023 (0.036)	-0.025 (0.017)	0.20 (0.12)	-5 (2.8)	0.3 (3.1)
HO × NO	-128 (113)	-6 (4.6)	-3 (3.6)	-0.076 (0.033)	-0.058 (0.016)	0.08 (0.11)	-4 (2.7)	-4 (4.6)

[1]CR was recorded as a repeated binary measure (conceived / not conceived after each of the first three AI)

absolute value, of CR for HO × MO crossbreds and −4% of CR for HO × NO crossbreds). Therefore, combined crossbreeding parameters were close to zero for 3/4 cows, performances of which were close to expectations based on breed differences only, although the raw phenotypic performance suggested more favorable recombination loss for 3/4 HO cows. Moreover, the phenotypic average CR of 3/4 MO was similar to that of MO cows. For DFS, even though MO cows were genetically superior to NO and HO purebred cows (−16 and −13 d, respectively), heterosis was greater in HO × NO crossbred cows than in HO × MO cows (3 vs. 7% of the parent breeds mean, respectively; Table 3-5). Recombination loss for DFS was unfavorable but very small for HO × MO cows (+0.3 d), whereas it was favorable for HO × NO cows (−4 d).

4. DISCUSSION

In this study, we aimed to estimate additive and nonadditive genetic effects in the 3 main French breeds for production and fertility traits. Although breeds are currently evaluated separately in France, our study estimated breed difference and inbreeding and crossbreeding effects in 2 crossbred sub-populations, HO × MO and HO × NO. For a proper estimation of inbreeding effects, all the national purebred records were used. The inclusion of all purebred data in a single model also guaranteed a fair assessment of the genetic merit of parents, which is necessary to avoid biased estimates of breed differences. A threshold of 3 crossbred cows per herd-year combination was defined to select herds in data sets 3 and 4. This figure may appear quite low but crossbred cows represented 13% of the cows in these herds and 40% of all crossbred animals. It should be kept in mind that French herds had and still have a limited size, and requiring more crossbreds per herd would have reduced the population studied by 40%. The inclusion of only cows recorded in these herds with at least 3 crossbred cows in a single model also guaranteed a fair assessment of crossbreeding parameters, if the breed differences estimated from these records are valid. The number of F1 crossbred cows was small compared with the number of purebreds but large enough to allow a proper estimation of heterosis effect in both populations. However, in the HO × MO population, 85% of the F1 crossbreds had an HO dam and an MO sire. Therefore, the heterosis estimated in this population reflected both genotype effect and mating direction. Due to the small number of 3/4 crossbred cows, especially in the HO × MO population, estimates of recombination loss effects were not as accurate. There was also an imbalance between the number of 3/4 MO and 3/4 HO crossbreds in the HO × MO population. In both populations, the number of 3/4 MO (NO) cows with an F1 dam born from an MO (NO) dam and an HO sire was quite small compared with 3/4 MO (NO) cows with an F1 dam born from an HO dam and an MO (NO) sire. This is in agreement with the previous observation on F1 crossbred cows. Standard errors of estimates indicated that recombination losses were never significant in this study, although they had quite large values and were consistent across breeds, suggesting unfavorable effects.

The use of mature-equivalent production increased means of production compared with other studies on actual production, especially for first and second lactations. Therefore, it increased estimates of breed differences and absolute values of inbreeding and crossbreeding parameters. However, because coefficients were the same across breeds, they did not influence estimates of breed differences and crossbreeding parameters expressed relative to the mean. Production level of HO cows was largely superior to that of the 2 other purebred cows, whereas fertility level was largely inferior, as indicated in Barbat *et al.* (2010). However, HO cows recorded in herds with crossbred cows had better raw fertility than the average population (41 *vs.* 38%). This might be at least partially explained by the use of MO bulls, with better male fertility than HO bulls (Seegers *et al.*, 2001). Indeed, in herds with crossbreeding, 7.5% of AI on HO cows were with an MO bull compared with only 0.3% in purebred Holstein herds. Difference of DFS between the respective purebreds in the 2 data sets was around 15 d, even when cows of the 2 different breeds were herdmates. Such a difference when the herd environment is the same is clear evidence that overall breed difference in DFS is real and not just the result of farmers' decisions. As in a previous national report on SCS (Rupp, 2000), NO cows had the highest SCS compared with HO and MO cows, although they have the lowest milk production. Hence, NO cows seemed to be more susceptible to SCS than HO or MO cows. Except for SCS in the HO × NO sub-population, we found differences between F1 HO × MO cows or F1 HO × NO cows and HO purebred cows similar to those reported by Heins and Hansen (2012) for yields and DFS. This may suggest that independently from the environment, F1 crossbreds performed for these traits nearly the same compared with HO purebreds.

In a previous study of genetic diversity of French dairy cattle, Danchin-Burge *et al.* (2012) found lower inbreeding levels, close to 4%. Miglior and Burnside (1995) reported that assuming that unknown ancestors are unrelated led to an underestimation of the inbreeding level. Hence, not surprisingly, accounting for relatedness of unknown ancestors in our study led to a higher level of inbreeding of cows born in 2010, averaging 4.5 to 5%. However, the greatest impact of inbreeding in dairy cattle is assumed to be on traits expressed early in life (Adamec *et al.*, 2006; Mc Parland *et al.*, 2007). The cows in the study are those that survived as an embryo, that were born alive (rather than stillborn), that survived as a heifer (rather than dying or being sterile), and that survived adequate days postcalving to enter milk recording. Therefore, for these selected cows, inbreeding was likely to be underestimated. Inbreeding depression was observed for all traits and was similar across breeds when expressed as a percentage of the phenotypic mean, except for fat content in the NO breed. Generally, we found a larger effect of inbreeding for production traits (more than −30 kg for milk, −1.4 kg for fat, and −1.1 kg for protein) than in Miglior *et al.* (1995b) or Croquet *et al.* (2006) where a 1% increase in inbreeding caused a loss of 20 to 25 kg for milk, 0.90 to 0.96 for fat, and 0.69 to 0.79

for protein. This might be explained by the use of mature-equivalent production, which inflates the estimates accordingly. However, when inbreeding is expressed as percentage of the mean, Miglior *et al.* (1995a) found the same inbreeding effect on yields, but found an increase of fat and protein content for each 1% increase in inbreeding compared with our results. However, the effect of inbreeding on contents was, as in our study, very small, which may be related to the high heritability of these traits. Inbreeding had a small effect on SCS, again as in Miglior *et al.* (1995b) or Croquet *et al.* (2006). Despite a low value of inbreeding depression of 0.005 for SCS, Croquet *et al.* (2006) found that this effect was highly significant. Wall *et al.* (2005) found that 1% inbreeding caused a 0.2% increase in the SCS phenotypic mean, which is very close to our finding (a 0.1% increase). However, the inbreeding effect might be nonlinear, with a positive effect at low inbreeding level and a negative effect at high inbreeding level (Wall *et al.,* 2005; Mc Parland *et al.*, 2007).

Estimations of genetic breed differences for production and fertility traits were consistent with the average raw observations. Penasa *et al.* (2010b) estimated breed differences between MO and HO breeds of 731 kg for 305ME milk, 32.9 kg for 305ME fat, and 18.2 kg for 305ME protein. These differences are lower, except for protein yield, than those reported here, possibly because of the use of mature-equivalent production in this study. Regarding SCS, NO were genetically inferior to HO and HO were genetically inferior to MO. This confirmed that NO cows are more susceptible to subclinical mastitis than HO cows, whereas HO cows are more susceptible than MO cows. Genetic superiority of MO and NO compared with HO cows for CR explained almost all the observed phenotypic differences. Hence, when crossbreeding effects are neglected, MO additive effects allow a 6% gain of CR in F1 crossbred cows compared with HO. Breed differences estimated in the whole population or in the sample of herds with crossbred cows were similar, showing that this reduced sample of herd is valid for crossbreeding parameters estimation.

Heterosis estimates over all lactations were favorable and close to the literature results for milk production (i.e., 6% of parental mean for production traits, as reported in Sørensen *et al.,* 2008). Crossbreeding effects were important for production traits but we found a negligible heterosis effect for contents, except for fat content in the HO × MO population. The small estimates of heterosis and recombination loss effects for contents could be related to the high heritability of these traits. De Haas *et al.* (2013) and Freyer *et al.* (2008) found similar results. The higher estimates of crossbreeding parameters on fat content in the HO × MO population might be related to the large heterosis effect estimated for fat yield in this population. For SCS, we estimated a small favorable heterosis effect, as in Dechow *et al.* (2007). However, VanRaden and Sanders (2003) found a small but unfavorable (0.016) heterosis. The small magnitude of nonadditive effects
(inbreeding and crossbreeding) for SCS is consistent with the small reported dominance variance of the trait (Miglior *et al.,* 1995b). Relatively small heterosis effects were estimated for reproduction

traits: 6.5% (4.5%) of HO × MO (HO × NO) parental mean for CR and 3.4% (6.7%) for DFS. These results differ from the estimation of 10% heterosis for daughter pregnancy rate indicated by VanRaden *et al.* (2004). However, in a Danish experiment, Sørensen *et al.* (2008) also reported a small heterosis effect for traits related to pregnancy rate. Our estimates of heterosis on DFS are close to those reported by Sørensen *et al.* (2008) and Wall *et al.* (2005).

We found negative recombination estimates for all traits but their standard errors were always large. Consequently, estimates, although always unfavorable and consistent across breeds, were not significantly different from zero. In the French context, most crossbred cows probably result from situations where pure HO herds were being upgraded to pure MO herds or from pure NO herds being upgraded to pure HO herds. Therefore, the reduced number of 3/4 cows added to an unbalanced number of 3/4 HO cows compared with 3/4 MO (NO) cows might explain our estimates of recombination loss. In many countries, 3-breed rotational crossbreeding is often recommended. Unfortunately, our data were not adequate to study such a crossbreeding plan here. Admittedly, our estimation of crossbreeding parameters using only F1 and backcrosses is not adapted to such study.

Effects of inbreeding and crossbreeding found in this study could affect cow and farm profitability. In Belgium, Croquet *et al.* (2006) found that a 1% increase in inbreeding cost €6.13 per cow based on their total economic index. In contrast, crossbreeding seems to affect positively cow profitability. Indeed, Heins *et al.* (2012) found that Montbéliarde × Holstein cows and Scandinavian Red × Holstein cows had a higher profit per day than Holstein cows (+$0.22 and +$0.15 respectively). However, French dairy farms are different from US farms. A study of cow and farm profitability of crossbreeding depending on the mating system and the system of production is planned but is out of the scope of this paper.

5. CONCLUSIONS

Crossbreeding between the main 3 French dairy cattle breeds is currently limited (0.25% in our data set), but a joint analysis of national data sets of production and functional traits for all purebred cows and for herd-mate purebred and crossbred cows allowed estimation of actual breed genetic differences, as well as inbreeding and crossbreeding parameters. Many of the parameter estimates were in line with previous reports. Overall, HO × MO F1 crossbreds were found to be genetically almost as productive as purebred HO cows (with a reduction of only 55 kg in milk production but with similar fat and protein yields) while being more fertile (+7% of CR). The HO × NO F1 cows showed similar characteristics for each trait but to a lesser extent. Heterosis effects on contents were small, but because of the breed superiority of both MO and NO for these traits, F1 crossbreds had

higher fat and protein contents than HO cows. Crossbreeding with the MO breed favored a decrease of SCS, whereas crossbreeding with the NO breed tended to increase SCS. Recombination loss estimates were all in the unfavorable direction but because of the limited number of backcrossed cows, these estimates were never significantly different from zero. For rotational crossbreeding (not studied here), these results suggest that the choice of breeds involved and their sequence must be investigated to maximize heterosis effects and to minimize recombination losses.

6. ACKNOWLEDGMENTS

This study was funded by PASS'SAS (Roulans, France). We are thankful to the Centre de Traitement de l'Information Génétique of INRA for providing the data used in this study and to the French Livestock Institute (Paris, France) for helping us to access these data. We also acknowledge the numerous comments of the anonymous reviewers that helped to improve this paper.

7. REFERENCES

Adamec, V., B. G. Cassell, E. P. Smith, and R. E. Pearson. 2006. Effects of inbreeding in the dam on dystocia and stillbirths in US Holsteins. J. Dairy Sci. 89:307–314.

Barbat, A., P. Le Mezec, V. Ducrocq, S. Mattalia, S. Fritz, D. Boichard, C. Ponsart, and P. Humblot. 2010. Female fertility in French dairy breeds: Current situation and strategies for improvement. J. Reprod. Dev. 56:S15–S21.

Boichard, D. 2002. Pedig: A Fortran package for pedigree analysis suited for large populations. CD-ROM Commun. no. 28–13 in Proc. 7th World Congr. Genet. Appl. Livest. Prod. Montpellier, France.

Croquet, C., P. Mayeres, A. Gillon, S. Vanderick, and N. Gengler. 2006. Inbreeding depression for global and partial economic indexes, production, type and functional traits. J. Dairy Sci. 89:2257–2267.

Danchin-Burge, C., G. Leroy, M. Brochard, S. Moureaux, and E. Verrier. 2012. Evolution of the genetic variability of eight French dairy cattle breeds assessed by pedigree analysis. J. Anim. Breed. Genet. 129:206–217.

de Haas, Y., E. A. A. Smolders, J. N. Hoorneman, W. J. Nauta, and R. F. Veerkamp. 2013. Suitability of cross-bred cows for organic farms based on cross-breeding effects on production and functional traits. Animal 7:655–665.

Dechow, C. D., G. W. Rogers, J. B. Cooper, M. I. Phelps, and A. L. Mosholder. 2007. Milk, fat, protein, and somatic cell score and days open among Holstein, Brown Swiss and their crosses. J. Dairy Sci. 90:3542–3549.

Ducrocq, V. 2010. Sustainable dairy cattle breeding: Illusion or reality? 9th World Congr. Genet. Appl. Livest. Prod., Leipzig, Germany.

Freyer, G., S. König, B. Fischer, U. Bergfeld, and B. G. Cassel. 2008. Invited Review: Crossbreeding in dairy cattle from a German perspective of the past and today. J. Dairy Sci. 91:3725–3743.

Hare, E., H. D. Norman, and J. R. Wright. 2006. Survival rates and productive herd life of dairy cattle in the United States. J. Dairy Sci. 89:3713–3720.

Heins, B. J., and L. B. Hansen. 2012. Short communication: Fertility, somatic cell score, and production of Normande × Holstein, Montbéliarde × Holstein, and Scandinavian Red × Holstein crossbreds versus pure Holsteins during their first 5 lactations. J. Dairy Sci. 95:918–924. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2011-4523.

Heins, B. J., L. B. Hansen, and A. De Vries. 2012. Survival, lifetime production, and profitability of Normande × Holstein, Montbéliarde × Holstein, and Scandinavian Red × Holstein crossbreds versus pure Holsteins. J. Dairy Sci. 95:1011–1021.

Institut de l'Elevage. 2013. National Statistics. Accessed July 30, 2013. http://idele.fr/recherche/publication/idelesolr/recommends/chiffres-cles-2012-des-productions-bovines-lait-viande.html.

Mc Parland, S., J. F. Kearney, M. Rath, and D. P. Berry. 2007. Inbreeding effects on milk production, calving performance, fertility, and conformation in Irish Holstein-Friesians. J. Dairy Sci. 90:4411–4419.

McAllister, A. J. 2002. Is crossbreeding the answer to questions of dairy breed utilization? J. Dairy Sci. 85:2352–2357.

Miglior, F., and E. B. Burnside. 1995. Inbreeding of Canadian Holstein cattle. J. Dairy Sci. 78:1163–1167.

Miglior, F., E. B. Burnside, and J. C. M. Dekkers. 1995a. Nonadditive genetic effects and inbreeding depression for somatic cell counts of Holstein cattle. J. Dairy Sci. 78:1168–1173.

Miglior, F., E. B. Burnside, and B. W. Kennedy. 1995b. Production traits of Holstein cattle: Estimation of nonadditive genetic variance components and inbreeding depression. J. Dairy Sci. 78:1174–1180.

Miglior, F., M. L. Muir, and B. J. Van Doormal. 2005. Selection indices in Holstein cattle of various countries. J. Dairy Sci. 88:1255–1263.

Penasa, M., N. López-Villalobos, R. D. Evans, A. R. Cromie, R. Dal Zotto, and M. Cassandro. 2010. Crossbreeding effects on milk yield traits and calving interval in spring-calving dairy cows. J. Anim. Breed. Genet. 127:300–307.

Poutous, M., M. Briend, S. Calomiti, D. Doan, C. Felgines, and G. Steier. 1981. Méthode de calcul des index laitiers. Bull. Tech. Inf. 361:433–446.

Robert-Granié, C., B. Bonaïti, D. Boichard, and A. Barbat. 1999. Accounting for variance heterogeneity in French dairy cattle genetic evaluation. Livest. Prod. Sci. 60:343–357.

Rupp, R., D. Boichard, C. Bertrand, and S. Bazin. 2000. Bilan national des numérations cellulaires dans le lait des différentes races bovines laitières françaises. INRA Prod. Anim. 13:257–267.

Seegers, H., R. Coulon, F. Beaudeau, M. Fouchet, and J. M. Quillet. 2001. Factors associated with variation in occurrence of different types of return-insemination in dairy herds. Pages 357–360 in Proc. 8th Renc. Rech. Ruminant, Paris, France.

Seegers, H., C. Fourichon, and F. Beaudeau. 2003. Production effects related to mastitis and mastitis economics in dairy cattle herds. Vet. Res. 34:475–491.

Sørensen, M. K., E. Norberg, J. Pedersen, and L. G. Christensen. 2008. Crossbreeding in dairy cattle: A Danish perspective. J. Dairy Sci. 91:4116–4128.

VanRaden, P. M. 1992. Accounting for inbreeding and crossbreeding in genetic evaluation of large populations. J. Dairy Sci. 75:3136–3144.

VanRaden, P. M., and A. H. Sanders. 2003. Economic merit of crossbred and purebred US dairy cattle. J. Dairy Sci. 86:1036–1044.

VanRaden, P. M., M. E. Tooker, and J. B. Cole. 2004. Heterosis and breed differences for daughter pregnancy rate in crossbred cows. J. Dairy Sci. 87(Suppl. 1):284. (Abstr.)

VanRaden, P. M., M. E. Tooker, J. B. Cole, G. R. Wiggans, and J. H. Megonigal Jr.. 2007. Genetic evaluations for mixed-breed populations. J. Dairy Sci. 90:2434–2441.

Wall, E., S. Brotherstone, J. F. Kearney, J. A. Woolliams, and M. P. Coffey. 2005. Impact of nonadditive genetic effects in the estimation of breeding values for fertility and correlated traits. J. Dairy Sci. 88:376–385.

Weigel, K. A. 2007. Crossbreeding: A dirty word or an opportunity? Proc. Western Dairy Mgmt. Conf., Reno, NV.

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

Windig, J. J., M. P. L. Calus, and R. F. Veerkamp. 2005. Influence of herd environment on health and fertility and their relationship with milk production. J. Dairy Sci. 88:335–347.

Chapitre 4 : Modélisation des fonctions biologiques des vaches, des décisions dans la conduite du troupeau et des performances technico-économiques d'un atelier de bovins laitiers

Dans le cadre de cette thèse nous avons choisi d'évaluer l'intérêt technique et économique du croisement entre races laitières en nous appuyant sur des simulations. Nous avons utilisé un simulateur déjà existant (Hortet, 2000) auquel nous avons apporté des modifications permettant d'intégrer l'effet du choix des accouplements et du progrès génétique sur les performances des animaux afin de répondre à notre problématique. Le simulateur a été conçu afin de simuler un atelier de bovins laitiers, qui sera par la suite dénommé atelier. Les phénomènes simulés ne remettent en cause ni l'orientation et la structure générale de l'exploitation, ni les grands choix de bâtiments et d'équipements, ni le système fourrager. C'est donc seulement une partie du fonctionnement technique de l'atelier qui est représenté.

1. Présentation du simulateur

Le simulateur a été construit sur un modèle individu-centré, dynamique et mécaniste. Ce type de simulateur présente l'intérêt de représenter finement le troupeau en permettant notamment d'intégrer la diversité des individus et la variabilité de leurs réponses biologiques (Puillet *et al.*, 2010). Dans le cas de cette étude, le simulateur ECOMAST permet de prendre en compte les différences et la variabilité génétique intra- et inter-races. Il permet également d'envisager la représentation d'une interaction décision-caractéristiques individuelles, comme par exemple le choix de conserver des génisses ou de réformer des vaches en fonction de leur type génétique (de race pure vs issues de croisement). Ainsi, l'unité élémentaire de simulation est l'animal de sexe femelle aux différentes étapes de sa vie (de sa naissance à sa réforme/mort) et il est représenté informatiquement par un ensemble de variables d'état. Le modèle étant dynamique (Caro *et al.*, 2010), ces variables d'état sont mises à jour au fur et à mesure de l'avancement de la simulation sur le pas de temps défini. Le pas de temps du simulateur est le jour, ce qui permet de prendre en compte les événements et les processus avec précision (par exemple survenue des événements de reproduction et de santé, processus de production laitière du troupeau à la journée). Les nouvelles valeurs dépendent ainsi de la survenue des événements simulés (par exemple, la fécondation qui déclenche une gestation ou la survenue d'une infection intra mammaire) ou bien correspondent à une incrémentation (par exemple, les stades de lactation, de gestation et de tarissement).

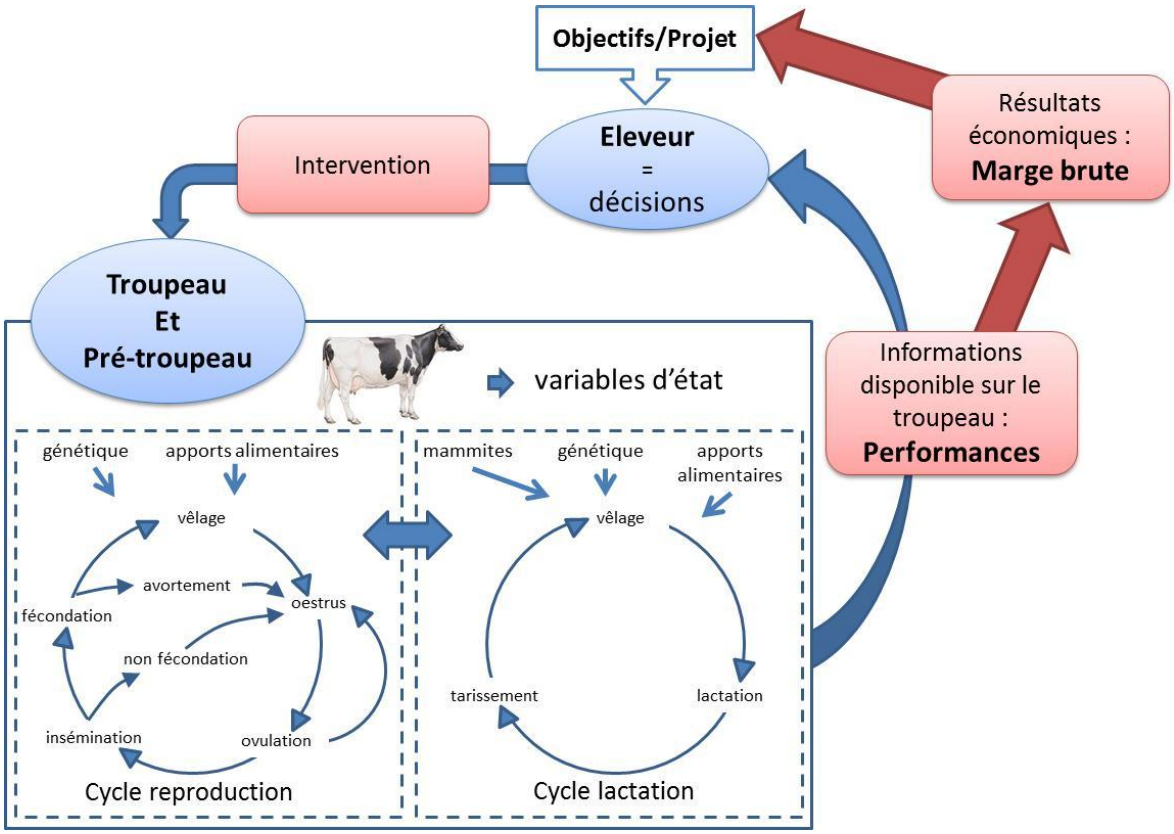


Figure 4-1. Schéma de l'organisation générale du simulateur ECOMAST explicité dans la suite du chapitre

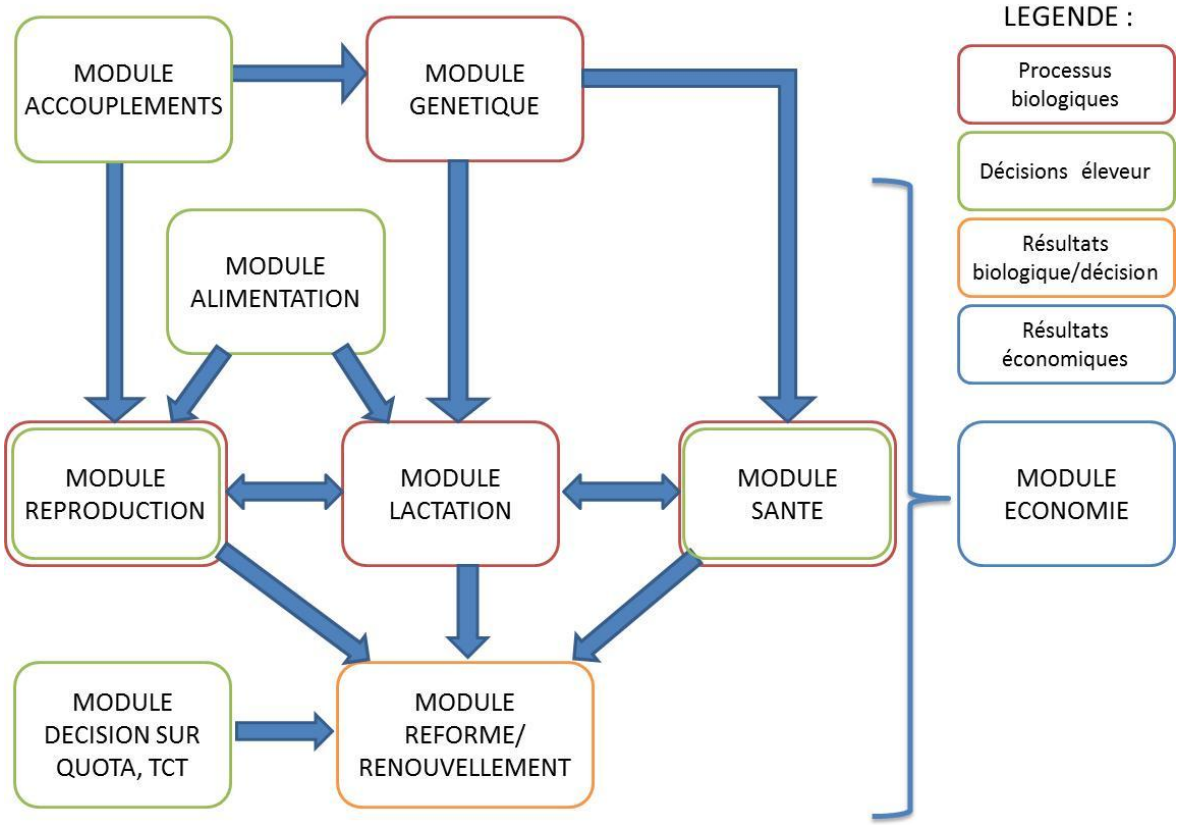


Figure 4-2. Schéma de l'organisation en modules du simulateur ECOMAST et représentation des interactions entre ces modules

L'objectif du simulateur est de reproduire les processus impliqués dans l'évolution du troupeau simulé en reproduisant les événements et étapes, via une approche de type mécaniste par opposition à la simulation descriptive qui vise à reproduire un résultat global sans chercher à en reproduire les étapes ayant conduit à ce résultat. Une des caractéristiques du simulateur est de modéliser des événements discrets, tels que la survenue des événements de reproduction et des troubles de santé, ou les décisions d'accouplement, de conservation des génisses et des réformes. Ainsi, certaines valeurs de variables d'état sont mises à jour en fonction à la fois de la survenue d'événements biologiques et de décisions liées à ces événements. Un grand nombre de ces variables d'état sont gérées par tirage aléatoire dans des lois statistiques. Cette forme de stochasticité concerne par exemple l'attribution des valeurs génétiques vraies associées aux index connus, et la survenue d'un trouble de la santé ou d'un événement lié à la reproduction. Ainsi, les résultats obtenus par deux tours de simulation avec les mêmes paramètres d'entrée ne produisent jamais des résultats complètement identiques (Sokolowski and Banks, 2010).

Chaque animal de sexe femelle est défini par trois types de variables d'état :

- Variables d'état à valeur fixe depuis la naissance et variables d'état quasi-fixe. Pour celles-ci, la valeur est révisable sans possibilité de retour à la valeur d'origine, à partir d'un jour quelconque de simulation (par exemple, pour mimer la perte d'un quartier de la mamelle) (Tableau 4-1) ;
- Variables d'état du cycle de lactation-reproduction en cours, mises à jour chaque jour de la simulation (Tableau 4-2) ;
- Variables d'état des cycles de lactation-reproduction précédents (notamment liées aux effets de la durée du tarissement et des troubles de santé encore en cours au moment de l'initialisation de la nouvelle lactation).

La modélisation a pour objectif de représenter les processus biologiques ou liés à la prise de décisions de l'éleveur qui viennent modifier les variables d'états (Figure 4-1). Pour représenter au mieux les différentes interactions entre les différents processus biologiques et les prises de décision, le simulateur est organisé en 9 modules connectés les uns aux autres (Figure 4-2).

2. Modélisation des décisions d'accouplement

La modélisation des décisions d'accouplement a pour objectif de représenter les décisions de l'éleveur quant aux choix des accouplements entre les vaches de son troupeau et les taureaux à sa disposition en termes de race et d'index. Les stratégies d'accouplement sont définies selon deux grandes catégories : stratégie d'accouplement en race pure et stratégie d'accouplement en croisement. Pour la stratégie d'accouplement en race pure, l'expérimentateur peut définir la race

Tableau 4-1. Variables d'état fixes décrivant chaque individu représenté dans le troupeau simulé

Description des variables
Etat fixé dès la naissance
Identité (numéro interne)
Date de naissance
Identité de la mère (numéro interne)
Pourcentage de la race 1 chez la mère
Pourcentage de la race 2 chez la mère
Identité du père (numéro interne)
Race du père
Pourcentage de la race 1 chez l'individu représenté
Pourcentage de la race 2 chez l'individu représenté
Coefficient d'hétérosis
Coefficient de recombinaison
Valeur génétique vraie lait 305 jours (kg)
Valeur génétique vraie TB 305 jours (g/kg)
Valeur génétique vraie TP 305 jours (g/kg)
Valeur génétique vraie taux de conception (%)
Valeur génétique vraie mammites cliniques (%)
Index ascendance lait 305 jours (kg)
Index ascendance TB 305 jours (g/kg)
Index ascendance TP 305 jours (g/kg)
Index ascendance taux de conception (%)
Index ascendance IVIA1 (j)
Index ascendance mammites cliniques (%)
Niveau adulte de référence lait 305 jours (l)
Niveau adulte de référence TB 305 jours (g/l)
Niveau adulte de référence TP 305 jours (g/l)
Code de forme de courbe de lactation propre à l'animal (3 classes de coefficients équation de Wood)
Niveau de référence du taux de conception (%)
Niveau de référence de la sensibilité aux mammites cliniques (%)
Coefficient multiplicateur de détectabilité individuelle de l'œstrus
Etat fixé à partir d'un jour quelconque de simulation (ne peut être revu qu'en aggravation)
Coefficient multiplicateur de réduction définitive de la quantité de lait produite (0 à 1)
Pointeur de quartiers perdus suite à IIM

Tableau 4-2. Variables d'état décrivant chaque individu représenté dans le troupeau simulé pour le cycle de reproduction en cours

Description des variables
Reproduction
Rang de lactation (0 pour génisse nullipare, puis 1 à 10)
Date du dernier vêlage
Durée de lactation
Durée de gestation (en jours depuis le jour de l'insémination fécondante)
Durée de période sèche (en jours depuis le jour du tarissement)
Rang intra-lactation du dernier œstrus
Délai depuis dernier œstrus (en jours)
Rang intra-lactation de la dernière IA
Délai depuis dernière IA (en jours)
Dernier veau né (sexe et viabilité)
Sexe du veau à naître
Valeur génétique vraie lait 305 jours de la génisse à naitre (kg)
Valeur génétique vraie TB 305 jours de la génisse à naître (g/kg)
Valeur génétique vraie TP 305 jours de la génisse à naître (g/kg)
Valeur génétique vraie taux de conception de la génisse à naître (%)
Valeur génétique vraie mammites cliniques de la génisse à naitre (%)
Index lait 305 jours de la génisse à naitre (kg)
Index TB 305 jours de la génisse à naître (g/kg)
Index TP 305 jours de la génisse à naître (g/kg)
Index taux de conception de la génisse à naître (%)
Index IVIA1 de la génisse à naitre (jours)
Index mammites cliniques de la génisse à naitre (%)
Pourcentage de sang de la race 1 chez la génisse à naitre
Pourcentage de sang de la race 2 chez la génisse à naitre
Coefficient d'hétérosis de la génisse à naitre
Coefficient de recombinaison de la génisse à naitre
Niveau adulte de référence lait 305 jours (l) de la génisse à naitre
Niveau adulte de référence TB 305 jours (g/l) de la génisse à naitre
Niveau adulte de référence TP 305 jours (g/l) de la génisse à naitre
Niveau de référence du taux de conception (%) de la génisse à naitre
Niveau de référence de la sensibilité aux mammites cliniques (%) de la génisse à naitre

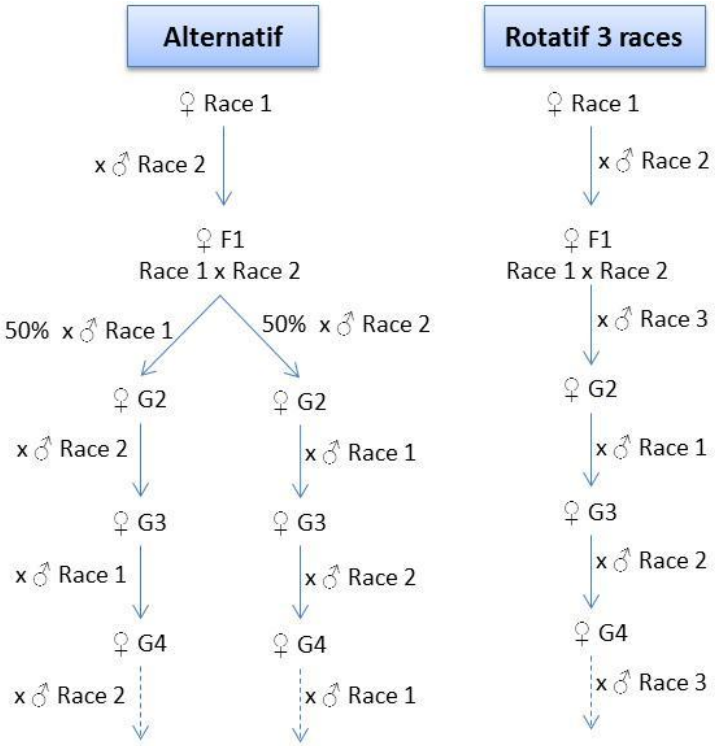


Figure 4-3. Modélisation du choix de la race des taureaux d'insémination en fonction du génotype des vaches dans les schémas en croisement alternatif et rotatif trois races

(possibilité de simuler des troupeaux de différentes races pures) et la sélection des taureaux selon trois catégories, la catégorie des 10 taureaux les plus utilisés dans leur race respective, la catégorie des 10 taureaux les plus laitiers dans leur race respective et la catégorie des 10 taureaux combinant des index « Fertilité vache », « mammites cliniques » et « TP » les plus améliorateurs possible dans leur race respective. Pour la stratégie d'accouplement en croisement, l'expérimentateur peut définir le schéma de croisement (alternatif ou rotatif trois races), les races utilisées dans ces schémas, la catégorie de sélection des taureaux (identique entre les trois races) et la proportion vache de race pure inséminées en croisement chaque année.

A la suite de ce paramétrage, dans les stratégies d'accouplement en croisement, le choix de la race est géré par le modèle en fonction du schéma en croisement paramétré et du génotype de la vache à inséminer (Figure 4-3). Le modèle tire aléatoirement un taureau parmi les 10 taureaux proposés pour la sélection choisie et la race déterminée à chaque décision d'insémination.

3. Modélisation des fonctions biologiques

3.1. Reproduction

La fonction biologique de reproduction est modélisée autour de la survenue de 3 événements discrets : ovulation-œstrus, fécondation et interruption de la gestation (normale ou anormale). Chez un animal non gravide, les étapes suivantes sont simulées (Figure 4-4):

- Survenue cyclique de l'ovulation associée ou non avec l'expression détectable d'un comportement d'œstrus selon une loi de probabilité empirique, avec comme cas particulier la survenue du premier œstrus après le vêlage qui diffère selon la composition raciale de l'animal (race pure Holstein, issue de croisement) ;
- Modulation de la possibilité de détecter l'œstrus par une variable d'expressivité des chaleurs (coefficient de détectabilité individuel) paramétré globalement pour la catégorie d'animaux. L'expression des chaleurs peut aussi être affectée par l'état de l'animal et par un déficit alimentaire à l'instant simulé ;
- Détection des chaleurs selon des taux de sensibilité et spécificité de la détection liés à l'expressivité, la parité et le rang intra-lactation de l'œstrus ;
- Décision d'inséminer ;
- Conception, au sens de la réalisation effective de la fécondation non suivie de mortalité embryonnaire précoce en fonction de la valeur génétique de la femelle inséminée, lui-même ,modulé en fonction de l'état de l'animal à l'instant simulé (production laitière, déficit alimentaire, trouble de santé) et de la race du taureau. L'effet de la production laitière est modulé à la fois selon la quantité produite journalière et le stade de lactation (Figure 4-5). Les niveaux de production journaliers minimum et maximum et leur coefficient de réussite associé sont paramétrables par l'expérimentateur.

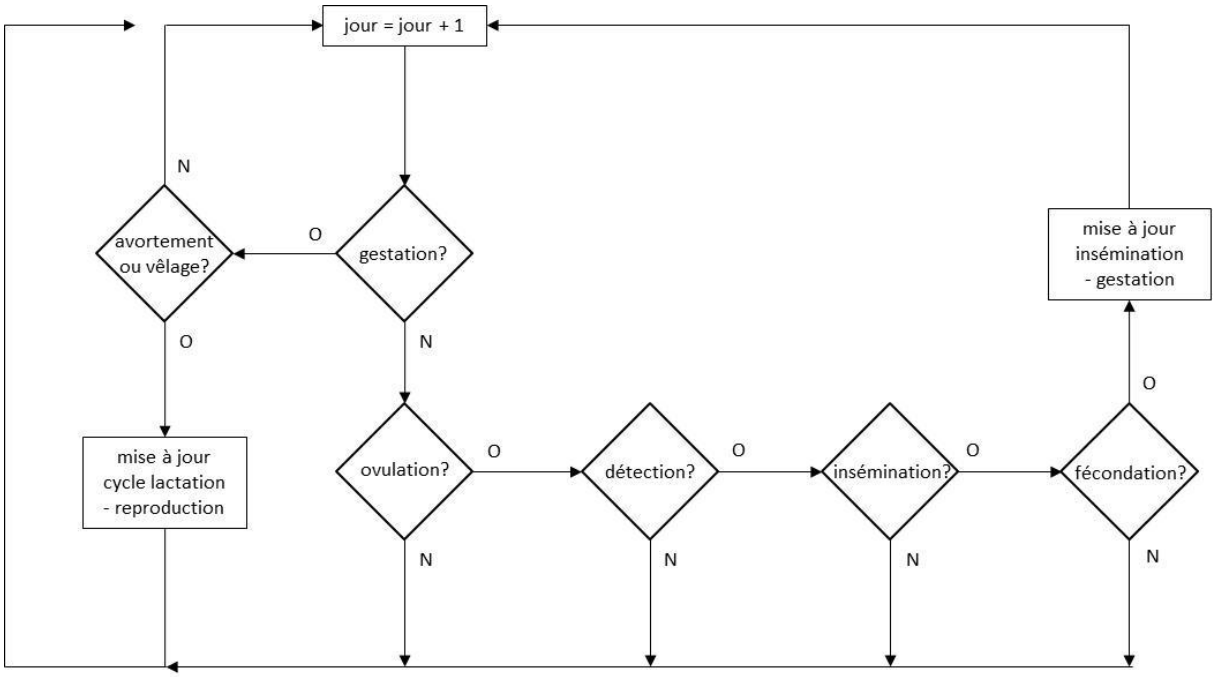


Figure 4-4. Représentation des événements survenant lors du cycle de reproduction d'un individu

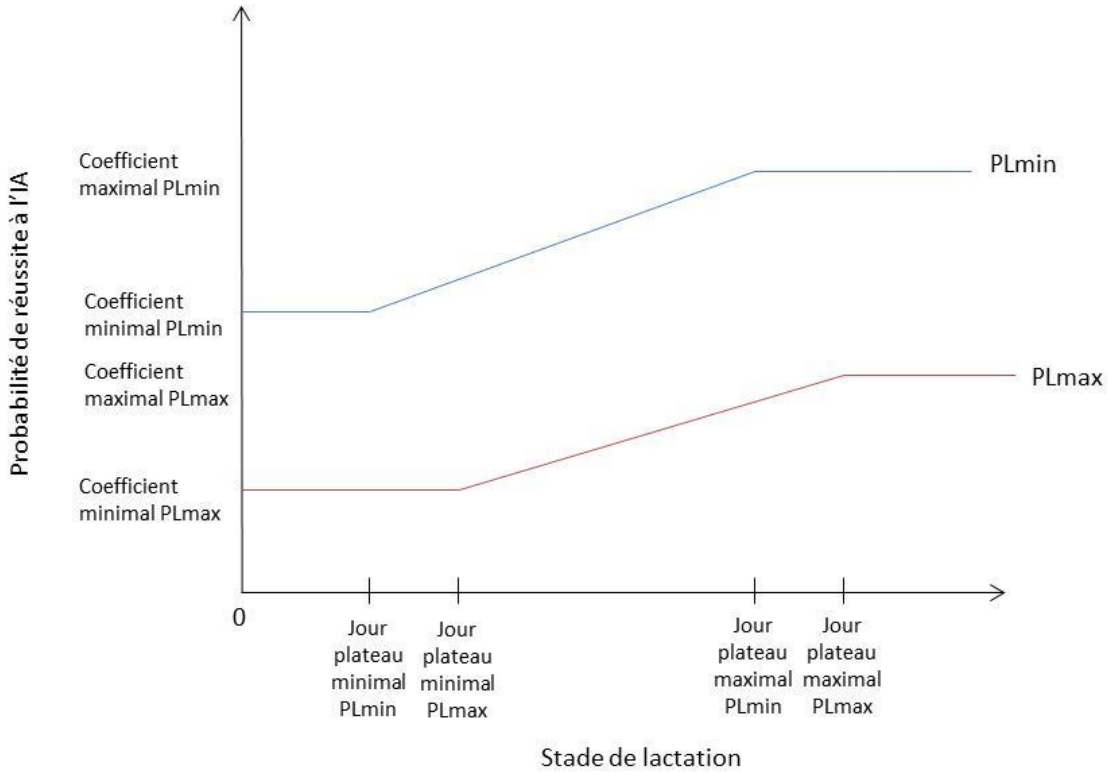


Figure 4-5. Probabilité minimale et maximale de réussite à l'insémination artificielle (IA) en fonction du stade de lactation et de la production laitière journalière

Ces événements définissent les niveaux des variables d'état associées (Tableau 4-2) et sont mises à jour à chaque pas de temps. Lorsqu'une insémination est définie comme fécondante, le sexe du veau à naitre est déterminé aléatoirement. Si le veau à naitre est une femelle, le module reproduction renvoie au module génétique. Les autres variables sont mises à jour en fonction de la survenue des événements biologiques et de règles de conduites de la reproduction (détection des chaleurs, délai minimal pour une première insémination, décisions ou non d'inséminer l'animal concerné) définies dans le but de mimer la conduite de l'atelier et les décisions de l'éleveur.

3.2. Valeur génétique et phénotype associé

Dans ce module appelé lors d'une insémination fécondante pour un veau femelle, les variables d'état concernant la valeur génétique et le phénotype associé sont déterminés les cinq caractères suivant :

- la valeur génétique pour la production laitière (VG_{lait}) et le niveau de production laitière adulte 305 jours (lait 305 jours),
- la valeur génétique pour le TB (VG_{TB}) et le niveau de TB adulte 305 jours (TB 305 jours),
- la valeur génétique pour le TP (VG_{TP}) et le niveau de TP adulte 305 jours (TP 305 jours),
- la valeur génétique pour la conception à l'IA (VG_{TC}) et le phénotype associé (Référence TC),
- la valeur génétique pour la sensibilité aux mammites cliniques (VG_{MA}) et le phénotype associé (Référence MA).

Dans un premier temps, les valeurs génétiques de la génisse à naitre sont estimées selon l'équation :

VG génisse à naitre = (VG mère + VG père)/2 + aléa de méiose

L'aléa de méiose pour un individu est tiré dans une loi normale de moyenne 0 et de variance égale à ½ de la variance génétique du caractère paramétrée par l'expérimentateur. Par la suite, l'équivalent d'un index sur ascendance est déterminée par un tirage dans la loi normale de moyenne égale à la VG de l'individu et d'écart-type $\sqrt{(1-CD) * Variance\ génétique}$. Nous avons fait le choix d'utiliser un CD de 0.30 pour estimer les index sur ascendance des différents caractères. Néanmoins le module génétique permet de choisir un CD plus élevé, notamment dans un objectif de simuler des femelles avec index sur génotypage.

La valeur génétique vraie du père de la génisse est estimée à partir de son index, du coefficient de détermination (CD) associé (de 70 dans le cas de jeunes taureaux génomiques) et de la variance génétique du caractère. A cette valeur génétique vraie intra-race est ajoutée la différence entre la race du taureau et la race Holstein (race de référence). L'estimation de la valeur génétique vraie des pères laisse la possibilité à l'expérimentateur d'introduire ou non un progrès génétique annuel sur les index des taureaux.

Tableau 4-3. Corrélations génétiques, d'environnement permanent et résiduelles pour les caractères de quantité de lait (lait), de TB, de TP, de fertilité (FER) et de mammites cliniques (MACL)

	Génétique				Environnement permanent*				Résiduelle			
Caractère	Quantité de lait	TB	TP	FER	Quantité de lait	TB	TP	FER	Quantité de lait	TB	TP	FER
TB	-0,40				-0,30				-0,15			
TP	-0,40	0,60			-0,30	0,56			-0,15	0,50		
FER	-0,23	0,10	0,10		-0,18	0,10	0,10		-0,10	0,10	0,10	
MACL	0,26	-0,10	-0,10	-0,24	0,14	-0,04	-0,06	-0,14	-0,05	0,04	0,00	0,00

**Les corrélations pour l'environnement permanent sont déduites des moyennes pondérées, c'est-à-dire que pour un caractère : corrélation environnement permanent = 0,6 corrélation génétique + 0,4 corrélation résiduelle*

La valeur génétique vraie de la mère est estimée selon deux possibilités : *(1)* soit la mère de la génisse est elle-même issue d'une mère et d'un père connu et dans ce cas sa valeur génétique vraie a été estimée sur le même modèle que celui de sa fille, *(2)* soit la mère de la génisse est issue d'une mère et/ou d'un père inconnu. En effet, dans un premier temps, pour initialiser la simulation des vaches et génisses doivent être créés. De plus, le simulateur laisse la possibilité d'acheter des vaches ou des génisses lors d'une simulation. Dans ces deux cas, les valeurs génétiques des mères et d'éventuellement des génisses à naître sont tirées aléatoirement dans une loi normale multivariable $\mathcal{N}$(moy(**VG$_5$**), σ(**VG$_5$**)) afin de tenir compte des corrélations génétiques existant entre les caractères. Par conséquent, les valeurs génétiques de ces femelles sont exprimées sous forme de vecteur $\begin{pmatrix} VG_{lait} \\ VG_{TB} \\ VG_{TP} \\ VG_{TC} \\ VG_{MA} \end{pmatrix}$. Les moyennes du vecteur des valeurs génétiques sont définies par le vecteur $\begin{pmatrix} \mu_{lait} \\ \mu_{TB} \\ \mu_{TP} \\ \mu_{TC} \\ \mu_{MA} \end{pmatrix}$. Grâce à une décomposition de Cholesky, les variances du vecteur **VG$_5$** sont égales aux matrices de variances-covariances respectives :

$$V = \begin{pmatrix} \sigma^2{}_{lait} & \rho_{lait*TB}\sigma_{lait}\sigma_{TB} & \rho_{lait*TP}\sigma_{lait}\sigma_{TP} & \rho_{lait*TC}\sigma_{lait}\sigma_{TC} & \rho_{lait*MA}\sigma_{lait}\sigma_{MA} \\ \rho_{lait*TB}\sigma_{lait}\sigma_{TB} & \sigma^2{}_{TB} & \rho_{TB*TP}\sigma_{TB}\sigma_{TP} & \rho_{TB*TC}\sigma_{TB}\sigma_{TC} & \rho_{TB*MA}\sigma_{TB}\sigma_{MA} \\ \rho_{lait*TP}\sigma_{lait}\sigma_{TP} & \rho_{TB*TP}\sigma_{TB}\sigma_{TP} & \sigma^2{}_{TP} & \rho_{TP*TC}\sigma_{TP}\sigma_{TC} & \rho_{TP*MA}\sigma_{TP}\sigma_{MA} \\ \rho_{lait*TC}\sigma_{lait}\sigma_{TC} & \rho_{TB*TC}\sigma_{TB}\sigma_{TC} & \rho_{TP*TC}\sigma_{TP}\sigma_{TC} & \sigma^2{}_{TC} & \rho_{TC*MA}\sigma_{TC}\sigma_{MA} \\ \rho_{lait*VIA1}\sigma_{lait}\sigma_{VIA1} & \rho_{TB*VIA1}\sigma_{TB}\sigma_{VIA1} & \rho_{TP*VIA1}\sigma_{TP}\sigma_{VIA1} & \rho_{TC*VIA1}\sigma_{TC}\sigma_{VIA1} & \rho_{VIA1*MA}\sigma_{VIA1}\sigma_{MA} \\ \rho_{lait*MA}\sigma_{lait}\sigma_{MA} & \rho_{TB*MA}\sigma_{TB}\sigma_{MA} & \rho_{TP*MA}\sigma_{TP}\sigma_{MA} & \rho_{TC*MA}\sigma_{TC}\sigma_{MA} & \sigma^2{}_{MA} \end{pmatrix}$$

Puis, dans un deuxième temps, les niveaux adultes correspondant sont déterminés selon une équation visant à tenir compte des corrélations existant entre les caractères. Par conséquent, les niveaux adultes des animaux sont exprimés sous forme de vecteur:

$$\begin{pmatrix} Lait\ 305j\ adulte \\ TB\ 305j\ adulte \\ TP\ 305j\ adulte \\ Référence\ TC \\ Référence\ MA \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu_{lait} \\ \mu_{TB} \\ \mu_{TP} \\ \mu_{TC} \\ \mu_{MA} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} VG_{lait} \\ VG_{TB} \\ VG_{TP} \\ VG_{TC} \\ VG_{MA} \end{pmatrix} + h_i \begin{pmatrix} H_{lait} \\ H_{TB} \\ H_{TP} \\ H_{TC} \\ H_{MA} \end{pmatrix} + r_i \begin{pmatrix} R_{lait} \\ R_{TB} \\ R_{TP} \\ R_{TC} \\ R_{MA} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_{lait} \\ p_{TB} \\ p_{TP} \\ p_{TC} \\ p_{MA} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_{lait} \\ e_{TB} \\ e_{TP} \\ e_{TC} \\ e_{MA} \end{pmatrix}$$

Les coefficients d'hétérosis (h_i) et de pertes par recombinaison (r_i) exprimés par l'animal i sont déterminés comme dans Dechow et al. (2007) :

$$\boldsymbol{h_i = 1 - \sum p_a \times m_a\ et\ r_i = 1 - \sum (p_a^2 + m_a^2)/2}$$

Où p_a et m_a sont les proportions de gènes issus de la race a chez le père et la mère de la vache i.

Pour simplifier les équations et comme les pères des animaux croisés sont de race pure et que nous avons choisi de n'étudier que le croisement entre 2 et 3 races maximum, les équations en fonction de la race du père deviennent :

- Si la race du père est la race 1 alors :

  $h_i = 1 - \%race1_m \; et \; r_i = 1 - (\%race1_m^2 + \%race2_m^2 + \%race3_m^2)/2$
- Si la race du père est la race 2 alors :

  $h_i = 1 - \%race2_m \; et \; r_i = 1 - (\%race1_m^2 + \%race2_m^2 + \%race3_m^2)/2$
- Si la race du père est la race 3 alors :

  $h_i = 1 - \%race3_m \; et \; r_i = 1 - (\%race1_m^2 + \%race2_m^2 + \%race3_m^2)/2$

Les valeurs d'hétérosis H et de pertes par recombinaison R sont paramétrables par l'expérimentateur selon le choix des races.

Les vecteurs des valeurs d'environnement permanent et de résiduelle pour les cinq caractères sont tirés dans des lois normales multivariables $\mathcal{N}$ (moy(**P**$_5$), σ(**P**$_5$)) et $\mathcal{N}$ (moy(**e**$_5$), σ(**e**$_5$)), respectivement.

Les moyennes des vecteurs **P**$_5$ et **e**$_5$ sont définies par le vecteur nul $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$. Grâce à une décomposition de Cholesky, les variances des vecteurs **P**$_5$ et **e**$_5$ sont égales aux matrices de variances-covariances respectives :

$$V = \begin{pmatrix} \sigma^2{}_{lait} & \rho_{lait*TB}\sigma_{lait}\sigma_{TB} & \rho_{lait*TP}\sigma_{lait}\sigma_{TP} & \rho_{lait*TC}\sigma_{lait}\sigma_{TC} & \rho_{lait*MA}\sigma_{lait}\sigma_{MA} \\ \rho_{lait*TB}\sigma_{lait}\sigma_{TB} & \sigma^2{}_{TB} & \rho_{TB*TP}\sigma_{TB}\sigma_{TP} & \rho_{TB*TC}\sigma_{TB}\sigma_{TC} & \rho_{TB*MA}\sigma_{TB}\sigma_{MA} \\ \rho_{lait*TP}\sigma_{lait}\sigma_{TP} & \rho_{TB*TP}\sigma_{TB}\sigma_{TP} & \sigma^2{}_{TP} & \rho_{TP*TC}\sigma_{TP}\sigma_{TC} & \rho_{TP*MA}\sigma_{TP}\sigma_{MA} \\ \rho_{lait*TC}\sigma_{lait}\sigma_{TC} & \rho_{TB*TC}\sigma_{TB}\sigma_{TC} & \rho_{TP*TC}\sigma_{TP}\sigma_{TC} & \sigma^2{}_{TC} & \rho_{TC*MA}\sigma_{TC}\sigma_{MA} \\ \rho_{lait*VIA1}\sigma_{lait}\sigma_{VIA1} & \rho_{TB*VIA1}\sigma_{TB}\sigma_{VIA1} & \rho_{TP*VIA1}\sigma_{TP}\sigma_{VIA1} & \rho_{TC*VIA1}\sigma_{TC}\sigma_{VIA1} & \rho_{VIA1*MA}\sigma_{VIA1}\sigma_{MA} \\ \rho_{lait*MA}\sigma_{lait}\sigma_{MA} & \rho_{TB*MA}\sigma_{TB}\sigma_{MA} & \rho_{TP*MA}\sigma_{TP}\sigma_{MA} & \rho_{TC*MA}\sigma_{TC}\sigma_{MA} & \sigma^2{}_{MA} \end{pmatrix}$$

Les variances des caractères pour l'environnement permanent et la résiduelle sont paramétrables par l'expérimentateur. Les corrélations appliquées aux caractères pour l'environnement permanent et la résiduelle sont issues de l'évaluation génétique de l'index de synthèse de la race Holstein (ISU) et sont données dans le Tableau 4-3. Enfin, les moyennes μ appliquées dépendront des scénarios et seront donc explicitées ultérieurement.

3.3. Production

Chaque animal est caractérisé par un potentiel de production (quantité de lait, TB et TP) atteint à l'état adulte (c'est-à-dire en 4ème lactation) pour une durée de lactation de 305 jours défini dans le module génétique (*cf.* 3.2). La production journalière théorique est déterminée à partir une courbe de Wood (1967):

$$\mathbf{PLJ_{Wood}} = a\, t^b\, e^{(-ct)}$$

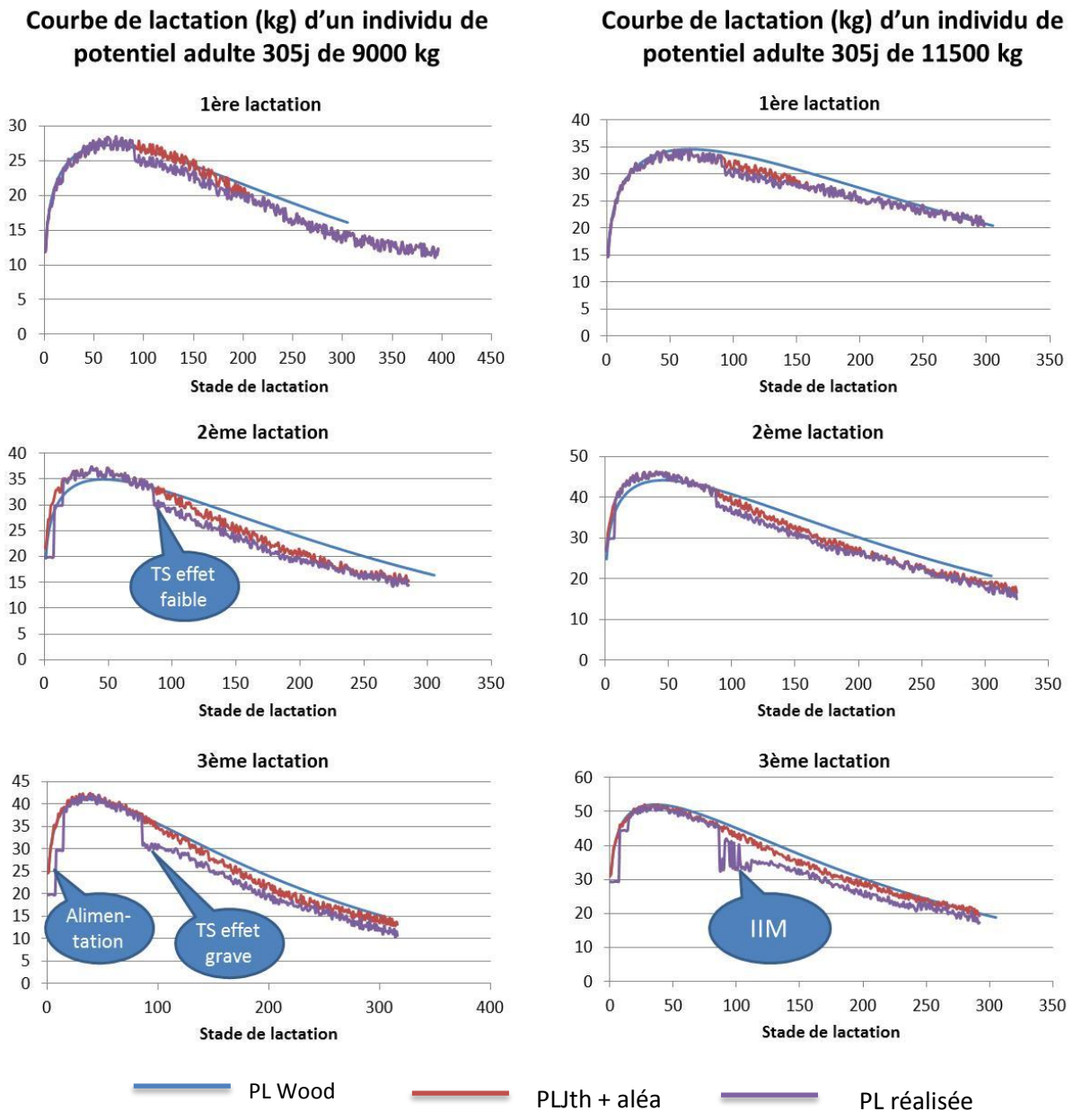


Figure 4-6. Exemples de modélisation de la production laitière journalière (PLJ) réalisée pour différents rangs de lactation et différents potentiels adultes 305 jours à partir d'une courbe de Wood et des différents effets limitants[1] survenant au cours de la lactation

1Les différents effets limitant la production sont l'alimentation, les infections intra-mammaires (IIM) et les autres troubles de santé (TS) dont les effets sur la production sont plus ou moins prononcés sur du plus ou moins long terme (effet faible à effet grave).

Les coefficients de Wood (1967), a, b et c dépendent du niveau de production 305 jours de la lactation et du rang de lactation. Le potentiel adulte 305 jours est modulé en fonction du rang de lactation et des effets du tarissement précédent. Si un avortement tardif survient, le niveau de production 305 jours de la lactation est corrigé pour prendre en compte son effet sur la lactation. Des effets de la saison et de la gestation sont ajoutés pour calculer la production journalière théorique :

$$PLJ_{th} = a\, t^{b}\, e^{(-ct)} + 1{,}4 \cos[0{,}017\,(j + 198)] + PGN_{m}$$

Enfin, la production journalière effectivement réalisée est calculée à partir de la production journalière théorique en tenant compte du plan d'alimentation en application pour la vache concernée ce jour-là, d'une réduction éventuelle de production liée à la survenue d'un trouble de santé (IIM ou autre) et d'un aléa journalier de ± 2kg. La Figure 4-6 présente des exemples de courbes de lactation modélisées par le simulateur pour un individu avec un potentiel adulte de 9000 kg et un individu avec un potentiel adulte de 11 500 kg pour les trois premières lactations et pour un plan de distribution des aliments non limitant.

Les valeurs journalières des taux (TB et TP) sont également modélisées par une équation de Wood (1967) mais sans distinction de courbes-types différentes. L'effet dû à la non-gestation n'est pas pris en compte. Un terme aléatoire $\mathcal{N}$ (0 ; 1,25) pour le TB et $\mathcal{N}$ (0 ; 0,5) pour le TP sont également ajoutés. Un effet de la saison (photopériode) sur les taux est pris en compte dans l'équation de la production journalière :

$$TBc = a'\, t^{b'}\, e^{(-c't)} + 0{,}814421 \cos[0{,}01838\,(j - 8{,}6)] - 0{,}06$$

$$TPc = a''\, t^{b''}\, e^{(-c''t)} + 1{,}48 \cos[0{,}017261\,(j - 6)] + 0{,}026$$

Où :

- TBc et TPc sont les TB et TP corrigés ;
- t est le nombre de jours postpartum ;
- j est le jour calendaire (à partir du 1er janvier) ;
- a', b' et c' sont les coefficients de Wood pour le TB et a'', b'' et c'' sont les coefficients de Wood pour le TP.

3.4. Troubles de santé : les infections intra-mammaires (IIM)

Le simulateur modélise la survenue de cinq types d'infections intra-mammaires (IIM) permettant ainsi de prendre en compte les entités épidémio-cliniques majeurs actuelles (staphylocoques, streptocoques, Coliformes et pathogènes mineurs). Chaque IIM peut, lors de sa survenue, débuter sous forme clinique ou sous forme subclinique selon des fréquences propres. Les formes cliniques peuvent ensuite déboucher sur des formes sub-cliniques. Par ailleurs, la prévalence d'une IIM peut modifier le risque de survenue des autres IIM. Ainsi, l'expérimentateur peut définir pour chaque IIM :

- le niveau d'incidence global et la distribution du risque d'incidence entre les 5 IIM ;
- le ratio clinique/subclinique de chaque IIM ;
- la distribution de profils définissant des intensités et des durées variables pour les signes cliniques et les effets sur la production laitière en l'absence de traitement ;
- la distribution de profils définissant des intensités et des durées variables pour les élévations de CCSLI en l'absence de traitement.

Chaque vache est exposée, chaque jour simulé, à une probabilité d'occurrence de chaque IIM définie selon les paramètres précédents. Une période réfractaire de 7 jours est appliquée après la survenue d'une IIM. La survenue ou non d'une IIM pour une vache donnée dépend de la combinaison d'un risque propre à la vache, fonction de sa valeur génétique (*cf.* Annexe B), et de l'efficacité des méthodes de prévention. Le simulateur détermine ensuite la concentration en cellules somatiques du quartier (CCSQ) en fonction de 3 termes (Robert-Briand, 2006):

- un niveau de base en l'absence d'IIM défini par une courbe de Wood dépendant du numéro de lactation (primipares, 2ème lactation et 3ème lactation et plus) ;
- un terme additionnel consécutif à une IIM déterminé en fonction du niveau d'expression de l'IIM (subclinique ou clinique) ;
- un terme aléatoire défini selon une loi Bêta décalée à gauche et dont la moyenne est centrée sur la valeur de CCSQ obtenue ci-dessus.

Le niveau de concentration en cellules somatiques de la vache (CCSV) est ensuite obtenu en faisant la moyenne des CCSQ pondérée de la production laitière.

Suite aux IIM, une perte de la production laitière individuelle (en l'absence de traitement) est modélisée selon deux types de procédés :

- des pertes associées aux IIM cliniques pour lesquelles un pourcentage de la production laitière journalière est retranché ;
- des pertes associées aux IIM subcliniques estimées selon une formule et des coefficients de régression dépendant de la CCSV (Hortet and Seegers, 1998).

3.5. Autres troubles de santé et de reproduction

Le simulateur modélise la survenue et les répercussions de troubles de santé non nommément définis mais susceptibles de mimer l'expression cumulée des principaux troubles de santé courants chez la vache (boiterie, troubles du peripartum, …). Ces troubles de santé ont été découpés en quatre catégories pour lesquelles l'expérimentateur peut choisir l'effet sur la perte de production laitière (grave x court terme, grave x long terme, peu grave x court terme et peu grave x long terme) plus ou moins prononcé selon le stade de lactation. L'expérimentateur définit un niveau d'incidence global du troupeau et sa distribution entre les quatre catégories.

Une modulation du risque d'incidence individuel en fonction du niveau adulte 305 jours des vaches a été modélisé par :

$$1+(\text{Lait 305j adulte} \times \mu)/\mu$$

où Lait 305j adulte est le niveau adulte 305 jours de la vache considérée et μ est la moyenne du troupeau paramétrée par l'expérimentateur.

Le module relatif à la reproduction (*cf*. 3.1) définit le niveau de fertilité de base qui résulte des paramétrages d'efficacité de la reproduction. Néanmoins, les troubles de santé autres que les IIM peuvent modifier la détectabilité de l'œstrus et le taux de conception selon des coefficients paramétrables. Il est également possible de modifier le taux de conception via le module alimentation afin de prendre en compte l'effet d'une alimentation limitante.

Des taux de mortalité et de réforme aléatoires suite aux troubles de santé sont paramétrables. Ainsi, chez les veaux, des taux de mortinatalité et des taux de mortalité entre la naissance et 3 semaines sont définis. Un taux de mortalité est également appliqué aux femelles de renouvellement entre l'âge de 3 semaines et le premier vêlage. Les vaches adultes sont également exposées à un taux de mortalité aléatoire et à un taux de réforme aléatoire pour des raisons non modélisées (problèmes de comportement, mauvaise conformation de la mamelle, accident, etc…).

4. Modélisation de la gestion des effectifs : réforme et renouvellement

4.1. Réforme

Le module gérant l'effectif des vaches en production est appelé périodiquement (tous les 15 du mois) afin de revenir entre les limites minimum et maximum du nombre de vaches (qui peuvent en pratique correspondre à des places disponibles dans les bâtiments ou à des ressources fourragères disponibles). Les vaches sont classées selon un score de candidature préférentielle à la réforme. Ce score dépend de coefficients multiplicateurs définis par l'expérimentateur pour l'aptitude laitière (production du jour et potentiel adulte), l'état de santé, le numéro de lactation, les stades de lactation et reproduction. Il est ainsi possible de mettre plus de poids sur la production ou sur la reproduction selon les objectifs de l'expérimentateur. En situation de gestion du volume à produire, à partir du 4ème mois de campagne, une estimation de la production potentielle jusqu'à la fin de campagne est calculée. Cela permet en y intégrant la production réalisée depuis le début de campagne d'estimer le niveau de réalisation du quota en fin de campagne et d'orienter la gestion des effectifs en cas de sous réalisation ou de sur réalisation estimée avec des seuils pour une réaction au niveau des réformes. Un processus complémentaire permet de gérer les réformes en situation de vêlages groupés en attribuant un coefficient multiplicateur aux vaches non gravides à la fin de la période d'insémination.

Les vaches sont ensuite réparties en 4 groupes : les super-candidates, les très candidates, les candidates et les protégées. Le groupe des super-candidates correspond aux vaches ayant atteint ou dépassé un score seuil. Ces vaches sont systématiquement vendues au moment de l'appel du module. Ensuite, en fonction des règles de décision paramétrées et en situation de sureffectif, la vente de vaches en lactation (groupes des vaches très candidates puis groupes des vaches candidates) ou la vente de génisses amouillantes est réalisée.

La réforme des génisses sur des critères de reproduction est également modélisée. La réforme est systématique après l'échec à la 3ème IA, à l'exception des filles des meilleurs vaches en potentiel de production du troupeau (10% supérieurs), pour lesquelles le seuil est fixé à la 6ème IA. Une élimination systématique de toutes génisses non gestantes après 300 jours écoulés depuis la 1ère IA intervient également.

4.2. Renouvellement

Les veaux mâles sont systématiquement vendus à 10 jours d'âge. Au même âge, l'effectif des veaux femelles conservé pour le renouvellement est calculé selon deux stratégies d'élevage des génisses paramétrables par l'expérimentateur :

- conservation de toutes les femelles avec ou sans option d'en vendre en tant que génisses amouillantes ;
- vente obligatoire des femelles issues des vaches au potentiel laitier le plus faible (nées des 10% inférieurs du troupeau) avec conservation obligatoire des femelles issues des vaches au potentiel laitier le plus élevé et ajustement de l'effectif conservé au besoin de renouvellement constaté selon la campagne précédente.

La croissance des génisses n'est pas simulée en tant que telle. Seules la mise à la reproduction et les performances de reproduction sont mimées.

4.3. Achat

Le renouvellement du troupeau est en principe interne ou du moins autant que possible. En situation de sous-effectif (effectif inférieur au seuil minimum) ou de sous-réalisation du volume à produire, l'achat de vaches en lactation ou de génisses amouillantes peut être décidé selon les règles définies par l'expérimentateur (interdiction complète, priorité à l'achat de génisses prêtes à vêler ou à l'achat de vaches en lactation, choix probabilisé).

5. Modélisation des plans de distribution des aliments

L'objectif du simulateur n'est pas de comparer des plans d'alimentation des vaches laitières mais d'estimer l'impact économique d'écarts de consommation d'aliments qui varient en fonction de l'effectif et de la production effective des animaux. Par conséquent, il est essentiel de déterminer les quantités d'aliments utilisées. La consommation des animaux est définie selon des plans d'alimentation renseignés par l'expérimentateur. Les quantités distribuées incluent un pourcentage de perte et gaspillage pour les fourrages.

Pour les vaches en lactation, le plan de distribution est défini pour chaque mois afin de prendre en compte les différences de conduite de l'alimentation pendant la campagne (stabulation, pâturage, …). La ration distribuée est caractérisée par :

- la quantité totale de fourrage distribué (kg MS) et les proportions de trois (au maximum) fourrages utilisés,
- la quantité de concentré d'équilibre (CE) et sa valeur énergétique (UFL par kg MB). Les quantités de fourrage et de CE définissent la ration de base équilibrée distribuée en quantité identique à toutes les vaches du troupeau et permettant une production journalière de base. Les primipares ne consomment que 90% des fourrages de cette ration. Cette correction intervient pour le cumul total des quantités consommées et distribuées.
- la quantité de concentré de production (CP) et sa valeur énergétique (UFL par kg MB). Cette quantité dépend du rythme de distribution (kg de concentré par kg de lait produit au-delà du niveau permis par la RBE) et est plafonnée par la quantité maximale à distribuer par vache et par jour. La quantité de CP autorisée détermine la production journalière permise par la ration totale (*cf.* 3.3).

Pour les vaches taries, le plan de distribution ne comprend que des fourrages jusqu'à trois semaine avant vêlage. Puis pendant les trois semaines précédant le vêlage, les vaches taries reçoivent du concentré en vue de la préparation au vêlage.

Pour les génisses, les plans de distribution sont simplifiés pour ne retenir que des quantités de fourrages et concentrés pour trois catégories de femelles après sevrage : femelles de moins d'un an, femelles d'un à deux ans et femelles de plus de deux ans. Les veaux femelles consomment du lait ou de la poudre de lait de la naissance jusqu'au sevrage (70 jours par défaut). Selon le choix de l'expérimentateur, il s'agit de la poudre de lait, de lait du tank ou de lait riche en cellules somatiques. Les veaux mâles n'ont pas de représentation réelle mais leur consommation de lait ou de poudre de lait jusqu'à 10 jours d'âge est comptabilisée.

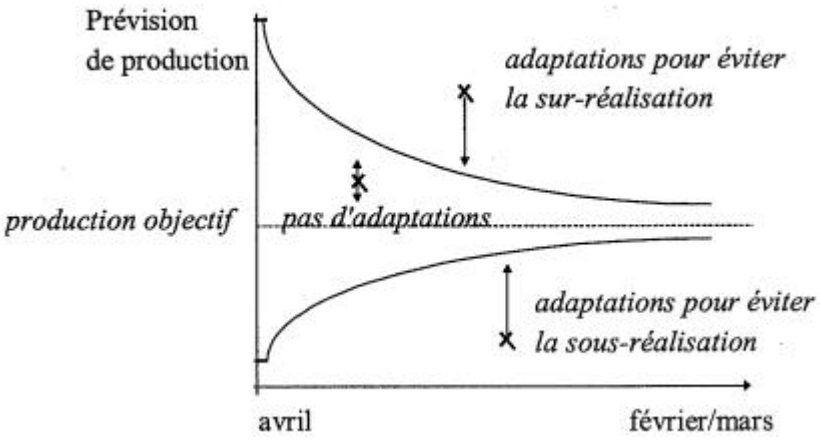


Figure 4-7. Principe général de mise en jeu des décisions d'adaptation à l'objectif de volume à produire

6. Modélisation de la gestion du volume à produire

6.1. Gestion du volume à livrer

Le volume à livrer par l'atelier est défini en litres et en TB de référence pour la campagne [avril$_n$; mars$_{n+1}$]. Il est fixe pour plusieurs campagnes successives d'un même protocole. Deux stratégies sont définies :

- Absence de gestion du volume à livrer : la limitation de la production intervient par le nombre de vaches minimum et maximum. Des règles de respect de seuils de concentration en cellules somatiques du lait de tank (CCSLT) ou individuelle (CCSLI) peuvent intervenir conditionnellement au paiement du lait (pénalité sur le lait pour un CCSLT élevé)
- Gestion conditionnelle du volume à livrer: des réactions d'adaptation interviennent pour limiter la sous et la sur-réalisation du volume à produire et respecter les seuils de CCSLT ou CCSLI.
- Gestion du volume à livrer avec contrainte de « forcing » : la sous-réalisation sera évitée à tout prix, sauf en cas d'arrêt de collecte sur CCSLT hors seuil.

6.2. Prévision de réalisation du volume à livrer et réaction d'adaptation

Une prévision de production laitière jusqu'à la fin de la campagne est réalisée tous les mois pour chaque vache en tenant compte de son stade physiologique, de ses troubles de santé en cours ou prévisionnels. Une estimation du volume de lait livré est calculée à partir de ces prévisions et du volume de lait déjà livré. En fonction de cette estimation, des réactions d'adaptation de l'effectif des vaches sont gérées selon le principe illustré par la Figure 4-7. Ces réactions sont paramétrables par l'expérimentateur, qui peut choisir de resserrer plus ou moins les courbes d'indifférences autour de l'objectif. La gestion de la réforme et de l'achat des vaches dépend donc de ces paramètres (*cf.* 4.1 et 4.3). Cependant, en fin de campagne laitière (janvier à mars), les achats/réformes d'animaux sont bridés par des plafonds d'autorisations pour ne pas risquer de disposer, pour le début de la campagne suivante, d'un troupeau d'effectif complètement incohérent par rapport au volume à produire sur la campagne.

6.3. Seuil de CCST

En France, des pénalités au prix du litre de lait peuvent être appliquées selon la CCST (-3,05 à -18,29€ pour 1000 litres). Si la moyenne géométrique des CCST sur 2 fois trois mois consécutifs est supérieure au seuil de CCST maximum, un arrêt de la collecte peut être prononcé. En cas de pénalités ou d'arrêt de collecte, des adaptations visant à limiter les pénalités peuvent être envisagées : réformes prioritaires, tri du lait, augmentation de la prévention des IIM et traitement en lactation

selon le CCSI des vaches. Les deux dernières adaptations sont très onéreuses (quantité importante de lait jeté, coût de la prévention) et ne seront donc utilisées que dans les cas les plus pénalisants.

7. Modélisation des résultats économiques

L'objectif du simulateur n'est pas d'optimiser les performances technico-économiques d'un atelier de bovins laitiers, mais de comparer les différences technico-économiques d'une modification de pratique pour un même atelier. Cette comparaison économique par la simulation n'est possible que si les charges de structure et l'unité de main d'œuvre de l'atelier ne diffèrent pas entre les scénarios. Une différence de marge brute entre les scénarios correspond donc à la même différence en valeur absolue d'excédent brut d'exploitation et de revenu. L'échelle de la marge brute est donc suffisante pour mettre en évidence des différences de revenu. Dans le cas de notre simulateur, la marge brute avec ou sans variation d'inventaire correspond au différentiel : Produits – Charges opérationnelles (hors fourrages).

7.1. Calcul des produits

Les produits proviennent de la commercialisation du lait et des animaux. Le prix de vente mensuel du lait est paramétrable par l'expérimentateur. Pour la commercialisation des animaux, c'est le solde de l'exercice (somme des ventes – somme des achats) qui est considéré dans les produits. Les prix d'achat et les prix de vente trimestriels des animaux sont définis par l'expérimentateur et dépendent du type génétique de l'individu (de race pure, issu de croisement laitier pour les vaches et veaux ou issu de croisement viande pour les veaux). L'expérimentateur peut décider d'appliquer un taux annuel d'accroissement ou de dépréciation sur ces prix.

7.2. Calcul des charges

Deux types de charges sont paramétrés dans le simulateur :

- Les charges variables exprimées à partir de compteurs. Elles correspondent aux cumuls sur les concentrés, aux inséminations, à la prévention et aux traitements des IIM, aux traitements des autres troubles de santé, aux traitements hormonaux des troubles de la reproduction et à un forfait vétérinaire pour tous les postes sanitaires non identifiés (vaccinations, traitements antiparasitaires, etc…).
- Les charges forfaitaires appliquées chaque mois à chaque animal présent. Elles correspondent à d'autres frais d'élevage que ceux cités ci-dessus.

Comme pour les produits, l'expérimentateur peut décider d'appliquer un taux d'accroissement ou de dépréciation selon l'évolution des coûts.

Chapitre 5 : Evaluation de l'intérêt technico-économique du croisement entre races laitières par simulations

L'objectif de ce chapitre est de présenter une évaluation par simulations des performances technico-économiques d'ateliers de bovins laitiers initialement en race pure Holstein dans lesquels le croisement entre races laitières est introduit**.** Les hypothèses sous-jacentes sont que cette introduction présente un intérêt qui dépend principalement :

- des schémas de croisement et des races adoptés et du temps écoulé depuis la mise en place du schéma de croisement ;
- de la conduite de l'atelier laitier, ainsi que des performances de production, de reproduction et de santé du troupeau considéré ;
- du prix de vente du lait et du prix d'achat des aliments concentrés.

Les simulations ont été réalisées à partir du simulateur ECOMAST dont le fonctionnement a été décrit dans le chapitre 4.

1. Matériel et méthode

1.1. Définition des protocoles de simulation

Un protocole de simulation combine quatre éléments de scénarios. Les protocoles retenus et leur dénomination sont présentés dans la Figure 5-1.

Elément 1 - Atelier initial en race pure Holstein défini avec une conduite de troupeau

Un atelier initial se définit par son effectif de vaches et de génisses ainsi que par ses performances de production, de reproduction et de santé au démarrage de la simulation. Il se définit aussi par sa conduite qui correspond à la gestion de la reproduction (autre que stratégie d'accouplement), de la santé (prévention et traitement), de l'alimentation, du renouvellement et des réformes.

Deux valeurs d'effectif, de 60 ou 120 vaches présentes-année, ont été testées pour l'atelier initial. L'effectif de 60 vaches présentes-année a été choisi pour correspondre à la taille moyenne des troupeaux français de demain (Lelyon *et al.*, 2012). L'effectif de 120 vaches se justifie par l'augmentation du nombre de grands troupeaux (> 100 vaches) prévue dans les prochaines années en France (Perrot *et al.*, 2014) et par sa situation courante dans d'autres pays européens (European Commission - EU FADN, 2013).

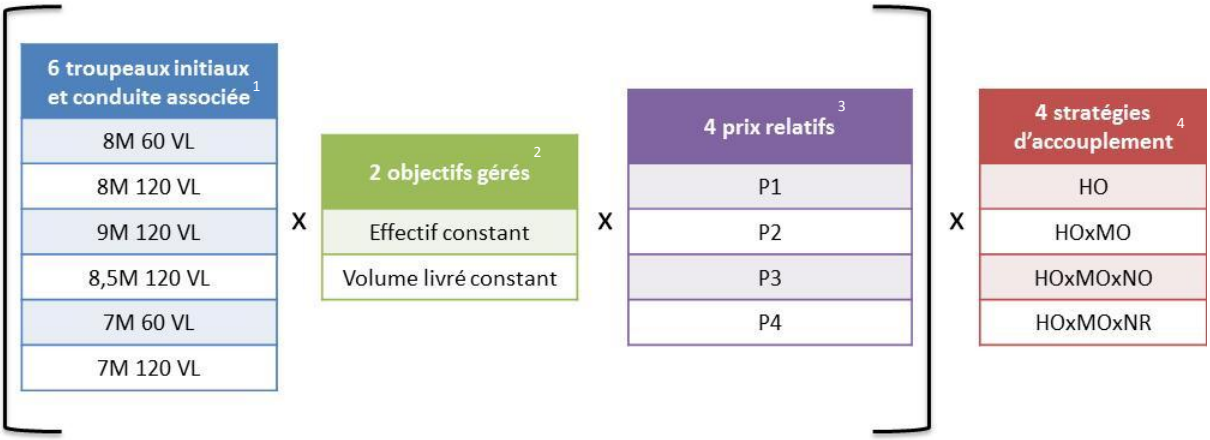


Figure 5-1. Description des protocoles simulés pour les quatre éléments de scénarios

[1]8M 60 VLP = troupeau initial de 60 vaches présentes année à 8000l de lait par an, 8M 120 VLP = troupeau initial de 120 vaches présentes année à 8000l de lait par an, 9M 120 VLP = troupeau initial de 120 vaches présentes année à 9000l de lait par an, 8,5M 120 VLP = troupeau initial de 120 vaches présentes année à 8500l de lait par an en situation de reproduction et sanitaire dégradée, 7M 60 VLP = troupeau initial de 60 vaches présentes année à 7000l de lait par an en vêlages groupés, 7M 120 VLP = troupeau initial de 120 vaches présentes année à 7000l de lait par an en vêlages groupés (description des performances moyennes des troupeaux initiaux dans le tableau 5-7).
[2]Effectif constant = Maintien de l'effectif initial tout au long de la simulation, Volume livré constant = Maintien de l'objectif de livraison initial tout au long de la simulation
[2]HO = race pure Holstein, HOxMO = croisement alternatif Holstein et Montbéliarde, HOxMOxNO = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Normande, , HOxMOxRS = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Rouge nordique.
[3]EF = pas de gestion du volume à livrer seulement un objectif de maintien de l'effectif tout au long de la simulation, VF = avec gestion du volume à livrer tout au long de la simulation
[3]P1 = un prix de base de vente du lait, une grille de modulation du prix du lait sur sa qualité et un coût des aliments concentrés correspondant à ceux de l'année 2014 ; P2 = un prix de base de vente du lait de 20% inférieur à P1, une grille de modulation du prix du lait sur sa qualité identique à P1 et un coût des aliments concentrés de 20% supérieur à P1 ; P3 =un prix de base de vente du lait de 20% inférieur à P1, une grille de modulation du prix du lait sur sa qualité dans laquelle le paiement du gramme différentiel de TB et de TP est de 20% supérieur à celui de P1, et un coût des aliments concentrés de 20% supérieur à P1 ; P4 = un prix de base de vente du lait de 20% supérieur à P1, une grille de modulation du prix du lait sur sa qualité identique à P1 et un coût des aliments concentrés de 20% inférieur à P1.

Quatre niveaux initiaux de performances zootechniques ont été testés :

- un niveau de production moyen à 8000 L par vache présente-année avec des performances de reproduction et de santé de même ordre de grandeur que celles de la moyenne des troupeaux français pour ce niveau de production (noté 8M). Ce scénario a été choisi pour représenter une situation de référence basée sur les résultats du contrôle laitier et pour laquelle des références technico-économiques étaient disponibles (à partir de réseaux d'élevage par exemple).
- un niveau de production moyen à 9000 L par vache présente-année, avec des performances de reproduction et de santé représentatives de la moyenne des ateliers laitiers français pour ce niveau de production (noté 9M).
- un niveau de production moyen à 8500 L par vache présente-année avec une fréquence élevée des troubles de reproduction et de santé (noté 8,5M).
- un niveau de production moyen à 7000 L par vache présente-année, avec des performances de reproduction et de santé compatibles avec des vêlages groupés sur 3 mois (noté 7M).

Les conduites d'atelier associées à ces 4 niveaux initiaux de performances zootechniques ont été maintenues dans le temps lors des simulations, pour éviter de confondre les effets d'un changement de conduite avec ceux du croisement.

Elément 2- Stratégie d'accouplements

Une stratégie d'accouplement, notée stratégie par la suite, correspond soit à l'utilisation exclusive de taureaux Holstein, soit à la mise en place d'un schéma de croisement sur toutes les vaches d'un atelier initial en race pure Holstein dès la première année de la simulation. Dans ce dernier cas, l'objectif retenu pour les simulations est d'introduire le croisement entre races laitières le plus rapidement possible et de manière durable dans l'atelier. En effet, les résultats issus de l'étude descriptive des pratiques (*cf.* Chapitre 3) ont montré que les essais de croisement engagés sur une faible proportion des vaches Holstein ne se maintiennent pas longtemps dans le temps.

Trois schémas de croisement ont été testés : croisement alternatif entre les races Holstein et Montbéliarde (HOxMO), croisement rotatif entre les races Holstein, Montbéliarde et Normande (HOxMOxNO) et croisement rotatif entre les races Holstein, Montbéliarde et Rouge Scandinave (HOxMOxRS). Bien que le croisement rotatif HOxMOxNO soit peu pratiqué en France (*cf.* Chapitre 2), l'abondance d'informations sur ces trois races et leur avantage à bénéficier de la sélection génomique nous ont incités à tester ce scénario.

Elément 3- Mode de gestion de l'effectif de vaches et de l'objectif de livraison

Deux modes de gestion ont été testés : une absence d'objectif de livraison avec seulement un objectif de maintien de l'effectif initial et une gestion de l'objectif de livraison pour limiter la sous- et sur-réalisation de cet objectif. Sans investissement conséquent, le nombre de places maximal est souvent limitant dans les ateliers et dans cette situation, les éleveurs peuvent avoir comme objectif de maximiser l'occupation des places disponibles dans les bâtiments existants et donc de maintenir l'effectif de vaches dans le temps. D'autres éleveurs peuvent avoir un contrat avec des industriels (Lelyon et al., 2012) incitant à maintenir le volume de lait livré dans le temps, sans le dépasser. En raison des évolutions d'ordre génétique et phénotypique affectant le niveau de production de lait par vache, des variations du nombre de vaches-présentes-année sont alors simulées, en supposant que les bâtiments sont en capacité d'accueillir les éventuels animaux supplémentaires.

Elément 4- Prix relatifs

Les niveaux de prix relatifs concernent à la fois le prix de vente du lait commercialisé et le prix d'achat des concentrés (concentré de production et concentré d'équilibre de la ration de base). Le prix de vente du lait commercialisé est déterminé mensuellement à partir d'un prix de base modulé par la qualité du lait livré, dont les pénalités liées au CCSLT et le paiement des grammes différentiels de la matière utile. Dans le cas d'une gestion d'un l'objectif de livraison, une décote du prix du lait est appliquée sur l'éventuel volume livré en sur-réalisation. Quatre niveaux de prix relatifs, invariants sur la durée des simulations, ont été testés :

- P1 : un prix de base du lait, une grille de modulation du prix du lait sur sa qualité et un prix d'achat des aliments concentrés correspondant à ceux de l'année 2014 ;
- P2 : un prix de base du lait de 20% inférieur à celui de P1, une grille de modulation du prix du lait sur sa qualité identique à P1 et un prix des aliments concentrés de 20% supérieur à celui retenu en P1 ;
- P3 : un prix de base du lait de 20% inférieur à celui de P1, une grille de modulation du prix du lait sur sa qualité dans laquelle le paiement du gramme différentiel de TB et de TP est de 20% supérieur à celui de P1, et un prix des aliments concentrés de 20% supérieur à P1,
- P4 : un prix de base du lait de 20% supérieur à P1, une grille de modulation du prix du lait sur sa qualité identique à P1 et un prix des aliments concentrés de 20% inférieur à P1.

Tableau 5-1 – Variances génétiques, d'environnement permanent et résiduelles utilisées pour modéliser les valeurs génétiques et les niveaux adultes des individus simulés en race Holstein (A. Barbat, communication personnelle)

Caractère	Variance génétique	Variance d'environnement permanent	Variance résiduelle
Quantité de lait (kg)	576081	62500	853776
TB (g/kg)	8,82	0,72	5,29
TP (g/kg)	2,19	0,18	1,32
FER (eg)	0,005	0,0025	0,25
MACL (eg)	0,0412	0,0036	0,09

FER = Fertilité vache (définie selon l'indexation), MACL = Mammites cliniques (définies selon l'indexation), eg = écart type génétique

Tableau 5-2. Progrès génétique annuel et écarts entre races appliqués aux index des taureaux utilisés pour les inséminations et hétérosis appliqués aux vaches issues de croisement[1].

Caractères	Holstein	Montbéliarde		Normande		Rouge scandinave		Hétérosis
	Progrès génétique	Progrès génétique	Ecart /HO	Progrès génétique	Ecart /HO	Progrès génétique	Ecart /HO	
Quantité de lait (kg)	80	52	-1000	62	-1850	52	-600	510
TB (g/kg)	0	0,03	+0,30	0	+3,25	0,01	+2,45	0,15
TP (g/kg)	0,04	0,08	+0,30	0,09	+1,45	0,08	+0,60	0
FER (eg)[2]	0,05	0,05	+2,00	0,02	+1,70	0,05	+1,50	0,40
MACL (eg)[3]	0,04	0,04	+2,50	0,02	+0	0,06	+2,50	0

HO = Holstein, eg = écart type génétique

[1]Les progrès génétiques sont ceux des taureaux nés entre 1998 et 2010 (Launay and Le Mezec, 2013) pour chacune des races françaises et après discussion avec des experts. Pour les races Rouges Scandinaves, les progrès génétiques ont été trouvés sur le site http://www.sweebv.info/ba52nycknav.aspx, consulté le 13 janvier 2015 et les écarts génétique avec la race Holstein nous ont été transmis par Sara Wiklert Petersson suite au stage de master de Rebeca Jönsson. Les écarts entre les races françaises et les effets d'hétérosis sont ceux estimés dans le chapitre 3.

[2]FER = Index Fertilité ; les index FER des taureaux sont ensuite transformés en index de fertilité pour le simulateur en utilisant la correspondance : +0,2 = +1 écart type génétique, pour le simulateur, un index de fertilité positif signifie plus de réussite à l'IA

[3]MACL = Index Mammites cliniques ; les index MACL des taureaux sont transformés en index de sensibilité aux mammites cliniques pour le simulateur en utilisant la correspondance : -0,16 = +1 écart type génétique de mammites cliniques, pour la simulateur un index de positif sensibilité aux mammites cliniques signifie une plus grande sensibilité aux mammites cliniques

1.2. Paramétrage des protocoles de simulation

1.2.1. Paramétrage des variables d'état des individus indépendantes de la conduite de l'atelier

Les valeurs des paramètres génétiques nécessaires au calcul des valeurs génétiques des animaux (*cf.* Chapitre 4) sont présentées dans les Tableaux 5-1 et 5-2. Les paramètres génétiques concernant la production laitière et les taux ont été déterminés directement à partir des résultats de l'étude génétique (*cf.* Chapitre 3). La modélisation des fonctions biologiques de la reproduction et de la santé de la mamelle dans le simulateur est plus complexe car elle n'est pas dérivée directement du modèle d'évaluation génétique française (*cf.* Chapitre 4). Des simulations de calibrage ont donc été nécessaires pour établir des correspondances, qui ont ensuite été appliquées pour paramétrer les écarts entre races tels qu'observés dans l'étude génétique pour la réussite à l'IA ou issus de la littérature (Rupp and Boichard, 2003; Bonaïti *et al.*, 2005), ou lorsqu'aucune référence n'était disponible, à dire d'experts (cas de la sensibilité aux mammites).

Les valeurs des paramètres non génétiques modulant les performances des animaux indépendamment de la conduite de l'atelier sont présentées dans les Tableaux 5-3 et 5-4. Ces valeurs ont été obtenues en réalisant des simulations de calibrage sur des troupeaux de race pure Holstein de différents niveaux de production et en confrontant les performances phénotypiques issues de ces simulations aux connaissances de la littérature. Les valeurs retenues ont été considérées indépendamment du type génétique des animaux, excepté pour l'expression des chaleurs. Les vaches de races Montbéliarde et Normande (et aussi, par hypothèse, Rouge Scandinave) exprimant mieux leurs chaleurs que les vaches de race Holstein (Cutullic et al., 2006; Disenhaus et al., 2010), la proportion des œstrus non exprimés chez les animaux issus de croisement a été supposée égale à la moyenne des proportions des œstrus non exprimés chez les parents de race pure.

Tableau 5-3. Paramètres individuels de la fertilité/fécondité des vaches

Description des paramètres	Valeur du paramètre	Source[1]
Détectabilité des œstrus en race Holstein		
Proportion d'ovulations sans expression ou avec expression discrète		
Génisses	0,4	
Vaches		
1ère ovulation	0,65	A dires d'expert mais validés sur la proportion totale d'ovulation sans expression d'après Cutullic, 2010
2ème ovulation	0,45	
3ème et + ovulation	0,3	
1er retour	0,45	
2ème retour	0,3	
Détectabilité des œstrus en races Montbéliarde/Normande		
Proportion d'œstrus sans expression ou avec expression discrète		
Génisses	0,4	
Vaches		
1ère ovulation	0,45	Dérivé de Cutillic et al., 2006 ; Disenhaus et al., 2010
2ème ovulation	0,35	
3ème et + ovulation	0,25	
1er retour	0,25	
2ème retour	0,15	
Effet de la production laitière journalière sur l'expression des chaleurs		
Augmentation de la proportion des ovulations sans expression entre 20 et 50 kg de lait par jour	+0,005	
Intervalle vêlage-1ère ovulation des cycles normaux		
Primipares (jours)	Moy : 31, ET : 10, min : 15	Grimard et Disenhaus, 2005
Multipares (jours)	Moy : 26, ET :7, min : 15	Grimard et Disenhaus, 2005
Anomalie de cycle		
Durée des anœstrus (jours)	Moy : 75, ET : 10, min : 50	
Durée des cycles décalés (jours)	Moy : 40, ET : 10, min : 26	
Risque d'anœstrus (coefficient multiplicatif)	1,2	
Risque de 1er cycle décalé	1,1	
Risque de 2ème cycle décalé	1,1	
Effet du niveau adulte de production 305j sur le risque d'anomalie de cycle		
Production 305j pour proportion minimale (kg)	5000	Validation sur la proportion totale de cycles normaux/anormaux d'après Cutullic, 2010
Production 305j pour proportion maximal (kg)	12000	
Proportion minimale d'anœstrus	0,05	
Proportion maximale d'anœstrus	0,25	
Proportion minimale de 1er cycle décalé	0,05	
Proportion maximale de 1er cycle décalé	0,15	
Proportion minimale de 2ème cycle décalé	0,05	
Proportion maximale de 2ème cycle décalé	0,15	
Durée de gestation (j)	282	
Coefficient multiplicateur du niveau individuel de probabilité de réussite à l'IA[2]		
Génisse	0,78	
Parité		
3ème lactation	0,95	
4ème lactation et +	0,93	
Rang de l'ovulation		
1ère ovulation	0,9	
2ème ovulation	0,95	
Cycle anormal	0,7	
Pour une production journalière minimale de 20 kg/j		
Stade de lactation minimal de 30 jours	0,5	
Stade de lactation maximal de 100 jours	0,7	Dérivé de Disenhaus et al., 2005 et Letort et al., 2012
Pour une production journalière maximale de 50 kg/j		
Stade de lactation minimal de 30 jours	0,2	
Stade de lactation maximal de 130 jours	0,4	
Fréquence de la mortalité embryonnaire précoce	0,2	Freret et al., 2006

IA= Insémination artificielle, Moy = Moyenne, ET = écart type, min = minimum

[1] *L'absence de source citée signifie que les paramètres ont été déterminés à l'appréciation des auteurs*

[2] L'effet de la production sur la probabilité de réussite à l'IA est décrite dans le 3.1 du chapitre 4.

Tableau 5-4. Principaux paramètres individuels de la santé des vaches

Description des paramètres	Valeur du paramètre	Source[1]
Infection intra-mammaires (IIM)		
Effet de la production laitière journalière sur le risque d'IIM		
Production minimale pour un effet et risque minimal associé	25 kg/j ; 0,5	
Production maximale pour un effet et risque maximal associé	50 kg/j ; 1,8	
Effet du niveau adulte de production 305j sur le risque d'IIM		
Production minimale pour un effet et risque minimal associé	4000 kg ; 0,8	Robert-Briand, 2006
Production maximale pour une effet et risque maximal associé	12000 kg ; 2,5	
Parité		
1ère lactation	0,75	
2ème et 3ème lactation	1	
4ème lactation et +	1,5	
Mortalité embryonnaire tardive		
Période de gestation	21 à 120 jours	Freret et al., 2006
Fréquence	0,16	
Avortement fœtal		
Période de gestation	150 à 275	
Fréquence	0,015	
Taux mortalité journalier aléatoire vaches	0,03	
Taux mortalité aléatoire génisses journalier	0,005	Perrin et al., 2011
Taux mortinatalité journalier	0,06	
Taux mortalité veaux 1-15 jours journalier	0,02	

[1] *L'absence de source citée signifie que les paramètres ont été déterminés à l'appréciation des auteurs*

Tableau 5-5. Principaux paramètres liés à la conduite des différents ateliers (1/2)

Paramètre[1]	Atelier initial				Source[2]
	8M	9M	8,5M	7M	
Gestion de la reproduction					
Sélection des 10 taureaux	Les plus utilisés	Sur la quantité de lait	Sur la quantité de lait	Sur les caractères fonctionnels et TP	
% Ovulations détectables détectées (sensibilité)	50	50	45	54	Dérivé de Disenhaus et al., 2010
Age minimal pour autorisation IA sur génisse	540	540	540	520	
Période IA autorisées					
Génisses	Toute l'année	Toute l'année	Toute l'année	15/03 au 31/07	
Vaches	Toute l'année	Toute l'année	Toute l'année	15/04 au 31/08	
Gestion des infections intra-mammaires (IIM)					
Prévention IIM basse					
Seuil de déclenchement CCSLT (x1000 cellules/ml)	<250	<250	<280	<250	
Coefficient multiplicateur du risque d'IIM	0,8	0,8	0,9	0,8	
Durée minimale d'application de la prévention (jours)	60	60	60	60	
Prévention IIM moyenne					
CCSLT (x1000 cellules/ml) associé	<300	<300	<350	<300	
Coefficient multiplicateur du risque d'IIM	0,35	0,35	0,4	0,35	
Durée minimale d'application de la prévention (jours)	60	60	60	60	
Prévention IIM haute					
CCSLT (x1000 cellules/ml) associé	>300	>300	>350	>300	
Coefficient multiplicateur du risque d'IIM	0,2	0,2	0,24	0,2	
Durée minimale d'application de la prévention (jours)	60	60	60	60	
Incidence annuelle cas clinique (Nbcas/VLP)	0,4	0,4	0,5	0,4	Dérivé de Seegers et al., 2013
Effet de la conduite sur les autres troubles de la santé (TS)					
Incidence autres TS	0,4	0,4	1	0,4	
Coefficient multiplicateur de la probabilité de réussite à l'IA suite TS	0,9	0,9	0,7	0,9	Dérivé de Fourichon et al., 2000
Coefficient multiplicateur de la proportion d'œstrus sans expression suite TS	1,1	1,1	1,3	1,1	
Gestion de l'alimentation des vaches en production					
Ration de base équilibrée (RBE)	EM/concentrés	EM/concentrés	EM/concentrés	herbagère	
Quantité de fourrages consommés en lactation	14 kg MS/j	15 kg MS/j	15 kg MS/j	De 14 à 17 kg MS/j	
Proportion fourrages distribués/ fourrages consommés	1,07	1,07	1,07	1,07	
Quantité de concentrés d'équilibre distribués	3,5 kg MB/j	4,5 kg MB/j	4,5 kg MB/j	De 0 à 3 kg MB /j	
Production laitière journalière permise par RBE	26 kg	32 kg	32 kg	De 16 à 28 kg	
Quantité maximale de concentré de production	6 kg MB/j	8 kg MB/j	8 kg MB/j	2 kg MB	
Coefficient multiplicateur de la probabilité de réussite à l'IA pour alimentation limitante	1	1	0,85	De 0,8 à 0,9	Dérivé de Cutullic, 2010
Pénalisation du TP suite à un déficit énergétique (en g/kg)	0	0	0	2	

IA = Insémination artificielle, IIM = Infection intra-mammaire, CCSLT = concentration en cellules somatiques du lait de tank, Nbcas/VLP = Nombre de cas par vache présente-année, TS = Troubles de la santé autres qu'infection intra-mammaire, EM = Ensilage de maïs, MS/j = Matière sèche par jour, MB/j = Matière brute par jour

[1]La description des index des taureaux selon leur type de sélection est donnée dans le Tableau 5-7.

[2]L'absence de source citée signifie que les paramètres ont été déterminés à l'appréciation des auteurs

Tableau 5-6. Principaux paramètres liés à la conduite des différents ateliers (2/2)

Paramètre[1]	Atelier initial			
	8M	9M	8,5M	7M
Gestion du renouvellement				
Tri des veaux femelles	Selon besoins	Selon besoins	Selon besoins	Aucun
Proportion maximale de l'effectif de génisses vendu en amouillantes	10%	10%	10%	20%
Gestion de la réforme				
Risque de réforme aléatoire	0,03	0,03	0,03	0,03
Risque réforme autres TS	0,075	0,075	0,09	0,075
Réforme forcée des vaches non gravides hors période IA (vêlages groupés)	non	non	non	oui
Score de candidature à la réforme				
Coefficient multiplicateur du score des vaches en 1ère lactation	0,8	0,8	0,8	0,8
Coefficient multiplicateur du score des vaches en lactation 6 à 8	4	4	4	4
Coefficient multiplicateur du score des vaches en lactation 9 et plus	7	7	7	7
Coefficient multiplicateur du score des 10% meilleures sur le lait	0,4	0,4	0,4	1
Coefficient multiplicateur du score des vaches à CCSI>3000	10	10	5	10
Coefficient multiplicateur du score pour occurrence d'une IIMc	1,5	1,5	1,5	1,5
Coefficient multiplicateur du score des vaches de stade de lactation <= 3 mois	0,2	0,2	0,2	0,2
Coefficient multiplicateur du score des vaches non gravides pour un stade de lactation >3 mois				
Stade de lactation <6 mois et >4 IA	De 2 à 20	De 2 à 20	De 0,8 à 15	De 2 à 15
Stade de lactation <6 mois et 1 à 3 IA	De 0,8 à 2	De 0,8 à 2	De 0,5 à 1	De 0,8 à 1
Stade de lactation <6mois et 0 IA	0,5	0,5	0,4	0,5
Stade de lactation >6 mois et > 4 IA	De 5 à 40	De 5 à 40	De 1 à 20	De 40 à 90
Stade de lactation >6 mois et 1 à 3 IA	De 2 à 10	De 2 à 10	De 0,8 à 5	De 40 à 90
Stade de lactation >6mois et 0 IA	De 2 à 5	De 2 à 5	1	De 40 à 90
Coefficient multiplicateur du score des vaches avec IA <46 jours	De 0,2 à 1,1	De 0,2 à 1,1	De 0,2 à 0,6	De 0,2 à 0,9
Coefficient multiplicateur du score des vaches gravides (fonction du stade gestation)	De 0,1 à 1	De 0,1 à 1	De 0,1 à 0,2	0,1
Proportion maximale de l'effectif maximal vendu par an	40%	40%	40%	40%
Proportion maximale de l'effectif maximal acheté par an	20%	20%	20%	0%

TS = Troubles de santé autres qu'infection intra-mammaire, IA = Insémination artificielle, CCSI = concentration en cellules somatiques individuelle, IIMc = Infection intra-mammaire clinique

[1]Les différentes modalités de tri des génisses sont décrites dans le chapitre 3

Tableau 5-7. Moyenne des index pour la quantité de lait, le TB, le TP, la fertilité et les mammites cliniques des 10 taureaux des trois catégories de choix possibles

Choix des taureaux	Race	Quantité de lait (kg)	TB (g/kg)	TP (g/kg)	Fertilité (eg)	Mammites cliniques (eg)
Les plus utilisés	HO	470	0,73	0,35	0,23	0,43
	MO	600	0,20	0,75	0,56	0,37
	NO	684	0,27	0,31	-0,13	0,02
	NR[1]	637	0,73	0,81	0,44	0,33
Sur la quantité de lait	HO	1640	-1,94	-0,52	0,49	0,31
	MO	956	-1,20	-0,23	0,32	0,11
	NO	1114	-0,88	-0,19	-0,09	0,09
	NR	1110	-0,30	0,19	0,26	0,22
Sur les caractères fonctionnels et TP	HO	275	1,40	1,08	1,50	0,90
	MO	281	1,22	1,45	1,10	0,91
	NO	521	1,11	1,15	0,53	0,13
	NR	251	1,38	0,80	0,62	0,36

eg = écart-type génétique

Les données des index sont celles de taureaux existants, issus du Bilan Génétique des Inséminations Artificielles (Le Mézec and Launay, 2014), des différents catalogues des entreprises de sélection et de l'indexation des taureaux rouges nordiques (site internet : http://www.sweebv.info/ba52nycknav.aspx, consulté le 13 janvier 2015)

Les index des taureaux Rouges Nordique ont été transformés à l'échelle française à l'aide des différentes correspondances données obtenues sur le site internet : www.nordicebv.info/NR/.../PrinciplesNyeste.pdf, consulté le 13 janvier 2015

[1]Pour les taureaux importés, les index pour les plus utilisés sont en fait sélectionnés sur l'index de synthèse scandinave

Tableau 5-8. Les principales caractéristiques des quatre ateliers initiaux

Caractéristiques des ateliers	Troupeau initial					
	8M 120 VLP	**9M 120 VLP**	**8,5M 120 VLP**	**7M 120 VLP**	**8M 60 VLP**	**7M 60 VLP**
Effectifs						
Vaches en 1ère lactation	40	40	43	44	18	22
Vaches en 2ème lactation	32	32	36	34	16	17
Vaches en 3ème lactation	21	21	25	25	12	12
Vaches en 4ème lactation et plus	27	27	17	22	14	11
Génisses de 0 - 1 ans	35	35	43	58	18	29
Génisses de 1 -2 ans	42	42	38	61	21	30
Génisses de plus de 2 ans	18	18	20	15	10	8
Valeur génétique vraie vaches[1]						
Lait (kg)	+16	+1016	+694	-222	+5	-213
TB (g/kg)	-0,14	-0,56	-0,82	0,78	-0,12	+0,67
TP (g/kg)	+0	-0,12	-0,04	0,66	-0,10	+0,64
Fertilité (eg)	+0	+0	-0,35	+1,15	+0,05	+1,15
Sensibilité mammites cliniques (eg)	+0,03	+0,03	+0,20	+0,25	+0	+0,23
Performances zootechniques moyennes						
Production moyenne						
Lait (litres)	8050	9000	8650	7100	7950	7100
TB (g/l)	40,6	39,4	39,5	40,2	40,4	40,3
TP (g/l)	32,8	32,0	31,4	30,0	32,7	30,0
Reproduction moyenne						
% Ovulation sans expression vache	11	12	17	8	11	8
% Cyclicité régulière	50	45	45	50	50	49
IVIA1 (jours)	86	90	93	82	87	83
IVIAF (jours)	131	140	170	100	131	102
Taux de réussite 1ère IA des vaches (%)	44	39	26	45	46	47
Age 1er vêlage (mois)	29,5	29	29	32	29,5	31
Taux de réussite 1ère IA des génisses (%)	53	53	43	67	58	67
Santé de la mamelle moyenne						
CCSLT (cellules/mL)	290	300	320	260	290	270
IIMc/100 VLP (n)	45	48	55	40	46	41
Nombre de traitements[2]	6,4	6,6	7,5	5,7	6,2	5,7
Consommation moyenne par vache par an d'aliments						
Fourrages (kg matière sèche)	5250	5300	5250	5550	5250	5550
Concentrés (kg matière brute)	1650	1950	1950	1050	1650	1050
Taux de réforme moyen du troupeau (%)	30	32	34	36	30	38
Taux de renouvellement (%)	31,5	32,5	34	37	32	38

eg = écart type génétique, IVIA1 = Intervalle vêlage – 1ère insémination, IVIAF = Intervalle vêlage – insémination fécondante, CCSLT = Concentration en cellules somatiques du lait de tank, IIMc/100 VLP = Infections intra-mammaires cliniques détectées pour 100 vaches-présentes

[1]une valeur génétique vraie de fertilité positive signifie plus de réussite à l'IA, une valeur génétique vraie de sensibilité aux IIMc positive signifie une plus grande sensibilité aux mammites cliniques

[2]Le nombre de traitement regroupe les traitements antibiotiques et de prévention liés à la santé de la mamelle, les traitements antibiotiques liés aux autres troubles de la santé, les traitements hormonaux liés au troubles de la fertilité, les inséminations et les vêlages.

1.2.1. Obtention des ateliers initiaux en race pure des protocoles de simulation

Pour obtenir les ateliers initiaux en race pure Holstein, 2 étapes ont été nécessaires : le paramétrage de la conduite des ateliers et l'initialisation des variables d'états des vaches des troupeaux des ateliers initiaux.

Les valeurs des paramètres de conduite pour chacun des ateliers initiaux sont présentées dans les Tableaux 5-5, 5-6 et 5-7. Elles ont été calibrées après une série de simulations sur 10 ans permettant de vérifier la stabilité des performances zootechniques des ateliers dans le temps en dehors des évolutions liées au progrès génétique. Ces valeurs définissent des conduites d'atelier impactant plus ou moins fortement les performances des animaux. Le choix de ces valeurs repose sur l'hypothèse que *(1)* les différences entre les performances moyennes des ateliers 8M et 9M sont davantage expliquées par une différence de niveau génétique que par les paramètres relatifs à la technicité de l'éleveur et *(2)* les différences de performances des ateliers 7M et 8,5M par rapport aux ateliers 8M et 9M respectivement, bien qu'influencées par le niveau génétique des animaux, sont essentiellement expliquées par la conduite de l'atelier. Les valeurs des paramètres de conduite ont été maintenues sur toute la durée des simulations pour un atelier donné.

Une fois le paramétrage arrêté, une simulation sur 10 ans avec 20 répétitions a été réalisée pour chaque atelier à partir des troupeaux utilisés pour les simulations tests décrites précédemment (*cf.* 1.2.2). A partir de leurs caractéristiques principales, deux ou trois des 20 troupeaux finaux ainsi obtenus ont été retenus pour chaque atelier. Cette simulation sur 10 ans ayant entrainé un progrès génétique, une correction du niveau génétique de ces troupeaux a été appliquée pour pouvoir les utiliser comme troupeaux initiaux. Ces troupeaux initiaux ont été de nouveau testés par une simulation sur 10 ans pour observer l'évolution de leurs performances zootechniques et valider leur évolution génétique. Le troupeau initial dont les caractéristiques et l'évolution ont été les plus cohérentes avec la définition a priori de l'atelier initial considéré a ensuite été choisi pour la réalisation des protocoles de simulation décrits au 1.1. Les principales caractéristiques des ateliers initiaux ainsi retenus sont données dans le Tableau 5-8.

1.2.2. Paramétrage des conduites des ateliers au cours de la simulation

Le paramétrage des conduites des ateliers au cours de la simulation est identique à celui défini dans le 1.2.1, à l'exception de quelques spécificités liées à l'introduction du croisement. Comme pour les trois stratégies HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS, toutes les vaches Holstein ont été accouplées à des taureaux Montbéliards, une modulation de 1,2 a été ajoutée à la probabilité de réussite à l'IA de ces vaches Holstein pour prendre en compte un effet de la race du taureau (Barbat A., communication personnelle ; Seegers *et al.*, 2005). Pour répondre à l'objectif d'obtenir rapidement un troupeau composé à 100% de vaches issues de croisement, une modulation de 0,75 du score de

Tableau 5-9. Principaux paramètres économiques

Paramètres	Valeurs	Source[2]
Prix de vente du lait (€/1000L)		
Prix de base mensuel Janvier	390	
Prix de base mensuel Février	386	
Prix de base mensuel Mars	369	
Prix de base mensuel Avril	318	
Prix de base mensuel Mai	321	
Prix de base mensuel Juin	350	
Prix de base mensuel Juillet	370	
Prix de base mensuel Août	370	
Prix de base mensuel Septembre	368	Grille de paiement CILOUEST, cotations nationales
Prix de base mensuel Octobre	358	
Prix de base mensuel Novembre	355	
Prix de base mensuel Décembre	361	
Pénalités CCSLT seuil 250 000 cellules	3,05	
Pénalités CCSLT seuil 300 000 cellules	9,15	
Pénalités CCSLT seuil 400 000 cellules	18,29	
Paiement grammes différentiels TB référence 38g/l	2,60	
Paiement grammes différentiels TP référence 32g/l	6,60	
Décote appliqué au lait livré en cas de sur-réalisation	15,00	
Prix unitaire de vente des animaux (€)		
Veau mâle Holstein à 8j	80	
Veau mâle issu de croisement à 8j	110	
Veau femelle Holstein à 8j	40	
Veau femelle issu de croisement à 8j	60	
Génisse de réforme Holstein	800	Cotations nationales et communication personnelle de P. Le Mezec
Génisse amouillante avec IA <6 mois	1000	
Génisse amouillante avec IA >6 mois	1200	
Vache HO suite réforme aléatoire	800	
Vache HO suite réforme boucherie	1000	
Plus-value vache issue de croisement	200	
Coût d'achat des concentrés (€/tonne)		
Aliment concentré de production vache	340	Cotations nationales (Marché des céréales et tourteaux)
Aliment concentré ration de base équilibrée	265	
Aliment concentré génisse	200	
Coût lié à la reproduction (€)		
Prix unitaire IA	28	Communication personnelle P. Le Mezec
Prix unitaire traitement infertilité	25	
Coût lié à la santé de la mamelle (€)[1]		
Prix unitaire traitement IIMc	22	
Prévention traite basse (/an pour le troupeau)	1752	
Prévention traite moyenne (/an pour le troupeau)	3252	
Prévention traite haute (/an pour le troupeau)	4752	
Autre frais par animal (€)		
Frais vétérinaire hors IIM		
Vache	12	
Vache réforme aléatoire	50	
Vache mort aléatoire	50	
Frais d'élevage		
Veau mâle 8j vivant	20	
Veau mâle 8j mort	10	
Veau femelle 8j	25	
Génisse 0 - 1 ans	23	
Génisse 1 - 2 ans (de mai à octobre)	25	
Génisse 1 - 2 ans (de novembre à avril)	35	
Génisse > 2 ans (de mai à octobre)	35	
Génisse > 2 ans (de novembre à avril)	45	
Vache présente	55	

IIMc = Infection intra-mammaire clinique, IA = Insémination artificielle

[1]Le déclenchement des niveaux de prévention est fonction du seuil de CCSLT paramétré (cf. Tableau 5-5)

[2]L'absence de source citée signifie que les paramètres ont été déterminés à l'appréciation des auteurs

candidature préférentielle à la réforme des vaches issues de croisement a été ajouté. Enfin, dans l'atelier 7M, le paramétrage des génisses a été « conservation de toutes les génisses avec possibilité de vente en amouillantes ». Cependant, le taux de réforme observé dans les simulations réalisées avec cette gestion des génisses pour les stratégies en croisement a été supérieur à 40%, ce qui nous a semblé irréaliste. Par conséquent, dans les protocoles de l'atelier 7M avec des stratégies en croisement, la gestion des génisses a été paramétrée en fonction des besoins de renouvellement.

1.2.3. Paramétrage de la gestion de l'effectif de vaches et de l'objectif de livraison

Dans le cas d'une absence d'objectif à réaliser quant au volume de lait livré, la priorité est mise sur le maintien de l'effectif moyen de vaches présentes-année sur toute la durée de simulation. La variation permise autour de cet effectif est de 1% pour les ateliers initiaux 8M, 9M et 8,5M. En revanche, pour l'atelier initial 7M, la variation permise autour de cette moyenne a été fixée à 8% pour s'adapter à la contrainte de saisonnalité des vêlages, avec notamment une entrée groupée des génisses dans le troupeau de vaches et une réforme importante à la fin de la période de reproduction.

Dans le cas d'une gestion visant à atteindre un volume livré fixé à l'avance, la gestion des effectifs priorise la réactivité destinée à limiter la sous et la sur-réalisation par rapport à cet objectif de livraison. Les achats de vaches et les ventes de génisses amouillantes sont autorisés pour ces adaptations (Tableau 5-6).

1.2.4. Paramétrage des prix de vente et charges opérationnelles

Le prix de base mensuel du lait, le paiement des grammes différentiels de la matière utile et le prix d'achat des aliments concentrés pour les prix relatifs P1 sont données dans le Tableau 5-9. Les pénalités sur le prix de base mensuel du lait liées au CCSLT, les différents prix de vente des animaux et les charges opérationnelles autres que l'alimentation, couramment appelées frais d'élevage, sont également données dans le Tableau 5-9 et ont été identiques pour tous les protocoles des différents prix relatifs.

1.3. Exécution des plans de simulation

Le plan de simulation définit le nombre de répétitions à exécuter et l'horizon de simulation d'un protocole. L'horizon de simulation choisi a été de 15 ans. En effet, à partir d'un troupeau initial en race pure, l'atteinte du stade d'équilibre pour un troupeau en croisement est longue. Une durée de 15 ans a donc permis d'obtenir 5 générations successives de vaches issues de croisement dans le troupeau. Cela laisse également la possibilité d'étudier l'impact de l'introduction d'une stratégie en croisement à différents pas de temps en termes de phases de transition. Compte tenu de la stochasticité d'un grand nombre de processus biologiques modélisés (*cf.* Chapitre 4), il a été nécessaire de tester différents nombre de répétitions dans l'objectif de stabiliser les écart-types entre répétitions sans trop impacter le temps de de résolution du plan de simulation. Le nombre de 250 répétitions a ainsi été choisi.

1.4. Analyse des résultats

1.4.1. Analyse des effets des stratégies d'accouplement en croisement sur la composition génotypique des troupeaux

Pour les stratégies en croisement, l'évolution des effectifs de vaches Holstein, issues de croisements de première génération (F1), de deuxième génération (G2), de troisième génération (G3) et de quatrième génération et plus (G4+) sera décrite pour chaque année de l'horizon de simulation.

1.4.2. Analyse des performances zootechniques des troupeaux en fonction de la stratégie d'accouplement et de l'atelier

L'évolution sur les 15 années des performances zootechniques des différents ateliers pour la stratégie en race pure Holstein a été étudiée. Puis les performances zootechniques annuelles des ateliers pour les stratégies en croisement ont été analysées en écart aux performances zootechniques de référence de la stratégie en race pure Holstein. Les critères retenus pour mesurer l'intérêt des différentes stratégies sur les performances zootechniques des ateliers au cours des 15 années de simulation ont été :

- Pour les performances de production : la production laitière annuelle moyenne par vache présente-année (PL_{AMV}), le TB et le TP annuel moyen du lait livré (TB_{AML} et TP_{AML}, respectivement) ;
- Pour les performances fonctionnelles : le taux de réussite annuel aux IA ($TRIA_{AM}$) et l'intervalle vêlage – IA fécondante annuel moyen par vache ($IVIAF_{AMV}$), le nombre d'infections intra-mammaires cliniques détectées pour 100 vaches présentes-année (nombre d'IIMc/100VLP).

1.4.3. Analyse de l'effet du croisement sur la robustesse des vaches en fonction de la stratégie d'accouplement et de l'atelier laitier

Les critères retenus pour étudier la robustesse des vaches sont la proportion annuelle de vaches du troupeau en 4ème lactation ou plus (proportion de VL_{4+}) et le compte annuel moyen d'intervention par vache présente-année (compteur Nb_{AM} trt/VLP). Tous les traitements pour les différents troubles de santé (IIM et autres), les traitements pour les troubles de la fertilité, le nombre d'IA et le nombre de vêlages ont été cumulés dans le compteur Nb_{AM} trt/VLP, en raison du travail supplémentaire au travail d'astreinte et de leur rôle potentiel de source de stress.

1.4.4. Analyse de l'effet du croisement sur les performances économiques selon la stratégie d'accouplement et l'atelier pour le niveau de prix relatifs de 2014

Les performances économiques des ateliers laitiers étant essentiellement liées à la production laitière, les critères de volume de lait commercialisé et de prix de vente du lait commercialisé en fonction des stratégies d'accouplement et des ateliers seront étudiés pour les 15 années de la simulation.

Les critères économiques étudiés pour quantifier les écarts positifs ou négatifs de marge brute (MB) en fonction des ateliers, ont été le produit cumulé sur 15 ans et ses composantes ainsi que les charges opérationnelles et ses composantes ont été étudiées. Les écarts de MB annuelle entre toutes les stratégies ont également été calculés. En cas d'une modification de plus de 4% de la consommation totale de fourrages sur une année des vaches des stratégies en croisement par rapport à celles de la stratégie en race pure Holstein, les coûts d'alimentation et les MB ont été corrigées en considérant un gain ou une perte sur les coût de production de 30€ par tonne de matière sèche d'écart (Réseaux d'Elevage Pays de la Loire, 2013). Afin de prendre en compte qu'un gain ou une perte de MB dans 10 ans n'est pas équivalent au même gain ou perte de MB, en valeur absolue, dans un an, un taux d'actualisation de 3% par an a été appliqué à la MB selon la formule :

$$MBactu = MB(1+a)^{-n}$$

avec : MBactu = marge brute actualisée,

MB = marge brute calculée pour l'année considérée,

a = taux annuel d'actualisation,

n = nombre d'années séparant l'année d'expression de MBa de la première année de simulation.

Les MBactu ont ensuite été cumulées sur les 15 ans (MB_{15ans}) et ramenées à l'outil de production limitant, à la vache pour une gestion de l'effectif de vaches et aux 1000 L pour une gestion de l'objectif de livraison.

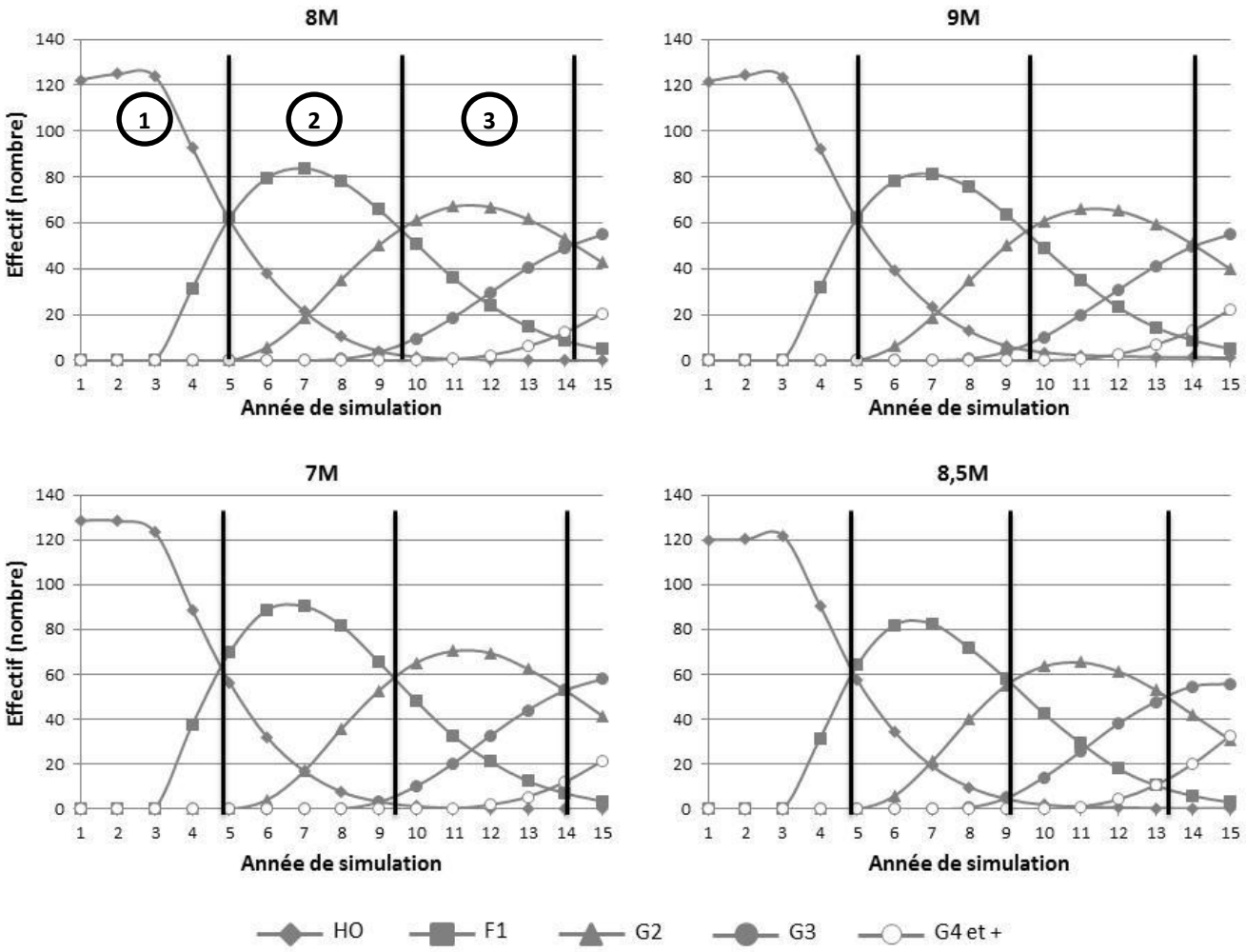


Figure 5-2. Composition génotypique du troupeau: effectif de vaches en lactation pour chaque type génétique en début de campagne selon l'atelier initial sur tout l'horizon de simulation

HO = vaches Holstein, F1 = vaches de 1ère génération de croisement, G2 = vache de 2ème génération de croisement, G3 = vaches de 3ème génération de croisement, G4 et + = vaches de 4ème génération et plus de croisement

Ateliers : 8M = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année, 9M = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année, 8,5M = troupeau initial à 8500l de lait par vache présente année en situation de reproduction et sanitaire dégradée, 7M = troupeau initial à 7000l de lait par vache présente année en vêlages groupés

L'étude des moyennes étant insuffisante, une étude de la dispersion des résultats a été réalisée. La proportion de répétitions des protocoles avec des stratégies en croisement ayant une MB_{15ans} supérieures à la moyenne de la MB_{15ans} obtenue avec la stratégie en race pure a été calculée. La proportion de répétitions des protocoles avec des stratégies en croisement ayant une MB_{15ans} supérieures à la MB_{15ans} maximale obtenue avec la stratégie en race pure a également été calculée.

1.4.5. Analyse de l'effet du croisement sur les performances technico-économiques en fonction de la stratégie d'accouplement et de l'atelier pour différents niveaux de prix relatifs

Les mêmes critères économiques que ceux décrits pour l'analyse des performances technico-économique pour le niveau de prix relatif de 2014 ont été étudiés. Les principales similarités ou différences par rapport aux résultats obtenus avec le niveau de prix relatif de 2014 ont été étudiées.

2. Résultats

2.1. Evolution de la composition génotypique des troupeaux en stratégie d'accouplement de croisement, pendant la simulation

Pour tous les protocoles de simulation, l'entrée des vaches issues de croisement dans le troupeau a été progressive. Au sein d'un atelier donné, l'évolution de la composition génotypique a été identique pour les trois stratégies en croisement, pour les deux effectifs testés (120 et 60 vaches) et pour les deux modes de gestion de l'effectif de vaches ou de l'objectif de livraison. La Figure 5-2 donne les évolutions de la composition génotypique des troupeaux de 120 vaches à effectif fixe de la stratégie HOxMO pour tous les ateliers. Trois périodes différentes en termes de composition génotypique des troupeaux, identiques pour tous les ateliers, ont été identifiées. De l'année 1 à l'année 4 (période 1), les vaches de race Holstein ont été majoritaires dans tous les ateliers et leur nombre a diminué progressivement avec l'entrée en lactation des premières F1 au cours de l'année 3. De l'année 5 à l'année 9 (période 2), les vaches F1 ont été majoritaires dans les ateliers. L'effectif maximal de F1 a été atteint au cours de l'année 6 (67% des vaches). De l'année 10 à l'année 15 (période 3), les vaches G2 et G3 ont été majoritaires dans les troupeaux et ont représenté 34% et 45% des vaches en année 15. Au final, les premières vaches F1, G2, G3 et G4 sont entrées en lactation au cours des années 3, 6, 9 et 12, respectivement.

2.2. Performances zootechniques moyennes des vaches pour les quatre stratégies d'accouplement en fonction de l'atelier initial

Les résultats des performances zootechniques des vaches n'ont dépendu que de la stratégie d'accouplement et du type d'atelier. En effet, pour les deux tailles testées (60 et 120 vaches), pour les deux modes de gestion de l'effectif de vaches constant ou de l'objectif de livraison et pour les quatre niveaux de prix relatifs, les résultats des performances zootechniques des vaches d'une même stratégie d'accouplement dans un même atelier ont été très similaires. Par conséquent pour plus de lisibilité, seuls les résultats des ateliers initiaux de 120 vaches à effectif fixe ont été présentés. Les Figures 5-3 et 5-4 présentent respectivement les évolutions des performances de production moyennes par vache et des performances de reproduction et de santé de la mamelle au cours des 15 ans de simulations dans chaque atelier avec 120 VLP à effectif fixe pour toutes les stratégies d'accouplement. Les résultats des performances zootechniques des protocoles non présentés dans cette partie sont donnés en annexe C.

2.2.1. Evolution des performances zootechniques dans les troupeaux en stratégie d'accouplement en race pure avec un effectif constant de 120 vaches

La PL_{AMV} a augmenté de 758 à 860 L entre l'année 1 et l'année 15 dans les ateliers 8M, 9M et 8,5M, et n'a augmenté que de 250 litres sur la même période dans l'atelier 7M. Les évolutions du TB_{AML} et du TP_{AML} au cours de la simulation ont été différentes selon l'atelier. Dans l'atelier 8M, le TB_{AML} et le TP_{AML} ont diminué jusqu'en année 7 (-0,4 g/L et -0,5 g/L, respectivement) puis ont augmenté pour atteindre en année 15 le même niveau qu'en année 1. Dans l'atelier 9M, le TB_{AML} et le TP_{AML} ont diminué tout au long des 15 années de simulation (-1,2 g/L et -0,3 g/L au total, respectivement). Dans l'atelier 8,5M, la courbe d'évolution a été similaire à celle de l'atelier 9M mais les chutes de TB_{AML} et de TP_{AML} ont été moins marquées (-0,9 g/L et -0,1 g/L au total, respectivement). Dans l'atelier 7M, le TB_{AML} et le TP_{AML} ont augmenté tout au long des 15 années de simulation (+1,0 g/L et +1,1 g/L au total, respectivement).

Le $TRIA_{AM}$ a progressé de 4,5 ; 5,5 et 6,2 points dans les ateliers 8M, 9M et 8,5M, respectivement, sur les 15 années de simulation, alors qu'il est resté constant dans l'atelier 7M. Cependant, l'$IVIAF_{AMV}$ est resté constant sur les 15 ans de la simulation dans les quatre ateliers. Le nombre annuel moyen d'IIMc/100VLP est resté constant sur les 15 années de simulation dans les ateliers 8M, 9M et 7M. En revanche, dans l'atelier 8,5M, une augmentation de 11 IIMc/100VLP a été observée entre l'année 1 et l'année 15.

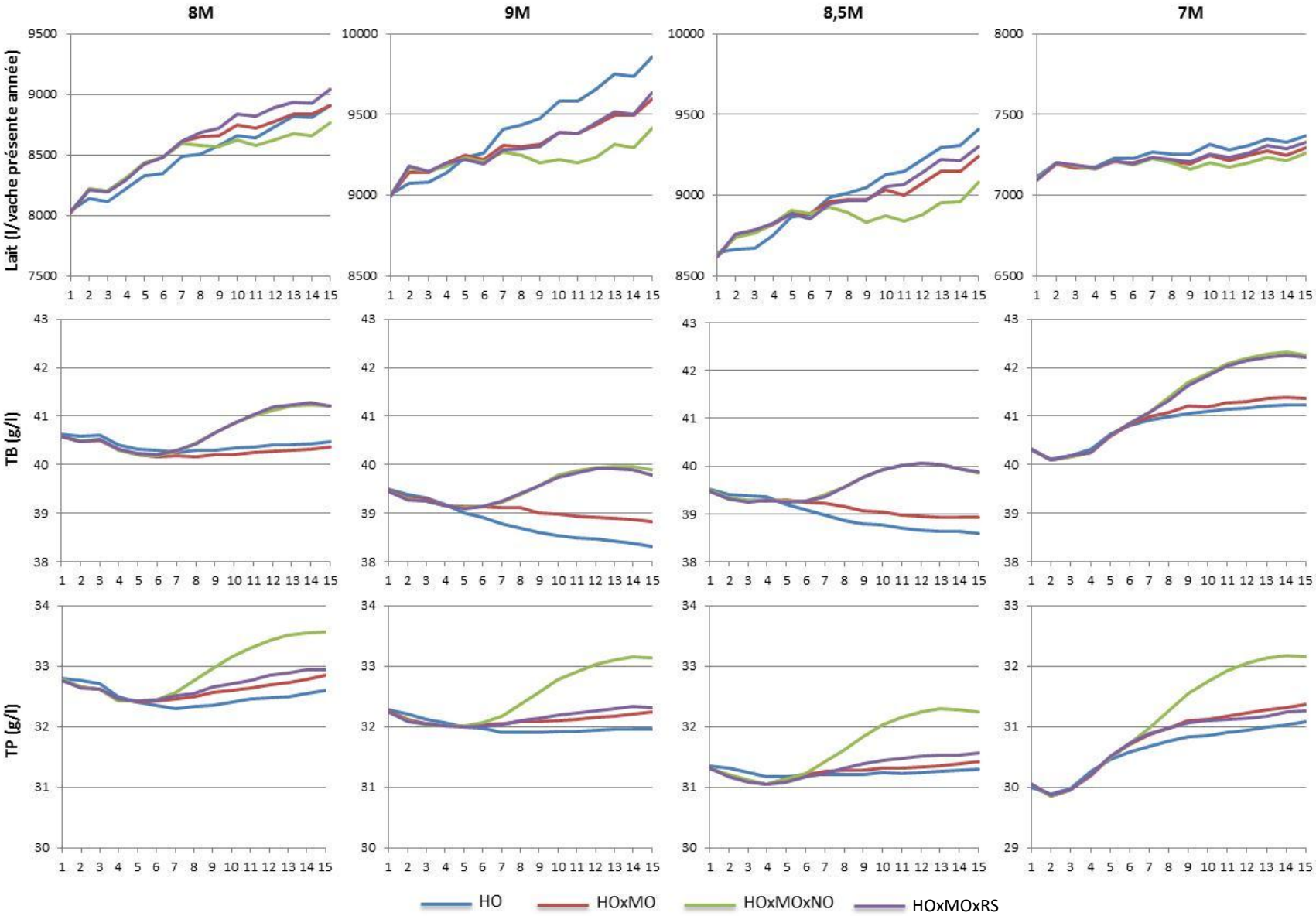


Figure 5-3. Performances de production[1] des vaches pour les quatre stratégies d'accouplement dans les quatre ateliers d'effectif de 120 vaches constant sur tout l'horizon de simulation

[1]Les performances de production présentées sont la production laitière moyenne par vache présente-année, le TB et le TP annuel moyen du lait livré

Ateliers : 8M = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année, 9M = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année, 8,5M = troupeau initial à 8500l de lait par vache présente année en situation de reproduction et sanitaire dégradée, 7M = troupeau initial à 7000l de lait par vache présente année en vêlages groupés

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

2.2.2. Comparaison des performances zootechniques moyennes des ateliers entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein

2.2.2.1. Performances de production annuelles moyennes par vache

La PL_{AMV}, le TB_{AML} et le TP_{AML} d'un atelier donné ont été similaires entre les stratégies HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS de l'année 1 à l'année 5. Sur cette même période, les trois stratégies en croisement ont augmenté la PL_{AMV} et diminué TB_{AML} et le TP_{AML} dans tous les ateliers par rapport à la stratégie en race pure Holstein. A partir de l'année 6, la PL_{AMV} des ateliers avec la stratégie HOxMOxRS a été supérieure, excepté pour l'atelier 9M, où elles ont été égales, à celle des ateliers avec la stratégie HOxMO, elle-même supérieure à la PL_{AMV} des ateliers avec la stratégie HOxMOxNO. Les TB_{AML} des ateliers avec les stratégies HOxMOxNO et HOxMOxRS ont été similaires et supérieurs à celui des ateliers avec la stratégie HOxMO. Les TP_{AML} des ateliers avec les stratégies HOxMOxRS et HOxMO ont été similaires et inférieurs à celui des ateliers avec la stratégie HOxMOxNO.

Les écarts de PL_{AMV} entre chacune des stratégies en croisement et la stratégie de référence en race pure Holstein ont été différents en fonction de l'atelier et de l'année de simulation. Dans l'atelier 7M, les écarts de PL_{AMV} entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein ont été très faibles au cours des 15 années de simulation. Dans l'atelier 8M, de l'année 2 à l'année 6, des écarts de +70L à +140L ont été observés entre les trois stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein. Puis, après l'année 6, l'écart de PL_{AMV} entre la stratégie HOxMOxNO et la stratégie en race pure Holstein a diminué pour devenir négatif à partir de l'année 8 jusqu'à atteindre -147L en année 15. L'écart de PL_{AMV} entre la stratégie HOxMO et la stratégie en race pure Holstein a progressivement diminué, à partir de l'année 6, pour s'annuler à partir de l'année 13. Enfin, l'écart de PL_{AMV} entre la startégie HOxMOxRS et la stratégie en race pure Holstein est resté positif jusqu'en année 10 de plus de 130L, puis a progressivement diminué jusqu'à atteindre +45L en année 15. Dans les ateliers 9M et 8,5M, jusqu'en année 5, des écarts de PL_{AMV} d'au maximum 100L ont été observés entre les trois stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein. Puis à partir de l'année 6, l'écart de PL_{AMV} entre chacune des stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein est devenu de plus en plus négatif. Cette infériorité de PL_{AMV} a été plus importante dans l'atelier 9M que dans l'atelier 8,5M et pour la stratégie HOxMOxNO que pour les stratégies HOxMOxRS et HOxMO. Ainsi, en année 15, l'écart de PL_{AMV} par rapport à la stratégie en race pure Holstein le plus important a été observé pour la stratégie HOxMOxNO (-442L et -327L dans les ateliers 9M et 8,5M, respectivement) et l'écart le plus faible a été observé pour la stratégie HOxMOxRS (-219L et -104L dans les ateliers 9M et 8,5M, respectivement).

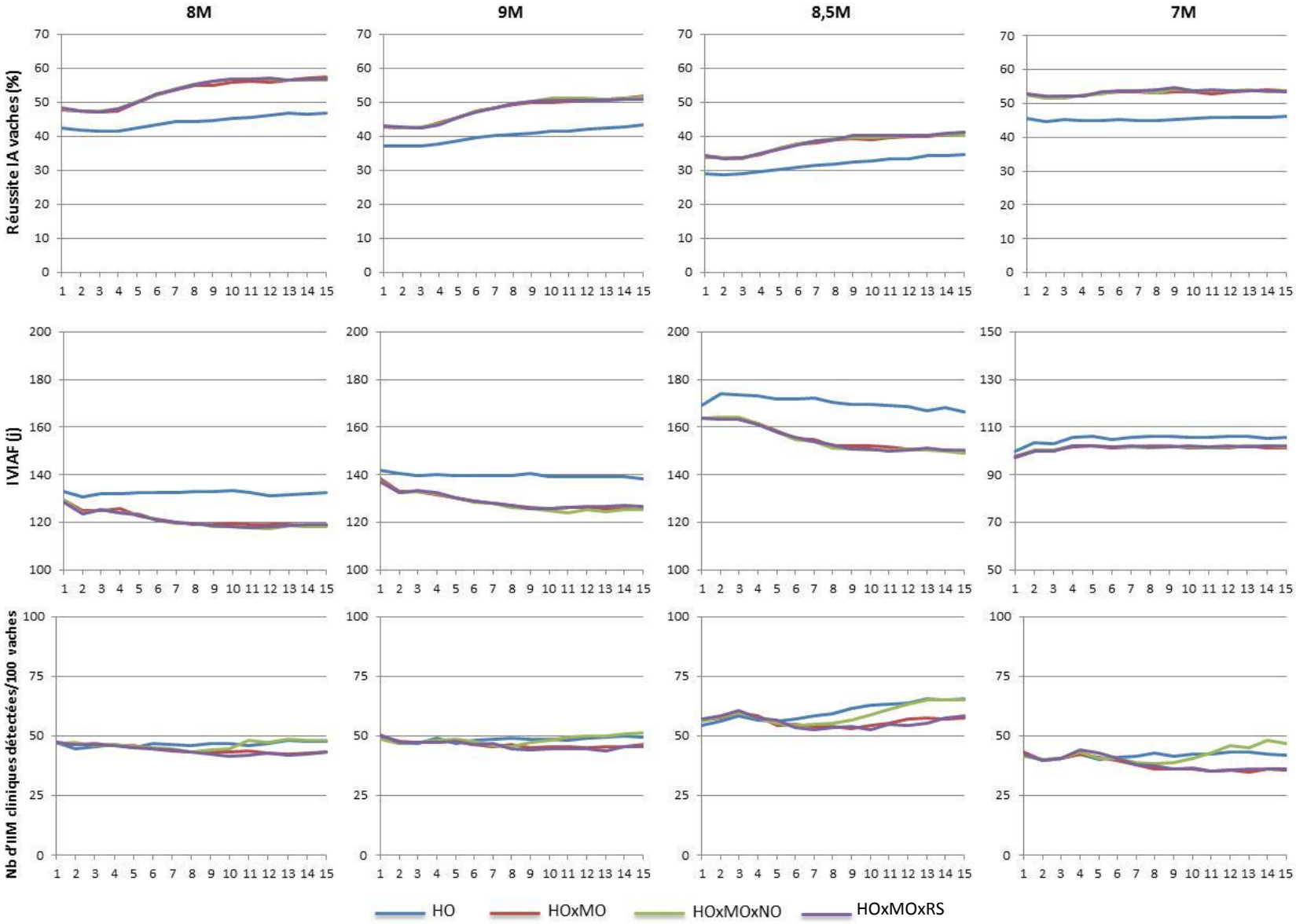


Figure 5-4. Performances de reproduction et de santé de la mamelle[1] des vaches pour les quatre stratégies d'accouplement dans les quatre ateliers d'effectif de 120 vaches constant sur tout l'horizon de simulation

[1]Les performances de reproduction et de santé de la mamelle présentées sont le taux annuel de réussite à l'IA, l'Intervalle vêlage-insémination fécondante (IVIAF) et le nombre d'infections intra-mammaires (IIM) détectées pour 100 vaches présentes-année

Ateliers : 8M = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année, 9M = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année, 8,5M = troupeau initial à 8500l de lait par vache présente année en situation de reproduction et sanitaire dégradée, 7M = troupeau initial à 7000l de lait par vache présente année en vêlages groupés

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

Les écarts de TB_{AML} entre chacune des stratégies en croisement et la stratégie de référence en race pure Holstein ont été différents en fonction de l'atelier et de l'année de simulation. Les écarts de TB_{AML} entre la stratégie HOxMO et la stratégie en race pure Holstein ont été modérés et au maximum de +0,5 g/L dans l'atelier 9M. Dans tous les ateliers, les stratégies HOxMOxNO et HOxMOxRS ont largement augmenté le TB_{AML} par rapport à la stratégie en race pure Holstein (jusqu'à 1,6 g/L dans l'atelier 9M). Cette supériorité n'est pas apparue aux mêmes moments en fonction des ateliers. Cet écart de TB_{AML} est apparu à partir de l'année 5, dans les ateliers 9M et 8,5M, et à partir de l'année 7 dans les ateliers 8M et 7M.

Les écarts de TP_{AML} entre chacune des stratégies en croisement et la stratégie de référence en race pure Holstein ont été moins affectés par le type d'atelier au cours des 15 années de simulation que ceux du TB_{AML}. Seule la stratégie HOxMOxNO a largement augmenté le TP_{AML} des ateliers par rapport à la stratégie en race pure Holstein, les écarts les plus importants ayant été observés dans l'atelier 9M (jusqu'à 1,2 g/L). Les écarts de TP_{AML} entre la stratégie HOxMO ou HOxMOxRS et la stratégie en race pure Holstein ont été d'environ +0,1 à +0,4 g/L dans tous les ateliers.

2.2.2.2. Performances de reproduction et de santé de la mamelle annuelles moyennes

Les écarts d'$IVIAF_{AMV}$ et de $TRIA_{AM}$ par rapport à la stratégie de référence en race pure Holstein ont été similaires entre les trois stratégies en croisement pour un type d'atelier donné. Ces écarts ont toujours été positifs au cours des 15 années de simulation mais ont été différents en fonction de l'atelier. Dès l'année 1, l'écart entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein a été de +5 à +7 points de $TRIA_{AM}$ en fonction de l'atelier. Cet écart de $TRIA_{AM}$ a été accompagné d'un écart d'$IVIAF_{AMV}$ de -2 jours dans l'atelier 7M et jusqu'à -5,3 jours dans l'atelier 8,5M. A partir de l'année 3, l'écart de de $TRIA_{AM}$ entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein a augmenté avant de se stabiliser à partir de l'année 9 (+11,5, +9,3, +7,7 et +9 points au maximum dans les ateliers 8M, 9M, 8,5M et 7M, respectivement). L'écart d'$IVIAF_{AMV}$ a quant à lui été de -14 jours dans les ateliers 8M et 9M, de -18 jours dans l'atelier 8,5M et de -4 jours dans l'atelier 7M.

Les écarts du nombre d'IIMc/100VLP entre les trois stratégies en croisement et la stratégie de référence en race pure Holstein ont été quasiment nuls dans tous les ateliers, entre l'année 1 et l'année 5. Après l'année 6, les écarts de nombre d'IIMc/100VLP par rapport à la stratégie en race pure Holstein ont toujours été très favorables pour les stratégies HOxMO et HOxMOxRS et maximaux dans les ateliers 8,5M (-8,3 et -10,2 IIMc/100VLP, respectivement) et 7M (-8,2 et -7,9 IIMc/100VLP, respectivement). A partir de l'année 6, l'écart entre la stratégie HOxMOxNO et la stratégie en race pure Holstein a d'abord été de -2,0 IIMc/100VLP dans les ateliers 8M et 9M et de -4,5 IIMc/100VLP dans les ateliers 8,5M et 7M. Puis à partir de l'année 8, cet écart a diminué pour devenir nul voire défavorable, en fonction de l'atelier, en année 15.

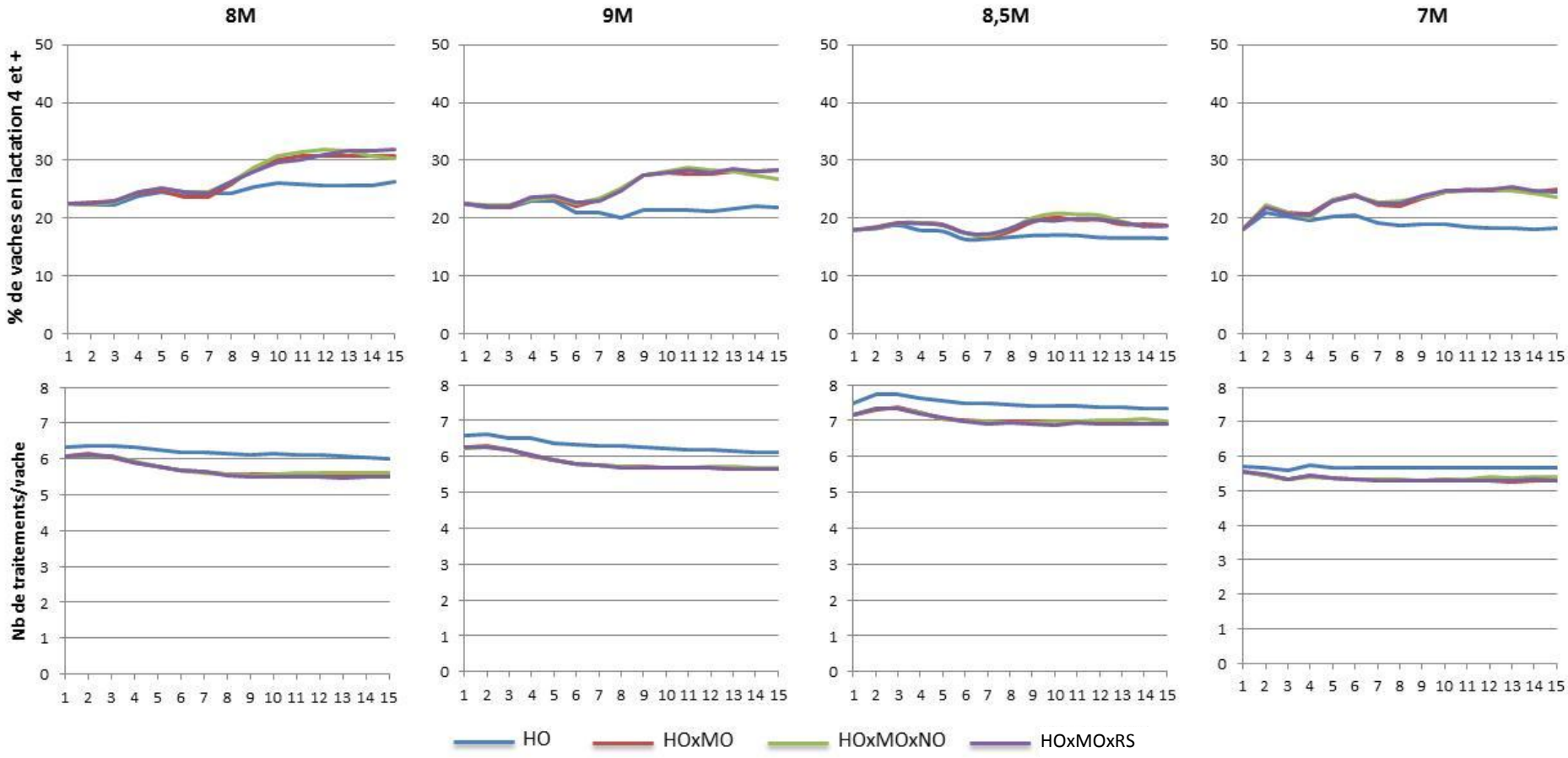


Figure 5-5. Moyennes annuelles de la proportion de vaches en 4ème lactation et plus et du nombre de traitements[1] par vache présente-année pour les quatre stratégies d'accouplement dans les quatre ateliers d'effectif de 120 vaches constant sur tout l'horizon de simulation

Ateliers : 8M = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année, 9M = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année, 8,5M = troupeau initial à 8500l de lait par vache présente année en situation de reproduction et sanitaire dégradée, 7M = troupeau initial à 7000l de lait par vache présente année en vêlages groupés

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

[1]Le nombre de traitements correspond au nombre de traitements antibiotiques pour les différents troubles de santé, aux nombres de traitements lié à la prévention des infections intra-mammaires, au nombre d'insémination et au nombre de naissances

2.3. Robustesse des vaches en fonction de la stratégie d'accouplement et de l'atelier

Les résultats sur la robustesse des vaches ont été très similaires pour les deux tailles testées (60 et 120 vaches), pour les deux modes de gestion de l'effectif de vaches constant ou de l'objectif de livraison et pour les quatre niveaux de prix relatifs simulés. Par conséquent pour plus de lisibilité, seuls les résultats des ateliers initiaux de 120 vaches à effectif fixe ont été présentés dans la Figure 5-5.

Pour la stratégie en race pure Holstein, la proportion de VL_{4+} a augmenté de 2% entre l'année 1 et l'année 15 dans l'atelier 8M. Cette proportion a diminué d'environ 1 à 1,5% dans les ateliers 9M, 8,5M et 7M sur la même période. Le compteur Nb_{AM} trt/VLP a diminué de 0,3 dans l'atelier 8M, de 0,5 dans l'atelier 9M et de 0,1 dans les ateliers 8,5M et 7M entre l'année 1 et l'année 15.

L'écart de proportion de VL_{4+} entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein ont été différents en fonction de l'atelier et de l'année de simulation. Dans les ateliers 7M, 8M et 9M, les écarts de proportion de VL_{4+} entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein ont été quasiment nuls jusqu'en année 3, année 7 ou en année 5, respectivement. Puis, l'écart de proportion de VL_{4+} par rapport à la stratégie en race pure Holstein a augmenté en faveur des stratégies en croisement jusqu'à +6 à +7 points de proportion de VL_{4+} à partir de l'année 9. Dans l'atelier 8,5M, l'écart de proportion de VL_{4+} entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein ont été très faibles jusqu'en année 7. A partir de l'année 8, cet écart est devenu très légèrement favorable pour les stratégies en croisement (+2 points).

Au sein d'un AL donné, les compteurs de Nb_{AM} trt/VLP des stratégies en croisement ont toujours été inférieurs à ceux de la stratégie en race pure Holstein au cours des 15 années de simulation. Dès l'année 1, les écarts entre les trois stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein ont été de -0,3 traitements par VLP dans les ateliers 8M, 9M et 8,5M et de -0,2 dans l'atelier 7M. En année 15, les écarts entre les stratégies HOxMO ou HOxMOxRS et la stratégie en race pure Holstein ont été de -0,5 traitements par VLP dans les ateliers 8M et 9M, de -0,4 dans l'atelier 8,5M et de -0,3 dans l'atelier 7M. Les écarts entre la stratégie HOxMOxNO et la stratégie en race pure Holstein ont été de -0,4 traitements par VLP dans les ateliers 8M et 9M, de -0,3 dans l'atelier 8,5M et de -0,2 dans l'atelier 7M. Au final, indépendamment du mode de gestion de l'effectif ou du volume de livraison, les stratégies en croisement ont permis de diminuer le nombre de traitements total cumulé sur les 15 ans de simulation de 6,8 à 8,8% dans l'atelier 8M, de 4,0 à 5,6% dans l'atelier 8,5M et de 4,1% à 4,7% dans l'atelier 7M par rapport au nombre de traitements cumulés sur 15 ans pour la stratégie en race pure Holstein. Dans l'atelier 9M, les stratégies en croisement ont permis de diminuer le nombre de traitements total cumulé sur les 15 ans de simulation de 7,3 à 7,5% pour un mode de gestion de l'effectif et de 4,0 à 5,1% pour un mode de gestion de l'objectif de livraison.

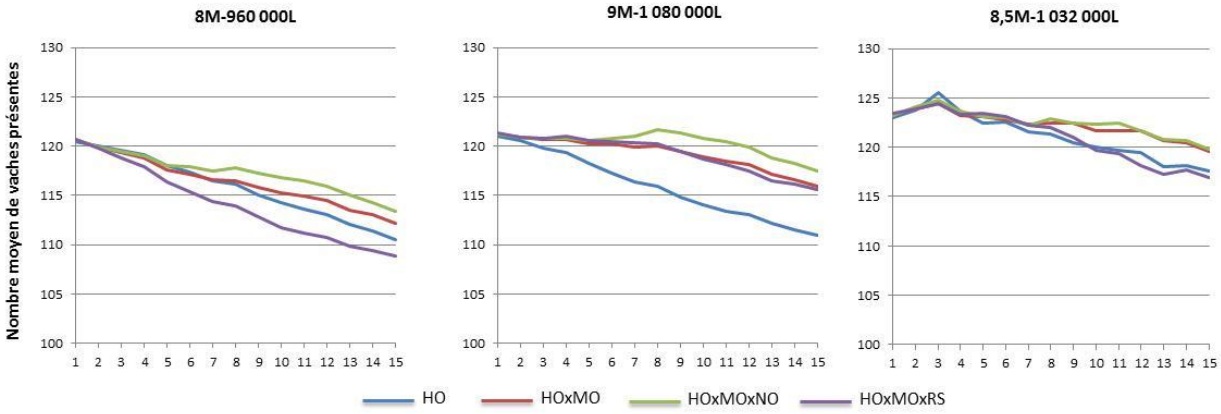


Figure 5-6. Nombre moyen de vaches présentes par année de simulation pour les quatre stratégies d'accouplement dans les ateliers 8M, 9M et 8,5M de 120 vaches initialement avec un objectif de livraison constant sur tout l'horizon de simulation

Ateliers : 8M-960 000L = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année avec un objectif de livraison de 960 000L, 9M-1 080 000L = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année avec un objectif de livraison de 1 080 000L, 8,5M-1 032 000L = troupeau initial à 8600l de lait par vache présente année avec une fréquence élevée des troubles de la reproduction et de la santé avec un objectif de livraison de 1 032 000L

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

2.4. Performances économiques des ateliers en fonction des stratégies d'accouplement pour le niveau de prix relatifs de 2014

Les écarts relatifs des performances économiques entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein obtenus dans les ateliers de 60 vaches ou de 120 vaches ont été très similaires, par conséquent pour plus de lisibilité, seuls les résultats des ateliers initiaux de 120 vaches ont été présentés. Dans l'atelier 7M, les résultats économiques ont été similaires entre les modes de gestion de l'effectif et de l'objectif de livraison, par conséquent seuls les résultats pour le mode de gestion de l'effectif ont été présentés. Les résultats des performances économiques des protocoles, non présentés dans cette partie, sont donnés en annexe D.

2.4.1. Effet des stratégies d'accouplement sur l'effectif moyen de vaches présentes-année, le volume de lait livré et le prix de vente du lait commercialisé

Dans les protocoles avec gestion de l'objectif de livraison, le volume livré dans les ateliers 8M, 9M et 8,5M avec la stratégie en race pure Holstein a bien correspondu à l'objectif de production. Les stratégies en croisement ont entrainé une très légère augmentation du volume total livré sur les 15 années de simulation par rapport à la stratégie en race pure de production d'environ 0,6% dans l'atelier 8M, 1% dans l'atelier 9M et 0,5% dans l'atelier 8,5M. Dans l'atelier 8M, la gestion de l'objectif de production a entrainé une diminution de l'effectif de l'année 1 à l'année 15 de 120 VLP à 111 VLP, 112 VLP, 113 VLP et 109 VLP pour les stratégies HO, HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS, respectivement (Figure 5-6). Dans l'atelier 9M, environ 121 VLP ont été présentes en moyenne sur la 1ère année de simulation, quelle que soit la stratégie. Cet effectif a diminué dès l'année 1 pour atteindre en année 15 un effectif moyen de 111 VLP pour la stratégie en race pure Holstein. L'effectif de vaches pour les stratégies HOxMO et HOxMOxRS n'a diminué qu'à partir de l'année 8 et a été d'en moyenne 116 VLP en année 15. L'effectif de vaches pour la stratégie HOxMOxNO est resté supérieur à 120 VLP jusqu'en année 12, puis a diminué pour atteindre une moyenne de 117 VLP en année 15. Dans l'atelier 8,5M, environ 123 VLP ont été présentes en moyenne sur la 1ère année de simulation, quelle que soit la stratégie. Cet effectif a diminué à partir de l'année 4 pour atteindre en année 15 un effectif moyen de 117 VLP pour les stratégies HO et HOxMOxRS et de 120 VLP pour les stratégies HOxMO et HOxMOxNO.

Dans les protocoles avec une gestion de l'effectif de vaches présentes-année, l'effectif de vaches présentes-année a été très constant sur les 15 années. De l'année 1 à l'année 4, les stratégies en croisement ont permis d'augmenter le volume de lait livré dans tous les ateliers par rapport à la stratégie en race pure Holstein (de 0,5 à 1,7% en fonction des ateliers ; Tableau 5-10). Dans les ateliers 9M et 8,5M, à partir de l'année 5, l'écart de volume de lait livré avec la stratégie en race pure Holstein a été faible ou en défaveur pour les stratégies en croisement. La perte de volume de lait livré par rapport à la stratégie en race pure Holstein a été maximale, dans l'atelier 9M entre l'année 9

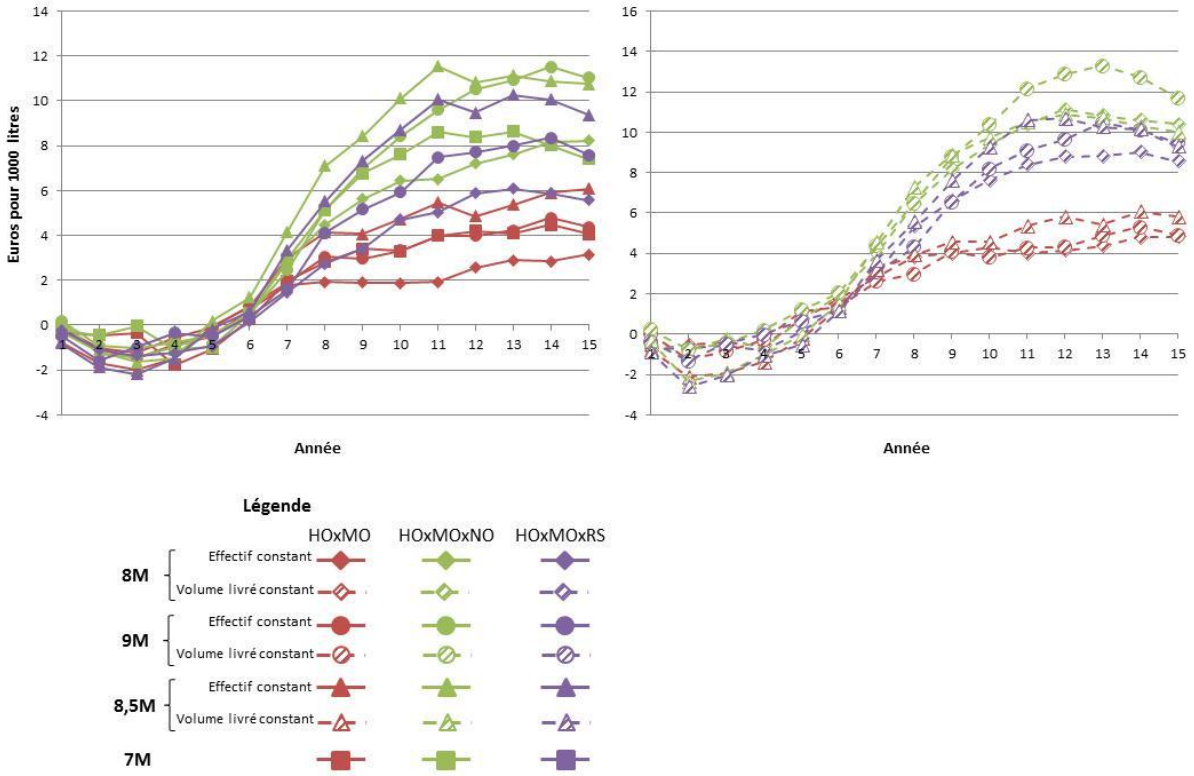


Figure 5-7. Ecart du prix de vente annuel du lait (en euros pour 1000 litres) des stratégies d'accouplement en croisement en référence à la stratégie en race pure Holstein dans les quatre ateliers de 120 vaches initialement avec un effectif constant ou un objectif de livraison constant sur tout l'horizon de simulation

Ateliers : 8M = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année, 9M = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année, 8,5M = troupeau initial à 8500l de lait par vache présente année en situation de reproduction et sanitaire dégradée, 7M = troupeau initial à 7000l de lait par vache présente année en vêlages groupés

Stratégies d'accouplement en croisement: HOxMO = croisement alternatif Holstein et Montbéliarde, HOxMOxNO = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Normande, HOxMOxRS = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Rouge Scandinave

Tableau 5-10. Volume livré cumulé moyen en litres sur les trois périodes de changement de composition génotypique des troupeaux en croisement pour les quatre stratégies d'accouplement dans les quatre ateliers d'effectif constant de 120 vaches

Atelier et période considérée	HO	HOxMO	HOxMOxNO	HOxMOxRS
Période [1-5 ans[				
8M	3 860 212	+32 814	+37 467	+32 058
9M	4 313 892	+28 118	+32 277	+33 468
8,5M	4 092 305	+37 791	+39 181	+40 134
7M	3 392 570	+57 709	+60 768	+56 970
Période [5-10 ans[				
8M	5 015 749	+73 508	+56 524	+88 894
9M	5 567 335	-49 788	-74 436	-58 750
8,5M	5 264 258	+19 124	-12 658	+9 575
7M	4 303 773	+45 547	+36 038	+37 497
Période [10-15 ans]				
8M	6 239 266	+35 242	-81 887	+112 403
9M	6 913 647	-157 564	-297 369	-151 400
8,5M	6 511 638	-49 372	-185 936	-5 657
7M	5 212 120	+29 332	-27 716	+34 680

Ateliers : 8M = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année, 9M = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année, 8,5M = troupeau initial à 8500l de lait par vache présente année en situation de reproduction et sanitaire dégradée, 7M = troupeau initial à 7000l de lait par vache présente année en vêlages groupés

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

et l'année 10, pour la stratégie HOxMOxNO (-4,3% du volume de lait livré par la stratégie en race pure Holstein sur cette période). Dans les ateliers 8M et 7M, les stratégies HOxMO et HOxMOxRS ont permis d'augmenter le volume de lait livré par rapport à la stratégie en race pure Holstein en cumul sur les 15 années de la simulation (+1% et +1,5% du volume total de lait livré sur les 15 années par la stratégie en race pure Holstein dans l'atelier 8M, respectivement et +1% dans l'atelier 7M). En revanche, à partir de l'année 10, la stratégie HOxMOxNO a entrainé une diminution du volume livré par rapport à la stratégie en race pure Holstein, l'écart de volume total de lait livré sur les 15 années de simulation a été au final nul entre la stratégie HOxMOxNO et la stratégie en race pure Holstein dans les ateliers 8M et 7M.

Dans tous les ateliers, les stratégies en croisement ont entrainé une diminution du prix de vente du lait d'environ 2€/1000L par rapport au prix de vente du lait avec la stratégie en race pure Holstein entre l'année 1 et l'année 4 (Figure 5-7). Après l'année 6 de simulation, dans tous les ateliers, les en comparaison à la stratégie en race pure Holstein, les stratégies en croisement ont permis un gain de plus en plus important au cours des années sur le prix de vente du lait. Pour chacune des stratégies en croisement, ce gain a été plus important avec un mode de gestion de l'objectif de livraison qu'avec un mode de gestion de l'effectif de vaches. Après l'année 6, la stratégie HOxMOxNO a permis le gain le plus important sur le prix de vente du lait de la stratégie en race pure Holstein, et la stratégie HOxMO, le gain le plus faible. En année 15, en fonction des ateliers et du mode de gestion de l'effectif ou de l'objectif de livraison, le prix du lait par rapport à celui de la stratégie en race pure Holstein a augmenté de 3 à 6€/1000L pour la stratégie HOxMO, de 7 à 13€/1000L pour la stratégie HOxMOxNO et de 5 à 11€/1000L pour la stratégie HOxMOxRS.

2.4.2. Effet des stratégies d'accouplement sur les produits de l'atelier

Pour un objectif de livraison constant tout au long des 15 années de simulation, les écarts de produit total cumulé sur 15 ans (P_{15ans}) entre chacune des stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein ont été similaires au sein d'un atelier donné. De plus, les stratégies en croisement ont permis une meilleure régulation de l'effectif en limitant l'achat de vaches dans tous les ateliers par rapport à la stratégie en race pure Holstein. Pour un effectif de vaches constant, les écarts de P_{15ans} en comparaison à la stratégie en race pure Holstein ont été différents en fonction de la stratégie en croisement et de l'atelier (Tableau 5-11). Dans l'atelier 8M, pour ces deux objectifs, les stratégies en croisement ont entrainé une augmentation du produit obtenu avec la stratégie en race pure Holstein pour la commercialisation du lait ainsi que pour les ventes des vaches et des veaux. Avec un objectif de livraison constant, les stratégies en croisement ont permis une augmentation de 3% du P_{15ans} obtenu dans l'atelier 8M avec la stratégie en race pure Holstein. Avec un effectif de vaches constant, cette augmentation n'a été que de 1,4% à 2,6% du P_{15ans} obtenu avec la stratégie en race pure Holstein, avec le minimum pour la stratégie HOxMOxNO et le maximum pour la stratégie HOxMOxRS.

Tableau 5-11. Produit total cumulé (€) sur 15 ans et ses différentes composantes pour les quatre stratégies d'accouplement dans les quatre ateliers initiaux de 120 vaches sur tout l'horizon de simulation

Composantes du produit	HO	HOxMO	HOxMOxNO	HOxMOxRS
Vente lait				
8M objectif d'effectif fixe	5 473 693	+66 862	+53 391	+124 599
8M objectif de livraison fixe	5 213 839	+ 92 449	+113 270	+91 047
9M objectif d'effectif fixe	5 952 631	-29 050	-37 978	-3 318
9M objectif de livraison fixe	5 739 548	+114 259	+159 510	+135 070
8,5M objectif d'effectif fixe	5 478 139	+44 535	+32 120	+89 250
8,5M objectif de livraison fixe	5 508 582	+85 050	+74 207	+76 644
7M	4 498 490	+71 008	+76 637	+77 661
Vente réforme vaches				
8M objectif d'effectif fixe	465 858	+20 602	+34 402	+18 393
8M objectif de livraison fixe	463 778	+52 938	+56 322	+50 017
9M objectif d'effectif fixe	502 515	+12 506	+15 317	+7 815
9M objectif de livraison fixe	511 240	+15 476	+21 606	+17 670
8,5M objectif d'effectif fixe	516 494	+70 178	+71 443	+68 061
8,5M objectif de livraison fixe	520 744	+87 275	+82 654	+87 309
7M	604 266	+12 232	+11 345	+8 218
Vente réforme génisses				
8M objectif d'effectif fixe	60 756	-12 213	-12 750	-12 582
8M objectif de livraison fixe	59 016	-8 796	-13 699	-9 873
9M objectif d'effectif fixe	47 521	-831	-1 469	-1 694
9M objectif de livraison fixe	72 201	-19 244	-23 889	-21 873
8,5M objectif d'effectif fixe	30 290	+9 678	+8 459	+9 823
8,5M objectif de livraison fixe	54 528	-764	-2 126	-1 173
7M	144 402	-32 991	-34 100	-32 092
Vente veaux 8j				
8M objectif d'effectif fixe	77 287	+24 747	+27 993	+27 868
8M objectif de livraison fixe	74 353	+22 665	+26 576	+23 578
9M objectif d'effectif fixe	74 976	+23 188	+26 205	+26 517
9M objectif de livraison fixe	70 932	+25 038	+29 529	+28 373
8,5M objectif d'effectif fixe	67 835	+20 185	+23 157	+23 233
8,5M objectif de livraison fixe	67 284	+20 537	+23 826	+23 024
7M	72 590	+27 308	+29 965	+29 747
Achats animaux vivants				
8M objectif d'effectif fixe	3 197	+725	+3 341	-1 901
8M objectif de livraison fixe	34 502	-6 494	-12 811	-14 323
9M objectif d'effectif fixe	9 571	+4 498	+6 552	-490
9M objectif de livraison fixe	40 027	-6 874	-7 157	-8 520
8,5M objectif d'effectif fixe	16 056	-7 056	-4 622	-9 278
8,5M objectif de livraison fixe	54 728	-19 988	-20 484	-21 593
7M	0	0	0	0
Total				
8M objectif d'effectif fixe	6 074 397	+99 274	+89 895	+160 178
8M objectif de livraison fixe	5 776 484	+171 227	+195 280	+169 091
9M objectif d'effectif fixe	6 568 072	+1 316	-4 477	+29 809
9M objectif de livraison fixe	6 353 895	+142 401	+193 913	+167 759
8,5M objectif d'effectif fixe	6 076 702	+151 633	+139 801	+199 644
8,5M objectif de livraison fixe	6 096 409	+212 085	+199 044	+207 399
7M	5 319 749	+77 557	+83 847	+83 533

Ateliers : 8M = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année, 9M = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année, 8,5M = troupeau initial à 8500l de lait par vache présente année en situation de reproduction et sanitaire dégradée, 7M = troupeau initial à 7000l de lait par vache présente année en vêlages groupés

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

Tableau 5-12. Charges opérationnelles totales cumulées (€) sur 15 ans et ses différentes composantes pour les quatre stratégies d'accouplement dans les quatre ateliers initiaux de 120 vaches

Composantes des charges	HO	HOxMO	HOxMOxNO	HOxMOxRS
Alimentation concentrée				
8M objectif d'effectif fixe	962 336	+1 849	-6 990	+7 327
8M objectif de livraison fixe*	938 138	+6 085	+1 404	+2 786
9M objectif d'effectif fixe	1 103 162	-17 569	-26 392	-17 877
9M objectif de livraison fixe *	1 063 020	+6 835	+4 419	+3 123
8,5M objectif d'effectif fixe	1 107 292	-2 722	-12 441	-764
8,5M objectif de livraison fixe *	1 111 985	+4 252	-4 229	-4 525
7M*	663 694	-28 758	-35 434	-28 908
Santé mamelle				
8M objectif d'effectif fixe	87 827	-5 844	+3 050	-8 500
8M objectif de livraison fixe	87 026	-16 271	-7 898	-17 622
9M objectif d'effectif fixe	87 397	-2 424	+6 964	-4 540
9M objectif de livraison fixe	91 079	-9 808	-5 051	-14 774
8,5M objectif d'effectif fixe	104 396	-12 796	-2 839	-13 183
8,5M objectif de livraison fixe	105 943	-13 484	-4 036	-16 547
7M	54 519	-1 441	+4 017	-252
Reproduction				
8M objectif d'effectif fixe	174 447	-25 583	-26 011	-26 765
8M objectif de livraison fixe	166 148	-21 247	-20 829	-24 864
9M objectif d'effectif fixe	184 508	-25 366	-25 903	-25 406
9M objectif de livraison fixe	176 698	-20 022	-19 420	-20 344
8,5M objectif d'effectif fixe	211 659	-23 175	-23 648	-24 308
8,5M objectif de livraison fixe	211 955	-20 126	-20 333	-23 078
7M	151 516	-16 219	-16 642	-16 411
Santé autre				
8M objectif d'effectif fixe	88 685	+2 773	+2 810	+3 397
8M objectif de livraison fixe	85 085	+2 042	+1 892	+724
9M objectif d'effectif fixe	80 391	+2 210	+1 839	+1 987
9M objectif de livraison fixe	77 783	+3 816	+3 492	+2 971
8,5M objectif d'effectif fixe	185 907	+5 911	+5 845	+5 688
8,5M objectif de livraison fixe	188 546	+5 678	+5 787	+4 793
7M	89 573	+3 388	+3 242	+3 127
Autres frais d'élevage				
8M objectif d'effectif fixe	319 942	-7 395	-7 341	-7 615
8M objectif de livraison fixe	304 119	+257	+2 422	-5 186
9M objectif d'effectif fixe	323 098	-7 902	-7 870	-8 121
9M objectif de livraison fixe	311 922	-216	+2 113	-615
8,5M objectif d'effectif fixe	324 258	+2 166	+1 901	+2 213
8,5M objectif de livraison fixe	325 021	+6 385	+6 271	+3 272
7M	370 566	-15 331	-16 407	-16 142
Total				
8M objectif d'effectif fixe	1 648 319	-32 104	-32 364	-29 915
8M objectif de livraison fixe	1 595 502	-28 061	-21 754	-43 374
9M objectif d'effectif fixe	1 792 711	-49 100	-49 357	-51 908
9M objectif de livraison fixe	1 733 550	-16 710	-11 452	-26 924
8,5M objectif d'effectif fixe	1 945 329	-29 943	-30 478	-29 672
8,5M objectif de livraison fixe	1 955 072	-16 458	-15 617	-35 321
7M	1 339 685	-54 248	-57 137	-54 537

Ateliers : 8M = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année, 9M = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année, 8,5M = troupeau initial à 8500l de lait par vache présente année en situation de reproduction et sanitaire dégradée, 7M = troupeau initial à 7000l de lait par vache présente année en vêlages groupés

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

**La variation de consommation totale en fourrages entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein a été supérieure à 4%. Par conséquent les charges d'alimentation concentrée ont été corrigées pour les fourrages.*

Dans l'atelier 9M, pour une gestion de l'effectif de vache constant sur les 15 années de simulation, l'écart de P_{15ans} obtenu avec les stratégies en croisement en comparaison à la stratégie en race pure est très faible. En revanche, pour une gestion de l'objectif de livraison, les écarts de produits liés à la commercialisation du lait, à la réforme des vaches et à la vente des veaux ont été très favorables aux stratégies en croisement en comparaison à la stratégie en race pure Holstein. Par conséquent, les stratégies en croisement ont entrainé une augmentation de 2,2 à 3,1% du P_{15ans} obtenu avec la stratégie en race pure Holstein. Dans l'atelier 8,5M, les stratégies en croisement ont entrainé une augmentation du produit lié à la commercialisation du lait (+0,6% à+1,6%) et du produit lié à la vente des vaches de réforme et des veaux (+16%) obtenus avec la stratégie en race pure Holstein. Pour les deux modes de gestions de l'effectif de vaches ou de l'objectif de livraison, les stratégies en croisement ont permis d'augmenter de près de 3% le P_{15ans} obtenu avec la stratégie en race pure Holstein. Dans l'atelier 7M, les trois stratégie en croisement ont permis d'augmenter de 1,6% le P_{15ans} obtenu avec la stratégie en race pure Holstein.

2.4.3. Effet des stratégies d'accouplement sur les charges opérationnelles de l'atelier

Les stratégies en croisement ont entrainé une diminution de la consommation de fourrage de plus de 4% par an par rapport à la stratégie en race pure dans l'atelier 7M pour un mode de gestion de l'effectif de vaches. En revanche, elles ont entrainé une augmentation de la consommation de fourrage de plus de 4% par an par rapport à la stratégie en race pure dans les ateliers 9M et 8,5M pour un mode de gestion de l'objectif de livraison. Les charges d'alimentation annuelles dans ces ateliers avec les stratégies en croisement ont donc été corrigées pour prendre en compte cette baisse ou cette augmentation de consommation des fourrages. Pour une gestion de l'effectif de vaches, les stratégies en croisement ont entrainé une diminution similaire des charges opérationnelles cumulées sur 15 ans (CO_{15ans}) obtenues dans l'atelier correspondant avec la stratégie en race pure Holstein, le poste de gain le plus important étant les frais liés à la reproduction (Tableau 5-12). Pour une gestion de l'objectif de livraison, la stratégie HOxMOxRS a entrainé une diminution plus importante des CO_{15ans} obtenues dans l'atelier correspondant avec la stratégie en race pure Holstein que les stratégies HOxMO et HOxMOxNO, notamment sur les frais de reproduction et de santé de la mamelle. Dans l'atelier 9M, les charges liées à l'alimentation concentrée obtenues avec la stratégie en race pure Holstein ont été diminuées avec les stratégies en croisement pour un mode de gestion de l'effectif de vaches mais ont été augmentées pour un mode de gestion de l'objectif de livraison.

Tableau 5-13. Moyennes et écart-type (ET) entre répétitions des marges brutes actualisées (€) cumulées sur 15 ans des ateliers initiaux de 120 vaches pour un mode de gestion de l'effectif de vache ou de l'objectif de livraison pour les stratégies d'accouplement en croisement en comparaison à la race pure

Marges brutes actualisées[1]	HO		HOxMO		HOxMOxNO		HOxMOxRS	
	Moyenne	ET	Moyenne	ET	Moyenne	ET	Moyenne	ET
8M – 120 VLP								
MBa_{15ans}	3 507 851	36 779	+97 162	31 311	+89 965	36 028	+138 920	33 545
MBa_{15ans}/VLP	1945	19	+69	17	+63	18	+79	18
MBa_{15ans} /1000l	*229,8*	*1,8*	*+5,4*	*1,6*	*+6,8*	*1,7*	*+6,3*	*1,6*
8M-960 000L								
MBa_{15ans}	3 318 133	29 465	+149 935	25 003	+160 072	25 014	+160 072	25 404
MBa_{15ans} /1000l	231,2	1,9	+7,9	1,6	+9,5	1,5	+9,8	1,6
9M – 120 VLP								
MBa_{15ans}	3 787 144	33 196	+36 070	34 293	+31 021	34 063	+57 514	36 247
MBa_{15ans}/VLP	2104	18	+20	19	+17	19	+32	20
MBa_{15ans} /1000l	*225,5*	*1,5*	*+4,6*	*1,6*	*+6,5*	*1,6*	*+5,9*	*1,6*
9M-1 080 000L								
MBa_{15ans}	3 671 121	31 590	+117 907	29 873	+149 194	31 947	+141 952	26 689
MBa_{15ans} /1000l	226,6	1,9	+7,3	1,8	+9,2	2,0	+8,8	1,6
8,5M – 120 VLP								
MBa_{15ans}	3 285 846	46 319	+140 346	40 330	+131 954	44 770	+174 252	46 688
MBa_{15ans}/VLP	1825	26	+78	22	+74	25	+97	26
MBa_{15ans} /1000l	*207,1*	*1,8*	*+8,7*	*1,7*	*+10,5*	*2,0*	*+10,4*	*2,1*
8,5M-1 032 000L								
MBa_{15ans}	3 297 191	41 523	+163 354	132 423	+151 256	145 988	+178 444	64 528
MBa_{15ans} /1000l	206,8	1,8	+9,2	2,7	+10,6	2,6	+11,4	2,1
7M – 120 VLP								
MBa_{15ans}	3 173 014	104 226	+91 954	64 250	+96 446	58 870	+95 187	71 725
MBa_{15ans}/VLP	1763	58	+51	36	+53	33	+53	40
MBa_{15ans} /1000l	*245,8*	*2,0*	*+4,6*	*1,6*	*+6,1*	*1,8*	*+4,9*	*1,7*

[1] Les marges brutes annuelles sont cumulées sur les 15 ans de simulation en appliquant une actualisation annuelle de 3% (MBa_{15ans}). L'unité de production comparable entre les ateliers à volume fixe étant le litre de lait produit, la marge brute pour 1000L (MBa_{15ans}/1000L) est estimée en divisant la marge brute cumulée sur 15 ans par l'objectif de volume à produire cumulé sur les périodes. A volume constant, le nombre de vaches présentes-année et donc la consommation totale en fourrage ont été augmentés (>4%) pour les stratégies HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS par rapport à la stratégie HO. Par conséquent les charges d'alimentation concentrée ont été corrigées pour les fourrages.

Ateliers : 8M-120 VLP = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année avec un effectif constant de 120 vaches présentes-année, 8M-960 000L = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année avec un objectif de livraison de 960 000L, 9M-120 VLP = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année avec un effectif constant de 120 vaches présentes-année, 9M-1 080 000L = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année avec un objectif de livraison de 1 080 000L, 8,5M-120 VLP = troupeau initial à 8500l de lait par vache présente année en situation de reproduction et sanitaire dégradée avec un effectif constant de 120 vaches présentes-année, 8,5M-1 032 000L = troupeau initial à 8500l de lait par vache présente année en situation de reproduction et sanitaire dégradée avec un objectif de livraison de 1 032 000L, 7M-120 VLP = troupeau initial à 7000l de lait par vache présente année en vêlages groupés avec un effectif constant de 120 vaches présentes-année.

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

2.4.4. Effet des stratégies d'accouplement sur les marges brutes de l'atelier

Les performances moyennes annuelles de la marge brute des ateliers en fonction de la stratégie d'accouplement et du mode de gestion de l'effectif de vaches ou de l'objectif de livraison sont présentées en annexe E.

Les stratégies en croisement ont toujours augmenté les MB_{15ans} obtenues avec la stratégie en race pure Holstein (Tableau 5-13). Avec une gestion de l'objectif de production, les stratégies HOxMOxNO et HOxMOxRS ont été entrainées les écarts de MB_{15ans} les plus importants. Avec une gestion de l'effectif de vaches, la stratégie HOxMOXRS a entrainé les écarts de MB_{15ans} les plus importants et la stratégie HOxMOxNO les écarts les plus faibles. Les écarts relatifs de MB_{15ans} ont été variables en fonction de l'atelier et du mode de gestion de l'effectif ou de l'objectif de livraison.

Dans l'atelier 9M, les écarts de MB_{15ans} ont été plus importants dans le cas d'une gestion de l'objectif de livraison que dans celui d'une gestion de l'effectif de vaches (3,2%, 4,1% et 3,9% *vs* 1,0%, 0,9% et 1,5% des MB_{15ans} obtenues avec la stratégie en race pure Holstein, pour les stratégies HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS, respectivement). Dans l'atelier 8M, les écarts de MB_{15ans} ont été relativement similaires dans le cas d'une gestion de l'effectif de vaches que dans celui d'une gestion de l'objectif de livraison sauf pour la stratégie HOxMOXNO (3,5%, 3,2% et 4,1% *vs* 3,4%, 4,1% et 4,2% des MB_{15ans} obtenues avec la stratégie en race pure Holstein, pour les stratégies HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS, respectivement). Dans l'atelier 8,5M, les écarts de MB_{15ans} ont été similaires pour les deux modes de gestion et ont été en relatifs les plus importants (4,4%, 5,1% et 5,5% des MB_{15ans} obtenues avec la stratégie en race pure Holstein, pour les stratégies HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS, respectivement). Dans l'atelier 7M, les écarts de MB_{15ans} ont été similaires pour toutes les stratégies en croisement et de l'ordre de 3% de la MB_{15ans} obtenue avec la stratégie en race pure Holstein.

Les coefficients de variation entre les 250 répétitions de chaque simulation pour la MB_{15ans} ont été similaires entre toutes les stratégies pour les ateliers 8M, 9M ou 8,5M (1%, 0,9% et 1,3%, respectivement ; Tableau 5-13). Le coefficient de variation de la MB_{15ans} de l'atelier 7M a été réduit pour les stratégies en croisement (2%) par rapport à celui de la stratégie en race pure Holstein (3,4%).

Dans le cas d'une gestion de l'objectif de livraison, dans l'atelier 8M, 100% des 250 répétitions pour les stratégies en croisement ont donné une MB_{15ans} supérieure à la MB_{15ans} maximale obtenue avec la stratégie en race pure Holstein. Dans les ateliers 9M et 8,5M, 100% des 250 répétitions pour les stratégies en croisement ont donné une MB_{15ans} supérieure à la MB_{15ans} moyenne obtenue avec la stratégie en race pure Holstein. Dans l'atelier 9M, 73% des 250 répétitions pour la stratégie HOxMO et 94% pour les stratégies HOxMOxNO et HOxMOxRS ont donné une MB_{15ans} supérieure à la MB_{15ans} maximale obtenue avec la stratégie en race pure Holstein. Dans l'atelier 8,5M, 79%, 75% et 87% des 250 répétitions pour les stratégies HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS, respectivement, ont donné une MB_{15ans} supérieure à la MB_{15ans} maximale obtenue avec la stratégie en race pure Holstein.

Tableau 5-14. Produits, charges opérationnelles et marges brutes actualisées (€) cumulées sur 15 ans des ateliers initiaux 8M et 9M de 120 vaches pour les stratégies d'accouplement en croisement en comparaison à la race pure pour différents niveaux de prix relatifs

Paramètres économiques[1]	HO	HOxMO	HOxMOxNO	HOxMOxRS
8M				
Prix relatif 1				
P_{15ans}	6 074 397	+99 274	+89 895	+160 178
CO_{15ans}	1 648 319	-32 104	-32 364	-29 915
MBa_{15ans}/VLP	1 945	+69	+63	+79
Prix relatif 2				
P_{15ans}	4 919 809	+159 118	+162 982	+221 886
CO_{15ans}	1 821 498	-15 665	-16 204	-6 876
MBa_{15ans}/VLP	1 363	+74	+75	+95
Prix relatif 3				
P_{15ans}	4 965 890	+148 153	+158 573	+207 448
CO_{15ans}	1 828 148	-22 558	-22 157	-15 286
MBa_{15ans}/VLP	1 381	+71	+74	+91
Prix relatif 4				
P_{15ans}	7 111 294	+148 809	+132 432	+225 834
CO_{15ans}	1 448 959	-28 733	-27 919	-24 444
MBa_{15ans}/VLP	2 489	+72	+66	+107
9M				
Prix relatif 1				
P_{15ans}	6 568 072	+1 316	-4 477	+29 809
CO_{15ans}	1 792 711	-49 100	-49 357	-51 908
MBa_{15ans}/VLP	2 104	+20	+17	+32
Prix relatif 2				
P_{15ans}	5 372 497	+441	+7 450	+39 890
CO_{15ans}	2 117 270	-59 464	-54 926	-61 998
MBa_{15ans}/VLP	1434	+24	+24	+40
Prix relatif 3				
P_{15ans}	5 375 783	+6 130	+21 279	+49 853
CO_{15ans}	2 120 975	-62 833	-61 160	-62 834
MBa_{15ans}/VLP	1435	+28	+32	+44
Prix relatif 4				
P_{15ans}	7 697 031	+71 071	+48 198	+106 656
CO_{15ans}	1 637 117	-43 552	-38 723	-46 659
MBa_{15ans}/VLP	2670	+50	+38	+64

[1] *P_{15ans} = Produit total cumulé sur 15 ans, CO_{15ans} = charges opérationnelles totales cumulées sur 15 ans. Les marges brutes annuelles sont cumulées sur les 15 ans de simulation en appliquant une actualisation annuelle de 3% (MBa_{15ans}). L'unité de production comparable entre les ateliers à effectif fixe étant la vache laitière, la marge brute par vache présente-année (MBa_{15ans}/VLP) est estimée en divisant la marge brute cumulée sur 15 ans par l'objectif d'effectif cumulé sur 15 ans (ici 120x15).*

Ateliers : 8M = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année, 9M = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année.

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

Prix relatif 1 = un prix de base de vente du lait, une grille de modulation du prix du lait sur sa qualité et un coût des aliments concentrés correspondant à ceux de l'année 2014 ; Prix relatif 2 = un prix de base de vente du lait de 20% inférieur à Prix relatif 1, une grille de modulation du prix du lait sur sa qualité identique à Prix relatif 1 et un coût des aliments concentrés de 20% supérieur à Prix relatif 1 ; Prix relatif 3 =un prix de base de vente du lait de 20% inférieur à Prix relatif 1, une grille de modulation du prix du lait sur sa qualité dans laquelle le paiement du gramme différentiel de TB et de TP est de 20% supérieur à celui de Prix relatif 1, et un coût des aliments concentrés de 20% supérieur à Prix relatif 1 ; Prix relatif 4 = un prix de base de vente du lait de 20% supérieur à Prix relatif 1, une grille de modulation du prix du lait sur sa qualité identique à Prix relatif 1 et un coût des aliments concentrés de 20% inférieur à Prix relatif 1.

Dans le cas d'une gestion de l'effectif, dans les ateliers 8M et 8,5M, 100% des 250 répétitions pour les stratégies en croisement ont donné une MB_{15ans} supérieure à la MB_{15ans} moyenne obtenue avec la stratégie en race pure Holstein. Dans l'atelier 8M, seulement 47%, 39% et 87% des 250 répétitions pour les stratégies HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS, respectivement, ont donné une MB_{15ans} supérieure à la MB_{15ans} maximale obtenue avec la stratégie en race pure Holstein. Dans l'atelier 8,5M, seulement 37%, 26% et 67% des 250 répétitions pour les stratégies HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS, respectivement, ont donné une MB_{15ans} supérieure à la MB_{15ans} maximale obtenue avec la stratégie en race pure Holstein. Dans l'atelier 9M, 86% (8%), 82% (7%) et 94% (22%) des 250 répétitions pour les stratégies HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS, respectivement, ont donné une MB_{15ans} supérieure à la MB_{15ans} moyenne (maximale) obtenue avec la stratégie en race pure Holstein. Enfin, dans l'atelier 7M, 94% des 250 répétitions pour les stratégies en croisement ont donné une MB_{15ans} supérieure à la MB_{15ans} moyenne obtenue avec la stratégie en race pure Holstein, mais seulement 14%, 16% et 21% d'entre elles, respectivement, ont donné une MB_{15ans} supérieure à la MB_{15ans} maximale.

2.5. Performances économiques des ateliers en fonction des stratégies d'accouplement pour les différents niveaux de prix relatifs

Seuls les résultats des ateliers 8M et 9M de 120 vaches avec un mode de gestion de l'effectif ont été étudiés pour les quatre niveaux de prix relatifs paramétrés (Tableau 5-14).

Dans l'atelier 8M, l'augmentation de 20% du prix d'achat du lait par les laiteries couplée à la baisse de 20% du prix d'achat des concentrés par les éleveurs a peu modifié les écarts relatifs de MB_{15ans} entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure par rapport au niveau de prix relatifs de 2014. Dans l'atelier 9M, ces évolutions ont légèrement augmenté les écarts relatifs de MB_{15ans} observés pour le niveau de prix relatifs de 2014. Ces écarts ont été dans ce contexte de 1,9%, 1,4% et 2,4% des MB_{15ans} obtenues avec la stratégie en race pure Holstein, pour les stratégies HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS, respectivement.

Dans les ateliers 8M et 9M, la diminution de 20% du prix d'achat du lait par les laiteries combinée ou non à une augmentation du paiement du gramme différentiel de matière utile et couplée à l'augmentation de 20% du prix d'achat des concentrés par les éleveurs a largement augmenté les écarts relatifs de P_{15ans} et de MB_{15ans}. Dans l'atelier 8M, les écarts de MB_{15ans} ont été les plus élevés dans le contexte de diminution du prix d'achat du lait sans augmentation du paiement du gramme différentiel de matière utile (5,4%, 5,5% et 7,0% pour les stratégies HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS, respectivement). En revanche, dans l'atelier 9M, les écarts de MB_{15ans} ont été les plus élevés ont été plus important dans un contexte d'augmentation du paiement du gramme différentiel de matière utile (1,9%, 2,2% et 3,1% pour les stratégies HOxMO, HOxMOxNO et HOxMOxRS, respectivement). Dans les ateliers 8M et 9M, les écarts relatifs de MB_{15ans} par rapport à la stratégie en

race pure Holstein ont été similaires pour les stratégies HOxMO et HOxMOxNO lorsque le paiement du gramme différentiel de matière utile était identique au niveau de prix relatif de 2014, alors que dans un contexte d'augmentation du paiement du gramme différentiel de matière utile, l'écart relatif de MB_{15ans} a été plus important pour la stratégie HOxMOxNO.

3. Discussion

Cette discussion portera essentiellement sur la validation interne des résultats. La validation externe ainsi que les applications pratiques de ces résultats seront présentées dans la discussion générale.

Nous avons évalué les performances technico-économiques de différentes stratégies d'accouplement en race pure et en croisement à partir d'un modèle mécaniste dynamique. Plus complexe qu'un modèle mathématique (Dijkhuizen *et al.*, 1986; Sørensen *et al.*, 1992; Lopez-Villalobos *et al.*, 2000), le modèle utilisé pour cette évaluation nous a permis de bien identifier les écarts de performances liées aux différentes stratégies d'accouplement, avec notamment une prise en compte des écarts génétiques entre les races impliquées et des effets d'hétérosis. De plus, ce modèle nous a permis d'évaluer l'intérêt de l'introduction de stratégies d'accouplement en croisement pour des ateliers initialement en race Holstein avec des conduites et des situations de production, de reproduction et de santé différentes. Les intérêts de ces stratégies ont également été évalués pour un maintien constant soit de l'effectif initial de vaches soit de l'objectif de livraison du volume et pour des niveaux de prix relatifs différents. Les résultats des simulations ont confirmé la pertinence de l'étude de ces interactions, les résultats différant selon la stratégie d'accouplement en croisement et selon l'atelier.

Le paramétrage du modèle a reposé sur un certain nombre d'hypothèses. Afin de ne pas trop compliquer la modélisation du calcul de la valeur génétique des individus (*cf.* Chapitre 4), mais également en raison du manque d'information à notre disposition, l'effet d'hétérosis estimé pour les F1 HO x MO au Chapitre 3 a été appliqué pour toutes les vaches issues de croisement, indépendamment de la stratégie d'accouplement. Il est, toutefois, probable que l'introduction d'une troisième race génétiquement éloignée des deux races parentales des F1 augmente l'effet d'hétérosis (Jonhson *et al.*, 1978; Robison *et al.*, 1981). Cependant, les résultats des simulations ont montré une supériorité des stratégies d'accouplement avec un schéma de croisement rotatif par rapport aux stratégies avec un schéma de croisement alternatif. Par conséquent, notre paramétrage ne semble pas aller à l'encontre des conclusions obtenues dans des études antérieures (McDowell and McDaniel, 1968a, b, c; Sørensen *et al.*, 2008). De plus, nous n'avons pas introduit de variabilité sur l'effet d'hétérosis alors que toutes les vaches F1 pourraient ne pas exprimer le même effet d'hétérosis (Hill, 1982; VanRaden and Sanders, 2003). Cependant, en raison des 250 répétitions pour la simulation des

protocoles, le raisonnement sur une moyenne de la population F1 par rapport aux populations parentales a pu être appliqué (VanRaden *et al.*, 2007). Le progrès génétique de l'index de quantité de lait des taureaux Holstein a été paramétré à +80 kg de lait par an. Pour une même amélioration des index génétiques des caractères fonctionnels, ce progrès a été plus optimiste, en restant réaliste (Ducrocq *et al.*, 2014), que celui espéré avec l'ISU de 2012 (+53 kg de lait par an ; Didier Regaldo, communication personnelle). Des analyses de sensibilité auraient pu être réalisées pour valider tous les paramètres choisis. Cependant, au vu du nombre important de paramètres affectant une performance, nous avons fait le choix de ne pas les réaliser. Cette décision a également été justifiée par les objectifs fixés pour cette étude, qui étaient d'évaluer des écarts de performances liés à un changement de stratégie d'accouplement, et par les différentes étapes de calibration, qui ont permis de mettre en évidence des effets cohérents des niveaux génétiques et des conduites d'atelier sur les performances zootechniques.

Les résultats des simulations ont montré, pour la stratégie en race pure Holstein, un lien entre les marges brutes et le niveau de production avec une meilleure rentabilité économique à la vache pour l'atelier à 9000 L/VLP et une plus faible rentabilité pour l'atelier à 7000 L/VLP. En revanche, la marge brute aux 1000 L a été plus importante dans l'atelier à 7000 L/VLP que dans l'atelier à 9000 L/VLP. Cette relation a été également mise en évidence par des études menées dans les fermes de référence (Réseaux d'Elevage Pays de la Loire, 2013). De plus, les ordres de grandeurs des marges brutes pour 1000 L sont cohérents avec les références françaises qui donnent une fourchette de marge brute en 2013 de 205 à 255€/1000 L pour des niveaux de productions entre 8000 et 9400 L/VLP (Réseaux d'Elevage Pays de la Loire, 2013) en tenant compte, contrairement à nous, des coûts de production des fourrages mais également des aides de la PAC. Les résultats de marges brutes de l'atelier herbager à 7000 L/VLP ont également été du même ordre de grandeur que ceux donnés par les Réseaux d'Elevages sur les systèmes herbagers des Pays de la Loire (Réseaux d'Elevage Pays de la Loire, 2012). Pour les ateliers à 8000 L/VLP et 9000 L/VLP avec la stratégie d'accouplement en race pure Holstein, la marge brute cumulée sur les 15 ans obtenue dans le cas d'un maintien de l'effectif de vaches a été supérieure de respectivement 5,7 et 3,2% à celle obtenue dans le cas d'un maintien de l'objectif de livraison. Veerkamp *et al.* (2002) ont également mis en évidence, pour une même situation initiale en race pure Holstein, une marge brute totale supérieure dans un contexte de maintien de l'effectif de vaches par rapport à celle obtenue dans le cas d'un maintien de l'objectif de livraison.

Les résultats des simulations ont montré que pour tous les protocoles avec des stratégies d'accouplement en croisement, l'évolution de la démographie génotypique des troupeaux a été progressive avec une apparition des premières F1 en année 3, du fait d'un âge au vêlage moyen de 29 mois, et une disparition des vaches Holstein en année 9, suite à l'insémination de 100% des vaches Holstein en croisement dès l'année 1. Ces résultats montrent donc que la composition génotypique

d'un troupeau avec une stratégie d'accouplement en croisement change tous les ans. De plus, l'état d'équilibre des schémas de croisement alternatifs ou rotatifs, c'est à dire permettant de maintenir, en moyenne sur toutes les vaches du troupeau, respectivement 67 et 86% de l'hétérosis maximal observé chez les vaches F1 (Sørensen et al., 2008), n'a été obtenu qu'au bout de l'année 10. Ceci montre l'importance de prendre en compte la phase de transition pour évaluer les performances technico-économiques de l'introduction du croisement dans les ateliers français et de ne pas simplement comparer des ateliers en race pure Holstein et des ateliers en croisement ayant atteint le stade d'équilibre.

Les écarts de performances technico-économiques entre les ateliers avec une stratégie d'accouplement en croisement et ceux avec une stratégie d'accouplement en race pure Holstein ont différé en fonction de la période de la simulation. Ainsi, entre l'année 1 et l'année 5, dans les ateliers avec une stratégie d'accouplement en croisement, le niveau de production laitière annuelle moyenne par vache présente-année a été supérieur et les taux ont été inférieurs à ceux obtenus dans les ateliers avec une stratégie d'accouplement en race pure Holstein. Ces résultats s'expliquent par un nombre plus important de vaches en début de lactation dans les ateliers avec une stratégie d'accouplement en croisement sur cette période. Ceci est lié à un intervalle vêlage-vêlage plus court des vaches de race Holstein inséminées avec des semences de taureaux Montbéliards sur cette période. Les taux plus faibles obtenus pour les ateliers avec une stratégie d'accouplement en croisement se sont traduits, sur cette même période, par un prix de vente du lait commercialisé plus bas pour ces ateliers en comparaison avec les ateliers avec une stratégie d'accouplement en race pure Holstein. En dépit de cette baisse du prix de vente du lait, l'augmentation du volume de lait commercialisé permise par l'introduction des stratégies en croisement a entrainé, pour les différents ateliers, une marge brute légèrement supérieure pour les stratégies d'accouplement en croisement par rapport aux stratégies d'accouplement en race pure Holstein. Après l'année 5, les écarts des performances technico-économiques entre les ateliers avec une stratégie d'accouplement en croisement et les ateliers avec une stratégie d'accouplement en race pure Holstein ont été fortement dépendants des caractéristiques de l'atelier et du schéma de croisement utilisé.

Dans tous les ateliers, l'introduction du croisement entre races laitières a contribué à améliorer les performances de reproduction et de santé de la mamelle. Pour le taux de réussite à l'IA, les écarts de performances annuelles moyennes entre les ateliers avec des stratégies d'accouplement en croisement et ceux avec des stratégies d'accouplement en race pure Holstein (+7 à +11 points, selon l'atelier) ont été cohérents avec ceux mis en évidence, dans le Chapitre 3, entre les vaches de race Holstein et les femelles F1 HO x MO. Cependant, l'effet favorable du croisement sur la réussite à l'IA a été plus faible lorsque la fréquence des troubles de reproduction et de santé était élevée. Néanmoins, le gain d'un pourcent de réussite à l'IA a eu plus d'effet sur l'IVIAF dans l'atelier 8,5M que dans les autres ateliers, avec un écart de -18 jours dans cet atelier contre -14 jours dans les ateliers 8M

et 9M par rapport à l'IVIAF obtenu avec une stratégie en race pure Holstein. Dans l'atelier 7M, l'amélioration du taux de réussite à l'IA a eu peu d'effet sur l'IVIAF (-7 jours). En effet, dans cet atelier avec des vêlages groupés, l'IVIAF a été fortement conditionné par la période d'insémination annuelle de trois mois entre mai et juillet.

Pour la production laitière, dans les ateliers 7M et 8M, l'hétérosis a permis de compenser, voire de dépasser, la perte de niveau génétique sur le lait introduite par le croisement avec des races moins productive que la race Holstein. En revanche, dans des ateliers initiaux plus productifs (9M et 8,5M), l'hétérosis n'a pas suffi pour compenser, sur la durée, cette diminution du niveau génétique des vaches issues de croisement. Dans ces ateliers, en comparaison à la stratégie en race pure Holstein, les stratégies en croisement alternatif HOxMO et en croisement rotatif HOxMOxRS ont entrainé les mêmes écarts sur la quantité de lait alors que dans l'atelier moins productif 8M, la stratégie a entrainé l'écart le plus favorable. L'apport de sang Holstein dès la 2ème 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, la stratégie d'accouplement HOxMOxRS a été la plus avantageuse par rapport à la stratégie d'accouplement en race pure Holstein.

La marge brute obtenue avec la stratégie HOxMOxNO a été relativement similaire à celles obtenues avec les deux autres stratégies en croisement (HOxMO et HOxMOxRS) et supérieure à la marge brute obtenue avec la stratégie en race pure Holstein. Bien qu'après l'année 6, le volume commercialisé avec la stratégie HOxMOxNO soit devenu nettement inférieur au volume commercialisé avec les trois autres stratégies d'accouplement (HOxMO, HOxMOxRS et race pure) dans tous les ateliers, le prix de vente du lait commercialisé a été plus élevé pour la stratégie HOxMOxNO en comparaison à celui obtenu avec les autres stratégies d'accouplement. Cette augmentation s'explique principalement par une augmentation importante (>+1 g/L) des TB et TP dont les grammes différentiels ont été payé 2,60€ et 6,60€, respectivement.

Les écarts de produits et charges opérationnelles entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure ont été cohérents avec les écarts de performances de production, de reproduction et de santé. Le raccourcissement de l'intervalle vêlage-vêlage a entrainé une augmentation du nombre de naissances et du nombre de vaches taries par an suite au raccourcissement dans les ateliers avec une stratégie d'accouplement en croisement par rapport aux ateliers avec une stratégie d'accouplement en race pure Holstein. Par conséquent, les interventions liées aux vêlages ou aux traitements au tarissement ont été plus nombreuses dans les ateliers avec une stratégie d'accouplement en croisement que dans les ateliers avec une stratégie d'accouplement en race pure Holstein.

Les écarts de marges brutes entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein ont été différents, pour un même atelier, en fonction du maintien constant de l'effectif de vaches ou de l'objectif de livraison sur les 15 années de simulation. Avec un objectif de livraison constant sur les 15 années de simulations, les deux stratégies HOxMOxNO et HOxMOxRS ont permis, dans les ateliers 8M et 9M, d'obtenir une marge brute équivalente et supérieure de plus de 4% (environ +9€/1000 L) à celle obtenue avec la stratégie en race pure Holstein. En revanche, dans l'atelier 9M, avec un effectif de vaches constant, les écarts de marge brute entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein ont été très faibles. Avec un effectif de vaches constant, dans l'atelier 8M, le gain de marge brute par rapport à la stratégie en race pure Holstein a été le plus élevé pour la stratégie HOxMOxRS et le plus faible pour la stratégie HOxMOxNO (+79 et +63€ par vache et par an, respectivement). Sur un plan strictement économique, pour un même objectif de livraison, l'augmentation du prix de vente du lait commercialisé suite à l'introduction de la stratégie HOxMOxNO a largement compensé les charges liées à l'augmentation du nombre de vaches présentes-année par rapport à la stratégie en race pure Holstein. Cet effet a été d'autant plus important que le niveau de production par vache présente-année a été élevé.

Dans les ateliers 8M et 9M, la baisse du prix de base du lait combinée à la hausse du prix d'achat des concentrés, par rapport au niveau de prix relatifs de référence, a entrainé une forte augmentation de l'avantage relatif des stratégies en croisement par rapport à la stratégie en race pure Holstein sur le produit, les charges opérationnelles et la marge brute cumulés sur 15 ans . En effet, le poids économique de l'augmentation des grammes différentiels de TB et TP est plus important lorsque le prix de base d'achat du lait par les laiteries est bas. En revanche, le niveau de prix relatif correspondant à une hausse du prix de base du lait combinée à une baisse du prix d'achat des concentrés n'a pas eu le même impact sur les avantages économique de l'introduction du croisement par rapport à la stratégie en race pure Holstein dans l'atelier 9M et dans l'atelier 8M. Dans l'atelier 8M, avec ce niveau de prix relatif, l'écart relatif de marge brute entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure a été moins important qu'avec le niveau de prix relatif de 2014. En effet, dans cet atelier, l'augmentation du prix des concentrés n'a pas eu d'effet sur l'écart relatif des charges liées à l'alimentation et donc des charges opérationnelles entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein. Cette diminution de l'écart relatif de marge brute entre les stratégies de croisement et la stratégie en race pure Holstein s'explique par un poids économique de l'augmentation des grammes différentiels de TB et TP moins important lorsque le prix de base d'achat du lait par les laiteries est haut. Dans l'atelier 9M, la hausse du prix d'achat des concentrés a augmenté l'écart relatif entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein pour les charges opérationnelles. Cette augmentation a entrainé une augmentation de l'écart relatif de marge brute entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein par rapport au

niveau de prix relatif de 2014. Toutefois, en raison de l'effet défavorable de la hausse du prix de base d'achat du lait par les laiteries sur l'écart relatif de produit, l'augmentation de l'écart relatif de marge brute entre les stratégies en croisement et la stratégie en race pure Holstein par rapport au niveau de prix relatifs de 2014 a été moins importante que dans le cas d'une baisse du prix de base du lait combinée à une hausse du prix d'achat des concentrés.

4. Conclusion

L'évaluation, par modélisation-simulation, de l'intérêt de l'introduction du croisement entre races laitières dans un troupeau initialement en race pure Holstein a montré de meilleures performances zootechniques et économiques dans les ateliers avec une stratégie d'accouplement en croisement que dans les ateliers avec une stratégie d'accouplement en race pure Holstein. Cette évaluation a également mis en évidence cet avantage des ateliers avec une stratégie d'accouplement en croisement est lié à une amélioration de la robustesse des vaches. Ceci s'est traduit par une diminution du nombre d'interventions potentiellement sources de stress pour l'éleveur. Les résultats ont montré une similarité entre les trois stratégies en croisement testées avec un léger avantage à la stratégie en croisement rotatif entre les races Holstein, Montbéliarde et Rouge Scandinave. Toutefois, les résultats des simulations réalisées ont montré que l'intérêt de l'introduction du croisement entre races laitières est variable en fonction de la situation initiale et la conduite de l'atelier, ainsi qu'avec le mode de gestion de l'effectif de vache ou de l'objectif de livraison et des niveaux de prix relatifs. Les applications pratiques, développées ensuite dans la discussion générale, devront prendre en compte ces interactions, notamment dans un objectif de conseil aux éleveurs.

Chapitre 6 : Discussion générale

L'introduction du croisement entre races laitières dans un atelier initialement en race pure Holstein est une décision de stratégie sur le long terme pour l'éleveur. Il a besoin, pour prendre une telle décision, de connaitre les conséquences à court, moyen et long terme de cette introduction. L'objectif de cette thèse était donc d'évaluer l'intérêt de l'introduction de différents schémas de croisement (alternatif *vs.* rotatif pour les races Montbéliarde, Normande et Rouge Scandinave) dans différents types d'ateliers en race pure Holstein. Cette évaluation, réalisée à partir de simulations s'appuyant sur une modélisation individu-centrée, mécaniste et dynamique, a constitué une approche originale car, à la différence de travaux préexistants, elle a permis *(1)* d'étudier l'évolution, en dynamique sur une durée de 15 ans, des performances technico-économiques des ateliers dans lesquels des schémas de croisement ont été introduits, *(2)* de comparer ces performances à celles des mêmes ateliers maintenus en race pure Holstein et *(3)* de comparer ces performances en fonction du type d'atelier et de plusieurs contextes de prix relatifs.

Cette partie traite d'abord des forces et faiblesses des approches mises en œuvre dans nos travaux, de la validité externe de nos résultats et de leur cohérence avec l'état des connaissances antérieures. Des perspectives et besoins de recherches complémentaires sont ensuite présentés. Enfin, les implications pratiques de nos résultats, notamment dans la formulation de premiers éléments de conseil aux éleveurs, sont développées.

1. Atouts et limites des options de modélisation mécaniste relativement détaillée

L'utilisation d'un modèle individu-centré intégrant la valeur génétique des individus pour évaluer les intérêts technico-économiques du croisement par simulation a été une option originale et que nous considérons pertinente. En effet, les écarts de marge brute observés dans nos résultats entre les stratégies d'accouplement en croisement et la stratégie d'accouplement en race pure Holstein ont été relativement faibles (au maximum +5% de la marge brute obtenue avec la stratégie d'accouplement en race pure Holstein) en dépit de la modélisation détaillée des différents processus impliqués. Il faut toutefois noter qu'à charges de structure équivalentes, l'écart de marge brute en euros correspond directement à un écart de revenu pour l'éleveur.

Les résultats ont montré des effets différents de l'introduction du croisement sur les performances de production laitière, de TB, de TP, de reproduction et de santé de la mamelle en fonction des ateliers et des stratégies d'accouplement. Ces écarts de performances zootechniques ont impacté plus ou moins fortement les performances économiques des ateliers. Ces résultats nous semblent robustes étant donné qu'ils ont été obtenus grâce à des simulations intégrant en partie les

estimations des paramètres génétiques du croisement (chapitre 2), qui reposent sur un nombre d'individus élevé, largement supérieur au nombre d'individus utilisés dans de nombreuses études (Dechow *et al.*, 2007; Walsh *et al.*, 2008; Begley *et al.*, 2010; de Haas *et al.*, 2013).

La modélisation de la valeur génétique des individus retenue dans cette thèse a été élaborée à partir du modèle d'évaluation génétique français. Cette modélisation intègre, pour chaque caractère, les effets d'hétérosis des croisements et les effets additifs du père et de la mère. Ceci permet notamment de prendre en compte la variabilité génétique intra-race en laissant le choix sur les taureaux d'insémination. Un modèle en classes (Kristensen, 1987) n'aurait pas permis ce degré de précision dans la modélisation des valeurs génétiques pour les caractères de production, de reproduction et de santé de la mamelle. De plus, la prise en compte d'index de taureaux existants pour calculer la valeur génétique des vaches du simulateur permet d'être réaliste, en particulier pour les corrélations génétiques existant entre caractères. Cette option n'a généralement pas été choisie dans la construction des modèles préexistants de fonctionnement de troupeaux de vaches laitières. Ainsi, les modèles décrits par Dijkhuizen *et al.* (1986) et par Plaizier *et al.* (1998) prennent en compte la valeur génétique des vaches pour la production mais pas pour la reproduction, ce qui conduit de fait à considérer des performances de reproduction complètement indépendantes de la production laitière. Le modèle de Brun-Lafleur (2011), bien qu'il intègre à la fois le niveau génétique des individus et les corrélations négatives entre le niveau de production laitière journalière et les évènements de la reproduction, tire aléatoirement les valeurs génétiques des vaches sans considération de ses parents et ne peut donc pas simuler des différences de stratégie dans le choix des taureaux.

Les simulations que nous avons conduites reposent sur un paramétrage des écarts entre races et des effets d'hétérosis identiques pour tous les protocoles simulés. Or, dans les ateliers où la conduite était limitante (faible utilisation de concentrés de production ou faible prévention des troubles de la santé), l'effet d'hétérosis pourrait avoir été plus important que dans les ateliers avec une conduite moins limitante (Bryant *et al.*, 2007; Penasa *et al.*, 2010a). L'intérêt de l'introduction du croisement entre races laitières dans les ateliers herbagers avec vêlages groupés ou avec une faible prévention des troubles de la santé, déjà mis en évidence dans nos résultats de simulation, pourrait donc avoir été sous-estimé. Cependant, étant donné que d'autres études réfutent un effet favorable d'un environnement difficile sur l'effet d'hétérosis en bovins laitiers comme dans d'autres espèces (Bodin *et al.*, 2010; François *et al.*, 2010; Kargo *et al.*, 2012), l'effet éventuel aurait été vraisemblablement très limité. Notre constat sur l'effet bénéfique de l'introduction du croisement dans de tels ateliers sans faire intervenir ce type d'interaction est donc un résultat robuste.

Les simulations réalisées ne prennent, par ailleurs, pas non plus en compte les effets de la consanguinité. Ceci pourrait avoir entraîné une sous-estimation des effets positifs du croisement sur les performances technico-économiques des ateliers laitiers. En effet, bien que l'augmentation annuelle du coefficient de consanguinité dans les populations Holstein semble ralentir sur les dix dernières années (Ducrocq *et al.*, 2014), les résultats du chapitre 2 ont montré que la consanguinité continue d'augmenter d'environ 0,08 point de consanguinité par an dans les populations femelles des trois principales races laitières françaises. Si cette évolution se confirmait à l'avenir, les effets positifs de l'introduction du croisement dans les ateliers laitiers pourraient s'accroître légèrement au cours des prochaines années en raison *(1)* d'une augmentation des effets d'hétérosis avec la consanguinité des populations parentales (Dickerson, 1973) et *(2)* d'une augmentation de la diversité génétique permise par le croisement (Dickerson, 1973).

Les effets génétiques du croisement sur les caractères de santé autres que les mammites n'ont pas été pris en compte dans notre étude étant donné que l'évaluation génétique de ces caractères n'est pas encore mise en place en France (Boichard and Brochard, 2012). En revanche, l'effet du niveau de production sur la santé étant plus connu (Windig *et al.*, 2005), celui-ci a été introduit dans la modélisation en faisant l'hypothèse que le croisement entre races laitières tend à diminuer le potentiel de production des vaches et donc à diminuer le risque d'incidence des troubles de santé autres que mammites cliniques. Concernant la sensibilité aux mammites cliniques, les effets génétiques du croisement n'ont, en pratique, pas été estimés à partir des bases de données nationales (*cf.* Chapitre 2) car l'évaluation de ce caractère aurait reposé sur des effectifs très limités. En effet, les informations nécessaires à une évaluation génétique sur la sensibilité aux mammites cliniques sont issues uniquement des troupeaux déclarant un minimum de 5% de lactations avec une occurrence de mammite clinique. De plus, pour l'étude des paramètres génétiques du croisement, la population d'étude a également été réduite (uniquement des troupeaux ayant au moins dix vaches dont trois vaches issues de croisement sur une campagne). Par conséquent, des écarts entre races pour la sensibilité aux mammites cliniques, estimés à partir des résultats de l'évaluation intra-race, ont été considérés pour le paramétrage. L'effet d'hétérosis pour ce caractère a quant à lui été supposé nul étant donné que certains auteurs ont montré des effets d'hétérosis favorables (Lopez-Villalobos and Spelman, 2010) et d'autres ont montré des effets non significatifs (Prendiville *et al.*, 2010) ou défavorables (McDowell and McDaniel, 1968b; Sørensen *et al.*, 2008). Enfin, en parallèle à ces travaux de thèse, une étude en cours sur la mortinatalité et la mortalité des veaux vivants à 24h issus de croisement par rapport aux veaux de race pure Holstein est menée. Les premiers résultats ont montré que la survie des veaux nés de mères F1 était meilleure que celle des veaux de race pure Holstein. Cependant, les écarts mis en évidence ont été relativement faibles et comme le poids économique de la survie des veaux est relativement faible (Pinard *et al.*, 2013), l'effet éventuel d'une amélioration de la survie des veaux aurait été vraisemblablement très limité et n'aurait pas modifié nos conclusions.

2. Choix de plans de simulation sur des protocoles contrastés

Dans cette thèse, l'évaluation des intérêts technico-économiques de l'introduction du croisement a été réalisée à l'échelle de l'atelier en faisant évoluer de manière mécaniste la composition génotypique du troupeau sur un pas de temps journalier. Cette approche semble plus pertinente que celles comparant les performances technico-économiques des vaches issues de croisement entre races laitières avec les vaches de race Holstein d'un même troupeau. En effet, dans une perspective de conseil de gestion de l'atelier laitier, il faut apporter des informations à l'échelle du troupeau (Gaudin *et al.*, 2011). De même, le choix de simuler l'introduction du croisement sur toutes les vaches d'un atelier de vaches de race Holstein dès la première année nous a semblé pertinent, bien que cela soit contraire à ce que nous avons observé pour la majorité des essais d'introduction du croisement entre races laitières en France « dans la vraie vie » (*cf.* Chapitre 1). En effet, cette option a permis d'exacerber les potentiels intérêts de l'introduction du croisement entre races laitières en extrêmisant les stratégies (0% de croisement *vs.* 100% des inséminations en croisement).

L'approche par modélisation-simulation a permis de comparer les performances technico-économiques sur le long terme dans des ateliers initialement en race Holstein différant nettement en termes de situation de production, de reproduction, de santé et de conduite pour maximiser les chances de mettre en évidence une interaction entre l'introduction du croisement et l'atelier. Ceci a pu conduire à prendre en compte des situations d'ateliers peu représentés tels quels en France. Par exemple, les situations de très faibles performances de reproduction et de santé de la mamelle simulées avec l'atelier 8,5M sont relativement extrêmes (taux de réforme supérieur à 35% et concentration en cellules somatiques du lait de tank proche du seuil de l'arrêt de collecte du lait). De même, des situations d'ateliers en race pure Holstein avec des vêlages groupés et un apport limité en aliments concentrés, tels que celui simulé avec l'atelier 7M, sont probablement peu présents en France, contrairement à d'autres pays dans lesquels les caractères fonctionnels des vaches Holstein ont été moins dégradés, comme l'Irlande (Lane *et al.*, 2013).

Cette approche par modélisation-simulation a également permis de tester, pour une même situation initiale en termes de production, de reproduction, de santé et de conduite d'atelier, les interactions entre l'introduction du croisement et le mode de gestion de l'effectif de vaches ou de l'objectif de livraison. Même si dans la « vraie vie » les modes de gestion des effectifs des vaches ou du volume de livraison peuvent évoluer au cours du temps, notamment dans le contexte de fin des quotas laitiers (Lelyon *et al.*, 2012; Perrot *et al.*, 2014), la comparaison des résultats des simulations requiert de fixer ces paramètres dans le temps. Les choix de fixer l'effectif de vaches présentes-année ou le volume de livraison annuel ont permis d'évaluer l'intérêt de l'introduction du croisement entre races laitières pour des stratégies extrêmes, la majorité des ateliers se situant probablement entre les deux dans la « vraie vie ».

L'approche par modélisation-simulation a permis de tester, pour un même atelier et un même mode de gestion de l'effectif de vaches, les interactions entre l'introduction du croisement et le niveau des prix relatifs. Même si dans la « vraie vie » l'évolution des prix du lait et des concentrés est découplée avec des variations peu prédictibles, une variation nette des niveaux de prix relatifs a été testée afin d'exacerber les éventuels effets d'interactions. Pour un même protocole, des variations de 20% des prix de références ont été appliquées sur le prix de base d'achat du lait par les laiteries et le prix d'achat des aliments concentrés par les éleveurs, ces variations étant opposées. Ceci a permis de comparer l'intérêt de l'introduction du croisement pour des contextes économiques favorables et des contextes économiques défavorables.

3. Variabilité de l'intérêt technico-économique du croisement entre races laitières

La confrontation de nos résultats économiques à d'autres résultats doit tenir compte du fait que les aspects économiques sont très inconstants dans le temps et dans l'espace, notamment pour un horizon aussi long que le nôtre (Seegers *et al.*, 1994). De plus, très peu d'études se sont intéressées aux performances technico-économique des vaches issues de croisement (Lopez-Villalobos *et al.*, 2000; Heins *et al.*, 2012) et aucune étude portant sur la comparaison d'ateliers ou exploitations en race pure et en croisement dans des conditions comparables aux nôtres n'a été répertoriée.

Les résultats de nos simulations ont montré que la robustesse des vaches dans les ateliers avec des stratégies en croisement a toujours été meilleure à celle des vaches dans les ateliers avec une stratégie en race pure Holstein. Un écart de +5 à +6 points de la proportion de vaches en 4ème lactation et plus a été observé entre les ateliers avec une stratégie d'accouplement en croisement et ceux avec une stratégie en race pure Holstein. Cet écart est toutefois légèrement inférieur à celui observé par Heins *et al.* (2012) (+21 points de la proportion de vaches F1 Holstein x Montbéliarde, Holstein x Normande et Holstein x Rouge Scandinave en 4ème lactation comparée à la proportion de vaches de race pure Holstein en 4ème lactation). Ceci peut s'expliquer par le fait que *(1)* dans notre étude, les comparaisons ont été faites entre ateliers et non uniquement entre vaches de différents génotypes, et *(2)* le nombre de vaches de race Holstein en 4ème lactation dans l'étude de Heins *et al.* (2012) a été très faible (n=48). Les écarts de taux de réussite à l'insémination d'environ +10 points et d'intervalle vêlage-insémination fécondante d'environ -15 jours entre des ateliers avec des stratégies en croisement et des ateliers avec des stratégies en race pure, dans le cas de vêlages étalés, mis en évidence par nos simulations sont légèrement inférieurs aux écarts de +8 à +13 points de réussite à la première insémination et de -20 à -25 jours ouverts[2] estimés entre des vaches F1 Holstein x Montbéliarde, Holstein x Normande et Holstein x Rouge Scandinave et des vaches de

[2] $\text{Nombre de jours ouverts} = \frac{\text{Intervalle vêlage−conception pour les vaches gravides+Intervalle vêlage−jour actuel pour les vaches non gravides}}{\text{Nombre de vaches du troupeau mises ou susceptibles d'être mises à la reproduction}}$

race Holstein par Heins *et al.* (2006b). Les mêmes explications que celles données pour la longévité s'appliquent dans ce cas. L'effet favorable de l'introduction du croisement sur la prévalence des infections intra-mammaires a été maximal (-8 à -10 mammites cliniques détectées pour 100 vaches par rapport aux ateliers avec une stratégie en race pure) à la fois dans les ateliers avec une fréquence élevée et une fréquence faible des troubles de santé de la mamelle (>50 et <40 mammites cliniques détectées pour 100 vaches). Cet effet a été plus réduit (environ -4 mammites cliniques détectées pour 100 vaches par rapport aux ateliers avec une stratégie en race pure) dans les ateliers avec des stratégies en croisement et une situation sanitaire initiale intermédiaires. Aucune étude portant sur la comparaison de la prévalence des infections intra-mammaires dans des conditions comparables aux nôtres n'a été répertoriée. Toutefois, en race pure, les mesures de prévention ont une action plus importante dans les troupeaux avec une prévalence élevée que dans des troupeaux avec une prévalence plus faible (Seegers, communication personnelle). Nos résultats ont ainsi montré un écart d'environ -0,5 intervention, hors alimentation et traite, par vache et par an entre les ateliers avec des stratégies en croisement et ceux avec une stratégie en race pure Holstein. Cet écart en faveur des stratégies d'accouplement en croisement est vraisemblablement synonyme de diminution de temps de travail pour l'éleveur mais également de diminution d'interventions potentiellement source de stress.

Avec un objectif de livraison constant sur les 15 années de simulation, l'avantage économique des stratégies d'accouplement en croisement sur la stratégie d'accouplement en race pure a été plus important que lorsque l'effectif a été maintenu, et notamment pour des niveaux de production élevés (>9000 L en moyenne par vache présente-année). En effet, les bénéfices de l'amélioration de la robustesse des vaches ont largement compensé les inconvénients de l'augmentation de l'effectif des vaches. Les charges opérationnelles sur 15 ans ont ainsi été inférieures de 6 à 24€ par vache présente-année entre les ateliers avec des stratégies en croisement et celui avec une stratégie en race pure. Ceci, couplé à une augmentation du prix de vente du lait commercialisé jusqu'à 13€/1000 L, explique que pour un même objectif de livraison les marges brutes obtenues avec les stratégies en croisement aient été supérieures aux marges brutes obtenues avec la stratégie en race pure Holstein. Aucune étude portant sur la comparaison d'ateliers ou exploitations en race pure et en croisement dans des conditions comparables aux nôtres n'a été répertoriée, toutefois nous considérons ces résultats cohérents avec nos options de modélisation et de paramétrages des processus simulés. En dépit de cet impact favorable sur les performances économiques, pour un niveau de production de plus de 9000 L par vache et par an et un objectif de livraison constant, l'augmentation de l'effectif de vaches (d'au minimum 5 vaches présentes-années au bout de 7 ans de stratégie en croisement) et de génisses de renouvellement, est tout de même vraisemblablement synonyme d'augmentation du temps de travail d'astreinte.

Avec un effectif de vaches maintenu constant sur 15 ans, l'intérêt technico-économique de l'introduction du croisement entre races laitières par rapport à la race pure a été plus important pour la stratégie d'accouplement rotatif HOxMOxRS que pour les stratégies d'accouplement alternatif HOxMO et rotatif HOxMOxNO. Dans ces conditions, cet intérêt a été au minimum sur les 15 ans de 17€ par vache présente-année avec la stratégie d'accouplement rotative HOxMOxNO dans un atelier avec un niveau de production supérieur à 9000 L. Cet intérêt a été au maximum de 97€ par vache présente-année avec la stratégie d'accouplement rotative HOxMOxRS dans un atelier avec des troubles importants de la reproduction et de la santé de la mamelle (taux de réussite inférieur à 35% et prévalence d'infections intra-mammaires supérieure à 50 mammites cliniques détectées pour 100 vaches).

Avec un objectif de livraison constant, l'intérêt technico-économique de l'introduction du croisement entre races laitières par rapport à la race pure a été le plus important pour les stratégies HOxMOxRS et HOxMOxNO avec un écart de marge brute de près de +10€ aux 1000 L dans tous les ateliers. Plusieurs études ont montré un impact économique très favorable de l'amélioration génétique sur les taux protéique et butyreux (qui est particulièrement prononcée dans le cas de l'introduction de la stratégie HOxMOxNO), contrairement à l'effet de l'amélioration génétique sur la quantité de lait par vache (Veerkamp *et al.*, 2002; VanRaden, 2004; Pinard *et al.*, 2013). Bien que les races impliquées ne soient pas les mêmes, plusieurs études ont également montré un avantage des schémas de croisement rotatif à 3 races sur les schémas de croisement alternatif (McDowell and McDaniel, 1968c; McAllister, 2002; Hansen *et al.*, 2005; Sørensen *et al.*, 2008).

Pour des prévalences de troubles de reproduction et de santé modérés, l'introduction du croisement a eu des effets différents sur les performances économiques des ateliers dont les niveaux de production étaient supérieurs à 9000 L par vache et par an par rapport à ceux dont les niveaux de production étaient compris entre 7000 et 8000 L par vache et par an. En effet, dans les ateliers à haut niveau de production laitière, l'introduction du croisement a entrainé une baisse importante de la production par vache présente-année, ce qui n'a pas été le cas pour des niveaux de production laitière plus modérés. Dans nos résultats, et avec les ordres de grandeur des paramétrages effectués, en comparaison à la stratégie d'accouplement en race pure Holstein, l'augmentation de la robustesse des vaches permise par l'introduction du croisement a donc été beaucoup plus avantageuse dans les ateliers à niveau de production modéré que dans les ateliers à haut niveau de production, pour lesquels la baisse de quantité de lait commercialisé a impacté plus fortement la marge brute. Nos résultats ont montré un avantage sur la marge brute d'au maximum 1,5% lorsque l'effectif de vaches a été constant sur les 15 ans et d'environ 4% lorsque l'objectif de livraison a été constant dans les ateliers avec des stratégies en croisement par rapport à ceux avec une stratégie en race pure Holstein. Ces avantages ont été plus importants que ceux obtenus par Heins *et al.* (2012), qui ont mis en évidence, dans des troupeaux californiens, avec un niveau de production par vache par lactation

supérieur à 9000 kg, des avantages de +5,3% et de +3,6% de profit journalier pour les vaches F1 Holstein x Montbéliarde et Holstein x Rouge Scandinave et un désavantage de -6,7% pour les vaches F1 Holstein x Normande par rapport aux vaches de race pure Holstein. Une explication possible est que, dans l'étude américaine, le produit de la vente du lait n'était ajusté que pour la variation du volume commercialisé alors que nous avons aussi pris en compte le paiement de la matière utile qui est apparu comme le facteur le plus avantageux.

Aucune étude sur le croisement n'a été répertoriée pour des niveaux de production plus modérés avec des vêlages étalés. Toutefois, dans les systèmes herbagers néo-zélandais de faible niveau de production et avec des vêlages groupés, Villalobos *et al.* (2000) ont montré un avantage pour les stratégies d'accouplement alternatif Holstein x Jersiaise ou rotatif Holstein x Jersiaise x Ayrshire de 17% et 15% sur le revenu net par vache par an obtenu avec la stratégie en race pure Holstein. Nos résultats ont montré un écart de +3% de marge brute entre les stratégies d'accouplement en croisement et la stratégie en race pure Holstein dans les ateliers herbagers et en vêlages groupés. A charges de structures équivalentes, cet écart de marge brute peut représenter un écart de revenu bien plus important que ceux obtenus par Villalobos et al. (2000). Ceci peut s'expliquer par la simulation, dans notre étude, d'un atelier herbager avec un niveau de production par vache présente-année bien plus élevé que dans l'étude néo-zélandaise (7000 L vs. 3402 L). Le niveau de production choisi pour ce système, bien que dans la tranche haute, est cependant réaliste dans le contexte français (Réseaux d'Elevage Pays de la Loire, 2012).

Pour des ateliers avec des prévalences des troubles de reproduction et de santé élevées, l'introduction du croisement rotatif HOxMOxRS a été la plus avantageuse sur les performances économiques en comparaison à la stratégie d'accouplement en race pure Holstein (+97€ de marge brute par vache et par an avec maintien d'un effectif constant et +11,4€ de marge brute pour 1000 L pour un objectif de livraison constant). Aucune étude préexistante sur le croisement n'a produit de résultats directement comparables aux nôtres. Toutefois, des études de modélisation-simulation en race pure Holstein ont montré que l'amélioration de la fertilité et de la santé de la mamelle est plus avantageuse lorsque la fréquence des troubles de reproduction et de santé est élevée (De Vries, 2006; Bar *et al.*, 2008).

Le prix d'achat des aliments concentrés a augmenté au cours des dernières années (Trostle, 2010; European Commission - EU FADN, 2013) et la compétition alimentaire entre les productions animales et la consommation humaine pourrait entretenir cette augmentation (Godfray *et al.*, 2010). De plus, avec la fin des quotas laitiers, le prix d'achat du lait par les laiteries pourrait être plus volatil avec une tendance à la baisse (Lelyon *et al.*, 2012). Par conséquent, le scénario simulé avec une baisse de 20% du prix de base d'achat du lait par les laiteries et une hausse de 20% du prix d'achat des aliments concentrés par les éleveurs, bien que très défavorable, a permis d'étudier l'intérêt du croisement entre races laitières dans un contexte pertinent pour l'éclairage des décisions des

éleveurs. Dans un tel contexte défavorable, l'introduction du croisement entre races laitières a eu un intérêt supérieur à celui observé dans un contexte de prix relatifs plus favorable. En effet, la diminution des besoins en aliments concentrés et l'augmentation du prix de vente unitaire du lait commercialisé compense largement la diminution du volume livré pour un effectif de vaches constant. Heins et al. (2012) ont également montré un profit plus important pour les vaches F1 que pour les vaches de race Holstein lorsque le prix du lait était de 20% plus bas à celui de référence. Cependant, ils ont obtenu la même augmentation, en proportion, du profit obtenu avec les vaches de race Holstein pour un coût d'alimentation plus élevé.

4. Besoins et opportunités d'amélioration des connaissances

Cette étude a permis de mettre en évidence un intérêt des stratégies d'accouplement en croisement entre races laitières par rapport à la stratégie de rester en race pure Holstein à travers des effets d'hétérosis favorables et significatifs pour des caractères d'intérêt, une amélioration de la robustesse des vaches et une augmentation de la marge brute. Les schémas de croisement alternatif HOxMO et rotatif HOxMOxNO et HOxMOxRS ont un impact relativement similaire sur les performances technico-économiques des ateliers avec tout de même un petit avantage pour le schéma HOxMOxRS.

Les premiers résultats ont montré que, pour des ateliers en race pure Holstein avec une prévalence de troubles de reproduction et de santé modérée et un niveau de production de plus de 9000 L par vache, et lorsque l'opportunité de modifier l'effectif de vaches est limitée ou nulle, l'introduction du croisement entre races laitières n'a pas ou peu d'intérêt. En revanche, dans des ateliers avec une prévalence de troubles de reproduction et de santé élevée (>160 jours d'intervalle vêlage-insémination fécondante et > 50 mammites cliniques détectées pour 100 vaches) ou dans des ateliers avec un niveau de production entre 7000 L et 8000 L par vache et par an, l'introduction du croisement va permettre d'améliorer à la fois la robustesse des vaches et la marge brute obtenues, par rapport à la situation de référence en race pure Holstein (+6 points de la proportion de vaches en 4ème lactation et plus et +60 à +100€ de marge brute), ayant une répercussion économique importante sur le revenu de l'éleveur.

Toutefois, des recherches complémentaires pourraient venir enrichir ces connaissances. Le simulateur utilisé permettrait notamment de tester l'effet combiné de l'introduction du croisement entre races laitières et de l'utilisation de semence sexée, qui permettrait d'atteindre plus rapidement l'état d'équilibre. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'une utilisation massive de la semence sexée pour accélérer l'introduction du croisement entrainerait une augmentation du taux de réforme. Or, un taux de réforme élevé ayant un coût économique important (Knaus, 2009), il faut s'assurer que l'état d'équilibre est économiquement bien plus intéressant que l'état de transition. En effet, nos résultats ont montré que, même sans utilisation de la semence sexée, l'introduction d'une stratégie en

croisement permet un gain de marge brute de près de 30€ par vache et par an dès la deuxième année par rapport à la stratégie d'accouplement en race pure Holstein dans les ateliers avec des fréquences de troubles de la reproduction et de la santé élevées.

Le module de gestion des accouplements a été créé pour laisser à l'utilisateur un choix sur la proportion des vaches Holstein du troupeau initial à mettre en croisement et sur une possibilité éventuelle d'inséminer les vaches issues de croisement en retour avec des taureaux Holstein. Par exemple, pour les ateliers à niveau de production élevée, un troupeau composé en partie de vaches de race Holstein et en partie de vaches issues de croisement en majorité F1, pourrait permettre de compenser en partie la diminution de la quantité de lait livré par vache tout en améliorant les performances de reproduction. En effet, nos résultats ont montré un effet positif du croisement sur les performances technico-économiques d'un atelier à haut niveau de production avec un effectif constant, sur les premières années d'introduction. La proportion adéquate de vaches de race Holstein et de vaches issues de croisement serait également à déterminer.

Des travaux complémentaires sur l'intérêt du croisement entre races laitières sur d'autres caractères de santé, notamment sur les estimations des écarts entre races et des effets d'hétérosis, pourraient venir enrichir et conforter les conclusions apportées par nos études. Ceci permettrait notamment de pouvoir mieux appréhender l'intérêt technico-économique du croisement entre races laitières pour des systèmes en agriculture biologique pour lesquels cette pratique est apparue intéressante (de Haas *et al.*, 2013). En effet, dans ces systèmes, la recherche d'une réduction du nombre de traitements antibiotiques, mise en évidence dans notre étude pour le traitement des mammites cliniques, est particulièrement importante (Hovi *et al.*, 2003). De même, des recherches sur l'intérêt du croisement avec d'autres races que celles étudiées dans cette thèse pourraient être menées. En effet, les races choisies pour les stratégies d'accouplement en croisement simulées correspondaient aux races les plus utilisées par les éleveurs français ayant tenté une expérience de croisement (*cf.* Chapitre 1). Cependant, le recours à des races plus rustiques (telles que la Vosgienne ou la Bretonne Pie Noire) pourrait permettre d'améliorer encore plus la robustesse des animaux. La baisse du niveau de production par vache induite par ces croisements pourrait cependant impacter négativement le revenu de l'éleveur.

5. Implications pratiques, notamment pour le conseil aux éleveurs.

Nos résultats ne sont pas totalement généralisables du fait d'une représentativité incomplète des ateliers étudiés par rapport à la totalité des ateliers laitiers français de race pure Holstein. Cependant, compte tenu des caractéristiques contrastées des ateliers que nous avons simulés, nous estimons que nos résultats permettent tout d'abord de mettre en évidence que le conseil aux éleveurs sur l'intérêt du croisement ne peut pas être uniforme. Pour des éleveurs visant un niveau de production élevé mais faisant face à de nombreux troubles de reproduction et de santé, l'introduction du croisement apparait comme une solution très intéressante, notamment dans le cas où des verrous d'ordre structurel empêchent une remise en cause de la conduite. Pour les autres, cet intérêt va dépendre du contexte de l'exploitation et des opportunités des éleveurs. En fonction du niveau de production des ateliers et du schéma de croisement choisis, les éleveurs doivent s'attendre à des pertes de volume produits ou à une augmentation de l'effectif du troupeau plus ou moins importante. En fonction des contrats mis en œuvre avec les laiteries, de la présence ou non d'un robot de traite ou de la main d'œuvre disponible, les augmentations de marge brute mises en évidence dans cette thèse ne présentent pas le même risque calculé pour les éleveurs. Ceci a notamment été illustré par nos résultats, qui ont montré que pour les schémas alternatif Holstein x Montbéliarde et rotatif Holstein x Montbéliarde x Normande, la probabilité d'obtenir une marge brute supérieure à la marge brute maximale espérée avec une stratégie en race pure Holstein est inférieure à 50%. 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 Normandes sont plus importantes que celle de la race Holstein, selon les cotations nationales, et des 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 aux éleveurs que l'introduction du croisement n'est pas irréversible, et qu'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. En effet, le discours des entreprises de sélection aux éleveurs et les évaluations génétiques nationales ne portent que sur les races pures et diffèrent selon les races. De plus, la plupart des troupeaux sur lesquels sont réalisées des études pour constituer une base de conseil aux éleveurs sont majoritairement en race pure. Ainsi, ce développement ne pourra passer que par une meilleure visibilité de la pratique du croisement entre races laitières, notamment par la mise en place de troupeaux démonstrateurs dans des fermes expérimentales ou par la mise en place d'évaluations génétiques incluant les informations des vaches issues de croisement.

Chapitre 7 : Conclusion générale

Le croisement entre races laitières est une stratégie marginale dans la majorité des exploitations bovines laitières des pays développés, et c'est encore plus particulièrement le cas en France. Cependant, le besoin de corriger la dégradation de la robustesse observée chez les vaches de race Holstein, tout comme la recherche de la meilleure valorisation unitaire du litre de lait, ainsi que celle 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. L'évaluation de l'intérêt de la mise en place et de la poursuite d'un schéma de croisement dans un atelier laitier développé sur un troupeau initialement en race Holstein, par rapport au choix de rester en race pure, était l'objectif de nos travaux. Il a été jugé qu'une telle évaluation n'était réalisable de manière pertinente que par une approche par modélisation et simulation en raison des difficultés et limites inhérentes aux approches par expérimentation et observation sur une telle question de recherche.

Le choix de la modélisation-simulation a impliqué des études préliminaires et des recherches bibliographiques pour produire des valeurs de paramétrage adaptées au contexte français. En particulier, la quantification précise et cohérente des écarts de valeurs génétiques ainsi que les effets d'hétérosis entre les races Holstein, Montbéliarde et Normande, pour la quantité et les taux de matières utiles du lait, le taux de conception et la concentration en cellules somatiques du lait, a été conduite à partir des bases de données nationales. Les niveaux d'hétérosis favorables et significatifs ainsi mis en évidence pour les génotypes issus de croisement ont confirmé la pertinence de modéliser la valeur génétique des individus en s'appuyant sur le modèle d'évaluation génétique français qui permet d'intégrer la valeur génétique du père et de la mère.

D'après l'analyse des bases de données sur les inséminations, la majorité des éleveurs français ayant engagé des stratégies ou des essais plus conjoncturels de croisement entre races laitières dans des troupeaux Holstein l'a fait sur une faible proportion du troupeau et sur une durée souvent limitée. Ceci tend à indiquer des hésitations et revirements fréquents. En comparaison, le type de stratégie d'accouplement simulée pour nos travaux, c'est à dire appuyée sur une implémentation plus cohérente (application à tout le troupeau initial et poursuite sur une durée de 15 ans), a notamment permis de documenter quantitativement et dans le temps les effets obtenus d'amélioration sur des taux de matière utile et la robustesse des vaches (en particulier sur la fertilité et 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 1000 L de lait livrés dans différents types d'ateliers. L'intérêt du croisement s'est révélé être particulièrement important 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.

Toutefois, en vue de la valorisation pratique de nos résultats, il est important de prendre en compte le fait que l'intérêt de l'introduction du croisement entre races laitières dans un atelier en race pure Holstein est variable. Il n'est donc pas pertinent de formuler une recommandation de conseil uniforme. Une attention importante doit être apportée aux priorités des éleveurs et aux opportunités qui s'ouvriraient à eux, en termes de projet d'agrandissement de leur troupeau, des possibilités d'augmentation du volume de lait livré, de tensions ou pas sur la main d'œuvre de l'exploitation, etc.

Par ailleurs, des études complémentaires gagneraient à être menées pour, par exemple, étudier des croisements entre la race Holstein et d'autres races que celles explorées dans cette thèse, mais également pour mieux étudier l'intérêt du croisement entre races laitières sur des caractères de santé. Plus prioritairement, des travaux complémentaires sur l'intérêt de combiner le croisement entre races laitières et les nouvelles technologies, notamment le sexage et le génotypage, pourraient être conduits pour déterminer les meilleures stratégies en fonction des ateliers et des objectifs des éleveurs.

Références bibliographiques

Adamec, V., Cassell, B.G., Smith, E.P., Pearson, R.E., 2006. Effects of Inbreeding in the Dam on Dystocia and Stillbirths in US Holsteins. Journal of Dairy Science 89, 307-314.

Ahlman, T., Berglund, B., Rydhmer, L., Strandberg, E., 2011. Culling reasons in organic and conventional dairy herds and genotype by environment interaction for longevity. Journal of Dairy Science 94, 1568-1575.

Auldist, 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. Journal of Dairy Science 90, 4856-4862.

Bar, D., Tauer, L.W., Bennett, G., González, R.N., Hertl, J.A., Schukken, Y.H., Schulte, H.F., Welcome, F.L., Gröhn, Y.T., 2008. The Cost of Generic Clinical Mastitis in Dairy Cows as Estimated by Using Dynamic Programming. Journal of Dairy Science 91, 2205-2214.

Barbat, A., Le Mezec, P., Ducrocq, V., Mattalia, S., Fritz, S., Boichard, D., Ponsart, C., Humblot, P., 2010. Female Fertility in French Dairy Breeds: Current Situation and Strategies for Improvement. Journal of Reproduction and Development 56, S15-S21.

Beaumard, D., 2010. Current trends of the crossbreeding use within French dairy farms. Mémoire de fin d'étude. ESA.

Begley, N., Buckley, F., Burnside, E.B., Schaeffer, L., Pierce, K., Mallard, B.A., 2009a. Immune responses of Holstein and Norwegian Red × Holstein calves on Canadian dairy farms. Journal of Dairy Science 92, 518-525.

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. Advances in Animal Biosciences 1, 341-341.

Begley, N., Buckley, F., Pierce, K.M., Fahey, A.G., Mallard, B.A., 2009b. Differences in udder health and immune response traits of Holstein-Friesians, Norwegian Reds, and their crosses in second lactation. Journal of Dairy Science 92, 749-757.

Begley, N., Rath, M., Buckley, F., 2007. Milk production, udder health, body condition score at breeding and fertility of first lactation Holstein-Friesian, Norwegian Red and Holstein-Friesian × Norwegian Red cows on Irish dairy farms. 58th Meeting European Association for Animal Production. Wageningen Acad. Publ., Wageningen, the Netherlands, Dublin, Ireland, p. 314.

Berglund, B., 2008. Genetic Improvement of Dairy Cow Reproductive Performance. Reproduction in Domestic Animals 43, 89-95.

Bidanel, J., 1992. La gestion des populations: Comment exploiter la variabilité génétique entre races: du croisement simple à la souche synthétique. Génétique quantitative, Prod. Anim., hors série, INRA, 249-254.

Blöttner, S., Heins, B., Wensch-Dorendorf, M., Hansen, L., Swalve, H., 2011a. 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. Journal of Dairy Science 94, 5212-5216.

Blöttner, S., Heins, B.J., Wensch-Dorendorf, M., Hansen, L.B., Swalve, H.H., 2011b. Brown Swiss × Holstein crossbreds compared with pure Holsteins for calving traits, body weight, backfat thickness, fertility, and body measurements. Journal of Dairy Science 94, 1058-1068.

Bodin, L., Bolet, G., Garcia, M., Garreau, H., Larzul, C., David, I., 2010. Robustesse et canalisation: vision de généticiens. Productions animales 23, 11-21.

Boichard, D., 2002. PEDIG: a fortran package for pedigree analysis suited for large populations. Proceedings of the 7th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, pp. 525-528.

Boichard, D., Brochard, M., 2012. New phenotypes for new breeding goals in dairy cattle. animal 6, 544-550.

Bonaïti, B., Moureaux, S., Mattalia, S., 2005. Bilan et paramètres génétiques des mammites cliniques collectées par le contrôle laitier dans les races Montbéliarde, Normande et Prim'Holstein. Renc. Rech. Ruminants 12, 271-274.

Bougouin, M., 2010. Le croisement entre races bovines laitières en France : premières photographies par les bases de données. Mémoire de fin d'étude. ESA-Angers.

Brade, E., Brade, W., Klunker, M., 2007. Kreuzung mit Amerikanischen Jerseys. Milchpraxis 1, 17-19.

Brun-Lafleur, L., 2011. Modélisation du fonctionnement d'un troupeau laitier pour anticiper les conséquences de son pilotage. Rennes, AGROCAMPUS-OUEST.

Brun-Lafleur, L., Cutullic, E., Faverdin, P., Delaby, L., Disenhaus, C., 2013. An individual reproduction model sensitive to milk yield and body condition in Holstein dairy cows. animal 7, 1332-1343.

Bryant, J.R., López-Villalobos, N., Pryce, J.E., Holmes, C.W., Johnson, D.L., Garrick, D.J., 2007. Short Communication: Effect of Environment on the Expression of Breed and Heterosis Effects for Production Traits. Journal of Dairy Science 90, 1548-1553.

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.

Caro, J.J., Möller, J., Getsios, D., 2010. Discrete event simulation: the preferred technique for health economic evaluations? Value in health 13, 1056-1060.

Cartwright, S.L., Schaeffer, L.R., Burnside, E.B., Mallard, B.A., 2012. Adaptive immune response, survival, and somatic cell score between postpartum Holstein and Norwegian Red × Holstein first-calf heifers. Journal of Animal Science 90, 2970-2978.

Christensen, L., Pedersen, J., 1988. Crossbreeding of Dairy Cattle. National Institute of Animal Science. Landhusholdningsselskabets forlag, København, Denmark.

Croquet, C., Mayeres, P., Gillon, A., Vanderick, S., Gengler, N., 2006. Inbreeding depression for global and partial economic indexes, production, type, and functional traits. Journal of Dairy Science 89, 2257-2267.

Cutullic, E., Delaby, L., Causeur, D., Disenhaus, C., 2006. Facteurs de variation de la détection des chaleurs chez la vache laitière conduite en vêlages groupés. XIIIè Rencontres recherche ruminants.

Danchin-Burge, C., Leroy, G., Brochard, M., Moureaux, S., Verrier, E., 2012. Evolution of the genetic variability of eight French dairy cattle breeds assessed by pedigree analysis. Journal of Animal Breeding and Genetics 129, 206-217.

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.

De Vries, A., 2006. Economic value of pregnancy in dairy cattle. Journal of Dairy Science 89, 3876-3885.

De Vries, A., 2013. Cow longevity economics: The cost benefit of keeping the cow in the herd. DeLaval Cow longevity conference, Tumba, Sweden Aug, pp. 28-29.

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. Journal of Dairy Science 90, 3542-3549.

Dhakal, K., Maltecca, C., Cassady, J.P., Baloche, G., Williams, C.M., Washburn, S.P., 2012. Calf birth weight, gestation length, calving ease, and neonatal calf mortality in Holstein, Jersey, and crossbred cows in a pasture system. Journal of Dairy Science.

Dickerson, G.E., 1973. Inbreeding and heterosis in animals. Journal of Animal Science 1973, 54-77.

Dijkhuizen, A.A., Stelwagen, J., Renkema, J.A., 1986. A stochastic model for the simulation of management decisions in dairy herds, with special reference to production, reproduction, culling and income. Preventive Veterinary Medicine 4, 273-289.

Disenhaus, C., Cutullic, E., Freret, S., Paccard, P., Ponsart, C., 2010. Vers une cohérence des pratiques de détection des chaleurs: intégrer la vache, l'éleveur et le système d'élevage. 17èmes Rencontres Recherches Ruminants. Institut de l'Elevage, pp. 113-120.

Disenhaus, C., Grimard, B., Trou, G., Delaby, L., 2005. De la vache au système: s' adapter aux différents objectifs de reproduction en élevage laitier. Rencontre Recherche Ruminants 12.

Ducrocq, V., 2010. Sustainable dairy cattle breeding: illusion or reality. Proc. 9th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Leipzig, Germany, pp. 1-8.

Ducrocq, V., Wiggans, G., Garrick, D., Ruvinsky, A., 2014. Genetic improvement of dairy cattle. The Genetics of Cattle, 371.

European Commission - EU FADN, 2013. EU dairy farms report 2013

Fischer, B., Haacker, W., Blum, H., Bäthge, 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.

Fourichon, C., Seegers, H., Malher, X., 2000. Effect of disease on reproduction in the dairy cow: a meta-analysis. Theriogenology 53, 1729-1759.

François, D., Allain, D., Foulquié, D., Boissy, A., Jacquiet, P., Moreno, C., Rupp, R., Bodin, L., HAZARD, D., Bouix, J., 2010. Amélioration génétique de l'adaptation des Ovins aux milieux difficiles. Renc. Rech. Rumin 17, 439-442.

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. Journal of Dairy Science 91, 3725-3743.

Gaudin, M., Jaffrès, C., Réthoré, A., 2011. Gestion de l'exploitation agricole. Eléments pour la prise de décision à partir de l'étude de cas concrets. Tec&Doc Lavoisier, Paris.

Goddard, M., 2009. Genomic selection: prediction of accuracy and maximisation of long term response. Genetica 136, 245-257.

Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C., 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. science 327, 812-818.

Hansen, L., 2000. Consequences of selection for milk yield from a geneticist's viewpoint. Journal of Dairy Science 83, 1145-1150.

Hansen, L., Heins, B., Seykora, T., 2005. Is crossbreeding the answer for reproductive problems of dairy cattle. pp. 113-118.

Hare, E., Norman, H., Wright, J., 2006. Survival rates and productive herd life of dairy cattle in the United States. Journal of Dairy Science 89, 3713-3720.

Harris, B.l., Clark, J.M., Jackson, R.G., 1996. Across breed evaluation of dairy cattle. Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production. New Zealand Society of Animal Production, pp. 12-15.

Harris, B.L., Winkelman, A.M., Burton, L.J., 2000. Comparisons of fertility measures in strains of Holstein-Friesian cows, Jersey cows and their crosses. the Massey University Dairy Farmers' Conference, New Zealand, pp. 71-78.

Hazel, A.R., Heins, B.J., Seykora, A.J., Hansen, L.B., 2014. Production, fertility, survival, and body measurements of Montbéliarde-sired crossbreds compared with pure Holsteins during their first 5 lactations. Journal of Dairy Science 97, 2512-2525.

Heins, B.J., Hansen, L.B., 2012. Short communication: Fertility, somatic cell score, and production of Normande×Holstein, Montbéliarde×Holstein, and Scandinavian Red × Holstein crossbreds versus pure Holsteins during their first 5 lactations. Journal of Dairy Science 95, 918-924.

Heins, B.J., Hansen, L.B., De Vries, A., 2012. Survival, lifetime production, and profitability of Normande × Holstein, Montbéliarde × Holstein, and Scandinavian Red × Holstein crossbreds versus pure Holsteins. Journal of Dairy Science 95, 1011-1021.

Heins, B.J., Hansen, L.B., Hazel, A.R., Seykora, A.J., Johnson, D.G., Linn, J.G., 2010. Birth traits of pure Holstein calves versus Montbeliarde-sired crossbred calves. Journal of Dairy Science 93, 2293-2299.

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. Journal of Dairy Science 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. Journal of Dairy Science 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. Journal of Dairy Science 89, 2799-2804.

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. Journal of Dairy Science 94, 501-506.

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. Journal of Dairy Science 91, 1270-1278.

Hill, W., 1982. Dominance and epistasis as components of heterosis. Zeitschrift für Tierzüchtung und Züchtungsbiologie 99, 161-168.

Hortet, P., 2000. Evaluation ex-ante de l'efficacité économique des programmes de maitrise des infections intramammaires en élevage bovin laitier Ecole Nationale Agronomique de Rennes.

Hortet, P., Seegers, H., 1998. Calculated milk production losses associated with elevated somatic cell count in dairy cows: review and critical discussion. Veterinary Research 29, 497-510.

Hovi, M., Sundrum, A., Thamsborg, S.M., 2003. Animal health and welfare in organic livestock production in Europe: current state and future challenges. Livestock Production Science 80, 41-53.

Ingvartsen, K.L., Dewhurst, R.J., Friggens, N.C., 2003. On the relationship between lactational performance and health: is it yield or metabolic imbalance that cause production diseases in dairy cattle? A position paper. Livestock Production Science 83, 277-308.

Institut de l'Elevage, 2014. Chiffres clés 2013, Production bovines lait et viande.

Institut de l'Elevage, France Conseil Elevage, 2015. Résultats de contrôle laitier France 2014.

Jalvingh, A.W., van Arendonk, J.A.M., Dijkhuizen, A.A., 1993. Dynamic probabilistic simulation of dairy herd management practices. I. Model description and outcome of different seasonal calving patterns. Livestock Production Science 37, 107-131.

Jonhson, R., Omtvedt, I., Walters, L., 1978. Comparison of productivity and performance for two-breed and three-breed crosses in swine. Journal of Animal Science 46, 69-82.

Joubel, E., 2012. Le croisement entre races laitières en France en 2012. Mémoire de fin d'étude. ESA-Angers.

Kargo, M., Madsen, P., Norberg, E., 2012. Short communication: Is crossbreeding only beneficial in herds with low management level? Journal of Dairy Science 95, 925-928.

Knaus, W., 2009. Dairy cows trapped between performance demands and adaptability. Journal of the Science of Food and Agriculture 89, 1107-1114.

Kristensen, A.R., 1987. Optimal replacement and ranking of dairy cows determined by a hierarchic Markov process. Livestock Production Science 16, 131-144.

Lane, E.A., Crowe, M.A., Beltman, M.E., More, S.J., 2013. The influence of cow and management factors on reproductive performance of Irish seasonal calving dairy cows. Animal reproduction science 141, 34-41.

Launay, A., Le Mezec, P., 2013. Bilan d’indexation des races laitières, Résultats de la champagne 2012. Institut de l’Elevage Collection Résultats.

Le Mézec, P., Launay, A., 2014. Bilan Génétique de l'insémination en races bovins laitières. Résultats 2013. Collection Résultats. Institut de l'élevage et INRA GABI.

Lelyon, B., Chatellier, V., Daniel, K., 2012. Fin des quotas laitiers, contractualisation et stratégies productives: enseignements d'une modélisation bioéconomique. Productions animales 25, 67.

Long, C.R., 1980. Crossbreeding for beef production: Experimental results. Journal of Animal Science 51, 1197-1223.

Lopez-Villalobos, N., Garrick, D.J., Holmes, C.W., Blair, H.T., Spelman, R.J., 2000. Profitabilities of Some Mating Systems for Dairy Herds in New Zealand. Journal of Dairy Science 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 Congress Genetic Applied Livestock Production, Leizig Gemany.

Lucy, M.C., 2001. Reproductive Loss in High-Producing Dairy Cattle: Where Will It End? Journal of Dairy Science 84, 1277-1293.

Lynch, M., Walsh, B., 1998. Genetics and analysis of quantitative traits. Sinauer Sunderland, MA.

Malchiodi, F., Penasa, M., Tiezzi, F., Bittante, G., 2011. Milk Yield Traits, Somatic Cell Score, Milking Time and Age at Calving of Pure Holstein Versus Crossbred Cow. Agriculturae Conspectus Scientificus (ACS) 76, 259-261.

Marsh, W., Dijkhuizen, A., Morris, R., 1987. An economic comparison of four culling decision rules for reproductive failure in United States dairy herds using DairyORACLE. Journal of Dairy Science 70, 1274-1280.

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.

Mc Parland, S., Kearney, J., Rath, M., Berry, D., 2007. Inbreeding effects on milk production, calving performance, fertility, and conformation in Irish Holstein-Friesians. Journal of Dairy Science 90, 4411-4419.

McAllister, A.J., 2002. Is Crossbreeding the Answer to Questions of Dairy Breed Utilization?1. Journal of Dairy Science 85, 2352-2357.

McDowell, R.E., McDaniel, B.T., 1968a. Interbreed Matings in Dairy Cattle. I. Yield Traits, Feed Efficiency, Type and Rate of Milking1. Journal of Dairy Science 51, 767-777.

McDowell, R.E., McDaniel, B.T., 1968b. Interbreed Matings in Dairy Cattle. II. Herd Health and Viability1. Journal of Dairy Science 51, 1275-1283.

McDowell, R.E., McDaniel, B.T., 1968c. Interbreed Matings in Dairy Cattle. III. Economic Aspects1. Journal of Dairy Science 51, 1649-1658.

Mendonça, L.G.D., Abade, C.C., da Silva, E.M., Litherland, N.B., Hansen, L.B., Hansen, W.P., Chebel, R.C., 2014. Comparison of peripartum metabolic status and postpartum health of Holstein and Montbéliarde-sired crossbred dairy cows. Journal of Dairy Science 97, 805-818.

Miglior, F., Burnside, E.B., 1995. Inbreeding of Canadian Holstein cattle. Journal of Dairy Science 78, 1163-1167.

Miglior, F., Burnside, E.B., Dekkers, J.C., 1995a. Nonadditive genetic effects and inbreeding depression for somatic cell counts of Holstein cattle. Journal of Dairy Science 78, 1168-1173.

Miglior, F., Burnside, E.B., Kennedy, B.W., 1995b. Production traits of Holstein cattle: estimation of nonadditive genetic variance components and inbreeding depression. Journal of Dairy Science 78, 1174-1180.

Miglior, F., Muir, B., Van Doormaal, B., 2005. Selection indices in Holstein cattle of various countries. Journal of Dairy Science 88, 1255-1263.

Minery, S., Brochard, M., Mattalia, S., 2008. Use of national and international EBVs of fertility in total merit index. Interbull Bulletin, 113.

Norberg, E., Sørensen, L.H., Byskov, K., Kargo12, M., 2014. Heterosis and Breed Effects for Milk Production, Udder Health and Fertility in Danish Herds applying Systematic Crossbreeding. 10th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production (WCGALP).

Panicke, L., Freyer, G., 1992. Estimation of additive and non-additive effects in dairy cattle. Arch. Anim. Breed. 35, 537-549.

Pearson, R.E., Plowman, R.D., Hooven, N.W., Jr., Miller, R.H., Smith, J.W., Weinland, B.T., 1977. Three Mating Systems Compared: I. First-, Second-, and Third-Lactation Milk Yields, Composition, Flow, and Milking Times1. Journal of Dairy Science 60, 1773-1786.

Pedersen, J., Christensen, L.G., 1989. Heterosis for milk production traits by crossing Red Danish, Finnish Ayrshire and Holstein-Friesian cattle. Livestock Production Science 23, 253-266.

Penasa, M., De Marchi, M., Zotto, R.D., de Jong, G., Bittante, G., Cassandro, M., 2010a. Heterosis effects in a black and white dairy cattle population under different production environments. Livestock Science 131, 52-57.

Penasa, M., López-Villalobos, N., Evans, R., Cromie, A., Dal Zotto, R., Cassandro, M., 2010b. Crossbreeding effects on milk yield traits and calving interval in spring-calving dairy cows. Journal of Animal Breeding and Genetics 127, 300-307.

Perrin, J., Ducrot, C., Vinard, J., Hendrikx, P., Calavas, D., 2011. Analyse de la mortalité bovine en France de 2003 à 2009. Productions animales 24, 235.

Perrot, C., Caillaud, D., Chatellier, V., Ennifar, M., You, G., 2014. La diversité des exploitations et des territoires laitiers français face à la fin des quotas. Rencontres autour des recherches sur les ruminants, 203-210.

Perrot, C., Mottet, A., You, G., 2011. Les modèles laitiers européens du nord de l'UE à l'épreuve de la volatilité. Renc. Rech. Rum 18, 317-320.

Pinard, D., Regaldo, D., Guerrier, J., 2013. Un modèle bioéconomique pour mettre à jour l'objectif de sélection de la race Prim'Holstein. Rencontres autour des recherches sur les ruminants, 137-140.

Pinedo, P., De Vries, A., Webb, D., 2010. Dynamics of culling risk with disposal codes reported by Dairy Herd Improvement dairy herds. Journal of Dairy Science 93, 2250-2261.

Pinedo, P.J., Daniels, A., Shumaker, J., De Vries, A., 2014. Dynamics of culling for Jersey, Holstein, and Jersey × Holstein crossbred cows in large multibreed dairy herds. Journal of Dairy Science 97, 2886-2895.

Plaizier, J.C.B., King, G.J., Dekkers, J.C.M., Lissemore, K., 1998. Modeling the relationship between reproductive performance and net-revenue in dairy herds. Agricultural Systems 56, 305-322.

Prendiville, R., Pierce, K., Buckley, F., 2009. An evaluation of production efficiencies among lactating Holstein-Friesian, Jersey, and Jersey× Holstein-Friesian cows at pasture. Journal of Dairy Science 92, 6176-6185.

Prendiville, 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. Journal of Dairy Science 93, 2741-2750.

Prendiville, R., Pierce, K., Delaby, L., Buckley, F., 2011. Animal performance and production efficiencies of Holstein-Friesian, Jersey and Jersey× Holstein-Friesian cows throughout lactation. Livestock Science 138, 25-33.

Puillet, L., Sauvant, D., Tichit, M., 2010. Intérêts et limites de la prise en compte de la variabilité individuelle dans les modèles de fonctionnement du troupeau. INRA Prod. Anim 23, 255-268.

Réseaux d'Elevage Pays de la Loire, 2012. Evolution des systèmes laitiers herbagers en Pays de la Loire. Analyse et perspectives. Institut de l'Elevage - Chambre d'agriculture des Pays de la Loire.

Réseaux d'Elevage Pays de la Loire, 2013. Repères techniques et économiques en élevage laitier. Résultats 2013 - Projections 2014. In: Collection Références (Ed.). Institut de l'Elevage - Chambres d'Agriculture.

Robert-Briand, A., 2006. Infections intramammaires de la vache laitière en l'absence de traitement antibiotique systématique au tarissement.

Robert-Granié, C., Bonaıti, B., Boichard, D., Barbat, A., 1999. Accounting for variance heterogeneity in French dairy cattle genetic evaluation. Livestock Production Science 60, 343-357.

Robison, O.W., McDaniel, B.T., Rincon, E.J., 1981. Estimation of Direct and Maternal Additive and Heterotic Effects from Crossbreeding Experiments in Animals. Journal of Animal Science 52, 44-50.

Roetta, M., 2012. Etude des performances laitières et de croissance des individus issus de la première génération de croisement entre les races Normande et prim'Holstein. Rapport de stage de BTS.

Rupp, R., 2000. Bilan national des numérations cellulaires dans le lait des différents races bovines laitières françaises. Productions animales 13, 257-268.

Rupp, R., Boichard, D., 2003. Genetics of resistance to mastitis in dairy cattle. Veterinary research 34, 671-688.

Sauvant, D., Martin, O., 2010. Robustesse, rusticité, flexibilité, plasticité... les nouveaux critères de qualité des animaux et des systèmes d'élevage: définitions systémique et biologique des différents concepts. Productions animales 23, 5-9.

Schaeffer, L.R., Burnside, E.B., Glover, P., Fatehi, J., 2011. Crossbreeding results in Canadian dairy cattle for production, reproduction and conformation. The Open Agriculture Journal 5, 63-72.

Seegers, H., Bareille, N., Guatteo, R., Joly, A., Chauvin, A., Chartier, C., Nusinovici, S., Peroz, C., Roussel, P., BEAUDEAU, F., 2013. Epidémiologie et leviers pour la maîtrise de la santé des troupeaux bovins laitiers: approche monographique pour sept maladies majeures. INRA Prod. Anim 26, 157-176.

Seegers, H., Beaudeau, F., Blosse, A., Ponsart, C., Humblot, P., 2005. Performances de reproduction aux inséminations de rangs 1 et 2 dans les troupeaux Prim'Holstein. Renc. Rech. Rum, 141-144.

Seegers, H., Coulon, R., Beaudeau, F., Fouchet, M., Quillet, J., 2001. Etude descriptive et identification de facteurs de variation de différentes catégories de retours après insémination artificielle en troupeaux laitiers. Rencontres autour des recherches sur les ruminants, 357-360.

Seegers, H., Fourichon, C., Beaudeau, F., 2003. Production effects related to mastitis and mastitis economics in dairy cattle herds. Veterinary research 34, 475-491.

Seegers, H., Fourichon, C., Hortet, P., Sørensen, J., Billon, D., Bareille, N., Beaudeau, F., 1999. Evaluation des conséquences économiques des stratégies de maîtrise de la concentration en cellules somatiques du lait produit par un troupeau de vaches laitières. J. Nat. GTV-INRA, 26-28.

Seegers, H., Fourichon, C., Malher, X., L'Hostis, M., 1994. A framework for animal health management. Veterinary research 25, 165-173.

Sewalem, A., Kistemaker, G., Miglior, F., Van Doormaal, B., 2006. Analysis of inbreeding and its relationship with functional longevity in Canadian dairy cattle. Journal of Dairy Science 89, 2210-2216.

Sewalem, A., Miglior, F., Kistemaker, G., Sullivan, P., Van Doormaal, B., 2008. Relationship between reproduction traits and functional longevity in Canadian dairy cattle. Journal of Dairy Science 91, 1660-1668.

Shelton, M., 1986. Breed use and crossbreeding in goat production.

Shull, G.H., 1948. What Is" Heterosis"? Genetics 33, 439.

Simon, H.A., 1986. Rationality in psychology and economics. Journal of Business, S209-S224.

Sokolowski, J.A., Banks, C.M., 2010. Modeling and simulation fundamentals: theoretical underpinnings and practical domains. John Wiley & Sons.

Sørensen, A.C., Madsen, P., Sørensen, M., Berg, P., 2006. Udder health shows inbreeding depression in Danish Holsteins. Journal of Dairy Science 89, 4077-4082.

Sørensen, J.T., Kristensen, E.S., Thysen, I., 1992. A stochastic model simulating the dairy herd on a PC. Agricultural Systems 39, 177-200.

Sørensen, M.K., Norberg, E., Pedersen, J., Christensen, L.G., 2008. Invited Review: Crossbreeding in Dairy Cattle: A Danish Perspective. Journal of Dairy Science 91, 4116-4128.

Swalve, H., 2007. Crossbreeding in dairy cattle: International trends and results from crossbreeding data in Germany. Lohmann Information 42, 38-46.

Touchberry, R.W., 1992. Crossbreeding Effects in Dairy Cattle: The Illinois Experiment, 1949 to 19691. Journal of Dairy Science 75, 640-667.

Trostle, R., 2010. Global Agricultural Supply and Demand: Factors Contributing to the Recent Increase in Food Commodity Prices (rev. DIANE Publishing.

USDA, 2015. Accessed on 7 Juillet 2015. Online: http://quickstats.nass.usda.gov/.

Van Der Werf, J.H.J., De Boer, W., 1988. Estimation of Genetic Parameters in a Crossbred Population of Black and White Dairy Cattle. Journal of Dairy Science 72, 2615-2623.

VanRaden, P., 1992. Accounting for inbreeding and crossbreeding in genetic evaluation of large populations. Journal of Dairy Science 75, 3136-3144.

VanRaden, P., Tooker, M., Cole, J., 2004. Heterosis and breed differences for daughter pregnancy rate of crossbred dairy cows. J. Dairy Sci 87, 284.

VanRaden, P.M., 2004. Invited Review: Selection on Net Merit to Improve Lifetime Profit. Journal of Dairy Science 87, 3125-3131.

VanRaden, P.M., Sanders, A.H., 2003. Economic Merit of Crossbred and Purebred US Dairy Cattle. Journal of Dairy Science 86, 1036-1044.

VanRaden, P.M., Tooker, M.E., Cole, J.B., Wiggans, G.R., Megonigal, J.H., 2007. Genetic Evaluations for Mixed-Breed Populations. Journal of Dairy Science 90, 2434-2441.

Veerkamp, R., Beerda, B., 2007. Genetics and genomics to improve fertility in high producing dairy cows. Theriogenology 68, S266-S273.

Veerkamp, R., Dillon, P., Kelly, E., Cromie, A., Groen, A., 2002. Dairy cattle breeding objectives combining yield, survival and calving interval for pasture-based systems in Ireland under different milk quota scenarios. Livestock Production Science 76, 137-151.

Verrier, E., Le Mezec, P., Boichard, D., Mattalia, S., 2010. Evolution des objectifs et des méthodes de sélection des bovins laitiers. Bulletin de l'Académie vétérinaire de France 163, 73-81.

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. Journal of Dairy Science 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. Journal of Dairy Science 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. Journal of Dairy Science 91, 4401-4413.

Walsh, S., Williams, E., Evans, A., 2011. A review of the causes of poor fertility in high milk producing dairy cows. Animal reproduction science 123, 127-138.

Waurich, B., 2007. Einkreuzungseffekte von Jersey-Vatertieren auf die sächsische Holsteinpopulation für Produktions- und Sekundärmerkmale. Georg-August-Universität, Göttingen, Germany.

Weigel, K.A., 2007. Crossbreeding: A Dirty Word or an Opportunity? University of Wisconsin. Department of Dairy.

Weigel, K.A., Barlass, K.A., 2003. Results of a Producer Survey Regarding Crossbreeding on US Dairy Farms. Journal of Dairy Science 86, 4148-4154.

Williams, J., Aguilar, I., Rekaya, R., Bertrand, J., 2010. Estimation of breed and heterosis effects for growth and carcass traits in cattle using published crossbreeding studies. Journal of Animal Science 88, 460-466.

Windig, J., Calus, M., Veerkamp, R., 2005. Influence of herd environment on health and fertility and their relationship with milk production. Journal of Dairy Science 88, 335-347.

Young, C., 1984. Systems of mating—problems and opportunities. Proc. Natl. Inv. Workshop on Genet. Impr. Dairy Cattle, Milwaukee, WI. Cornell Univ., Ithaca, NY, pp. 61-72.

Annexe A: Publication et communications

Articles

Acceptés

Dezetter, C., H. Leclerc, S. Mattalia, A. Barbat, D. Boichard et V. Ducrocq, 2015. Inbreeding and crossbreeding parameters for production ansd fertility traits in Holstein, Montbéliarde, and Normande cows. *J. Dairy Sci.* 98: 4904-4913.

Communications orales

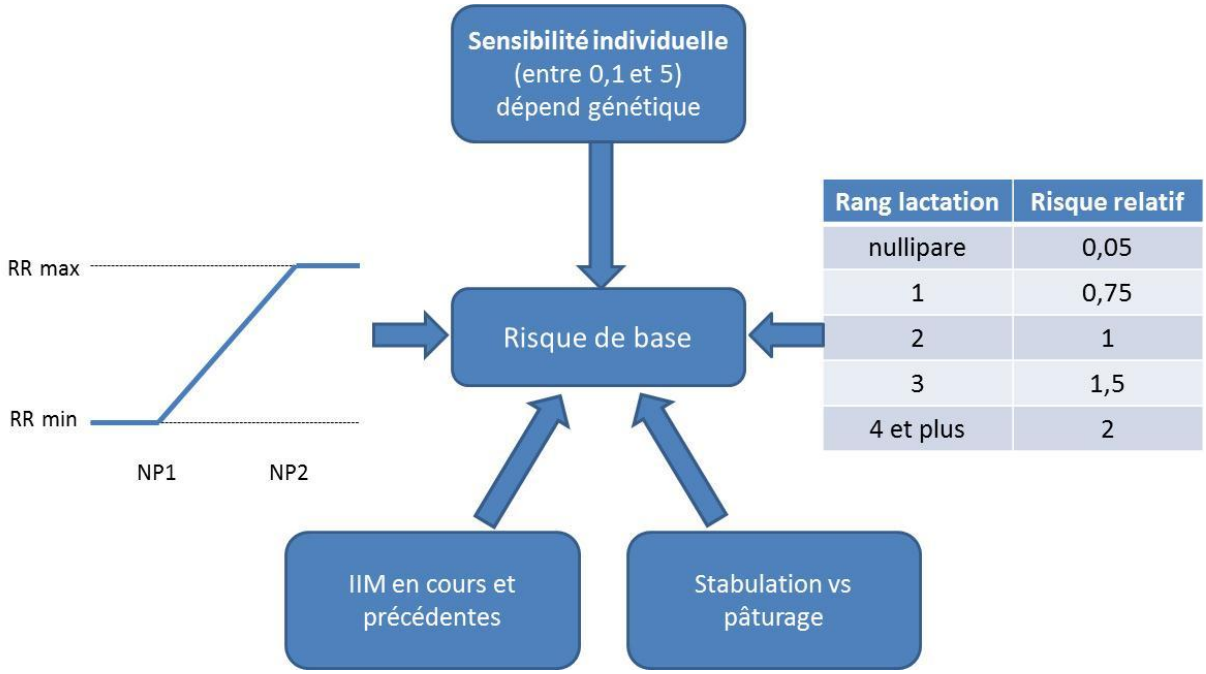
Dezetter, C., C. Côrtes, C. Lechartier, P. Le Mezec, S. Mattalia et H. Seegers, 2013. Crossbreeding in French dairy farms. In 64th Annual Meeting of the European Association for animal Production, Nantes, 26-30 août.

Dezetter, C., H. Leclerc, S. Mattalia, A. Barbat, D. Boichard et V. Ducrocq, 2014. Inbreeding and crossbreeding parameters for production ansd fertility traits in Holstein, Montbéliarde, and Normande cows. In 10th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Vancouver, 17-22 août.

Dezetter, C., H. Leclerc, S. Mattalia, A. Barbat, D. Boichard et V. Ducrocq, 2014. Estimation des effets de la consanguinité et du croisement pour les caractères de production chez les vaches de race Prim'Holstein, Montbéliarde et Normande. In 21ème journées des Rencontres Recherches Ruminants, Paris, 3 et 4 décembre

Annexe B : Modélisation du risque d'occurrence des infections intra-mammaires en l'absence de prévention

Un seul cas peut toutefois survenir un jour donné, en cas de conflits (plusieurs cas incidents déterminés pour des IIM différentes), c'est le trouble le moins fréquent qui est retenu. La fonction de risque de base en l'absence de méthodes de prévention est définie pour chaque IIM en fonction du stade de lactation pour prendre en compte la variation de l'incidence entre le tarissement, le pré-vêlage, la période péri-partum, le début de la lactation et le reste de la lactation (Hortet, 2000). Ce risque de base est modulé par des coefficients de risques relatifs illustrés dans la figure 4.5. Un effet de contagion accrue est ajouté en fonction de la prévalence des IIM observée au cours de la semaine précédente. Le risque calculé précédemment peut être plus ou moins réduit par des mesures de préventions que l'expérimentateur peut faire varier en fonction de la concentration cellulaire du tank.



Rang lactation	Risque relatif
nullipare	0,05
1	0,75
2	1
3	1,5
4 et plus	2

Modulation du risque de base d'occurrence des IIM à l'échelle de l'individu par des coefficients multiplicatifs de risques relatifs

Annexe C : Performances zootechniques moyennes annuelles des ateliers d'effectif constant de 60 vaches présentes-année selon la stratégie d'accouplement

1. Atelier avec un troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année

Stratégie d'accouplement	Année	PL_{AMV} (kg)	TB_{AMV} (g/L)	TP_{AMV} (g/L)	$TRIA_{AM}$ (%)	$IVIAF_{AMV}$ (j)	IIMc/100 VLP	VL_{4+} (%)	Nb_{AM} trt/VLP
	1	7922	40.7	32.7	43.5	131	47.7	23.2	6.2
	2	8067	40.4	32.8	43.1	131	44.9	22.5	6.2
	3	8068	40.6	32.7	44.5	130	45.6	24.0	6.2
	4	8224	40.3	32.4	43.4	131	46.6	24.2	6.2
	5	8309	40.2	32.4	44.7	131	48.5	26.1	6.1
	6	8325	40.2	32.3	44.9	132	47.1	26.8	6.1
	7	8427	40.2	32.3	45.5	133	47.1	26.4	6.0
HO	8	8483	40.2	32.3	44.9	133	50.3	26.7	6.1
	9	8486	40.2	32.4	45.6	134	48.8	27.4	6.0
	10	8587	40.3	32.4	45.7	134	49.2	27.9	6.0
	11	8587	40.4	32.5	46.2	133	49.9	27.0	6.0
	12	8677	40.4	32.5	46.3	133	50.3	27.0	6.0
	13	8753	40.4	32.5	46.9	134	49.9	26.9	6.0
	14	8765	40.4	32.6	47.4	133	49.8	26.8	6.0
	15	8864	40.5	32.6	47.6	132	50.8	26.9	5.9
	1	7924	40.6	32.7	49.0	131	47.6	23.2	5.9
	2	8128	40.4	32.7	48.9	124	43.9	23.2	6.0
	3	8142	40.5	32.6	49.8	123	45.5	24.5	6.0
	4	8313	40.2	32.4	49.5	124	46.7	25.0	5.8
	5	8425	40.1	32.4	51.8	121	48.2	26.1	5.8
	6	8461	40.0	32.4	53.8	120	46.6	26.0	5.7
	7	8582	40.0	32.4	55.2	120	45.4	24.5	5.6
HOxMO	8	8629	40.1	32.5	55.7	119	43.4	26.1	5.6
	9	8653	40.1	32.5	55.9	119	43.3	28.3	5.6
	10	8722	40.1	32.6	56.1	120	42.9	29.9	5.5
	11	8702	40.2	32.6	56.5	119	44.6	31.3	5.5
	12	8784	40.2	32.6	56.7	119	44.3	31.0	5.5
	13	8851	40.2	32.7	56.9	118	43.9	31.5	5.5
	14	8832	40.3	32.8	57.7	119	44.4	31.1	5.5
	15	8915	40.3	32.8	57.6	119	44.0	31.1	5.5
	1	7919	40.6	32.7	48.9	132	45.6	23.2	5.9
	2	8148	40.3	32.6	48.6	123	46.6	23.1	6.0
	3	8154	40.5	32.6	49.7	123	48.4	24.3	6.0
	4	8310	40.2	32.4	49.7	123	47.3	25.0	5.8
	5	8409	40.1	32.4	51.6	122	47.7	25.9	5.8
	6	8467	40.1	32.4	53.7	120	46.6	25.3	5.7
	7	8564	40.2	32.5	55.3	119	45.3	24.1	5.6
HOxMOxNO	8	8576	40.4	32.7	56.0	119	45.0	26.6	5.6
	9	8563	40.6	32.9	56.9	118	45.9	28.9	5.6
	10	8600	40.8	33.1	57.3	118	46.6	30.8	5.5
	11	8578	41.0	33.3	57.1	118	48.7	31.2	5.6
	12	8612	41.1	33.4	57.0	119	49.2	31.6	5.6
	13	8672	41.2	33.5	56.8	118	50.8	31.3	5.6
	14	8643	41.3	33.6	56.9	119	49.7	31.2	5.6
	15	8737	41.3	33.6	57.3	119	50.3	29.9	5.6
	1	7918	40.7	32.7	48.8	132	48.7	23.2	6.0
	2	8122	40.4	32.7	48.8	124	45.9	23.5	6.0
	3	8137	40.5	32.6	50.1	124	47.9	24.8	6.0
	4	8302	40.2	32.4	49.8	124	46.8	25.3	5.8
	5	8419	40.1	32.3	52.4	121	46.5	25.8	5.7
	6	8492	40.0	32.3	53.7	121	44.4	26.3	5.7
	7	8613	40.2	32.4	55.5	120	44.5	24.6	5.6
HOxMOxRS	8	8677	40.3	32.5	55.9	119	43.7	26.4	5.5
	9	8685	40.6	32.6	57.2	118	44.1	28.4	5.5
	10	8785	40.8	32.7	57.5	119	43.1	30.2	5.5
	11	8805	41.0	32.8	57.9	119	43.1	30.9	5.5
	12	8880	41.1	32.8	57.9	118	42.5	31.2	5.5
	13	8948	41.2	32.8	58.2	119	43.6	31.1	5.5
	14	8935	41.2	32.9	57.6	119	43.7	31.6	5.5
	15	9009	41.2	32.9	57.4	120	42.0	31.7	5.5

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

PL_{AMV} = Production laitière annuelle moyenne par vache présente-année, TB_{AML} = TB annuel moyen du lait livré , TP_{AML} = TP annuel moyen du lait livré, $TRIA_{AM}$ = Taux de réussite annuel aux IA, $IVIAF_{AMV}$ = Intervalle vêlage – IA fécondante annuel moyen par vache, IIMc/100VLP = Nombre d'infections intra-mammaires cliniques détectées pour 100 vaches présentes-année, VL_{4+} = Proportion annuelle de vaches du troupeau en 4ème lactation ou plus, Nb_{AM} trt/VLP = Compte annuel moyen d'intervention par vache présente-année.

2. Atelier avec un troupeau initial à 7000l de lait par vache présente année en vêlages groupés

Stratégie d'accouplement	Année	PL_{AMV} (kg)	TB_{AMV} (g/L)	TP_{AMV} (g/L)	$TRIA_{AM}$ (%)	$IVIAF_{AMV}$ (j)	IIMc/100 VLP	VL_{4+} (%)	Nb_{AM} trt/VLP
	1	7106	40.5	30.0	46.9	102	45.7	18.3	5.7
	2	7191	40.2	29.9	46.1	104	40.6	21.7	5.6
	3	7220	40.2	30.0	46.8	103	41.3	20.1	5.6
	4	7197	40.5	30.3	46.5	105	40.0	19.3	5.6
	5	7230	40.7	30.5	47.5	106	41.0	19.5	5.6
	6	7224	40.9	30.7	46.8	106	40.1	19.7	5.6
	7	7267	41.0	30.7	46.9	106	41.4	19.5	5.6
HO	8	7267	41.0	30.8	47.0	105	42.2	19.4	5.6
	9	7260	41.1	30.9	47.3	107	41.6	19.0	5.6
	10	7317	41.1	30.9	47.5	106	42.0	18.7	5.6
	11	7291	41.2	31.0	48.0	106	41.7	18.2	5.6
	12	7325	41.2	31.0	47.8	106	41.3	18.2	5.6
	13	7354	41.3	31.0	47.9	108	42.4	18.6	5.6
	14	7319	41.3	31.1	48.3	107	44.0	18.9	5.6
	15	7377	41.3	31.1	48.6	106	43.4	18.7	5.6
	1	7084	40.4	30.0	54.1	99	46.5	18.2	5.6
	2	7175	40.2	29.8	53.2	102	41.9	22.5	5.4
	3	7195	40.1	29.9	53.5	101	40.5	20.8	5.3
	4	7171	40.3	30.2	54.3	102	42.0	19.8	5.3
	5	7205	40.6	30.5	54.5	102	40.5	21.5	5.3
	6	7184	40.9	30.8	55.3	103	40.0	23.1	5.3
	7	7239	41.0	30.9	55.1	102	37.9	24.0	5.3
HOxMO	8	7213	41.1	31.0	54.4	103	36.5	24.0	5.3
	9	7211	41.2	31.1	54.9	102	37.6	25.0	5.3
	10	7246	41.2	31.1	54.6	103	35.4	25.0	5.2
	11	7216	41.3	31.2	54.4	102	34.7	25.5	5.2
	12	7239	41.3	31.3	55.1	103	35.2	25.8	5.2
	13	7262	41.3	31.3	54.8	103	36.0	25.6	5.2
	14	7256	41.4	31.3	54.7	102	35.6	26.2	5.3
	15	7288	41.4	31.4	56.2	102	36.4	25.6	5.2
	1	7074	40.4	30.0	54.4	99	46.2	18.2	5.6
	2	7175	40.1	29.8	54.0	101	41.2	23.1	5.4
	3	7199	40.1	29.9	53.5	101	41.7	21.3	5.4
	4	7174	40.3	30.2	54.2	102	42.6	20.1	5.3
	5	7211	40.7	30.5	54.7	103	41.9	21.9	5.3
	6	7184	40.9	30.8	54.6	103	40.7	23.2	5.3
	7	7212	41.1	31.0	55.3	102	38.2	23.5	5.3
HOxMOxNO	8	7196	41.4	31.3	55.1	103	38.9	24.1	5.3
	9	7165	41.7	31.6	55.4	102	39.0	24.4	5.3
	10	7202	41.9	31.7	55.3	101	41.6	25.0	5.3
	11	7174	42.1	31.9	55.4	102	43.3	25.5	5.3
	12	7197	42.2	32.1	54.5	102	45.5	24.9	5.3
	13	7233	42.3	32.1	54.7	103	46.6	24.7	5.4
	14	7221	42.3	32.2	54.8	102	47.4	24.3	5.4
	15	7265	42.3	32.2	55.2	103	48.1	24.1	5.4
	1	7078	40.4	30.0	54.4	99	47.0	18.3	5.6
	2	7170	40.2	29.8	53.9	102	42.0	23.0	5.4
	3	7194	40.1	29.9	53.6	101	40.9	21.3	5.4
	4	7178	40.3	30.2	53.9	101	41.9	20.6	5.3
	5	7213	40.6	30.5	55.1	102	42.9	22.2	5.3
	6	7194	40.8	30.7	54.7	103	40.2	23.3	5.3
	7	7224	41.1	30.9	54.5	103	37.7	23.8	5.3
HOxMOxRS	8	7221	41.3	30.9	54.9	102	38.1	24.1	5.3
	9	7210	41.6	31.1	55.1	103	35.8	24.5	5.2
	10	7254	41.8	31.1	55.5	102	36.4	25.5	5.3
	11	7224	42.0	31.1	54.6	102	35.7	25.7	5.3
	12	7252	42.1	31.1	55.2	102	34.5	25.9	5.3
	13	7297	42.2	31.2	54.7	103	36.3	26.4	5.3
	14	7280	42.2	31.2	54.0	103	36.2	26.2	5.3
	15	7317	42.2	31.3	54.7	103	38.4	25.7	5.3

Stratégies d'accouplement : HO =accouplement uniquement en race pure, HOxMO = croisement alternatif Holstein et Montbéliarde, HOxMOxNO = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Normande, HOxMOxRS = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Rouge Scandinave
PL_{AMV} = Production laitière annuelle moyenne par vache présente-année, TB_{AML} = TB annuel moyen du lait livré , TP_{AML} = TP annuel moyen du lait livré, $TRIA_{AM}$ = Taux de réussite annuel aux IA, $IVIAF_{AMV}$ = Intervalle vêlage – IA fécondante annuel moyen par vache, IIMc/100VLP = Nombre d'infections intra-mammaires cliniques détectées pour 100 vaches présentes-année, VL_{4+} = Proportion annuelle de vaches du troupeau en 4ème lactation ou plus, Nb_{AM} trt/VLP = Compte annuel moyen d'intervention par vache présente-année.

Annexe D : Performances économiques moyennes annuelles des ateliers d'effectif constant de 60 vaches présentes-année selon la stratégie d'accouplement

1. Atelier avec un troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année

Stratégie d'accouplement	Année	Produit (€)	Charges opérationelles (€)	MB actualisée (€)	MB par vache (€)	MB/1000 L (€)
	1	190814	52409	136006	2267	290.0
	2	193580	52949	136262	2271	284.6
	3	194182	53171	132745	2212	277.5
	4	196415	54861	128894	2148	263.8
	5	196312	53727	126368	2106	256.9
	6	195391	53877	121623	2027	247.3
	7	196893	53898	119834	1997	240.9
HO	8	198670	54694	117282	1955	233.5
	9	197762	54476	113084	1885	226.0
	10	199648	54489	111022	1850	219.6
	11	199212	54685	107923	1799	213.7
	12	202781	55342	106308	1772	207.3
	13	204259	55310	104293	1738	202.0
	14	204107	55520	101081	1685	195.6
	15	205839	55555	99276	1655	190.1
	1	190236	51750	136692	2278	291.2
	2	195930	52621	138679	2311	286.9
	3	195555	52873	135070	2251	279.6
	4	200660	54324	131738	2196	265.7
	5	199931	53157	130499	2175	261.4
	6	201796	53562	126519	2109	252.1
	7	204194	53716	126402	2107	248.7
HOxMO	8	206671	54041	124620	2077	242.7
	9	207027	53993	121014	2017	236.2
	10	208518	54097	118714	1979	229.3
	11	208262	54232	114349	1906	222.0
	12	209652	54376	112482	1875	216.0
	13	211697	54399	109896	1832	209.6
	14	211300	54410	106863	1781	204.5
	15	212661	54665	104421	1740	198.0
	1	190547	52040	136657	2278	291.1
	2	196015	53021	138343	2306	285.5
	3	196192	53040	135404	2257	279.9
	4	199848	54475	131070	2184	264.9
	5	199815	53389	129631	2161	260.2
	6	202407	53809	127076	2118	253.2
	7	203927	53889	126859	2114	249.9
HOxMOxNO	8	207060	54144	124716	2079	244.6
	9	206983	53976	120960	2016	238.2
	10	208651	53726	118499	1975	232.5
	11	206870	53996	114405	1907	225.6
	12	209776	54101	112320	1872	219.8
	13	210718	54135	109396	1823	213.6
	14	209101	54008	105216	1754	206.6
	15	211242	54031	103581	1726	201.1
	1	190086	51736	136546	2276	291.3
	2	194964	52528	137794	2297	285.3
	3	195564	52640	135178	2253	280.0
	4	199870	54044	131735	2196	266.4
	5	199977	53241	130371	2173	261.1
	6	203072	53565	127453	2124	253.2
	7	205165	53683	127216	2120	249.1
HOxMOxRS	8	209080	54065	126325	2105	244.6
	9	208364	53990	122359	2039	237.9
	10	211939	54175	120815	2014	231.8
	11	212493	54393	117873	1965	226.0
	12	214322	54697	115105	1918	218.8
	13	215016	54661	112673	1878	213.0
	14	215115	54875	108941	1816	206.1
	15	217128	54852	106970	1783	200.7

Stratégies d'accouplement : HO =accouplement uniquement en race pure, HOxMO = croisement alternatif Holstein et Montbéliarde, HOxMOxNO = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Normande, HOxMOxRS = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Rouge Scandinave
Les marges brutes annuelles (MB) ont été actualisées en appliquant un taux annuel de 3%.

2. Atelier avec un troupeau initial à 7000l de lait par vache présente année en vêlages groupés

Stratégie d'accouplement	Année	Produit (€)	Charges opérationnelles (€)	MB actualisée (€)	MB par vache (€)	MB/1000 L (€)
	1	170482	44120	130811	2180	309.2
	2	169775	45322	123057	2051	290.3
	3	171842	44682	119976	2000	282.4
	4	174780	44686	118854	1981	279.8
	5	175159	44739	116304	1938	273.0
	6	178079	45020	114237	1904	266.9
	7	177423	44948	110854	1848	259.6
HO	8	176801	44911	106463	1774	250.3
	9	175735	44642	103224	1720	243.9
	10	176691	44779	101143	1686	237.3
	11	176136	44777	98144	1636	231.5
	12	177854	45302	95918	1599	223.5
	13	178311	45183	93486	1558	217.4
	14	178410	45363	90493	1508	211.2
	15	179830	45533	88982	1483	205.5
	1	170194	44309	129108	2152	300.5
	2	173959	45365	124383	2073	285.1
	3	176389	44389	123389	2056	281.8
	4	176207	44163	120856	2014	277.5
	5	176250	43928	117964	1966	272.4
	6	178505	44106	115746	1929	267.4
	7	181129	43970	114492	1908	262.8
HOxMO	8	180958	43925	111488	1858	256.6
	9	181211	43887	108755	1813	251.8
	10	180817	43680	105061	1751	243.2
	11	181026	43857	102396	1707	237.4
	12	182656	43909	99994	1667	230.5
	13	182182	44055	97257	1621	223.4
	14	183068	44238	94426	1574	217.9
	15	183400	44303	92048	1534	210.3
	1	170526	44907	128928	2149	299.5
	2	174137	46044	123943	2066	283.6
	3	175988	44943	122357	2039	279.7
	4	176083	44736	119971	2000	275.8
	5	176509	44424	117534	1959	270.6
	6	177903	44698	114807	1913	265.3
	7	180015	44410	113764	1896	262.0
HOxMOxNO	8	182405	44533	111787	1863	257.9
	9	180881	44007	108518	1809	253.7
	10	182202	44170	105687	1761	245.2
	11	182938	44015	103293	1722	241.5
	12	182609	44198	99817	1664	232.8
	13	182268	44155	96624	1610	225.6
	14	182294	44210	93796	1563	219.9
	15	182389	44162	91209	1520	212.5
	1	169751	44301	128987	2150	300.7
	2	173819	45591	123929	2065	284.2
	3	176441	44396	123321	2055	281.2
	4	176589	44070	120755	2013	277.3
	5	175407	43702	117213	1954	271.0
	6	177212	43827	115009	1917	267.0
	7	179329	43917	113740	1896	262.5
HOxMOxRS	8	180766	43980	111177	1853	256.8
	9	180807	43824	108431	1807	251.5
	10	181910	44067	105741	1762	243.1
	11	183206	44138	103590	1727	239.0
	12	183041	44211	100536	1676	231.1
	13	184839	44413	98234	1637	224.0
	14	184959	44429	95436	1591	218.3
	15	184388	44427	92354	1539	211.2

Stratégies d'accouplement : HO =accouplement uniquement en race pure, HOxMO = croisement alternatif Holstein et Montbéliarde, HOxMOxNO = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Normande, HOxMOxRS = croisement rotatif Holstein, Montbéliarde et Rouge Scandinave
Les marges brutes annuelles (MB) ont été actualisées en appliquant un taux annuel de 3%.

Annexe E : Marge brute annuelle moyenne non actualisée (en €) des ateliers selon la stratégie d'accouplement

Stratégie d'accouplement	Année	8M - 120 VLP	8M – 960 000L	9M - 120 VLP	9M – 1 080 000L	8,5M – 120 VLP	8,5M- 1 032 000L	7M – 120 VLP
HO	1	280249	277608	304013	307102	280714	288571	266541
HO	2	284034	281372	305192	305860	267154	274943	259298
HO	3	288168	282939	311468	310357	266311	279160	257257
HO	4	285978	277542	310323	306744	270993	276691	254622
HO	5	287066	277767	310848	306436	272066	274760	264886
HO	6	289777	277659	315311	307372	275498	277858	267999
HO	7	294123	277467	318390	307540	276641	277599	267104
HO	8	297114	278433	320706	309887	276572	277954	267668
HO	9	297278	275032	319318	307614	275724	272969	267397
HO	10	299045	277095	323160	308427	275831	275195	268358
HO	11	298109	275358	322581	305865	274337	272771	267443
HO	12	303082	277220	325644	307377	278983	276406	269383
HO	13	304739	277155	328297	307241	279941	274182	271929
HO	14	305221	276598	327229	306654	280715	275048	271752
HO	15	309471	277938	331502	308323	283075	276843	272882
HOxMO	1	280696	278985	305715	307773	280794	289996	262780
HOxMO	2	287682	286533	308622	310045	272786	274517	260516
HOxMO	3	290460	286839	313688	313016	272956	285520	261738
HOxMO	4	290206	283430	312174	311222	276706	281663	258687
HOxMO	5	292930	285958	313798	311680	281379	287478	266878
HOxMO	6	297646	287763	317588	315491	285219	289514	271275
HOxMO	7	306000	293994	322727	319685	291291	296289	274292
HOxMO	8	310012	296784	324183	323009	294464	295993	277401
HOxMO	9	309977	293533	322969	321092	291357	294905	279400
HOxMO	10	311721	296263	326441	323062	292772	297193	279516
HOxMO	11	311052	294178	326679	321346	291832	293460	279268
HOxMO	12	313532	296046	329820	322953	294872	297310	279615
HOxMO	13	315506	294887	330905	322748	296671	295844	281715
HOxMO	14	315712	294624	331163	322208	296845	297552	282019
HOxMO	15	318561	297018	333496	324499	300469	298709	283849
HOxMOxNO	1	280512	278804	305643	308481	281007	288764	262802
HOxMOxNO	2	288087	285079	309492	310938	272796	275695	259898
HOxMOxNO	3	290215	286383	313444	313616	272707	283998	261890
HOxMOxNO	4	289951	283329	310666	310997	276207	280819	259094
HOxMOxNO	5	292516	284920	313076	312791	280604	285290	267781
HOxMOxNO	6	297541	287897	315929	316891	285209	290696	269875
HOxMOxNO	7	306420	294354	321553	322113	290499	294541	275012
HOxMOxNO	8	309518	298046	324957	326418	293954	297457	279583
HOxMOxNO	9	309612	297310	323175	325366	290762	294360	279471
HOxMOxNO	10	311166	299555	326751	329029	291874	296794	280641
HOxMOxNO	11	310251	296780	326051	325687	292274	293446	281451
HOxMOxNO	12	312603	298574	328600	328584	293466	293958	281696
HOxMOxNO	13	313419	297270	330776	328404	294484	293080	282274
HOxMOxNO	14	312814	297684	329825	326686	293702	294934	280600
HOxMOxNO	15	316697	298225	333515	328942	299137	296943	281160
HOxMOxRS	1	281272	278606	305366	307647	280626	289015	262835
HOxMOxRS	2	287745	285333	309721	310536	273400	276117	259736
HOxMOxRS	3	291093	287072	314287	314874	273456	284429	262825
HOxMOxRS	4	289723	282952	312848	311247	277385	281578	258012
HOxMOxRS	5	292955	284314	312329	312110	280395	286122	266246
HOxMOxRS	6	298787	287792	315893	315773	284651	290108	270613
HOxMOxRS	7	307025	293455	321749	320278	291901	296795	273559
HOxMOxRS	8	313536	296105	326426	323919	294472	298103	277937
HOxMOxRS	9	315126	295658	326598	323424	294940	298879	278618
HOxMOxRS	10	318934	299269	330340	326949	299675	298446	278342
HOxMOxRS	11	319013	296830	331145	325789	299764	297168	281507
HOxMOxRS	12	323161	297928	334463	327692	303386	299635	282733
HOxMOxRS	13	323332	296260	335461	327124	304493	295718	283837
HOxMOxRS	14	322596	296746	335158	327106	303903	296979	282757
HOxMOxRS	15	325884	297682	338797	328075	306194	297173	283493

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

Ateliers : 8M-120 VLP = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année avec un effectif constant de 120 vaches présentes-année, 8M-960 000L = troupeau initial à 8000l de lait par vache présente année avec un objectif de livraison de 960 000L, 9M-120 VLP = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année avec un effectif constant de 120 vaches présentes-année, 9M-1 080 000L = troupeau initial à 9000l de lait par vache présente année avec un objectif de livraison de 1 080 000L, 8,5M-120 VLP = troupeau initial à 8500l de lait par vache présente année en situation de reproduction et sanitaire dégradée avec un effectif constant de 120 vaches présentes-année, 8,5M-1 032 000L = troupeau initial à 8500l de lait par vache présente année en situation de reproduction et sanitaire dégradée avec un objectif de livraison de 1 032 000L, 7M-120 VLP = troupeau initial à 7000l de lait par vache présente année en vêlages groupés avec un effectif constant de 120 vaches présentes-année.

l'université nantes angers le mans
PÔLE DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

Oniris
École Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation
Nantes Atlantique
Santé et alimentation au cœur de la vie

Thèse de Doctorat

Charlotte DEZETTER

Evaluation de l'intérêt du croisement entre races bovines laitières

Assessment of the advantage of crossbreeding between dairy breeds

Résumé

La robustesse des vaches Holstein (HO) a été dégradée par la sélection pratiquée ces dernières décennies alors que le croisement entre races laitières permettrait *a priori* de l'améliorer. L'objectif général de cette thèse était donc d'évaluer par modélisation-simulation l'intérêt de l'introduction du croisement entre races laitières dans des troupeaux HO. Dans une étape intermédiaire, le traitement des bases de données nationales a établi que les écarts entre races et l'hétérosis pour les caractères de production et de reproduction étaient significatifs, pour les races HO et Montbéliarde (MO) ou Normande (NO). Au cours de l'étape de simulation, des scénarios déroulés sur 15 ans ont comparé 3 stratégies d'accouplement impliquant les races MO, NO et/ou Rouge Scandinave (RS) à celle consistant à rester en race HO, et ceci pour différents types d'ateliers. Compte-tenu des paramétrages retenus pour ces simulations, dans les ateliers à niveau élevé de productivité laitière et faible prévalence de troubles de reproduction et santé, le croisement n'a pas montré d'avantage économique. En revanche, à productivité élevée mais prévalence marquée de tels troubles, le croisement avait un effet positif et, notamment, la stratégie rotative HOxMOxRS augmentait le résultat de près de 100 €/vache/an. Pour des niveaux de productivité plus modérés, l'intérêt économique était moindre, mais la robustesse des vaches était améliorée avec moins d'interventions sur les vaches. En dépit de ces résultats plutôt favorables, le constat dressé en étape préliminaire, sur la très large résistance en France à la pratique du croisement, incite à mieux construire le conseil aux éleveurs sur cette question.

Mots clés
Vache laitière ; Croisement ; Performances zootechniques ; Performances économiques ; Evaluation génétique ; Modélisation ; Holstein ; France

Abstract

Robustness of Holstein (HO) cows has decreased over the past decades while crossbreeding might be a way to improve it. The aim of this thesis was to assess, with a simulation model, the interest of the introduction of a crossbreeding mating plan in HO herds. From a preliminary estimation of crossbreeding parameters for production and reproduction traits in HO, Montbéliarde (MO) and Normande (NO) cows from the national database, we concluded that breed differences and heterosis effects were significant. Then, we simulated, over 15 years, three different crossbreeding scenarios with HO, MO, NO or Scandinavian Red (SR) breeds, in comparison to pure HO mating for several types of dairy operations. Given the parameters values of our study, in high milk-yielding herds with low prevalence of reproduction and health disorders, the introduction of crossbreeding was not more profitable than keeping on pure HO mating. However, in high milk-yielding herds with high prevalence of reproduction and health disorders, crossbreeding was more profitable than keeping on pure HO mating, especially for the 3-way rotational HOxMOxSR scheme, which increased the gross margin by 100€/cow/year compared to pure HO mating. In moderate milk-yielding herds, profitability advantage of crossbreeding was smaller but cows' robustness was improved and led to fewer treatments per cow. As shown in an initial step of this study and despite of our quite favorable results, French dairy producers are still widely reluctant to implement crossbreeding. Therefore, the study highlights the need of a more elaborated advice to producers on this subject.

Key words
Dairy cow; Crossbreeding; Animal performance; Profitability; Genetic evaluation; Modelling; Holstein; France