HAL open science

La mise en place du croisement rotatif dans un troupeau bovin laitier de race pure : quelle évolution des pratiques d'élevage et des performances associées?

Julien Quenon

▶ To cite this version:

Julien Quenon. La mise en place du croisement rotatif dans un troupeau bovin laitier de race pure : quelle évolution des pratiques d'élevage et des performances associées?. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2021. Français. NNT : 2021INPT0011 . tel-04420255v2

HAL Id: tel-04420255

https://theses.hal.science/tel-04420255v2

Submitted on 26 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Agrosystèmes, Écosystèmes et Environnement

Présentée et soutenue par :

M. JULIEN QUENON

le lundi 1 février 2021

Titre :

La mise en place du croisement rotatif dans un troupeau bovin laitier de race pure: quelle évolution des pratiques d'élevage et des performances associées?

Ecole doctorale :

Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries (SEVAB)

Unité de recherche :

AGroécologie, Innovations, TeRritoires (AGIR)

Directeur(s) de Thèse :

M. MICHEL DURU

MME MARIE-ANGELINA MAGNE

INGRAND STEPHANE

Rapporteurs :

M. CHARLES-HENRI MOULIN, MONTPELLIER SUPAGRO

M. YANNICK LE COZLER, AGROCAMPUS OUEST

Membre(s) du jury :

MME NATHALIE MANDONNET, INRA PETIT BOURG, Président

MME ANNE LAUVIE, INRAE MONTPELLIER, Membre

MME MARIE-ANGELINA MAGNE, INRA TOULOUSE, Membre

M. MICHEL DURU, INRA TOULOUSE, Membre

M. STEPHANE INGRAND, INRA CLERMONT FERRAND, Membre

Remerciements

Merci Marie-Angélina de m'avoir fait confiance pour ton premier encadrement de thèse. J'espère que je ne t'aurai pas découragée de renouveler l'expérience avec d'autres ! Merci pour la pédagogie dont tu as fait preuve pour me transmettre une méthode et des réflexes de travail en recherche. Merci pour la liberté que tu m'as laissée durant ces trois ans pour m'approprier ce sujet de thèse et le faire évoluer – voire peut-être dériver – par rapport à ce que tu avais envisagé initialement. Merci de m'avoir encouragé à approfondir mes questionnements et mes « lubies », mais également de m'avoir aidé à les canaliser et les formaliser. Je te remercie enfin d'avoir toujours eu ce souci de mettre en place ce qu'il fallait pour permettre une relation de travail saine, en dépit des tumultes qui ont pu la ponctuer.

Merci Stéphane pour ton pragmatisme et ta capacité à synthétiser à la fois tes idées mais aussi celles des autres avec justesse. Plus d'une fois cela m'a été d'un grand secours quand je « phosphorais » sans parvenir à donner forme à mes réflexions. Merci pour ton caractère jovial, prompt à dédramatiser ce qui n'est pas grave, et à considérer avec sérieux mais jamais sans humour ce qui l'est davantage.

Merci Michel pour nos discussions souvent imprévues mais toujours riches d'enseignements. Merci d'avoir partagé un peu de ton temps et de ton expérience pour éclairer mes réflexions. Merci enfin pour ton engagement inébranlable dont j'espère pouvoir m'inspirer à l'avenir.

Je remercie Yannick Le Cozler, Charles-Henri Moulin, Anne Lauvie et Nathalie Mandonnet d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je remercie les membres de mon comité de thèse Alain Ducos, Luc Delaby, Laurence Puillet, Julie Labatut et Didier Boichard, pour les échanges lors de nos trois réunions, qui m'ont à chaque fois permis d'enrichir mes réflexions en cours de nouvelles perspectives

Je tiens à vivement remercier les éleveur·euse·s qui m'ont accueilli sur leur ferme ou chez eux/elles. Merci de m'avoir accordé votre temps, merci pour ces discussions et pour avoir partagé avec moi vos opinions quant aux organismes de recherche et au manque de retour sur les résultats de leurs travaux auprès de celles et ceux qui y ont contribué. Tout jeune doctorant alors (1ère année), je m'étais promis de vous donner tort. Malheureusement, à l'heure d'écrire ces remerciements, je dois reconnaître ne pas y être parvenu pour le moment, bien que cela ne saurait tarder. Je vous présente néanmoins mes excuses et espère échanger avec vous sur ce travail très bientôt.

Je remercie Pascale Le Mézec, Mickaël Brochard, Isabelle Pailler, Jean-François Thoby, Pauline Rio et Félix Lemaréchal pour leur expertise et leur aide pour l'échantillonnage des fermes. Merci à Sandra Novak et aux éleveurs d'OaSys d'avoir aidé à affiner le guide d'entretien. Merci à Anne-Laure Brunet, Jérôme Ralu, Xavier Fischer, Olivier Vasseur, Isabelle Balvay et Etienne Poulain pour l'extraction des données.

Merci Gabrielle pour ton travail de défrichage des données, ta proactivité dans les réflexions sur leur analyse, ta précieuse rigueur dans le travail et la pédagogie dont tu as fait preuve pour me faire progresser en statistiques et en codage R. Je remercie également Isabelle Palhière et Hélène Larroque pour le temps qu'elles m'ont accordé, y compris lorsque je les sollicitais à l'improviste. Merci enfin à Célia Pontet pour son aide sur les modèles linéaires et Jacques-Eric Bergez pour ses nombreuses contributions.

Merci au département Action transition et territoires (ex-SAD) de l'INRAE et à la région Occitanie d'avoir financé mon salaire au cours de ce travail. Les frais de fonctionnement de cette thèse ont été financé par le projet PSDR4 ATA-RI et le Conseil Scientifique de l'ENSFEA.

Pour réaliser ce travail, j'ai été accueilli au sein de l'UMR AGIR. Je tiens à remercier ses membres pour leur accueil, et notamment aux membres de l'équipe MAGELLAN que j'ai davantage côtoyé. Merci en particulier à Laurent Hazard d'avoir accepté de « dégripper le rouage », à Guillaume Martin d'avoir participé à l'atelier d'écriture de mon premier article, à Vincent Thénard pour l'organisation des séminaires du lundi (toujours propices à ouvrir son champ des perspectives). Merci à l'équipe des gestionnaires et des secrétaires Mathieu Solle, Thierry Courbun, Marina Lefebvre et Maryse Perreu et Christel Moder, ainsi qu'à l'équipe informatique d'appui Bruno Bade, Marie-Hélène Charron et Denis Baudet et enfin à Agnès : c'est votre travail qui m'a permis ce luxe de pouvoir « ne pas avoir à penser » aux impératifs logistiques, matériels et administratifs.

Merci à toute l'équipe organisatrice et aux participant·e·s de la formation EDEN, qui m'a fourni une boîte à outils bien utile pour appréhender les différentes étapes de la thèse. Merci à Matthieu Pouget pour ses interventions extrêmement enrichissantes.

Au cours de cette thèse, j'ai saisi l'opportunité de réaliser des missions d'enseignement. Merci à mes « chaperonnes » Magali Willaume, Sandrine Allain, Julie Ryschawy, Katia Massip et Cécile Bonnefont.

Merci à l'équipe organisatrice de la Game Jam Scientifique et aux partenaires d'Amour Vache. J'ai pu grâce à vous goûter avec plaisir aux joies de la créativité vidéoludique en équipe et il me tarde de recommencer !

Merci à mes partenaires de volley du mardi soir, de l'ADAS et de Dessine-moi un ballon, pour ces moments de défoulement sur le terrain, et pour ceux de convivialité en troisième mi-temps.

Je remercie le « groupe des non-permanent·e·s » pour sa dynamique, ses moments de partage et de réflexion en commun. Merci à mes voisines de bureau : Camille, pour avoir supporté mes longues diatribes, Gwen pour nos interminables mais passionnantes discussions épistémologiques, Cathy pour ta détermination à construire du commun et Elise pour ton goût de l'humour pince-sans-rire. Je te remercie également camarade Augustine pour ton goût de la révolution et ton brevet de secourisme anti-PLS. Merci Mariem pour m'avoir partagé tes projets inspirants. Merci Julie pour ta détermination à faire bouger les choses et à ta capacité à mobiliser. Merci Rémi pour nos échanges enthousiastes voire enflammés sur l'environnement, les mathématiques et l'humain. Merci à Pierre Casel, pour nos échanges paisibles sur ces mêmes sujets. Merci à Clémentine, Defne, Neila, Félix, Calypso pour les pauses cafés non planifiées du vendredi après-midi. Merci Myriam pour tes conseils de fin de thèse. Merci Fernanda pour ta jovialité si communicative. Merci Sandrine pour ton alliance de sérieux et de folie douce, Hélène pour les découvertes musicales et ton humour caustique, Maëlys pour ta sollicitude et Camille pour nos discussions. Enfin, merci Kévin pour ton écoute et la pédagogie avec laquelle tu m'as permis de prendre du recul sur ma situation à chacun de nos échanges.

Après m'être longtemps convaincu que je ne ferais pas de recherche, il me semble opportun de remercier les personnes qui m'ont fait réviser ma position : merci à Jean-Louis Fiorelli d'avoir réveillé ma curiosité ; merci à Hugues Caillat de m'avoir donné les moyens de la satisfaire tout en me donnant confiance en mes capacités ; merci enfin à Julia Jouan et Aude Ridier de m'avoir fait réaliser « qu'il était temps » de sauter le pas.

Après trois années passées à Toulouse, je remercie toutes les personnes que j'y ai rencontré ou retrouvé : merci à mes colocs Yacine, Thomas, Benoît, Emma, Elise et Justine. Merci à ma famille du Sud-Ouest pour les repas du dimanche, les anniversaires-surprises ou non et tous ces bons moments en votre compagnie. Merci Thibault pour les verres au bar, les rendez-vous au marché Saint-Aubin, les manifs, les aprèm' jeux de société et le sentier Cathare. Merci à Elisa pour nos discussions sur l'architecture et la cuisine. Merci enfin à l'association Convivencia pour son action tout d'abord, et pour son accueil : il me tarde d'y prendre part pour de bon !

Merci Victor et Marie pour votre accueil : héberger un thésard en train de terminer de rédiger son manuscrit, c'était franchement pas un bon plan sur le papier, j'espère que vous ne l'avez pas regretté !

Merci à mes ami·e·s d'école et d'après encore : merci aux sudistes Cyril et Greg pour le boulot abattu week-end après week-end au bord du volcan. Merci Thomas pour nos soirées Loliennes, notre projet d'instagrammeurs dans les cartons depuis trois ans, et plus encore pour le plaisir de refaire le monde avec toi. Merci aux gens de l'Ouest : merci Mélanie pour nos discussions sur le grand ogre laitier ou les questions de féminisme ; merci Clément pour ta générosité et ton précieux souci des autres ; merci Matthieu pour nos soirées à observer non pas un homme mais un félin qui volait et à nous demander si c'est la façon de s'endormir ou bien de se réveiller qui est importante ; merci Vincent et Cloé pour votre acharnement à réunir toute la bande de copicopains et pour nous faire réaliser à l'occasion que ces moments sont précieux. Merci encore à toutes celles et tous ceux que j'oublie au moment d'écrire ces lignes. Qu'ils/elles m'en excusent.

Merci Hugo pour ta sensibilité et ta créativité, merci Pierre pour ta sensibilité et ta créativité. Merci pour votre humour et votre folie qui me revigore à chacune de nos retrouvailles. Et merci à tous les deux pour ces si chouettes moments passés en votre compagnie

Merci Maman pour ton soutien indéfectible et ta patience.

Merci Papa pour ta confiance indéfectible et ton écoute.

Enfin, merci Alice pour ce camp de base construit à deux.

Table des matières

Remerciements 1
Table des matières 5
Contexte de la thèse 9
Productions réalisées durant la thèse 11
Liste des encadrés 15
Liste des figures 15
Liste des tableaux 19
Introduction générale 21
Chapitre 1 – Contexte, problématique et questions de recherche 27
1.1. Pour quelles raisons le croisement laitier émerge-t-il ? Des enjeux contemporains de l'élevage bovin lait et des limites d'un modèle basé sur la race pure et l'hyperspécialisation pour y répondre 29
1.1.1. Contexte et enjeux socio-économiques de l'élevage bovin laitier 29
1.1.2. Evolution de la sélection génétique des bovins laitiers du milieu du XXème siècle à aujourd'hui : apports, limites et alternatives à l'hyperspécialisation des races 37
1.2. Le croisement laitier en élevage bovin : une pratique atypique en développement 47
1.2.1. Le croisement de races : schémas et programmes de croisement 47
1.2.2. Bénéfices théoriques du croisement laitier : l'effet d'hétérosis et la complémentarité des races 51
1.2.3. Le croisement laitier : une pratique en marge du modèle dominant 59
1.3. Les travaux de recherche sur le croisement laitier se concentrent sur l'évaluation des performances à l'échelle animal 61
1.3.1. L'estimation des paramètres génétiques du croisement laitier 61
1.3.2. L'évaluation des performances du croisement laitier 69
1.3.3. Synthèse de l'état de l'art et questions en suspens 87
1.4. Question de recherche 91
1.4.1. Problématique 91
1.4.2. Question et sous-questions de recherche 97
Chapitre 2 – Cadre d'analyse et démarche générale 99
2.1. Construction d'un cadre d'analyse ancré en zootechnie système 99
2.1.1. Application du cadre conceptuel du système d'élevage au cas du croisement rotatif 99
2.1.2. Application du cadre conceptuel de la gestion de la diversité animale en élevage au cas du croisement rotatif 107
2.1.3. Présentation du cadre conceptuel construit pour analyser l'évolution des pratiques et des performances du troupeau induite par le croisement rotatif 115
2.2. Une approche rétrospective dans des fermes commerciales 117

2.2.1. Une approche basée sur l'étude de cas de fermes commerciales 117
2.2.2. Une analyse rétrospective 121
2.3. Un dispositif de recherche basé sur des données quantitatives et qualitatives à différents niveaux d'organisation 127
2.3.1. Justification d'un dispositif mixte.....127
2.3.2. Approche qualitative.....129
2.3.3. Approche quantitative.....133
Chapitre 3 – Trois trajectoires types de transition technique pour gérer la mise en place du croisement rotatif au sein d'un troupeau bovin laitier conduit en race pure.....137
3.1. Introduction 137
3.2. Article 1 : Managing the transition from purebred to rotational- crossbred dairy cattle herds: three technical pathways from a retrospective case-study analysis 139
Abstract.....139
Implications 141
Introduction 143
Materials and methods 145
Results 151
Discussion.....161
Conclusion 171
References.....171
3.3. Conclusion 173
Chapitre 4 – Combiner les génotypes diversifiés générés par le croisement rotatif pour améliorer les performances globales du troupeau 175
4.1. Introduction 175
4.2. Article 2 : Effects of three-breed rotational crossbreeding on milk and functional performances in dairy cattle herds: the issue of benefiting from genetic diversity....177
Abstract.....177
Introduction 179
Materials and methods 183
Results and discussion.....193
Conclusion 205
References.....207
4.3 Conclusion 209
Chapitre 5 – Evolution des performances de troupeaux bovins laitiers au sein desquels est mis en place le croisement rotatif et identification de ses déterminants.....211
Résumé 211
5.1. Introduction 213
5.2. Matériels et méthodes 219
5.2.1. Echantillonnage et recueil de données 219

5.2.2. Edition des données 221
5.2.3. Méthodes et traitement des données 231
5.3. Résultats 237
5.3.1. Etat initial et évolution des performances zootechniques élémentaires des troupeaux 237
5.3.2. Etat initial et évolution de la composition et de la gestion technique des troupeaux 241
5.3.3. Identification des facteurs qui expliquent l'évolution des performances zootechniques des troupeaux 245
5.3.4. Analyse de la projection d'individus caractéristiques sur les composantes de la PLS : description de l'évolution des performances et des systèmes 257
5.4. Discussion 263
5.4.1. Le croisement rotatif contribue à l'amélioration des performances zootechni -ques du troupeau 263
5.4.2. Le croisement rotatif améliore les performances zootechniques du troupeau différemment selon le stade d'avancement dans la pratique du croisement ..269
5.4.3. Retours sur la méthode 273
5.5. Conclusion 277
5.6. Références 279
Chapitre 6 – Discussion générale 281
6.1. Contributions scientifiques de la thèse 285
6.1.1. Caractériser le croisement rotatif comme un cas d'étude pour analyser la coévolution des pratiques de configuration du troupeau et de ses performances zootechniques 285
6.1.2. Caractériser le croisement rotatif comme un cas d'étude prometteur pour analyser la gestion de de la diversité animale dans les systèmes d'élevage .307
6.2. Analyse critique de la stratégie et du dispositif de recherche 325
6.3. Implications et perspectives opérationnelles 333
Conclusion générale 339
Références bibliographiques 343
Annexes 365
Annexe 1 : Résumé accepté à l'EAAP 2020 365
Annexe 2 : Résumé accepté à l'IFSA 2020 366
Annexe 3 : Actes de la « présentation flash » acceptée aux 3R 2020 367
Annexe 4 : Affiche acceptée aux 3R 2018 371
Annexe 5 : Affiche présentée à la Journée du projet ATA-RI – 03/10/19 372
Annexe 6 : Ecarts de valeurs moyennes pour plusieurs indicateurs de performances de production entre vaches F_1 et vaches de race pure, issus de la revue de littérature effectuée dans la thèse 373

Annexe 7 : Ecarts de valeurs moyennes pour plusieurs indicateurs de performances de reproduction entre vaches F_1 et vaches de race pure, issus de la revue de littérature effectuée dans la thèse 375

Annexe 8 : Ecarts de valeurs moyennes pour plusieurs indicateurs de performances de traits de santé et de longévité entre vaches F_1 et vaches de race pure, issus de la revue de littérature effectuée dans la thèse 376

Annexe 9 : Ecarts de valeurs moyennes pour plusieurs indicateurs de performances de production entre vaches G_2, vaches F_1 et vaches de race pure, issus de la revue de littérature effectuée dans la thèse 377

Annexe 10 : Ecarts de valeurs moyennes pour plusieurs indicateurs de performances de reproduction entre vaches G_2, vaches F_1 et vaches de race pure, issus de la revue de littérature effectuée dans la thèse 378

Annexe 11 : Ecarts de valeurs moyennes pour plusieurs indicateurs de performances de traits de santé et de longévité entre vaches G_2, vaches F_1 et vaches de race pure, issus de la revue de littérature effectuée dans la thèse.....379

Annexe 12 : Guide d'entretien.....380

Annexe 13 : Exemple de monographie construite à partir des données d'enquête 388

Contexte de la thèse

Laboratoire d'accueil

Cette thèse a été réalisée entre le 23 octobre 2017 et le 22 décembre 2020 au sein de l'UMR AGIR (Agroécologie, Innovations et teRritoires) du centre INRAE Occitanie-Toulouse, et dans l'équipe MAGELLAN (Méthodes pour l'Agroécologie et la Gestion LocaLe des ressources Agricoles et Naturelles).

Enseignements

Au cours des trois années de cette thèse, j'ai effectué les missions d'enseignement suivantes :

- Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse (ENSAT) :
  - **UE Systèmes d'Elevage et Territoires :** tutorat de projet, 22h d'équivalent de travaux dirigés (Niveau Bac +4)
  - **UE Diagnostic d'un Agroécosystème :** 12h d'équivalent de travaux dirigés (Niveau Bac + 2 et Bac + 3)
  - **Le croisement laitier en élevage bovin lait :** 5h de cours magistral (Niveau Bac + 4)
  - **Qualité de la viande de volaille :** 6h de travaux pratiques (Niveau Bac + 4)
- La Prépa des INP :
  - **Organisation cellulaire (bactérie unicellulaire, histologie animale et embryogenèse)** : 28h de travaux pratiques (Niveau Bac +1)

Financements

- Département ACT (Action, Transition et Territoires) de l'INRAE
- Région Occitanie
- Programme PSD4, financé par l'INRAE et la Région Occitanie
- Conseil scientifique de l'ENSFEA (Ecole Nationale Supérieure de Formation de l'Enseignement Agricole)

Productions réalisées durant la thèse

- **Articles dans des revues à facteur d'impact**

Quénon J., Ingrand S., Magne M.-A. 2020. Managing the transition from purebred to rotational-crossbred dairy cattle herds: three technical pathways from a retrospective case-study analysis. Animal, 1-11. doi:10.1017/S1751731119003458

Quénon J., Ingrand S. and Magne M.-A. 2020. *A soumettre*. Effects of three-breed rotational crossbreeding on milk and functional performances in dairy cattle herds: the issue of benefiting from genetic diversity

Magne M.-A. and Quénon J. Dairy crossbreeding on cattle farms challenges the mainstream sociotechnical system locked into pure-breeding and high-specialization paradigms. A case study in France. Agronomy for Sustainable Development (*Minor revision, to resubmit on 26/12/20*)

- **Chapitre d'ouvrage**

Magne M.-A., Quénon J., Doré A. 2020. Analyse socio-technique des changements induits par le développement du croisement laitier dans les pratiques des professionnels de l'élevage bovin lait français. 73-91. *In* Changement et professionnalisation Cépaduès, 2020, 9782364938601. ⟨hal-02947855⟩

- **Communications orales à des congrès internationaux**

Quénon J., Ingrand S. and Magne M.-A. 2020. Combining categories of crossbred females to improve the overall performance of the dairy cattle herd. How to benefit from genetic diversity induced? 71th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science. Online. ***(Résumé en Annexe 1)***

Quénon, J., Ingrand, S., & Magne, M.-A. 2020 (postponed). Managing transition towards diversified livestock systems: lessons from experience of dairy cattle farmers who adopted dairy crossbreeding. 14th European IFSA (International Farming System Association) Symposium, Évora, Portugal ***(Résumé en Annexe 2)***

- **Communications orales à des congrès nationaux**

Quénon, J., Ingrand, S., & Magne, M.-A. 2020. Performances zootechniques du croisement rotatif 3 voies. Une évaluation aux échelles individuelle et troupeau. 25ème Rencontres Recherches Ruminants. En ligne. ***(Actes en Annexe 3*** : Actes de la « présentation flash » acceptée aux 3R 2020***)***

- **Communications par affiche à des congrès nationaux**

Quénon, J., Ollion, E., Basset, M., Magne, M.-A. 2018. Pourquoi et comment les éleveurs bovin lait adoptent-ils le croisement laitier ? 24ème Rencontres Recherches Ruminants, Paris, France **(*Actes en Annexe 4)***

- **Documents à vocation de vulgarisation**

Quénon, J., Ingrand, S., & Magne, M.-A. 2019. Trois trajectoire-types pour passer d'un troupeau bovin lait conduit en race pure vers une conduite en croisement trois voies. Journées ATA-RI 03/10/19. Toulouse, France ***(voir Annexe 5))***

Quénon, J., Magne, M.-A., Ollion, E., Basset, M. 2018. Le croisement entre races laitières : pour quelles raisons et comment ? Avec quels résultats ? 4p. doi:10.13140/RG.2.2.21187.86562

Comment constituer la meilleure équipe de vaches possible ? Finale régionale de « Ma Thèse en 180 secondes » Théâtre Sorano, Toulouse, 25/03/19. https://www.youtube.com/watch?v=aEsLQuBLb58&t=38s

Hétérosis. Jeu vidéo de gestion d'un troupeau bovin laitier et de l'utilisation du croisement laitier, co-créé au cours de la Game Jam Scientifique organisée par le Quai des Savoirs. 1ère édition, Toulouse. 29-31/03/19. https://margauxberard.itch.io/heterosis

- **Cours et documents pédagogiques**

Quénon J. 2020. La gestion de la diversité animale en élevage : le cas du croisement laitier en élevage bovin lait. 53p.

Quénon J. 2020. Quelle place peuvent occuper les labels et les SIQO dans la transition des élevages vers des pratiques plus agroécologiques ? 10p.

Liste des encadrés

Encadré 1 : Définitions de la race animale …… 36

Liste des figures

Figure 1 : Composition de l'objectif de sélection des races bovines Holstein, Montbéliarde et Normande en 2012.....38
Figure 2 : Organisation du dispositif d'amélioration génétique des bovins laitiers en France jusqu'au 1er novembre 2018 38
Figure 3 : Évolution des moyennes d'index de valeur génétique des vaches pour la production laitière (kg par lactation), en écart à la moyenne de 1988.....40
Figure 4 : Évolution de la composition raciale du cheptel bovin laitier en France entre 1962 et 2019. 40
Figure 5 : Évolution des performances moyennes des vaches contrôlées en France 42
Figure 6 : Evolution entre 2003 et 2017 de la composition de l'objectif de sélection pour quatre indices de synthèse en bovins laitiers.....42
Figure 7 : Principaux schémas de croisement utilisés en élevage bovin laitier pour la création et l'amélioration de race et le maintien de génotypes diversifiés.....46
Figure 8 : Programme de croisement rotatif 3 voies (Holstein × Jersiaise) × Brune des Alpes 48
Figure 9 : Comparaison des parts de gènes contribuant respectivement aux génotypes des individus F1, G2 et G3 pour trois programmes de croisement 50
Figure 10 : Composition de l'objectif de sélection des races bovines Holstein, Montbéliarde, et Normande en 2012 et des races Brune et Simmentale en 2013.....52
Figure 11 : Hétérosis pour le lait et l'intervalle vêlage-IA première en première génération de croisement HO × NO et comparaison aux moyennes parentales HO et NO 54
Figure 12 : Schéma explicatif de la théorie de l'expression des effets non-additifs pour deux loci indépendants 56
Figure 13 : Nombre de femelles croisées et volume de lait livré par région de France métropolitaine en 2017.....58
Figure 14 : Analyse de la littérature traitant du croisement laitier selon l'objet d'analyse et le niveau organisationnel à laquelle l'analyse est réalisée. 60
Figure 15 : Ecarts d'intervalle vêlage-insémination fécondante moyen en fonction de l'écart de production laitière moyenne entre vaches F_1 et vaches Holstein obtenus dans plusieurs études.. 70
Figure 16 : Ecarts de taux protéique (TP) moyen en fonction de l'écart de taux butyreux (TB) moyen entre vaches F_1 et vaches Holstein obtenus dans plusieurs études 70
Figure 17 : Ecarts de production de matière protéique moyenne en fonction de l'écart de production de matière grasse moyenne entre vaches F_1 et vaches Holstein obtenus dans plusieurs études 72
Figure 18 : Ecarts de production de SCS moyen en fonction de l'écart de production laitière moyenne entre vaches F_1 et vaches Holstein obtenus dans plusieurs études 72
Figure 19 : Comparaison du produit total, des charges totales et du profit au cours de la carrière de vaches Holstein pures et de croisées F_1 74
Figure 20 : Ecarts d'intervalle vêlage-insémination fécondante moyen en fonction de l'écart de production laitière moyenne entre vaches G_2 et vaches Holstein obtenus dans plusieurs études. 74

Figure 21 : Ecarts de production de matière protéique moyenne en fonction de l'écart de production de matière grasse moyenne entre vaches G_2 et vaches Holstein obtenus dans plusieurs études 76
Figure 22 : Estimation du délai temporel entre l'insémination en croisement d'une vache de race pure du troupeau et l'entrée en lactation d'une femelle croisée F_1, puis l'entrée en lactation d'une femelle croisée G_2.....76
Figure 23 : Comparaison du produit, des charges et de la marge annuelle pour deux types de systèmes et trois troupeaux bovins laitiers 80
Figure 24 : Résultats d'une simulation sur 15 ans montrant l'évolution de la composition en génotypes d'un troupeau suite à l'introduction d'une stratégie de croisement rotatif 3 voies sur 100% des femelles Holstein en année 1.....82
Figure 25 : Écarts de productivité par vache et par an, de taux, de fertilité et de sensibilité aux infections intra-mammaires des trois stratégies de croisement par rapport à la conduite en race pure Prim'Holstein dans différents ateliers laitiers 82
Figure 26 : Écarts de prix du lait, de produit total, de consommation de concentrés par vache et par an et de charges opérationnelles totales des trois stratégies de croisement par rapport à la conduite en race pure Prim'Holstein dans différents ateliers laitiers.....84
Figure 27 : Marge brute par vache laitière actualisée et cumulée sur les 15 années de simulations pour les quatre stratégies d'accouplement dans les trois ateliers laitiers 86
Figure 28 : Effet sur l'évolution de la composition du troupeau de deux modes de gestion du croisement rotatif différents 94
Figure 29 : Formalisation du système d'élevage comme l'articulation d'un sous-système décisionnel et d'un sous-système biotechnique d'élaboration de la production.....100
Figure 30 : Formalisation du système d'élevage selon une perspective dynamique. 102
Figure 31 : Identification des composantes clefs du système d'élevage pour comprendre la mise en œuvre et la gestion du croisement rotatif dans un troupeau bovin laitier 104
Figure 32 : Application du cadre conceptuel du système d'élevage pour analyser l'utilisation du croisement rotatif dans un troupeau bovin lait comme une transition technique.....106
Figure 33 : Cadre conceptuel pour analyser de manière intégrée la gestion de la diversité animale dans les systèmes d'élevage 106
Figure 34 : Les différentes formes de diversité animale, les niveaux d'organisation où elle se construit et s'exprime. La gestion de la diversité animale permet de fournir des bénéfices.108
Figure 35 : Application du cadre d'analyse de la gestion de la diversité animale dans les systèmes d'élevage pour évaluer les effets de l'utilisation du croisement rotatif sur la composition du troupeau bovin laitier et ses performances 110
Figure 36 : Cadre d'analyse construit et utilisé pour analyser l'évolution dans le temps long des pratiques des éleveur·euse·s, de la composition et des performances du troupeau bovin laitier induite par l'utilisation du croisement rotatif.....114
Figure 37 : Effet sur l'évolution de la composition du troupeau de deux modes de gestion du croisement rotatif différents. Résultats d'une simulation d'un troupeau de 100 vaches sur 10 ans 120
Figure 38 : Mise en œuvre de la méthode « boule de neige » pour constituer l'échantillon des 26 fermes 126
Figure 39 : Répartition géographique de la pratique du croisement laitier en France métropolitaine et des 26 fermes échantillonnées 126
Figure 40 : Présentation du dispositif de recherche combinant approches qualitative et quantitative selon une perspective statique et selon une perspective dynamique pour traiter les trois sous-questions de recherche 128
Figure 41 : Classes of the 11 variables selected to characterise changes in crossbreeding and herd-configuration management when transitioning the dairy cattle herd towards rotational crossbreeding.....146

Figure 42 : Three groups of dairy cattle farmers differing in their technical pathways to move towards rotational crossbred herd, according to the scale of change in the farming system (Dim. 1) and to the rate of its introduction within the herd and the consequences on the management of replacement (Dim. 2) 154
Figure 43 : Conceptual model of the three technical pathways from a purebred to a rotational crossbred dairy cattle herd 160
Figure 44 : Modèle conceptuel des trois trajectoires types de transition technique suivies par les éleveur·euse qui mettent en place le croisement rotatif au sein de leur troupeau initialement conduit en race pure.....172
Figure 45 : Diversity of breed combinations for lactations data in dataset 1 among the 14 sampled herds. Breeds' combinations are grouped in bar charts by Holstein (HO) purebred and first- and second-generation crosses (F1 and G2, respectively). 182
Figure 46 : Diversity of breed combinations for lactation data in dataset 1 within two herds of the 14-herd sample. 184
Figure 47 : (A) Holstein (HO), F_1 and G_2 compositions of the 119 herds selected to have a mean calving to conception interval (CCI) shorter than 130 days and maximize trade-offs among milk yield, milk fat and protein contents, CCI and somatic cell score (SCS). Trade-offs of all 119 herd compositions are presented pairwise: (B) milk yield vs. CCI and (C) milk yield vs. SCS 196
Figure 48 : (A) Holstein (HO), F_1 and G_2 compositions of the 119 herds selected to have a mean calving to conception interval (CCI) shorter than 130 days and maximize trade-offs among milk yield, milk fat and protein contents, CCI and somatic cell score (SCS). Trade-offs of all 119 herd compositions are presented pairwise: (B) milk yield vs. fat content and (C) milk yield vs. protein content.....200
Figure 49 : Diversité des combinaisons de races du jeu de données de lactations initial ...224
Figure 50 : Représentation graphique de la matrice de corrélation pour les variables explicatives utilisées pour les régressions PLS n°1 et PLS n°2 : variables de structure et de pratiques (a) et variables de croisement et de diversité du troupeau (b). 232
Figure 51 : Distribution parmi les troupeaux de l'échantillon des valeurs d'intercept pour les performances du troupeau : production laitière totale (a), taux de matière utile (b) part de vaches très fertiles (c), part de vaches avec une lactation saine (d) et et part de vaches en 3ème lactation et plus (e) 236
Figure 52 : Distribution parmi les troupeaux de l'échantillon de l'évolution des performances du troupeau au cours de la période d'étude 2009-2017: production laitière totale (a), taux de matière utile (b) part de vaches très fertiles (c), part de vaches avec une lactation saine (d) et part de vaches en 3ème lactation et plus (e). 236
Figure 53 : Distribution parmi les troupeaux de l'échantillon des valeurs d'intercept et de l'évolution au cours de la période d'étude des variables relatives à la composition du troupeau : part de vaches croisées (a, b), de vaches F_1 parmi les croisées (c, d), de vaches G_2 de croisement rotatif 3 voies parmi les croisées (e, f) et de vaches G_3 de croisement rotatif 3 voies parmi les croisées (g, h). 240
Figure 54 : Distribution parmi les troupeaux de l'échantillon des valeurs d'intercept (b, d, et f) et de l'évolution au cours de la période d'étude (a, c, e et g) des variables de structure et de pratiques parmi l'échantillon des 13 troupeaux. 242
Figure 55 : Résultats de la PLS n°2 : (a) projection des variables de réponse (en orange) et des variables explicatives (en gris) sur les 2 composantes retenue ; (b) projection des individus (n = 13) sur les 2 composantes retenues selon les variables explicatives (à gauche) ou de réponse (à droite).....244
Figure 56 : Résultats de la PLS n°2 : représentations en réseau des coefficients d'association entre les variables de réponse (cercles oranges) et les variables explicatives (rectangles gris) de la composante 1 (a) et de la composante 2 (b).. 246

Figure 57 : Résultats de la PLS n°2 et projection projection de trois indvidus sur les 2 composantes retenues selon les variables explicatives (à gauche) ou de réponse (à droite) : F03, F07 et F12.....256
Figure 58 : Représentation de la situation initiale (a) et de l'évolution au cours de la période d'étude (b) de la multi-performance de trois troupeaux de l'échantillon 272
Figure 59 : Représentation de la situation initiale (a) et de l'évolution au cours de la période d'étude (b) de trois variables rendant compte du niveau d'intensification du système d'élevage des trois troupeaux de l'échantillon.....272
Figure 60 : Application du modèle du cycle de déclenchement du changement (*triggering change cycle*) des systèmes agricoles proposé par Sutherland et al. (2012) au cas de la transition d'une conduite du troupeau en race pure vers une conduite en croisement rotatif 290
Figure 61 : Propositions d'enrichissement du modèle de simulation ECOMAST et de son application au cas de l'introduction et de la gestion du croisement rotatif dans le troupeau bovin laitier.....294

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeur du coefficient d'expression d'hétérosis des sept premières générations de schémas de croisement alternatif, rotatif 3 voies et rotatif 4 voies 54
Tableau 2 : Hétérosis (pourcentage d'écart à la moyenne parentale) pour les traits de production : lait, matières grasse et protéique, taux butyreux et protéique.....64
Tableau 3 : Hétérosis (pourcentage d'écart à la moyenne parentale) pour les traits de reproduction : intervalle vêlage-vêlage, intervalle vêlage-IA première, intervalle vêlage-IA fécondante, taux de gestation des filles, nombre d'IA pour fécondation.....66
Tableau 4 : Hétérosis (pourcentage d'écart à la moyenne parentale) pour les traits de santé de la mamelle et de longévité 68
Tableau 5 : Structure and content of the interview guide on crossbreeding management in the dairy cattle farms sampled.....148
Tableau 6 : Classes of the 10 supplementary variables to describe the changes in general characteristics or practices of the dairy cattle farms sampled 150
Tableau 7 : Main characteristics of sampled dairy cattle farms when crossbreeding began (t_0: 1991 to 2012) and in 2018.....152
Tableau 8 : Classes of the active and supplementary variables that are significantly represented on the first two axes retained from the multiple correspondence analysis performed to describe changes in management of the dairy cattle herds sampled 156
Tableau 9 : Characteristics of dairy cattle farms in three technical pathways towards rotational crossbred herds.....158
Tableau 10 : Main characteristics (median, minimum and maximum values) of the 14 sampled dairy cattle farms in 2009 and 2018.....182
Tableau 11 : Characteristics of genetic classes as a function of the combination of the percentage of Holstein genes and coefficient of heterosis, corresponding to first- to fifth-generations of three-breed rotational crossbreeding.....184
Tableau 12 : Description of the two datasets used for the statistical analyses of milk production and udder health performances (dataset 1) and reproduction performances (dataset 2) 186
Tableau 13 : Description of the two datasets used for the statistical analyses of milk production and udder health performances (dataset 1) and reproduction performances (dataset 2) 188
Tableau 14 : Least square means estimates (standard error in parentheses) of 305-d milk yield, fat and protein contents, milk solids, somatic cell score, calving to first service interval and calving to conception interval for the three genetic classes.....192
Tableau 15 : Variables utilisées pour décrire pour chaque campagne d'étude la composition démographique et génétique des troupeaux échantillonnés, les modes de gestion technique de ces troupeaux et pour évaluer leurs performances zootechniques. 220
Tableau 16 : Caractérisation des classes génétiques en fonction de la combinaison de races et de la valeur théorique d'hétérosis 226
Tableau 17 : Composition de la matrice de variables de réponses Y 234
Tableau 18 : Composition des matrices de variables explicatives X1 et X2 234
Tableau 19 : Comparaison des troupeaux selon l'évolution de leurs performances zootechniques en comparaison de la moyenne de l'échantillon.....256
Tableau 20 : Description des stratégies de gestion de l'incertitude et de sécurisation du système mises en œuvre par les éleveur·euse·s des groupes 2 et 3 lors de la transition vers la gestion de troupeau en croisement et des degrés et preuves d'émancipation de ces éleveurs vis-à-vis du régime sociotechnique dominant en élevage bovin lait 304
Tableau 21 : Types d'approche scientifique adoptée dans la thèse selon le cadre et la contribution de chacune d'eux à trois fronts de recherche identifiés par Magne et al. (2019) pour analyser de manière intégrée la diversité animale en élevage.....308

Introduction générale

Au cours de la seconde moitié du vingtième siècle, le développement de l'élevage bovin dans les pays à économie de marché a largement été basé sur un modèle productiviste. Celui-ci a conduit à une standardisation des modes de production des exploitations (Pflimlin et al., 2009), dont l'une des illustrations est une forte segmentation des populations bovines en races spécialisées selon le type de production i.e. lait et/ou viande, opérée par sélection génétique. La filière bovine a été organisée autour de la notion de race animale, avec un large dispositif d'amélioration génétique en amont des exploitations, et des dispositifs de contrôles des performances et de conseil en aval (Vissac, 2002). Le travail de sélection génétique opéré sur les races bovines laitières – en particulier sur la race Holstein – s'est attaché à augmenter les quantités de lait produites par animal et par année, ce à quoi il est parvenu, mais au détriment de performances relatives aux traits dits fonctionnels *i.e.* fertilité, santé et longévité (Lucy, 2001; Knaus, 2009; Gauly et al., 2013). La forte dégradation de ces derniers a conduit la filière à intégrer davantage ces traits dans l'indexation à la fin des années 2000 (Phocas et al., 2016). En parallèle, la pratique du croisement entre différentes races laitières (croisement laitier) s'est développé chez les éleveur·euse·s comme une voie plus efficace que la sélection en race pure pour améliorer les traits fonctionnels des animaux (Ferris et al., 2018).

Le croisement laitier est une pratique marginale mais croissante en France (Le Mézec, 2018). Elle présente des bénéfices théoriques portant sur l'amélioration des traits fonctionnels, en tirant partie de l'effet d'hétérosis et de la complémentarité des races impliquées dans le croisement, ceci d'autant plus qu'elles sont éloignées génétiquement (Bidanel, 2020). Si de nombreux travaux ont confirmé que les performances – phénotypiques – relatives aux traits fonctionnels des vaches croisées de première génération (F_1) étaient effectivement supérieures à celles de vaches de race pure (Dezetter et al., 2019), les performances à long terme du croisement, c'est-à-dire au-delà de la première génération, sont encore peu étudiées (Shonka-Martin et al., 2018; McClearn et al., 2020a). La question qui se pose alors pour les éleveur·euse·s ayant mis en place le croisement laitier dans leur troupeau est celle de la conduite des accouplements à adopter pour les génisses F_1. Si un retour à une race pure est toujours possible par absorption, il annule en revanche les bénéfices de

l'hétérosis. En comparaison, réaliser un accouplement des génisses F_1 avec des taureaux d'une troisième race (croisement rotatif trois voies) pour obtenir des individus croisés de deuxième génération (G_2) permet en théorie de stabiliser l'hétérosis et de bénéficier des effets additifs de la race choisie, avec des conséquences sur les performances phénotypiques des femelles G_2 qui peuvent toutefois rester incertaines, en l'absence d'un nombre suffisant de références. Cette question est amenée à se reposer à chaque génération de croisement et les choix successifs d'accouplements des animaux croisés conduisent ainsi à faire cohabiter au sein du troupeau plusieurs cohortes de femelles génétiquement diversifiées : race pure, F_1, G_2, *etc*. En d'autres termes, la mise en place et la gestion du croisement laitier au sein d'un troupeau initialement conduit en race pure induit progressivement sa diversification génétique, laquelle peut générer une hétérogénéisation des profils de performances des animaux. Ce processus crée donc de l'incertitude pour les éleveur·euse·s. Comment les éleveur·euse·s gèrent-ils leur troupeau durant cette période de transition vers un troupeau croisé, c'est-à-dire comment font-ils/elles évoluer leurs pratiques de configuration du troupeau – accouplement, renouvellement, réforme – pour tirer parti du croisement sur le long terme? Comment les performances zootechniques du troupeau – quantité de lait, taux de matières grasse et protéique du lait, fertilité, santé de la mamelle – évoluent-elles au cours du temps une fois le croisement introduit dans le troupeau en race pure ?

Cette thèse définit donc comme objet de recherche la période de transition entre la conduite initiale d'un troupeau bovin laitier en race pure, et la conduite en croisement rotatif, selon les modalités de sa mise en place et de sa gestion ultérieure. Elle vise à analyser cette transition selon deux angles : l'évolution de la conduite technique du troupeau et l'évolution des performances zootechniques qui en découlent, avec une attention portée au processus de diversification génétique du troupeau sous-tendu par l'utilisation du croisement rotatif et ses conséquences Elle s'inscrit donc pleinement dans le champ de la zootechnie système, en analysant les interactions statiques et dynamiques entre les deux composantes – *i.e. sous-systèmes décisionnel* et *d'élaboration de la production* – des *systèmes d'élevage* en transformation (Landais, 1994; Dedieu et al., 2008). En mobilisant ce cadre conceptuel et en l'adaptant au cas de la transition vers le croisement laitier du troupeau bovin lait, elle vise tout d'abord à compléter les connaissances sur le croisement laitier par une analyse des modalités

opérationnelles de son introduction et de sa conduite. De plus, en interrogeant le lien entre la diversification génétique du troupeau et l'évolution de ses performances zootechniques, cette thèse traite de l'articulation entre les dimensions biologiques et décisionnelles qui construisent sur le long terme la multiperformance des troupeaux et contribue ce faisant à approfondir les connaissances sur la transition vers des systèmes d'élevage valorisant la diversité animale. En termes opérationnels, cette thèse a comme objectif de produire des références sur différentes trajectoires de mise en place et de gestion du croisement rotationnel dans les troupeaux bovin laitier et sur l'évolution des performances des troupeaux durant la période de transition vers un troupeau croisé pour aider des éleveur·euse·s et leurs conseiller·ère·s à identifier si et dans quelles conditions le croisement rotatif est une option cohérente à leur projet et leur situation d'élevage.

Chapitre 1 – Contexte, problématique et questions de recherche

Dans ce premier chapitre, je développe dans un premier temps la problématique de la thèse (section 1.1). J'exposerai dans un premier temps l'évolution du contexte socioéconomique de l'élevage bovin lait (section 1.1.1), au carrefour entre l'essoufflement du modèle productiviste et le développement du modèle agroécologique. Je présenterai ensuite comment l'évolution de ce contexte s'est traduite dans l'évolution de la sélection génétique des bovins laitiers (section 1.1.2) : d'une sélection priorisant la productivité laitière à une sélection multi-traits visant un compromis entre production laitière et caractéristiques fonctionnelles et cherchant à sélectionner sur des traits de robustesse ; d'une sélection à l'origine du développement d'un nombre restreint de races largement diffusées à l'échelle internationale et d'une érosion de l'agrobiodiversité à une recrudescence de l'intérêt pour la diversité animale au sein des troupeaux. Je montrerai comment ces évolutions du contexte de l'élevage et de la sélection génétique des bovins laitiers conduisent à l'émergence et la coexistence de plusieurs alternatives au système d'élevage bovin lait dominant en France et comment ces alternatives réinterrogent le type d'animaux élevés, voire la combinaison de types d'animaux aux aptitudes individuelles diversifiées au sein du troupeau. Après avoir mis en évidence que le croisement laitier intègre ces deux aspects, je rendrai compte qu'il constitue une pratique émergente et en développement, bien que marginale (section 1.1.3) : cela m'amènera à m'intéresser à la manière dont les éleveur·euse·s mettent en œuvre le croisement laitier et les questions que cela soulève.

Dans un deuxième temps (section 1.2), je dresserai un état des recherches menées sur le croisement rotatif. Je mettrai en évidence que la majorité de ces travaux adoptent une approche centrée à l'échelle de l'animal et qu'à l'inverse, peu d'entre eux considèrent l'échelle du troupeau et de sa dynamique. J'exposerai sur cette base les éléments de connaissance manquants que ce travail de thèse contribue à combler : (i) l'étude des modalités de gestion technique mises en place par les éleveur·euse·s dans l'introduction et la gestion dans le temps long du croisement laitier, (ii) l'impact de la diversification du troupeau causée par la pratique du croisement laitier sur ses performances et (iii) les modalités de gestion selon lesquelles cette diversification peut

constituer un bénéfice pour l'éleveur·euse et non un « dommage collatéral » inhérent à la pratique du croisement. Enfin, pour conclure ce premier chapitre (section 1.3), je m'appuierai sur les questions que l'état de l'art laisse en suspens pour formuler la problématique de recherche : j'expliciterai la question de recherche à traiter, les éléments de cadrage conceptuel que je mobilise pour ce faire.

1.1. Pour quelles raisons le croisement laitier émerge-t-il ? Des enjeux contemporains de l'élevage bovin lait et des limites d'un modèle basé sur la race pure et l'hyperspécialisation pour y répondre

1.1.1. Contexte et enjeux socio-économiques de l'élevage bovin laitier

Au cours de la seconde moitié du XXème siècle, le développement de l'élevage dans les pays à économie de marché s'est basé sur un modèle productiviste (Prével, 2008; Pflimlin et al., 2009), dont la logique repose sur la recherche de gains de productivité en « *décomposant la production en processus productifs élémentaires séparés et optimisés et en séparant la conception de la production* » (Bonneuil et Thomas, 2006, cités par Labatut, 2009). Un tel développement visait notamment, dans le cas de la France, à assurer son autosuffisance alimentaire afin de s'extraire de la dépendance aux aides américaines : c'est donc d'abord à une demande quantitative que l'agriculture française a été sommée de répondre (Bourgeois et Demotes-Mainard, 2000). Les systèmes d'élevage ont été conçus et gérés en fixant *a priori* des objectifs de production à atteindre et en considérant la variabilité de leur environnement et de ses composantes biologiques internes (animaux et cultures) comme des facteurs limitant ou altérant la réalisation de ces objectifs (Caron et al., 2014). Afin d'atténuer les effets de cette variabilité externe et interne, ce modèle productiviste s'est appuyé sur :

- la sélection génétique des populations végétales et animales sur des caractères/traits de production – sur laquelle je reviendrai plus en détail (voir section 1.1.2).
- l'utilisation systématisée d'intrants (aliments concentrés, engrais de synthèse, produits phytosanitaires et vétérinaires)

- la diffusion d'innovations techniques et technologiques – mécanisation, robotisation, *etc.* – appuyée par les pouvoirs publics au moyen de nouvelles normes associées (Vissac, 2002; Pluvinage, 2015) qui ont consolidé l'adoption et l'usage de ces innovations.

Ce modèle a de ce fait conduit à une standardisation et rationalisation des modes de production, à une spécialisation des exploitations – *i.e.* des orientations de leurs productions, des types de cultures cultivées et d'animaux élevés – et des territoires (Foley et al., 2005) et à leur intégration plus ou moins prononcée dans des filières structurées en amont et en aval (Mazoyer, 1982), avec comme conséquence la distanciation entre les personnes produisant les produits alimentaires et celles les consommant (Lokie, 2002; Buttel, 2006). Il a ainsi permis d'accroître les rendements et les niveaux de production agricoles et d'homogénéiser les qualités sanitaire et nutritionnelle des produits agricoles (Pflimlin et al., 2009). Certaines conséquences néfastes du modèle productiviste ont été initialement considérées comme de simples « contreparties » ou « effets secondaires », négligeables au regard de ses bénéfices (Vissac, 2002). À mesure que le contexte de production agricole a évolué et, avec lui, la compréhension accrue de ses composantes et de leurs interactions, ces contreparties – environnementales, sociales, économiques, sanitaires, éthiques – se sont révélées constituer, de par leur nombre et leur poids, de véritables écueils du modèle productiviste, mettant en péril à la fois les exploitations et leur environnement : dégradation des écosystèmes et de leur fonctionnement – *e.g.*, déforestation (FAO, 2006), pollution des eaux (Commission Européenne, 2018) –, impact sur le changement climatique – *e.g.*, cycles biochimiques du carbone et de l'azote (FAO, 2006) –, érosion de la biodiversité « sauvage » (FAO, 2006) et de la biodiversité domestique (Tisdell, 2003; Hoffmann, 2010; FAO, 2015), raréfaction des ressources – eau, minéraux, énergies fossiles (FAO, 2006) –, impact néfastes sur la santé animale et humaine – *e.g.* crise sanitaire de l'ESB (Peretti-Watel, 2001; Seguin, 2002). L'organisation des filières (choix des marchés, répartition de la valeur, financiarisation) et la logique de fonctionnement des exploitations (investissement, endettement, dépendance (Cordellier, 2013)) sont remises en question, tandis qu'émergent des problématiques sociales comme le temps de travail (Dedieu et al., 2006) et le bien-être au travail (Droz et al., 2014), et des problématiques éthiques – *e.g.*, souffrance animale (Clark et al., 2016) – liées aux activités d'élevage.

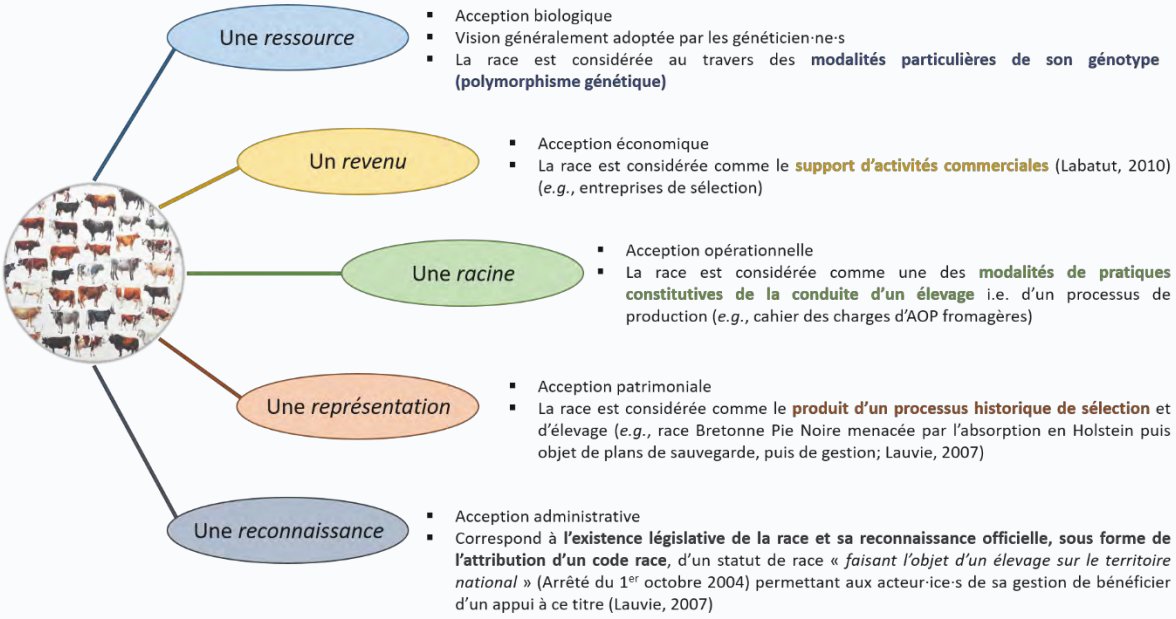
Pointées depuis les années quatre-vingt (Tirel, 1983), ces écueils sont de plus en plus prégnants aujourd'hui (Brussaard et al., 2010; Duru et al., 2015), tant et si bien que les objectifs de ce modèle productiviste sont questionnés au sein du monde agricole et de la recherche, mais également par la population extra-agricole (Delanoue et al., 2015). L'enjeu qui émerge est celui de la durabilité des exploitations d'élevage, c'est à dire de leur capacité à « [être] *viable, vivable, transmissible et reproductible inscrivant son développement dans une démarche sociétalement responsable* » (Zahm et al., 2015). Cet enjeu de durabilité des systèmes d'élevage – relativement récent dans sa formulation en tant que tel – s'ajoute celui plus classique de l'adaptation à un environnement complexe et changeant à long terme (FAO, 2006) en matière de climat (GIEC, 2013), de contexte économique et politique (Souchère et al., 2003; Barnes et al., 2016) et socio-culturel culturels (de Bakker and Dagevos, 2012; Willett et al., 2019). A cela s'ajoute l'adaptation aux changements à plus court terme de cet environnement – *e.g.*, épisodes climatiques extrêmes (Itier and Seguin, 2007), volatilité des prix des intrants (Garrido et al., 2016) – qui affecte encore davantage les fermes que ces changements tendanciels (Katz et Brown, 1992; Ray et al., 2015). Dans ce contexte, l'enjeu de durabilité consiste en la capacité des systèmes d'élevage à fonctionner dans un environnement non optimal et variable, ce qui redéfinit leurs objectifs en invitant à infléchir l'objectif cardinal de production issu du modèle productiviste et à l'arbitrer au regard d'autres objectifs : économie et/ou autonomie de la production en intrants et capitaux extérieurs, revalorisation économique de la production, réduction du temps de travail et de sa pénibilité, atténuation des disservices écosystémiques de l'activité d'élevage. Les arbitrages entre ces objectifs – parfois contradictoires – varient selon les acteur·rice·s, de même que les moyens opérationnels qu'ils/elles envisagent et mettent en œuvre. Certaines approches s'appuient sur des apports technologiques innovants *i.e.* élevage de précision (Allain et al., 2014; Halachmi and Guarino, 2016), d'autres sur la gestion d'activités généralement externalisées en amont – *e.g.*, insémination par l'éleveur·euse (Idele, 2017) – ou en aval des exploitations d'élevage – *e.g.*, vente directe ou semi-directe (Aubry et Chiffoleau, 2009) –, d'autres encore sur une valorisation accrue des produits d'élevage par économie de gamme – *e.g.*, labels (Magrini et Duru, 2015), signes d'identification (Dervillé et Allaire, 2014) –, d'autres enfin reposent davantage sur la gestion de processus biologiques et écologiques – *e.g.* vêlages groupés de printemps (Olori et al., 2002), monotraite (Pomiès et al., 2008). Ces approches ne sont évidemment pas incompatibles entre elles et peuvent être

combinées. Cet arbitrage d'objectifs divers et parfois contradictoires repose également sur le type d'animaux élevés.

Le double enjeu d'adaptation à un environnement changeant et de durabilité a conduit à faire émerger des modèles agricoles alternatifs au modèle agricole productiviste, dont les degrés d'institutionnalisation diffèrent : l'agriculture biologique (Niggli et al., 2015), l'agroécologie (Altieri, 2002; Duru et al., 2015), l'agriculture éco-efficiente (Keating et al., 2010). L'agroécologie peut désigner un mouvement social, une science ou un ensemble de pratiques (Wezel et al., 2009). Vue comme une science, l'agroécologie constitue un socle de connaissances et de méthodes en proposant « *d'appliquer les principes et concepts de l'écologie à la conception et à la gestion des agroécosystèmes* » (Gliessman et al., 1998), initialement mobilisé pour des agroécosystèmes de cultures végétales. Elle repose sur une vision foncièrement holistique, qui s'attache à identifier l'ensemble des composantes des systèmes et à expliciter leurs interactions internes et avec leur environnement (Thompson et Scoones, 2009). Il existe plusieurs acceptions de l'agroécologie, dont Horlings et Marsden (2011), cité·e·s par Duru et Therond (2015), rendent compte en distinguant les paradigmes de *modernisation écologique forte* (ou *profonde*) et *faible* (*strong* and *weak ecological modernization)*, selon la façon dont est considérée l'écologisation de l'agriculture. La modernisation écologique *faible* de l'agriculture vise à accroître l'efficience accrue de l'utilisation des intrants de synthèse afin de réduire les coûts de production et les impacts environnementaux. Elle repose sur la mise en place de pratiques de gestion normées (Ingram, 2008) et l'utilisation de technologies de l'agriculture de précision (Halachmi and Guarino, 2016) ou de l'ingénierie génétique (Phocas et al., 2014a, 2016). Elle peut également s'appuyer sur la substitution d'intrants de synthèse par d'autres intrants moins nocifs pour l'environnement (Singh et al., 2011). A l'opposé, la modélisation écologique *profonde* de l'agriculture vise à reconcevoir les systèmes agricoles et le système agri-alimentaire. Elle repose sur une forte diversification des composantes biologiques végétales et animales des systèmes agricoles (Kremen et al., 2012; Dumont et al., 2014) et l'intensification des interactions entre les composantes du système biophysique, afin de substituer les intrants de synthèse par des services écosystémiques (Duru et Therond, 2015). Elle nécessite des pratiques agricoles et des systèmes de culture ou d'élevage localement adaptés (Duru and Therond, 2015). L'application des principes de l'agroécologie à l'élevage

Encadré 1 : définitions de la race animale

L'espèce est le rang taxinomique de base en systématique et est définie comme « *une population ou un ensemble de populations dont les individus peuvent effectivement ou potentiellement se reproduire entre eux et engendrer une descendance viable et féconde, dans des conditions naturelles* » (Meyer, 2020). Une première définition de race pourrait donc être : une « *[sub]division d'une espèce, représentée par une population, à caractères constants, spécifiques, originaux et héréditaires* » (CNRTL). Cependant, cette définition omet un élément crucial qui est que cette subdivision est le résultat d'un processus anthropique lié à l'activité d'élevage, c'est-à-dire le processus de sélection des individus qui pourront effectivement se reproduire et transmettre leur génotype (section 1.1.2). Ainsi, une race peut être considérée comme une entité *a minima* composite, aussi bien constituée par « le contenu d'information génétique qu'elle recèle » (Lauvie, 2007) – i.e. la réponse adaptative biologique d'une population animale à un processus de sélection – que par le fait d'être l'« objet de pratiques collectives de sélection et d'élevage qui modifient, volontairement ou non son contenu biologique » (Lauvie, 2007), c'est-à-dire un processus culturel. Afin de rappeler qu'une race est une entité qui n'a de sens qu'en contexte d'élevage et de sélection, Vissac (1993) propose de relier ces définitions biologique et culturelle ainsi : « *la première traduit un effet et la deuxième en constitue la cause* ». Ce faisant, la race peut être considérée comme le produit d'un système social, résultant d'interactions entre acteur·rice·s aux acceptions différentes de la race (Audiot, 1995, citée par Lauvie, 2007) :



Cette acception de la race comme produit d'un système social se retrouve également dans la législation française qui définit la race comme « un ensemble d'animaux qui a suffisamment de points en commun pour pouvoir être considéré comme homogène par un ou plusieurs groupes d'éleveurs qui sont d'accord sur l'organisation du renouvellement des reproducteurs et des échanges induits, y compris au niveau international » (décret n° 2006-1662 du 21 décembre 2006 relatif à l'identification et à l'amélioration génétique des animaux). Pellegrini et Ribereau-Gayon (2020) insistent quant à eux encore davantage sur son rôle prépondérant : « *loin d'être la résultante de l'adaptation « naturelle » de l'espèce aux contraintes locales du milieu et aux pratiques d'élevage, une race animale et même une race dite pure est d'abord le produit de négociations où se mêlent rapports de classes, contexte social, économique et politique, considérations esthétiques et techniques de sélection* ».

conduit à un changement de paradigme : le système n'est plus construit *ex situ* mais au contraire en faisant dépendre l'objectif de production des caractéristiques internes et externes du système. Il ne s'agît plus de recourir à des intrants comme tampon aux effets des perturbations environnementales mais d'exploiter les capacités d'adaptation des animaux, des végétaux et du sol pour arbitrer sur le long terme l'objectif de production en fonction des ressources disponibles, des conditions climatiques, *etc.* (Dumont et al., 2013, 2014). Les systèmes agroécologiques sont donc des systèmes « contextualisés » à bas niveaux d'intrants, dont la structure et le fonctionnement sont arbitrés au regard de leur environnement. L'agroécologie propose donc de répondre aux enjeux d'adaptation et de durabilité des systèmes d'élevage en mobilisant les capacités d'adaptation de ses composantes, à la fois agrobiologique – i.e. animal et végétale – et décisionnelle – i.e. gestion et pratiques par l'éleveur·euse. Dans le cas de la composante animale qui est celle qui nous intéresse ici, l'application des principes généraux de l'agroécologie a conduit à postuler que l'*agrobiodiversité animale* (appelée *diversité animale* ci-après) constitue un levier majeur pour accroître les capacités d'adaptation des systèmes d'élevage et leur durabilité au sein d'environnements non-optimaux et variables (Darnhofer et al., 2010; Dumont et al., 2013, 2020; Magne et al., 2019).

1.1.2. Evolution de la sélection génétique des bovins laitiers du milieu du XXème siècle à aujourd'hui : apports, limites et alternatives à l'hyperspécialisation des races

Le développement de l'élevage bovin selon un modèle productiviste s'est fait en segmentant les filières de production – lait et viande – et en leur définissant des objectifs de production nécessitant entre autres l'amélioration génétique des animaux élevés au sein des exploitations. Chez les ruminants, l'amélioration génétique a été mise en œuvre par *race.* Une race est une entité composite : elle est à la fois constituée d'un contenu biologique et d'un contenu anthropique, car elle est résulte d'un processus social organisé qui décide des orientations de son contenu biologique (Encadré 1). L'amélioration génétique des races repose sur le principe de *sélection animale* : le choix humain des animaux qui s'accouplent sur la base de critères – ou *traits* – transmissibles à leur descendance et qui présente un intérêt pour l'élevage.

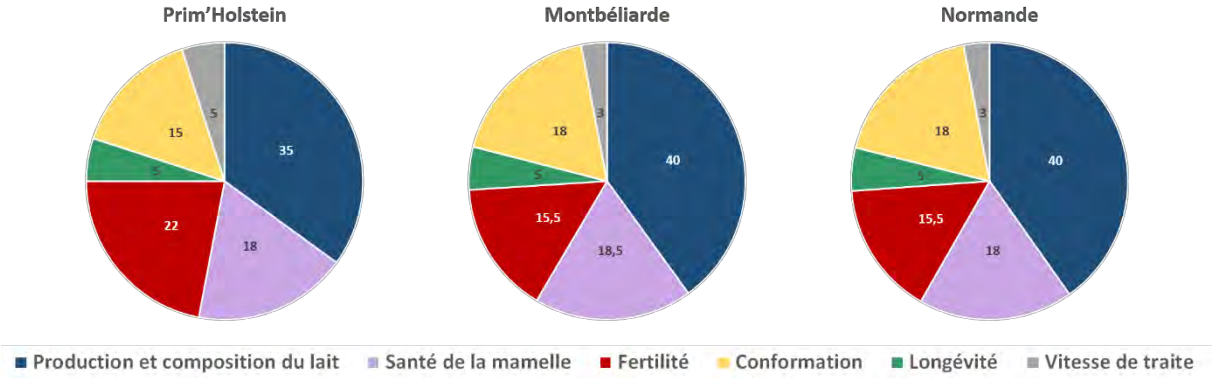


Figure 1 : Composition de l'objectif de sélection des races bovines Holstein, Montbéliarde et Normande en 2012 (Données Idele)

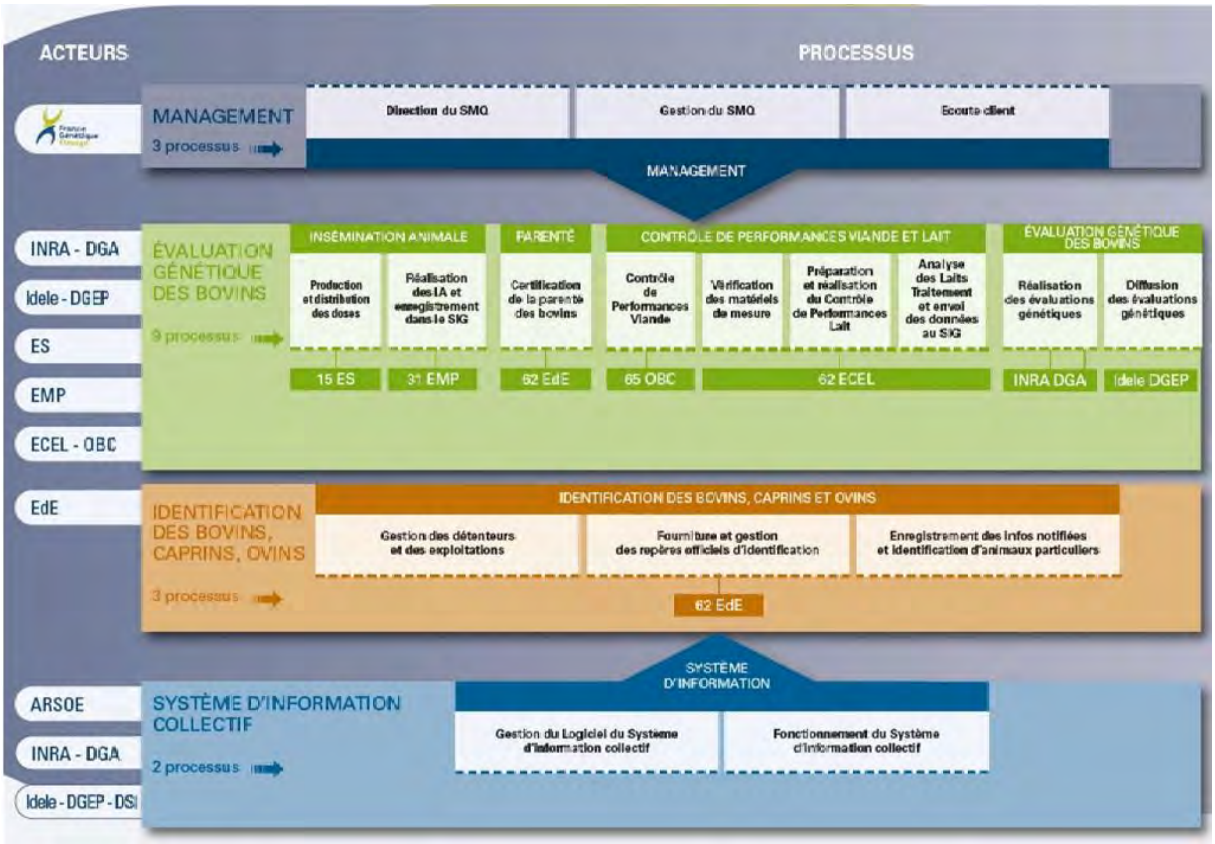


Figure 2 : Organisation du dispositif d'amélioration génétique des bovins laitiers en France jusqu'au 1er novembre 2018 et l'entrée en vigueur du Nouveau Règlement Zootechnique Européen (Source : France Génétique Elevage, 2017)

Ces traits peuvent être de nature morphologique (*e.g.*, couleur de la robe, hauteur au garrot), physiologique (*e.g.*, volume de lait produit, vitesse de croissance), *etc.* Ce choix peut être réalisé sur la base du phénotype, c'est-à-dire en évaluant l'expression du trait considéré chez l'individu parent (*i.e.* en évaluant une performance observée), ou sur la base du génotype, c'est-à-dire sur la base d'une valeur estimée statistiquement de la valeur génétique de l'individu parent pour le trait considéré : c'est l'indexation. L'indexation est faite en considérant les effets des gènes gouvernant le trait considéré, les effets d'environnement et l'interaction des effets génétiques et environnementaux (Le Roy et al., 2019). Cette valeur permettant de hiérarchiser les individus selon leur valeur génétique relative à un trait est appelée *index de sélection*. Il en existe ainsi pour de nombreux traits : quantité de lait produite, teneur en matière grasse et en matière protéique du lait, résistance aux maladies, mesures morphologiques, vitesse de croissance *etc.* Afin de pouvoir sélectionner les individus sur plusieurs traits et donc plusieurs objectifs à la fois, ont été développé des *index de synthèse*, c'est-à-dire des index qui combinent plusieurs index mono-traits. Le poids relatif affecté à chaque trait au sein de l'index de synthèse définit l'orientation de la sélection et donc du progrès génétique escompté (Figure 1). C'est ainsi qu'ont été segmentées les populations bovines en races spécialisées selon le type de production : races *laitières* et races *à viande,* au détriment des races dites *mixtes* (Pflimlin et al., 2009). En France, l'évaluation génétique des bovins se fait avec des index calculés sur une base de référence propre à chaque race : autrement dit, il n'est aujourd'hui pas possible d'évaluer deux bovins de races différentes en comparant leur valeur d'*ISU* (*Index de Synthèse Unique*, l'index de synthèse français pour les bovins lait), contrairement à d'autres pays où le modèle d'évaluation génétique est multiracial, comme les Etats-Unis (Olson et al., 2012, cité·e·s par Dezetter et al., 2019) ou la nouvelle Zélande (Harris et Johnson, 2010, cité·e·s par Dezetter et al., 2019).

En France, la sélection génétique des bovins laitier et ses marchés (Labatut, 2010) ainsi que les activités de conseil aux éleveur·euse·s ont ainsi été organisées intra-race (Figure 2) par des systèmes de collecte, de gestion et de traitement des informations phénotypiques et généalogiques, mis en place par les entreprises et organismes de sélection animale et fortement appuyés par les pouvoirs publics (Vissac, 2002; Le Roy et al., 2019). Les objectifs de sélection des races bovines laitières ont été alignés sur les objectifs de production de la filière, considérant les animaux élevés en conditions

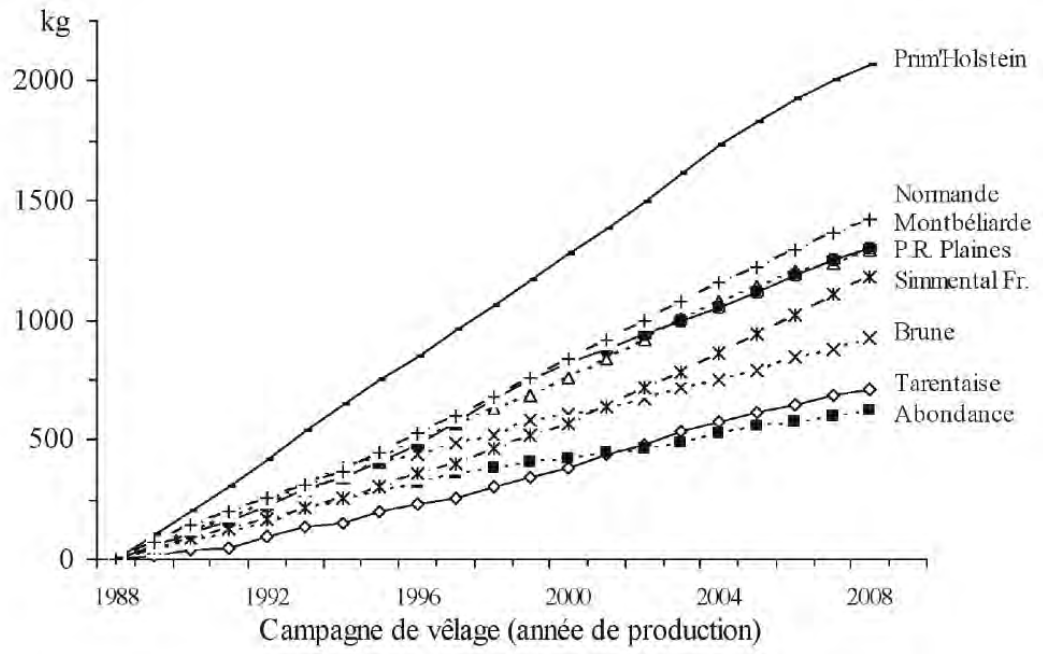


Figure 3 : Évolution des moyennes d'index de valeur génétique des vaches pour la production laitière (kg par lactation), en écart à la moyenne de 1988 (Source : Verrier et al., 2010 ; données INRA/Institut de l'Élevage)

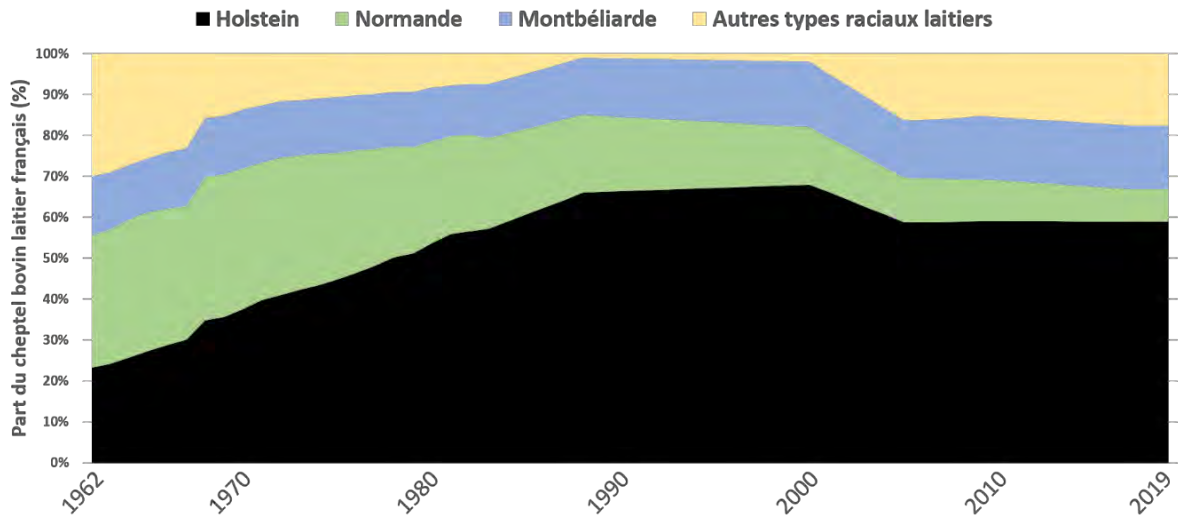


Figure 4 : Évolution de la composition raciale du cheptel bovin laitier en France entre 1962 et 2019. Données SCEES et Ministère de l'Agriculture, Raboisson (2004) et Idele

optimales et non variables. Les index ont donc été initialement définis en privilégiant l'amélioration des traits relatifs à la quantité de lait produite par lactation par rapport aux traits de qualité du lait et surtout aux traits dits *fonctionnels* : fertilité, santé et longévité. Le cas de la race Prim'Holstein (*Holstein* ci-après) est à ce titre représentatif de cette orientation des index des races bovines laitières (Figure 3), d'autant plus qu'elle a progressivement supplantée toutes les autres races laitières en France (Figure 4) et qu'elle est aujourd'hui encore ultra-majoritaire en France – en système conventionnel comme en système conduit en agriculture biologique (Roinsard et Le Mézec, 2017) – et dans les pays à économie de marché (WHFF, 2016). Le progrès génétique a effectivement contribué à améliorer les performances moyennes des vaches laitières en France (Figure 5) : entre 1970 et 2010, la production standardisée à 305 jours a augmenté de plus de 100 kg par vache laitière et par an ; entre 2005 et 2015, l'augmentation a été de 50 kg par vache laitière et par an environ (Verrier et al., 2010; Idele et FCEL, 2015). Ce progrès génétique a été permis par une diminution drastique des effectifs de pères à taureaux, qui a eu pour effet concomitant l'augmentation de la consanguinité intra-race (Mattalia et al., 2006), inhérent au principe de sélection mais cependant poussé à son paroxysme dans ce qui a parfois été désigné sous l'appellation de *star system i.e*. une offre restreinte de taureaux dits « stars » (Leroy et Danchin-Burge, 2020). De plus, en raison des corrélations génétiques négatives entre fonctions biologiques, ce choix d'orienter la sélection vers certains traits de production a conduit à dégrader les traits fonctionnels : dégradation de la fertilité (Lucy, 2001; Pryce et al., 2004; Oltenacu et Algers, 2005; Mackey et al., 2007; Le Mézec et Barbat-Leterrier, 2008), de la santé de la mamelle et de la résistance aux maladies en général (Ingvartsen et al., 2003; Sørensen et al., 2006; Knaus, 2009), sensibilité accrue aux aléas climatiques (Gauly et al., 2013) et aux variations de l'apport alimentaire (Delaby et al., 2009). Cela a eu pour conséquence une diminution de la longévité des animaux au sein des troupeaux laitiers majoritairement de race Holstein, les problèmes de fertilité ou de santé de la mamelle étant les premières causes de réforme, bien plus qu'un niveau de production laitière jugé insuffisant (Weigel et al., 2003; Sewalem et al., 2008; Pinedo et al., 2010; Ahlman et al., 2011). Ce taux de réforme élevé d'individus potentiellement productifs pèse économiquement sur les exploitations (Allaire et Gibson, 1992; De Vries, 2014) : pour des taux de réforme de 27 % *vs.* 37 %, le coût du renouvellement est de 13 €/1000 litres *vs.* 38 €/1000 litres (Le Lan et al., 2007). Devant la nécessité d'endiguer la dégra-

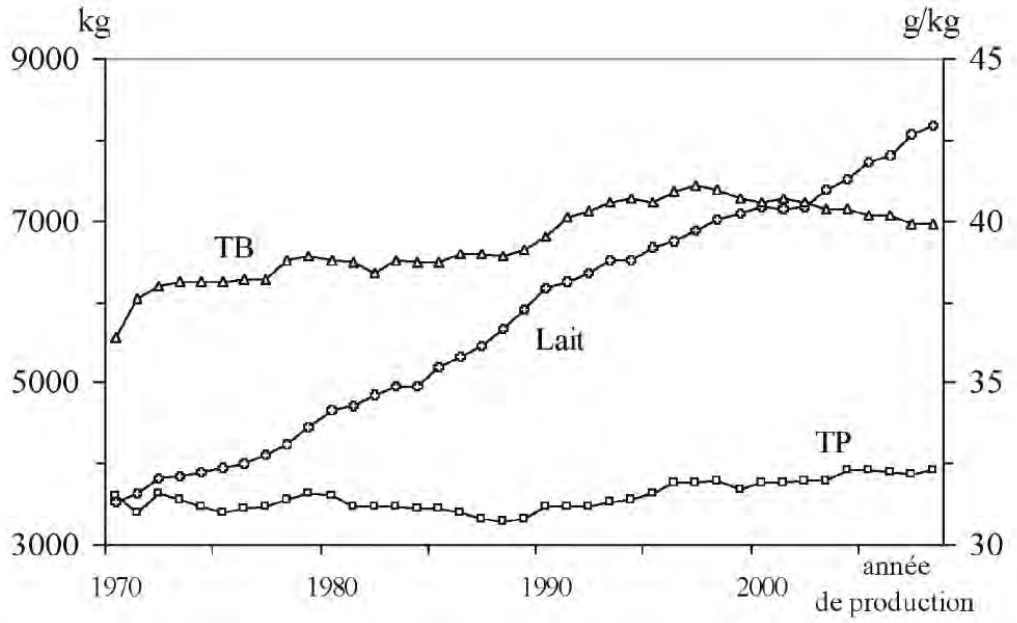


Figure 5 : Évolution des performances moyennes des vaches contrôlées en France. Lait = production de lait par vache et par lactation (kg) ; TP = Taux protéique (g/kg) ; TB = Taux de matière grasse (g/kg). (Verrier et al., 2010, d'après France Contrôle Laitier)

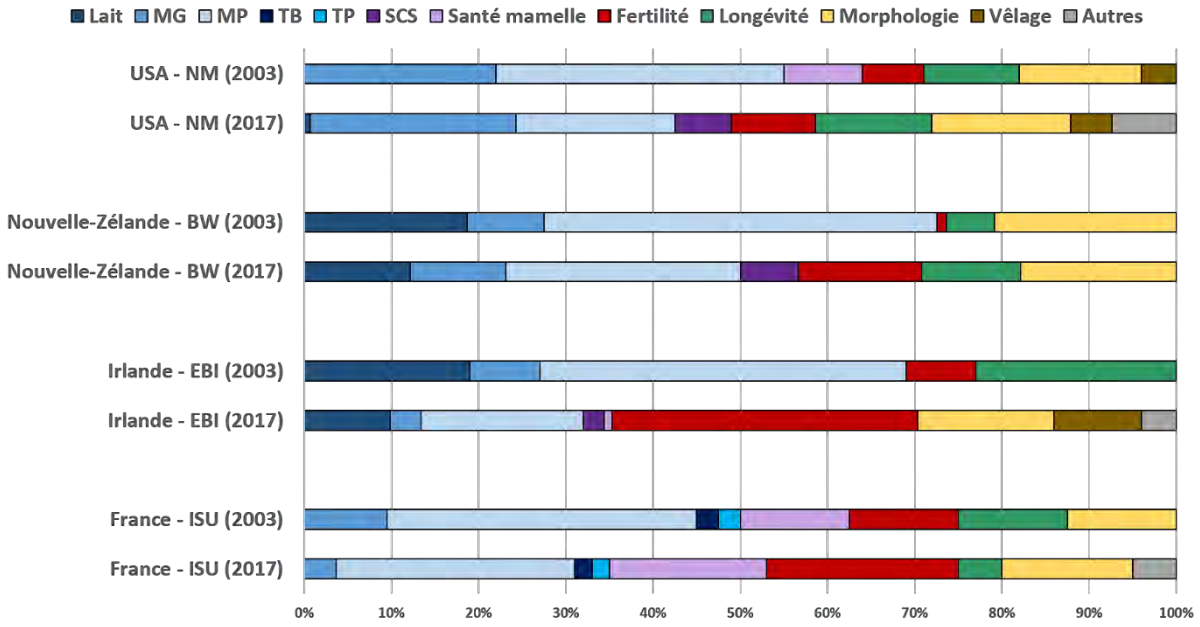


Figure 6 : Evolution entre 2003 et 2017 de la composition de l'objectif de sélection pour quatre indices de synthèse en bovins laitiers : NM (Net Merit), Breeding Worth (BW), Economic Breeding Index (EBI) et Index de Synthèse Unique (ISU). Données : Miglior et al. (2005), Idele (2012, 2018), (DairyNZ, 2018; ICBF, 2018; Vanraden et al., 2018)

-dation des traits fonctionnels, les programmes de sélection génétique ont été progressivement réorientés depuis les années 2000 et davantage encore dans les années 2010, en augmentant le poids relatif des traits fonctionnels dans les index de sélection (Figure 6, Pryce et Veerkamp, 2001; Miglior et al., 2005; Minery et al., 2008; Cole et VanRaden, 2018). En France, une comparaison des compositions d'ISU 2001 et 2012 témoigne également de ce changement d'orientation. Cependant, celui-ci se heurte aux corrélations génétiques défavorables entre traits de production et traits fonctionnels précédemment citées, à la faible héritabilité de ces traits (Dassonneville et al., 2009) et à la forte influence des effets de milieu – climat, mode d'élevage, alimentation et pression sanitaire – sur les performances pour ces traits (Phocas et al., 2017). En outre, dans la perspective de faire évoluer le profil des animaux élevés pour répondre aux enjeux de durabilité un objectif récent des programmes d'amélioration génétique consiste à intégrer dans les index de synthèse des traits relatifs à l'adaptation des animaux à leur environnement d'élevage et ses variations, parfois regroupés sous la notion de *robustesse* : résistance aux aléas climatiques, efficience d'utilisation des ressources alimentaires du milieu, *etc.* (Phocas et al., 2014b, 2017). Les liaisons génétiques complexes qui sous-tendent ces fonctions de robustesse sont longtemps restées inaccessibles, mais les récents progrès de la génomique laisse entrevoir des perspectives futures de sélectionner les individus sur ces traits (Tixier-Boichard et al., 2015) et suscitent donc beaucoup d'attentes : en témoigne le considérable effort de recherche et de développement déployé aux échelles nationale et internationale (Brochard et al., 2013; Purfield et al., 2019; Newton et Berry, 2020). Toutefois, certains travaux prospectifs soulignent que le progrès génétique espéré *via* la sélection génomique pourrait rester relativement lent et conduire à un essoufflement de la réponse génétique plus précoce qu'en sélection classique, sauf à identifier et rajouter continuellement de nouveaux marqueurs (Goddard, 2009). Il est aussi important de noter que les dispositifs mettant en œuvre l'amélioration génétique des races – par la voie mâle – en France ont longtemps été mutualisés à l'échelle nationale. Si cela a en théorie permis à des éleveur·euse·s d'avoir un pouvoir dans les négociations quant à l'orientation des programmes de sélection (Selmi et Joly, 2014), ces programmes ont, au moins temporairement et quelle que soit la race, privilégié l'amélioration du potentiel laitier (Verrier et al., 2010), rendant de fait laborieuse l'utilisation de taureaux issus de programmes d'amélioration génétique alternatifs. L'ouverture du secteur à la concurrence permise par la Loi d'Orientation Agricole de

2006, c'est-à-dire la possibilité de définir des index « privés » par les entreprises de sélection, a ouvert les perspectives d'une offre génétique davantage segmentée et diversifiée pour les éleveur·euse·s, perspectives étendues à l'échelle européenne par le nouveau Règlement Zootechnique Européen de 2016 (Labatut et Tesnière, 2017).

L'évolution des objectifs de sélection et l'intégration de traits fonctionnels aux index de synthèse sont récents en France et le délai relativement long pour améliorer efficacement ces traits et inverser les tendances issues de plusieurs décennies de sélection centrée sur la production laitière. Aussi, certain·e·s éleveur·euse·s optent pour des alternatives à l'élevage de troupeaux intégralement composés de vaches de race Holstein française. Certain·e·s choisissent une autre race pour conduire le troupeau, dont l'orientation du programmes de sélection correspond davantage à leurs objectifs (Ollion, 2015). D'autres adoptent une stratégie de diversification de la composante animale au sein du troupeau pour tirer parti de la variabilité des aptitudes individuelles (Puillet et al., 2010; Ollion et al., 2016), raciales (Delaby et al., 2009; Magne et al., 2016) ou génotypiques : troupeaux multi-races (Ollion, 2015; Magne et al., 2016) et croisement de races (Le Mézec et Dezetter, 2015).

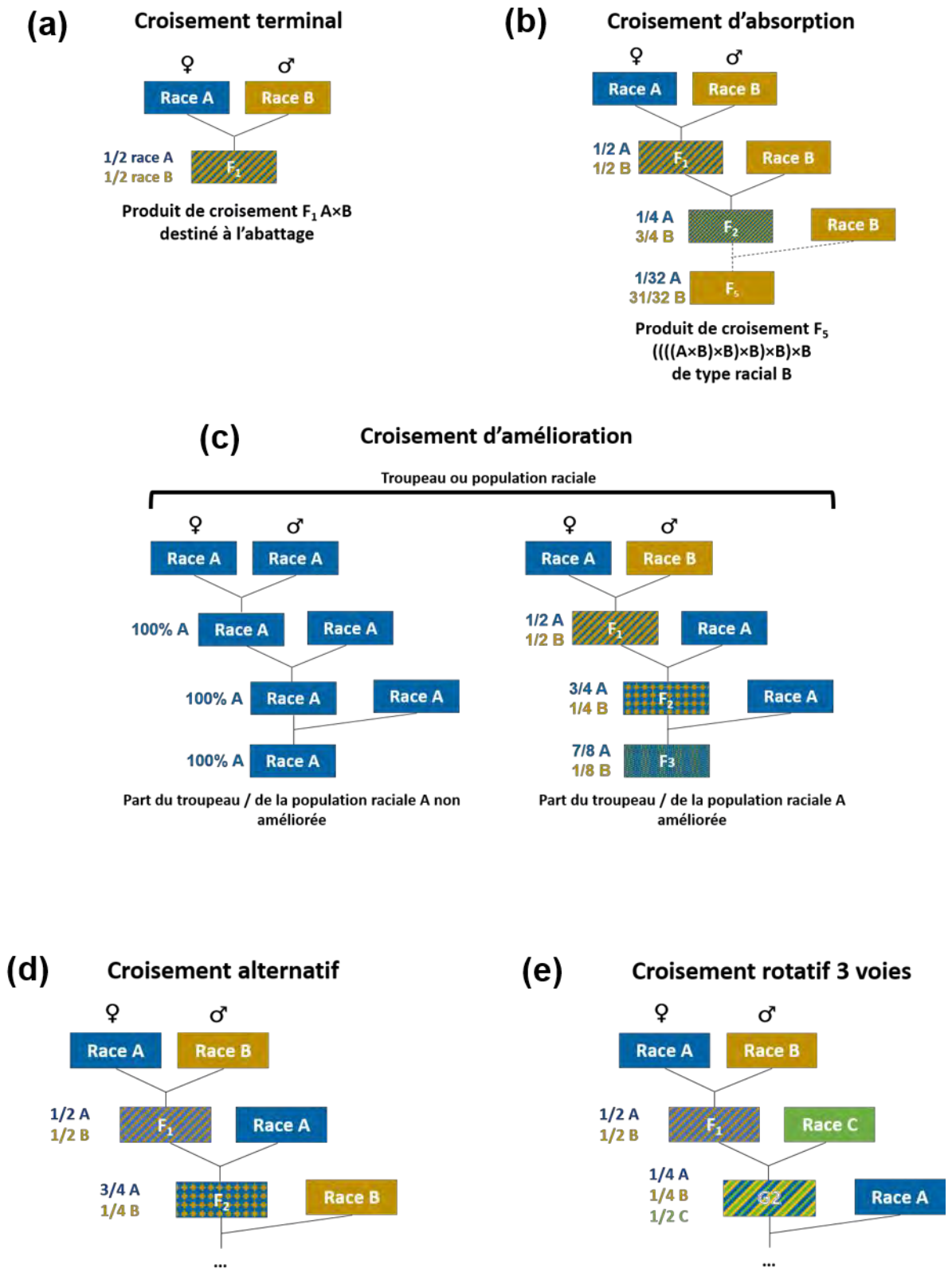


Figure 7 : Principaux schémas de croisement utilisés en élevage bovin laitier pour la création et l'amélioration de race et le maintien de génotypes diversifiés

1.2. Le croisement laitier en élevage bovin : une pratique atypique en développement

1.2.1. Le croisement de races : schémas et programmes de croisement

Le croisement génétique est défini comme « *l'accouplement entre des reproducteurs d'une même espèce appartenant à des populations homogènes et génétiquement différentes (races, souches, lignées)* » (Verrier et al., 2009). En élevage de ruminants et en particulier de bovins laitiers, on parle de croisement de *races*. Il existe plusieurs schémas de croisement :

- Le croisement *industriel* – ou croisement *terminal* – correspond au croisement entre un taureau de race spécialisée viande avec une femelle de race spécialisée lait (*race laitière* ci-après) ou de race mixte (Figure 7 a), afin d'augmenter la valeur bouchère des veaux : les produits de croisement sont destinés à l'abattage et n'ont pas vocation à servir au renouvellement du troupeau *i.e.* à être mis à l'accouplement.

- Le *croisement d'absorption* permet le passage progressif d'une race initiale (dite race *absorbée*) à une autre race (dite *absorbante*) en utilisant systématiquement des taureaux de la race absorbante sur les femelles du troupeau (Figure 7 b). Lors de ce processus la proportion de gènes de la race absorbée décroît de moitié à chaque génération : elle passe de 1/2 à 1/4, puis de 1/4 à 1/8 et ainsi de suite. On considère généralement que le processus d'absorption est réalisé à partir de la 4e ou 5e génération, c'est-à-dire lorsque la part de gènes de la race absorbante est de 15/16 ou 31/32 (Bidanel, 2020). A l'échelle de l'exploitation, c'est une méthode qui permet la mise en œuvre du changement de la race du troupeau. A l'échelle de populations animales (race), le croisement d'absorption permet de modifier durablement une race donnée : l'absorption de la Bretonne Pie Noire par la Holstein américaine dans les années 70 en France en constitue un exemple historique emblématique (Vissac, 1993, 2002).

- Le *croisement d'amélioration* consiste à réaliser occasionnellement – c'est-à-dire de façon non systématique – un accouplement croisé entre la race initiale (dite *à améliorer*) et une autre race (dite *améliorante*), afin d'améliorer un trait d'intérêt et/ou réduire temporairement le taux de consanguinité de la race à améliorer

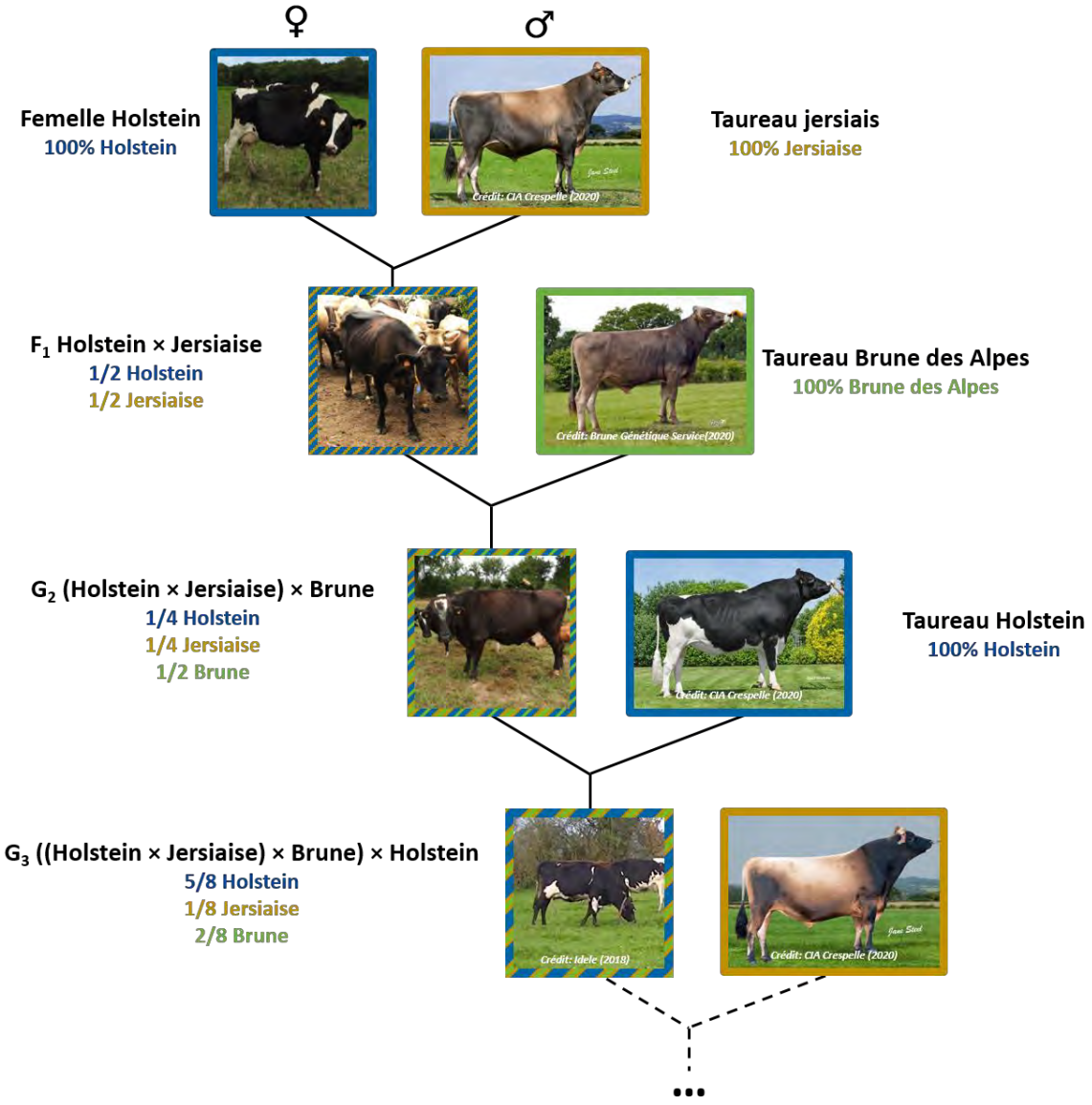


Figure 8 : Programme de croisement rotatif 3 voies (Holstein × Jersiaise) × Brune des Alpes

(Figure 7 c). La race améliorante doit donc présenter une supériorité génétique pour le trait d'intérêt, tout en ne présentant pas de défauts trop importants. A l'échelle d'un élevage donné, le croisement d'amélioration est généralement réalisé sur une seule génération et sur une partie du troupeau seulement. A l'échelle de populations de race entière, on peut citer l'exemple des races Abondance et Montbéliarde qui ont bénéficié d'apports de gènes Holstein rouge nord-américains dans les années 70-80 et 80-90 respectivement (Mattalia et al., 2006), afin d'améliorer leurs performances laitières.

- Le *croisement alternatif* – aussi appelé *croisement deux voies* ou *croisement rotatif deux voies* – consiste à alterner à chaque génération la race du taureau utilisé pour l'accouplement (Figure 7 d).
- Le *croisement rotatif* – ou *croisement rotationnel* – consiste à alterner à chaque génération les races des taureaux laitiers utilisés pour l'accouplement, et ce de manière cyclique. On parle de *croisement rotatif trois voies* lorsque trois races sont utilisées (Figure 7 e), *quatre voies* lorsque quatre races sont utilisées, *etc.*

Je ne retiens ici que les schémas de croisements dits *alternatif* et *rotatif* entre races laitières (« *croisement laitier* » ci-après), qui visent à maintenir durablement une diversité génétique au sein du troupeau, en procédant à un changement systématique de la race du taureau avec laquelle les femelles sont mises à l'accouplement et en conservant les femelles produites de croisement pour assurer le renouvellement du troupeau. En raison de l'organisation historique du dispositif d'amélioration génétique autour de la sélection par la voie mâle, et du fait que la réglementation européenne impose que les taureaux de monte publique soient de race pure (Boichard et al., 2017), un accouplement croisé implique généralement un taureau de race pure et une femelle croisée et moins fréquemment l'inverse, moins fréquemment encore un taureau croisé et une femelle croisée.

On appelle *programme de croisement* la combinaison ordonnée des races utilisées dans un schéma (Figure 8). La première génération issue d'un accouplement croisé entre deux individus de races pures différentes est communément désignée comme la génération F_1. La seconde, issue d'un accouplement entre une femelle croisée F_1 et un mâle de race pure, est communément désignée comme la génération G_2, la troisième génération sous le nom de G_3, *etc.* Cependant, il est nécessaire de préciser

Programme de croisement	*Génération de croisement*	*Part de gènes HO*	*Part de gènes JE*	*Part de gènes BS*
Alternatif HO×JE	F_1 : HO×JE	1/2	1/2	0
	G_2 : (HO×JE)×HO	3/4	1/4	0
	G_3 : ((HO×JE)×HO)×JE	3/8	5/8	0
Rotatif 3 voies (HO×JE)×BS	F_1 : HO×JE	1/2	1/2	0
	G_2 : (HO×JE)×BS	1/4	1/4	2/4
	G_3 : ((HO×JE)×BS)×HO	5/8	1/8	2/8
Rotatif 3 voies (HO×BS)×JE	F_1 : HO×JE	1/2	1/2	0
	G_2 : (HO×BS)×JE	1/4	2/4	1/4
	G_3 : ((HO×BS)×JE)×HO	5/8	2/8	1/8

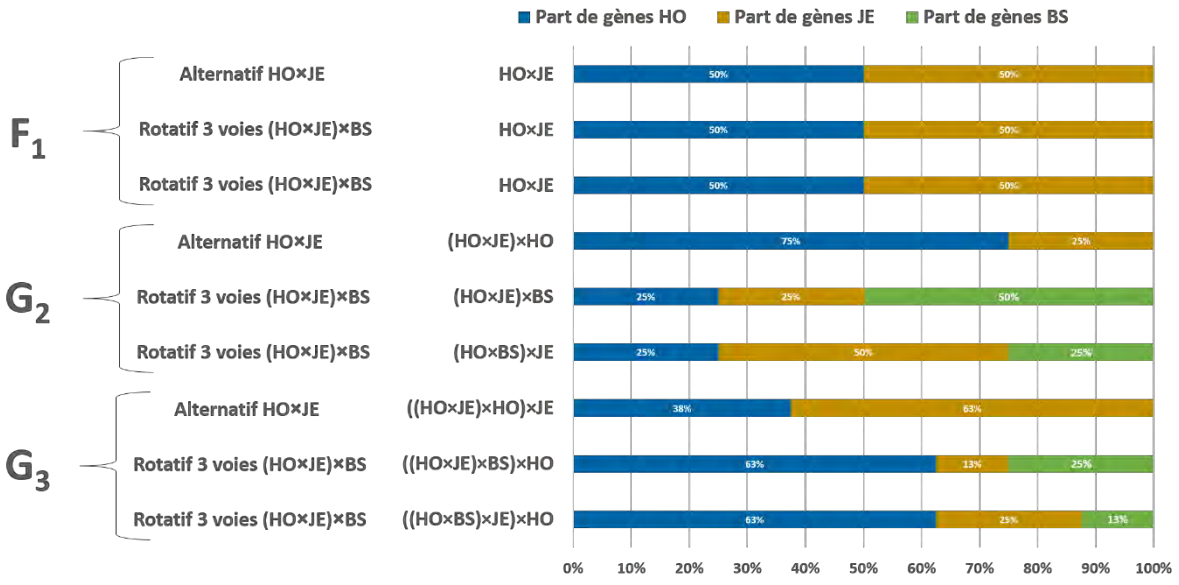


Figure 9 : Comparaison des parts de gènes contribuant respectivement aux génotypes des individus F1, G2 et G3 pour trois programmes de croisement : un programme de croisement alternatif et deux programmes de croisement rotatif 3 voies (HO : Holstein ; JE : Jersiaise ; BS : Brune des Alpes)

le type de schéma et le programme considéré lorsqu'on fait référence à un individu de 2ème génération ou plus (Figure 9). En raison de l'utilisation fréquente d'un mâle de race pure pour les accouplements croisés, c'est la race du taureau utilisé le plus récemment qui est majoritaire au sein du génotype du produit de croisement. Le reste du génotype de ce dernier est composé pour la partie issue de la mère d'un « *patchwork du génome des races utilisées lors des générations précédentes de croisement* » (Dezetter et al., 2019).

On peut représenter un programme de croisement alternatif entre deux types raciaux R1 et R2 en l'écrivant comme suit : R1 × R2. Cependant, il n'existe pas de convention quant à l'ordre d'écriture des génotypes mâle et femelle, lesquels définissent le sens du croisement dont l'impact sur la valeur d'hétérosis sera montré par la suite (voir section 1.2.2). Bien que certains travaux fassent figurer le génotype femelle d'origine à la fin de l'expression (Hazel et al., 2014, 2020), la majorité le font figurer en début d'expression et c'est donc cette convention d'écriture que j'adopterai dans la suite du manuscrit. Ainsi, l'écriture « HO × MO » désigne un programme de croisement alternatif basé sur l'utilisation de taureaux Montbéliard (MO) sur des femelles Holstein. L'écriture « (HO × MO) × JE » désigne un programme de croisement trois voies basé sur l'utilisation en première génération de taureaux Montbéliard (MO) sur des femelles Holstein, puis sur l'utilisation de taureau Jersiais (JE) en deuxième génération sur le produit HO × MO.

1.2.2. Bénéfices théoriques du croisement laitier : l'effet d'hétérosis et la complémentarité des races

Le croisement rotatif induit deux effets génétiques bénéfiques : il permet de tirer parti de la complémentarité des races impliquées dans le programme de croisement (effet génétique additif) et de l'effet d'hétérosis (effet génétique non-additif). Afin de présenter ces effets génétiques, il est utile de rappeler le modèle de référence utilisé par la sélection animale pour décrire et prévoir la performance d'un individu, décrit par l'équation suivante (Le Roy et al., 2019) :

$$P = G + E + (G \times E) \qquad [1]$$

Où P est l'expression phénotypique – *i.e.* la performance – d'un individu, G l'effet indépendant de son génotype, E l'effet indépendant de son environnement d'élevage et $(G \times E)$ les effets d'interactions entre génotype et environnement d'élevage.

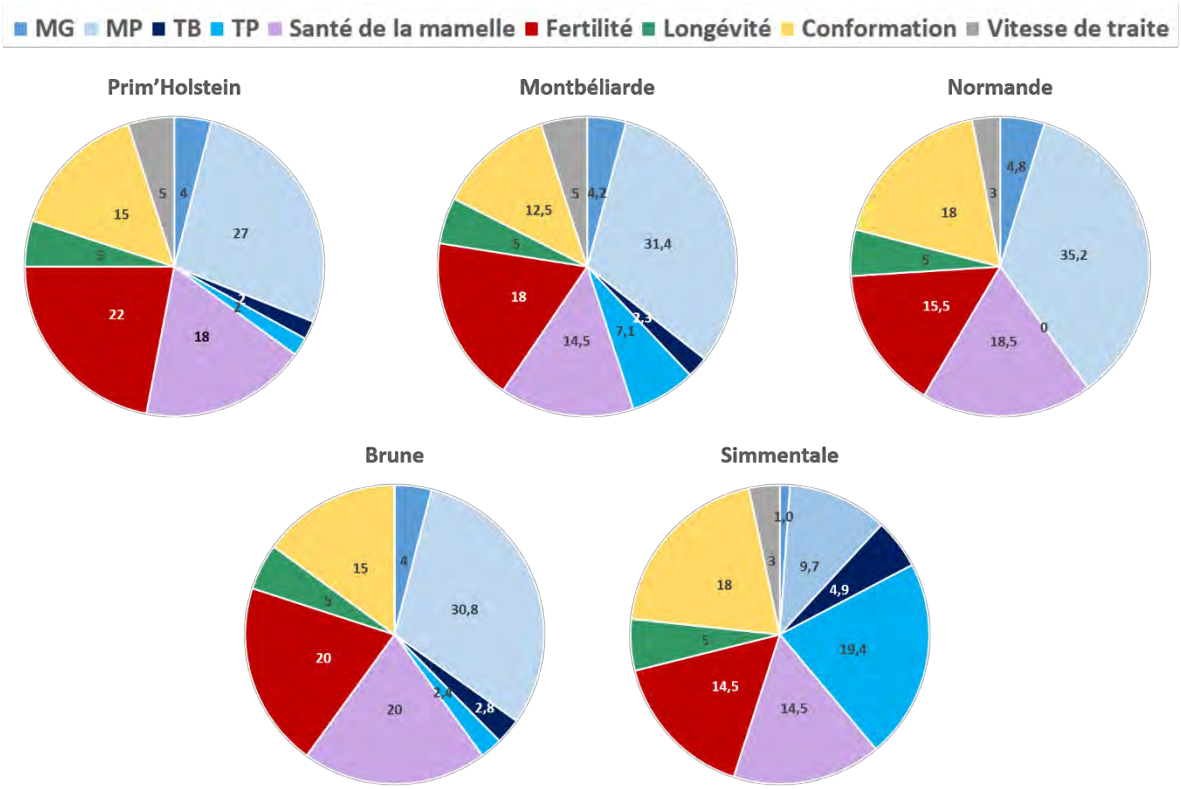


Figure 10 : Composition de l'objectif de sélection des races bovines Holstein, Montbéliarde, et Normande en 2012 et des races Brune et Simmentale en 2013 (Données Idele)

Le croisement présente des bénéfices théoriques relatifs à la part génétique (G) de la performance d'un individu croisé. Cette part génétique dépend d'effets génétiques additifs et non-additifs (Dezetter et al., 2019). Les effets génétiques *additifs* (A) correspondent à la part des gènes transmissible à la descendance et qui fait l'objet de l'évaluation en sélection en race pure. Elle est composée de :

- La contribution additive moyenne de chacune des races parentales impliquées dans le programme de croisement (effet inter-races). Comme dans un accouplement en race pure, la valeur additive moyenne d'un individu issu de croisement correspond à la somme des valeurs de chaque parent pondérée par leur proportion respective dans son génotype (Bidanel, 1992). Cette contribution additive des races parentales peut être valorisée « qualitativement » par le croisement, en s'appuyant sur la complémentarité de celles-ci. En effet, les objectifs des programmes d'amélioration génétique raciaux prennent en compte un nombre variable de traits dont certains sont corrélés négativement, *e.g.* quantité de lait produite et fertilité. L'amélioration conjointe par sélection sur des traits antagonistes peut s'avérer lente, en particulier lorsque ces traits sont faiblement héritables, comme c'est le cas pour les traits fonctionnels (Dassonneville et al., 2009). La relative diversité des objectifs de sélection des différentes races laitières (Figure 10) a conduit à une diversité génétique – et phénotypique – des types raciaux portant, entre autres, sur des traits antagonistes à l'échelle d'un objectif de sélection monoracial, qu'il est ensuite intéressant d'associer via un programme de croisement.
- La contribution additive individuelle des parents (effet intra-race) : la valeur des parents est déterminée par leur race et leur contribution mais également par leur valeur génétique individuelle propre au sein de leur race respective, dont la mesure classique est donnée par la valeur d'index.

L'estimation de ces valeurs additives inter- et intra-race est l'objet de nombreux travaux que je présenterai plus tard (voir section 1.3).

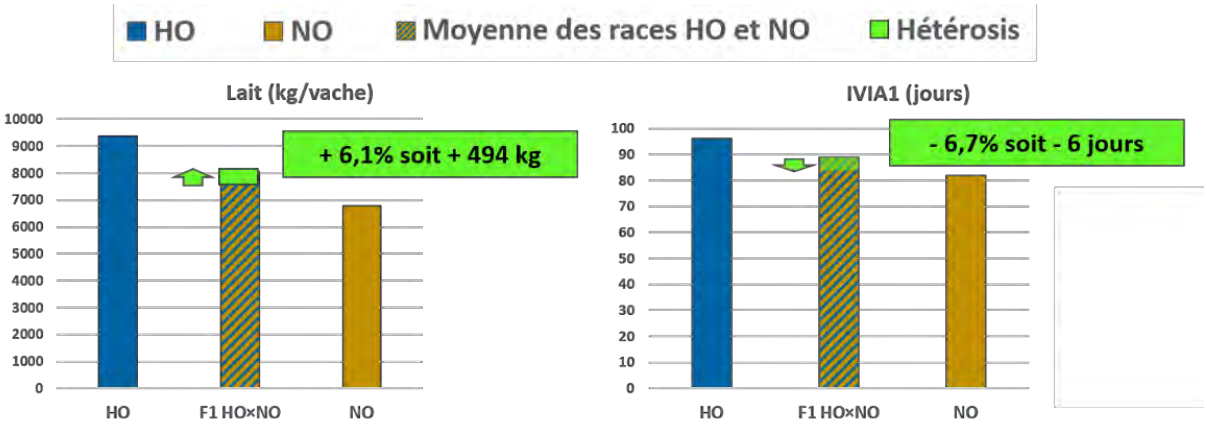


Figure 11 : Hétérosis pour le lait et l'intervalle vêlage-IA première en première génération de croisement HO × NO et comparaison aux moyennes parentales HO et NO. HO : Holstein ; NO : Normande (d'après Dezetter et al., 2015)

H (%)	F_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7
Alternatif R1×R2	100	50	75	63	69	66	67
Rotatif 3 voies (R1 × R2) × R3	100	100	75	88	88	84	86
Rotatif 4 voies *(R1 × R2) × R3*	100	100	100	88	94	94	88

Tableau 1 : Valeur du coefficient d'expression d'hétérosis H (VanRaden, 1992) des sept premières générations de schémas de croisement alternatif, rotatif 3 voies et rotatif 4 voies

Les effets génétiques *non-additifs* correspondent à la part qui ne se transmet pas à la descendance. Il s'agit des effets spécifiques du croisement, aussi appelés *paramètres du croisement* (Brun, 1992) :

- L'effet d'*hétérosis* : l'effet ou phénomène d'hétérosis (« *hétérosis* » ci-après) est défini en génétique animale, pour un trait donné, comme la différence entre la performance moyenne de la population de F_1 et la performances moyenne des deux populations parentales (Shull, 1948 et Bidanel, 1992, cités par Dezetter et al., 2019) (Figure 11). L'hétérosis s'explique principalement par des effets d'interactions génétiques intra-locus (effets de *dominance*), et plus partiellement par des effets d'interaction inter-loci (effets d'*épistasie*, Figure 12). Le processus historique de sélection en race pure augmente le taux d'homozygotie (fréquence des gènes avec deux allèles identiques) du génotype des individus de cette race. Il maintient également, pour la race considérée, les effets d'épistasie favorables à l'expression dans le milieu de sélection de certains traits (Dezetter et al., 2019). À l'inverse, un individu croisé aura un taux d'hétérozygotie (fréquence des gènes avec deux allèles différents) supérieur à celui des races parentales *i.e.* un génotype plus diversifié, ce qui augmente la probabilité qu'il exprime ce génotype quel que soit l'environnement d'élevage. Le coefficient d'expression d'hétérosis (H) par un individu croisé peut se calculer ainsi (VanRaden, 1992) :

$$H = 1 - \sum_i s_i d_i$$

  Où s_i est la proportion de gènes de la race i du génotype de l'individu croisé issue du père (*sire* en anglais), d_i est la proportion de gènes de la race i issue de la mère (*dam* en anglais). Le coefficient H est maximal pour les individus F_1. Pour les générations suivantes, il pourra être maintenu à une valeur plus ou moins élevée en fonction du schéma de croisement considéré, *i.e.* du nombre de races (Tableau 1). En outre, l'effet d'hétérosis pour un trait donné est généralement d'autant plus élevé que les populations parentales sont génétiquement éloignées et que l'héritabilité de ce caractère est faible (Lynch and Walsh, 1998), ce qui est le cas des caractères fonctionnels chez les bovins laitiers (Dassonneville et al., 2009).

- Les effets de recombinaison épistatique : j'ai exposé précédemment que la sélection en race pure « fixait » les effets d'épistasie favorables à l'expression de

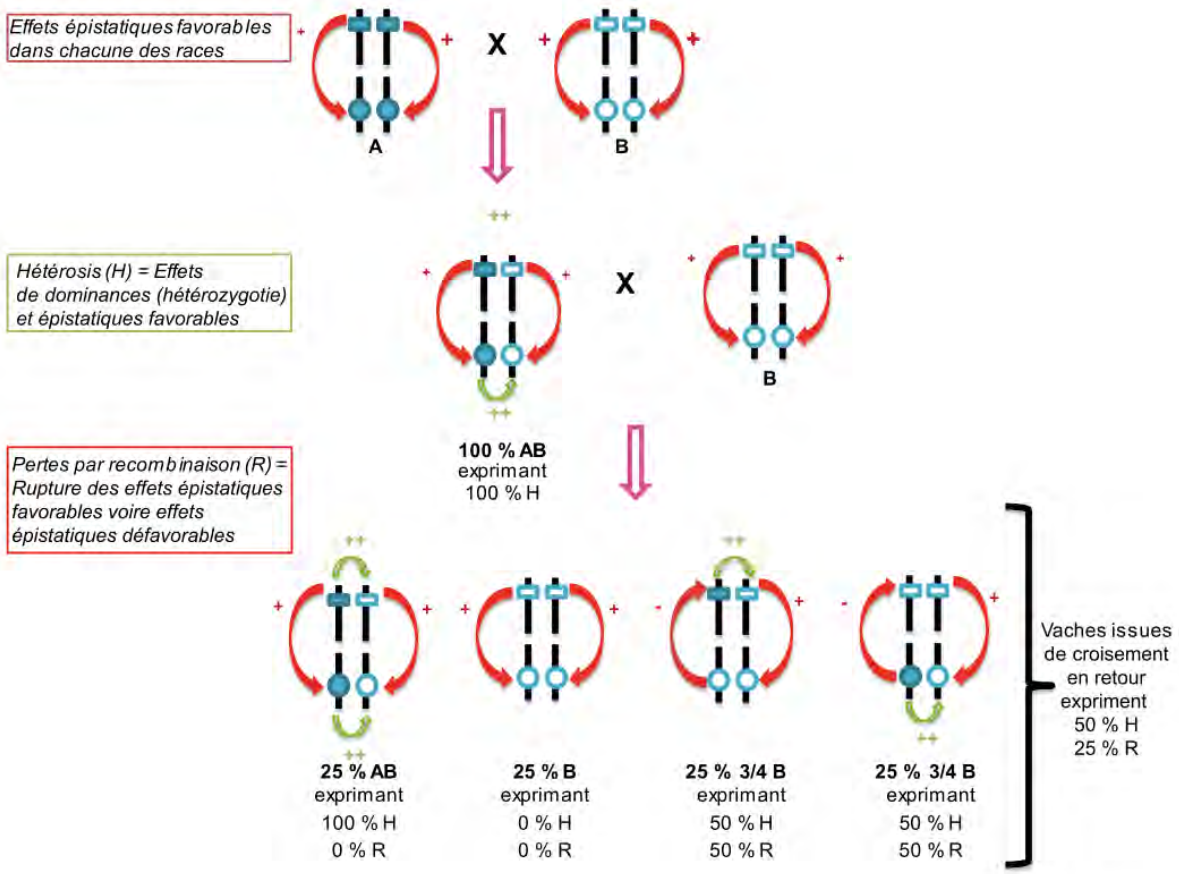


Figure 12 : Schéma explicatif de la théorie de l'expression des effets non-additifs pour deux loci indépendants (Dezetter et al., 2019)

certains gènes. La raison à cela est que ces effets sont transitoirement détruit lors de la recombinaison méiotique mais rétablis du fait de l'accouplement en race pure (Dezetter et al., 2019), c'est-à-dire du fait que la fécondation impliquera des gamètes porteur des mêmes allèles (Figure 12). Dans le cas d'un accouplement croisé, les effets épistatiques présents chez les parents et transitoirement détruits lors de la recombinaison méiotique ne sont que partiellement rétablis, c'est-à-dire moins fréquemment d'un point de vue probabiliste. Cela peut alors annuler ces effets épistatiques favorables, voir en générer d'autres défavorables : on parle de « *pertes épistatiques par recombinaison* ». On évalue ces pertes par recombinaison (R) en calculant l'indicateur suivant (Dechow et al., 2007) :

$$R = 1 - \sum_i \frac{s_i^2 + {d_i}^2}{2}$$

Où s_i est la proportion de gènes de la race i du génotype de l'individu croisé issue du père (*sire* en anglais), d_i est la proportion de gènes de la race i issue de la mère (*dam* en anglais). La valeur de R est maximale et vaut 75% pour un individu produit par un croisement de retour – ou *backcross* – c'est-à-dire un individu de deuxième génération d'un programme de croisement alternatif.

Afin de bénéficier des effets du croisement, il semble donc nécessaire de concevoir les programmes de croisement pour maximiser l'hétérosis et minimiser les pertes de recombinaison. L'analyse des valeurs prises théoriquement par les indicateurs H et R plaide en faveur de programmes de croisement impliquant un nombre de races strictement supérieur à 2. Un volet de la littérature portant sur le croisement laitier a pour objet d'estimer les paramètres de croisement : je le présenterai également par la suite (voir section 1.3.2). La présentation des différents effets génétiques du croisement permet d'exprimer l'équation [1] comme suit, dans le cas de la description générale de la performance d'un individu croisé :

$$P = A + H + R + E + (G \times E) \qquad [1']$$

Où P est l'expression phénotypique de l'individu, A la somme des effets génétiques additifs (inter- et intra-race), H l'effet d'hétérosis, R l'effet des pertes par recombinaison, E l'effet indépendant de son environnement d'élevage et $(G \times E)$ les effets d'interactions entre génotype et environnement d'élevage.

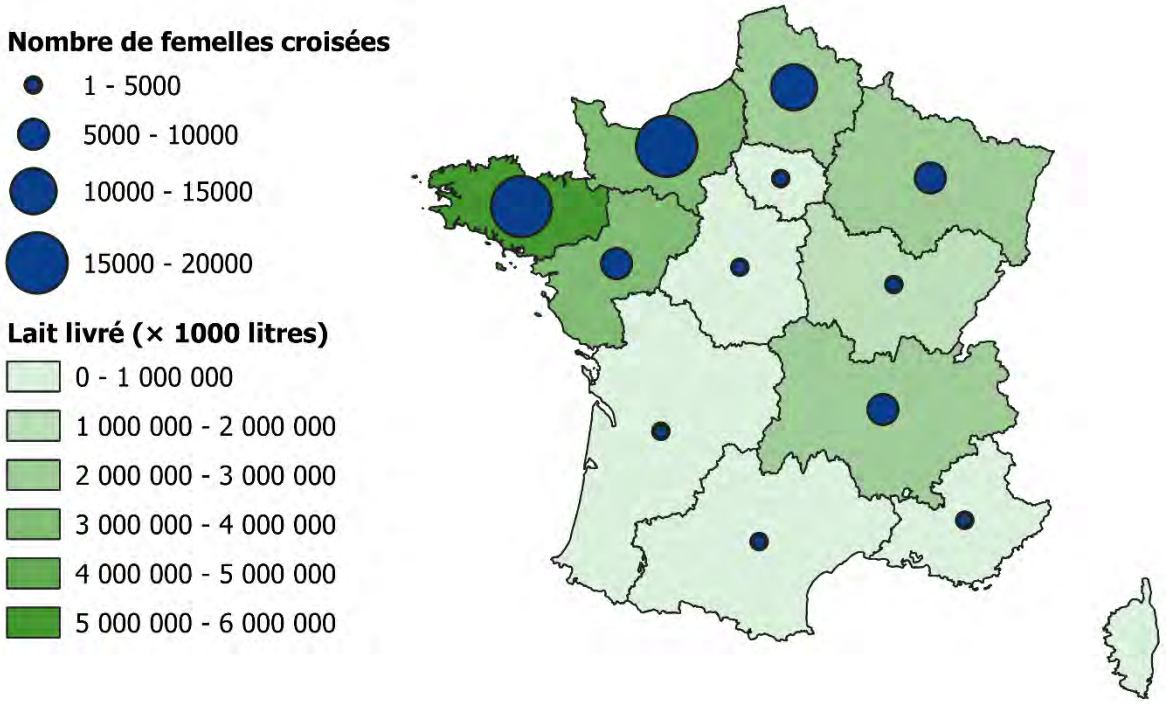


Figure 13 : Nombre de femelles croisées et volume de lait livré par région de France métropolitaine en 2017 (Données Reproscope et France AgriMer)

1.2.3. Le croisement laitier : une pratique en marge du modèle dominant

Au regard des bénéfices théoriques du croisement laitier, on peut être étonnés que cette pratique demeure relativement marginale dans la plupart des pays à économie de marché : En France, le croisement laitier est une pratique minoritaire : en 2011, les femelles croisés ne représentaient que 5 % du cheptel national laitier (Le Mézec, 2012) ; 2% des inséminations sur les femelles de race laitière pure sont des inséminations de croisement laitier (Le Mézec, 2018). Cependant, cette pratique est en progression : non seulement la part d'inséminations en croisement laitier est en croissance continue – de 3,9% en 2010 à 5,8% en 2018 (Le Mézec, 2019) – mais les femelles issues de croisement laitier sont généralement conservées par les éleveur·euse·s et elles-mêmes inséminées en croisement laitier par la suite – 81% des inséminations sur femelles laitières croisées (Le Mézec, 2018). Il est également important de noter que la pratique du croisement diffère selon le bassin de production (Figure 13) : le nombre de femelles croisées est en effet le plus élevé dans les zones d'élevage où la race Holstein est la plus représentée, qui coïncident avec les bassins de forte production laitière. Cette pratique est également relativement marginale dans la plupart des pays à économie de marché : les vaches croisées représentent ainsi 12% du cheptel laitier au Danemark (Lauritsen et Flagstad (2017), cité par Clasen et al. (2019)), 8% en Suède (Växa Sverige (2018), cité par Clasen et al. (2019)), 5,2% en Irlande (Coffey et al., 2016), 4,5% aux Etats Unis (Norman et al. (2015), cité par Hazel et al. (2017)). Avec près de la moitié de son cheptel constitué de vaches croisées « Kiwi » *i.e.* Holstein × Jersiaise (LIC et DairyNZ, 2019), la Nouvelle-Zélande fait figure d'exception, bien qu'il soit plus juste de considérer aujourd'hui la « Kiwi » comme une race synthétique, certes construite par croisement alternatif, mais qui dispose aujourd'hui d'une population de référence, d'index de sélection et de taureaux indexés (DairyNZ, 2020).

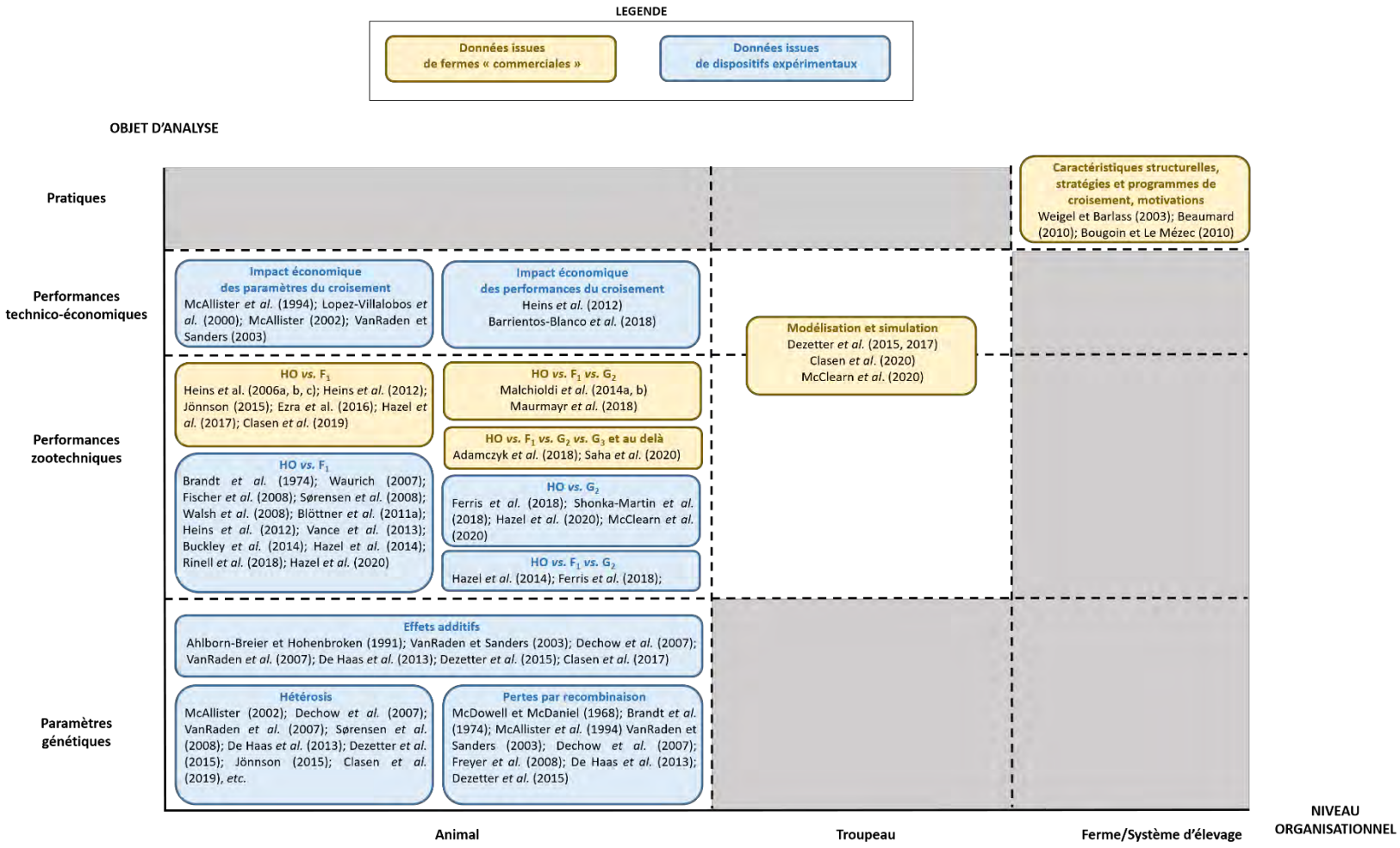


Figure 14 : Analyse de la littérature traitant du croisement laitier selon deux axes : l'axe vertical caractérise l'objet d'analyse : estimation des paramètres génétiques du croisement, analyse des performances zootechniques et technico-économiques du croisement et analyse descriptive des modes de gestion du croisement (motivations, pratiques générales de croisement, etc.). L'axe horizontal caractérise le niveau organisationnel à laquelle l'analyse est réalisée : animal, troupeau et ferme.

1.3. Les travaux de recherche sur le croisement laitier se concentrent sur l'évaluation des performances à l'échelle animal

Cette partie s'appuie sur une revue non systématique de la littérature scientifique qui n'inclue que les travaux menés dans les pays à économie de marché, dans lesquels l'objectif principal du croisement laitier est d'améliorer les traits fonctionnels des animaux du troupeau initialement conduit intégralement en Holstein pure (Quénon et Magne, 2017) alors que, dans les pays « en développement », il vise davantage à améliorer les traits productifs d'animaux davantage adaptés à leur environnement d'élevage (Roschinsky, 2013; Leroy et al., 2015). Pour un revue de la littérature du croisement dans certains de ces pays, je renvoie à la synthèse réalisée par Roschinsky (2013). J'ai analysé la littérature selon deux axes (Figure 14) : l'axe vertical caractérise l'objet d'analyse : estimation des paramètres génétiques du croisement (effets additifs, hétérosis et pertes de recombinaison), analyse des performances zootechniques (de traits de production et de traits fonctionnels) et technico-économiques du croisement, analyse descriptive des modes de gestion du croisement (motivations, pratiques générales de croisement, etc.). L'axe horizontal caractérise le niveau organisationnel à laquelle l'analyse est réalisée : animal, troupeau et ferme.

1.3.1. L'estimation des paramètres génétiques du croisement laitier

Un premier volet de la littérature vise à estimer les déterminants génétiques du croisement laitier en les analysant pour divers programmes de croisement. On trouve tout d'abord des travaux qui estiment les valeurs additives raciales et individuelle des parents impliqués dans un accouplement croisé. L'effet de la race des parents sur la valeur additive de l'individu croisé peut être estimé par régression linéaire (Dechow et al., 2007 et De Haas et al., 2013, cités par Dezetter et al., 2019) en utilisant des modèles du type :

$$y_j = \mu + \Sigma \text{ effets fixes} + \Sigma c_{ij} r_i + \varepsilon_j$$

Où y_j est la performance de la vache croisée j, μ est la moyenne des performances de la population de référence choisie, Σ effets fixes correspond aux effets d'environnement d'élevage affectant le trait considéré y (troupeau, année, parité,

saison de vêlage, etc.), $\Sigma c_{ij} r_i$ est la composante de la valeur additive de la vache croisée j, c_{ij} est la proportion de gènes issue de la race pure i dans le génotype de j, r_i est la moyenne des effets additifs de la race i, ε_j est l'effet résiduel du modèle.

Ces modèles n'intègrent pas la valeur génétique individuelle de chaque parent. Cela constitue un biais pour l'estimation totale des effets génétiques additifs, dans la mesure où cela revient à considérer chaque parent comme représentatif de sa race et que cette race n'évolue pas génétiquement i.e. ne fait pas l'objet d'un programme d'amélioration génétique. D'autres travaux y pallient donc en intégrant la valeur génétique intra-race individuelle des parents comme effet aléatoire pour estimer la valeur génétique additive totale (VanRaden et al., 2007, Dezetter et al., 2015, cités par Dezetter et al., 2019) en utilisant des modèles – aléatoires – du type :

$$y_j = \mu + \Sigma \text{ effets fixes} + g_j + \varepsilon_j$$

Où y_j est la performance de la vache croisée j, μ est la moyenne des performances de la population de référence choisie, Σ effets fixes correspond aux effets d'environnement d'élevage affectant le trait considéré y (troupeau, année, parité, saison de vêlage, etc.), g_j est la somme de la composante de la valeur additive de la vache croisée j ($\Sigma c_{ij} r_i$) et de la valeur génétique intra-race (a_j), ε_j est l'effet résiduel du modèle.

En France, chaque race est évaluée séparément, avec une base de référence – i.e. une population de référence – pour le calcul des index qui lui est propre, contrairement à d'autres pays comme la Nouvelle-Zélande ou les Etats-Unis qui utilisent des modèles d'évaluations multiraciaux (Dezetter et al., 2019). Il est par conséquent difficile d'avoir une vision globale des écarts génétiques inter-races pour tous les traits de performances. Néanmoins, de grandes tendances peuvent être dégagées : la race Holstein est génétiquement supérieure aux races Montbéliarde et Normande (Dezetter et al., 2015), Ayrshire, Brune, Guernesey, Jersiaise et Shorthorn (Ahlborn-Breier et Hohenboken, 1991; VanRaden et Sanders, 2003; Vanraden et al., 2007) pour la quantité de lait produite par lactation et les quantités de matière grasse et protéique. Elle est au contraire génétiquement inférieure à ces races pour les traits de fertilité (Vanraden et al., 2007; Dezetter et al., 2015) et de longévité (Vanraden et al., 2007; Clasen et al., 2017). Enfin, la race Holstein est génétiquement sujet à des scores

Croisement	Hétérosis (% par rapport à la moyenne des parents)					Auteur·rice·s	Pays	Nombre de vaches	% vaches croisées
	Production								
	Lait	MG	MP	TB	TP				
HO × AY	-2,0	-1,8	-2,4			VanRaden et Sanders (2003)	Etats-Unis	72 914	0,2%
	1,8	1,8	1,9			Harris et al. (1996) et Harris *et al.* (2000), cité·e·s par Dezetter (2015)	Nouvelle-Zélande	8 900 000	NP
	3,5	2,6	4,0			Pedersen et Christensen (1989), cités par Dezetter (2015)	Danemark	1 018	81,0%
	16,5	20	17,2			McAllister *et al.* (1994)	Canada	5 070	27,4%
HO × BS	3,2	4,5	3,8			VanRaden et Sanders (2003)	Etats-Unis	75 192	1,1%
	5,0 à 6,7	7,3 à 10,4	5,6 à 7,1			Dechow *et al.* (2007)	Etats-Unis	6 439	13,6%
	5,0		5,3			Freyer *et al.* (2008)	Allemagne	NP	NP
HO × FR	1,4					Wall *et al.* (2005)	Royaume-Uni	408 847	> 25%
	0,9	2,5	0,3	0,7	-0,8	Coffey *et al.* (2016)	Irlande	1 725	12,1%
	2,1		1,7			Begley *et al.* (2010), cités par Dezetter *et al.* (2019)	Irlande	3 316	19,9%
	2,4 à 4,0	3,8 à 5,3	3,0 à 4,8			Penasa *et al.* (2010a)	Pays-Bas	11 055	43,1%
	3,4		3,4			Penasa *et al.* (2010b)	Irlande	416 640	18,3%
	2,3	2,6	2,4			Van der Werf et De Boer (1988), cités par Dezetter (2015)	Pays-Bas	92 333	75,0%
	0,8	1,3	1,0			Pedersen et Christensen (1989), cités par Dezetter (2015)	Danemark	1 018	81,0%
HO × GU	2,4	4,4	4,0			VanRaden et Sanders (2003)	Etats-Unis	73 729	0,2%
	8,0	8,5	4,7			Touchberry (1992)	Etats-Unis	519	55,0%
HO × JE	1,6	4,5	4,1			VanRaden et Sanders (2003)	Etats-Unis	80 060	2,0%
	6,3			-4,2	-0,9	Waurich (2007) cité par Freyer *et al.* (2008)	Allemagne	28 591	1,6%
	5,6	6,5	6,3	-0,8	0,5	Coffey *et al.* (2016)	Irlande	1 725	12,1%
	5,0		6,4			Lopez-Villalobos et Spelman (2010), cités par Dezetter *et al.* (2019)	Nouvelle-Zélande	53 419	NP
			4,9			Norberg *et al.* (2014)	Danemark	56 342	44,7%
	3,3	3,5	3,3			Kargo *et al.* (2012)	Danemark	312 859	NP
	4,1 à 6,6	5,0 à 7,6	4,9 à 7,3			Lembeye *et al.* (2016)	Nouvelle-Zélande	156 043	57,1%
	3,3 à 5,9	4,8 à 6,8	4,4 à 6,4			Lembeye *et al.* (2016)	Nouvelle-Zélande	156 043	57,1%
	6,9		7,5			Penasa *et al.* (2010b)	Irlande	416 640	18,3%
	4,1	4,3	4,2			Harris *et al.* (1996) et Harris *et al.* (2000), cité·e·s par Dezetter (2015)	Nouvelle-Zélande	8 900 000	NP
HO × MO	6,0	6,4	5,7	0,6	0,0	Dezetter *et al.* (2015)	France	52 902	13,3%
	6,9		6,1			Penasa *et al.* (2010b)	Irlande	416 640	18,3%
HO × NO	6,1	6,4	5,6	0,1	-0,2	Dezetter *et al.* (2015)	France	55 741	13,5%
HO × RS	2,1		3,0			Begley *et al.* (2010), cités par Dezetter *et al.* (2019)	Irlande	3 316	19,9%
	1,6 à 2,0	2,2 à 2,4	1,3 à 2,0			Jönsson (2015)	Danemark	2 581 440	1,3%
			2,2			Norberg *et al.* (2014)	Danemark	56 342	44,7%
	9,2	8,6	9,0			Pedersen et Christensen (1989), cités par Dezetter (2015)	Danemark	1 018	81,0%
HO × SH	0,3	1,3	1,2			VanRaden et Sanders (2003)	Etats-Unis	73 507	0,2%
Divers	3,4	4,4	4,1			VanRaden et Sanders (2003) ; VanRaden *et al.* (2004)	Etats-Unis	92 471	7,9%

Tableau 2 : Hétérosis (pourcentage d'écart à la moyenne parentale) pour les traits de production : lait, matières grasse (MG) et protéique (MP), taux butyreux (TB) et protéique (TP). Les valeurs en rouge correspondent à des écarts non significatifs. HO : Holstein ; AY : Ayrshire ; BS : Brune des Alpes ; FR : Frisonne ; GU : Guernesey ; JE : Jersiaise ; MO : Montbéliarde ; NO : Normande ; RS : Rouge Scandinave ; SH : Shorthorn ; Divers : plus de 4 races mises en jeu. NP : non précisé

cellulaires supérieurs à ceux des races Montbéliarde (Dezetter et al., 2015), Ayrshire, Brune, et Shorthorn (Vanraden et al., 2007) mais inférieurs à ceux des races Normande (Dezetter et al., 2015) et Jersiaise (Ahlborn-Breier et Hohenboken, 1991; VanRaden et Sanders, 2003; Vanraden et al., 2007).

On trouve ensuite des travaux qui estiment les paramètres spécifiques du croisement (*i.e.* hétérosis et pertes par recombinaison) pour différents programmes de croisement, c'est-à-dire différentes combinaisons de races bovines laitières. Ces travaux s'appuient sur des modèles de régression du type (Dezetter et al., 2019) :

$$y_j = \mu + \Sigma \text{ effets fixes} + \Sigma c_{ij} r_i + \beta_2 \times H + \beta_3 \times R + \varepsilon_j$$

Où y_j est la performance de la vache croisée j, μ est la moyenne des performances de la population de référence choisie, Σ effets fixes correspond aux effets d'environnement d'élevage affectant le trait considéré y (troupeau, année, parité, saison de vêlage, *etc.*), $\Sigma c_{ij} r_i$ est la composante de la valeur additive de la vache croisée j, c_{ij} est la proportion de gènes issue de la race pure i dans le génotype de j, r_i est la moyenne des effets additifs de la race i, β_2 est le coefficient de régression sur l'effet d'hétérosis H, β_3 est le coefficient de régression sur l'effet des pertes par recombinaison R , ε_j est l'effet résiduel du modèle.

La plupart des estimations de l'effet d'hétérosis se limite à celui exprimé par les F_1, en raison du manque de données disponibles pour les générations de croisement suivantes (Dezetter et al., 2019). Il a été montré que l'effet d'hétérosis varie selon :

- Les traits considérés : pour un trait donné, l'effet d'hétérosis est d'autant plus prononcé que son héritabilité est faible (Lynch et Walsh, 1998) : ainsi, si l'effet d'hétérosis est globalement favorable pour les traits de production – lait et taux – (Tableau 2), il l'est encore davantage pour les traits de reproduction (Tableau 3). En revanche, les estimations d'effet d'hétérosis pour les traits de santé restent équivoques (Tableau 4)
- Le programme de croisement :
    - Les races impliquées dans le programme de croisement : l'effet d'hétérosis est d'autant plus prononcé que les génotypes parentés sont génétiquement

Croisement	Hétérosis (% par rapport à la moyenne des parents)					Auteur·rice·s	Pays	Nombre de vaches	% vaches croisées
	Fertilité								
	IVV	IVIA1	IVIAF	Taux de gestation filles	Nombre d'IA				
HO × BS			-8,0 à -7,3			Dechow *et al.* (2007)	Etats-Unis	6 439	13,6%
	9,0					Freyer *et al.* (2008)	Allemagne	NP	NP
HO × FR	-0,4	-1,3			-1,5	Wall *et al.* (2005)	Royaume-Uni	408 847	> 25%
	-1,5	-0,2				Coffey *et al.* (2016)	Irlande	1 725	12,1%
	-0,3					Penasa *et al.* (2010b)	Irlande	416 640	18,3%
HO × GU	**3,3**	**1,0**	**9,4**		**12,8**	Touchberry (1992)	Etats-Unis	519	55,0%
HO × JE					-4,6	Waurich (2007) cité par Freyer *et al.* (2008)	Allemagne	28 591	1,6%
	-2,0	-1,6				Coffey *et al.* (2016)	Irlande	1 725	12,1%
		-3,8				Norberg *et al.* (2014)	Danemark	56 342	44,7%
	-0,5					Penasa *et al.* (2010b)	Irlande	416 640	18,3%
HO × MO		-3,4	6,5			Dezetter *et al.* (2015)	France	52 902	13,3%
	-2,7					Penasa *et al.* (2010b)	Irlande	416 640	18,3%
HO × NO		-6,7	4,5			Dezetter *et al.* (2015)	France	55 741	13,5%
HO × RS	-0,7 à -2,6	-0,8 à -4,2			-2,7 à -3,4	Jönsson (2015)	Danemark	2 581 440	1,3%
		-2,1				Norberg *et al.* (2014)	Danemark	56 342	44,7%
Divers				7,0		VanRaden et Sanders (2003) ; VanRaden *et al.* (2004)	Etats-Unis	92 471	7,9%

Tableau 3 : Hétérosis (pourcentage d'écart à la moyenne parentale) pour les traits de reproduction : intervalle vêlage-vêlage (IVV), intervalle vêlage-IA première (IVIA1), intervalle vêlage-IA fécondante (IVIAF), taux de gestation des filles, nombre d'IA pour fécondation. Les valeurs en rouge correspondent à des écarts non significatifs. Les valeurs en gras correspondent à des écarts défavorables. HO : Holstein ; BS : Brune des Alpes ; FR : Frisonne ; GU : Guernesey ; JE : Jersiaise ; MO : Montbéliarde ; NO : Normande ; RS : Rouge Scandinave ; Divers : plus de 3 races mises en jeu. NP : non précisé

éloignées (Lynch et Walsh, 1998). Les tendances générales des écarts génétiques inter-races ont été présentés plus haut.

- Le sens du croisement, qui repose sur la distinction entre le génotype d'origine paternelle et celui d'origine maternelle (par exemple, considérant un croisement alternatif impliquant les races Holstein et Montbéliarde, il existe deux sens possible de croisement : soit utiliser un mâle Montbéliard sur une femelle Holstein, soit un mâle Holstein sur une femelle Montbéliarde). Cela témoigne d'un effet d'hétérosis d'origine maternelle significatif (Ahlborn-Breier et Hohenboken, 1991; Jönsson, 2015), assez favorables concernant divers traits fonctionnels (McAllister, 2002; Sørensen et al., 2008; Bidanel, 2020). A l'inverse, concernant les traits de production laitière, il ne se dégage pas de consensus sur le sens à privilégier pour un croisement impliquant un génotype Holstein et un autre type racial (Dezetter et al., 2019).

- Le rang de lactation : l'effet du rang de lactation sur la valeur estimée de l'hétérosis est variable. Pour les traits de production, certains travaux montrent que l'hétérosis augmente avec le rang de lactation (Dechow et al., 2007; Dezetter et al., 2015) et d'autre la tendance inverse (VanRaden et Sanders, 2003; Jönsson, 2015).

Les travaux estimant les pertes par recombinaison pour les animaux de deuxième génération de croisement sont moins nombreux et les estimations faites sont généralement statistiquement non significatives (McDowell et McDaniel, 1968; Brandt et al., 1974; McAllister et al., 1994; Freyer et al., 2008) du fait du nombre limité de G_2 dans les populations analysées (Dezetter et al., 2019). Cependant, les pertes par recombinaisons sont susceptibles de réduire la supériorité des individus croisés de générations au-delà de la F_1, en se cumulant à la réduction progressive de l'hétérosis. Quelques tendances peuvent être considérées avec prudence : l'effet des pertes par recombinaison est plutôt défavorable pour la quantité de lait (VanRaden et Sanders, 2003; Dechow et al., 2007; De Haas et al., 2013; Dezetter et al., 2015). Cette effet est plus équivoque pour les traits de fertilité : certains travaux font état de pertes par recombinaison favorables (De Haas et al., 2013) et d'autres de pertes défavorables (Dechow et al., 2007; Dezetter et al., 2015). Enfin, certaines études analysent quant à elles les conséquences économiques potentielles des paramètres

Croisement	Hétérosis (% par rapport à la moyenne des parents)					Auteur·rice·s	Pays	Nombre de vaches	% vaches croisées
	Santé mamelle	Longévité							
	SCS	Taux de survie L1-L2	Taux de survie L1-L3	Taux de réforme en L1	Nombre de lactations				
HO × BS	-7,8					Dechow *et al.* (2007)	Etats-Unis	6 439	13,6%
					9,0	Freyer *et al.* (2008)	Allemagne	NP	NP
HO × FR	8,7					Coffey *et al.*(2016)	Irlande	1 725	12,1%
	0,1					Begley *et al.* (2010), cités par Dezetter *et al.* (2019)	Irlande	3 316	19,9%
	-0,5 à -4,8					Penasa *et al.* (2010a)	Pays-Bas	11 055	43,1%
HO × GU		24,5				Touchberry (1992)	Etats-Unis	519	55,0%
HO × JE	**1,6**			**2,4**		Waurich (2007) cité par Freyer *et al.* (2008)	Allemagne	28 591	1,6%
	-3,1					Coffey *et al.*(2016)	Irlande	1 725	12,1%
	-0,4					Lopez-Villalobos et Spelman (2010), cités par Dezetter et al. (2019)	Nouvelle-Zélande	53 419	NP
	-0,7					Norberg *et al.* (2014)	Danemark	56 342	44,7%
HO × MO	-1,4					Dezetter *et al.* (2015)	France	52 902	13,3%
HO × NO	-1,1					Dezetter *et al.* (2015)	France	55 741	13,5%
HO × RS	-0,2					Begley *et al.* (2010), cités par Dezetter *et al.* (2019)	Irlande	3 316	19,9%
	-2 à 2,7	4,6	4,5			Jönsson (2015)	Danemark	2 581 440	1,3%
	-0,3					Norberg *et al.* (2014)	Danemark	56 342	44,7%
RS × HO	0,1 à 2,0	13,0	12,3			Jönsson (2015)	Danemark	2 642 233	3,6%
Divers	0,7	1,2				VanRaden et Sanders (2003) ; VanRaden *et al.* (2004)	Etats-Unis	92 471	7,9%
		17,0				Sørensen *et al.* (2008)	Danemark	4 471	51,5%

Tableau 4 : Hétérosis (pourcentage d'écart à la moyenne parentale) pour les traits de santé de la mamelle – Score Cellulaire Somatique (SCS) – et de longévité : taux de survie jusqu'à la 2ème lactation, taux de survie jusqu'à la 3ème lactation, taux de réforme en 1ère lactation, nombre de lactations effectuées. Les valeurs en rouge correspondent à des écarts non significatifs. Les valeurs en gras correspondent à des écarts défavorables. HO : Holstein ; BS : Brune des Alpes ; FR : Frisonne ; GU : Guernesey ; JE : Jersiaise ; MO : Montbéliarde ; NO : Normande ; RS : Rouge Scandinave ; Divers : plus de 3 races mises en jeu. NP : non précisé

du croisement estimés pour différents programmes de croisement alternatif (McAllister et al., 1994; McAllister, 2002; VanRaden et Sanders, 2003) ou trois voies (Lopez-Villalobos et al., 2000). Ces études montrent toutes l'intérêt économique – potentiel, puisque basé sur des estimations du gain de performances lié à l'hétérosis – du croisement.

1.3.2. L'évaluation des performances du croisement laitier

1.3.2.1. Performances du croisement à l'échelle animal : une entrée par programme de croisement

Un deuxième volet de la littérature porte sur l'analyse des performances zootechniques – production laitière, fertilité, santé, longévité – des femelles croisées ainsi que sur la composition et les caractéristiques physicochimiques du lait. Comme pour les travaux estimant les paramètres génétiques du croisement, ces travaux adoptent une entrée par programme de croisement et présentent des résultats à l'échelle de l'animal : ils se basent sur la comparaison entre les performances d'individus moyens aux génotypes différents, c'est-à-dire appartenant aux différentes populations de femelles croisées issues d'un programme de croisement donné et de femelles des races pures impliquées dans ledit programme. La race Holstein étant majoritaire dans les élevages bovins lait des pays à économie de marché (WHFF, 2016), beaucoup de ces travaux ne comparent les performances des croisées qu'au type racial HO : ainsi, Hazel et al. (2017) comparent entre elles les performances de vaches HO et de vaches HO × Montbéliarde et HO × Rouge Scandinave. Les études s'appuient sur des données issues de dispositifs expérimentaux ou de fermes « commerciales », via les dispositifs de contrôle des performances. L'estimation de l'effet du génotype sur les performances repose sur le calcul de moyennes ajustées pour le facteur « génotype » extraites de modèles statistiques du type :

$$y_j = \mu + \Sigma \text{ effets fixes} + b_j + \varepsilon_j$$

Où y_j est la performance de la vache croisée j, μ est la moyenne des performances de la population de référence choisie, Σ effets fixes correspond aux effets d'environnement d'élevage affectant le trait considéré y (troupeau, année, parité, saison de vêlage, *etc.*), b_j est l'effet du génotype de la vache croisée j, ε_j est l'effet résiduel du modèle.

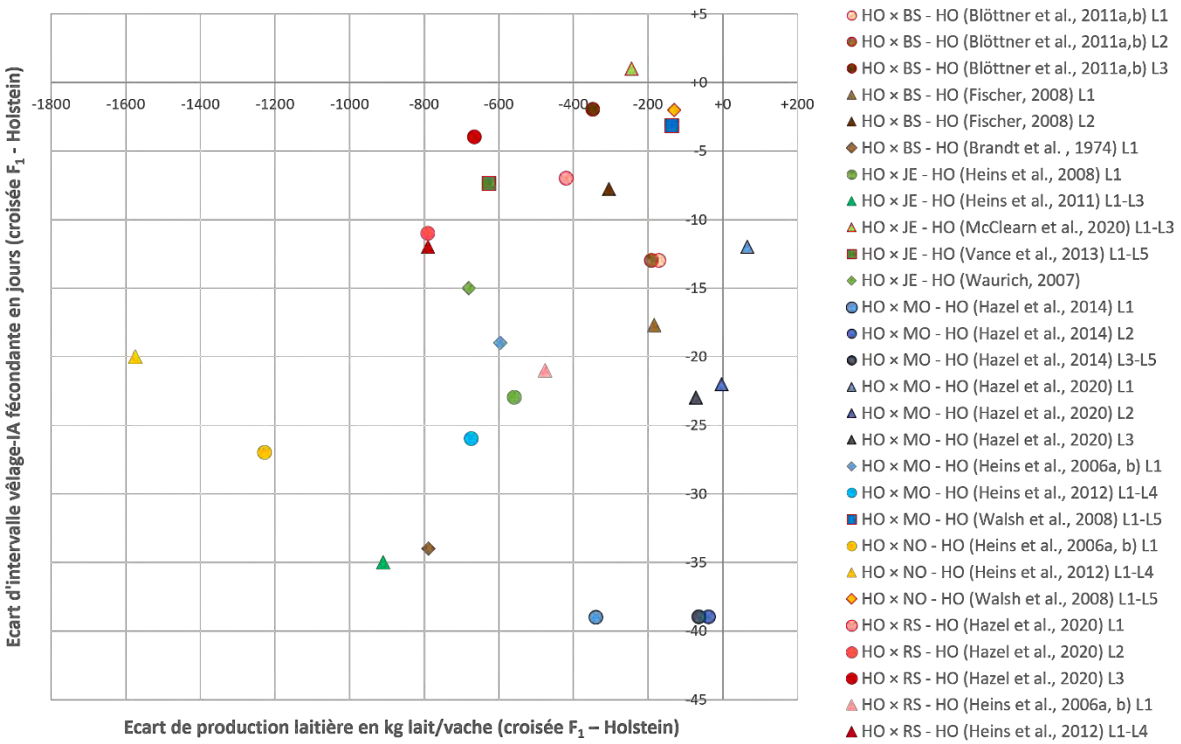


Figure 15 : Ecarts d'intervalle vêlage-insémination fécondante moyen en fonction de l'écart de production laitière moyenne entre vaches F1 (de diverses combinaisons de races) et vaches Holstein obtenus dans plusieurs études. L1 à L5 : parités 1 à 5. La production laitière est standardisée à 305 jours. Les symboles à bord noir – respectivement à bord rouge – correspondent aux études pour lesquelles l'écart de production laitière moyenne – respectivement l'écart d'IVIAF moyen – était non significatif entre F1 et HO.

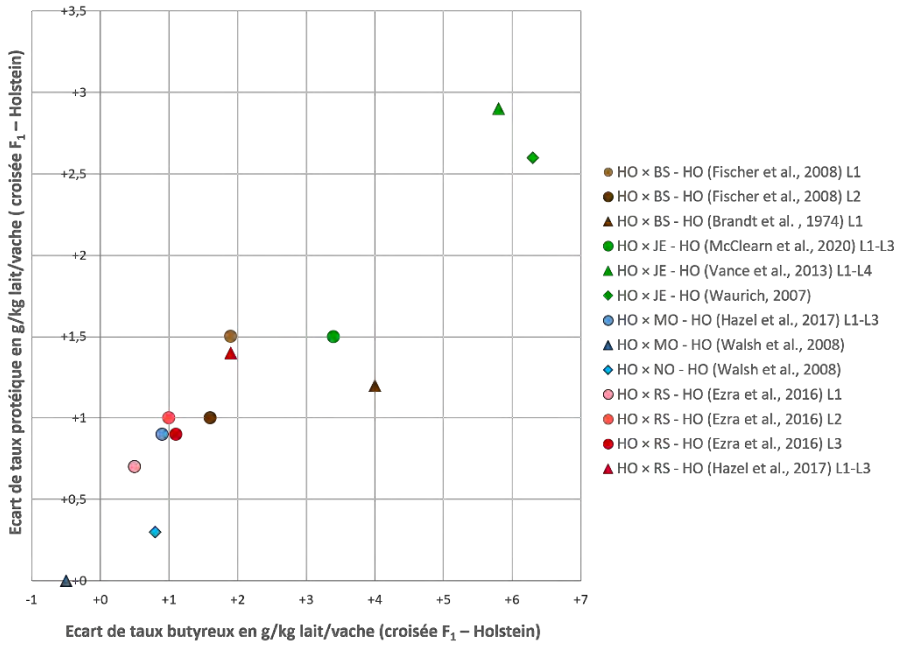


Figure 16 : Ecarts de taux protéique (TP) moyen en fonction de l'écart de taux butyreux (TB) moyen entre vaches F1 et vaches Holstein obtenus dans plusieurs études. L1 à L5 : parités 1 à 5. Les valeurs de taux sont standardisées à 305 jours. Les symboles à bord noir correspondent aux études pour lesquelles l'écart de TB moyen était non significatif entre F_1 et HO.

Performances des F_1 : Il existe de nombreux travaux qui comparent les performances de vaches de première génération (F_1) pour un programme de croisement donné à celles des populations parentales de race pure, majoritairement HO. Plusieurs tendances peuvent être dégagées.

Tout d'abord, à de rares exceptions près (Hazel et al., 2020), les F_1 ont des performances laitières moyennes inférieures à celles des HO, quel que soit la seconde race utilisée (Figure 15, données brutes en Annexe 6) : la perte de production laitière n'excède pas 400 kg/vache pour les F_1 issues de croisement avec des taureaux de race Brune ou Montbéliarde, tandis qu'elle est comprise entre -400 et -900 kg/vache pour les F_1 issues de croisement avec des taureaux de race Rouge scandinave ou Jersiaise ; enfin, les pertes relatives de production laitière les plus importantes ont été observées pour les F_1 HO × Normande (-1 227 à - 1 574 kg/vache, Heins et al., 2006, 2012). Une tendance univoque inverse se dégage concernant les performances de fertilité des F_1 comparées aux HO : excepté dans le cas de vaches HO ayant été fortement sélectionnées sur les traits de fertilité (McClearn et al., 2020a), les F_1 ont des performances de fertilité moyennes supérieures à celles des HO (Figure 15, données brutes en Annexe 7). En fonction des études, l'IVIAF moyen des F_1 est inférieur à celui des HO à hauteur de 0 à 20 jours (Walsh et al., 2008; Blöttner et al., 2011a; b; Hazel et al., 2020), voire plus de 20 jours (Heins et al., 2008, 2011; Heins et Hansen, 2012; Hazel et al., 2017). Clasen et al., (2019) ont également montré que le différentiel d'IVIAF entre HO et F_1 était significativement plus important dans les systèmes bas intrants (-11 à -16 jours) que les systèmes à plus haut niveau d'intrants (-8 à -9 jours). Les performances de reproduction supérieures des F_1 comparativement aux HO ont également été observées pour d'autres indicateurs de performances de reproduction (voir Annexe 7) : taux de réussite à l'IA première et taux de gestation supérieurs (Hazel et al., 2014, 2020), nombre d'IA nécessaires pour fécondation inférieur (Buckley et al., 2014).

Concernant la production de matières grasse et protéique du lait, la plupart des travaux mettent en évidence que les F1 ont des taux butyreux et protéique systématiquement supérieurs à ceux des HO, de 1 à 2 points en général et davantage pour les F1 HO × Jersiaise (Figure 16, données brutes en Annexe 6). Cependant, en raison de leur production de lait inférieure, la production moyenne de matières grasse et protéique des F_1 peut rester inférieure à celle des HO (Figure 17, données brutes en Annexe 6).

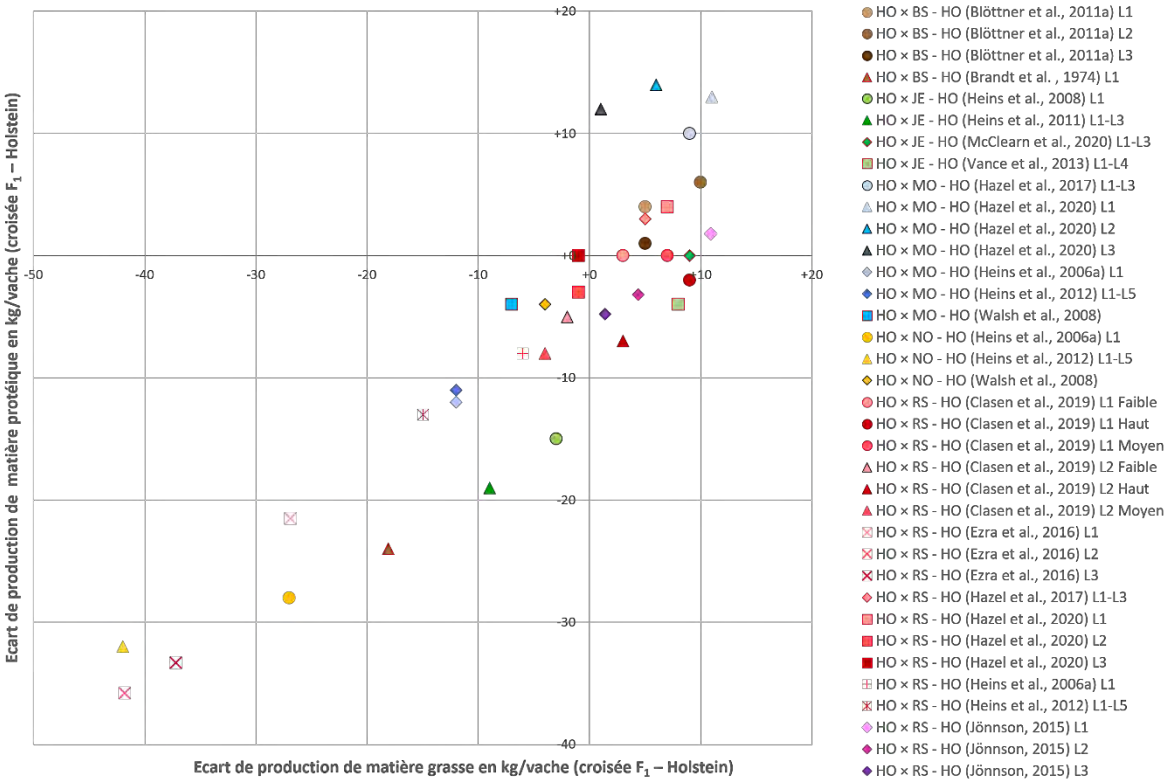


Figure 17 : Ecarts de production de matière protéique moyenne en fonction de l'écart de production de matière grasse moyenne entre vaches F_1 et vaches Holstein obtenus dans plusieurs études. L1 à L5 : parités 1 à 5. Les symboles à bord noir – respectivement à bord rouge – correspondent aux études pour lesquelles l'écart de production de MG moyenne – respectivement l'écart de production de MP moyen – était non significatif entre F_1 et HO. Faible/Moyen/Haut : niveau d'intensivité de la production laitière.

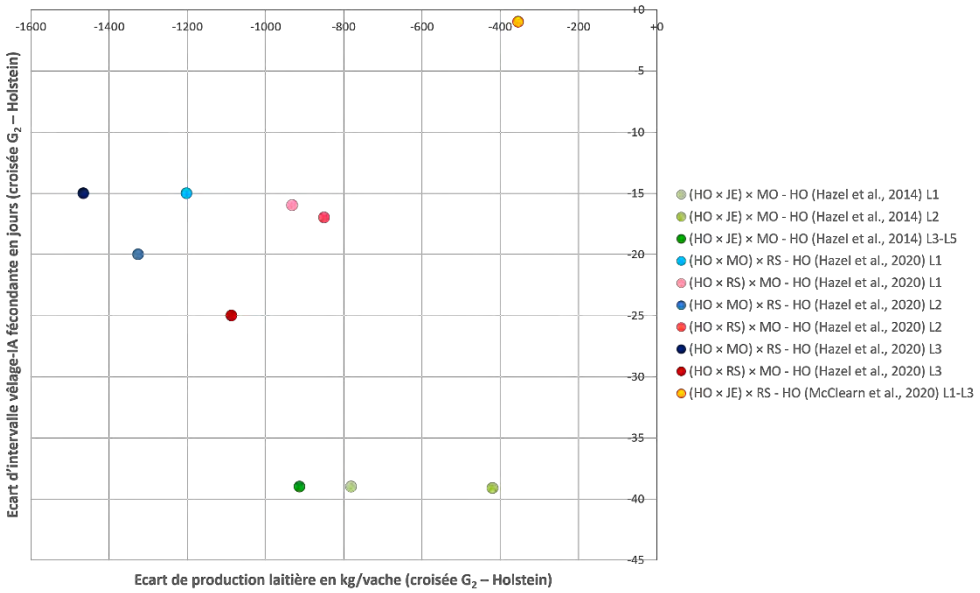


Figure 18 : Ecarts de production de SCS moyen en fonction de l'écart de production laitière moyenne entre vaches F_1 et vaches Holstein obtenus dans plusieurs études. L1 à L5 : parités 1 à 5. Les symboles à bord rouge correspondent aux études pour lesquelles l'écart de SCS moyen était non significatif entre F_1 et HO.

D'autres études portent sur la composition fine du lait – *e.g.*, acides gras, lactose, caséine – et ses propriétés physico-chimiques relatives à sa fromageabilité (Vance et al., 2013; Malchiodi et al., 2014b; Maurmayr et al., 2018; Puppel et al., 2018; Saha et al., 2020) et mettent en évidence les qualités du lait des vaches F_1.

Concernant les performances de santé, les études se limitent généralement à évaluer les performances de santé de la mamelle, approchée par la mesure du score cellulaire somatique (*SCS*). Leurs résultats ne permettent pas de dégager de tendance univoque, et donc de conclure quant à un bénéfice du croisement laitier sur ce point (Figure 18, données brutes en Annexe 6), d'autant plus que le SCS reste un indicateur indirect et donc imparfait de la sensibilité des femelles aux mammites cliniques (Rupp et Boichard, 2000; Van den Borne et al., 2011). Parmi les rares études qui comparent spécifiquement l'occurrence de mammites cliniques entre HO et F_1, certaines semble suggérer que ces dernières y sont moins sensibles (Heins et al., 2011; Vance et al., 2013), mais d'autres ne mettent pas en évidence de différence significative (Prendiville et al., 2010; McClearn et al., 2020a).

On trouve par ailleurs des études qui évaluent d'autres traits fonctionnels, relatifs à l'état ou la longévité des femelles : elles font généralement état de meilleures notes d'état corporel des F_1 (Hazel et al., 2014; Rinell et Heringstad, 2018, données en Annexe 8) et de taux de réforme en première lactation inférieur (Waurich, 2007, cité par Freyer et al., 2008). De nombreuses études mettent également en évidence un taux de mortinatalité des veaux et velles F_1 bien inférieur à celui des HO : de -4 (Hazel et al., 2017) à -38% (Clasen et al., 2019).

Les conséquences économiques de ce différentiel de performances zootechniques entre croisées F_1 et individus de race pure sont évaluées par plusieurs étude, qui diffèrent dans les éléments du système qu'elles prennent en compte pour analyser les produits et charges. Barrientos-Blanco et al. (2018) montrent que les valeurs de taux de gestation supérieures des F_1 HO × Jersiaise par rapport aux HO pures conduit à atténuer certaines pressions économiques associées à une mauvaise reproduction du troupeau laitier liées à des stratégies de reproduction par IA, et en particulier en semence sexée. Heins et al. (2012) ont estimé le profit moyen cumulé pour l'ensemble

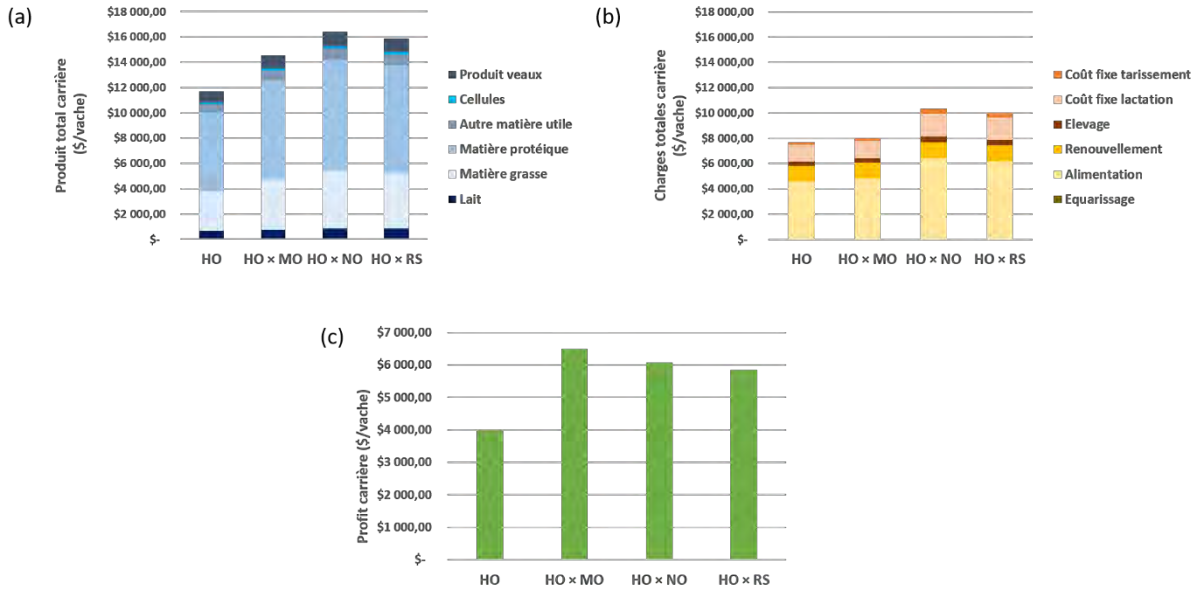


Figure 19 : Comparaison du produit total (a), des charges totales (b) et du profit (c) au cours de la carrière de vaches Holstein pures (HO) et de croisées F_1 HO × Montbéliarde (HO × MO), HO × Normande (HO × NO) et HO × Rouge scandinave (HO × RS) (d'après Heins *et al.*, 2012)

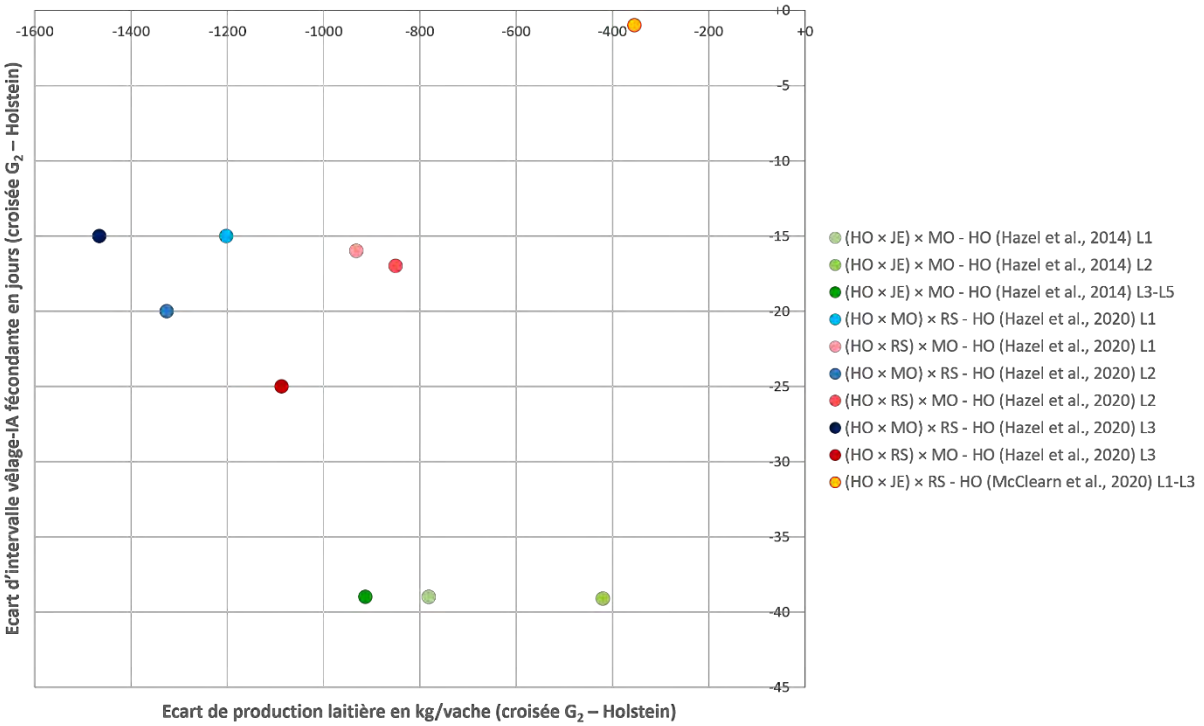


Figure 20 : Ecarts d'intervalle vêlage-insémination fécondante moyen en fonction de l'écart de production laitière moyenne entre vaches G_2 (de diverses combinaisons de races) et vaches Holstein obtenus dans plusieurs études. L1 à L5 : parités 1 à 5. La production laitière est standardisée à 305 jours. Les symboles à bord rouge correspondent à l'étude pour laquelle l'écart d'IVIAF moyen était non significatif entre G_2 et HO.

de la carrière d'une vache et comparé leurs valeurs entre HO pure et différentes F_1 (Figure 19) : ils/elle ont montré que les HO × NO, HO × MO et HO × RS avaient des profit cumulé à la carrière tous supérieurs aux vaches HO, respectivement à hauteur de 26%, 50% et 44%.

Performances des G_2 : les études qui comparent les performances zootechniques des croisées de deuxième génération (G_2) à celles des vaches HO et/ou des vaches F_1 sont beaucoup moins nombreuses, *a fortiori* pour des programmes de croisement rotatif trois voies. Les tendances et ordres de grandeur sont généralement similaires à celles observées pour les F_1 : les G_2 produisent en moyenne moins de lait et sont en moyennes plus fertiles (Figure 20, données brutes en Annexe 9). Bien qu'elles aient des taux butyreux et protéique supérieurs aux HO (McClearn et al., 2020a), elles produisent moins de matières grasse et moins de matière protéique (Figure 21, données brutes en Annexe 9). Leurs performances de fertilité restent également supérieures à celles des femelles HO, mais sans que des différences significatives avec celles des F_1 puissent être mises en évidence (Malchiodi et al., 2014a; McClearn et al., 2020a). Les résultats portant sur le SCS ou d'autres traits de santé sont trop peu nombreux pour permettre d'en dégager des tendances générales (Ferris et al., 2018). On trouve également quelques résultats sur les notes d'état corporel des G_2 similaires à ceux des F_1. Enfin, les travaux portant sur la composition fine du lait des G_2 font état de différences significatives et favorables pour les G_2 comparées aux HO, mais ne mettent pas en évidence de différences significatives entre G_2 et F_1 (Malchiodi et al., 2014b; Maurmayr et al., 2018; Saha et al., 2020).

Ce second volet de l'état de l'art met en évidence que les études les plus nombreuses et les plus anciennes sont celles qui comparent les performances de vaches F_1 à celles des populations parentales de race pure. Les études qui intègrent les performances de vaches G_2 sont moins nombreuses et souvent plus récentes (Ferris et al., 2018; Shonka-Martin et al., 2018; McClearn et al., 2020a) et celles qui intègrent les performances des générations suivantes sont encore plus rares (Adamczyk et al., 2018; Saha et al., 2020). La raison principale à cela est le manque de données disponibles. Dans le cas d'études basées sur des dispositifs expérimentaux, il résulte tout d'abord du fait que le croisement laitier est un processus dont les effets sur la composition du troupeau sont longs à se manifester, en raison notamment de la durée

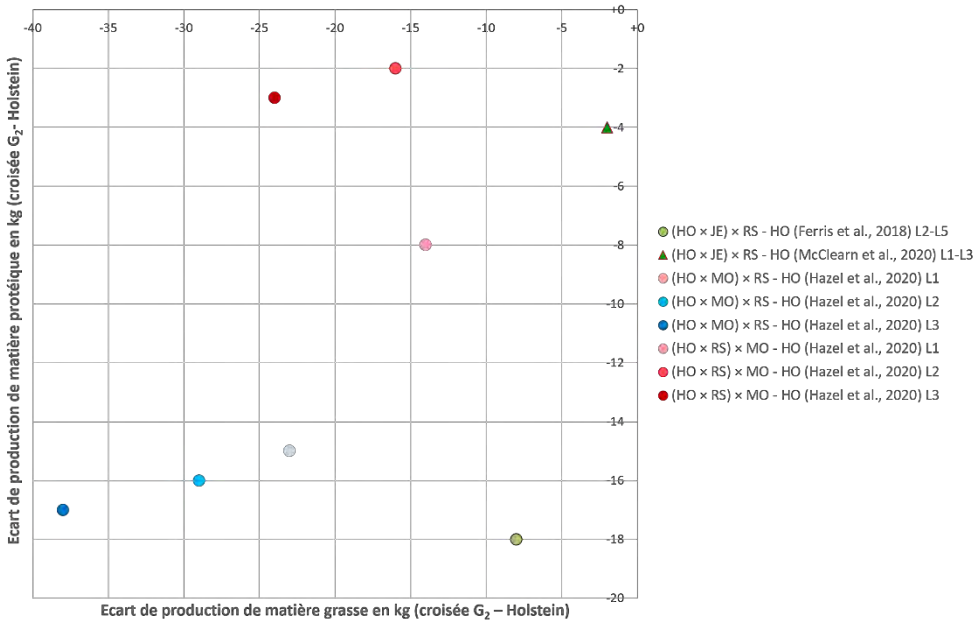


Figure 21 : Ecarts de production de matière protéique moyenne en fonction de l'écart de production de matière grasse moyenne entre vaches G_2 (de diverses combinaisons de races) et vaches Holstein obtenus dans plusieurs études. L1 à L5 : parités 1 à 5. Le symbole à bord rouge correspond à l'étude pour laquelle l'écart de production de MP moyen était non significatif entre G_2 et HO.

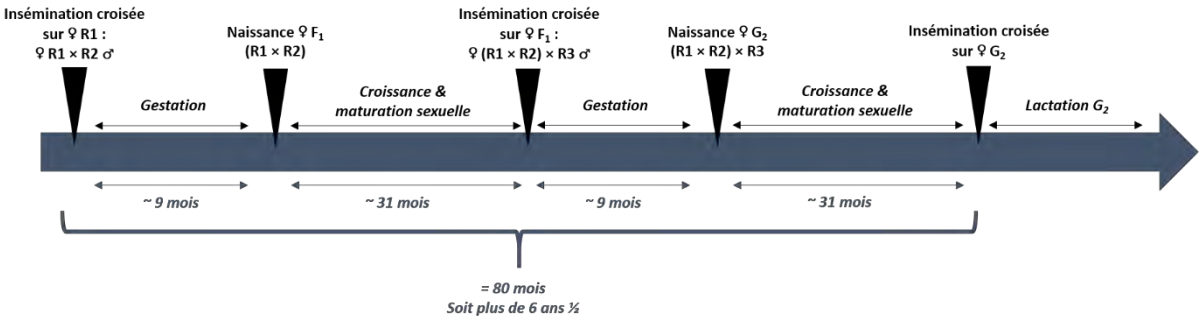


Figure 22 : Estimation du délai temporel entre l'insémination en croisement d'une vache de race pure du troupeau et l'entrée en lactation d'une femelle croisée de 1ère génération (F_1) d'une part, puis l'entrée en lactation d'une femelle croisée de 2ème génération (G_2) d'autre part. L'estimation s'appuie sur les hypothèses simplificatrices suivantes : âge au premier vêlage de 31 mois (Reproscope, 2017) et taux de réussite de l'IA1 de 100%

de la gestation et de la maturation sexuelle : ainsi, entre la première insémination croisée sur une vache de race pure et la première lactation d'une vache G_2, il se sera écoulé au minimum près de six années – en considérant un âge au premier vêlage de 30 mois (Reproscope, 2017) et en supposant un taux de réussite à la première insémination de 100% (Figure 22). Cela rend la mise en place et le suivi de tels dispositifs coûteux. Dans le cas d'études basées sur des données issues de fermes « commerciales », la problématique de temps long reste valable, à laquelle s'ajoute le fait que le croisement reste une pratique marginale, ce qui complexifie la constitution de population de référence de taille statistique satisfaisante. Enfin, il n'existe pas en France d'identification officielle des animaux croisés hormis le code 39 : or celui-ci indique simplement que l'animal est issu d'un accouplement croisé, mais ne renseigne en aucun cas les races employées, ni le sens de leur utilisation, et peut donc tout aussi bien désigner un individu issu d'un croisement terminal, un individu F_1 HO × Montbéliarde ou un individu croisé de troisième génération d'un croisement quatre voies ((HO × Jersiaise) × Rouge scandinave) × Brune). Cela nécessite donc un travail d'identification généalogique préalable à la constitution d'une population de référence pour l'analyse.

Ces travaux portant sur les performances du croisement laitier sont issus de contextes d'élevage – pays, climat, système d'élevage, *etc.* – très différents : ils permettent ainsi de dresser un comparatif toujours plus exhaustif des atouts des races et des combinaisons qu'il pourrait être intéressant de concrétiser dans des programmes de croisement. Leur principale limite réside cependant dans le fait que leurs résultats sont obtenus à l'échelle de l'animal uniquement, plus précisément que les comparaisons des génotypes – génotypes parentaux de race pure, F_1, G_2, etc. – se basent sur les performances d'individus moyens hypothétiques. Ils ne mobilisent pas ces résultats pour en évaluer les conséquences à l'échelle du troupeau, c'est-à-dire évaluer les conséquences de la diversité phénotypique générée par le croisement sur les performances du troupeau. Étendre l'évaluation des performances du croisement au niveau organisationnel du troupeau amène à devoir considérer la dynamique démographique de celui-ci car l'introduction et la conduite du croisement au sein du troupeau génère sa diversification génétique selon un processus au long cours, c'est-à-dire une cohabitation de génotypes différents – race(s) pure(s) et différentes générations de croisement – dont les proportions respectives au sein du troupeau

varient dans le temps. Aussi, l'évaluation des performances du croisement à l'échelle du troupeau semble nécessiter d'en étudier la dynamique d'évolution, en parallèle de la dynamique démographique et de la diversification génétique engendrée par l'introduction et la conduite du croisement laitier.

1.3.2.2. Performances du croisement laitier à l'échelle du troupeau : intégrer la dynamique d'évolution génétique du troupeau à des degrés différents

L'analyse des performances du croisement laitier à l'échelle du troupeau se heurte aux difficultés évoquées plus haut liées au manque de données disponibles au-delà des premières générations de croisement. Aussi, il n'existe à ma connaissance que très peu de travaux qui traitent de cette question dans la littérature, dont je vais présenter succinctement la méthodologie et les résultats principaux.

L'étude de Clasen et al. (2020) évalue les performances – zootechniques et technico-économiques – à l'échelle troupeau de six stratégies, définis par la combinaison de trois conduites génétiques, *i.e.* (i) Holstein pur, (ii) croisement terminal (Holstein × Rouge Suédoise) × Race allaitante et (iii) croisement alternatif Holstein × Rouge Suédoise, et de deux conduites générales, *i.e.* (i) agriculture conventionnelle et (ii) agriculture biologique (*AB* pour la suite). Elle repose sur un modèle de simulation stochastique individu-centré du troupeau, c'est-à-dire qui modélise le fonctionnement d'un ensemble d'entités autonomes (les « individus ») par un ensemble de règles de comportement au sein de l'environnement de modélisation ; puis, à chaque pas de temps et en fonction des variations de l'état de l'environnement, le modèle applique à chaque individu les règles de comportement pour déterminer son état au temps suivant ; enfin, en simulant l'ensemble des individus et leur variation d'état *i.e.* leur fonctionnement, on fait émerger le fonctionnement d'une suprastructure, constituée de tous les individus. Les variations d'états de l'environnement ou les règles de fonctionnement des individus peuvent dépendre de processus probabilistes, on parle donc de modèle stochastique (Goreaud, 2004). Ainsi, Clasen et al. (2020) utilisent le modèle *SimHerd* (Østergaard et al., 2000) : celui-ci décrit le génotype de l'animal (proportion des races, hétérosis) et son état (âge, stade de lactation, production de lait, poids, stade du cycle œstral, stade de gestation, état sanitaire, statut de l'abattage). Suivant un pas de temps d'une semaine, il simule des évènements discrets

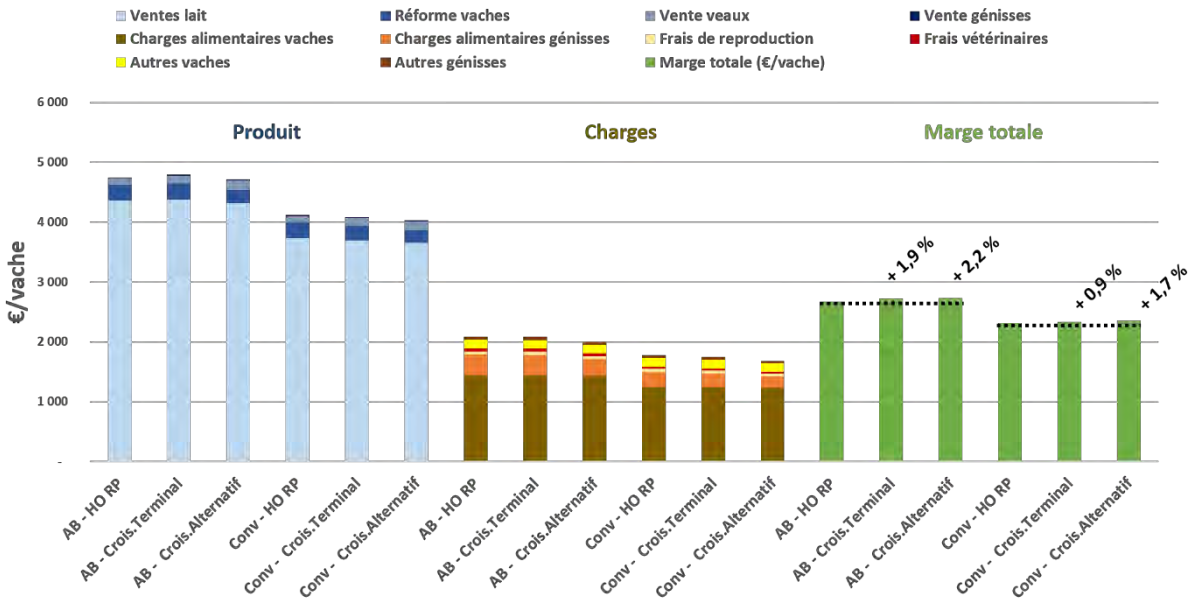


Figure 23 : Comparaison du produit, des charges et de la marge annuelle (en €/vache) pour deux types de systèmes – en agriculture biologique (*AB*) et en agriculture conventionnelle (*Conv*) – et trois troupeaux bovins laitiers : un troupeau de Holstein suédoises (*HO RP*), un troupeau ayant introduit un programme de croisement terminal (HO × Rouge scandinave) × Race allaitante (*Crois.Terminal*) et un troupeau ayant introduit un programme de croisement alternatif HO × Rouge scandinave (*Crois.Alternatif*). Résultats de l'étude de Clasen et al. (2020)

(maladie, détection de chaleur, avortement, conception, mort, abattage) de manière probabiliste (paramètres d'entrée du modèle) qui peuvent venir modifier l'état de l'animal et du troupeau dans son ensemble et notamment sa démographie. Les paramètres de sorties du modèle sont des performances zootechniques à l'échelle du troupeau qui peuvent ensuite être utilisées pour effectuer des calculs économiques. Le fonctionnement des six troupeaux a été simulé pendant cinquante ans, jusqu'à atteindre une *situation d'équilibre*, c'est-à-dire où la composition du troupeau reste stable (situation généralement atteinte au bout de vingt années de simulation). Les principaux résultats de cette étude sont les suivants (Figure 23) : l'état d'équilibre a été atteint pour un troupeau en croisement alternatif intégralement composé de vaches croisées ce qui est assez logique au vu du programme de croisement alternatif choisi. En ce qui concerne les performances zootechniques et économiques, comparé à la conduite en race pure, la stratégie de croisement alternatif permet d'augmenter la marge économique annuelle par vache, en système conventionnel (+ 39€/vache/an) comme en système en agriculture biologique (+ 59€/vache/an). Cette rentabilité supérieure du croisement alternatif par rapport à la conduite en race pure est principalement due à l'amélioration des performances de traits fonctionnels, en particulier la fertilité, ce qui a permis de diminuer le taux de renouvellement des troupeau croisés (- 7,9%/vache/an pour les systèmes conventionnels, - 9,2%/vache/an pour les systèmes en AB), ouvrant la possibilité d'accroître le taux de « croisement viande » et donc de diminuer les coûts d'entretiens des jeunes animaux (- 48€/vache/an en système conventionnel et - 64 €/vache/an en systèmes AB) tout en augmentant le produit viande en vif (+ 42 €/vache/an en système conventionnel et + 41€ en système en AB). Dans le même temps, la production laitière a très peu diminué dans les troupeaux où a été introduit le croisement alternatif (-184 kg/vache/an soit - 1,8% en système conventionnel et -115 kg/vache/an soit -1,3% en système en AB), dont les conséquences sur le produit lait (-78€/vache en système conventionnel et -37 €/vache en système AB) sont contrebalancées par ailleurs. Au regard de la description du modèle de simulation, il semblerait que celui-ci permette un suivi de la dynamique démographique du troupeau et de ses performances selon un pas de temps fin. Cependant, seuls les résultats obtenus une fois la situation d'équilibre atteinte sont présentés : ceci ne permet pas d'apprécier la dynamique de la simulation au-delà de considérer, pour une conduite donnée (agriculture conventionnelle ou agriculture biologique), le troupeau Holstein pur comme état initial et le troupeau en croisement

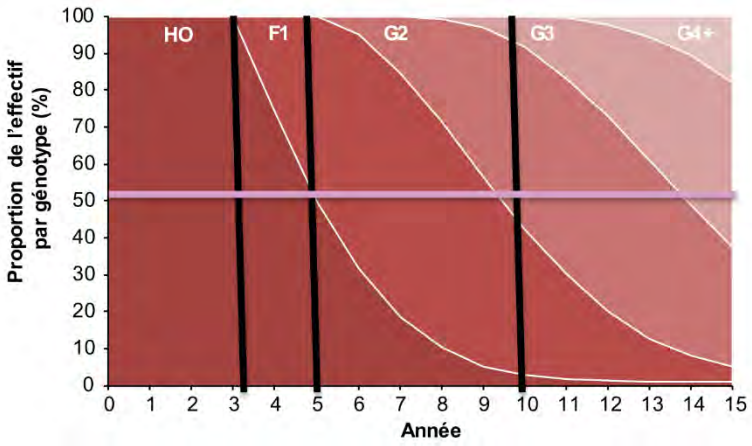


Figure 24 : Résultats d'une simulation sur 15 ans montrant l'évolution de la composition en génotypes d'un troupeau suite à l'introduction d'une stratégie de croisement rotatif 3 voies sur 100% des femelles Holstein en année 1 : proportions de vaches de race pure Prim'Holstein (HO), issues de 1ère (F1), 2ème (G2), 3ème (G3) et 4ème génération et plus (G4+) de croisement (Dezetter *et al.*, 2019)

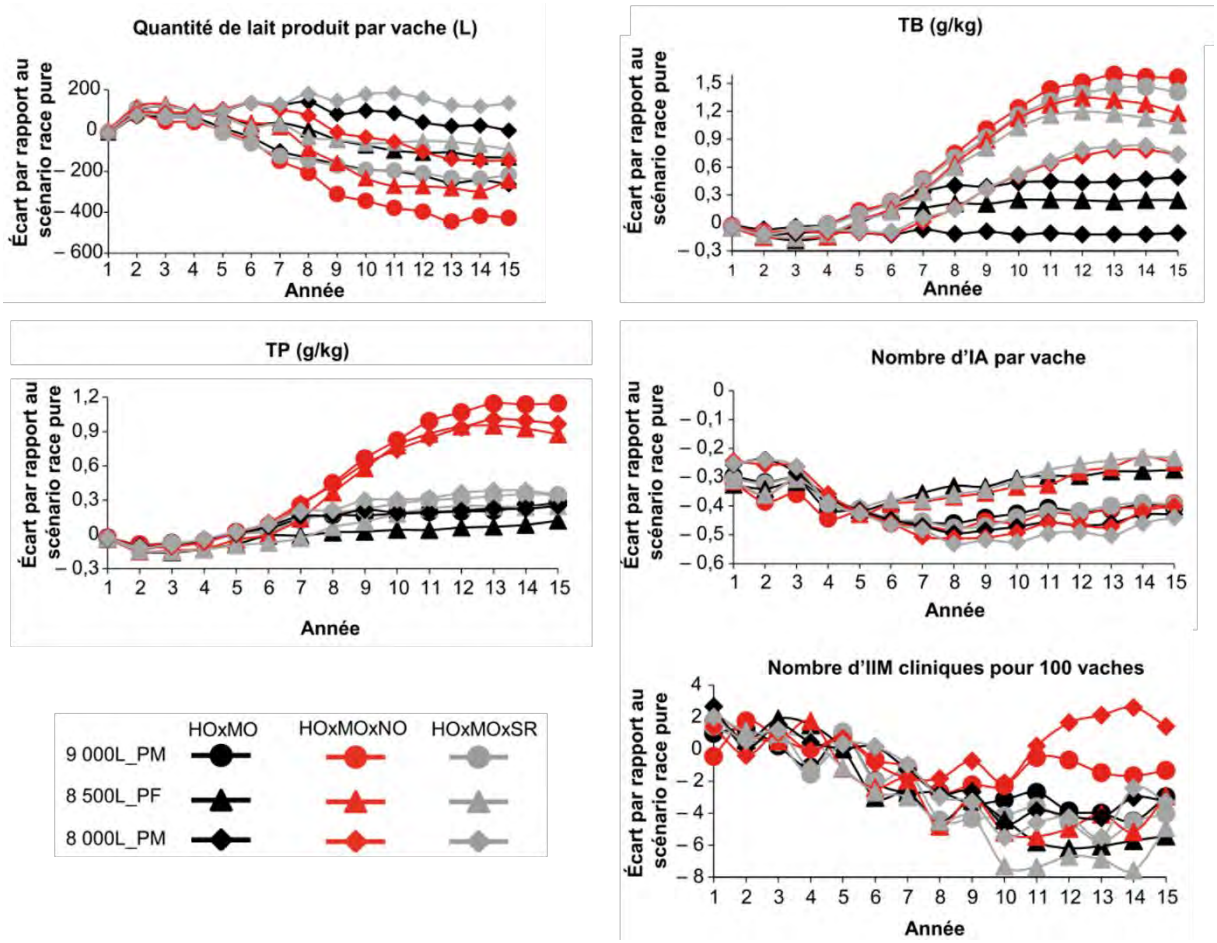


Figure 25 : Écarts de productivité par vache et par an, de taux, de fertilité et de sensibilité aux infections intra-mammaires (IMM) des trois stratégies de croisement par rapport à la conduite en race pure Prim'Holstein dans différents ateliers laitiers (Dezetter *et al.*, 2019)

alternatif comme état final. L'étude de Dezetter et al. (2017), complétée par Dezetter et al. (2019), s'appuie également sur la construction d'un modèle de simulation dynamique, individu-centré, mécaniste et stochastique pour évaluer les effets économiques résultant de l'évolution des performances (production, fertilité, santé et renouvellement) du troupeau initialement conduit en Holstein pur au sein duquel est introduit puis conduit le croisement laitier. Trois programmes de croisement ont été testés et comparés à la simulation du troupeau Holstein pur : (i) croisement alternatif Holstein × Montbéliarde, *HO × MO* ci-après, (ii) croisement trois voies (Holstein × Montbéliarde) × Normande*, (HO × MO)* × *NO* ci-après et (iii) croisement trois voies (Holstein × Montbéliarde) × Rouge Scandinave, *(HO × MO)* × *RS* ci-après. Les conséquences sur les performances du troupeau des trois programmes de croisement ont été testées au sein de trois types de troupeaux : (i) un troupeau avec un niveau de production de 9000 L/vache/an et une prévalence moyenne de problèmes de santé et de reproduction (*9000L_PM* ci-après), (ii) un troupeau avec un niveau de production de 8500 L/vache/an et une prévalence forte de problèmes de santé et de reproduction (*8500L_PF* ci-après) et (iii) un troupeau avec un niveau de production de 8000 L/vache/an et une prévalence moyenne de problèmes de santé et de reproduction (*8000L_PM* ci-après). Le modèle permet de simuler l'évolution des performances des troupeaux qui résulte du progrès génétique obtenu via le choix des taureaux utilisé dans les stratégies d'accouplement. D'autres paramètres d'entrées (prix du lait, coût et produit de la réforme, charges relatives à la gestion du troupeau, *etc.*) permettent ensuite d'estimer la marge brute par vache laitière pour chacun des trois systèmes et son évolution au cours de la période de simulation. La simulation a été réalisée sur une période de 15 ans à compter de la première insémination croisée et en maintenant un effectif du troupeau constant de 120 vaches. L'évolution de la composition en génotypes du troupeau au cours de la période de simulation montre qu'il faut attendre cinq - respectivement dix ans – pour que les F_1 – respectivement les G2 – constituent la moitié de l'effectif du troupeau (Figure 24). Les résultats de la simulation sont exprimés par vache et par an, et les performances des systèmes conduits en croisement sont présentées relativement à celles d'un système conduit en HO pur. Au bout de cinq années de simulation, la productivité laitière moyenne des vaches des systèmes conduits en croisement devient inférieure à celle en HO pures, et ce quel que soit le programme de croisement mis en place (Figure 25). Cette baisse de productivité est d'autant plus prononcée que la productivité était élevée à l'état initial,

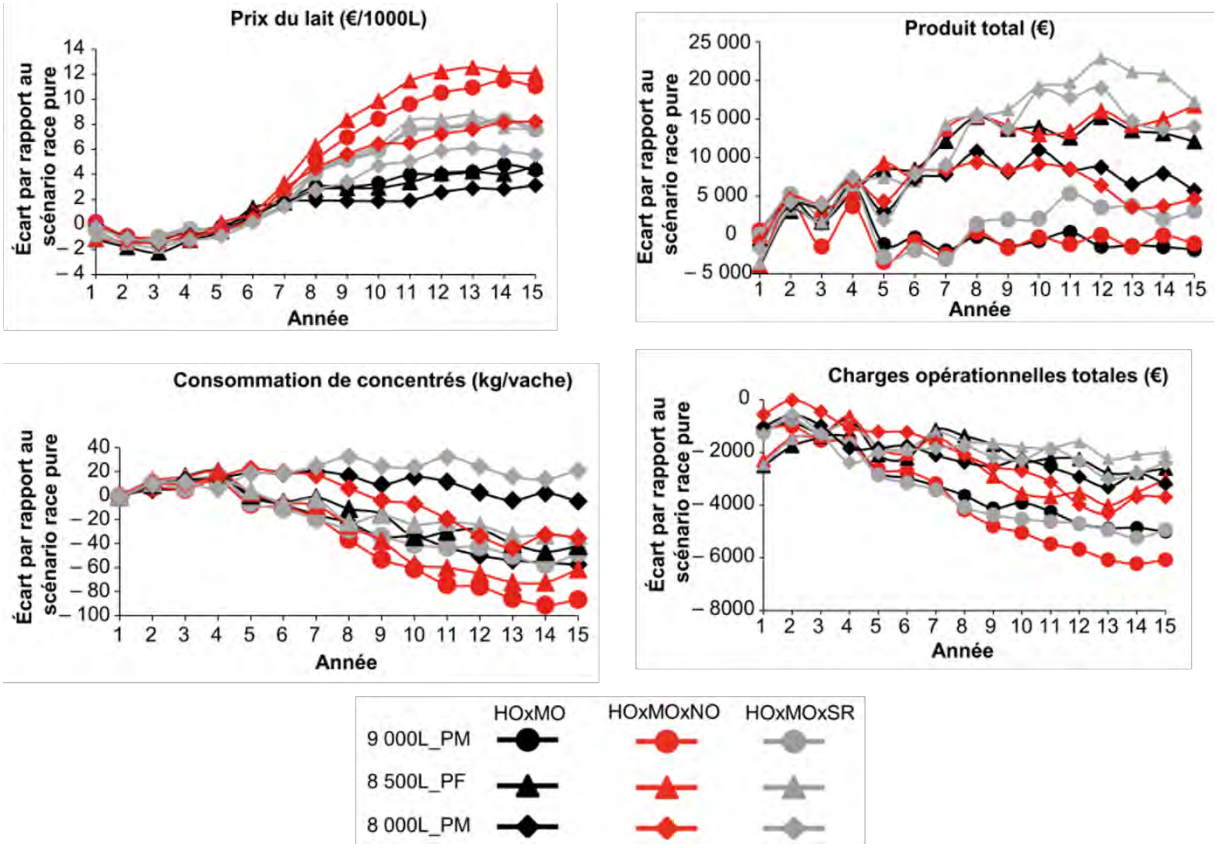


Figure 26 : Écarts de prix du lait, de produit total, de consommation de concentrés par vache et par an et de charges opérationnelles totales des trois stratégies de croisement par rapport à la conduite en race pure Prim'Holstein dans différents ateliers laitiers (Dezetter *et al.*, 2019)

c'est-à-dire pour les ateliers *8500L_PF* et *9000L_PM*. A l'inverse, les autres performances zootechniques (taux de matière utile, reproduction, santé de la mamelle et longévité) sont toujours favorables au systèmes croisés. L'augmentation des taux est plus importante dans les ateliers *8500L_PF* et *9000L_PM* comparés à l'atelier *8000_PF*, et d'autant plus élevée pour les stratégies de croisement trois voies comparé à la stratégie de croisement alternatif HO × MO, ce qui permet une valorisation du lait supérieure pour les combinaisons d'ateliers *8500L_PF* et *9000L_PM* adoptant le croisement trois voies (Figure 26). Cependant, dans l'atelier *9000L_PM,* le produit total augmente peu comparé aux deux autres systèmes, car la plus-value du produit viande – permise par l'utilisation de races mixtes MO et NO – ne suffit pas à compenser la perte de productivité laitière. A l'inverse, dans les ateliers moins productifs, les bénéfices du croisement sur le produit viande – pour l'atelier *8500L_*PF – et l'hétérosis favorable au produit lait – pour l'atelier *8000L_PM* – permettent une forte augmentation du produit total. Concernant les charges opérationnelles, celles-ci diminuent dans tous les systèmes et pour toutes les stratégies de croisement utilisées (Figure 26) : la diminution des infections intra-mammaires permet de réduire les frais de leur traitement, l'amélioration de la fertilité permet de réduire les frais d'insémination et la durée de non-productivité des vaches et la consommation de concentrés inférieure des vaches croisées pour produire un volume de lait de base permet une diminution des charges d'alimentation. La comparaison des marges brutes entre stratégies d'accouplement par système montre que ce sont les systèmes en croisement trois voies qui l'améliorent le plus au cours des 15 années de simulation (Figure 27). Cette augmentation relative de la marge brute est d'autant plus prononcée dans les systèmes moins productifs (*8000L_PM*) et dans les systèmes où les performances de fertilité initiales sont fortement dégradées (*8500L_PF*). Le travail de Dezetter et al. (2017), rend lui aussi compte des performances zootechniques et économiques du croisement laitier à l'échelle troupeau. Mais à la différence de l'étude de Clasen et al. (2020), il intègre non seulement des programmes de croisement trois voies jusqu'en G_2, mais également un suivi en parallèle des dynamiques d'évolution de la diversité génétique intra-troupeau et de la diversité phénotypique intra-troupeau qu'elle supporte. Cependant, en s'appuyant sur la modélisation et la simulation de troupeaux croisés pour pallier au manque de données disponibles au-delà de la première génération de croisées, on comprend aisément que le travail de Dezetter et al. (2017) est contraint à certaines hypothèses, simplificatrices au regard des multiples modalités

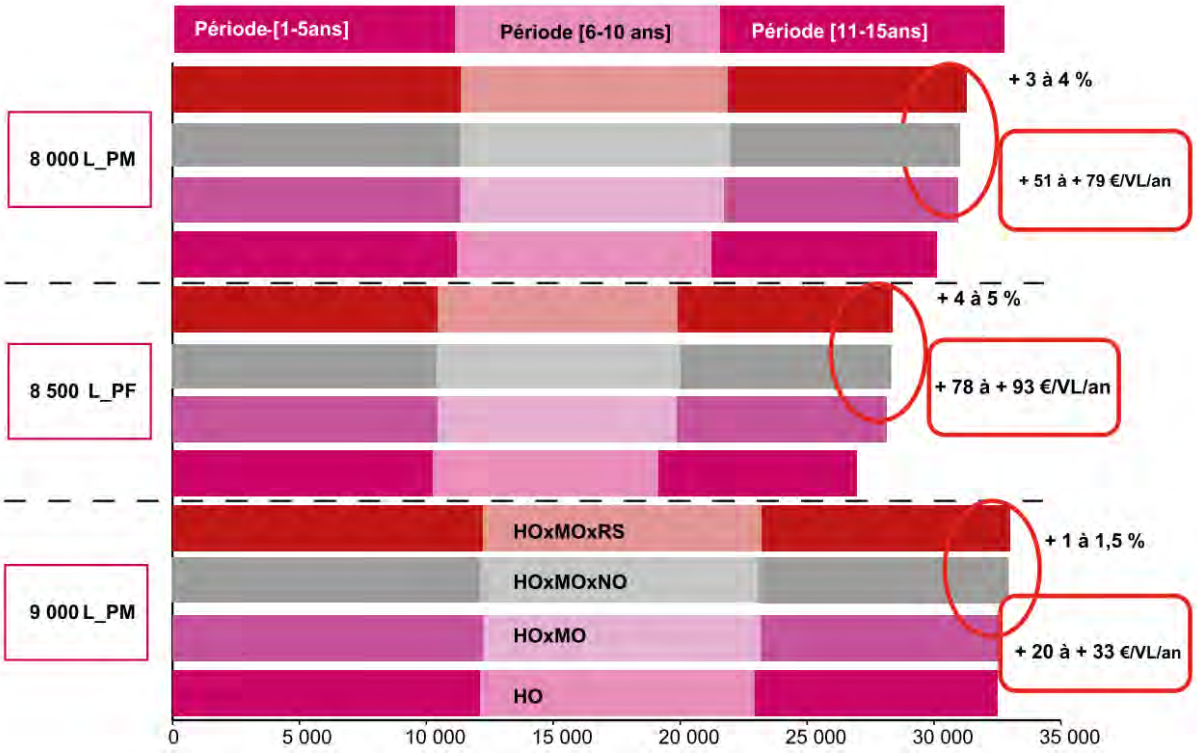


Figure 27 : Marge brute (sans coût des fourrages) par vache laitière actualisée et cumulée sur les 15 années de simulations pour les quatre stratégies d'accouplement (HO pure, croisement alternatif HO × MO, croisement trois voies (HO × MO) × RS et croisement trois voies (HO × MO) × NO)) et dans les trois ateliers laitiers : *8000L_PM* (120 vaches laitières avec un niveau laitier initial de 8000 litres/VL/an et une prévalence moyenne des troubles de santé et de fertilité) ; *8500L_PF* (120 vaches laitières avec un niveau laitier initial de 8500 litres/VL/an et une prévalence forte des troubles de santé et de fertilité) ; *9000L_PM* (120 vaches laitières avec un niveau laitier initial de 9000 litres/VL/an et une prévalence moyenne des troubles de santé et de fertilité). (Dezetter *et al.*, 2019)

selon laquelle le croisement laitier peut être introduit et conduit : il suppose par exemple l'introduction et la conduite d'un unique programme de croisement au sein du troupeau Holstein pur avec un plan d'accouplement appliqué de manière stricte (*e.g.*, valeurs fixées du taux d'accouplement en croisement sur les Holstein et sur les F_1). Or certains travaux suggèrent qu'un nombre négligeable d'éleveur·euse·s mettent en place des programmes de croisement « *peu définis* » (Beaumard et al., 2010) ou conduisent transitoirement voire durablement plusieurs programmes en parallèle au sein de leur troupeau (Quénon et al., 2018). Une autre hypothèse faite par Dezetter et al. (2017) concerne les objectifs généraux affectés tour à tour aux troupeaux, sous forme de système de contrainte : le premier consiste à maintenir la taille du troupeau constante ; cependant, la tendance en France est plutôt à l'agrandissement des cheptels bovins laitiers (Idele, 2019). Le second consiste en un maintien de la production laitière à un niveau constant – et donc à un agrandissement du cheptel pour compenser la production laitière des vaches croisées F_1 et G_2 inférieure à celle des vaches Holstein – pour répondre à la demande des coopératives laitières (Schlecht et Spiller, 2012) ; s'il s'agît d'une tendance plus réaliste, il ne s'agît cependant d'un objectif poursuivi par tous·tes les éleveur·euse·s qui introduisent le croisement laitier au sein de leur troupeau : certain·e·s cherchent à améliorer les taux, d'autres la rusticité du troupeau, *etc.* (Quénon et al., 2018)

1.3.3. Synthèse de l'état de l'art et questions en suspens

De l'état de l'art réalisé, je retiens plusieurs points :

- Les études sur le croisement laitier adoptent une entrée par programme de croisement, avec très généralement la Holstein comme race de base. Les programmes de croisement les plus recensés sont HO × Montbéliarde, HO × Brune et HO × Rouge scandinave en F_1, et (HO × Montbéliarde) × Rouge scandinave et (HO × Rouge scandinave) × Montbéliarde en G_2.
- Ces études montrent que les performances des F_1 issues de ces programmes sont généralement conformes aux bénéfices et contreparties de la théorie génétique du croisement et de l'estimation des

valeurs d'hétérosis : comparé aux individus parentaux HO, les F_1 de ces programmes de croisement ont des productions laitières plus faibles et de meilleures performances pour les taux, la fertilité et la longévité. Les performances des G_2 sont quant à elles inférieures à celles des races pures pour les traits de production mais restent favorables pour les taux de matière utile et les traits fonctionnels.

- A l'échelle du troupeau, le croisement présente des bénéfices économiques pour les systèmes bovins laitiers qui le mettent en place, selon les conditions des modèles de simulation définies.
- Le croisement trois voies est considéré comme un compromis entre la maximisation dans le temps long du pourcentage d'hétérosis – 86% *vs.* 93% entre le croisement trois voies et quatre voies – et les contraintes de gestion et de valorisation de l'ajout de nouvelles races au programme de croisement (McAllister, 2002) (*e.g.*, tenue de la généalogie et gestion des accouplements). Cependant, il n'y a pas d'études qui traitent de la gestion technique du troupeau croisé et encore moins de l'évolution de cette gestion au cours du passage d'un troupeau de race pure à un troupeau croisé. Ceux-ci sont simplifiés voire non pris en compte dans les études de modélisation-simulation.
- Il n'y a pas d'études qui questionnent les bénéfices potentiels à retirer de la cohabitation des entités animales au sein du troupeau au cours du passage d'un troupeau de race pure à un troupeau croisé.

1.4. Question de recherche

1.4.1. Problématique

La mise en place et la conduite du croisement présente des bénéfices zootechniques et économiques. Cependant, ceux-ci sont plus ou moins marqués selon les modalités de sa gestion technique (programme de croisement choisi, stratégies d'accouplement, de renouvellement et de réforme *etc.*) et diverses contraintes relatives à l'état du troupeau (santé, fertilité) et aux objectifs affectés par l'éleveur·euse au troupeau (niveau de production laitière visé). De plus, ces bénéfices n'apparaissent qu'au bout de plusieurs années après les premières inséminations croisées sur les femelles de race pure, plus exactement une fois la part de vaches F_1 en lactation suffisamment élevée dans le troupeau. Or la « vitesse » à laquelle cette composition du troupeau est atteinte est intrinsèquement liée à la conduite du croisement et sa gestion technique, à commencer par la part des femelles inséminées en croisement, et ce à chaque génération. A notre connaissance, la gestion technique du croisement telle que pratiquée par les éleveur·euse·s, et *a fortiori* comment celle-ci évolue lors du passage d'un troupeau en race pure vers un troupeau croisé, n'a fait l'objet d'aucune étude. En général, celles qui décrivent la gestion à l'échelle des fermes dans lesquelles le croisement est mis en place se limitent à décrire les motivations des éleveur·euse·s à mettre en place le croisement, les programmes de croisement utilisés ou les caractéristiques structurelles générales des fermes. Ainsi, l'analyse compréhensive de Weigel et Barlass (2010) a permis de décrire les caractéristiques structurelles de 50 fermes américaines utilisant le croisement laitier, les raisons et motivations ayant conduit les éleveur·euse·s à le mettre en place dans leur troupeau, les programmes de croisement choisis ainsi qu'une évaluation déclarative des éleveur·euse·s quant à la capacité des vaches croisées à répondre à leurs objectifs. En France, Beaumard et al. (2010) ont caractérisé les stratégies de croisement – y compris de croisement d'absorption et d'amélioration – et le niveau d'intensivité de 63 élevages bovins laitiers et analysé les motivations des éleveur·euse·s à mettre en place le croisement. Bougouin et Le Mézec (2010) ont dressé un état des lieux des races utilisées dans les programmes de croisement laitier utilisés en France.

Le croisement trois voies est considéré comme un compromis entre la maximisation dans le temps long du pourcentage d'hétérosis et les contraintes de gestion et de valorisation de l'ajout de nouvelles races au programme de croisement (*e.g.*, tenue de

la généalogie et gestion des accouplements). Cependant, la gestion technique de tels programmes de croisement reste peu étudiée, en raison du manque de données disponibles pour les générations de croisement au-delà de la F_1. Or il s'agit de questions qu'un·e éleveur·euse qui introduit le croisement rotatif au sein de son troupeau est inéluctablement amené·e à se poser : quel plan d'accouplement mettre en place avec les individus F_1 ? Croiser en retour (i.e. avec un taureau de la race initiale) et adopter un schéma de croisement deux voies réduira l'hétérosis et peut donc sembler en inadéquation avec l'objectif d'améliorer les performances du troupeau en matière de traits fonctionnels. Introduire une troisième race et adopter un schéma de croisement rotatif trois voies permet en théorie de maintenir l'hétérosis sur les générations suivantes (McAllister, 2002) mais les références empiriques sont, on l'a vu, encore peu nombreuses. Plus généralement, les modalités selon laquelle introduire et conduire le croisement laitier au sein d'un troupeau sont susceptibles de générer un certain nombre de questionnements : quel(s) schéma(s) de croisement introduire ? Sur l'intégralité ou seulement une partie du troupeau ? Si l'introduction est faite sur une partie du troupeau seulement, sur la base de quels critères choisir les vaches concernées ? Comment raisonner les accouplements sans index ? Etant supposé que le croisement améliore la fertilité du troupeau, quelles en seront les conséquences sur sa démographie ? Ainsi, l'introduction du croisement au sein du troupeau en race pure et la conduite d'un troupeau croisé ne vont pas de soi. Ceci vient interroger l'évolution des pratiques de configuration du troupeau – *i.e.* gestion des accouplements et de la reproduction, du renouvellement et de la réforme – au cours de l'introduction du croisement, qui n'a, à notre connaissance, pas encore fait l'objet de recherches.

D'autre part, en n'adoptant que rarement l'échelle du troupeau, les études sur le croisement laitier n'interroge pas la question de la diversité animale générée à l'échelle du troupeau par l'utilisation du croisement. A l'échelle individuelle, le croisement laitier favorise l'hétérozygotie : un individu produit de croisement présente un taux d'hétérozygotie supérieur à celui des populations parentales. A l'échelle du troupeau bovin laitier, du fait de la durée des processus biologiques de maturation sexuelle et de gestation, un troupeau de vaches laitières est composé de femelles d'âges différents. Dans le cas particulier d'un troupeau intégralement composé de vaches de race pure et au sein duquel est mis en place un programme de croisement, celui-ci

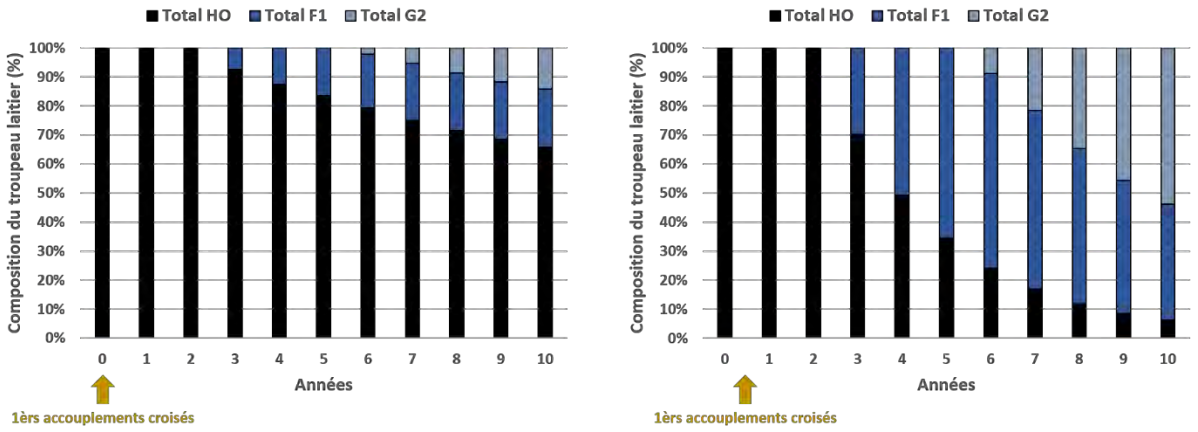


Figure 28 : Effet sur l'évolution de la composition du troupeau de deux modes de gestion du croisement rotatif différents : taux de croisement sur les femelles de race pure de 25% (à gauche) et de 100% (à droite). Résultats d'une simulation d'un troupeau de 100 vaches sur 10 ans

sera amené à voir cohabiter – au moins transitoirement – en son sein des individus de la race pure initiale ainsi que des individus de plusieurs générations de croisement successives (Figure 28). Ces individus de race pure et issus de générations de croisement successives diffèrent génétiquement : par conséquent, la mise en place d'un programme de croisement laitier au sein d'un troupeau initialement conduit en race pure génère une *diversité génétique* à l'échelle du troupeau, c'est-à-dire à la cohabitation de génotypes différents. Le croisement rotatif est donc une pratique de diversification génétique du troupeau bovin laitier. Cependant, les études sur le croisement laitier ne traitent pas des conséquences de cette cohabitation d'entités animales diversifiées : quelles sont les conséquences sur les performances du troupeau dans son ensemble et leur évolution ? Quels en sont les potentiels bénéfices et inconvénients ? Comment peuvent-ils être géré par l'éleveur·euse ? De plus, la conduite du croisement rotatif induit un renouvellement continuel des types génétiques qui cohabitent au sein du troupeau, et donc d'entités animales aux performances potentiellement diversifiées. Par conséquent, les performances du troupeau croisé sont susceptibles d'évoluer avec l'évolution de sa composition en entité animales génétiques diversifiées, laquelle dépend des pratiques de gestion du croisement, et plus généralement de la configuration du troupeau.

1.4.2. Question et sous-questions de recherche

Comment évoluent les pratiques de configuration du troupeau et les performances zootechniques associées au cours de la mise en place du croisement rotatif dans un troupeau bovin laitier conduit en race pure ?

Pour répondre à cette question, nous la décomposons en trois sous-questions de recherche:

Sous-question 1 : Quels sont les modes de gestion technique mis en œuvre par les éleveur·euse·s pour introduire le croisement rotatif au sein du troupeau en race pure ?

Sous-question 2 : La diversité de génotypes au sein du troupeau générée par la pratique du croisement rotatif améliore-t-elle ses performances zootechniques ?

Sous-question 3 : Quelle part le croisement rotatif explique-t-il dans l'évolution des performances de troupeaux bovins laitiers dans lesquels il est mis en place ?

Chapitre 2 – Cadre d'analyse et démarche générale

Ce chapitre vise à décrire et justifier le cadre conceptuel que j'ai construit pour analyser ma question de recherche ainsi que la démarche générale que j'ai adoptée pour y répondre. Tout d'abord, je présenterai les deux cadres théoriques (celui des système d'élevage et celui de la gestion de la diversité animale en élevage) que je mobilise avant de décrire la manière dont je les articule pour construire mon cadre d'analyse de l'évolution des pratiques et des performances du troupeau bovin laitier induite par l'utilisation du croisement rotatif. Ce cadre permet d'analyser l'introduction et la gestion du croisement rotatif dans un troupeau bovin laitier initialement en race pure comme une transition technique. Ensuite, je préciserai et justifierai le fait d'avoir centré ma démarche de recherche sur des analyses rétrospectives de fermes commerciales. Enfin, je présenterai le dispositif de recherche combinant des approches qualitatives et quantitatives pour traiter les trois sous-questions de recherche.

2.1. Construction d'un cadre d'analyse ancré en zootechnie système

2.1.1. Application du cadre conceptuel du système d'élevage au cas du croisement rotatif

La formulation des sous-questions de recherche témoigne de ma volonté de traiter la thématique du croisement rotatif sous l'angle de la zootechnie système. Ainsi, il s'agit d'analyser le processus d'élaboration des performances zootechniques des troupeaux croisés en m'appuyant sur les modalités selon lesquelles le croisement rotatif est mis en place et géré en leur sein par les éleveur·euse·s.

Le système d'élevage est défini comme « *un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisé par l'homme en fonction de ses objectifs pour faire produire (…) et se reproduire un collectif d'animaux domestiques en valorisant et renouvelant différentes ressources* » (Dedieu et al., 2008, d'après Landais, 1987). Le concept de système d'élevage a été élaboré dans les années 80 par des zootechnicien·ne·s (Landais, 1987 et Gibon et al., 1988, cité·e·s par Dedieu et al., 2008), en réponse aux questions de recherche que soulevait le constat d'une adoption limitée de techniques d'intensification par les agriculteur·rice·s. De ce constat a émergé la proposition de

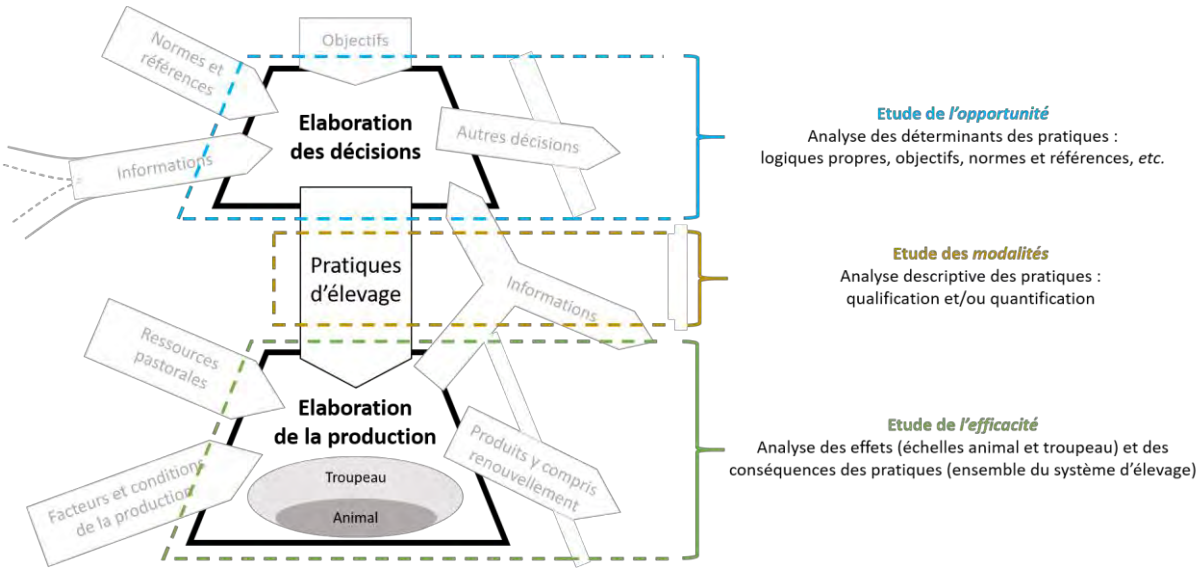


Figure 29 : Formalisation du système d'élevage comme l'articulation d'un sous-système décisionnel et d'un sous-système biotechnique d'élaboration de la production (Dedieu et al. 2008, d'après Osty et Landais, 1991). L'analyse des pratiques d'élevage selon trois perspectives complémentaires – opportunité, modalités et efficacité – permet une compréhension du système d'élevage dans son ensemble (d'après Landais et Deffontaines, 1989)

déplacer l'objet d'analyse en zootechnie des *techniques d'élevage* aux modalités de leur mise en œuvre concrète et contextuelle par les éleveur·euse·s, désignées sous le nom de *pratiques d'élevage* (Landais et al., 1988). La distinction faite entre *techniques* et *pratiques* est explicitée par Milleville (1987) : « *Si les techniques peuvent être décrites indépendamment de l'agriculteur qui les met en œuvre, il n'en est pas de même des pratiques, qui sont liées à l'opérateur et aux conditions dans lesquelles il exerce son métier* ». Le déplacement de l'objet d'analyse vers les pratiques d'élevage relève d'une proposition d'intégrer à la formalisation traditionnelle de l'activité d'élevage par la zootechnie de l'époque – alors essentiellement vue comme un ensemble de techniques d'exploitation d'un groupe d'animaux – la dimension d'activité humaine.

Les développements théoriques et méthodologiques de cette proposition ont conduit à formaliser le système d'élevage comme un « *système biologique finalisé et piloté* » (Landais, 1992), pouvant être représenté comme le couplage d'un sous-système anthropique d'*élaboration des décisions* – aussi appelé *modèle d'action* (Duru, 1988; Sebillotte and Soler, 1988a) – et un sous-système biotechnique *d'élaboration de la production* (Figure 29). Ces deux sous-systèmes sont interreliés, au travers des pratiques d'une part, lesquelles traduisent et matérialisent les décisions de l'éleveur·euse en affectant le système biotechnique, et des retours d'informations d'autre part, lesquelles correspondent aux réponses du système biotechnique aux pratiques mise en œuvre (Landais and Deffontaines, 1989; Dedieu et al., 2008). Cette représentation met en évidence la place centrale qu'occupe l'analyse des pratiques dans l'étude des systèmes d'élevage. L'analyse des pratiques peut se faire selon trois perspectives complémentaires (Figure 29), développées par Landais et al. (1988) : *modalité, efficacité* et *opportunité* des pratiques. Les *modalités* des pratiques correspondent à la « *manière de faire* » et s'étudient donc par une analyse descriptive des pratiques en les qualifiant (*e.g.*, les races et leur séquence d'association dans un programme de croisement) et les quantifiant (*e.g.*, le pourcentage de vaches du troupeau inséminées selon ce programme de croisement). L'*efficacité* des pratiques rend compte de la combinaison des effets directs des pratiques, *i.e.* sur l'objet affecté par ces pratiques (animal ou le troupeau) et de leurs conséquences sur des éléments du système d'élevage qui ne sont pas directement affectés par ces pratiques : les effets des pratiques s'étudient par une évaluation des performances aux échelles

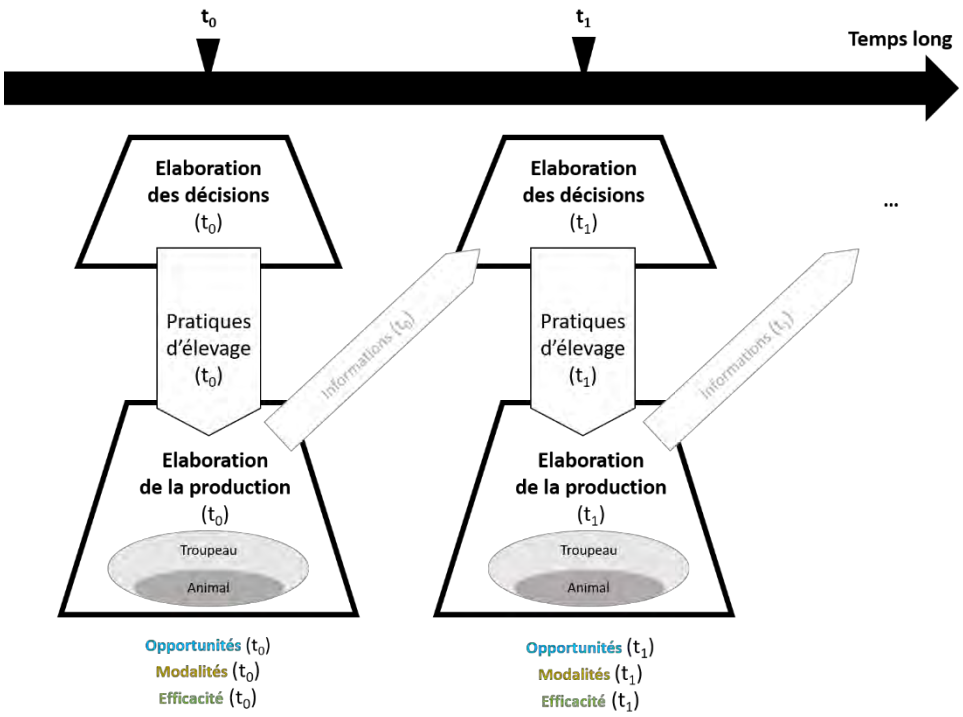


Figure 30 : Formalisation du système d'élevage selon une perspective dynamique. L'étude sur le temps long des opportunités, modalités et efficacité des pratiques d'élevage permet une analyse fonctionnelle dynamique du système d'élevage

animal et troupeau, tandis que leurs conséquences nécessitent une prise de recul sur la structure et le fonctionnement global du système d'élevage. Enfin, les *opportunités* des pratiques sont définies comme les déterminants de leur mise en œuvre par l'éleveur·euse à un instant donné dans le contexte singulier de sa ferme, c'est-à-dire ses objectifs propres – qui ne visent donc pas nécessairement l'*efficacité* (Le Moigne, 1977, cité par Landais et al., 1988) – et la représentation qu'il/elle se fait de son système, de ses contraintes et de ses atouts selon des normes et des références (Blanc-Pamard et al., 1992; Darré et al., 2004). Ainsi, l'étude des pratiques d'élevage, en combinant l'analyse de leurs opportunités, modalités et efficacité, permet une compréhension du fonctionnement du système d'élevage à différents niveaux de son organisation : animal, troupeau, sous-système biotechnique, sous-système décisionnel, système d'élevage. Outre la prise en compte de l'échelle organisationnelle, l'étude des pratiques d'élevages permet une analyse du fonctionnement dynamique du système d'élevage (Figure 30) : la description des changements ou du maintien en l'état dans le temps des pratiques (*i.e.* modalités) permet ensuite d'inférer les opportunités qui ont conduit l'éleveur·euse à les mettre en œuvre, puis d'étudier leur efficacité par rapport à la situation initiale. L'efficacité des pratiques constituant une des sources d'information mobilisées par les éleveur·euse·s pour élaborer leurs décisions futures (Magne, 2007), le suivi dans le temps des pratiques permet une analyse fonctionnelle et dynamique des systèmes d'élevage. Celle-ci peut être réalisée à l'échelle du cycle de production annuel – *temps rond* (Landais et al., 1988) – ou à l'échelle de l'histoire de l'exploitation – *temps long* (Landais et al., 1988). Les études à l'échelle du temps rond sont généralement centrées à l'échelle du troupeau (Ingrand and Dedieu, 1996, 2007) tandis que celles à l'échelle du temps long le sont à l'échelle de la ferme. Exception faite de la thèse de Moulin (1993) ou de certaines études (Cristofini et al., 1978), il existe à notre connaissance peu de travaux qui intègrent à la fois échelle troupeau et temps long.

Plusieurs éléments ont motivé notre choix de mobiliser le système d'élevage pour construire notre cadre d'analyse. Premièrement, la formulation de la question et des sous-questions de recherche traduit notre volonté de traiter le croisement rotatif comme une pratique au sens de Landais et al. (1988) et d'analyser ses modalités – que nous nommons « modes de gestion technique » – et son efficacité – au travers des performances des troupeaux. Cette approche se démarque de celle de la majorité

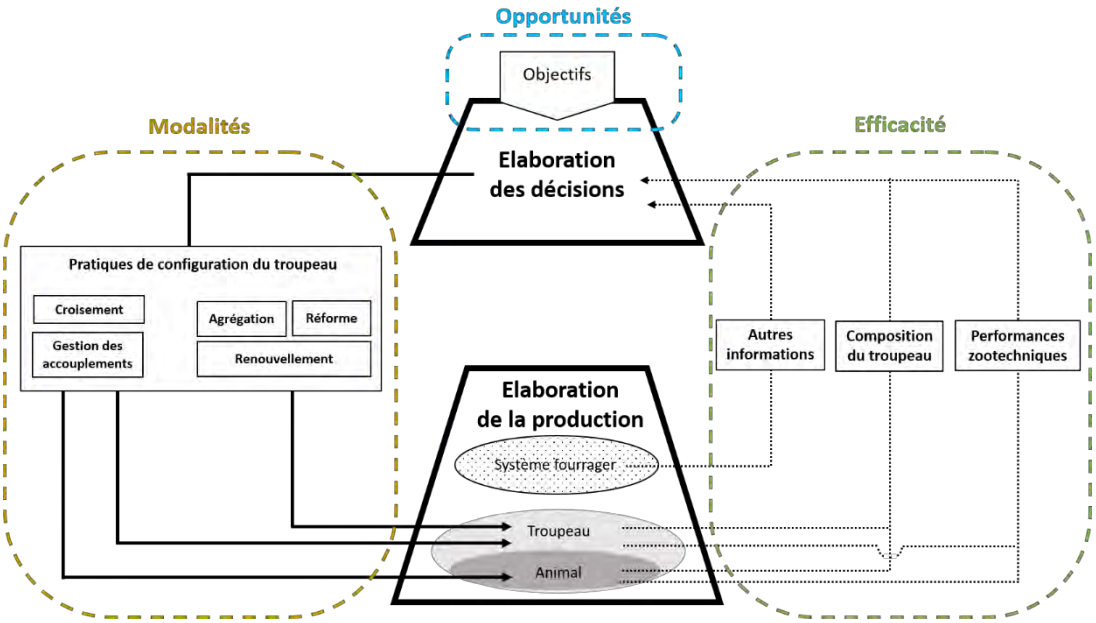


Figure 31 : Identification des composantes clefs du système d'élevage à analyser pour comprendre la mise en œuvre et la gestion du croisement rotatif dans un troupeau bovin laitier

des travaux sur le croisement laitier (voir chapitre 1) qui considèrent davantage le croisement comme une *technique* (Landais et al., 1988), s'attachent à produire des connaissances indépendantes de leur mise en œuvre concrète par les éleveur·euse·s et visent ainsi davantage la *transmissibilité* de leurs résultats à travers la production d'*énoncés enseignables* (Le Moigne, 1977, cité par Landais et al., 1988) plutôt que leur ancrage à des situations concrètes d'élevage : par exemple, un énoncé à visée généralisatrice du type « *le programme de croisement A permet en moyenne une dégradation moins importante de la productivité laitière des F_1 que le programme de croisement B* ». Deuxièmement, le cadre des systèmes d'élevage nous permet d'articuler notre analyse à plusieurs niveaux d'organisation du système, mais également selon une perspective dynamique. En effet, comme le chapitre 1 l'a mis en évidence, l'utilisation du croisement rotatif a un effet direct sur la composition du troupeau et son évolution : cela fait du croisement rotatif à la fois une *pratique de conduite* de la reproduction mais également une *pratique de configuration* du troupeau, au même titre que les pratiques d'agrégation, de renouvellement et de réforme (Landais et al., 1988; Moulin et Bocquier, 2005). Nous faisons donc le choix de retenir dans le cadre conceptuel de système d'élevage l'analyse des modalités et de l'efficacité des pratiques de configuration du troupeau – dont le croisement fait partie – et ceci en dynamique. Cela nous permet donc d'intégrer les modalités selon lesquelles le croisement est mis en œuvre et comment celles-ci évoluent ensuite avec sa gestion « en routine », mais également l'efficacité de ces modalités et de leur dynamique : leurs effets directs à l'échelle des animaux (génotype et performances) mais également leurs conséquences à l'échelle du troupeau (composition et performances).En revanche, dans ce travail, nous n'appréhendons que partiellement la dynamique des opportunités au cours de cette période en la limitant à l'analyse dynamique des *logiques propres*, c'est-à-dire des objectifs et modalités de cohérence de la conduite. La mobilisation de ce cadre conceptuel et son application au cas du croisement rotatif (Figure 31) nous permet d'illustrer notre approche, qui consiste à « *rendre compte des processus d'élaboration de la production en précisant les modalités d'interaction entre les fonctionnements biologiques animaux sur le (…) long terme et la gestion des individus, des lots, des cycles de production et du renouvellement du troupeau* » et à analyser « *l'effet des combinaisons de pratiques sur les transformations de l'état du troupeau [, qui] donnent lieu à production animale et au renouvellement de la composition de ce troupeau* » (Dedieu et al., 2008). Cela

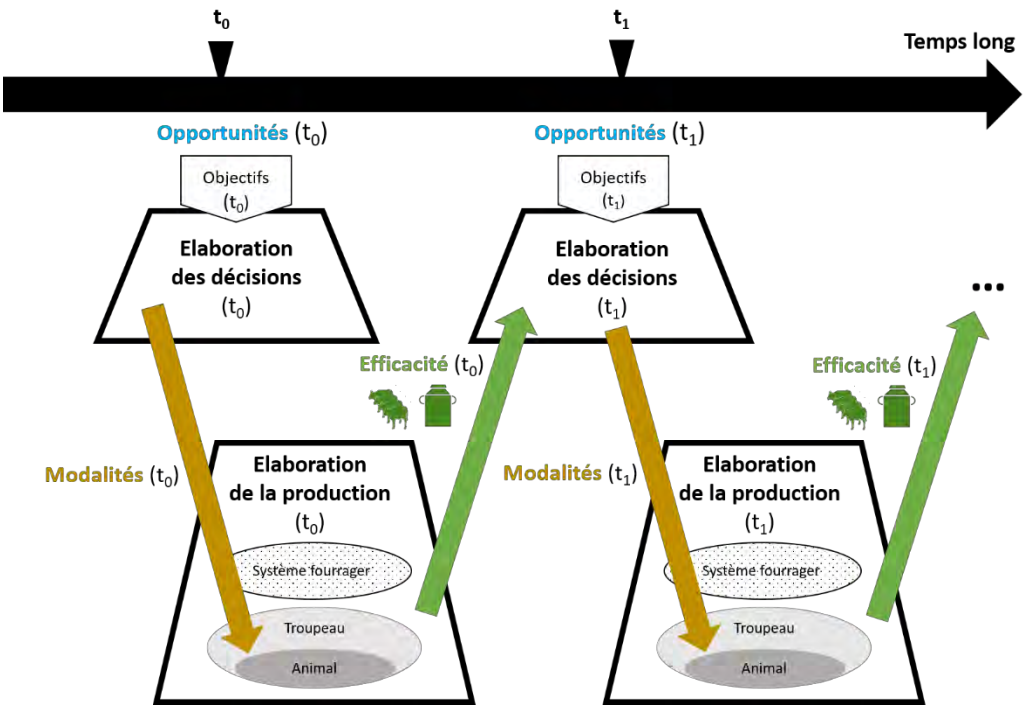


Figure 32 : Application du cadre conceptuel du système d'élevage pour analyser l'utilisation du croisement rotatif dans un troupeau bovin lait comme une transition technique. L'évolution des pratiques de configuration du troupeau y compris de croisement (modalité) engendre une évolution de la composition génétique du troupeau et une évolution des performances de ce dernier (efficacité). L'évolution de la composition génétique du troupeau et des performances associées constituent des informations pour l'éleveur·euse pour adapter en continue et en retour ses pratiques de configuration de troupeau.

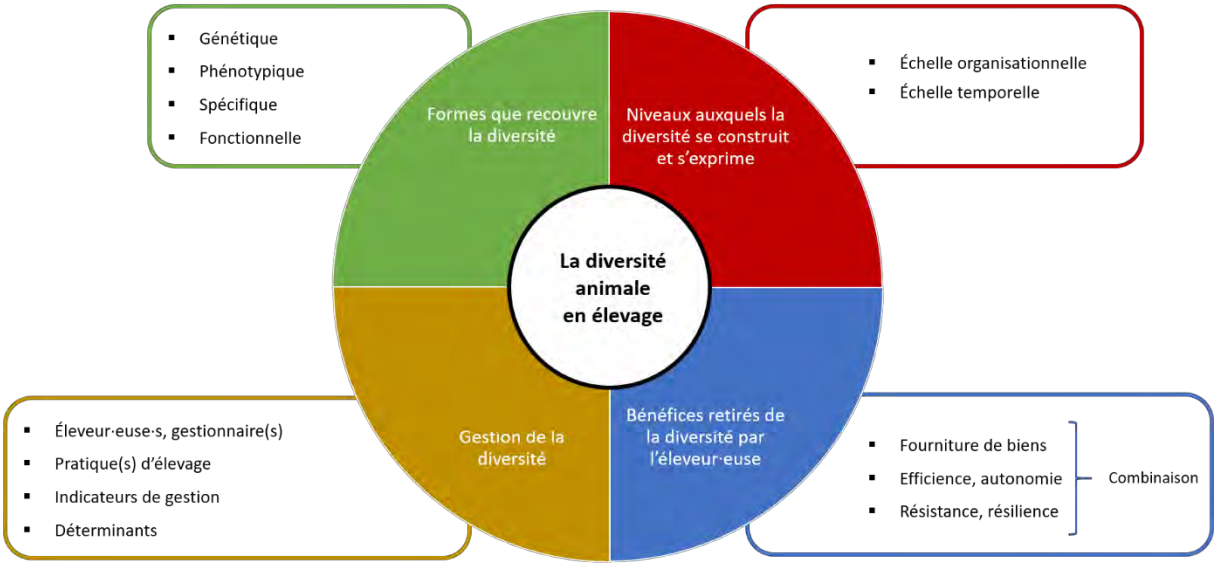


Figure 33 : Cadre conceptuel pour analyser de manière intégrée la gestion de la diversité animale dans les systèmes d'élevage (Magne et al., 2019)

nous amène à construire la représentation de notre application du modèle de fonctionnement système d'élevage au cas de l'utilisation du croisement rotatif selon une perspective dynamique (Figure 32). Pour appréhender l'efficacité des pratiques en prenant en compte la diversification génétique qu'induit l'utilisation du croisement, nous mobilisons le cadre d'analyse sur la gestion de la diversité animale en élevage proposé par Magne et al. (2019).

2.1.2. Application du cadre conceptuel de la gestion de la diversité animale en élevage au cas du croisement rotatif

Le croisement rotatif convoque la question de la diversité animale en élevage selon des perspectives multiples et intriquées entre elles : emboîtement d'échelle organisationnelles – du gène au troupeau en passant par l'animal –, dimension temporelle, modalités des pratiques qui génèrent la diversité animale et efficacité de celles-ci *i.e.* composition du troupeau et performances. Au regard de la complexité d'un tel objet d'étude, il nous est apparu nécessaire de formaliser les caractéristiques de la diversité animale que nous articulons: nous avons pour cela mobilisé le cadre conceptuel proposé par Magne et al. (2019) pour analyser de manière intégrée la diversité animale en élevage. Il distingue quatre entrées complémentaires pour ce faire (Figure 33) : les formes que recouvrent la diversité animale, les niveaux organisationnels et temporels auxquels elle se construit et s'exprime, les modalités de sa gestion et les bénéfices que peut en retirer l'éleveur·euse. Nous passerons en revue ces quatre entrées en décrivant brièvement leur contenu, puis nous préciserons comment ils permettent d'évaluer les performances du troupeau en intégrant la diversification génétique induite par le croisement au sein du troupeau.

L'étude de la diversité animale repose tout d'abord sur l'analyse des formes qu'elle recouvre d'une part, et des niveaux auxquels elle se construit et s'exprime d'autre part. Parmi les formes de diversité animale identifiées par Magne et al. (2019), nous en identifions trois comme adaptées au croisement rotatif : (i) la *diversité génétique*, qui désigne le polymorphisme des gènes – lequel est une conséquence directe du croisement – ; (ii) la *diversité phénotypique*, qui résulte de l'effet conjoint de la diversité génétique et de l'environnement d'élevage et qui désigne notamment la variabilité des traits physionomiques (*e.g.*, gabarit) et physiologiques (*e.g.*, âge, parité, production de

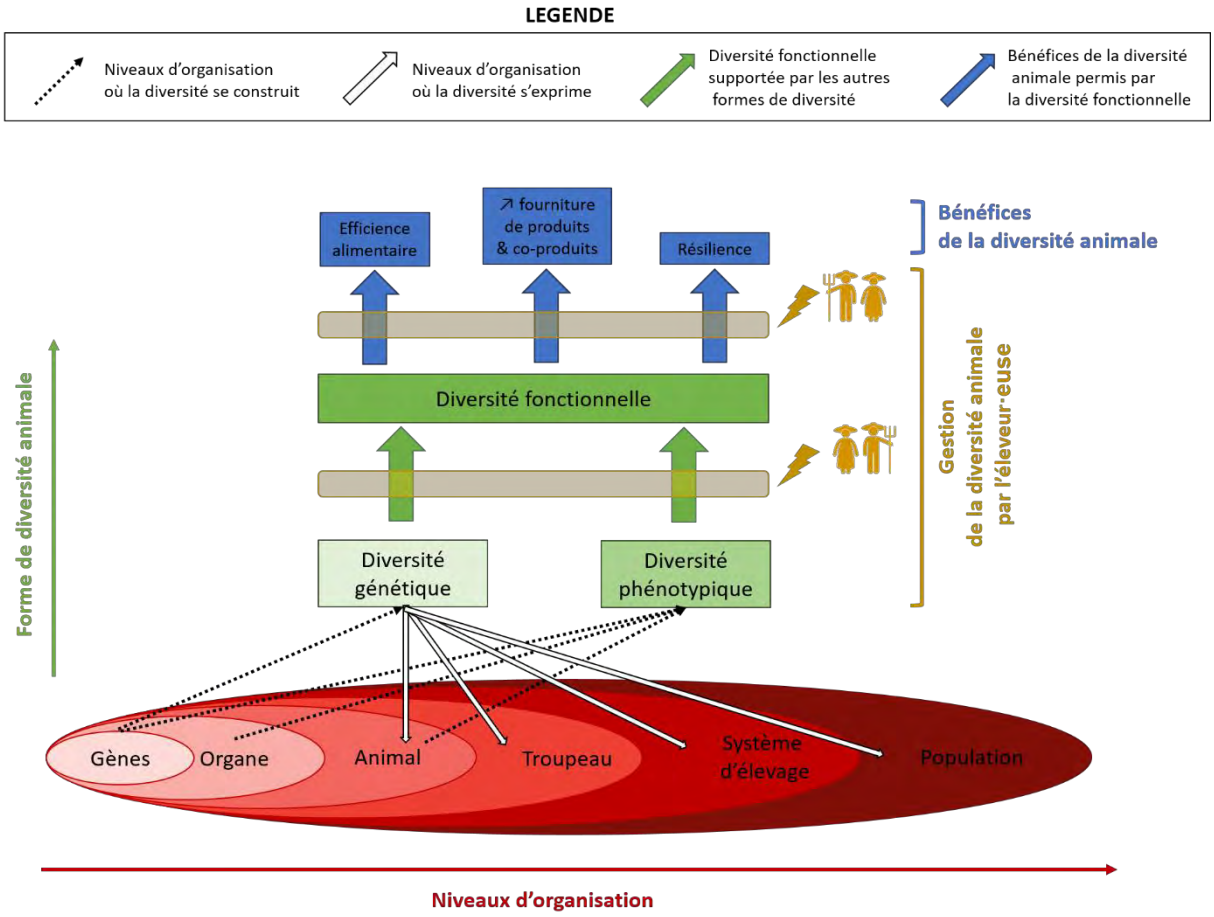


Figure 34 : Les différentes formes de diversité animale, les niveaux d'organisation où elle se construit et s'exprime. La gestion de la diversité animale permet de fournir des bénéfices (d'après Magne et al, 2019)

lait, œstrus) ; (iii) la diversité fonctionnelle, potentiellement supportée par les deux formes de diversité précitées (Figure 34) et qui renvoie à « l'association d'entités animales ayant des fonctionnements biologiques ou écologiques différents ou des réponses biologiques et écologiques différents ». Il s'agit de la forme de diversité reconnue comme la plus intéressante à étudier en zootechnie (Tichit et al., 2011), au sens qu'elle est la forme de diversité potentiellement valorisable pour l'humain et ses activités impactant les éco- et agroécosystèmes. Elle constitue une propriété du troupeau dont l'émergence dépend des modalités de pratiques selon lesquelles des éleveur·euse·s génèrent, agrègent, associent, et conduisent les entités animales diversifiées. Ces différentes formes de diversité animale sont donc liées et peuvent coexister au sein d'un système d'élevage, car ceux-ci sont des « système biologiques finalisés et pilotés » (Landais, 1992), et de par leur composante biologique, sont constitués d'un emboîtement de niveaux d'organisation du vivant. Le fonctionnement dynamique – selon différents pas de temps – d'un niveau d'organisation donné dépend ainsi du fonctionnement dynamique des niveaux d'organisation sous-jacents et de leurs interactions. Outre la considération des niveaux organisationnels et temporels dans l'analyse de la diversité animale, Magne et al. (2019), distinguent le niveau organisationnel et temporel où s'exprime la diversité animale du niveau où elle se construit (Figure 34). Cette distinction permet d'appréhender séparément les conséquences de la diversité animale sur le système d'élevage – considéré à un niveau organisationnel et temporel donné – et les déterminants de celle-ci, c'est-à-dire la diversité du fonctionnement dynamique des niveaux sous-jacents et de leurs interactions qui résultent en une expression de la diversité animale au niveau supérieur. Le niveau organisationnel auquel se construit la diversité animale renvoie donc à la forme de diversité considérée, tandis que le niveau auquel elle s'exprime interroge les modalités selon lesquelles elle peut être gérée et valorisée par les éleveur·euse.

Une fois décrite, la diversité animale en élevage peut être analysée selon les modalités et l'efficacité des pratiques – au sens de Landais et al. (1988) – qui permettent à l'éleveur·euse de la gérer et d'en bénéficier. Ces deux composantes renvoient à la composante anthropique du système d'élevage, c'est-à-dire de système « finalisé et piloté ». Si la gestion de la diversité génétique l'échelle des populations bovines laitières est historiquement assurée hors du système d'élevage par les acteur·rice·s

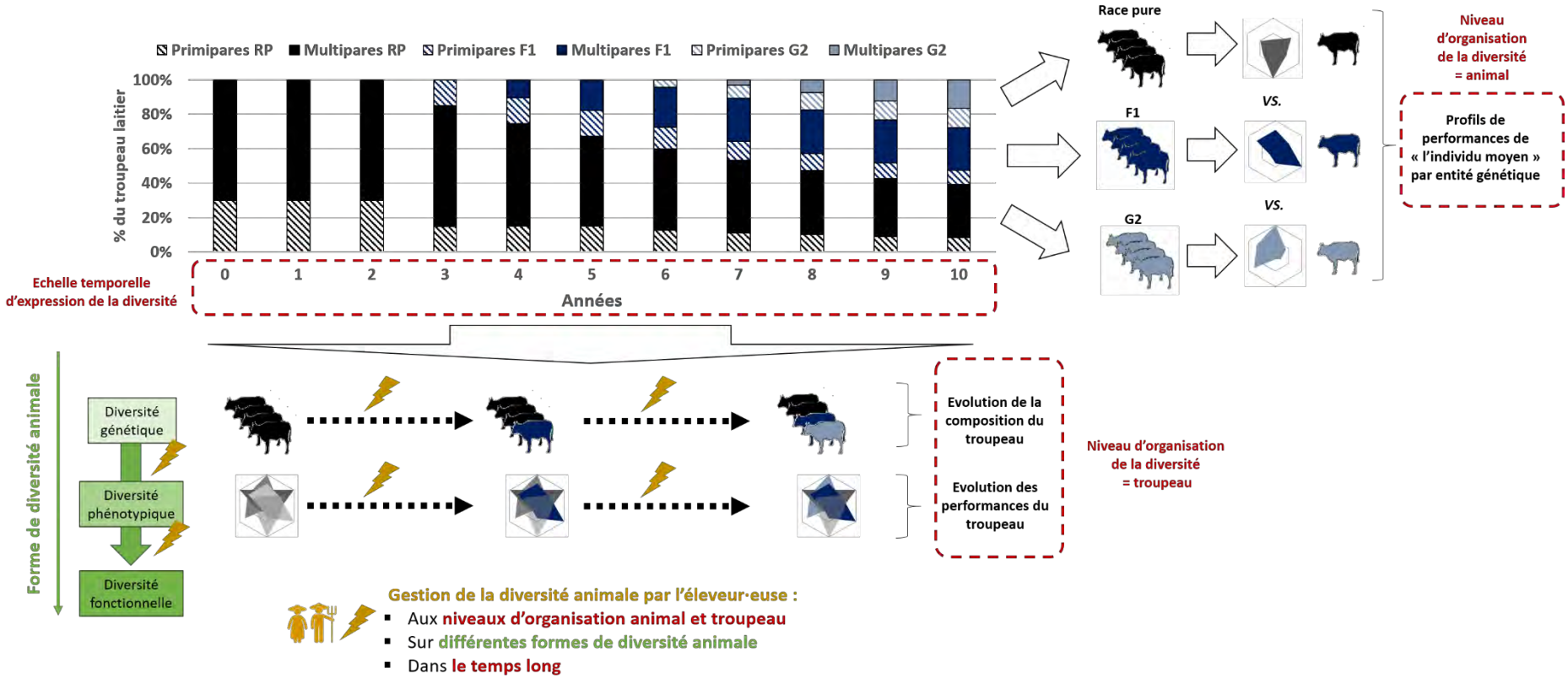


Figure 35 : Application du cadre d'analyse de la gestion de la diversité animale dans les systèmes d'élevage pour évaluer les effets de l'utilisation du croisement rotatif sur la composition du troupeau bovin laitier et ses performances

des programmes d'amélioration génétique (voir chapitre 1), la gestion des formes de diversité phénotypique et fonctionnelle échoient en premier lieu aux éleveur·euse·s. Ils/elles gèrent cette diversité *via* des combinaisons de pratiques : *pratiques de conduite* (reproduction, santé, alimentation), *pratiques de configuration du troupeau* (gestion des accouplements, renouvellement, réforme) et des *pratiques de commercialisation* (valorisation des différents produits d'élevage). Leurs modalités permettent de « *créer ou acquérir la diversité animale, de l'utiliser (l'orienter, la valoriser, la segmenter) et de* [l'entretenir] *ou non (la réduire, l'amplifier, la maintenir)* » (Magne et al., 2019). Ainsi, les pratiques de conduite permettent d'affecter la réponse biologique des animaux à leur environnement d'élevage et donc de gérer la diversité phénotypique. Les pratiques de configuration permettent quant à elles de générer et associer des profils individuels phénotypiquement diversifiés pour en tirer parti : elles permettent donc de gérer la diversité fonctionnelle à l'échelle supra-individuelle, c'est-à-dire à l'échelle du troupeau. Enfin, les pratiques de commercialisation permettent d'exploiter la diversité phénotypique dans une perspective de valorisation des produits d'élevage et s'inscrive donc dans une gestion de la diversité fonctionnelle du troupeau. Les bénéfices potentiels de la diversité découlent de sa gestion : ils correspondent aux « *avantages que l'éleveur·euse retire de la gestion des processus biologiques et écologiques assurés/supportés par la diversité animale* » (Magne et al., 2019) et s'apparentent donc davantage à des *conséquences* indirectes des modalités de sa gestion plutôt qu'à des *effets* directs de celle-ci. Autrement dit, les bénéfices de la diversité animale s'expriment davantage à l'échelle du système d'élevage qu'aux niveaux organisationnels où la diversité se construit et est gérée : *e.g.*, amélioration de la fourniture de produits et co-produits d'élevage, de l'efficience technique du système d'élevage et de sa résilience.

L'application de ce cadre conceptuel à la thématique du croisement rotatif nous permet ensuite d'identifier les composantes en jeu pour évaluer les performances du troupeau au cours de sa diversification génétique induite par l'utilisation du croisement au sein du troupeau (Figure 35). Premièrement, notre approche de la diversité animale dans ce travail est centrée sur l'échelle troupeau comme niveau organisationnel de son expression. Nous ne tenons compte de l'échelle animal que comme le niveau auquel la diversité exprimée par le troupeau se construit *i.e.* à travers sa composition. Deuxièmement, les formes de diversité animale que nous envisageons de considérer

dans notre approche sont principalement la diversité phénotypique et fonctionnelle. La diversité génétique est inhérente au croisement rotatif, mais nous ne la considérerons ici qu'à travers des artefacts visant à catégoriser les animaux du troupeau, *e.g.*, générations de croisement (F_1, G_2, *etc.*) pour ensuite étudier sa diversité phénotypique et fonctionnelle. L'étude de la diversité phénotypique est au cœur de la sous-question 2, puisque celle-ci vise à analyser les performances zootechniques à l'échelle troupeau, selon deux approches. La première s'appuie sur la diversité génétique intra-troupeau que génère le croisement rotatif et vise à déterminer si les entités animales ainsi générées et diverses génétiquement présentent des profils de performances zootechniques différents, puis d'évaluer leur potentielle complémentarité au sein d'un troupeau : en d'autres termes, cette première approche vise à tester le continuum entre diversité génétique, diversité phénotypique et diversité fonctionnelle dans le cas du croisement considéré selon une perspective statique. La seconde approche portée par notre sous-question 2 adopte, elle, une perspective dynamique : elle vise évaluer les conséquences de l'utilisation du croisement dans le temps long sur l'évolution des performances zootechniques du troupeau, et à la mettre en relation avec l'évolution de la diversification de la composition du troupeau en entités génétiques diversifiées : cette seconde approche consiste à analyser l'évolution de ce continuum entre diversité génétique, diversité phénotypique et diversité fonctionnelle, dans le temps long de la mise en place du croisement. Troisièmement, nous considérons uniquement l'éleveur·euse comme gestionnaire de la diversité animale générée par le croisement, du fait que notre approche est centrée à l'échelle du troupeau. Comme nous l'avons expliqué précédemment (voir section 2.1.1), le croisement rotatif peut être considéré comme une pratique à double statut : fondamentalement, il s'agit d'une simple modalité de conduite de la reproduction ; cependant, son efficacité a des conséquences sur le type d'animaux qui composent le troupeau, ce qui nous amène à le considérer également comme une pratique de configuration du troupeau. Ainsi, notre approche est centrée sur les pratiques de gestion de la diversité du troupeau liée à sa composition, c'est-à-dire les pratiques de configuration du troupeau : gestion des accouplements, croisement, agrégation, renouvellement, et réforme. Les indicateurs de la gestion de la diversité s'apparentent ainsi à des indicateurs de l'efficacité de ces pratiques et portent donc sur leurs effets sur la composition du troupeau (*e.g.*, pourcentages de vaches croisées, pourcentage de primipares) et leurs conséquences sur ses performances zootechniques (*e.g.*, production laitière, niveau de fertilité).

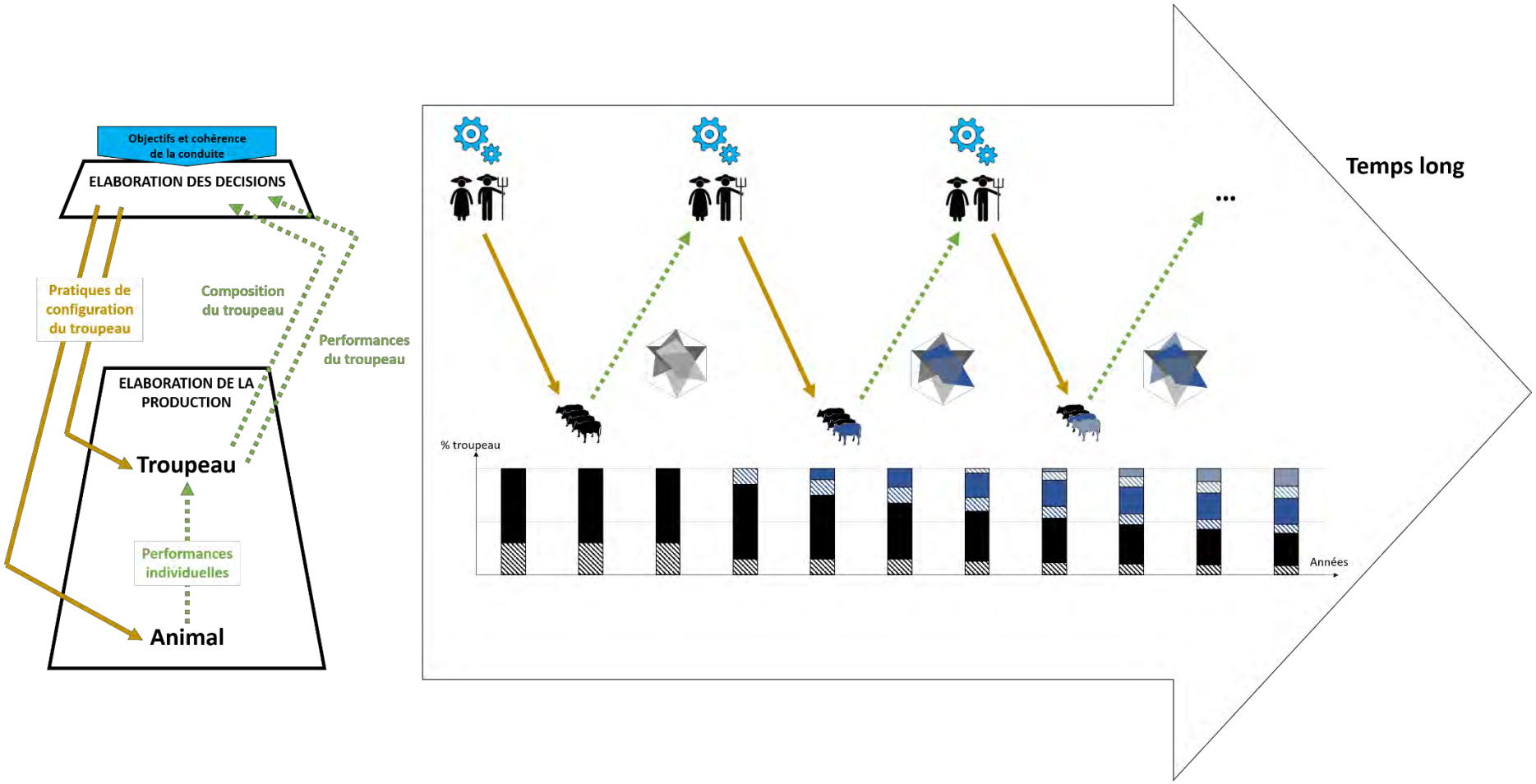


Figure 36 : Cadre d'analyse construit et utilisé pour analyser l'évolution dans le temps long des pratiques des éleveur·euse·s, de la composition et des performances du troupeau bovin laitier induite par l'utilisation du croisement rotatif

Enfin, les bénéfices de la diversité animale générée par le croisement rotatif sont en partie pris en compte dans notre approche et appréhendées à l'échelle du troupeau par le biais de ses performances zootechniques (mais sans toutefois pouvoir inférer sans hésitation à un bénéfice économique par exemple). Ainsi, dans le cadre de ce travail, nous pouvons ambitionner d'évaluer l'amélioration de la fourniture de produits et co-produits d'élevage à travers l'évaluation des taux de matière utile du lait, de la conformation ou du poids vif des animaux. L'évaluation de la résilience du troupeau, comprise comme sa capacité à produire, se reproduire et se maintenir, semble également possible à estimer, en s'appuyant sur les performances de fertilité, de santé de la mamelle – *via* l'utilisation du proxy des comptages cellulaires – et de la longévité des animaux. En revanche, l'efficience ne sera pas considérée dans ce travail, car elle porte sur des pratiques d'élevage que nous n'avons pas quantifié, *e.g.*, la conduite alimentaire du troupeau.

2.1.3. Présentation du cadre conceptuel construit pour analyser l'évolution des pratiques et des performances du troupeau induite par le croisement rotatif

La combinaison des deux cadres conceptuels présentés précédemment – système d'élevage et gestion de la diversité animale en élevage – m'a permis de construire un cadre d'analyse original pour répondre à ma question de recherche (Figure 36). Il me permet d'articuler dans le temps long de la mise en place et de la gestion du croisement rotatif, l'évolution des modalités des pratiques des éleveur·euse·s – en lien avec l'évolution de leurs logiques d'action propres – et l'évolution de la composition du troupeau et des performances aux échelles animal et troupeau qui en découlent. Mes sous-questions de recherche portent sur des éléments différents – et néanmoins reliés – du système d'élevage, considérés selon la perspective dynamique de la mise en place du croisement rotatif au sein d'un troupeau initialement composé de vaches de race pure, et de sa gestion dans le temps long : l'évolution des pratiques de configuration du troupeau mises en œuvre par l'éleveur·euse et de ses logiques propres – objectifs et cohérence de la conduite – d'une part, et l'évolution des performances du troupeau d'autre part, considérée comme résultant partiellement de la première.

2.2. Une approche rétrospective dans des fermes commerciales

2.2.1. Une approche basée sur l'étude de cas de fermes commerciales

Nous avons choisi de suivre une approche basée sur l'étude de cas, et plus précisément de cas multiples (Yin, 2009, cité par Barlatier, 2018). L'approche par étude de cas est particulièrement adaptée pour permettre une compréhension approfondie d'un phénomène tel qu'il se déroule en situation réelle (Lune et Berg, 2017). Plusieurs raisons justifient ce choix : la première est liée à l'ambition de ce travail – en particulier portée par la sous-question 1 – qui est d'appréhender les *logiques d'action* (Landais et Lasseur, 1993) des éleveur·euse·s qui utilisent le croisement rotatif, c'est-à-dire les objectifs qu'il/elles poursuivent et les modalités de cohérence de leur conduite. Or il s'agit d'informations « *qui ne sont ni données, ni uniformes a priori* » (Dedieu et al., 2008) : par conséquent, se « *donner les moyens d'y accéder* » (Landais, 1992) requiert une investigation approfondie et aussi proche du phénomène étudié que possible, afin d'accéder à des données riches en contexte réel (Barlatier, 2018). Cela justifie également le choix de fermes commerciales comme cas d'étude.

La deuxième raison renvoie au statut de pratique « atypique » du croisement rotatif : en effet, dans un système sociotechnique de l'élevage bovin laitier organisé pour et autour de la race pure, le croisement rotatif peut être considéré comme une « anomalie », c'est-à-dire « *un écart par rapport à une norme ou un repère* » (CNRTL) qui est par conséquent méconnu, y compris de la recherche. Ces anomalies « *incarnent des valeurs qui, pour ceux qu'elles intéressent, constituent des pistes d'avenir pour l'agriculture* » (Salembier, 2019), et sont investies d'un potentiel sur lequel s'appuyer pour concevoir des systèmes agricoles durables (Meynard et Dourmad, 2014 ; Magne et al., 2020). Dans le cas du croisement, sa mise en œuvre au sein du troupeau réinterroge donc les modalités selon lesquelles l'éleveur·euse met en cohérence les objectifs qu'il/elle affecte au troupeau croisé et au système d'élevage, sa conduite du troupeau et les performances du troupeau induites, c'est-à-dire les logiques d'action des éleveur·euse·s qui peuvent être diverses en contexte réel.

Le choix de s'appuyer sur des cas d'étude multiples de fermes commerciales vise à

extraire de l'analyse des résultats généralisables concernant les modes de gestion du croisement. Pour tester la sous-question 1, notre premier objectif est de décrire la plus grande diversité possible des modalités de la gestion technique du croisement rotatif et leur évolution, de la mise en place du croisement à sa conduite « en routine », au sein des cas d'études que nous échantillonnerons. Ensuite, nous souhaitons pouvoir extraire de ces cas singuliers des éléments génériques portant sur la gestion technique du croisement et son évolution. L'approche par étude de cas multiples permet effectivement d'explorer la diversité empirique et d'en extraire des régularités (Georges et Bennet, 2005, cités par Crowe et al., 2011) : on parle d'approche *exploratoire* (Yin, 2003 ; 2009) ou *collective* (Stake, 1995, cités par Barlatier, 2018). Pour tester notre sous-question 2, notre objectif est d'évaluer les performances zootechniques du croisement rotatif aux échelles animal et troupeau de façon à pouvoir distinguer l'effet spécifique du croisement de l'ensemble des autres facteurs explicatifs (*e.g.*, effet ferme×année). Cela nécessite de concevoir un dispositif de recherche qui nous donnera les moyens d'appréhender quantitativement le croisement ainsi que les autres facteurs potentiellement explicatifs.

La perspective selon laquelle je souhaite étudier le croisement rotatif s'apparente ainsi à celle employée par Meynard et Dourmad (2014) pour décrire l'innovation en élevage : « *celle-ci est supposée conçue, testée, appropriée par au moins quelques pionniers. Il s'agit alors d'en analyser in situ les performances (bénéfices […], effets non intentionnels) et d'éclairer les conditions de son adoption par de nouveaux acteurs* ». La question de l'application des connaissances produites par l'activité de recherche, relevée ici par ces auteurs, me conduit également à préciser ma posture sur ce point. Liée à l'ancrage de ce travail en zootechnie des systèmes d'élevage, ma démarche générale se veut compréhensive (Landais et Lasseur, 1993; Landais, 1994) : j'interroge les pratiques et les logiques d'action des éleveur·euse·s au regard du sens endogène qu'ils/elles leur attribuent ; l'analyse des performances zootechniques est également discutée au regard de ces pratiques et logiques propres. Les connaissances que je produis dans ce travail n'ont pas une visée normative, c'est-à-dire qu'elles ne visent ni à proposer de conduite optimale du croisement rotatif, ni à en caractériser une à partir d'une classification des troupeaux croisés selon leurs performances. Mes résultats visent davantage à permettre la conception d'*outils d'aide à la décision*, dont le rôle est « *d'enrichir la compréhension qu'ont les acteur·rice·s*

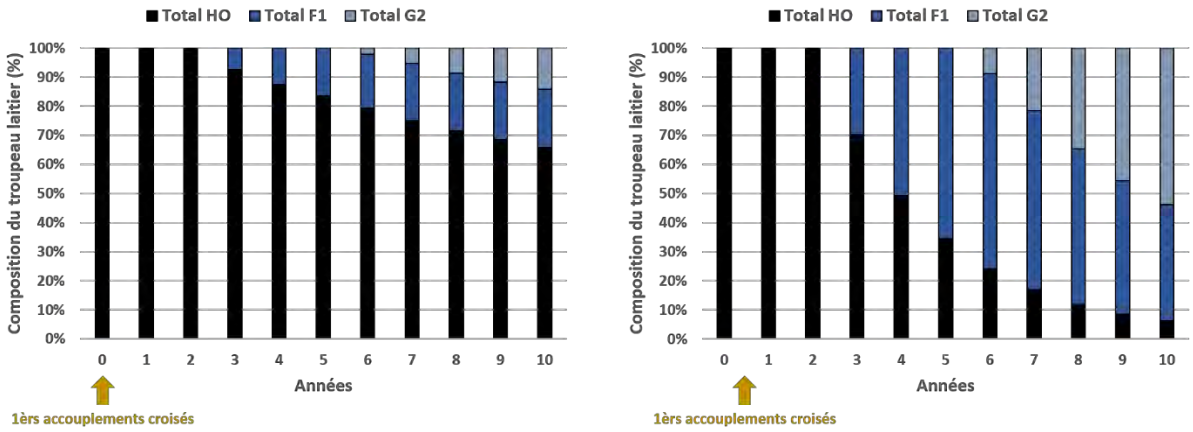


Figure 37 : Effet sur l'évolution de la composition du troupeau de deux modes de gestion du croisement rotatif différents : taux de croisement sur les femelles de race pure de 25% (à gauche) et de 100% (à droite). Résultats d'une simulation d'un troupeau de 100 vaches sur 10 ans

d'une situation » (Girard et al., 2008) : ils visent à faire émerger de l'analyse des évolutions conjointes des pratiques et des performances au cours de la mise en place du croisement rotatif par des éleveur·euse·s pionnier·ère·s des repères et des lignes directrices pouvant servir de support à des éleveur·euse·s qui l'envisagent, lesquel·le·s pourront les intégrer selon leurs logiques propres, qui peuvent dépasser le cadre de ce travail. Ma posture s'apparente ainsi à l'une des quatre postures identifiées par Meynard et Dourmad (2014) – *i.e.* « *proposer aux acteurs des outils et méthodes pour innover par eux-mêmes (…), ou pour adapter à leur propre situation des innovations exogènes* » – et aux « *design support oriented methods* » décrites par Le Gal et al. (2011).

2.2.2. Une analyse rétrospective

Nous avons fait le choix de réaliser l'étude de cas de fermes commerciales sur la base d'une analyse rétrospective. L'élément qui justifie ce choix est la différence de temporalité dans laquelle s'inscrivent le croisement rotatif et la thèse. En effet, le croisement rotatif est une pratique dont les effets sur les caractéristiques du troupeau – à commencer par sa composition – mettent plusieurs années à se manifester : entre le moment de l'insémination fécondante en croisement d'une vache de race pure et le moment où la femelle F_1 issue dudit croisement est susceptible de rejoindre le troupeau de femelles laitières, il se sera écoulé entre 3 et 5 années, en fonction des modalités de pratiques choisies par l'éleveur·euse de gestion du croisement (part d'accouplements croisés), de la reproduction (âge à la première insémination) et du renouvellement (Figure 37). Pour atteindre le stade où des femelles G_2 de croisement rotatif rejoignent le troupeau de femelles en production, il se sera écoulé entre 7 et 9 années. Au regard de la durée de la thèse, ce décalage entre l'introduction du croisement et ses différents effets et conséquences nous a conduit à adopter une approche basée sur l'analyse rétrospective des cas de fermes commerciales pour traiter les trois sous-questions de recherche. Concernant la sous-question 1 : pour décrire l'évolution des pratiques des éleveur·euse·s pendant le processus de transition technique induit par le croisement – y compris lorsqu'ils/elles ressentent ses effets dans leur conduite – et caractériser différents chemins de transition technique vers un troupeau croisé parmi une diversité de situations d'élevage, seule une analyse

a posteriori est pertinente compte tenu du temps de thèse réduit à trois ans. Le suivi en temps réel n'aurait pas permis un temps de suivi suffisant, à quoi se serait ajouté la difficulté méthodologique de construire un dispositif de recherche synchronique (*i.e.* d'éleveur·euse·s introduisant le croisement rotatif dans leur troupeau au cours de la même campagne) : le croisement étant une pratique singulière et peu connue y compris des chercheur·euse·s, la prospection voire la conception de cas d'études adéquats se serait avérée irréalisable en pratique. Concernant les sous-questions 2 et 3, faire un suivi en temps réel de troupeaux après le début de la pratique du croisement rotatif n'aurait pas permis de saisir les effets du croisement rotatif sur les performances zootechniques à proprement parler (stade G_2) dans le temps imparti de la thèse.

2.2.3. Un échantillonnage ciblant des élevages engagés dans une transition vers le croisement rotatif

J'ai cherché à identifier des élevages bovin laitier pratiquant le croisement rotatif depuis plusieurs années, associé à une diversité de situations d'élevage dans lesquelles il est géré en 2018 (ex : modes de production, localisation géographique, dans ou hors contrôle laitier…). Il ne s'agissait pas de rechercher une représentativité statistique, laquelle aurait été de toute façon difficile à vérifier en l'absence de base de données de référence disponible.

Pour cela, nous avons utilisé les critères d'échantillonnage suivants, qui ont été vérifiés sur une base déclarative par un entretien téléphonique préliminaire avec les éleveur·euse·s candidat·e·s :

- Les éleveur·euse·s dont le troupeau laitier (en production) était composé d'au moins un tiers de vaches croisées en 2018, seuil que nous avons estimé requis pour identifier des effets du croisement sur les modes de conduite des troupeaux et sur leurs performances.
- Les éleveur·euse·s ayant mis en place des programmes de croisement rotatif 3 voies et plus, lesquels ressortent de la littérature (voir chapitre 1) comme présentant des bénéfices théoriques supérieurs (*i.e.* hétérosis) mais engendrant une diversification intra-troupeau complexifiant la gestion de la conduite de troupeau.

- Les éleveur·euse·s dont le troupeau laitier (en production) comprend des croisées de deuxième génération de croisement 3 voies (G_2). L'hypothèse de travail qui justifie ce critère est similaire à la précédente : la présence de G_2 dans un troupeau donné nous assure *a priori* d'un « engagement » de l'éleveur·euse dans la pratique du croisement trois voies. De plus, on cherche à évaluer les performances de troupeaux au-delà de la génération F_1, pour laquelle les références dans la littérature sont nombreuses (voir chapitre 1) et donc les modes de gestion supposément moins incertains.
- Les éleveur·euse·s inscrits au contrôle de performances sur la période s'étalant entre la conduite en race pure et la mise en place du croisement jusqu'à 2018 et m'autorisant à y accéder, afin de disposer des données d'évolution de performances des troupeaux au cours de la mise en place du croisement. Ce critère était préférentiel : j'ai choisi préférentiellement les éleveur·euse·s dont les troupeaux étaient inscrits au contrôle laitier, mais je n'ai pas exclu ceux non-inscrits lorsque les modes de gestion du croisement différaient fortement de celui des autres éleveur·euse·s échantillonné·e·s, *e.g.*, races utilisées, ancienneté de la pratique, originalité du système de production.
- Enfin, j'ai cherché à recruter autant que possible des éleveur·euse·s de manière à obtenir un échantillon reflétant une diversité de contextes d'élevage, en termes de bassin de production, de types de système de production (agriculture conventionnelle et agriculture biologique, niveau d'intensité supposé de la production)

L'échantillon a été constitué par méthode « *boule de neige* » (Goodman, 1961), adaptée pour atteindre des populations difficiles d'accès (Biernacki and Waldorf, 1981). Afin de limiter autant que possible les effets de réseau, j'ai mobilisé différentes sources pour recruter les contacts initiaux, appelés « *contacts graines* » –*seeds* (Kirchherr and Charles, 2018) – : j'en ai identifié certains dans la presse technique agricole et par le biais de réseaux sociaux, tandis que d'autres m'ont été suggérés par des expert·e·s du dispositif génétique français à la suite d'entretiens préliminaires au cours desquels je leur ai exposé l'enjeu exploratoire et non représentatif de l'échantillonnage. J'ai ensuite recruté de nouveaux contacts au cours des entretiens avec ces « contacts graines » en leur demandant s'ils connaissaient d'autres

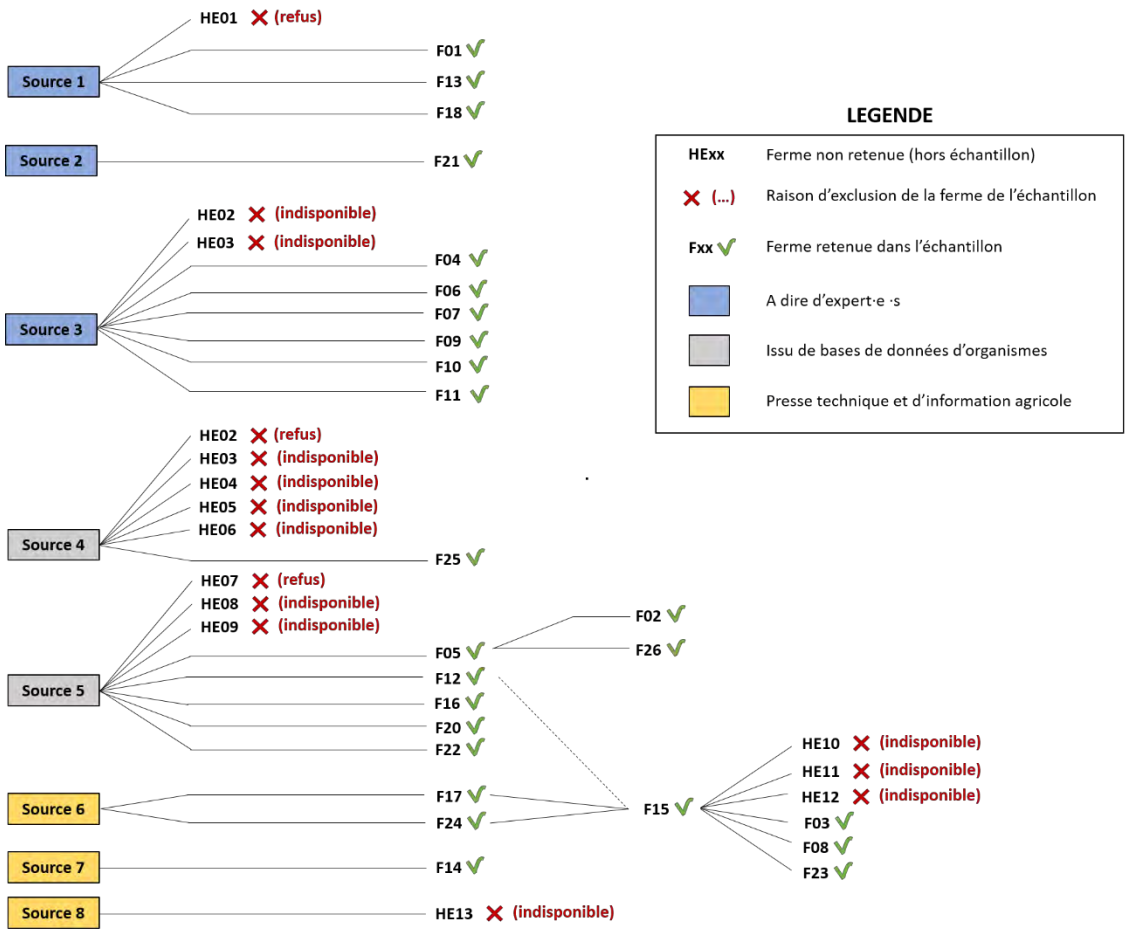


Figure 38 : Mise en œuvre de la méthode « boule de neige » pour constituer l'échantillon des 26 fermes

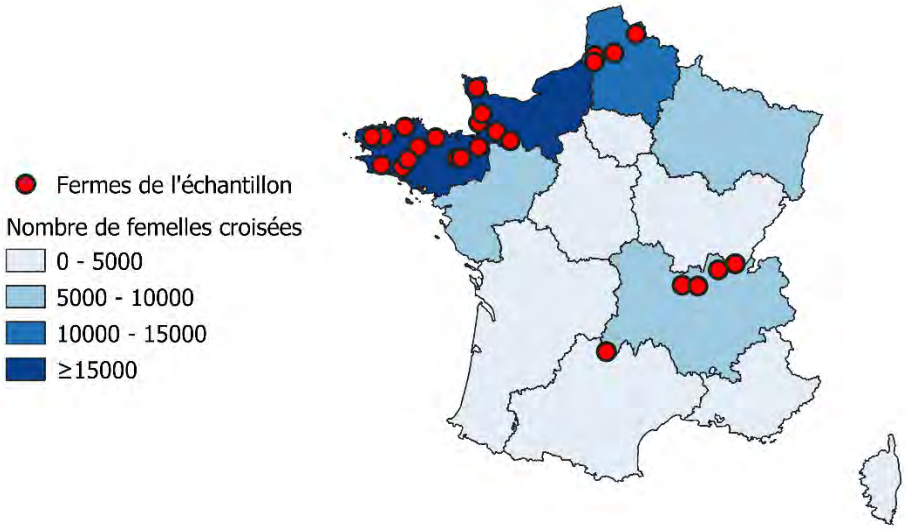


Figure 39 : Répartition géographique de la pratique du croisement laitier en France métropolitaine (d'après les données Reproscope) et des 26 fermes échantillonnées

éleveur·euse·s qui répondaient aux critères d'échantillonnage. J'ai procédé de la même manière avec les contacts nouvellement recrutés, jusqu'à atteindre une redondance dans le recueil d'informations (Figure 38).

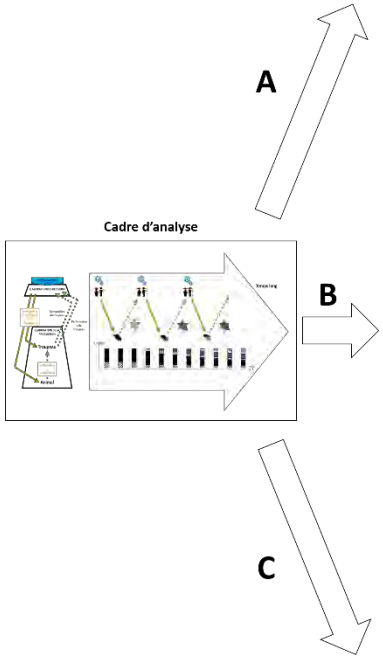
L'échantillon final est constitué de 26 fermes localisées dans plusieurs bassins de production de France métropolitaine (Figure 39) : Bretagne (n = 11), Auvergne-Rhône-Alpes (n=5), Normandie (n = 5) et Hauts-de-France (n = 5). En 2018, 18 de ces 26 fermes étaient conduites en agriculture biologique et 8 en agriculture conventionnelle. L'échantillon était variable au regard de l'« ancienneté » vis-à-vis de la pratique du croisement : les premiers accouplements croisés ont eu lieu entre 1992 et 2012 et les premières femelles G_2 ont rejoint le troupeau laitier entre 1999 et 2018. Avant la mise en place du croisement, la majorité des troupeaux de l'échantillon étaient intégralement conduit en race pure Holstein (n = 20) ; 4 troupeaux étaient multi-races (dont la race Holstein) et un seul était conduit en race pure Montbéliarde. Enfin, en 2018, 19 des 26 fermes étaient inscrites au contrôle laitier, 2 fermes n'étaient plus inscrites depuis peu (entre un et deux ans) et 5 fermes n'avaient jamais été inscrites.

2.3. Un dispositif de recherche basé sur des données quantitatives et qualitatives à différents niveaux d'organisation

L'ambition de ce travail est de relier l'évolution des pratiques de configuration du troupeau mises en œuvre par l'éleveur·euse et de ses logiques propres d'une part, et l'évolution des performances du troupeau d'autre part, considérée comme résultant partiellement de la première. Pour cela, j'ai co-construit un dispositif de recherche *mixte*, *i.e.* combinant une approche qualitative pour étudier l'évolution des pratiques et une approche quantitative pour étudier l'évolution des performances. L'articulation entre les sous-questions de recherche et les deux approches du dispositif de recherche est présentée sur la Figure 40.

2.3.1. Justification d'un dispositif mixte

Nous avons fait le choix d'aborder l'étude de cas de fermes commerciales à travers un dispositif de recherche *mixte i.e.* combinant des approches qualitative et quantitative



Composantes du cadre d'analyse étudiées	Sous-question de recherche et objectif associé	Echantillon (nombre de fermes)	Approche	Méthode de recueil des données	Méthode d'analyse des données	Résultats	Chapitre du manuscrit
	Sous-question 1 Caractériser les différents **modes de gestion de la mise en place et de la gestion du croisement rotatif** au sein d'un troupeau bovin laitier conduit initialement en race pure	N = 26	**Approche qualitative** **Analyse rétrospective** **Perspective dynamique** **Echelle troupeau** (et système d'élevage)	**Entretiens semi-directifs**	Catégorisation ↓ Analyse Factorielle des Correspondances Multiples ↓ Classification Hiérarchique Ascendante	3 trajectoires types de transition technique vers le croisement rotatif	Chapitre 3
	Sous-question 3 Analyser l'**évolution des performances de troupeaux au cours de la mise en place du croisement rotatif** et en identifier les facteurs explicatifs. Identifier la **part explicative de cette évolution attribuable au croisement rotatif**	N = 13	**Approche quantitative** **Analyse rétrospective** **Perspective statiques** **Echelle troupeau** (et interactions avec le système d'élevage et entités animales *infra*-troupeau)	**Trajectoires de transition technique** (Chapitre 3) **Caractéristiques structurelles des fermes** (Chapitre 3) **Extraction de données de lactations** (Contrôle laitier) **Extraction de données généalogiques et des types raciaux** (SNIG)	Régressions linéaires ↓ Régression des moindres carrés partiels (PLS2)	Des évolutions des performances de troupeaux univoques ou contrastées Effet du croisement sur l'évolution des performances significatif Effet différentiel du stade d'avancement dans la pratique du croisement sur l'évolution des performances	Chapitre 5
	Sous-question 2 Caractériser à l'**échelle de l'animal** les **profils de performances zootechniques** des entités génétiques générées par l'utilisation du croisement rotatif. Identifier les compromis entre performances que ces profils induisent à l'échelle du troupeau	N = 14	**Approche quantitative** **Perspective statique** **Entités animales** (Echelle troupeau)	**Extraction de données de lactations** (Contrôle laitier) **Extraction de données généalogiques et des types raciaux** (SNIG)	**(1)** Catégorisation d'entités animales (classes génétiques) **(2)** Régressions linéaires ↓ Moyennes ajustées ↓ Test de Tukey **(3)** Simulation de troupeaux ↓ Evaluation multicritères (optimum de Pareto)	**(1) et (2)** 3 classes génétiques aux profils de performances zootechniques distincts (validation de la méthode de catégorisation) **(3)** Identification de compositions de troupeaux aux profils de performances optimaux	Chapitre 4

Figure 40 : Présentation du dispositif de recherche combinant approches qualitative (analyse des pratiques par entretiens semi-directifs) et quantitative selon une perspective statique (analyse des performances des entités génétiques animales par régression linéaire et de leur combinaison à l'échelle du troupeau par optimisation) et selon une perspective dynamique (analyse de l'évolution des performances du troupeau par régression des moindres carrés partiels) pour traiter les trois sous-questions de recherche

nature des informations à collecter pour traiter les sous-questions de recherche : l'analyse des changements de pratiques et l'accès aux logiques d'acteurs n'est possible qu'à travers des méthodes qualitatives (Amaratunga et al., 2002) ; à l'inverse, l'évaluation des performances des animaux et des troupeaux en lien avec l'évolution de la composition génétique des animaux constituant le troupeau est adaptée à des méthodes d'analyse quantitative. Deuxièmement, combiner approches qualitative et quantitative pour étudier un même phénomène – procédé qualifié de « *triangulation* » (Yin, 1994, cité par Amaratunga et al., 2002) – est généralement vu comme une approche permettant une analyse plus poussée et une exploration plus riche dudit phénomène, en permettant notamment aux deux approches de se nourrir mutuellement de « surprises ou de paradoxes » qui émergent, ce qui peut induire de nouvelles hypothèses ou apporter de nouvelles perspectives (Rossman and Wilson, 1991, *ibid*). Enfin, ce type d'approche nous permet de procéder à nos différentes analyses de manière séquentielle, ce qui présente l'avantage dans le cas de ce travail de pouvoir appréhender séparément les relations entre changement de pratiques et les changement de composition du troupeau (génétique et démographique) d'une part, les relations entre changement de pratiques et de composition de troupeau et effets sur les performances d'autre part, tout en tenant compte des emboîtements d'échelles – animal et troupeau – des profils de performances. Ainsi, l'analyse qualitative sur les trajectoires de transition et l'analyse quantitative sur les entités génétiques et leurs profils de performances visent à produire des résultats qui alimentent la dernière étude basée sur l'analyse de l'évolution des performances des troupeaux (Figure 40, A).

2.3.2. Approche qualitative

L'approche qualitative visait à répondre à la sous-question de recherche 1 en recueillant les informations relevant de l'évolution des modes de gestion technique et des logiques propres des éleveur·euse·s au cours de la mise en place et de la gestion du croisement rotatif au sein des troupeaux échantillonnés (Figure 40). J'ai donc construit un premier dispositif d'enquêtes auprès éleveur·euse·s des fermes d'élevage échantillonnées (n = 26), mis en œuvre par des entretiens semi-directifs. Le guide d'entretien a été construit selon une approche compréhensive, visant à laisser l'éleveur·euse exprimer ses logiques propres (Guyot, 2006) et à concevoir une trame

générale et des questions suffisamment souples pour laisser à l'éleveur·euse l'initiative du déroulement de la réponse (Riutort, 2004). Le fait que les éleveur·euse·s n'aient pas mis en place le croisement au même moment rend de fait diachroniques les trajectoires d'évolution de leurs pratiques étudiées. La comparaison de ces trajectoires ne pouvait donc pas se faire année par année. Nous avons donc organisé le guide d'entretien pour explorer les évolutions des pratiques de configuration de troupeaux des éleveurs selon trois phases temporelles que nous avons définies *a priori.* Ainsi nous avons cherché à capter : (i) les modes de gestion technique du troupeau conduit en race pure depuis l'installation de l'éleveur jusqu'à la mise en place du croisement, (ii) les modes de gestion technique lors de l'introduction initiale du croisement, et (iii) les modes de gestion technique après l'introduction du croisement. Le guide d'entretien a été organisé en cinq parties, chacune d'elle permettant d'aborder un volet des modes de gestion technique du troupeau et a été renseigné pour chacune des 3 phases (voir Annexe 12). Notre approche étant rétrospective, cela requiert des éleveur·euse·s de se remémorer et d'exposer leurs pratiques, leurs objectifs et leurs évolutions respectives sur une période pouvant s'étaler de dix à vingt années. Ceci augmente intrinsèquement le risque d'informations inexactes, car les agriculteurs peuvent ne plus se souvenir de certaines informations, ou reconstruire leur histoire après coup, et en particulier dans un contexte d'entretien avec un interlocuteur extérieur (Vermersch, 2009). Pour limiter ce biais, la conduite de l'entretien s'est attachée à (i) encourager les éleveur·euse·s à se souvenir de faits concrets pour appuyer leur propos, (ii) à les inciter à décrire dans un premier temps leurs pratiques et objectifs actuels pour faciliter dans un second la comparaison aux pratiques et objectifs antérieurs, et (iii) à encourager dans un premier temps les éleveur·euse·s à comparer dans un premier temps de façon sommaire leurs pratiques et objectifs passés et actuels – *i.e.* changement *vs.* stabilité – et dans un second temps, de préciser les éventuels changements.

Après avoir testé le guide d'entretien auprès des techniciens gérant le troupeau laitier conduit en croisement rotatif trois voies du dispositif expérimental OasYs (Novak et al., 2014), nous avons réalisé les 26 entretiens entre août et septembre 2018. Les entretiens, d'une durée comprise entre 59 minutes et 2 heures 39 minutes ont été enregistrés avec l'accord des personnes enquêtées. Ils ont fait l'objet d'une retranscription non intégrale (monographies, voir exemple en Annexe 13) et ont per-

-mis, suivant notre démarche inductive, d'affiner la sous-question de recherche 1 en m'appuyant sur les éléments structurants de la diversité qui émergeait de l'analyse comparée des monographies. Une analyse factorielle des correspondances multiples (*AFCM*), suivie d'une classification ascendante hiérarchique (*CAH*) nous a permis de caractériser trois trajectoires-types de transition technique. Ces résultats sont présentés dans le chapitre 3.

2.3.3. Approche quantitative

L'approche quantitative visait à tester les sous-questions de recherche 2 et 3 en analysant les performances du croisement selon deux perspectives relevant à la fois de niveaux d'organisation et d'échelle temporelle différentes (Figure 40). Cette approche repose sur un dispositif de recueil et d'analyse de données de performances zootechniques issues des bases nationale et régionales du contrôle laitier et d'informations généalogiques et raciales issues du SNIG pour les troupeaux de l'échantillon initial inscrits au contrôle laitier pour la période s'étalant des campagnes 2008 à 2018 (n = 19 troupeaux sur 26). Les données de performances incluaient pour toutes les femelles issues de ces troupeaux leurs performances de lactation en matière de performances laitières (valeurs pour la lactation totale et la lactation standardisée à 305 jours de la production de lait, des quantités de matières grasse et protéique, des taux butyreux et protéiques), les résultats des comptages cellulaires effectués au cours de la lactation, des dates de début de lactation, de fin de lactation, des durées de tarissement. Les données d'informations généalogiques et de types raciaux des femelles ont permis, moyennant un travail de reconstruction de la séquence en s'appuyant sur les types raciaux parentaux, grand-parentaux, *etc.* de chaque femelle croisée de l'échantillon, de substituer au code race 39 une séquence génétique plus informative.

Premièrement, en adoptant une perspective statique et centrée à l'échelle de l'animal (sous-question 2), nous avons cherché à tester si le croisement générait des entités animales diversifiées en termes de profils de performances. Je me suis appuyé sur les données de lactations des femelles issues de 14 troupeaux sur les 19 inscrits au contrôle laitier, pour la période 2009-2018. J'ai défini trois classes génétiques d'individus. J'ai modélisé par régression linéaire les performances de 7 traits puis

estimé – pour chaque performance – la moyenne ajustée de chacune des trois classes génétiques que j'ai alors comparées deux à deux. J'ai ensuite simulé des troupeaux composés de combinaisons de ces classes génétiques et estimé leurs performances moyennes. Enfin, en m'appuyant sur une méthode d'évaluation multicritère non pondérée, j'ai identifié les compositions permettant d'optimiser les performances moyennes à l'échelle du troupeau. La méthode d'optimisation choisie est l'optimum de Pareto (Williams et Kendall, 2017), en raison de sa simplicité à être calculé et parce que l'emploi de méthodes permettant une analyse multicritères plus approfondie – *e.g.*, ELECTRE III (Martin et Legret, 2005) ou MCDA (Bigaret et Hodgett, 2017) – reposait sur la définition de valeurs de différentielles de pondération des performances ou de valeurs seuils, informations dont auxquelles nous n'avions pas accès. Ces résultats sont présentés dans le chapitre 4.

Deuxièmement en adoptant une perspective dynamique et centrée à l'échelle du troupeau (sous-question 3), nous avons cherché à analyser l'évolution au cours de la période 2009-2017 de plusieurs performances zootechniques des troupeaux échantillonnés (n = 13 sur 26) et cherché à en identifier les facteurs explicatifs, parmi lesquels le croisement mais également des éléments relevant de la conduite plus générale du système fourrager ou du système d'élevage dans son ensemble (Figure 40 B). L'objectif derrière cette approche est de proposer une analyse unifiée des pratiques et des performances induites par l'utilisation du croisement rotatif en adaptant une méthode développée par Martin et al. (2017). Nous nous sommes appuyé sur les données de lactation, les classes génétiques des femelles des troupeaux – définies dans le chapitre 4 (Figure 40 C) –, les informations relatives aux caractéristiques générale des fermes échantillonnées et les trajectoires-types de transition technique – résultats du chapitre 3 (Figure 40 A) –. Après avoir formalisé par régression linéaire l'évolution de caractéristiques structurelles et fonctionnelles du système d'élevage, l'évolution du croisement rotatif au sein du troupeau et l'évolution de performances zootechniques, j'ai réalisé une régression linéaire des moindres carrés partiels (*PLS*) pour permettre une évaluation multicritère de l'évolution des performances zootechniques du troupeau, mais également une analyse intégrative des facteurs explicatifs de cette évolution. Ces résultats sont présentés dans le chapitre 5.

Chapitre 3 – Trois trajectoires types de transition technique pour gérer la mise en place du croisement rotatif au sein d'un troupeau bovin laitier conduit en race pure

3.1. Introduction

Le premier objectif de la thèse était de caractériser l'évolution des pratiques de configuration du troupeau – gestion des accouplements, renouvellement, réforme – au cours de la mise en place du croisement rotatif, afin nous permettre de traiter la sous-question de recherche 1, qui suppose qu'il existe différents modes de gestion technique de la mise en place du croisement rotatif au sein du troupeau bovin laitier de race pure. Pour ce faire, nous avons réalisé des entretiens semi-directifs dans 26 fermes d'élevage de bovins laitiers. Nous avons collecté des informations permettant de décrire les changements dans les pratiques de croisement, de gestion des accouplements, du renouvellement et de la réforme, mais également les changements plus systémiques (*e.g.*, conversion à l'agriculture biologique, transition vers un système pâturant) depuis les premiers accouplements croisés jusqu'à la gestion du troupeau croisé en 2018 (date à laquelle les enquêtes ont été réalisées). Nous avons réalisé une analyse multivariée (ACM) et identifié deux lignes directrices principales structurant les trajectoires techniques de mise en place du croisement rotatif : (i) l'ampleur des changements systémiques associés à la mise en place du croisement dans le troupeau et (ii) les changements de pratiques de gestion du renouvellement et de de la configuration du troupeau en général pour s'adapter à l'évolution de la dynamique démographique du troupeau induite par le taux de croisement initial. La classification hiérarchique a ensuite permis d'identifier trois groupes d'éleveur·euse·s ayant suivi des trajectoires de transition technique vers le croisement rotatif différentes.

3.2. Article 1 : Managing the transition from purebred to rotational-crossbred dairy cattle herds: three technical pathways from a retrospective case-study analysis

Accepté le 13/12/19 dans Animal (14.6.1293-1303. doi:10.1017/S1751731119003458)

Julien Quénon [1], Stéphane Ingrand [2], Marie-Angélina Magne [3]

[1] *Université de Toulouse, INRAE, INPT, INP-EI Purpan, UMR 1248 AGIR, F-31326, Castanet-Tolosan, France*
[2] *Université Clermont Auvergne, AgroParisTech, INRAE, VetAgro Sup, F-63000 Clermont-Ferrand, France*
[3] *Université de Toulouse, INRAE, INPT, INP-EI Purpan, Ensfea, UMR 1248 AGIR, F-31326, Castanet-Tolosan, France*

Abstract

The growing interest in rotational crossbreeding in Western countries is due to its potential to improve reproductive and health performances of cows. Although a large amount of research focuses on assessing crossbred cows' performances, how to manage the transition from purebred to rotational crossbred herds is under-explored. Based on a retrospective analysis of French dairy herd case studies, we aimed to identify and characterise technical pathways to make such a transition. In 2018, we performed semi-directive interviews on 26 commercial dairy farms. Data were collected to describe changes in breeding, replacement and culling management practices from the first crossbred mating with purebred cows to the management of a mainly crossbred herd in 2018. Based on a multivariate analysis, we identified two main guidelines structuring technical pathways to move towards rotational crossbred herds: (i) the depth and scale of change (*i.e.* farm v. herd) associated with the introduction of rotational crossbreeding in the whole-farm dynamics and (ii) the changes in herd replacement and breeding practices to adapt to the evolution of herd demographics induced by the evolution of the dairy crossbred mating rate over time (high from the beginning *v.* distributed over time). Hierarchical clustering discriminated three groups of farmers differing in their technical pathway to move towards a rotational crossbred herd. In pathway 1, farmers customised one or several rotational crossbreeding schemes to support whole-farm transition towards an organic or grass-based system.

Once the scheme stabilised, they quickly implemented it and had to readjust replacement and culling practices to regulate imbalance in herd demographics induced by the improvement in cow fertility. In pathway 2, farmers also customised one or several rotational crossbreeding schemes to support whole-farm redesign but they implemented it more gradually in the herd, which induced no major imbalance in herd demographics. In pathway 3, farmers predefined a relatively well-known rotational crossbreeding scheme to correct fertility issues of purebred cows without any changes at the farm level. They implemented it quickly from the beginning and had to adapt herd replacement and culling to regulate imbalance in herd demographics induced by the improvement in cow fertility. These first empirical evidences on how dairy farmers manage the transition from a purebred to rotational crossbred herd provide original scientific and operational contributions

Keywords: dairy crossbreeding, agrobiodiversity, livestock farming system, diversified farming systems, farm trajectory

Implications

Comparing the performances of crossbred females to those of purebred ones is not enough for dairy cattle farmers to move towards rotational crossbred herds. Here, we identified and characterised three technical pathways to manage such a transition. Rather than turnkey solutions, these results can support discussion between advisers and dairy farmers and to provide empirical evidence to: (i) define consistent cross-breeding scheme in accordance with their herd and personal objectives; (ii) determine the rate of introducing crossbreeding considering its delayed effect on cow fertility and herd demographics and (iii) plan options to adapt breeding management to potential herd demographics imbalance and their implications on farm structure and products marketing.

Introduction

To address global changes, dairy cattle farmers must design and manage their entire system to produce and persist in variable and non-optimal environments, as well as optimise use of renewable resources and decrease use of non-renewable resources. Meeting this challenge raises questions about the model of agricultural intensification and breeding specialisation, as well as the breeds that were established in more economically developed countries during the 1950s and continue to predominate (Brussaard et al., 2010). This model aimed to increase herd and farm productivity by buffering internal and external variability. It is based on selecting a few commercial dairy cattle breeds based on milk traits, using external inputs (*e.g.*, concentrates, veterinary products) to satisfy high-level cow requirements and rationalising and standardising herd management. Among other consequences, it resulted in the global dominance of the Holstein (HO) breed from the beginning of the 1980s (Labatut and Tesnière, 2019). Decades of effective selection of HO cows for milk production have provided substantial gains in milk, fat and protein yields (Shook, 2006) at the expense of functional traits, such as fertility (Lucy, 2001), health (Ingvartsen et al., 2003) and longevity (Hare et al., 2006). The degradation of functional traits has been exacerbated by inbreeding, resulting from both selection principles and the mass-market structure of selection using a small number of available HO bulls (Labatut and Tesnière, 2019). Although selection programmes in most countries have included functional traits since 2000s, “the problems within the Holstein breed will take time to reverse” (Ferris *et al.*, 2018). For this reason, some dairy farmers adopt crossbreeding between dairy breeds (dairy crossbreeding), relying on both heterosis and complementarity of traits in dairy breeds as a faster and effective solution to enhance functional traits.

The expected performances of first-generation crossbred (**F_1**) cows can be assessed for a wide range of crossbreeding schemes (Buckley *et al.*, 2014). However, for farmers who commit their herd to dairy crossbreeding, a crucial question is how to progress from F_1 animals. Backcrossing to the original breed to implement two-breed rotational crossbreeding will reduce heterosis and thus may not be advisable when aiming to maintain the benefits of crossbreeding over time. Crossbreeding with a third breed to implement three-breed rotational crossbreeding theoretically has greater long-term benefits (McAllister, 2002), for which there are few empirical evidence beyond two

recent studies though (Dezetter *et al*., 2017; Shonka-Martin *et al.*, 2018). In addition, using rotational crossbreeding requires farmers to adopt new breeding strategies. Yet, on-farm management of rotational-crossbred herds has been less explored (Roschinsky *et al*., 2015), especially during the transition from purebred to crossbred herds. This lack of knowledge can explain why, although rotational crossbreeding has been growing in popularity over the last two decades, it remains marginal. This is particularly the case in France, where ca. 1 000 of 69 000 French dairy farms were using rotational crossbreeding in 2015 (Dezetter, 2015).

Managing the transition from a purebred to rotational-crossbred herd is not self-evident and requires dairy farmers to make decisions about changes in their herd management practices with few technical references and thus under uncertainty: which crossbreeding scheme is most suitable? Should all or only some of the females be rotationally crossbred? If the latter, how should they be selected? What are the consequences of rotational crossbreeding on herd functioning and demographics? In return, how do dairy farmers adapt management of reproduction, replacement and culling over time? Understanding and conceptualising how dairy farmers have introduced rotational crossbreeding into their purebred herds and adaptively managed their practices during the transition toward a mainly crossbred herd is thus critical to support farmers who are considering adopting crossbreeding. In this study, we aimed to identify and characterise “technical pathways” (*i.e.* combinations of changes in farmers’ herd management practices) used to move from a purebred to a rotational-crossbred herd, based on the experiences of French dairy farmers who went through the transition process many years ago.

Materials and methods

We used a case-study approach, which is particularly adapted to obtain in-depth understanding of a phenomenon in real-life settings (Crowe *et al.*, 2011). In this study, the phenomena were on-farm technical pathways to move from a purebred to a rotational-crossbred herd. To capture these technical pathways, we interviewed 26 dairy farmers in metropolitan France and performed a retrospective analysis of their herd management from the first time they introduced crossbreeding in their purebred herd to 2018, when their herd was substantially rotational-crossbred.

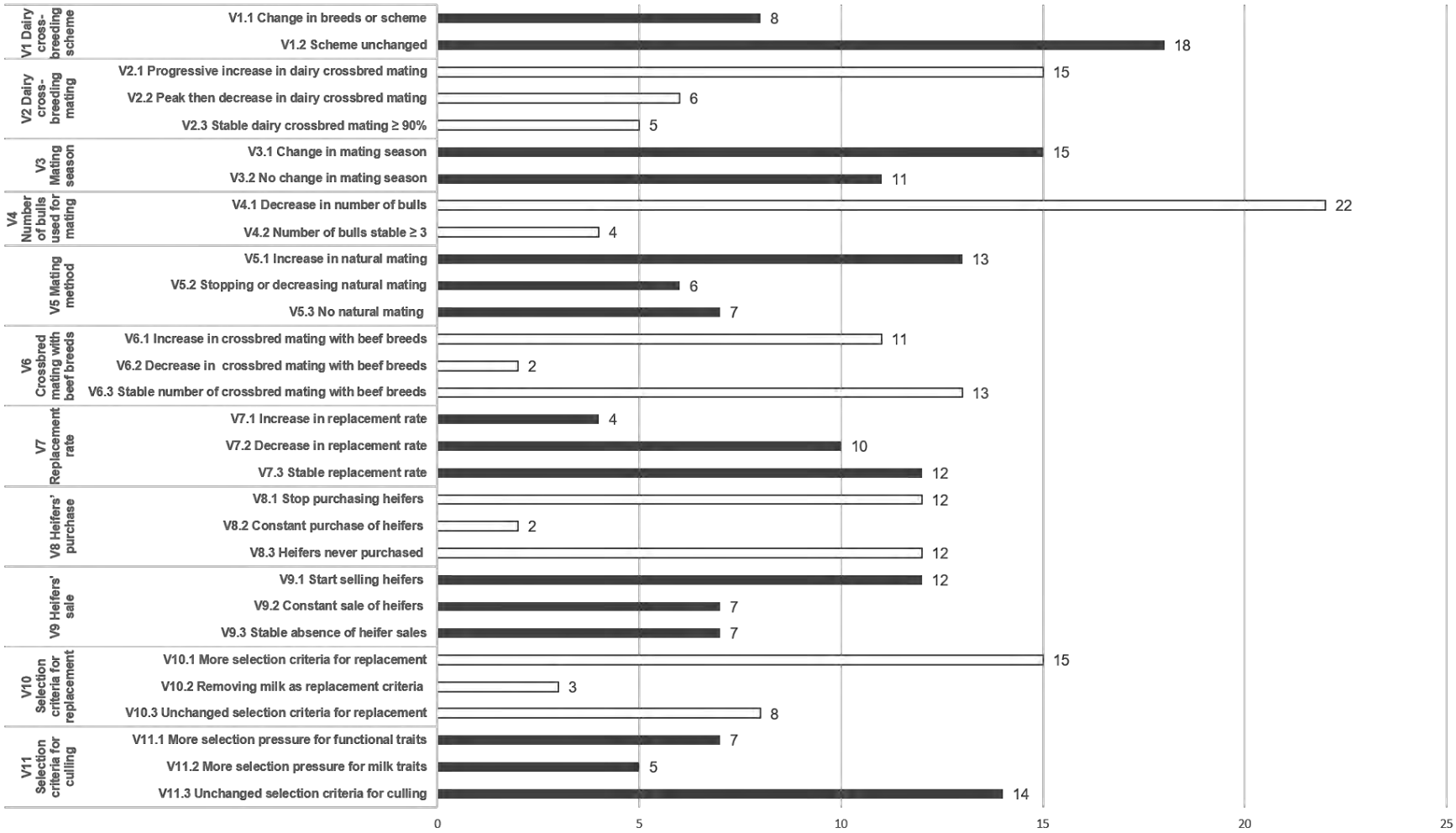


Figure 41 : Classes of the 11 variables (Vi.j, i = 1–11 and j = 1–3) selected to characterise changes in crossbreeding and herd-configuration management when transitioning the dairy cattle herd towards rotational crossbreeding

Sampling design

Sampling aimed to represent dairy farmers who had committed their herd to rotational crossbreeding with three or more breeds as a long-term strategy, to ensure they had made a transition toward a rotational-crossbred herd with substantial changes on herd management. Therefore, we sampled dairy farmers whose herd in 2018 (i) had at least 33% crossbred cows (all generations included) and (ii) included at least second-generation (**G_2**) crossbred lactating cows.

As developed by Biernacki and Waldorf (1981) to sample hard-to-reach populations, we used the snowball method for sampling. We initially relied upon several contacts of farmers ("seeds") provided by farm advisers from private and public breeding companies or identified in the technical press and through social networks. We recruited new farmers during interviews with these "seeds", asking them if they knew other farmers who met our sampling criteria. We then proceeded in the same manner with newly recruited farmers until we reached data saturation.

Interview design and process

We developed, tested and refined a semi-structured interview that focused on farmers' practices for herd-configuration management and its adaptation over time during the transition from a purebred to a crossbred herd. Herd-configuration management refers to practices that affect herd demographics, including breeding, replacement and culling. To objectify farmers' narratives, farmers were asked to focus on technical operations and facts that actually occurred (Vermersch, 2009). To consider the limits of farmers' memories during retrospective data collection, we considered trends in changes of basic herd management practices, rather than a year-by-year quantification.

The interview was organised into two sections. The first section gathered data about the general trajectory of the farm, from the farmer's establishment of the farm to the date of the interview. Farmers were asked to describe the history of the farm, particularly major changes on the farm from their perspectives. This included changes in farm characteristics (*e.g.*, farm size, herd size, milk yield), farmers' business objectives (*e.g.*, conversion toward organic farming) and personal motivations (*e.g.*, reducing workload, maintaining milk yield). The second and main section gathered

Topic of the interview guide	Collected data (for each section)	Selected encoded variable
Breeding management	Breeds, dairy crossbreeding schemes, percentage of crossbred in the herd, selection criteria for crossbred mating, mating season, mating methods[1], selection criteria for bulls, dairy crossbred mating, crossbred mating with beef breeds, age at first calving	V1: Changes in dairy crossbreeding scheme V2: Changes in dairy crossbred mating V3: Changes in mating season V4: Changes in the number of bulls used for mating V5: Changes in mating method V6: Changes in percentage of crossbred mating with beef breeds
Replacement management	Selection criteria for replacement, replacement rate[2], purchase of heifers, sale of heifers	V7: Changes in replacement rate V8: Changes in purchase of heifers V9: Changes in sale of heifers V10: Changes in selection criteria for replacement
Culling management	Selection criteria for culling, culling rate	V11: Changes in selection criteria for culling

[1] Mating methods: artificial insemination *vs.* natural mating;

[2] Replacement rate is calculated by dividing number of primiparous females with number of dairy cows

Tableau 5 : Structure and content of the interview guide on crossbreeding management in the dairy cattle farms sampled

data about changes that had occurred from the beginning of crossbreeding until 2018 in the three main dimensions of farmers' herd-configuration management: breeding, replacement and culling (Tableau 5). Farmers were asked to describe their practices for each dimension, first for the farming situation on the date of the survey (2018) and then on the date of the first dairy crossbred mating. We identified the changes that occurred in these practices between these two dates. All interviews were performed from August to September 2018, lasted an average of 90 minutes each and were recorded.

Data analysis

To standardise the representation of collected data, we summarised each of the 26 farmers' recorded interviews. We then used a method of data abstraction from knowledge engineering (Girard *et al.*, 2008) to build categorical variables (broken down into classes) to characterise the diversity of the changes in farmers' herd-configuration management practices during the transition toward a rotational-crossbred herd. Eleven active variables (**V*i.j*** = 1–11) that best reflected differences in these changes among the sampled farmers were selected (Figure 41). Two variables described the changes in breeding management: 'Crossbreeding scheme' (V1) and 'Percentage of dairy crossbred mating' (V2). Four variables described the changes in mating and reproduction management: 'Mating season' (V3), 'Number of bulls used for mating' (V4), 'Mating methods' (V5), that is, artificial insemination or natural mating and 'Percentage of crossbred mating with beef breeds' (V6). Four variables described the changes in replacement management: 'Replacement rate' (V7), 'Purchase of heifers' (V8), 'Sale of heifers' (V9) and 'Selection criteria for replacement' (V10). One variable described the changes in culling management: 'Selection criteria for culling' (V11). Ten supplementary variables were defined to describe the changes in more general characteristics or practices of the farm (Tableau 6).

Statistically, a technical pathway referred to a combination of classes of the active variables (**V*i.j***, *i* = 1–11 and *j* = 1–3). We aimed to identify and understand the diversity of these technical pathways. As developed by Abdi and Valentin (2007) to analyse the pattern of relationships of individuals described by categorical variables, we performed multiple correspondence analysis (MCA) of the dataset (26 farms × 11 active variables)

. Supplementary variable	Class of the variable
SV1 Major dairy crossbreeding scheme	SV1.1 Procross[1] scheme
	SV1.2 Normande or Simmental breeds-based scheme
	SV1.3 Jersey breed-based scheme
SV2 Breed of sire used on PB[2] cows	SV2.1 Montbéliarde sire on PB[2] cows
	SV2.2 Normande or Simmental sire on PB[2] cows
	SV2.3 Viking Red or Swiss Brown sire on PB[2] cows
SV3 Breed of sire used on F_1[3] cows	SV3.1 Montbéliarde sire on F_1[3] cows
	SV3.2 Normande or Simmentale sire on F_1[3] cows
	SV3.3 Viking Red or Swiss Brown sire on F_1[3] cows
	SV3.4 Jersey sire on F_1[3] cows
SV4 Breed of sires used on G_2[4] cows	SV4.1 Holstein sire on G_2[4] cows
	SV4.2 Normande or Simmentale sire on G_2[4] cows
	SV4.3 Viking Red or Swiss Brown sire on G_2[4] cows
	SV4.3 Jersey sire on G_2[4] cows
SV5 Evolution in farm size	SV5.1 Increase of Utilised Agricultural Area
	SV5.2 Decrease of the Utilised Agricultural Area
	SV5.3 Utilised Agricultural Area remained stable
SV6 Evolution in the percentage of grassland area	SV6.1 Increase in grassland area
	SV6.2 Decrease in grassland area
	SV6.3 Grassland areas remained stable
SV7 Evolution in the percentage of silage maize area	SV7.1 Increase in silage maize area
	SV7.2 Decrease of silage maize area
	SV7.3 Silage maize area remained stable
SV8 Evolution in herd size	SV8.1 Increase in herd size
	SV8.2 Herd size remained stable
SV9 Evolution in milk yield per cow	SV9.1 Increase in milk yield per cow
	SV9.2 Decrease in milk yield per cow
	SV9.3 Stable milk yield per cow
SV10 Evolution in farming	SV10.1 Converted to OF before dairy crossbreeding
	SV10.2 Conversion to OF after dairy crossbreeding
	SV10.3 Conventional farming

Tableau 6 : Classes of the 10 supplementary variables (SVi.j, i = 1-10 and j = 1-4) to describe the changes in general characteristics or practices of the dairy cattle farms sampled

We then performed clustering analysis, which used results of the MCA to discriminate and characterise groups of farmers with different technical pathways. Finally, we performed Kruskal–Wallis tests for the supplementary variables to compare the groups obtained. Effects were considered significant at $P < 0.05$. All statistical analyses were performed using R software (version 3.5.2, FactoMineR and factoextra packages).

Statistically, a technical pathway referred to a combination of classes of the active variables (**Vi.j**, i = 1–11 and j = 1–3). We aimed to identify and understand the diversity of these technical pathways. As developed by Abdi and Valentin (2007) to analyse the pattern of relationships of individuals described by categorical variables, we performed multiple correspondence analysis (MCA) of the dataset (26 farms × 11 active variables). We then performed clustering analysis, which used results of the MCA to discriminate and characterise groups of farmers with different technical pathways. Finally, we performed Kruskal–Wallis tests for the supplementary variables to compare the groups obtained. Effects were considered significant at $P < 0.05$. All statistical analyses were performed using R software (version 3.5.2, FactoMineR and factoextra packages).

Results

Changes in general characteristics of the sampled farms

The final sample consisted of 26 commercial farmers from four main regions of dairy cattle production in France: Brittany (n = 11), Normandy (n = 5), Auvergne-Rhône-Alpes (n = 5) and Hauts-de-France (n = 5). In 2018, among the 26 farmers, 18 practised organic farming, one was converting to organic farming and seven practised conventional farming. The farmers sampled had established their farms from 1980 to 2012 and had been crossbreeding for 6 years at least and 27 years at most. Before crossbreeding, 20 herds had been purebred HO, five had combined HO cows with one or more other dairy breeds and one had been purebred Montbéliarde. In 2018, all farms sampled had at least 43% crossbred cows and half had 82% crossbred cows in the herd. The farms sampled varied in farm size, herd size and milk yield, whether at the beginning of dairy crossbreeding or in 2018 (Tableau 7).

	Beginning (t_0)			2018			Percentage change (2018 *v.* t_0)[1]		
Characteristic	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max
Farm size (ha)	60	30	390	74	43	1000	+0.19	−0.42	+2.83
Grassland area (% of LFA)	ND	ND	ND	80	9	100	ND	ND	ND
Silage maize area (% of LFA)	ND	ND	ND	6	0	77	ND	ND	ND
Herd size	43	18	170	70	25	845	+0.36	−0.09	+3.98
Milk yield (kg/cow/year)	6966	4644	10 320	5600	3100	11 352	−0.21	−0.50	+0.39
Crossbred cows (% of the herd)	0	0	0	82	43	100	ND	ND	ND

Med = median; Min = minimum; Max = maximum; LFA = livestock feeding area; ND = not documented.
[1]Calculated for each farm characteristic *a* as $\frac{a_{2018}-a_{t0}}{a_{t0}}$.

Tableau 7 : Main characteristics of sampled dairy cattle farms when crossbreeding began (t_0: 1991 to 2012) and in 2018

Forage systems also varied among the farms in 2018: grassland and silage maize covered 9–100% and 0–77% of the livestock forage area, respectively. However, grass-based systems were most common in the sample in 2018, with medians of 80% grassland and 6% silage maize in the livestock forage area. In addition, the median percent- age changes from t0 to 2018 indicated a general increase in farm and herd size by 19% and 36%, respectively, and a decrease in milk yield per cow by 21% (Tableau 7).

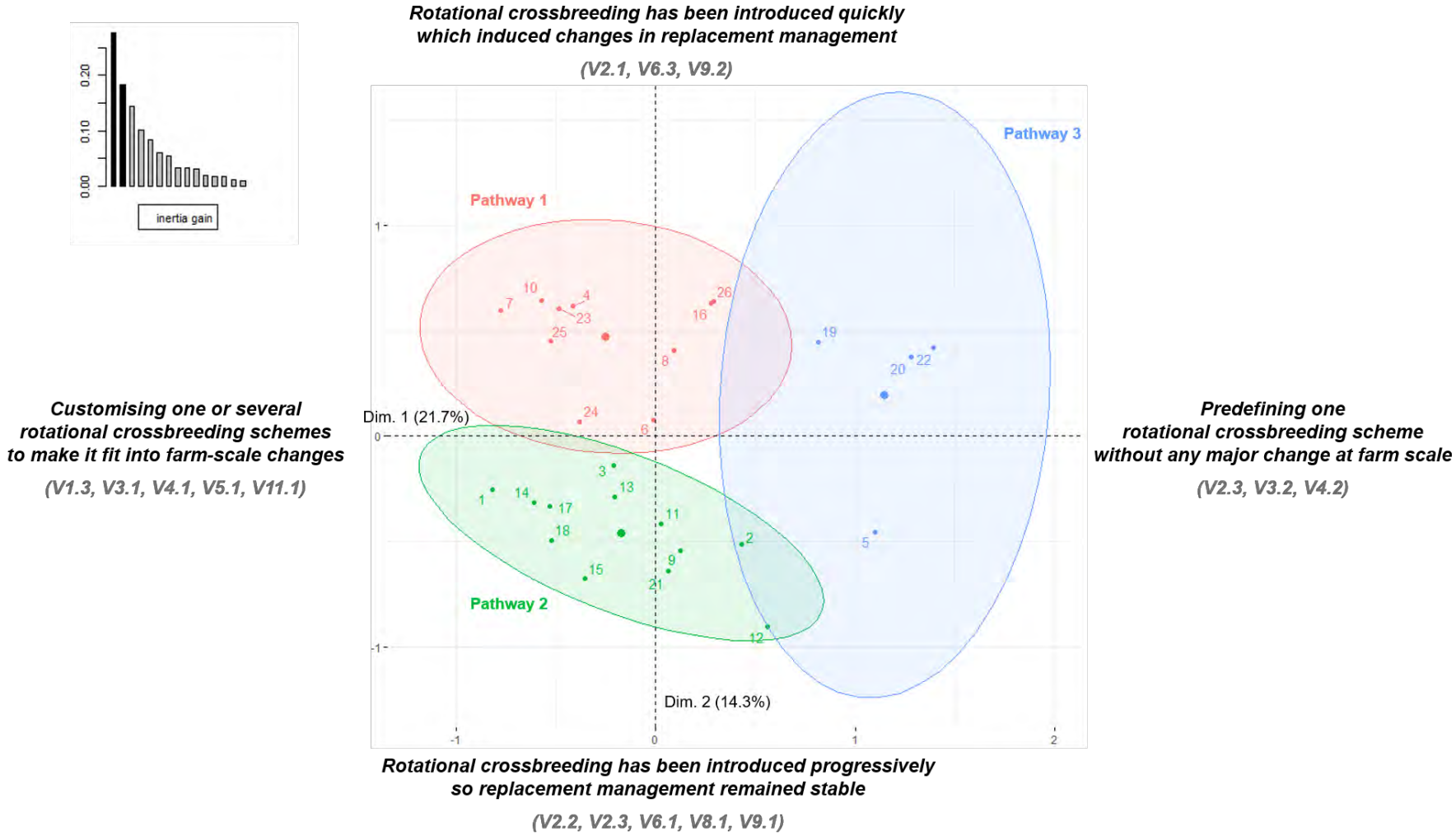


Figure 42 : Three groups of dairy cattle farmers differing in their technical pathways to move towards rotational crossbred herd, according to the scale of change in the farming system (Dim. 1) and to the rate of its introduction within the herd and the consequences on the management of replacement (Dim. 2). Classes of the active variables (Vi.j) determining each dimension are defined in Table 2. Ellipses of the groups are plotted according to a confidence interval of 90%.

Two guidelines structuring technical pathways towards rotational crossbred herds

The two first axes of the MCA explained 21.7% and 14.4% of the total inertia, respectively (Figure 42). They were considered as guidelines structuring technical pathways towards rotational crossbred herds.

Axis 1 was determined mainly by the depth of change in breeding and mating management practices during the introduction phase of crossbreeding into the purebred herd and the scale of change in the whole farm (herd *v.* farm). On the left side of axis 1 (Tableau 8), rotational crossbreeding was induced and was associated with substantial changes in mating (V3.1, V4.1 and V5.1) and replacement management (V11.1). These changes were notably allowed by fertility gains due to crossbreeding and aimed to support redesign of the whole farm, such as a shift to a low-input farming system or grass-based feeding system (SV7.2 and SV10.2). It consisted of using one or several rotational cross- breeding schemes after sequences of trial and error (V1.1), to create animals best suited to a livestock-system redesign, which implied grouping mating and/or low-feed requirement animals (SV1.3). Conversely, on the right side of axis 1, rotational crossbreeding induced fewer changes in herd management practices (V2.3 and V4.2) and was itself the main change in the farm (V3.2 and SV10.3). It consisted of implementing an initial predefined and well-known three-breed rotational crossbreeding scheme that remained stable over time (V1.2) to correct a fertility defect in cows without decreasing milk performances (SV9.1). No other changes were made except to increase selection pressure for milk traits (through replacement and culling) by improving cow fertility through crossbreeding. Axis 2 was determined mainly by the adaptation of herd replacement and breeding practices in response to the improvement in cow fertility according to the rate of dairy crossbred mating in the herd over time. The top of axis 2 (Tableau 8) referred to a rapid increase in dairy crossbreeding insemination within the herd (V2.2 and V2.3) and to required readjustments in replacement and breeding management to address an excess of heifers in the herd, such as selling cross- bred heifers or increasing crossbreeding with beef-breed bulls (V2.3, V6.1, V8.1 and V9.1). Conversely, the bottom of axis 2 referred to a gradual increase in dairy-crossbred mating in the herd (V2.1) and fewer changes in replacement management: crossbreeding with beef breeds (V6.3) and heifer sales (V9.2) remained unchanged.

Selected classes	Coordinate	cos2	v.test
Axis 1 Left side			
V1.1 Change in breeds or scheme	−0.342	0.264	−2.568
V3.1 Change in mating season	−0.554	0.418	−3.233
V4.1 Decrease in number of bulls	−0.341	0.639	−3.996
V5.1 Increase in natural mating	−0.663	0.439	−3.314
V9.3 Stable absence of heifer sales	−0.882	0.287	−2.677
V11.1 More selection pressure for functional traits	−0.818	0.246	−2.482
SV1.3 Jersey breed-based strategy	−0.524	0.145	−1.905
SV7.2 Decrease in silage maize area	−0.328	0.147	−1.918
SV10.2 Conversion to OF after dairy crossbreeding	−0.412	0.271	−2.603
Axis 1 Right side			
V1.2 Scheme unchanged	0.770	0.264	2.568
V2.3 Stable dairy crossbred mating ≥ 90%	1.261	0.379	3.077
V3.2 No change in mating season	0.755	0.418	3.233
V4.2 Number of bulls stable ≥ 3	1.874	0.639	3.996
V5.2 Stopping or decreasing natural mating	0.941	0.266	2.578
V7.1 Increase in replacement rate	1.258	0.288	2.681
V9.1 Start selling of heifers	0.614	0.323	2.842
V10.1 More selection criteria for replacement	0.469	0.300	2.737
V11.2 More selection pressure for milk traits	1.594	0.605	3.889
SV1.1 Procross scheme	0.628	0.338	2.906
SV9.1 Increase in milk yield per cow	0.982	0.289	2.689
SV10.3 Conventional farming	1.304	0.626	3.957
Axis 2 Bottom			
V2.1 Increase in dairy crossbred mating	−0.728	0.724	−4.253
V5.2 Stopping or decreasing natural mating	−0.854	0.219	−2.339
V6.3 Crossbreeding with beef breeds stable	−0.413	0.480	−2.064
V9.2 Constant sale of heifers	−0.997	0.366	−3.025
Axis 2 Top			
V2.2 Peak then decrease in dairy crossbred mating	1.060	0.337	2.903
V2.3 Stable dairy crossbred mating ≥ 90%	0.913	0.199	2.228
V6.1 Increase in crossbreeding with beef breeds	0.687	0.346	2.941
V8.1 Stop purchasing heifers	0.843	0.609	3.902
V9.1 Start selling heifers	0.493	0.208	2.282

OF = organic farming.
v.test = test value: when v.test ≥ 2 or v.test ≤ −2, the coordinates of the class are significantly positive or negative, respectively; cos2 = quality of the projection of the variable on the axis.

Tableau 8 : Classes of the active (Vi,j) and supplementary variables (SVi,j) that are significantly represented on the first two axes retained from the multiple correspondence analysis performed to describe changes in management of the dairy cattle herds sampled

Three groups of farmers according to their technical pathways towards rotational crossbred herds

The clustering process using the coordinates from these two MCA axes discriminated three groups of farmers that differed in their technical pathway towards crossbred herds (Figure 42). The Kruskal–Wallis tests performed on the median value of percentage change in each general farm characteristic of the groups (from t_0 to 2018) showed no significant differences among groups. Moreover, there was no correlation between the clusters identified and farm region.

Pathway 1: 'Customising one or several rotational crossbreeding scheme to support whole-farm redesign and then implementing it quickly'. This group of 10 farmers (Tableau 9) began crossbreeding in their herd as a strategy to support a whole-farm redesign, such as converting to organic farming (8 of 10 farmers) and/or transitioning to a low-cost grazing system (8 of 10 farmers). They all tested several breeds and three-breed rotational crossbreeding schemes in their initial purebred HO herd, in order to identify those best suited to such whole-farm redesign. Six farmers finally chose the 'Procross' scheme (Holstein × Montbéliarde × Viking Red) as a way to support such a whole-farm redesign while minimising the decrease in milk yield. The four other farmers finally chose three-breed rotational schemes, based on either Jersey, Normande or Simmental breeds, as they were more willing to enhance functional traits of the herd, at the expense of milk yield. Mating and calving, which were initially managed year-round, were restricted to a single period in spring to synchronise the lactation peak with grass growth, in accordance with the objectives of the whole-farm redesign. Mating management was no longer individualised: all farmers in the group reduced the number of bulls as inbreeding management became easier in crossbred herds. Most farmers in the group (7 of 10 farmers) used natural mating and their own bulls (purebred and crossbred) at first service more frequently, while the other three farmers continued to use only artificial insemination. For all 10 farmers, the percentage of dairy crossbred mating was low during the trial-and-error sequences for choosing suitable scheme(s). Once the cross- breeding scheme was chosen, however, the percentage increased to a peak and then decreased slightly to a fairly high and constant level. The increase in the dairy crossbred mating rate over time thus improved cow fertility and influenced herd demographics: farmers had to deal with more heifers. To regulate the excess heifers, they changed their herd-replacement practices. Nine farmers stopped

Characteristic	Pathway 1 ($n = 10$)	Pathway 2 ($n = 12$)	Pathway 3 ($n = 4$)
Classes of variables represented in the group	'Stop purchasing heifers' (V8.1) 'Peak then decrease in dairy crossbred mating' (V2.2) 'Increase in crossbreeding with beef breed' (V6.1) 'Change in mating season' (V3.1).	'Progressive increase in dairy crossbred mating' (V2.1) 'Heifers never purchased' (V8.3) 'Constant sale of heifers' (V9.2)	'Large and stable number of bulls ≥ 3' (V4.2) 'More selection pressure for milk traits' (V11.3) 'Stable dairy crossbred mating ≥ 90%' (V2.3) 'No change in mating season' (V3.2)
Classes of variables underrepresented in the group	'Stopping or decreasing natural mating' (V5.2)	'More selection pressure for milk traits' (V11.3) 'Stable dairy crossbred mating ≥ 90%' (V2.3)	'Increase in natural mating' (V5.1) 'Unchanged selection criteria for culling' (V11.3) 'Stopping or decreasing natural mating' (V5.2)
Position of the group on the MCA factorial plan	Axis 1 Left side Axis 2 Top	Axis 1 Left side Axis 2 Bottom	Axis 1 Right side Axis 2 Top

MCA = multiple correspondence analysis.

Tableau 9 : Characteristics of dairy cattle farms in three technical pathways towards rotational crossbred herds. Classes of the active variables (Vi.j) are defined in Figure 41

buying the heifers once needed to ensure herd size, and some (6 of 10 farmers) started to sell excess heifers. Eight farmers also increased the percent- age of crossbred mating with beef breeds. Moreover, the excess heifers enabled the increase in herd size to offset the decrease in milk yield (9 of 10 farmers).

Pathway 2: 'Customising one or several rotational crossbreeding scheme to support whole-farm redesign and then implementing it progressively'. Like farmers in pathway 1, this group of 12 farmers (Tableau 9) introduced dairy crossbreeding to support whole-farm change, more precisely conversion to organic farming (11 of 12 farmers). These farmers also tested several breeds and schemes, but unlike farmers in pathway 1, they all chose schemes more adapted for improving functional and milk-content traits, such as those based on the Jersey breed (6 of 12 farmers) or the Normande and Simmental breeds (4 of 12 farmers). This approach explained why, for these farmers, selection pressure on females was influenced less by milk yield traits and more by milk-content and functional traits. These farmers also crossbred few cows initially, but unlike farmers in pathway 1, increased the percentage of dairy crossbred mating progressively over time, even after they stabilised the final three-breed crossbreeding scheme. Consequently, this progressive rate of introducing dairy crossbred mating might not have imbalanced herd demographics (*i.e.* might have smoothed its consequences on fertility and hence on the number of heifers).

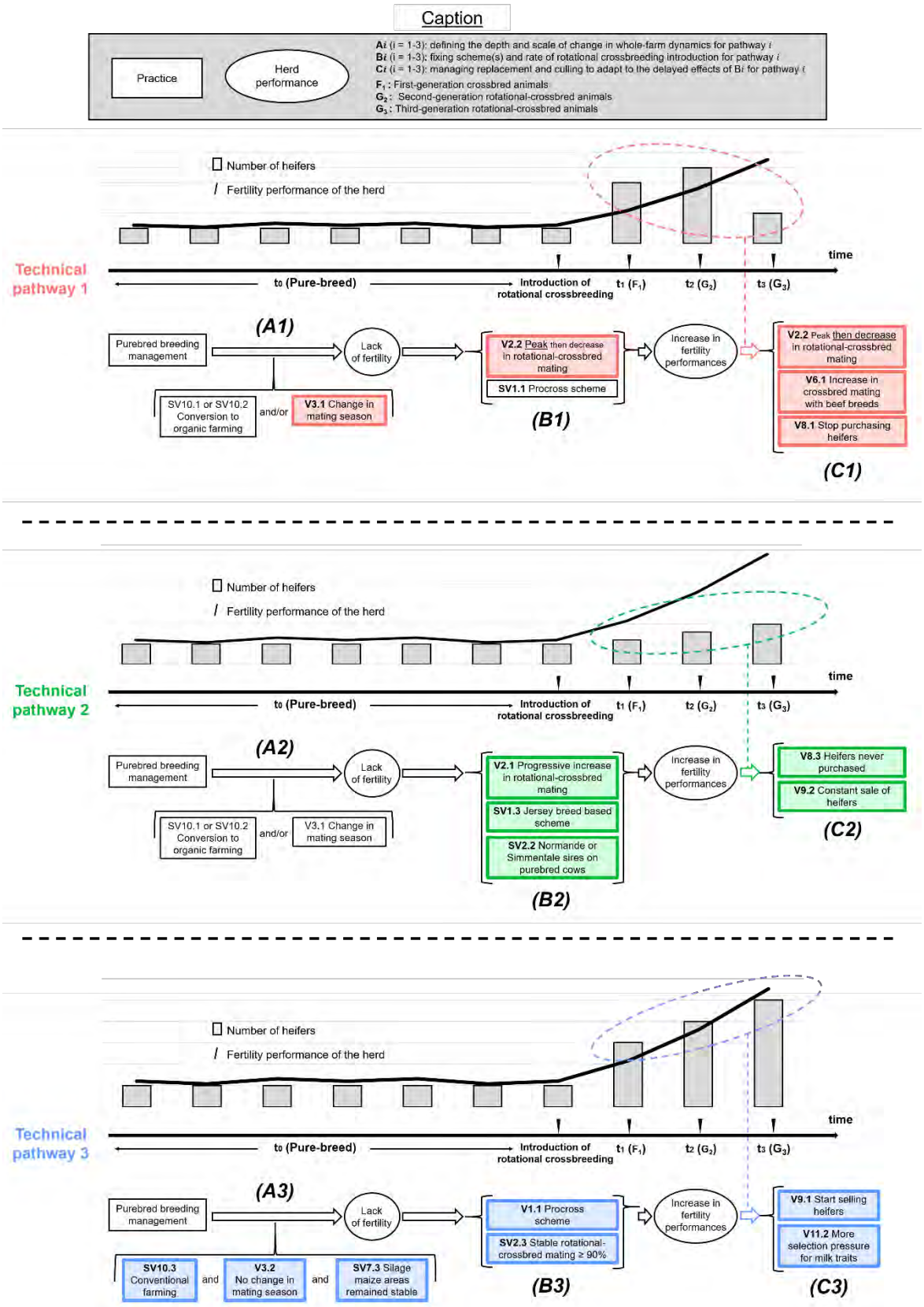


Figure 43 : Conceptual model of the three technical pathways from a purebred to a rotational crossbred dairy cattle herd. Classes of the active (Vi.j) and supplementary variables (SVi.j) characterising each pathway are defined in Figure 41 and Table 6, respectively

Pathway3: 'Predefining one relatively well-known rotational crossbreeding scheme and implementing it quickly to correct fertility issues of purebred cows without changing anything else'. This group of four farmers (Tableau 9) began dairy cross- breeding to improve cows' reproductive performances with- out decreasing milk performance, while also limiting herd and farm changes. Whole-farm management, breeding management and the fodder system remained the same. These farmers chose a relatively well-known three-breed cross- breeding scheme (i.e. 'Procross') from the very beginning of dairy crossbred mating and continued to implement it throughout the transition until they achieved a mostly rotational crossbred herd. As the benefits of the 'Procross' scheme for reproductive and milk performances fit their objectives, they were confident in crossbreeding a large percentage of cows (i.e. ≥90%) from the beginning, and maintaining it high over time. The high and stable percentage of dairy crossbred mating over time and the associated improvement in cow fertility had two consequences. First, it enabled farmers to increase selection pressure for milk- yield traits through replacement and culling. Secondly, like farmers in pathway 1, they had to deal with excess heifers by adapting herd replacement and/or increasing herd size.

Discussion

Based on our results, we developed a conceptual model of technical pathways that synthesises new insights about the transition process towards rotational crossbreeding in a generic way and facilitates comparison of the technical pathways identified (Figure 43). This graphical representation enables highlighting and discussing differences among the three technical pathways we identified.

Rotational crossbreeding as one element of redesigning the farm system v. a means to replace the purebred cows

We demonstrated that the technical pathways towards rotational crossbreeding differed in the depth and scale of change in whole-farm dynamics (Figure 43, Ai). Rotational crossbreeding was used mainly (by all 22 farmers of pathways 1 and 2) as a means to adapt the herd for whole-farm redesign, such as conversion to organic farming or transition to a grass-based system (Figure 43, A1 and A2). Conversely, as illustrated by pathway 3, it was also used only to replace the purebred HO herd with a

more robust genotype in a conventional farming system that remained relatively unchanged otherwise (Figure 43, A3). These results are consistent with those describing benefits of rotational crossbreeding not only in grass-based systems (Vance et al., 2013) but also in livestock systems with different land use and animal productivity (Dezetter et al., 2017; Clasen et al., 2019). They also agree with Nauta et al. (2005) and Sørensen et al. (2008) who showed that dairy crossbreeding was one way to adapt cows during the conversion to organic farming.

Crossbreeding to redesign farm system *v.* to replace purebred cows fit with the 'efficiency-substitution-redesign' (ESR) framework developed by Hill and MacRae (1995), which is often used to describe transition of crop systems towards agroecology (Mawois et al., 2019) but much less for livestock systems. According to the ESR framework, there are three levels of system change, based respectively on improving the system's efficiency, replacing one element of the system with another or redesigning the entire system, including its objectives. Our results showed that all dairy farmers who transitioned towards crossbred herds initially tried to improve the reproductive efficiency of their purebred herd. Repeated failures of this strategy led farmers of pathway 3 to engage in a strategy of replacing a purebred with a crossbred genotype, while farmers of pathways 1 and 2 adopted rotational cross- breeding because reproductive failures were compromising the whole-farm redesign they desired.

Differences in managing uncertainty and adapting herd management over time

The literature on the management of transitions states that there are no pre-defined pathways and that pathways must be built along the way, thus requiring farmers to manage uncertainty and adapt management (Magda et al., 2019). Our findings provide empirical evidence of how dairy farmers manage uncertainty and adapt management in different ways to move from purebred to rotational crossbred herds. First, the technical pathways differed in how farmers jointly chose the crossbreeding scheme for their herd and the rate at which they introduced it into the herd (Figure 43, Bi). Farmers of pathways 1 and 2 proceeded by trial and error to find scheme(s) consistent with their herd and personal objectives. It suggests their willingness to gain autonomy in decision-making over dairy genetics that did not meet yet their expectations. As they

chose to customise the schemes, they may have struggled to find appropriate external references. Conversely, farmers of pathway 3 chose the 'Procross' scheme before they started crossbreeding, for which more extensive literature exists (Dezetter et al., 2017; Shonka-Martin et al., 2018) and a breeding company provides technical advising services in many countries including France. This may have given them knowledge elements on the potential effects of rotational crossbreeding on herd performances and presumably reduced uncertainty. Besides, we showed that the introduction rate of dairy crossbreeding is closely related to the scheme dairy farmers chose: the longer they spent testing breeds and schemes to find the most suitable one(s), the more gradually they introduced them (Figure 43, B1 and B3 *v*. B2). These findings highlight the need for studies on the performances of different three-breed cross- breeding schemes (*i.e*. different kinds of G2 cows).

Secondly, we showed that, after introducing dairy crossbreeding, farmers had to manage the increase in crossbred mating rate over time, and to adapt to its consequences on herd demographics (Figure 43, Ci). Farmers of pathway 2 implemented it progressively and thus did not have to change their management, as there were no excess heifers (Figure 43, C2). Conversely, farmers of pathways 1 and 3 had to manage excess heifers, as they introduced it more quickly. They adapted by changing or combining several practices, such as increasing sales and stopping the purchase of heifers, replacing some dairy crossbred mating with cross- breeding with beef bulls and increasing herd size (Figure 43, C1 and C3).

Our conceptual model highlights effects of the interrelated nature of herd management practices on herd dem-ographics and its specific characteristics for transition towards rotational crossbreeding. These findings emphasise that transition towards a rotational crossbred herd consists of feedback loops between implementing herd management practices, assessing their effects on herd performances – for example, fertility – and demographics, and consolidating the technical choices adopted or readjusting them. Our results agree with the conceptual model of farm change cycle proposed by Sutherland et al. (2012) and extend it with empirical evidence in livestock systems.

Potential use for advising dairy farmers

Although we did not discuss with farm advisers how to use our results, we believe they can help support decisions of dairy farmers who are considering transition towards a rotational crossbred herd. Both the graphical representation of the MCA and our conceptual model can enable these farmers to visualise the main guidelines for such a transition, identify three possible technical pathways for it and anticipate consequences of each on herd configuration management. We do not claim to provide a turnkey solution but rather a basis for discussion between dairy farmers and advisers to define a crossbreeding scheme in accordance with the farmers' objectives (redesigning the farm system v. replacing a genotype), but also with how they manage uncertainty. Like those of Solano et al. (2001) and Magne and Cerf (2010), our results stress that the human component plays a fundamental role in decision-making. Our results could also be used to discuss how the rate of introducing crossbreeding into the purebred herd influences cow fertility and herd demographics. Rotationally crossbreeding only a few cows within the herd may reduce the risk of 'failure', but it dilutes its benefits on fertility, and thus uncertainty might remain. Conversely, rotationally cross- breeding the entire herd may not only yield benefits more rapidly but also cause delayed effects that farmers must manage and adapt to. To increase knowledge about this point and thus consolidate support for farmers, it will be interesting to analyse herd performances during the transition towards crossbred herds, as done by Dezetter et al. (2017), and test for differences in herd performances among the three technical pathways we identified

Finally, we highlighted different strategies to adapt to the delayed effects of rotational crossbreeding on herd demographics, including increasing animal sales, stopping animal purchases, crossbreeding with beef breeds to increase meat yields. These strategies can bediscussed for individual advice; however, as they may affect the marketing of animal products, we believe that collective advice, and even a discussion about the organisation of the downstream dairy industry (Magne et al., 2019), is also required.

Perspectives for the method

We do not claim to have a representative sample of the population of farmers practicing rotational crossbreeding in France. Moreover, organic farming is overrepresented in our sample, as it only represented ca. 4% of French dairy farms in 2015 (France AgriMer, 2016). Nevertheless, the sample, although small, represents ca. 3% of the population of dairy farmers practising rotational crossbreeding in France (Dezetter et al., 2015). However, to validate the robustness of our results, it is necessary to extend the sample within France and to other countries (e.g. those in central Europe, United States) that have similar contexts for initiating dairy crossbreeding (Buckley et al., 2014). Conversely, we believe that applying our method to dairy farms in countries in the Southern Hemisphere would be interesting, as their farms may differ in their general context and motivations for dairy crossbreeding (Roschinsky et al., 2015).

We used a retrospective method based on farmers' narratives about their past and present herd management practices and their changes over time. However, relying on farmers' memories for periods 10–20 years in the past inherently runs the risk of obtaining inaccurate data, as farmers may no longer remember them or reconstruct their history after the fact (Vermersch, 2009). We limited this bias and objectified the data collected by encouraging farmers to recall concrete facts and to emphasise their current practices, such as those used for purebred herd management, and the differences between past and present herd management. Despite this shortcoming, such long-term narratives are a relevant way to rebuild trajectories in the absence of consistent records (Chantre et al., 2015; Coquil et al., 2017). To avoid such reconstruction of history, it would be useful to analyse farmers' herd management, while they are transitioning, but doing so would require setting up long-term farm monitoring, which is costly from an organisational and economic perspective.

Conclusion

We provide first empirical evidence of different technical pathways to transition from a purebred to a rotational cross- bred herd. They highlight that such a transition requires dairy farmers to manage: (i) successive phases including assessing inconsistence of purebred herd with farmer's objectives, introducing rotational crossbreeding and implementing it in the whole herd; (ii) multiple and inter-related nature of change in herd configuration and the scale at which change is enacted; (iii) iterations between the changes in farmers' practices and their effects on herd performances, including fertility and its impact on herd demographics. These findings complete literature on rotational crossbreeding, which has, up to now, been focused on crossbred cows' performances rather than on herd management.

Acknowledgements

This study was funded by the Sciences for Action and Development (SAD) division of INRA, the French Occitanie Region, the ENSFEA scientific committee and the PSDR4 ATA-RI and ANR TATABOX projects. The authors thank advisers for their expertise on sampling and dairy farmers for their warm welcome. They are grateful to Guillaume Martin for his advice during the writing workshop for the article and Michelle and Michael Corson for the English editing.

Declaration of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethics statement

Dairy farmers were previously informed in writing about the purpose of the study and the information that we aimed to collect in the interviews. Dairy farmers' interviews were recorded with their verbal authorisation. All data have been pseudonymised.

Software and data repository resources

None of the data were deposited in an official repository.

References

Les références spécifiques au chapitre 3 sont intégrées à la section *Références bibliographiques* du manuscrit

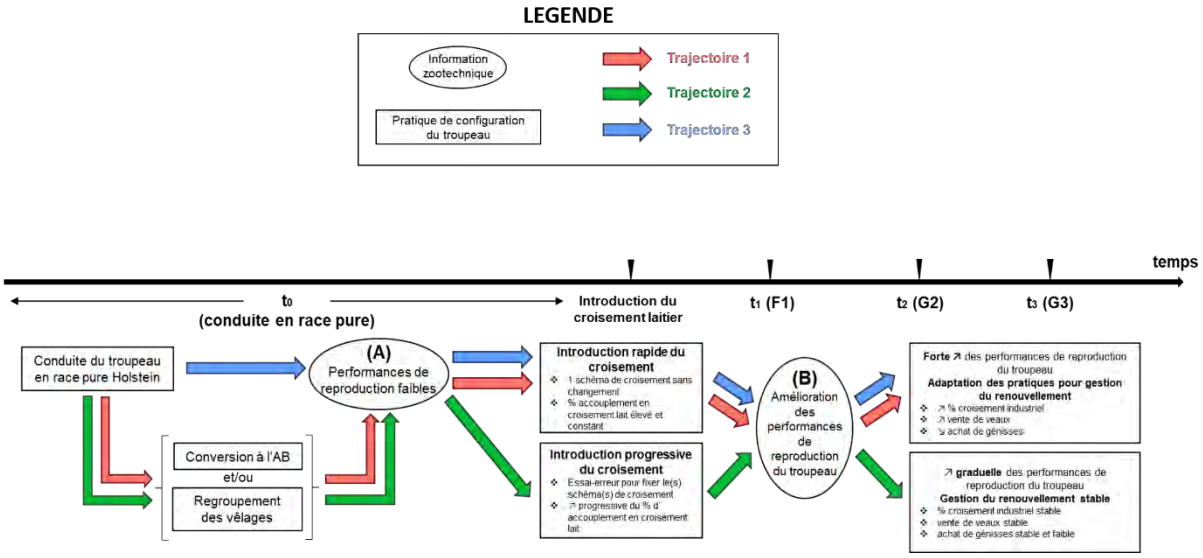


Figure 44 : Modèle conceptuel des trois trajectoires types de transition technique suivies par les éleveur·euse qui mettent en place le croisement rotatif au sein de leur troupeau initialement conduit en race pure

3.3. Conclusion

Nous avons caractérisé trois trajectoires types de transition vers un troupeau croisé (Figure 44) qui diffèrent selon l'ampleur des changements systémiques associés à l'introduction du croisement dans le troupeau (changements de faible ampleur *i.e.* maintien du système en place inchangé *vs.* changements de forte ampleur *i.e.* reconception du système *via* une conversion à l'AB ou une transition vers un système herbager et/ou économe) et selon le rythme auquel le croisement a été introduit et la gestion de ses effets différés qu'il induit (introduction rapide induisant un changement de la démographie du troupeau et nécessitant des éleveur·euse·s d'adapter leurs pratiques de configuration du troupeau *vs.* introduction lente et ne nécessitant pas d'ajustements des pratiques de configuration du troupeau). Ces trajectoires types présentent deux points de passage caractéristiques et communs aux trois trajectoires. Tout d'abord, les trois trajectoires se caractérisent par un point de blocage commun qui sous-tend le recours au croisement rotatif : il s'agit des faibles performances de reproduction lorsque le troupeau était conduit en race pure et qui motive la recherche d'une solution (Figure 44, A). Le second point commun de ces trajectoires et le constat par les éleveur·euse · de l'amélioration des performances de reproduction (sur une base déclarative) suite à la mise en place du croisement (Figure 44, B), toutefois dans des proportions et avec un délai variable selon les trajectoires. Cette information du changement d'état du troupeau (Dedieu et al., 2008) constitue une information (Magne, 2007), un indicateur pour les éleveur·euse qui justifie le choix opéré et permet de maintenir leur engagement dans la pratique du croisement (Sutherland et al., 2012), ce qui les amène éventuellement à devoir adapter leurs pratiques de configuration du troupeau, afin de gérer les surplus d'animaux.

Chapitre 4 – Combiner les génotypes diversifiés générés par le croisement rotatif pour améliorer les performances globales du troupeau

4.1. Introduction

Le deuxième objectif de la thèse était d'évaluer les conséquences de la cohabitation de génotypes diversifiés au sein du troupeau bovin laitier (induite par la mise en place et la gestion du croisement rotatif) sur ses performances. Ceci devait nous permettre de traiter la sous-question de recherche 2, qui suppose que les génotypes diversifiés générés par la pratique du croisement rotatif ont des profils de performances diversifiés et peuvent donc rendre compte d'une diversité fonctionnelle potentiellement valorisable par l'éleveur·euse. Afin de tester cette hypothèse, nous avons extrait les données de performances (quantité de lait, taux butyreux et protéique, matières grasse et protéique, intervalle vêlage-IA fécondante et comptages cellulaires) des femelles laitières issues de 14 troupeaux inscrits au contrôle laitier (parmi les 26 de l'échantillon initial), ainsi que leur données raciales et généalogiques. Tout d'abord, à partir du pourcentage de gènes Holstein et du coefficient théorique d'hétérosis, nous proposons une catégorisation de trois classes génétiques générées par l'introduction et la gestion du croisement rotatif dans un troupeau de race pure Holstein : HO (100 % gènes Holstein), F1 (50 % gènes Holstein) et G2 (25 % de gènes Holstein). Nous avons mis en évidence que ces classes génétiques avaient des performances de production laitière, de reproduction et de santé de la mamelle différentes. Nous avons ensuite modélisé des troupeaux de compositions en HO, F1 et G2 différentes, puis simulé leurs performances moyennes.

4.2. Article 2 : Effects of three-breed rotational crossbreeding on milk and functional performances in dairy cattle herds: the issue of benefiting from genetic diversity

A soumettre le 31/01/21

Julien Quénon [1], Stéphane Ingrand [2], Marie-Angélina Magne [3]

[1] *Université de Toulouse, INRAE, INPT, INP-EI Purpan, UMR 1248 AGIR, F-31326, Castanet-Tolosan, France*
[2] *Université Clermont Auvergne, AgroParisTech, INRAE, VetAgro Sup, F-63000 Clermont-Ferrand, France*
[3] *Université de Toulouse, INRAE, INPT, INP-EI Purpan, Ensfea, UMR 1248 AGIR, F-31326, Castanet-Tolosan, France*

Abstract

Introducing crossbreeding into a purebred dairy cattle herd causes the animal genetic classes (*i.e.* purebred and different generations of crosses) within the herd to diversify. Consequently, dairy farmers must manage this genetic diversity to derive benefits for herd performances from it. This raises two questions, which we aimed to answer: first, do the diverse animal genetic classes generated within the herd by crossbreeding have different milk and functional performances? Second, how should these classes be combined within the herd to optimize its overall performances? We based the study on milk record data from 14 French commercial crossbred herds that were initially Holstein (HO) purebred to analyze milk production, fertility and udder health performances. We first defined three genetic classes according to the percentage of HO genes and the theoretical coefficient of heterosis: HO pure-breed (100% HO genes, 0% heterosis), F_1 crosses (50% HO genes, 100% heterosis) and G_2 crosses (25% HO genes, 100% heterosis). We then estimated least squares means of milk production and functional performances for each of the three genetic classes. We showed that HO had significantly higher milk yield than F_1 or G_2 (7,513 vs. 7,289 and 6,697 kg/cow, respectively) but lower milk fat and protein contents than F_1 or G_2 (38.2 vs. 40.4 and 41.4 g/kg for fat, respectively, and 31.3 vs. 32.4 and 33.0 g/kg for protein, respectively). HO had a longer calving to conception interval (CCI) than F_1 or G_2, which did not differ significantly from each other. HO did not differ significantly in somatic cell score (SCS) compared to F_1 or G_2 (2.77 vs. 2.72 and 2.91, respectively), although F_1 had

significantly lower SCS than G_2. Finally, we simulated herd compositions with various percentages of HO, F_1 and G_2 and their mean performances. We selected herd compositions with CCI < 130 d and that were Pareto-optimal solutions for milk yield, milk fat and protein contents, CCI and SCS. The best herd compositions were the HO-F_1 mixed herds with less than 18% HO and F_1-G_2 mixed herds. While trade-offs favored milk yield and SCS at the expense of milk fat and protein contents for HO-F_1 mixed herds, they were the opposite for F_1-G_2 herds. These results provide insights into crossbreeding performances at the herd level and empirical evidence for discussing benefits of animal diversity.

Keywords: crossbreeding generations, performances, trade-offs, animal diversity, livestock farming system

Introduction

Despite the potential benefits of three-breed crossbreeding in dairy cattle herds, it remains uncommon in France (Dezetter, 2015) and in many Western countries (Hazel et al., 2017; Clasen et al., 2019; McClearn et al., 2020a). This situation has often been attributed to a lack of references about crossbreeding's benefits, but this lack has been gradually addressed. Studies have estimated additive and non-additive genetic parameters of crossbreeding (*i.e.* heterosis and recombination loss) for production and functional traits (VanRaden and Sanders, 2003; Dezetter et al., 2015) and assessed cows' phenotypical performances for specific three-breed crossbreeding programs (Malchiodi et al., 2014a; Maurmayr et al., 2018; Shonka-Martin et al., 2018). To a lesser extent, some studies have also assessed economic performances of crossbred herds for specific three-breed crossbreeding programs (Dezetter et al., 2017; Clasen et al., 2020). All of these studies share a common approach: they focused on one or more specific crossbreeding programs. Over time, this research built an increasingly precise comparison of advantages and disadvantages of each program compared to purebred parental populations, depending on the production system (Coffey et al., 2016; Clasen et al., 2019), thus providing references for dairy farmers about the "genetic offer"

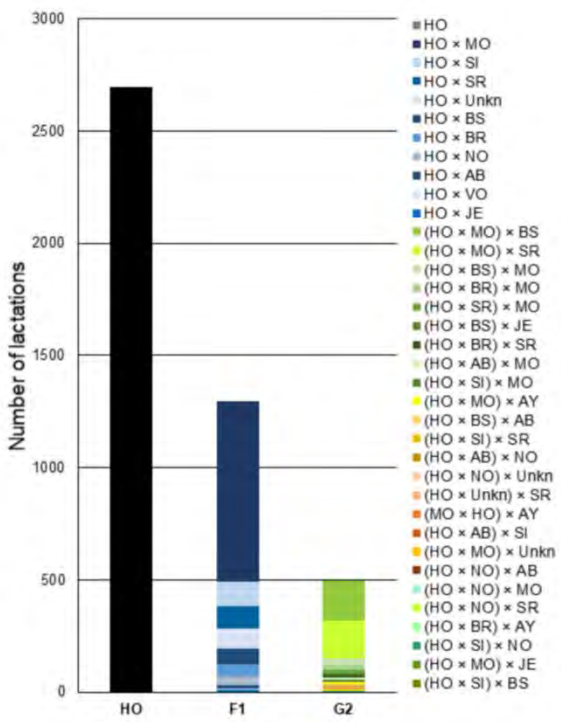
available from dairy crossbreeding. The few studies that assessed effects of three-breed rotational crossbreeding (hereafter "three-breed crossbreeding") on herd performances assumed that a single crossbreeding program was introduced and managed throughout the herd (Dezetter et al., 2017; Clasen et al., 2020). However, many dairy cattle farmers introduce and manage crossbreeding in a customized way using trial-and-error, which leads them to manage – temporarily or permanently – several crossbreeding programs simultaneously (Quénon et al., 2020) while keeping part of their herd purebred (Dezetter et al., 2017). Consequently, their herd can be composed of purebred and crossbred genotypes: introducing three-breed crossbreeding into a Holstein leads them to manage diverse genetic classes of animals, regardless of the crossbreeding program. This raises the critical issue of assessing performances of three-breed crossbreeding while considering genetic diversity that it generates, and doing so outside of a single crossbreeding program. Research on the benefits of using animal diversity to enhance the performance of livestock systems defines functional diversity as "the variety of functions played by individual production entities involved in overall performance" (Tichit et al., 2011). Many studies thus highlight that functional diversity plays a more critical role in overall performance than genetic or interspecific diversity (Tichit et al., 2011; Magne et al., 2016; Ollion et al., 2016). Thus, in the present case of crossbred herds, two questions are at issue. First, are the different genetic classes in a crossbred herd functionally diverse (*i.e.* do cows in these genetic classes differ in their performances)? Second, what combinations of these genetic classes are the best to optimize the overall herd performance?

The aim of the study was thus twofold: first, to assess and compare performances of milk production and functional traits among the genetic classes that result from using three-breed crossbreeding. We based assessment on a dataset of 14 French commercial dairy herds that had practiced it over a 10-year period. The second aim was to simulate the combinations of these genetic classes that optimize both milk production and functional performances at the herd level.

Characteristic	***2009***			***2018***		
	Med	**Min**	**Max**	**Med**	**Min**	**Max**
Farm size (ha)	80	36	300	98	43	225
Grassland area (% of LFA[1])	88	23	100	91	16	100
Silage maize area (% of LFA[1])	12	0	77	9	0	84
Herd size	44	25	90	70	25	139
Milk yield (kg/cow/year)	7,224	5,160	10,320	6,192	5,000	11,352

[1] LFA = Livestock Feeding Area

Tableau 10 : Main characteristics (median, minimum and maximum values) of the 14 sampled dairy cattle farms in 2009 and 2018.



HO = Holstein; MO = Montbéliarde; SI = Simmental; SR = Scandinavian Red; BS = Brown Swiss; BR = Belgian Red; NO = Normande; AB = Abondance; VO = Vosgienne; JE = Jersey; Unkn = Unknown

Figure 45 : Diversity of breed combinations for lactations data in dataset 1 among the 14 sampled herds. Breeds' combinations are grouped in bar charts by Holstein (HO) purebred and first- and second-generation crosses (F1 and G2, respectively).

Materials and methods

Farm sampling

The study drew on an original sample of 26 commercial dairy farms in France that managed three-breed crossbreeding and had at least 33% crossbred cows (all generations combined) in 2018 and at least second-generation lactating cows (Quénon et al., 2020). From these farms, we selected 14 that had been enrolled in the French Milk Record Organization from 2009-2018 and had data available on milk, calving, fertility and udder health performances, as well as the breed and genealogy of females. These 14 dairy farms (8 organic and 6 conventional) were located in four main regions of dairy production in mainland France: Brittany (n = 4), Auvergne-Rhône-Alpes (n = 4), Hauts-de-France (n = 3) and Normandy (n = 3). The farms varied in size, forage systems and milk yield in 2009 and 2018 (Tableau 10).

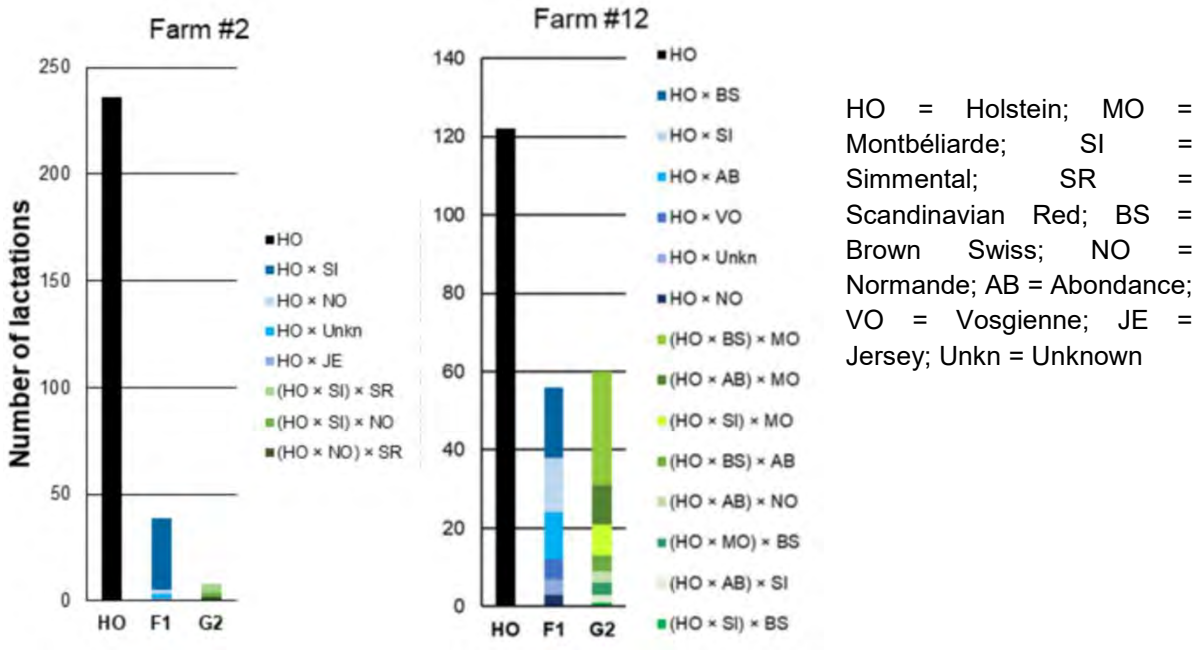
Analysis of cow performances by genetic class

Genetic classes. Breed combinations varied greatly among the 14 herds (Figure 45), and more importantly within each herd (Figure 46). Since purebred Holstein was the most common genotype among the sampled herds, we used two indicators to define the genetic classes that resulted from using three-breed crossbreeding. The first one was the percentage of Holstein genes (**HOg**) of each female, as used by De Haas et al. (2013), which we calculated from the breed and genealogical data. The second indicator was the coefficient of heterosis (**H**), which we calculated as Dechow et al. (2007) did:

$$H = 1 - \sum s_i d_i$$

where s_i and d_i are the proportions of sire genes and dam genes, respectively, from breed *i*.

We then removed lactations for genetic classes that were insufficiently distributed among the sampled herds (*i.e.* third-, fourth- and fifth-generation crosses), which left only three genetic classes: purebred HO, first-generation crosses (**F_1**) and second-generation crosses (**G_2**) (Tableau 11). In doing so, however, the coefficient of heterosis became non-discriminatory in our database, since it was 100% for both F_1 and G_2 (Tableau 11).



HO = Holstein; MO = Montbéliarde; SI = Simmental; SR = Scandinavian Red; BS = Brown Swiss; NO = Normande; AB = Abondance; VO = Vosgienne; JE = Jersey; Unkn = Unknown

Figure 46 : Diversity of breed combinations (Holstein (HO) purebred and first- and second-generation crosses (F1 and G2, respectively)) for lactation data in dataset 1 within two herds of the 14-herd sample.

HOg, %	**100.0**	**50.0**	**25.0**	**62.5**	**31.3**	**15.6**
H, %	0.0	100.0	100.0	75.0	87.5	87.5
Genetic class[1]	HO	F_1	G_2	G_3	G_4	G_5

[1] HO = Holstein; F_1 = first-generation crosses *i.e.* HO dam × breed A sire; G_2 = second-generation crosses (*i.e.* (HO × breed A) dam × breed B sire); G_3 = third-generation crosses (*i.e.* ((HO × breed A) × breed B) dam × HO sire); G_4 = fourth-generation crosses (*i.e.* (((HO × breed A) × breed B) × HO) dam × breed A sire); G_5 = fifth-generation crosses (*i.e.* ((((HO × breed A) × breed B) × HO) × breed A) dam × breed B sire)

Tableau 11 : Characteristics of genetic classes as a function of the combination of the percentage of Holstein genes (HOg) and coefficient of heterosis (H), corresponding to first- to fifth-generations of three-breed rotational crossbreeding

Data processing. Available data included 305-day milk yield (**MY** in kg/cow), 305-day fat content (**FC**, in g/kg of milk/cow), 305-day protein content **(PC**, in g/kg of milk/cow), 305-day milk solids (**MS** in kg/cow), somatic cell count (**SCC**), as well as parity, lactation length, birth date, calving date, age at calving and length of the previous dry period. We discarded data from lactations shorter than 275 days and with total milk yield less than 2,000 kg or greater than 12,000 kg. A somatic cell score (**SCS**) was calculated as $\log_2(SCC/100{,}000) + 3$. We calculated a calving to first service interval (**CFS**) as the number of days from the start of lactation to the first service and a calving to conception interval (**CCI**) as the number of days from the start of lactation to the date of successful insemination. Since reproduction data were missing for some females for which production data were available, we created two separate datasets (Tableau 12).

Dataset 1 consisted of milk performance data (*i.e.* MY, FC, PC and MS) and SCS for 4,487 lactations from 2,051 cows. Dataset 2 consisted of fertility and fecundity performance data (*i.e.* CFS and CCI) for 4,476 lactations from 2,010 multiparous cows. The contributions of the diverse breed combinations (involved in F_1 and G_2 crosses) to datasets 1 and 2 are detailed in Tableau 13.

Genetic class[1]	***Dataset 1***		***Dataset 2***	
	No. of lactations	*No. of cows*	*No. of lactations*	*No. of cows*
HO purebred	2,695	1,257	2,738	1,277
F_1 crosses [50% HO]	1,296	540	1,287	512
G_2 crosses [25% HO]	496	254	451	221
Total	4,487	2,051	4,476	2,010

[1] F_1 = first-generation crosses (i.e. HO dam × breed A sire); G_2 = second-generation crosses (i.e. (HO × breed A) dam × breed B sire).

Tableau 12 : Description of the two datasets used for the statistical analyses of milk production and udder health performances (dataset 1) and reproduction performances (dataset 2). For each, the number of lactations and the number of cows for Holstein (HO) purebred, first- and second-generation of crosses (F1 and G2, respectively) obtained from three-breed rotational crossbreeding into purebred HO herds are indicated.

Statistical analyses. We analyzed seven performance traits: four related to milk production (MY, FC, PC and MS), one related to udder health (SCS) and two related to fertility (CFS and CCI). We used linear models and estimated least square means (**LSM**) for genetic classes (*i.e.* HO, F_1 and G_2). We then tested for differences in performance between pairs of genetic classes using Tukey's tests ($P < 0.05$). We performed all statistical analyses using the *emmeans* package (Lenth, 2019) in RStudio software (v. 1.1.463, RStudio Inc., Boston, MA, USA).

To estimate LSM of performance traits in dataset 1 (*i.e.* milk yield (MY, FC, PC and MS) and udder health (SCS)), we used an adjusted version of the French genetic evaluation model for production traits (UMT eBis and Geneval, 2019):

$$[1] \quad Y_{ijklmno} = \mu + P_i \times G_j + H_k \times Y_l + P_i \times M_m + P_i \times A_n + P_i \times D_o + \varepsilon_{ijklmno}$$

where $Y_{ijklmno}$ = observation for the dependent variable; μ = overall population mean; $P_i \times G_j$ = fixed effect of the jth genetic class (j = HO, F_1, G_2) within the ith parity (i = primiparous, multiparous); $H_k \times Y_l$ = fixed effect of herd-year for the kth herd (k = 1-14) and l^{th} year (l = 2009-2018); $P_i \times M_m$ = fixed effect of the mth month of calving (m = January to December) nested within parity; $P_i \times A_m$ = fixed effect of age at calving n nested within parity; $P_i \times D_o$ = fixed effect of length of the oth previous dry period (o = < 60 days, 60-80 days, > 80 days) and $\varepsilon_{ijklmno}$ = residual error term.

To estimate LSM of performance traits in dataset 2 (*i.e.* CFS and CCI) we used an adjusted version of the French genetic evaluation model for reproduction traits (UMT eBis and Geneval, 2019):

$$[2] \quad Z_{ijklmn} = \mu + C_i \times G_j + H_k \times Y_l + M_m \times Y_l + A_n + \varepsilon_{uijklmn}$$

where Z_{ijklmn} = observation for the dependent variable; C_i = calving rank prior to insemination (*i.e.* the ith previous parity (i = primiparous, multiparous)) and ε_{ijklmn} = residual error term.

Genetic class[1]	Dataset 1		Dataset 2	
	No. of lactations (%)	*No. of cows (%)*	*No. of lactations (%)*	*No. of cows (%)*
HO purebred	**2,695 (60.0%)**	**1,257 (61.3%)**	**2,738 (61.2%)**	**1,277 (63.5%)**
F_1 crosses [50% HO]	**1,296 (28.9%)**	**540 (26.3%)**	**1,287 (28.8%)**	**512 (25.5%)**
HO × MO	806 (18.0%)	338 (16.5%)	794 (17.7%)	309 (15.4%)
HO × SI	106 (2.4%)	40 (1.9%)	99 (2.2%)	33 (1.6%)
HO × SR	102 (2.3%)	42 (2.0%)	101 (2.6%)	44 (2.2%)
HO × BS	71 (1.6%)	27 (1.3%)	80 (1.8%)	29 (1.4%)
HO × BR	55 (1.2%)	20 (1.0%)	49 (1.1%)	18 (0.9%)
HO × NO	39 (0.9%)	20 (1.0%)	28 (0.6%)	16 (0.8%)
Other F_1 crosses with < 10 lactations	117 (2.6%)	53 (2.6%)	136 (3.0%)	63 (3.1%)
G_2 crosses [25% HO]	**496 (11.1%)**	**254 (12.4%)**	**451 (10.1%)**	**221 (11.0%)**
(HO × MO) × BS	176 (4.0%)	76 (3.7%)	171 (3.8%)	67 (3.3%)
(HO × MO) × SR	173 (3.9%)	105 (5.1%)	147 (3.3%)	86 (4.3%)
(HO × BS) × MO	29 (0.6%)	8 (0.4%)	29 (0.6%)	10 (0.5%)
(HO × BR) × MO	18 (0.4%)	10 (0.5%)	16 (0.4%)	9 (0.4%)
(HO × SR) × MO	15 (0.3%)	11 (0.5%)	20 (0.5%)	12 (0.6%)
Other G_2 crosses with < 10 lactations	85 (1.9%)	44 (2.1%)	68 (1.5%)	37 (1.8%)
Total	**4,487**	**2,051**	**4,476**	**2,010**

[1] F_1 = first-generation crosses (i.e. HO dam × breed A sire); G_2 = second-generation crosses (i.e. (HO × breed A) dam × breed B sire); HO = Holstein; MO = Montbéliarde; SI = Simmental; SR = Scandinavian Red; BS = Brown Swiss; BR = Belgian Red; NO = Normande

Tableau 13 : Description of the two datasets used for the statistical analyses of milk production and udder health performances (dataset 1) and reproduction performances (dataset 2). For each, the number of lactations and the number of cows for Holstein (HO) purebred and first- and second-generation crosses (F_1 and G_2, respectively) obtained from three-breed rotational crossbreeding in purebred HO herds are indicated. The diversity and percentages of breeds involved in F_1 and G_2 crosses are also indicated

Analysis of performances at the herd level

Design of herd compositions. We simulated a set of herds that differed in their genetic class composition (*i.e.* percentages of HO, F_1 and G_2), following an approach inspired by mixture design. Mixture design comes from the field of experimental design (Snee, 1979) and defines a mixture as a product formed by mixing distinct components. The properties of the mixture can then be assessed based on the components' percentages in the mixture, which must sum to 100%. More formally, a mixture design is defined by a {q; r} system, where q is the number of mixture components (*i.e.* the "simplex coordinate system"), and r is the interval used to generate different percentages of components (i.e. the "degree of the lattice"). This {q; r} design generates $\binom{q+r-1}{r}$ mixtures. We designed herd compositions in our study as mixtures using a {3; 100} design, with q = 3 genetic classes (i.e. HO, F_1 and G_2) and r = 100 (*i.e.* percentage of each genetic class in the herd). We thus simulated $\binom{102}{3}$ = 5151 herds. All genetic class compositions of the simulated herds defined the 5151×3 matrix:

$$M_{herds} = \begin{pmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & b_{1,3} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{5151,1} & \cdots & b_{5151,3} \end{pmatrix}$$

where $b_{h,j}$ = percentage in animals in the jth genetic class (j =1 for HO, 2 for F_1, 3 for G_2) in the hth simulated herd (h = 1-5151).

Calculation of herd performances. We defined a 7×3 matrix:

$$M_{LSM} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,3} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{7,1} & \cdots & a_{7,3} \end{pmatrix}$$

where $a_{t,j}$ is the LSM of a performance trait t (t = 1 for MY, t = 2 for FC, …, t = 7 for CCI) for the jth genetic class.

The mean performances of all simulated herds was the matrix product:

$$M_{LSM} \times M_{herds_compositions} = M_{herds_performances} = \begin{pmatrix} c_{1,1} & \cdots & c_{1,7} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{5151,1} & \cdots & c_{5151,7} \end{pmatrix}$$

where c_{ht} is the mean value of trait t for the hth simulated herd.

Outranking herds based on trade-offs among herd performances. Among all 5151 simulated herds, we wished to reflect that crossbreeding is managed in purebred HO herds mainly to improve cow fertility, as supported by the literature (Buckley et al., 2014) and dairy farmers (Quénon et al., 2020). To consider this objective in our selection process, we selected herds with a CCI shorter than 130 days, based on the median CCI of French dairy cattle herds in 2017 (Reproscope, 2017), which restricted the sample to 1286 of the initial pool of 5151 herds.

Then, to identify herds among these 1286 that optimized trade-offs between milk production and functional performances, we used the concept of Pareto optimality, which defines optimality based on the trade-offs among several potentially contradictory objective functions required to improve a global objective (Williams and Kendall, 2017). We thus calculated Pareto-optimal solutions for the 1286 herds according to five objective functions based on mean MY, FC, PC, CCI and SCS at the herd level. We obtained the Pareto-optimal solutions on the Pareto frontier using a VBA program in Microsoft® Excel. A herd is a Pareto-optimal solution if no other herd is better than it for a given set of objective functions. We included a loop to use Excel's advanced filter function and to test, herd by herd, whether other herds were better for a given objective function. Since Pareto optimality is defined by maximizing objective functions (Williams and Kendall, 2017), we transformed herds' mean CCI and SCS into their opposites, since we wanted to minimize them. Applying the definition of Pareto-optimal solution to our study identified herds for which no other herd achieved at least one objective without hindering the achievement of another objective. We investigated trade-offs between pairs of mean herd performances to identify the best herd compositions.

Trait	Genetic classes		
	HO	**F_1 [50%HO]**	**G_2 [25% HO]**
MY (kg/cow)	7,513[a] (34.8)	7,289[b] (42.4)	6,697[c] (62.3)
FC (g/kg)	38.2[a] (0.14)	40.4[b] (0.17)	41.4[c] (0.24)
PC (g/kg)	31.3[a] (0.10)	32.4[b] (0.10)	33.0[c] (0.15)
MS (kg/cow)	519[a] (2.4)	528[b] (2.9)	498[c] (4.2)
SCS	2.77[ab] (0.041)	2.72[a] (0.049)	2.91[b] (0.073)
CFS (days)	97[a] (1.0)	87[b] (1.3)	89[b] (2.2)
CCI (days)	143[a] (1.6)	127[b] (2.3)	129[b] (3.7)

[a–c] Means within a row with different superscript letters differ significantly ($P < 0.05$).

Tableau 14 : Least square means estimates (standard error in parentheses) of 305-d milk yield (MY), fat and protein contents (FC and PC, respectively), milk solids (MS), somatic cell score (SCS), calving to first service interval (CFS) and calving to conception interval (CCI) for the three genetic classes: Holstein (HO), first-generation crossbreds HO dam × breed A sire (F_1) and three-breed crossbreds (HO × breed A) dam × breed B sire (G_2).

Results and discussion

Production and functional performances of purebred HO, F_1 and G_2 genetic classes

The three genetic classes of cows differed significantly from each other for all four milk performance traits investigated (i.e. milk yield and composition) (Tableau 14). MY was significantly higher for HO (7,513 kg/cow) than for F1 (7,289 kg/cow), which was significantly higher than for G2 (6,697 kg). Conversely, FC and PC were significantly lower for HO than for F1 (-2.2 g/kg for FC and -1.1 g/kg for PC), which was significantly lower than for G2 (-1.0 g/kg for FC and -0.6 g/kg for PC). Finally, MS were significantly higher for F1 (528 kg/cow) than for HO (519 kg/cow) and G2 (498 kg/cow), which suggests that the higher FC and PC for G2 were due to lower milk yields rather than greater fat and protein production. Both CFS and CCI were longer for HO than for F1 (+10 and +16 days, respectively) and G2 (+8 and +14 days, respectively). Conversely, CFS and CCI did not differ significantly between F1 and G2. Finally, SCS of HO (2.77) did not differ significantly from that of F1 (2.72) or G2 (2.91). However, SCS was significantly lower for F1 than for G2.

To discuss these results, we examined studies that focused on breed combinations that were the most common in datasets 1 and 2 among F1 and G2 classes (Tableau 13): HO × Montbéliarde (MO), HO × Simmental (SI) and HO × Scandinavian Red (SR) for F1, which represented ca. 18%, 2% and 2% of total sampled lactations, respectively, and (HO × MO) × Brown Swiss (BS) and (HO × MO) × SR for G2, which represented ca. 4% and 3% of total sampled lactations, respectively.

Thus, our results for F_1 and HO milk performances agree with those of many studies: Malchiodi et al. (2014b) and Hazel et al. (2017) reported that HO × MO and HO × SR crosses had lower MY and higher FC and PC than purebred HO. Our results for MS also match those of Hazel et al. (2017) for HO and HO × MO and those of Clasen et al. (2019) for HO and HO × SR. Conversely, they contrast with those of Hazel et al. (2014), who found no differences in MS or MY between HO × MO and HO. This may be due to different MO bull selection: while Hazel et al. (2014) used MO bulls ranked highly by the French total merit index (ISU), which contributed to high MY for HO × MO crosses, many farmers in our sample selected bulls without necessarily prioritizing a high ISU. Comparing G_2 and HO milk performances, our results confirm those of

Shonka-Martin et al. (2018), who reported that (HO × MO) × SR crossbreds had lower MY than HO did, although the differences with G_2 they found (-206 kg/cow for primiparous and -372 kg/cow for multiparous) were smaller than those found in our study (-816 kg/cow, all parities combined). Unlike Shonka-Martin et al. (2018), however, our results indicate that G_2 had lower MS than HO did, despite higher FC and PC. Finally, comparing F_1 and G_2 milk performances, which few studies have done, to our knowledge, our results contrast with those of Malchiodi et al. (2014) and Saha et al. (2017, 2018), who observed no significant differences in daily milk performances (i.e. MY, FC and PC) between F_1 and G_2 crosses.

Comparing functional performance traits, our results show higher fertility performances for F_1 than for HO, which agrees with many studies that compared F_1 crosses to HO: HO × Nordic Red crosses (regardless of the herd's production level) (Clasen et al., 2019), HO × SR crosses (Malchiodi et al., 2014a) and HO × MO crosses (Hazel et al., 2014; Malchiodi et al., 2014a). Comparing udder health, we found no significant difference in SCS between F_1 crosses and HO, which Malchiodi et al. (2014b) and Hazel et al. (2017) also observed. We also provide evidence of higher fertility of three-breed crosses than of HO, which only a few studies have assessed. This evidence agrees with that of Malchiodi et al. (2014a), who compared (HO × SR) × MO crosses to HO, and that of Hazel et al. (2014), who also reported shorter CCI for (HO × Jersey (JE)) × MO than HO and no significant differences compared to HO × MO crosses. Conversely, our results differ from those of McClearn et al. (2020), who reported no differences in CCI between (HO × JE) × Norwegian Red, (HO × JE) and HO. This may have been due to the specific focus on reproductive traits for selection programs of HO breed in Ireland compared to HO in France (Cole and VanRaden, 2018).

Here, we built genetic classes of cows based on the percentage of initial purebred genes and the theoretical coefficient of heterosis to assess effects of crossbreeding on cow and herd performances. Based on this approach, we showed that the genetic diversification of cows induced by the use of three-breed crossbreeding into purebred HO herds diversified milk production and cows' functional performances. These results agree with those of most studies that addressed this question by focusing on specific crossbreeding programs (Shonka-Martin et al., 2018; Clasen et al., 2019; McClearn et al., 2020a). This approach seems to be particularly

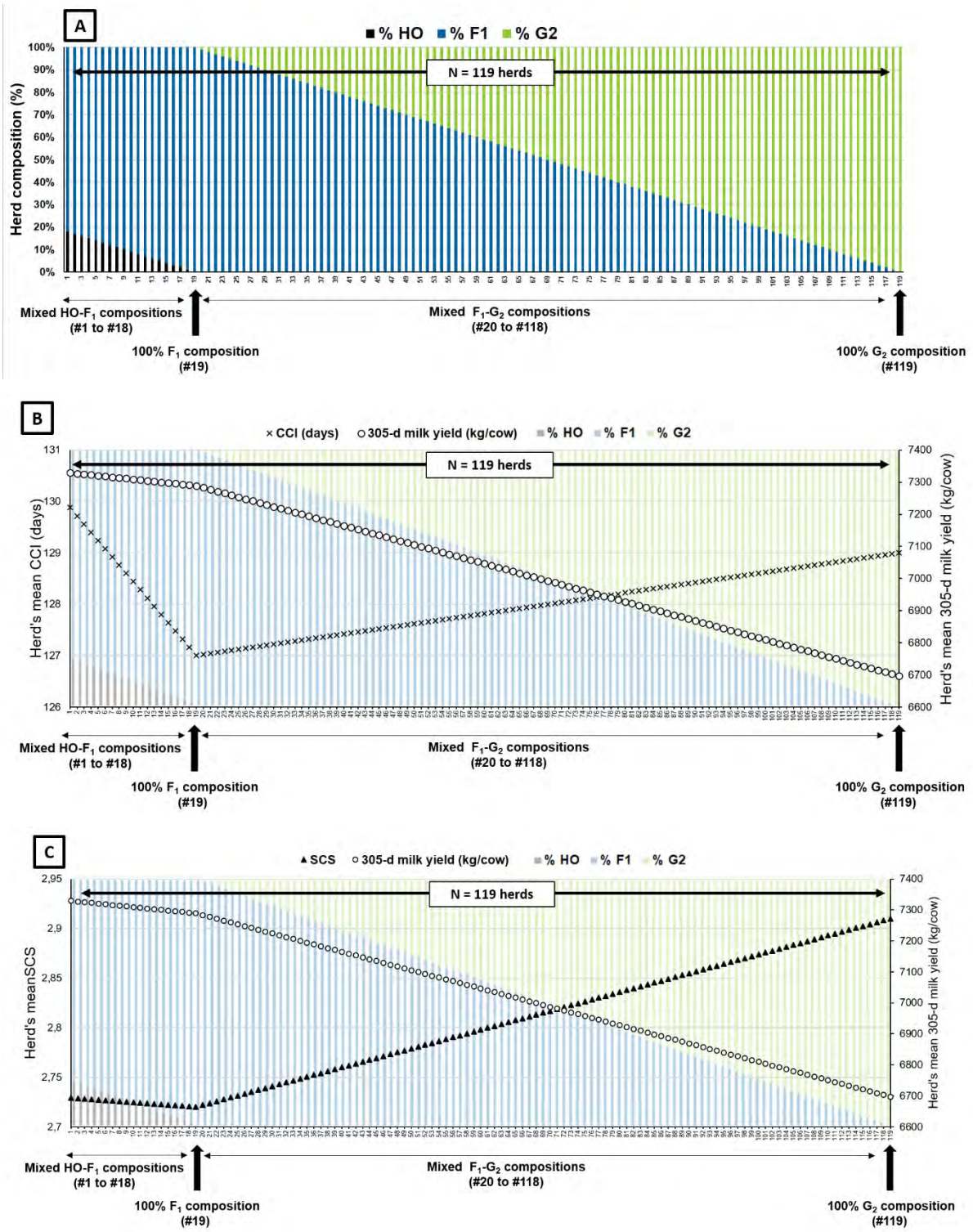


Figure 47 : (A) Holstein (HO), F_1 and G_2 compositions of the 119 herds selected to have a mean calving to conception interval (CCI) shorter than 130 days and maximize trade-offs among milk yield, milk fat and protein contents, CCI and somatic cell score (SCS). Trade-offs of all 119 herd compositions are presented pairwise: **(B)** milk yield vs. CCI and **(C)** milk yield vs. SCS

useful when using on-farm data (De Haas et al., 2013; Lembeye et al., 2016) and integrating ways that dairy farmers' manage dairy crossbreeding, which are often less linear than introducing and managing a single crossbreeding program (Quénon et al., 2020). However, this approach to genetic classification needs to be consolidated by testing it with a larger farm sample inside and outside of France to assess the robustness of its results. Indeed, given our small sample size, we were unable to test the effect of the theoretical coefficient of heterosis alone. It is nonetheless a deciding factor of crossbreeding performances (Dechow et al., 2007). Moreover, a larger sample would likely include more genetic classes, especially crosses beyond the second generation, to test the relevance of this genetic classification and provide a more comprehensive view of performances of three-breed crossbreeding in the long run.

Herd performances by purebred HO, F_1 cross and G_2 cross composition

Among the 1286 herds with mean CCI shorter than 130 days, 119 maximized trade-offs among the five performances objectives (MY, FC, PC, CCI and SCS) and thus were the Pareto-optimal solutions. Pareto-optimal herds had a lower HO percentage (< 18%) than F_1 and G_2 percentages (0-100%). They were composed either exclusively of first- or second-generation crossbred cows (100% F_1 or 100% G_2 herds, respectively), or they combined two genetic classes, either purebred HO and first-generation crosses (HO-F_1 mixed herds) or first- and second-generation crosses (F_1-G_2 mixed herds) (Figure 47 A). Conversely, Pareto-optimal herds did not include 100% HO or HO-G_2 mixed herds, nor combinations of all three genetic classes (HO-F_1-G_2 mixed herds). These results provide empirical evidence of the theoretical assumption that animal diversity benefits livestock farming systems (Dumont et al., 2013) and specifies this diversity as herds composed of two genetic classes (which optimize performance trade-offs) but not of all three of the genetic classes studied.

By construction, the 100% F_1 and 100% G_2 herds had the same mean performances as the F_1 and G_2 genetic classes, respectively. Thus, the 100% F_1 herd had the best composition for trade-offs among MY, CCI and SCS (Figure 47 B and Figure 47 C), which had means of 7,289 kg/cow, 127 days and 2.72, respectively. This result agrees with the fact that F_1 crosses benefit from maximum heterosis. Conversely, the 100% F_1 herd had lower FC and PC than the F_1-G_2 mixed herds and the 100% G_2 herd.

In comparison, the 100% G_2 herd had the best composition for maximizing FC and PC but the worst composition for MY among the 119 herds. However interesting they may be for performance trade-offs, herds composed entirely of F_1 or G_2 crosses cannot last over time, since replacement is impossible. For example, maintaining 100% F_1 herds would imply organizing the dairy cattle sector into several segments, as in the pig and poultry sectors, to enable crossbred dairy herds to replace cows exclusively with F_1 crosses. This organization is unrealistic, however, mainly because of the relatively long intergenerational duration of cattle (Dezetter et al., 2017). Conversely, both HO-F_1 and F_1-G_2 mixed herds are realistic (since HO are required to generate F_1, and F_1 are required to generate G_2) and reflect the demographic dynamics of a herd in which crossbreeding is introduced massively (*i.e.* 100% of HO cows are cross-mated) (Dezetter et al., 2017). Our results show that introducing rotational crossbreeding slowly does not optimize performances, since the percentage of HO in a herd that optimizes milk production and reproduction performances must not exceed 18%. However, introducing crossbreeding incrementally within the herd should benefit aspects besides the zootechnical performances that were the focus of our study, particularly those related to herd management. Indeed, it would enable dairy farmers to change replacement and culling management over time, manage uncertainties (Quénon et al., 2020) and learn along the way (Coquil et al., 2017).

Both HO-F_1 and F_1-G_2 mixed herds had equivalent mean CCI (127-129 days) (Figure 47 B). Mixed HO-F_1 herds had greater mean MY (7,291-7,329 kg/cow) and lower mean SCS (2.72-2.73) than mixed F_1-G_2 herds (6,697-7,289 kg/cow and 2.72-2.90, respectively) (Figure 47 C). Conversely, mixed HO-F_1 herds had lower mean FC (40.0-40.4 g/kg) and PC (32.2-32.4 g/kg) than F_1-G_2 herds (40.4-41.4 g/kg for FC, 32.4-33.0 g/kg for PC) (Figure 47 D).

Mean MY was always lower in herds without HO. Herds with mean MY greater than 7,300 kg/cow had a HO percentage of 5-18%. However, mean FC and PC always increased as the G_2 percentage increased. Herds with mean FC greater than 41 g/kg and mean PC greater than 32 g/kg had F_1-G_2 mixed compositions with a G_2 percentage greater than 55%. Herds with mean PC greater than 33 g/kg had F_1-G_2 mixed compositions with a G_2 percentage greater than 80%. In both cases, increase in the herd's FC and PC came at the expense of MY. However, the best herd compositions for optimizing trade-offs between MY and FC (Figure 48 B) and between MY and PC

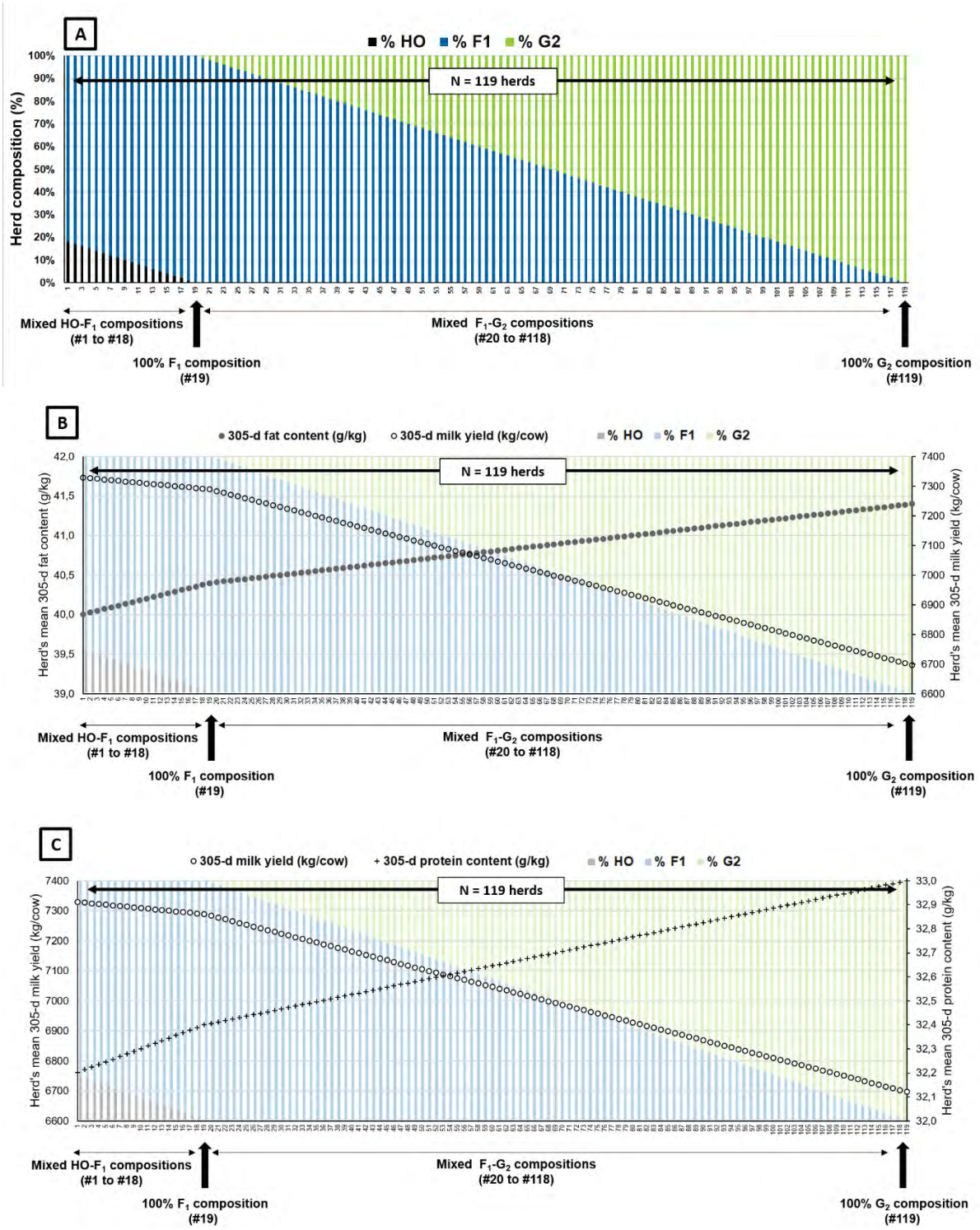


Figure 48 : (A) Holstein (HO), F_1 and G_2 compositions of the 119 herds selected to have a mean calving to conception interval (CCI) shorter than 130 days and maximize trade-offs among milk yield, milk fat and protein contents, CCI and somatic cell score (SCS). Trade-offs of all 119 herd compositions are presented pairwise: **(B)** milk yield vs. fat content and **(C)** milk yield vs. protein content

(Figure 48 C) were the F_1-G_2 mixed herds with an F_1 percentage of 60-65% and G_2 percentage of 35-40%. These herds had mean milk yield of 7,058-7,083 kg/cow, fat content of 40.8 g/kg, protein content of 32.6 g/kg, calving to conception interval of 127 days and SCS of 2.8. Herds with a G_2 percentage less than 35% had higher mean MY (7,083-7,329 kg/cow) but also lower mean FC (40.0-40.8 g/kg) and mean PC (32.0-32.6 g/kg). Conversely, herds with a G_2 percentage greater than 40% had higher mean FC (41.0-41.4 g/kg) and mean PC (32.8-33.0 g/kg) but also lower mean MY (6,697-7,046 kg/cow). These results provide initial insights about the compositions of crossbred or mixed herds that may be best to target while rotationally crossbreeding a purebred HO herd. Thus, our findings highlight that rather than a fully crossbred herd providing more benefits, as simulated in studies of economic benefits of dairy crossbreeding at the herd level (Dezetter et al., 2017; Clasen et al., 2020), mixed HO-F_1 or F_1-G_2 herds may do so. More precisely, we show that, within the constraints we imposed, the herds with the best trade-offs among MY, FC, PC and CCI performances are those composed of 60-65% F_1 and 35-40% G_2. Given the performances of these genetic classes, such herds can be based on functional complementarity between F_1 crosses (to produce MY) and G_2 crosses (which have lower MY but higher FC and PC). This kind of functional complementarity between dairy cows has been reported in multi-breed herds (Delaby et al., 2009; Magne et al., 2016). However, our results also show that there are thresholds of herd performances that influence which herd compositions to target. A dairy farmer's decision to exceed these thresholds (or not) depends on what the farmer can accept losing and wants to gain. Thus, based on our findings, three-breed crossbreeding leads to a permanent loss of MY, which dairy farmers would first need to accept. A farmer who will not accept having a herd with mean MY less than 7,300 kg/cow should keep a small percentage of HO cows in the herd to complement F_1 crosses. Similarly, a farmer whose herd has mean FC greater than 41g/kg and wants to increase FC and PC should mix F_1 and G_2 crosses. These results emphasize that an adequate herd composition (i.e. combination of genetic classes with different trade-off profiles that meet dairy farmers' objectives) thus depends on farmers' personal and business views of performances of the herd (Magne et al., 2016, 2019). Farmers' preferences could be included in the process of assessing herd performances at some point, either afterwards, by using the Pareto outranking and discussing the results obtained, as we did here, or beforehand, as a set of constraints within which to use the Pareto outranking (Williams and Kendall, 2017).

Although they do not detract from our results, limitations of our method can be addressed in future research. We defined a specific set of constraints (*i.e.* CCI < 130 days, maximizing the herd's mean MY, FC and PC, and minimizing the herd's mean SCS and CCI) and selected herd compositions that maximized trade-offs accordingly. Defining other sets of constraints would reflect other dairy farmers' strategies and enable additional discussion of optimal herd compositions. We outranked simulated herds using Pareto optimality, which does not need information about farmers' preferences in objective functions (Williams and Kendall, 2017). Conversely, it cannot weight the performance criteria to maximize, which depends greatly on the context and each farmer's strategy. This is a limitation because the herd compositions selected and their performances do not reflect the diversity of trade-offs among herd performances, whose relevance is highly contextual (*e.g.*, milk price, grazing system, calving period). To consider farmers' preferences and strategies better, other objective functions besides zootechnical performances could be included, such as herd input efficiency (*e.g.*, feed, drugs) (Dezetter et al., 2017; Clasen et al., 2020; McClearn et al., 2020b), herd resilience (Tichit et al., 2011) and farmers' work efficiency (Cournut et al., 2018). Finally, comparing herd compositions with optimal trade-offs that were determined using other multi-criteria analysis methods is a promising research perspective to validate the robustness of our results. In addition to identifying optimal herd compositions, defining an adequate combination of mating and replacement practices to reach these compositions would help dairy farmers plan how to transition their herds toward three-breed crossbreeding, which has yet to be done.

Finally, we used mean values to assess differences in herd performances without considering variability (*e.g.*, standard deviation) in performances among individuals in each genetic class. This variability may differ among the genetic classes, since the classification we used was relatively general. This variability could also differ among genotypes of specific crossbreeding programs. In both cases, variability among individuals is a key factor for assessing herd performance, like other supra-animal production entities (Tichit et al., 2011). It comes in part from the animals themselves (*i.e.* variability in individual genotypes and its expression due to the production environment), but dairy farmers can influence it through management practices, which constitute the decisional source of variability in individual performances (Puillet et al., 2010). Integrating the variability in individual performances better would enable the po-

-tential range of the resulting herd performances to be considered and provide more insights into how to combine animal sub-herd entities appropriately.

Conclusion

In this study, we evaluated the effects of rotational crossbreeding on herd performances by (i) explicitly integrating the diversification of genetic entities caused by crossbreeding and their functional complementarity within the herd and (ii) evaluating benefits of rotational crossbreeding according to trade-offs among zootechnical performances from both physiological and decision-making (i.e. compromises that dairy farmers must make) viewpoints. By doing so, we first showed that the diverse animal genetic entities generated within the herd by three-breed crossbreeding, which we classified according to the percentage of Holstein genes and the theoretical coefficient of heterosis, had different milk and functional performances. Thus, crossbred cows had higher fertility and milk fat and protein content performances but lower milk yield than Holstein purebred cows. First- and second-generation crosses differed mainly in fat and protein contents and milk yield. Second, we provided initial insights about the best composition of these three genetic classes within a herd to optimize milk production and functional performances. We thus highlight that rather than a fully crossbred herd, mixed Holstein-F_1 or F_1-G_2 herds could provide more benefits, depending on which zootechnical herd performances dairy farmers can accept losing and want to gain. These results must be studied further to be validated, particularly by broadening the sample of dairy cattle farms and consolidating the methods developed here. However, we highlight two original elements of our method. The first is a classification of genetic entities that goes beyond the limits of crossbreeding programs when addressing on-farm crossbreeding strategies of dairy farmers. The second one is the Pareto-optimal method of outranking, which assesses targeted herds and avoids the underlying assumption of most crossbreeding studies that these herds are fully crossbred. We identified final herd compositions, but the remaining challenge is to characterize changes in selection, replacement and culling management that make it possible to move from a Holstein purebred herd toward a targeted herd. This transition process is a scientific issue because there is little knowledge about it from crossbreeding studies and because of methodological

obstacles related to studying herd dynamics while considering the animal, management-entity and herd levels. It is also a major operational issue, since dairy farmers and agricultural advisors may need information outside of crossbreeding programs to plan transitions from purebred to crossbred herds.

Acknowledgements

This study was funded by the Sciences for Action, Transitions and Territories (ACT) division of INRAE, the French Occitanie Region, the ENSFEA scientific committee and the PSDR4 ATA-RI project. Data were provided by the French Chambers of Agriculture, Milk Record Organizations and Selection Organisms enrolled in National Systems of Genetic Information (SNIG). The authors thank dairy farmers for authorizing access to their data. They are grateful to Gabrielle Galipaud, Isabelle Palhière, Hélène Larroque, Célia Cholez and Jacques-Eric Bergez for their help with data processing and statistical analyses, and to anonymous reviewers who helped them improve this article.

References

Les références spécifiques au chapitre 4 sont intégrées à la section *Références bibliographiques* du manuscrit

4.3 Conclusion

Nous avons proposé une catégorisation des génotypes générés par la pratique du croisement rotatif dans un troupeau initialement conduit en race Holstein pure. Bien qu'elle soit moins précise d'un point de vue génétique, elle présente l'intérêt de permettre d'appréhender la diversité des génotypes croisés que la pratique du croisement dans des fermes commerciales – par opposition à un système expérimental contrôlé – peut induire, en raison des essais temporaires de combinaisons de race réalisés par l'éleveur·euse, voire la gestion de plusieurs programmes de croisement conjointement. De plus, les catégories que nous avons définies (HO, F1 et G2) présentent des profils de performances zootechniques cohérents avec celles dont font état les études sur le croisement laitier qui adoptent une entrée par programme de croisement. Si cette catégorisation demande à être consolidée en la testant avec d'autres jeux de données – et notamment au-delà de la deuxième génération de croisement –, les différences de profils de performances zootechniques mises en évidence entre HO, F1 et G2 contribuent à répondre à la question de recherche 2 : la diversification des génotypes induite par la mise en place du croisement rotatif trois voies supporte également une diversification phénotypique des animaux qui cohabitent au sein du troupeau. Nous avons ensuite cherché à identifier les compositions de troupeaux en HO, F1 et G2 qui présentaient le meilleur compromis en performances. Nous avons montré que les troupeaux combinant 60-65% F1 and 35-40% de G2 présentaient des compromis entre performances zootechniques intéressants, en ce sens qu'ils minimisent la perte de volume de lait et maximisent les taux et les performances de reproduction. Nous avons montré que des troupeaux mixant HO-F1 et F1-G2 permettent de jouer sur la complémentarité fonctionnelle des entités génétiques générées par le croisement pour améliorer les multi-performances du troupeau, l'amélioration restant à l'appréciation de l'éleveur·euse et du compromis entre performances qu'il/elle est prêt·e à faire.

Chapitre 5 – Evolution des performances de troupeaux bovins laitiers au sein desquels est mis en place le croisement rotatif et identification de ses déterminants

A soumettre

Résumé

Malgré ses avantages potentiels pour améliorer les traits fonctionnels des vaches laitières, l'utilisation de programme de croisement impliquant trois races (*i.e.* croisement rotatif trois voies) dans les troupeaux bovins laitiers reste assez rare en France et dans de nombreux pays occidentaux. Une explication de cette situation est le manque de références portant sur l'évolution des performances zootechniques de troupeaux issus de fermes commerciales, au sein desquels le croisement est mis en place dans des situations d'élevage initiales, des modalités et des dynamiques d'évolution diverses. L'objectif de cette étude était donc d'analyser les changements de performances zootechniques à l'échelle du troupeau (production de lait, taux de matière utile, fertilité et santé de la mamelle) induits par l'introduction du croisement rotatif et d'évaluer les facteurs explicatifs de ces changements. Nous nous sommes appuyé sur l'étude de cas rétrospective d'un échantillon de 13 troupeaux bovins laitiers français ayant introduit le croisement rotatif trois voies de façon substantielle (au moins 33% de vaches croisées dans le troupeau et présence de vaches de deuxième génération de croisement en lactation). En plus de la caractérisation des trajectoires de changement technique qu'ils ont suivi lors de l'introduction du croisement (Quénon et al., 2020), nous avons extrait les données raciales, généalogiques et de performances de lactation (n = 6628) pour les femelles (n = 2726) de ces troupeaux présentes au cours des campagnes 2009 à 2017. Nous avons modélisé l'évolution des performances zootechniques des troupeaux au cours de cette période par régression linéaire. Nous avons considéré plusieurs variables explicatives candidates : l'état initial des performances zootechniques, l'état initial de variables relatives au pourcentage de vaches croisées dans le troupeau, à l'effectif du troupeau, à la gestion technique du croisement et du système fourrager, ainsi que leur évolution, modélisée par régression linéaire. Afin d'évaluer l'évolution conjointe des cinq variables de performances zootechniques des troupeaux de 2009 à 2017 et d'identifier les facteurs qui l'expliquent

parmi les variables explicatives construites, nous avons réalisé plusieurs régressions des moindres carrés partiels (PLS). Nos résultats mettent en évidence que le croisement rotatif a un effet significatif sur l'évolution des performances zootechniques des troupeaux, mais qu'il ne constitue qu'un facteur explicatif parmi d'autres, tels que les changements systémiques mis en place de façon concomitante au croisement, l'état initial des performances du troupeau ou le stade d'avancement dans la pratique du croisement. La mise en place du croisement rotatif dans des troupeaux de race pure contribue à améliorer leurs performances de fertilité au détriment de la productivité laitière par vache, que la grande majorité des éleveur·euse·s compensent en augmentant l'effectif du troupeau. Les effets du croisement sur l'évolution des taux de matière utile, de la santé de la mamelle et la longévité des vaches ressortent comme plus contrastés. Ces résultats enrichissent les connaissances sur le croisement laitier par une analyse des modalités opérationnelles de sa mise en place et de sa conduite dans le temps en prenant en compte conjointement les dimensions biologiques et décisionnelles qui construisent sur le long terme la multiperformance des troupeaux et la diversification génétique induite dans les troupeaux par l'utilisation du croisement. En termes opérationnels, ces résultats constituent des modèles d'évolution des performances qui peuvent contribuer à alimenter la réflexion d'éleveur·euse·s qui envisagent d'introduire le croisement rotatif, afin d'identifier si et comment le croisement peut être un levier d'action cohérent par rapport à leur situation d'élevage et leur projet.

Mots-clefs : croisement rotatif, troupeau bovin laitier, évolution des performances, diversité animale, analyse rétrospective, analyse multivariée, transition

5.1. Introduction

Dans un contexte de production variable, incertain et non optimal, les performances de reproduction, de santé et de longévité des animaux deviennent des déterminants majeurs de la rentabilité des systèmes d'élevage (Fourichon et al., 2001; Inchaisri et al., 2010; De Vries, 2017). Ceci est vrai aussi bien pour les élevages herbagers, au sein desquels les périodes de vêlages doivent être en phase avec la disponibilité de l'offre herbagère (Crosse et al., 1994, Olori et al., 2002 et Harris, 2005, cités par

Buckley et al., 2014), que pour les élevages sans période de pâturage et ayant recours à de grandes quantités d'intrants achetés (Hansen, 2000 et Miglior et al., 2005, cités par Buckley et al., 2014). En effet, dans ces deux types d'élevage, l'augmentation accélérée de la consanguinité de la Holstein (HO) a engendré une détérioration des traits fonctionnels des vaches et de leur rentabilité (Dezetter et al., 2015). Par ailleurs, augmenter la qualité du lait, en particulier sa teneur en matière utile, est aussi un moyen pour mieux le valoriser (Courleux and Gaudoin, 2018) et ainsi améliorer la rentabilité des élevages (Dezetter et al., 2017). Pour compenser les effets de la sélection des vaches HO, qui s'est historiquement faite sur la productivité laitière au détriment de leur santé et de leur fertilité, les programmes de sélection de cette race intègrent depuis les années 2000, dans la plupart des pays, des traits fonctionnels (Miglior et al., 2005). Bien qu'une amélioration génétique sur ces caractéristiques soit possible (Berry et al., 2014), elle nécessitera un délai temporel non négligeable (Ferris et al., 2018). Dans ce contexte, et étant donné la supériorité d'autres races sur la qualité du lait, la reproduction et les caractéristiques sanitaires de plusieurs autres races laitières (Delaby et al., 2009; Dezetter et al., 2015), le croisement de femelles de race HO avec celles-ci avec apparait comme une solution alternative efficace et rapide pour les éleveurs par rapport à la sélection intra-race HO.

Malgré ses avantages potentiels, l'utilisation de programme de croisement impliquant trois races (*i.e.* croisement rotatif trois voies) dans les troupeaux laitiers reste assez rare en France (Dezetter, 2015) et dans de nombreux pays occidentaux (Hazel et al., 2017; Clasen et al., 2019; McClearn et al., 2020b). Ces mêmes auteur·ice·s attribuent cette situation à un manque de références sur les avantages du croisement. Pour combler ce manque, les recherches se sont centrées sur l'estimation des paramètres génétiques additifs et non additifs des croisements (*i.e.*, hétérosis et pertes de recombinaison) pour les traits de production et les traits fonctionnels (VanRaden and Sanders, 2003; Dezetter et al., 2015) ainsi que sur la comparaison entre des performances de vaches issues de programmes de croisement rotatif trois voies spécifiques et celles de vaches de race pure HO (Malchiodi et al., 2014a; Maurmayr et al., 2018; Shonka-Martin et al., 2018). Les quelques travaux qui portent sur l'évaluation des effets du croisement rotatif sur les performances des troupeaux montrent des avantages économiques. Ainsi, Lopez-Villalobos et al. (2000) ont simulé la rentabilité

de différents systèmes de croisement rotatif 2 et 3 voies en Nouvelle-Zélande et montré que le revenu net annuel par vache dans ces troupeaux était supérieur à celui dans des troupeaux HO. Heins et al. (2012) ont fait état de bénéfices journaliers par animal supérieurs pour des vaches croisées (HO x Montbéliarde et HO x Rouge Scandinave) comparé aux vaches HO, au sein de troupeaux croisés. Plus récemment, Dezetter et al. (2017) et Clasen et al. (2020) ont montré que différentes stratégies de croisement rotatif permettaient d'augmenter la rentabilité des troupeaux comparativement au système en race pure dans des conditions d'élevage simulées proches des contextes français et suédois respectivement. Parmi les études précédemment citées, trois reposent sur la simulation des performances technico-économiques de troupeaux basés sur le croisement (Lopez-Villalobos et al., 2000; Clasen et al., 2020) ou en transition vers le croisement (Dezetter et al., 2017). Ces approches par simulation permettent d'évaluer les effets du croisement sur le long terme et de comparer différentes alternatives à une conduite en race pure. En contrepartie, elles reposent sur des simplifications quant aux modes de gestion des troupeaux et prennent comme référence un troupeau de race pure HO, deux éléments qui ne permettent pas d'intégrer les trajectoires de mise en place du croisement adoptées par les éleveurs dans leurs situations réelles, y compris les changements systémiques qui peuvent être concomitants à l'utilisation du croisement (Quénon et al., 2020) et leurs effets sur l'évolution des performances du troupeau. Or, pour décider de s'engager dans une conduite de troupeau en croisement rotatif, les éleveurs ont besoin d'informations sur les effets que cela induit sur les performances des troupeaux au regard de différentes situations d'élevage initiales et des dynamiques d'évolution des systèmes d'élevage durant la période de transition vers un troupeau géré intégralement ou partiellement en croisement.

Dans cette étude, l'objectif a été d'évaluer les modifications des performances zootechniques de troupeaux conduits en race pure, après introduction du croisement rotatif. Nous avons émis deux hypothèses. La première est que la performance globale des troupeaux s'améliore avec l'utilisation du croisement rotatif, *i.e.* que les performances de reproduction, de santé de la mamelle, de longévité et de taux de matière utile des troupeaux s'améliorent et que, simultanément, la production laitière des troupeaux se maintient ou ne se dégrade pas trop. La deuxième hypothèse est que les bénéfices d'introduire le croisement rotatif dans les troupeaux dépendent de

leur situation initiale (notamment des performances zootechniques initiales), de la trajectoire de mise en place du croisement adoptée par les éleveurs (Quénon et al., 2020) et de l'évolution de la composition du troupeau liée à l'introduction et la gestion du croisement (*i.e.* l'évolution de sa composition génétique et sa diversification). Tester ces hypothèses a impliqué d'adopter une approche basée sur l'analyse rétrospective des performances de troupeaux bovins laitiers français dans lesquels les éleveurs avaient introduit le croisement rotatif avant ou depuis 2009, ceci sur une période de transition de 2009 à 2017.

5.2. Matériels et méthodes

5.2.1. Echantillonnage et recueil de données

Cette étude a été réalisée en adoptant une approche basée sur l'étude de cas, qui est particulièrement adaptée pour permettre une compréhension approfondie d'un phénomène, tel qu'il se passe en situation réelle (Crowe et al., 2011). Elle s'appuie sur un échantillon de 13 troupeaux sélectionnés parmi un échantillon de 26 fermes bovines laitières françaises ayant introduit le croisement rotatif trois voies de façon substantielle : ainsi, en 2018, ces troupeaux comptaient au moins 33% de vaches croisées (toutes générations de croisement confondues) et comprenaient au moins des vaches laitières de deuxième génération de croisement (Quénon et al., 2020). L'analyse des données d'enquêtes sur les changements de pratiques des éleveur·euse·s lors de l'adoption du croisement laitier a permis d'identifier les trajectoires-types de mise en place du croisement pour ces 13 troupeaux (Quénon et al., 2020). En plus de la caractérisation des trajectoires de changement technique, on dispose pour ces 13 troupeaux des données de contrôle des performances de lactation et de reproduction ainsi que des données raciales et généalogiques issues du Système National d'Information Génétique (*SNIG*) pour l'ensemble des femelles constituant les troupeaux sur la période d'étude qui s'étend des campagnes 2009 à 2017. Le jeu de données initial était ainsi constitué des 6628 lactations réalisées au cours des campagnes 2009 à 2017 par les 2726 femelles issues des 13 troupeaux échantillonnés. Les 13 troupeaux sont issus de quatre bassins de production laitière français : Bretagne (n = 4), Auvergne-Rhône-Alpes (n = 4), Normandie (n = 3) et Hauts-de-France (n = 2).

Catégorie de variables	Nom de la variable	Détails	Abréviation	Unité de calcul	Type de variable
Performances zootechniques du troupeau	Production de lait totale du troupeau	Somme des quantités de lait totales produites par les vaches du troupeau	LaitTroup	Kg/an	Quantitative
	Taux de Matière Utile (TMU) du lait	Somme des valeurs moyennes des taux butyreux et protéique	*TMU*	g/kg/VL	Quantitative
	Pourcentage de vaches fertiles	Part des vaches ayant un IVIAF ≤ 117 jours	*Fertilite*	%	Quantitative
	Pourcentage de lactations saines	Par des vaches ayant un SCS moyen < 4	*LactSain*	%	Quantitative
	Pourcentage de vaches en 3ème lactation et plus	Part du troupeau composée de vaches en 3ème lactation et plus	*L3etc*	%	Quantitative
Composition du troupeau	Effectif du troupeau	Nombre de vaches en lactation dans le troupeau	*EffTroup*	VL	Quantitative
	Pourcentage de races pures	Part du troupeau composée de vaches de race pure	*RP*	%	Quantitative
	Pourcentage total de croisées	Part du troupeau composée de vaches croisées	*Croisee*	%	Quantitative
	Pourcentage de *F1*	Part des vaches croisées composée de F_1	*F1*	%	Quantitative
	Pourcentage de *G2_alterabs*	Part des vaches croisées composée de G_2 de programmes alternatif ou d'absorption	*G2_alterabs*	%	Quantitative
	Pourcentage de *G2_3V*	Part des vaches croisées composée de G_2 de programmes rotatif trois voies	*G2_3V*	%	Quantitative
	Pourcentage de *G3_3V*	Part des vaches croisées composée de G_3 de programmes rotatif trois voies	*G3_3V*	%	Quantitative
	Pourcentage de *DivCr*	Part des vaches croisées composée d'autres croisées	*DivCr*	%	Quantitative
	Indice de Rao	Mesure de la diversité génotypique du troupeau	*Rao*	%	Quantitative
Gestion technique du troupeau	Forme d'élevage	AB stable/En conversion à l'AB/Conventionnel stable	*FormElev*	∅	Catégorielle
	Pourcentage de surface fourragère principale (SFP)	Part de la surface fourragère principale dans la SAU	*PourcSFP*	%	Quantitative
	Pourcentage de surface en herbe	Part de la SFP dédiée aux cultures prairiales	*HerbeSFP*	%	Quantitative
	Pourcentage de surface en maïs ensilage	Part de la SFP dédiée à la culture de maïs ensilage	*MaisSFP*	%	Quantitative
	Chargement	Nombre de vaches par ha de SFP	*Charg*	VL/ha	Quantitative
	Productivité laitière des vaches	Quantité de lait moyenne produite par les vaches	LaitVL	Kg/VL	Quantitative
	Groupe de trajectoire de transition technique	Groupe 1/Groupe 2/Groupe 3	*GrpTrajTech*	∅	Catégorielle

Tableau 15 : Variables utilisées pour décrire pour chaque campagne d'étude la composition démographique et génétique des troupeaux échantillonnés, les modes de gestion technique de ces troupeaux et pour évaluer leurs performances zootechniques.

5.2.2. Edition des données

Nous avons construit une base de données visant à mettre en relation pour chaque troupeau et à chaque année (individu statistique troupeau × année) trois catégories de variables (Tableau 15) :

- des variables relatives aux performances zootechniques des troupeaux : elles sont obtenues à partir des données de lactation (volume, taux protéique et butyreux, comptage de cellules somatiques/contrôle) et de reproduction pour les femelles de ces troupeaux sur la période 2009-2017, extraites du contrôle laitier.
- des variables relatives à la démographie et la composition génétique des troupeaux : elles sont obtenues à partir des données raciales et généalogiques des femelles des troupeaux, extraites du SNIG sur la période d'étude.
- des variables relatives aux modes de gestion technique des troupeaux sur la période d'étude : elles sont obtenues à partir des données d'enquêtes et des trajectoires de mise en place du croisement caractérisées pour chaque troupeau à partir de ces données d'enquête (Quénon et al., 2020).

5.2.2.1. Construction des variables de performances zootechniques des troupeaux

Cinq variables de performance zootechnique ont été construites à partir des données de lactation totale et de reproduction des femelles des troupeaux, extraites du contrôle laitier pour campagnes 2009-2017 (Tableau 15).

La production laitière totale du troupeau a été calculée, pour l'année considérée, comme la somme des quantités de lait produites au cours des lactations des femelles constitutives du troupeau ayant débuté pendant l'année considérée (*LaitTroup*, en kg).

Pour rendre compte de la production laitière « qualitative » pour un troupeau et une année donnée, j'ai utilisé la valeur moyenne du taux de matière utile du lait (*TMU* en g/kg/vache laitière), calculé comme la somme des taux butyreux (*TB* en g/kg/vache laitière) et protéique (*TP* en g/kg/vache laitière). Le TMU a été choisi plutôt que la quantité totale de matière utile du lait du troupeau car cette dernière est fortement corrélée à la quantité de lait produite ($Cor(LaitTroup, MU) = 1$) et ne fournit donc pas d'information supplémentaire à celle-ci. De plus, le choix d'utiliser une variable

agrégée au lieu de deux variables de taux distinctes (TB et TP moyen) a été fait pour n'avoir qu'une seule variable par type de performance zootechnique évaluée (quantité de lait, qualité de lait, reproduction, santé et longévité).

Pour rendre compte de la fertilité du troupeau pour une année donnée, j'ai construit une variable (*Fertilite*, en %) correspondant au pourcentage de vaches du troupeau ayant un IVIAF inférieur ou égal à 117 jours. Cette valeur seuil de 117 jours correspond à la valeur de l'IVIAF des 25% de vaches laitières les plus fertiles parmi les troupeaux bovins laitiers français (*i.e.* premier quartile Q1), les valeurs 2009 à 2013 étant indisponibles (Reproscope, 2017). Pour calculer cette variable, j'ai utilisé les dates de vêlages et d'inséminations fécondantes de chaque femelle pour chacune de leur lactation fournie par le contrôle laitier. Or, pour 2308 lactations, soit près de 35% de l'échantillon, l'IVIAF ne pouvait être calculé car les dates de vêlage ou d'inséminations fécondantes faisaient défaut. J'ai remplacé les valeurs d'IVIAF manquantes pour les lactations concernées par des valeurs imputées, en utilisant une méthode d'imputation multiple avec le package *missMDA* (Husson and Josse, 2020) sous R Studio (RStudio Team, 2020).

Pour rendre compte de l'état de santé de la mamelle du troupeau (*LactSain*, en %), j'ai calculé le pourcentage de vaches du troupeau ayant un score de cellules somatiques (SCS) moyen strictement inférieur à 4 (soit un CCS < 200.000) au cours de la lactation ; il s'agit donc du pourcentage de vaches du troupeau considérées comme ayant eu une lactation saine, c'est-à-dire sans mammite clinique (Lipkens et al., 2019; UMT eBis and Geneval, 2019). Pour calculer ce pourcentage, j'ai d'abord calculé le SCS moyen pour chaque lactation à partir des données de comptage de cellules somatiques de chaque contrôle mensuel des lactations des vaches fournies par le contrôle laitier. Ainsi, le SCS est calculé, pour chacun des contrôles réalisés au cours de la lactation, en suivant la formule établie par Wiggans et Shook (1987) :

$$SCS = log_2\left(\frac{CSC}{100\,000}\right) + 3\ ,$$

où CSC est le comptage de cellules somatiques réalisé au cours du contrôle, exprimé en nombre de cellules par ml de lait. Le SCS moyen d'une lactation est ensuite calculé pour les lactations présentant au minimum 5 contrôles. Le pourcentage de vaches ayant eu une lactation saine est ensuite calculé au sein de chaque troupeau pour chaque année.

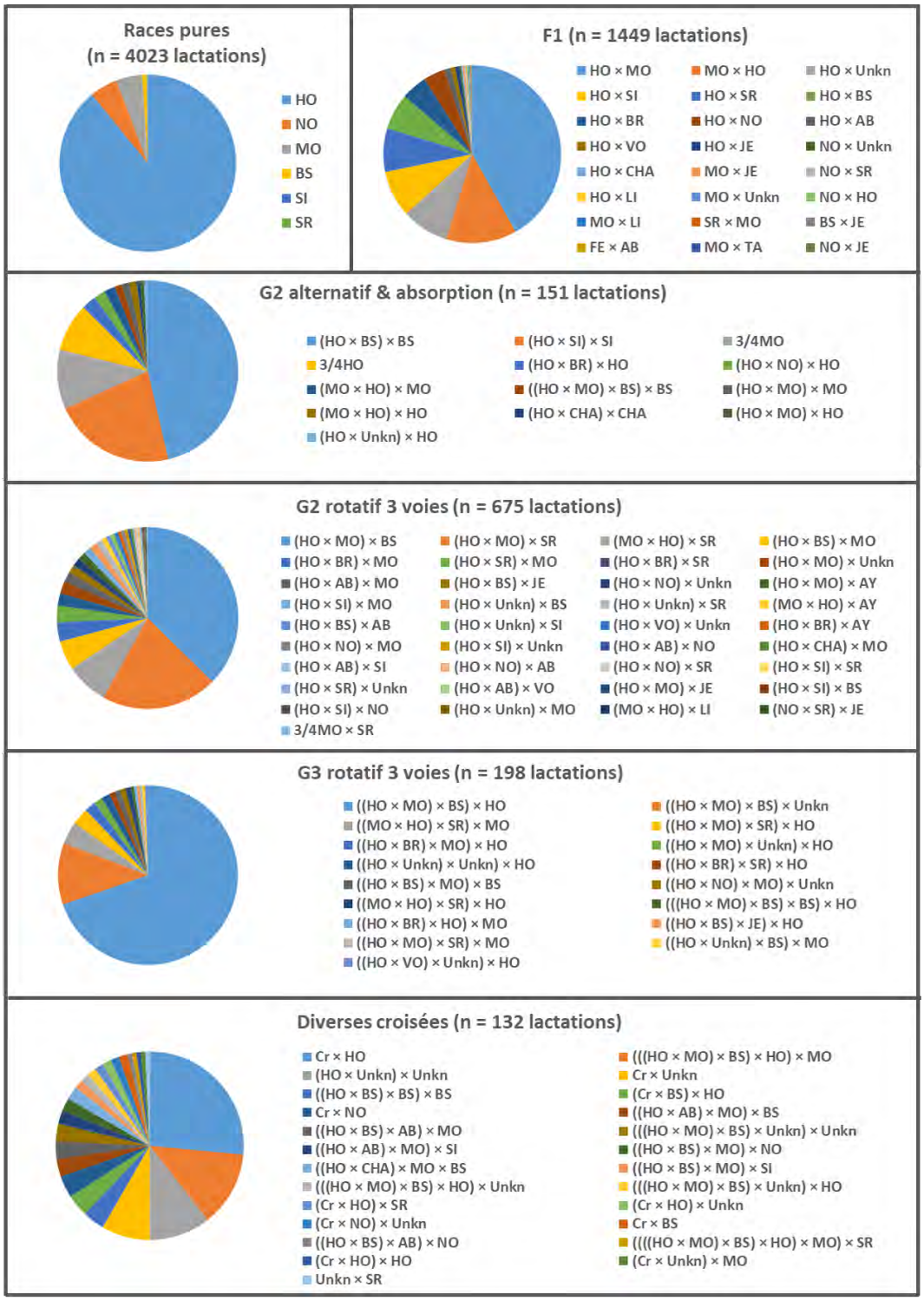


Figure 49 : Diversité des combinaisons de races du jeu de données de lactations initial (n = 6628) regroupées suivant la catégorisation détaillée dans le tableau 11. AB = Abondance ; AY = Ayrshire ; BR = Rouge Flamande ; BS = Brune ; CHA = Charolaise ; Cr = Croisée indéterminée ; FE = Ferrandaise ; HO = Holstein ; JE = Jersiaise ; LI = Limousine ; MO = Montbéliarde ; NO = Normande ; SI = Simmentale ; SR = Rouge Scandinave ; TA = Tarentaise ; Unkn = Unknown ; VO = Vosgienne

Pour rendre compte de la longévité du troupeau considérée comme reflétant sa robustesse (Ollion, 2015), j'ai calculé le pourcentage de vaches du troupeau en troisième lactation et plus (*L3etc*, en %).

5.2.2.2. Construction des variables de composition des troupeaux

Pour rendre compte de la composition génétique et démographique du troupeau en transition vers la gestion d'un troupeau croisé, j'ai construit des variables rendant compte (i) des classes génétiques engendrées par l'utilisation du croisement dans un troupeau initialement géré en race pure – principalement Holstein dans l'échantillon (voir Figure 49) – ; (ii) du processus de diversification génétique qui s'opère dans le troupeau à partir du moment où l'on introduit du croisement rotatif ; (iii) de la démographie classique d'un troupeau comme par exemple son effectif et les rangs de lactation moyen.

Définition des classes génétiques engendrées par le croisement au sein des troupeaux. Au sein des données du SNIG, chaque femelle croisée est désignée par le code race 39 quel que soit le programme de croisement et la génération de croisée considérés. J'ai donc utilisé les données raciales et généalogiques (combinaison des codes races parentaux, grand-parentaux, *etc.*) pour reconstruire leurs génotypes. Compte tenu de la grande diversité de génotypes croisés au sein des 13 troupeaux (voir Figure 49), j'ai défini des classes génétiques plus inclusives en m'appuyant sur le programme de croisement (c'est-à-dire la combinaison de races) et la valeur théorique d'hétérosis H selon la méthode exposée par VanRaden (1992) :

$$H = 1 - \sum_i s_i d_i \ ,$$

où s_i et d_i correspondent aux pourcentages de gènes issus de la race i respectivement apportés par le père (sire) et la mère (dam).

J'ai ainsi défini initialement 8 classes génétiques de femelles croisées et 1 classe génétique regroupant les races pures (Tableau 16, 3ème colonne). Cependant, certaines de ces classes étant très peu représentées dans l'échantillon, elles ont été regroupées : c'est le cas des classes « *G_2 alternatif* » et « *G_2 absorption* » d'une part (agrégées dans la classe « *G_2 alternatif et absorption* »), et des classes « *G3 absorption* », « *G3 rotatif 4 voies* » et « *Autres* » (agrégées dans la classes « *Diverses*

Combinaison de races	Heterosis H	Classe génétique initiale	Nombre de lactation *(% du total)*	Nombre de femelles *(%)*	Classe génétique finale	Abréviation
R1 ♀	0,000	Race pure	4023 (60,7%)	1670 (61,3%)	Race pure	*RP*
Toutes croisées	Divers > 0	Toutes croisées	2605 (39,3%)	1056 (38,7%)	Croisées	*Croisee*
R1 × R2 ♀ ♂	1,000	F_1	1449 (21,9%)	523 (19,2%)	F_1	*F1*
(R1 × R2) × R1 ♀ ♂	0,500	G_2 alternatif	41 (0,6%)	20 (0,7%)	G_2 alternatif et absorption	*G2_alterabs*
(R1 × R2) × R2 ♀ ♂	0,500	G_2 absorption	110 (1,7%)	46 (1,7%)		
(R1 × R2) × R3 ♀ ♂	1,000	G_2 rotatif 3 voies	675 (10,2%)	302 (11,1%)	G_2 rotatif 3 voies	*G2_3V*
((R1 × R2) × R3) × R1 ♀ ♂	0,750	G_3 rotatif 3 voies	198 (2,9%)	108 (3,9%)	G_3 rotatif 3 voies	*G3_3V*
((R1 × R2) × R2) × R2 ♀ ♂	0,125	G_3 absorption	5 (0,1%)	3 (0,1%)	Diverses croisées	*DivCr*
((R1 × R2) × R3) × R4 ♀ ♂	1,000	G_3 rotatif 4 voies	20 (0,3%)	8 (0,3%)		
Diverses	Inconnu	Autres	107 (1,6%)	46 (1.7%)		

Tableau 16 : Caractérisation des classes génétiques en fonction de la combinaison de races et de la valeur théorique d'hétérosis (H) : race pure (RP) et croisées (*Croisee*) : parmi les croisées, sont caractérisées les croisées de première génération (*F1*), les croisées de deuxième génération d'un programme de croisement alternatif ou d'absorption (*G2_alterabs*), les croisées de deuxième génération d'un programme de croisement rotatif 3 voies (*G2_3V*), les croisées de troisième génération d'un programme de croisement rotatif 3 voies (*G3_3V*) et les croisées diverses et/ou indéterminées (*DivCr*)

croisées »). Au final, 7 classes génétiques (Tableau 16, 6ème colonne) sont retenues ; la composition en génotypes de ces classes génétiques est détaillée en Annexe 1. Le pourcentage de vaches au sein de chaque troupeau × année a été calculé pour chacune de ces 7 classes génétiques (Tableau 16) :

- Deux classes « globales » qui distinguent les vaches de race pure (*RP*) et les vaches croisées, tout programme de croisement confondu (*Croisee*)
- Cinq classes génétiques de croisées plus détaillées rendant compte de programmes de croisement mis en place et gérés par les éleveur·euse·s au sein de troupeaux : *F1*, *G2_alterabs*, *G2_3V*, *G3_3V* et *DivCr*.

Définition des variables rendant compte de la diversification génétique au sein du troupeau suite à l'introduction du croisement. J'ai défini la variable *Rao* (Tableau 15) pour évaluer la diversité intra-spécifique en génotypes du troupeau, en m'inspirant de l'indice de Rao (Rao, 1982) utilisé en écologie (Rocchini et al., 2017) pour évaluer la diversité interspécifique d'un milieu donné. La particularité de l'indice de Rao est qu'il repose sur la prise en compte de la *dissimilarité* (Duncan and Duncan, 1955) entre les espèces du milieu considéré, *i.e.* de la distance – phylogénétique, fonctionnelle – entre ces espèces. Pour calculer cet indice j'ai utilisé la formule suivante :

$$Q = \sum_{i,j} p_i p_j d_{ij}$$

Avec Q l'indice de Rao du troupeau, p_i et p_j les abondances relatives des génotypes i et j au sein du troupeau ($\sum_i p_i = 1$) et d_{ij} la distance (dissimilarité) entre les génotypes i et j.

Définition des variables rendant compte de la démographie du troupeau. J'ai utilisé l'effectif du troupeau par année, qui permet d'évaluer si l'utilisation du croisement s'accompagne d'une augmentation de l'effectif du troupeau laitier pour maintenir sa production laitière totale.

5.2.2.3. Construction des variables de gestion technique des troupeaux

La première variable construite est une variable catégorielle (*GrpTrajTech*, Tableau 15) : elle rend compte du type de transition technique opérée par les éleveur·euse pour mettre en place et gérer le croisement, selon trois modalités caractérisées par Quénon et al. (2020) (voir Chapitre 3) :

- Groupe 1 : le croisement supporte une conversion à l'agriculture biologique ou une transition vers un système plus herbager. Les éleveur·euse·s choisissent en amont un programme de croisement pour rester productif en lait et l'introduisent rapidement au sein du troupeau, ce qui les conduit à devoir réajuster les pratiques de configuration (croisement industriel, achat/vente de génisses) pour gérer le surplus d'animaux lié à l'amélioration des performances de reproduction.
- Groupe 2 : le croisement supporte une conversion à l'agriculture biologique ou une transition vers un système plus herbager. Les éleveur·euse·s procèdent par essai-erreur pour trouver un programme de croisement adapté à leurs nouveaux objectifs, lesquels incluent l'acceptation d'une réduction du volume de lait produit. Ils/elles l'introduisent donc progressivement au sein du troupeau. De ce fait, les pratiques de configuration restent stables car les effets du croisement sur les performances de reproduction sont amortis dans le temps.
- Groupe 3 : la transition du troupeau vers le croisement constitue le seul changement majeur au sein du système d'élevage qui reste stable. Un unique programme de croisement est choisi en amont et introduit rapidement pour améliorer les performances de reproduction du troupeau sans dégrader celles de production. Ce rythme rapide conduit les éleveur·euse·s à réajuster les pratiques de configuration au cours de la transition pour s'adapter à l'afflux d'animaux, conséquence de l'amélioration des performances de reproduction du troupeau.

Les autres variables (n = 6, voir Tableau 15) ont été construites pour décrire les modes de gestion des troupeaux qui rendent compte du niveau général d'intensivité de la gestion de la production et des pratiques relatives à la gestion du système fourrager, susceptibles d'avoir une influence sur les performances du troupeau.

5.2.3. Méthodes et traitement des données

Pour analyser l'évolution des performances des troupeaux sur la période 2009-2017 (au cours de laquelle les éleveur·euse·s ont mis en place et géré le croisement rotatif) et en identifier les déterminants, j'ai utilisé une méthode statistique développée par Martin et al. (2017) et adaptée par Bouttes et al. (2018) et Perrin et al. (2020), que j'ai appliquée sur le jeu de données composé de 13 × 9 = 117 troupeaux × années, décrits selon les trois catégories de variables que sont les performances zootechniques, la composition et la gestion technique des troupeaux (Tableau 15). Nous avons choisi cette méthode pour deux raisons. Premièrement, elle permet de mettre en relation des variables de performances de systèmes agricoles à expliquer et des variables internes (*e.g.* structure, pratiques) et externes (*e.g.* prix du lait) aux systèmes agricoles qui peuvent expliquer ces performances. Deuxièmement, cette méthode permet d'intégrer la dimension évolutive de l'ensemble de ces variables (à expliquer et explicatives) et donc de considérer les transitions techniques sur le temps long, en intégrant les changements dans la structure et le fonctionnement du système étudié et leurs conséquences sur les performances de celui-ci. Dans le cas de cette étude, l'évolution des cinq variables de performances zootechniques des troupeaux sont les variables à expliquer et les variables relatives à la composition et la gestion technique des troupeaux sont des variables explicatives.

5.2.3.1. Des régressions linéaires pour calculer l'évolution des performances et de la composition et de la gestion technique des troupeaux

La première étape de la méthode consiste à quantifier l'évolution au cours de la période d'étude des variables à expliquer (performances des troupeaux) et des variables explicatives (composition et gestion technique des troupeaux). Pour cela, j'ai modélisé pour chaque troupeau l'évolution de chacune des cinq variables de performances zootechniques (*LaitTroup*, *TMU, Fertilite, LactSain* et *L3etc*), des neuf variables de composition du troupeau (*EffTroup*, *RP*, *Croisee*, *F1*, *G2_alterabs*, *G2_3V*, *DivCr*, et *Rao*) et des sept variables de gestion technique du troupeau (*FormElev*, *PourcSFP*, *HerbeSFP*, *MaisSFP*, *Charg*, *LaitVL* et *GrpTrajTech*) par régression linéaire en fonction du temps. J'ai utilisé, pour ce faire, la fonction *lm* du

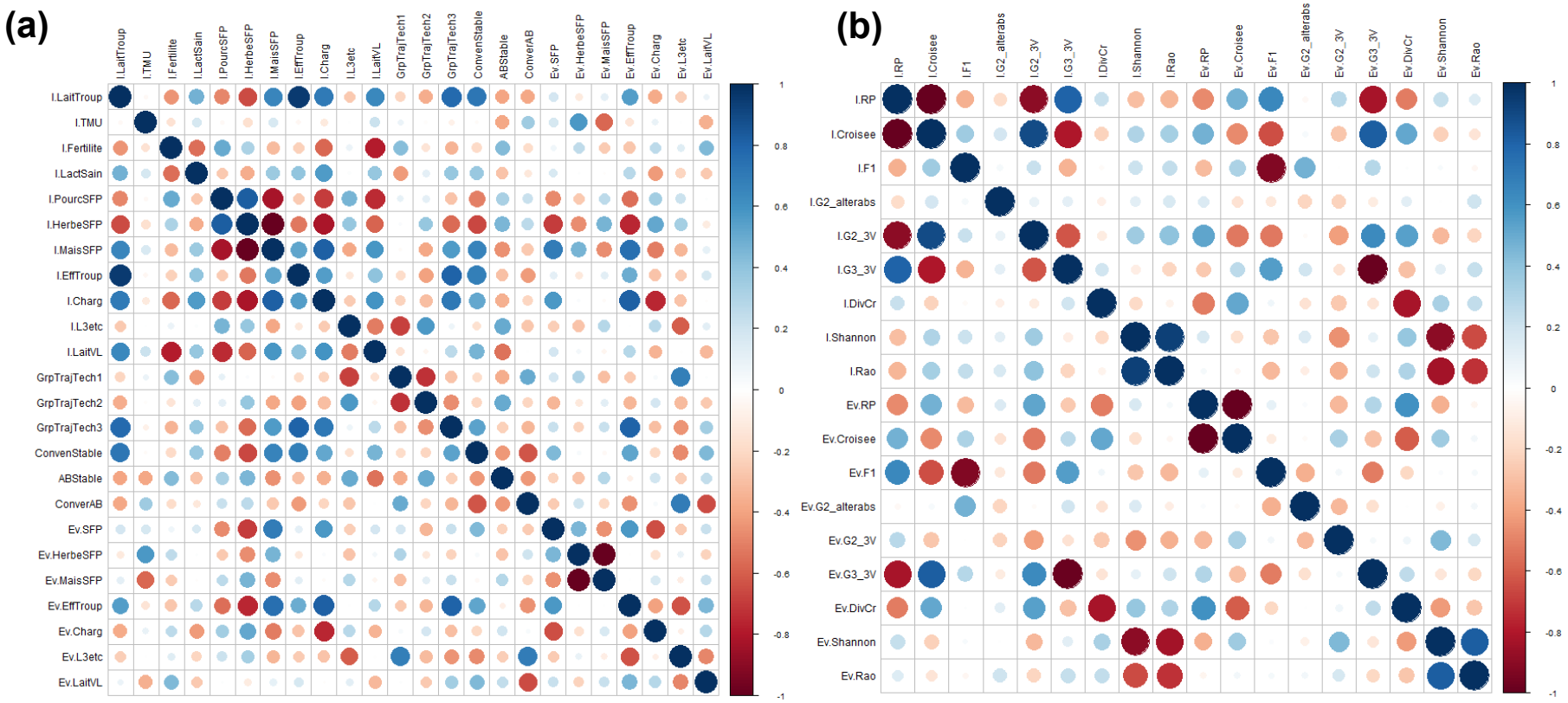


Figure 50 : Représentation graphique de la matrice de corrélation pour les variables explicatives utilisées pour les régressions PLS n°1 et PLS n°2 : variables de structure et de pratiques **(a)** et variables de croisement et de diversité du troupeau **(b)**. Les corrélations positives sont affichées en bleu et les corrélations négatives en rouge. L'intensité de la couleur et la taille des cercles sont proportionnelles à la valeur des coefficients de corrélation

package *stats* (R Core Team, 2020) sous RStudio. J'ai ensuite extrait les valeurs de pente et d'ordonnée à l'origine (*intercept* ci-après) pour chacune des régressions. Pour une variable donnée, la valeur de pente est notée *Ev.<Nom de la variable>* et la valeur d'intercept est notée *I.<Nom de la variable>* (voir Tableau 15 pour le nom des variables).

La valeur de pente rend compte de la tendance d'évolution de la variable considérée. Pour une variable quantitative (*e.g.*, production laitière du troupeau), la valeur de pente permet d'identifier si la variable a augmenté (valeur positive), diminué (valeur négative) ou si elle s'est maintenue (valeur nulle) sur la période 2009-2017. Pour une variable catégorielle (*e.g.*, *FormElev*), il n'y a pas de valeur de pente car les différentes modalités que peut prendre la variable décrivent déjà l'information relative à l'évolution de la variable au cours de la période 2009-2017. Ainsi, pour la variable *FormElev*, un troupeau pourra être qualifié par l'une des trois modalités – « ABStable », « ConverAB » ou « ConvenStable » (voir Tableau 15) – pour la période 2009-2017 selon que la ferme est restée en AB sur ladite période, s'est convertie à l'AB au cours de la période ou qu'elle est restée en agriculture conventionnelle sur la période, respectivement. Similairement, pour la variable catégorielle *GrpTrajTech*, un troupeau pourra être qualifié par l'une de ses trois modalités – « *GrpTrajTech1* », « *GrpTrajTech2* » et « *GrpTrajTech3* » – pour la période 2009-2017 selon le groupe de trajectoire de transition technique accompagnant la mise en place du croisement par l'éleveur·euse, comme présenté précédemment.

La valeur d'intercept rend compte de l'état initial de la variable considérée. Les valeurs d'intercept des variables de performances et celles des variables de composition et de gestion technique des troupeaux fournissent ainsi des informations complémentaires sur l'état des troupeaux au début de la période d'étude *i.e.* en 2009, lequel est supposé influencer l'évolution des performances des troupeaux sur la période 2009-2017.

Dès lors, à l'issue de cette étape, les cinq valeurs de pente des variables de performances de troupeau sont les variables à expliquer. Les valeurs de pente des variables de composition et de gestion technique des troupeaux d'une part et les valeurs d'intercept des trois catégories de variables (performances, composition et gestion technique des troupeaux) d'autre part en sont les variables potentiellement explicatives.

Type de variables	***Nom des variables***	***Matrice des Y : variables de réponse***
Evolution Performances	Ev.LaitTroup	×
	Ev.TMU	×
	Ev.Fertilite	×
	Ev.LactSain	×
	Ev.L3etc	×

Tableau 17 : Composition de la matrice de variables de réponses Y

Type de variables	***Nom des variables***	***Matrice des X : variables explicatives***	
		X1	***X2***
Etat initial Performances	I.LaitTroup	×	×
	I.TMU	×	×
	I.Fertilite	×	×
	I.LactSain	×	×
	I.L3etc	×	×
Etat initial Composition du troupeau	I.EffTroup	×	×
	I.RP	×	×
	I.Croisee	×	×
	I.F1		×
	I.G2_alterabs		×
	I.G2_3V		×
	I.G3_3V		×
	I.DivCr		×
	I.Shannon	×	×
	I.Rao	×	×
Etat initial Gestion technique du troupeau	I.PourcSFP	×	×
	I.HerbeSFP	×	×
	I.MaisSFP	×	×
	I.Charg	×	×
	I.LaitVL	×	×
Evolution Composition du troupeau	Ev.EffTroup	×	×
	Ev.RP	×	×
	Ev.Croisee	×	×
	Ev.F1		×
	Ev.G2_alterabs		×
	Ev.G2_3V		×
	Ev.G3_3V		×
	Ev.DivCr		×
	Ev.Shannon	×	×
	Ev.Rao	×	×
Evolution Gestion technique du troupeau	Ev.PourcSFP	×	×
	Ev.HerbeSFP	×	×
	Ev.MaisSFP	×	×
	Ev.Charg	×	×
	Ev.LaitVL	×	×
	ABStable	×	×
	ConvenStable	×	×
	ConverAB	×	×
	GrpTrajTech1	×	×
	GrpTrajTech2	×	×
	GrpTrajTech3	×	×

Tableau 18 : Composition des matrices de variables explicatives X1 et X2

5.2.3.2. Des régressions des moindres carrés partiels pour identifier les déterminants de l'évolution des performances des troupeaux

Afin d'évaluer l'évolution conjointe des cinq variables de performances zootechniques des troupeaux de 2009 à 2017 et d'identifier les facteurs qui l'expliquent parmi les variables explicatives construites (état initial des performances des troupeaux, état initial et évolution de la composition et de la gestion technique des troupeaux), j'ai réalisé plusieurs régressions des moindres carrés partiels (*PLS* ci-après) en utilisant le package *mixOmics* (Lê Cao et al., 2016) sous R Studio. La PLS est une méthode basée sur la projection multivariée qui consiste à modéliser les relations explicatives entre variables de deux ensembles de données : l'ensemble des variables de réponse/à expliquer – qui constitue la matrice X – et l'ensemble des variables explicatives – qui constitue la matrice Y – (Tenenhaus, 1998). Ainsi, la PLS génère des combinaisons linéaires de ces variables (appelées « *composantes* » de la PLS) en maximisant la covariance carrée entre les variables de réponse et les variables explicatives. Trois raisons ont motivé le choix de cette méthode d'analyse. D'abord, la PLS n'est pas limitée à une seule variable à expliquer (ou variable *de réponse*) contrairement à la régression linéaire (Tenenhaus, 1998), ce qui est le cas dans cette étude où l'on cherche à expliquer l'évolution de plusieurs performances. Ensuite, la PLS distingue un ensemble de variables de réponse et un ensemble de variables explicatives, contrairement à l'Analyse en Composantes Principales qui ne fait pas cette distinction (Tenenhaus, 1998). Enfin, elle prend en compte la multicolinéarité des variables explicatives, c'est-à-dire qu'elle offre la possibilité d'avoir des variables explicatives fortement corrélées, ce qui est le cas dans cette étude (Figure 50 : *e.g. Ev.RP et Ev.Croisee* sont inversement corrélées).

J'ai utilisé la régression PLS pour générer des composantes (combinaisons linéaires de variables) en maximisant la covariance carrée entre l'évolution des cinq performances zootechniques des troupeaux (matrice Y ; Tableau 17) et l'évolution de toutes les variables explicatives (matrice X). Nous avons fait deux PLS différentes selon les variables explicatives contenues dans la matrice X, plus particulièrement les variables relatives aux classes génétiques constitutives du troupeau. Ainsi, dans la PLS n°1, j'ai distingué deux classes, les races pures et les croisées tout génotype confondu (en % de vaches) alors que dans la PLS n°2, j'ai distingué les races pures et les cinq classes génétiques croisées – *F1, G2_alterabs, G2_3V, G3_3V et Ev.DivCr*

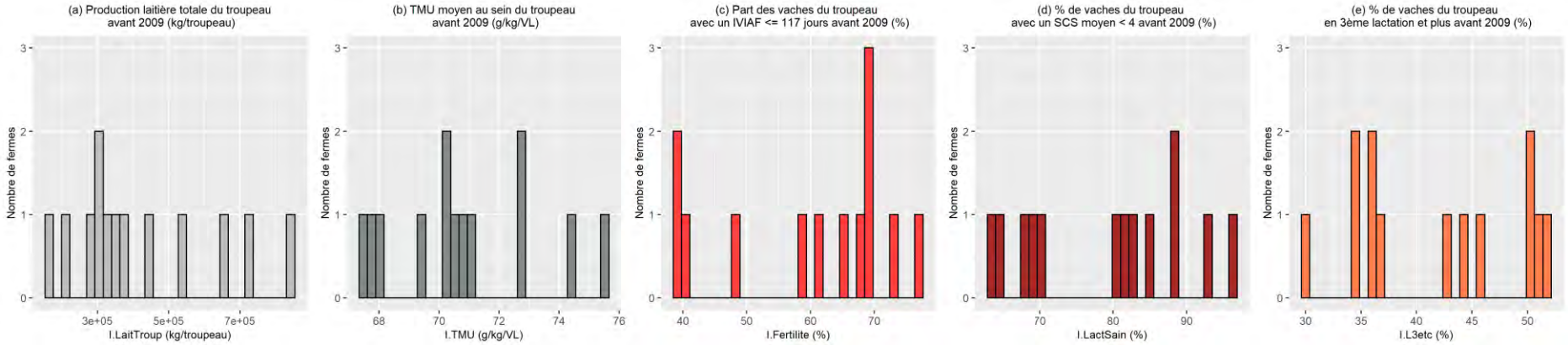


Figure 51 : Distribution parmi les troupeaux de l'échantillon des valeurs d'intercept pour les performances du troupeau : production laitière totale (a), taux de matière utile (b) part de vaches très fertiles (c), part de vaches avec une lactation saine (d) et et part de vaches en 3ème lactation et plus (e)

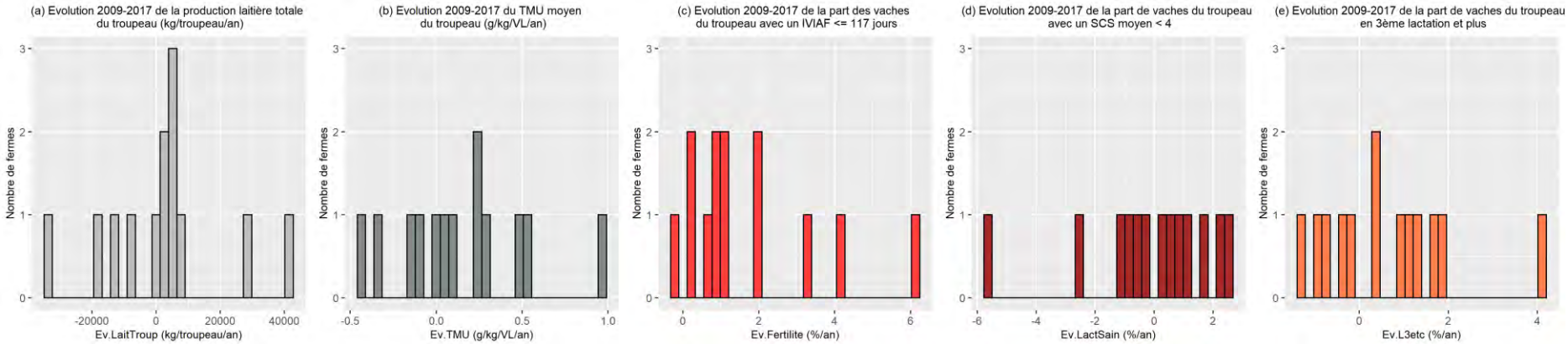


Figure 52 : Distribution parmi les troupeaux de l'échantillon de l'évolution des performances du troupeau au cours de la période d'étude 2009-2017: production laitière totale (a), taux de matière utile (b) part de vaches très fertiles (c), part de vaches avec une lactation saine (d) et part de vaches en 3ème lactation et plus (e). Les valeurs positives (respectivement négatives) sur l'axe des x des graphiques d'évolution des performances indiquent une augmentation (respectivement, une diminution) au cours du temps

– (Tableau 18). Ainsi, la PLS n°1 permet de tester l'effet du croisement en général sur l'évolution des performances du troupeau et la PLS n°2 d'identifier si certaines classes génétiques de croisées ont une influence plus importante. Pour pouvoir analyser les résultats de ces régressions, il faut notamment s'assurer que la qualité de prédiction de la PLS (*i.e.* qualité de prédiction des composantes générées) soit satisfaisante. La qualité de prédiction d'une PLS est mesurée par l'indicateur Q^2 et on considère qu'une composante PLS peut être incluse dans le modèle si $Q^2 \geq 0{,}0975$ (Tenenhaus, 1998).

5.3. Résultats

5.3.1. Etat initial et évolution des performances zootechniques élémentaires des troupeaux

A l'état initial – *i.e.* en 2009 –, la médiane de la production laitière des troupeaux de l'échantillon était de 360 000 kg de lait, soit supérieure à la moyenne nationale de 303 689 kg (FranceAgriMer, 2013). On observe une grande amplitude de production laitière des troupeaux (min = 159 000 kg, max = 840 000 kg, Figure 51 a). Au cours de la période 2009-2017, la tendance a été à l'augmentation de la production laitière totale pour 8 troupeaux sur 13 (Figure 52 a), ce qui suit la tendance nationale (FranceAgriMer, 2016a). Ceci est particulièrement le cas pour deux troupeaux dans lesquels la production laitière totale a augmenté respectivement de 29 000 et 42 000 kg lait/an. En revanche, la production laitière totale est restée stable pour un troupeau et a diminué pour quatre troupeaux, avec une perte de 9 000 à 35 000 kg lait/an selon les troupeaux.

Concernant le taux de matière utile moyen des troupeaux, trois troupeaux avaient à l'état initial (Figure 51 b) un TMU supérieur à la moyenne française (72,2 g/kg/VL, France Génétique Elevage (2010)). Au cours de la période 2009-2017, le TMU a augmenté dans 6 troupeaux sur 13 ; pour 3 d'entre eux, le gain a été d'au moins + 0,5 g TMU/kg lait/an soit +4,5 g TMU/kg lait au total (Figure 52 b). Deux troupeaux sur 13 ont diminué franchement le TMU tandis qu'il est resté relativement stable (entre -0,25 et + 0,25 g/kg/an soit entre -2,25 et + 2,25 g/kg au total) dans 5 troupeaux sur 13 au cours de la période 2009-2017, ce qui correspond à la tendance nationale (Idele et France Conseil Elevage, 2018).

Pour 4 troupeaux de l'échantillon, la fertilité des troupeaux était initialement assez faible, avec moins de 50% des vaches ayant un IVIAF ≤ 117 jours (Figure 51 c). La moitié des troupeaux de l'échantillon ont initialement près de 65% de vaches avec un IVIAF ≤ 117 jours. Ici encore, une grande amplitude existe entre les troupeaux constitués de vaches avec de bonnes performances de fertilité (max. = 77%) et ceux constitués de vaches aux performances de fertilité dégradées (min. = 39%). Cependant, au cours de la période 2009-2017 le pourcentage de vaches fertiles a augmenté dans 12 troupeaux sur 13 (Figure 52 c) : dans sept troupeaux, cette part a augmenté de 1,1% par an sur la période, ce qui représente une augmentation totale de 10% de vaches fertiles/troupeau entre 2009 et 2017. Un seul troupeau a vu ses performances de fertilité se dégrader très légèrement au cours de la période (min. = -0,13%/an soit - 1,2% au total).

Alors qu'à l'état initial tous les troupeaux avaient plus de 50 % des vaches ayant des lactations saines et 8 troupeaux sur 13 en avaient plus de 80% (Figure 51 d), l'évolution de la situation sanitaire au cours de la période 2009-2017 est plus contrastée que pour les performances de fertilité. Ainsi, la part de lactations saines se maintient (entre -0,2 et +0,2%/an soit entre -1,8 et +1,8% sur la période) pour 4 troupeaux sur 13 (Figure 52 d), elle augmente de plus de 0,2%/an pour 5 troupeaux et elle diminue de plus de 0,2%/an pour 4 troupeaux.

Enfin, les troupeaux étaient relativement jeunes à l'état initial, avec 9 troupeaux sur 13 ayant une part de vaches en 3ème lactation et plus inférieure à 50% de l'effectif (Figure 51 e), ce qui indique une longévité faible et un fort taux de renouvellement. L'évolution de la longévité au cours de la période 2009-2017 est contrastée dans l'échantillon: la part de vaches en 3ème lactation et plus se maintient (entre -1 et +1%/an soit entre -9 et +9% sur la période) pour 7 troupeaux sur 13 (Figure 52 e), elle augmente de plus de 1%/an pour 5 troupeaux et elle diminue de plus de 1%/an pour 1 troupeau.

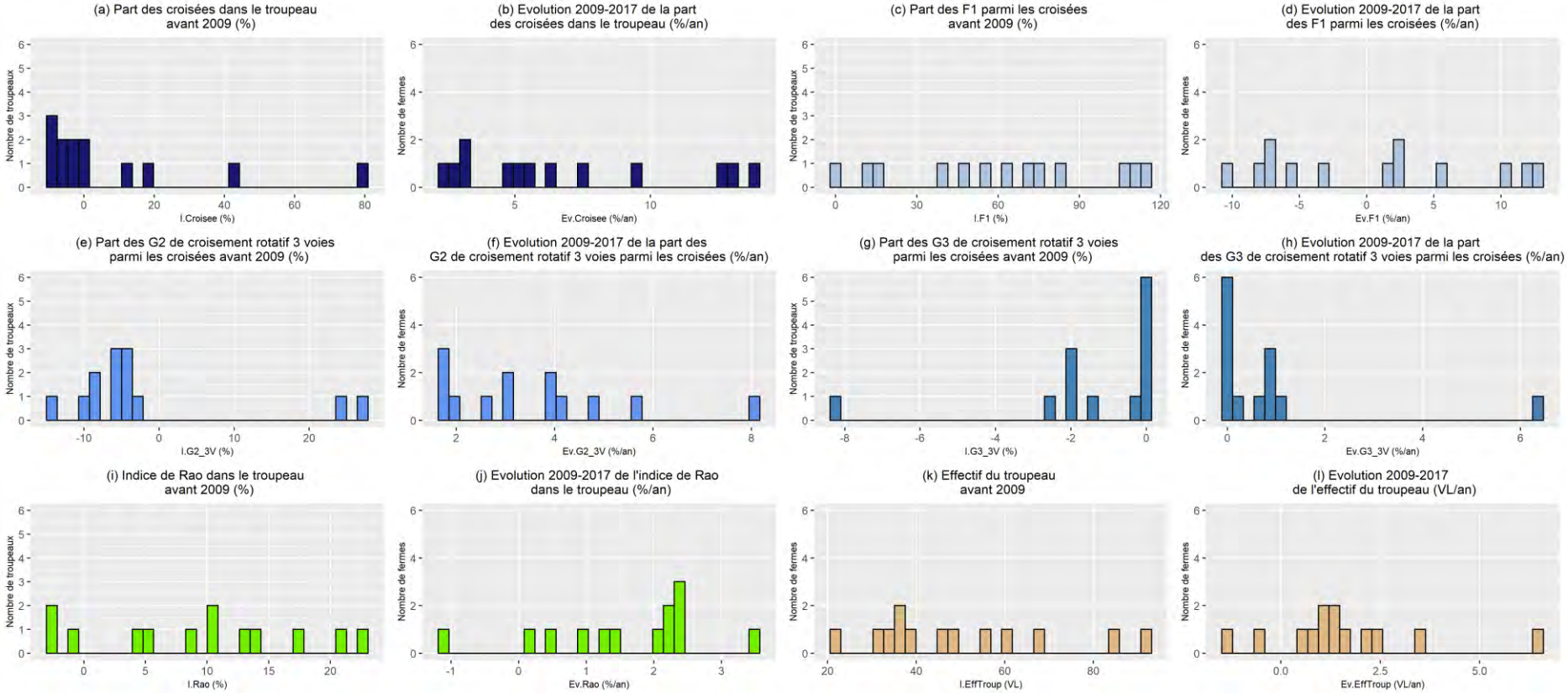


Figure 53 : Distribution parmi les troupeaux de l'échantillon des valeurs d'intercept et de l'évolution au cours de la période d'étude des variables relatives à la composition du troupeau : part de vaches croisées (a, b), de vaches F_1 parmi les croisées (c, d), de vaches G_2 de croisement rotatif 3 voies parmi les croisées (e, f) et de vaches G_3 de croisement rotatif 3 voies parmi les croisées (g, h). Les valeurs positives (respectivement négatives) sur l'axe des x des graphiques relatif à l'évolution des variables (b, d, f, h, j et l) indiquent une augmentation (respectivement, une diminution) au cours du temps

5.3.2. Etat initial et évolution de la composition et de la gestion technique des troupeaux

L'évolution de la composition des troupeaux au cours de la période 2009-2017 montre que les 13 troupeaux voient la part de croisées qui les constituent augmenter, ce qui atteste que ces troupeaux sont bel et bien dans la période de transition technique que constitue la mise en place du croisement en leur sein. Ainsi, l'évolution du pourcentage de croisées est positive dans tous les troupeaux (Figure 53 b), avec une amplitude variable (min. = +2,5%/an soit, max. = +14%/an). De la même manière les pourcentages de G2_3V (Figure 53 f) et G3_3V (Figure 53 h) augmentent dans les troupeaux, traduisant que le croisement est poursuivi au-delà de la F_1. En revanche, l'analyse de l'état initial des compositions de troupeaux montre qu'ils sont à des stades différents dans la mise en place et la gestion du croisement laitier, et ce, dès 2009. Ainsi, neuf troupeaux sur 13 ont un pourcentage de vaches croisées initial nul (Figure 53 a) et sont donc composés uniquement de vaches de race pure. Dans les quatre autres troupeaux, le croisement a été mis en place avant 2009 et la part de croisées qui les constituent varie de 10 à 80%. Ceci explique également pourquoi certains troupeaux (6/13) ont une évolution du pourcentage de F_1 négative sur la période (Figure 53 d) : ceux-ci avaient initialement un pourcentage élevé de F_1 qui a diminué au fur et à mesure que les vaches des générations de croisement suivantes les ont remplacées. On observe une corrélation négative entre la part initiale d'une classe génétique de croisées et son évolution (*I.F1* et *Ev.F1*, *I.G2_3V* et *Ev.G2_3V*, *I.G3_3V* et *Ev.G3_3V*, *etc.*, Figure 50) : la pratique du croisement laitier conduit à une succession dans le temps au sein du troupeau des générations de croisement. Plus un troupeau a de croisées F_1 à l'état initial, plus leur part relative diminuera au cours du temps car elles seront remplacées par les croisées de générations suivantes, et ainsi de suite pour chaque classe génétique. L'évolution de la diversification intra-spécifique au sein du troupeau (variable *Rao*) conforte ces deux tendances. Ainsi, l'augmentation de l'indice de Rao pour 12 troupeaux sur 13 (Figure 53 j) indique une augmentation du nombre de génotypes présents dans le troupeau et que ces génotypes sont de plus en plus dissimilaires. Enfin, il ressort que la démographie des troupeaux varie en termes d'effectif de vaches laitières sur la période 2009-2017.

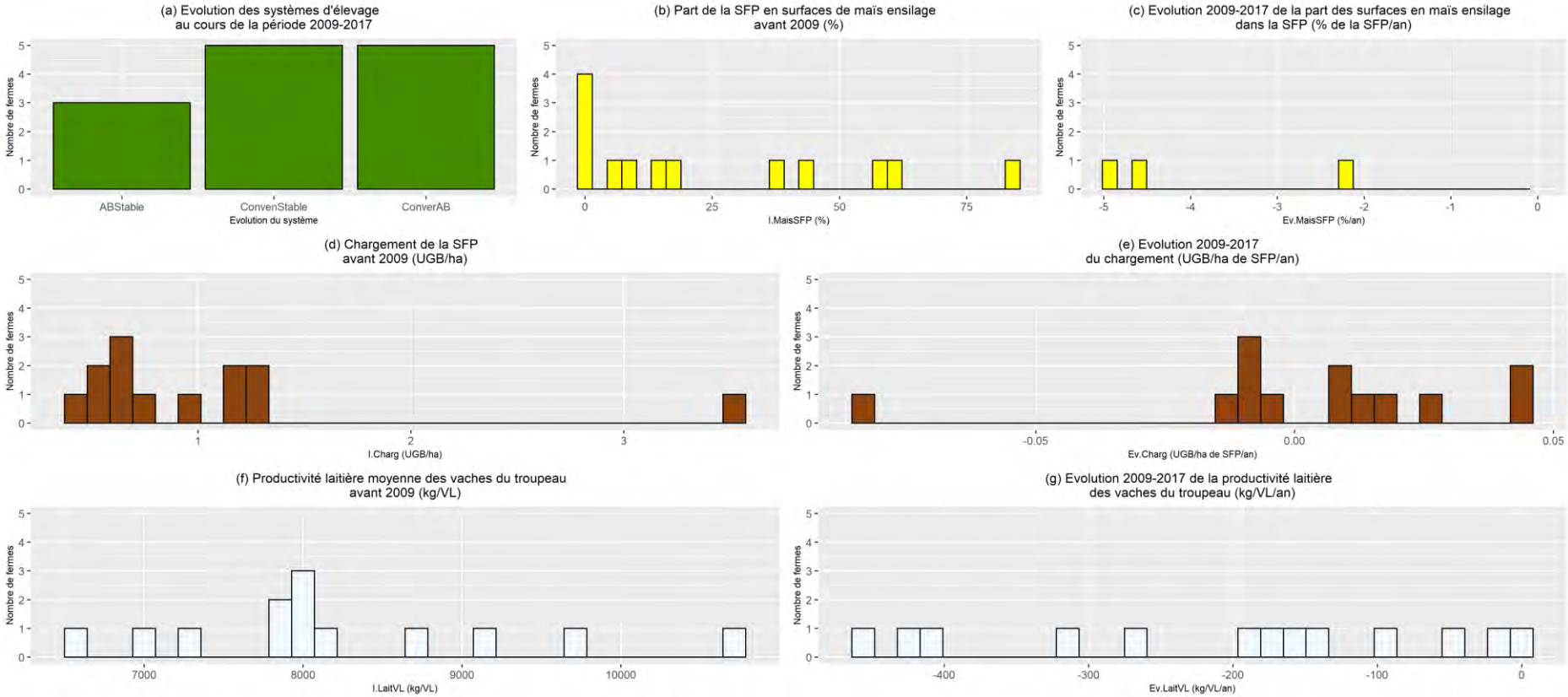


Figure 54 : Distribution parmi les troupeaux de l'échantillon des valeurs d'intercept (b, d, et f) et de l'évolution au cours de la période d'étude (a, c, e et g) des variables de structure et de pratiques parmi l'échantillon des 13 troupeaux. Les valeurs positives (respectivement négatives) sur l'axe des x indiquent une augmentation (respectivement, une diminution) au cours du temps

L'échantillon est constitué de troupeaux ayant un effectif initial (méd. = 47 VL) proche de l'effectif moyen des élevages bovins lait français (45 VL, Recensement Agricole (2010). Le nombre de vaches augmente dans 11 troupeaux sur 13 de manière plus ou moins grande (variant de + 0,5 à 5 VL/an soit + 5 à 45 VL sur la période, Figure 53 l). A l'inverse, il diminue légèrement dans 2 troupeaux avec des diminutions de 0,5 à 1 VL/an soit +5 à 9 VL sur la période 2009- 2017.

L'évolution des modes de gestion technique des troupeaux au cours de la période de transition 2009-2017 montre que le niveau d'intensification des systèmes d'élevage de l'échantillon diminue. Premièrement, à l'issue de la période d'étude, 8 troupeaux sur 13 sont conduits en agriculture biologique (AB) (soit 62% de l'échantillon contre 4% des fermes françaises, FranceAgriMer (2016b)). Cinq se convertissent à l'AB durant la période (Figure 54 a) alors que 3 troupeaux étaient déjà conduits en AB avant 2009 et le restent durant la période. Seuls 5 troupeaux restent en agriculture conventionnelle. Deuxièmement, l'échantillon est constitué de fermes « herbagères » avec une part des surfaces en maïs ensilage dans la SFP relativement faible (Agreste, 2013). Ceci est vrai en 2009 et cela s'accentue encore sur la période d'étude. Ainsi, alors que la part des surfaces en maïs est initialement inférieure à 15% de la SFP dans la moitié des fermes (méd. = 14%), comprise entre 25 et 50% pour 4 fermes sur 13 et supérieure à 50% pour 2 fermes sur 13 (Figure 54 b), elle reste constante au cours de la période 2009-2017 pour 10 fermes sur 13 (Figure 54 c). Dans les 3 autres fermes, la part de maïs dans la SFP diminue (-2 à -4,5%/an soit -18 à -40% sur la période d'étude) alors que la part d'herbe augmente. Troisièmement, le chargement par hectares de SFP est initialement faible (méd. = 1 UGB/ha de SFP, Figure 54 d) comparé à la moyenne française (1,5 UGB/ha de SFP, Recensement Agricole (2010)). Une exploitation sur les 13 a un chargement très élevé (max. = 3,5 UGB/ha de SFP). Le chargement est resté stable dans les élevages entre 2009 et 2017 (méd. = + 0.01 UGB/ha de SFP/an, Figure 54 e), excepté pour une ferme (min. = -0,08 UGB/ha/an). Enfin, de manière concomitante à ces modes production et leur évolution, on note une diminution de la productivité laitière par vache dans 12 troupeaux (-207 kg/VL/an en moyenne équivalant à - 1900 kg/VL sur la période d'étude ; Figure 54 f), et un maintien dans 1 troupeau. Cela s'observe dans des troupeaux qui ont une productivité laitière par vache variant en 2009 entre 6505 et 10 647 kg lait/VL (Figure 54 g) et une productivité laitière moyenne par vache inférieure à la moyenne nationale (8221 kg lait

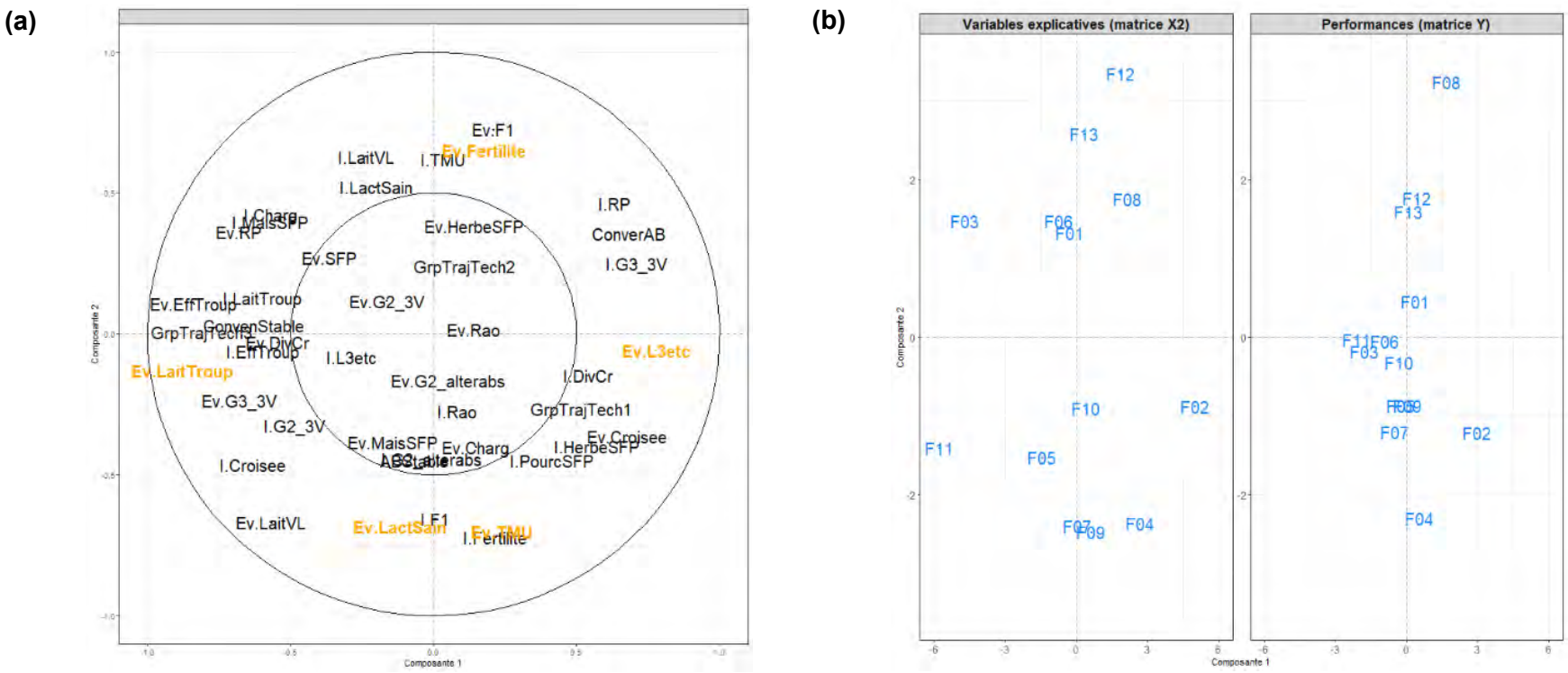


Figure 55 : Résultats de la PLS n°2 : **(a)** projection des variables de réponse (en orange) et des variables explicatives (en gris) sur les 2 composantes retenue ; **(b)** projection des individus (n = 13) sur les 2 composantes retenues selon les variables explicatives (à gauche) ou de réponse (à droite)

« Ev. » signifie « évolution » et correspond à la valeur de pente de la régression linéaire. « I. » signifie « initial » et correspond à la valeur d'intercept de la régression linéaire. Le nom des variables (voir Tableau 5.1) suit ces préfixes. PourcSFP : part de la SFP dans la SAU. HerbeSFP : part de surfaces en herbe dans la SFP. MaisSFP : part de surfaces en maïs ensilage dans la SFP. L3etc : part de vaches en 3ème lactation et plus. LaitVL : productivité moyenne des vaches. GrpTrajTech : groupes de trajectoire de transition technique. ConvenStable : conventionnel stable. ABStable: agriculture biologique stable. ConverAB: conversion à l'agriculture biologique. HO : pourcentage de Holstein. AutRP : pourcentage d'autres races pures. F1 : pourcentage de F_1. G2_alterabs : pourcentage de G_2 de croisement alternatif ou d'absorption. G2_3V : pourcentage de G_2 de croisement trois voies. G3_3V : pourcentage de G_3 de croisement trois voies. DivCr : pourcentage d'autres croisées. Shannon : indice d'équitabilité de Shannon. Rao : indice de Rao. LaitTroup : production laitière du troupeau. TMU : taux de matière utile moyen du troupeau. Fertilite : part de vaches fertiles dans le troupeau. LactSain : part de vaches à lactation saine dans le troupeau

/VL contre 8520 kg/VL respectivement, Institut de l'Elevage (2016)).

5.3.3. Identification des facteurs qui expliquent l'évolution des performances zootechniques des troupeaux

Les résultats des deux PLS réalisées ont convergé quant aux facteurs explicatifs de l'évolution des performances des troupeaux : ainsi, les variables relevant de la composition et des modes de gestion technique du troupeau qui expliquent les performances de la PLS n°2 sont identiques à celles de la PLS n°1 et intègrent en outre des facteurs explicatifs relevant de la composition fine des troupeaux en classes génétiques de croisées. Par conséquent, je ne présenterai ici que les résultats de la PLS n°2.

Les deux premières composantes ont été retenues pour analyser les relations entre variables de performances du troupeau et les variables explicatives ($Q^2 > 0,0975$). Les cinq variables de réponse (*Ev.LaitTroup*, *Ev.TMU*, *Ev.Fertilite*, *Ev.LactSain* et *Ev.L3etc*) sont projetées de façon satisfaisante sur ces deux composantes, *i.e.* en dehors du premier cercle sur la Figure 55 a. La première composante de la PLS oppose l'évolution de la production laitière du troupeau d'une part, et l'évolution de la part de vache de 3ème lactation et plus d'autre part (Figure 55 a). La deuxième composante de la PLS oppose l'évolution de la fertilité du troupeau d'une part et l'évolution de la part de vaches à lactation saine et du taux de matière utile moyen d'autre part (Figure 55 a). La projection des individus sur les composantes (Figure 55 b) montre une distribution peu marquée sur la composante 1 en comparaison de celle sur la composante 2 : cela indique que l'évolution des performances des troupeaux de l'échantillon est bien plus contrastée en ce qui concerne la fertilité, la santé de la mamelle et le TMU qu'elle ne l'est en ce qui concerne la production laitière et la part de vaches en 3ème lactation et plus.

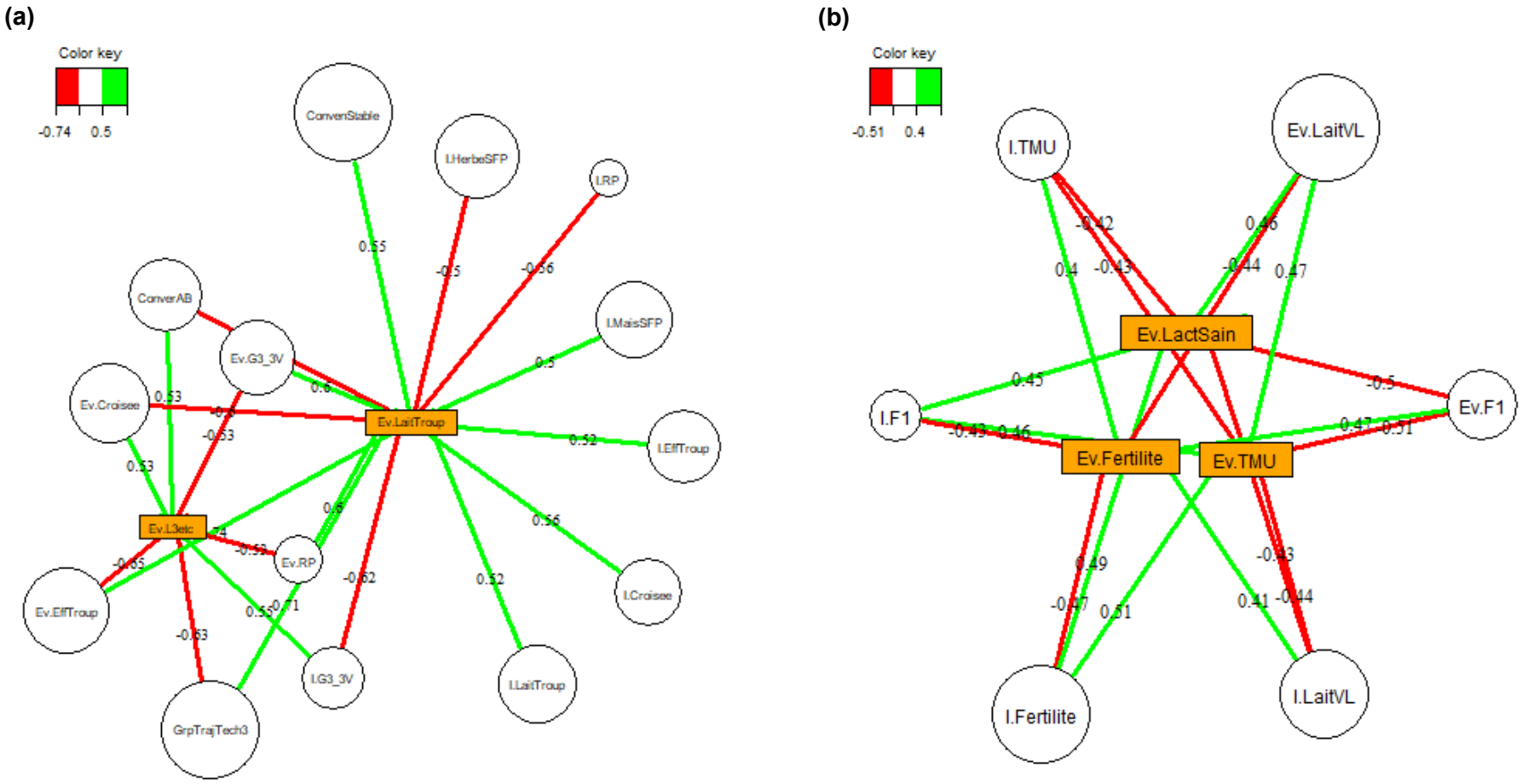


Figure 56 : Résultats de la PLS n°2 : représentations en réseau des coefficients d'association entre les variables de réponse (cercles oranges) et les variables explicatives (rectangles gris) de la composante 1 **(a)** et de la composante 2 **(b)**. Les lignes vertes indiquent une relation positive et les lignes rouges une relation négative. Les valeurs associées aux lignes correspondent au coefficient d'association.

5.3.3.1. Résultats de la composante 1 : associations entre évolution des performances laitière et de longévité et variables explicatives

Pour la composante 1, l'évolution de la production laitière du troupeau (*Ev.LaitTroup*) est associée à 14 variables explicatives (Figure 56 a), dont 8 relatives à la composition du troupeau, 5 à sa gestion technique et 1 à l'état initial de la performance. L'évolution de la part de vaches en 3ème lactation et plus (*Ev.L3etc*) est associée à 7 variables explicatives (Figure 56 a), dont 5 relatives à la composition du troupeau et 2 à sa gestion technique.

L'analyse des coefficients d'association entre l'évolution de la production laitière du troupeau et les variables explicatives montre que l'augmentation de la production laitière du troupeau est associée positivement à des troupeaux qui, à l'état initial, sont de grands troupeaux (+0,52, Figure 56 a) avec une production laitière élevée (+0,52) au sein de fermes en système conventionnel (+0,55), avec un système fourrager avec prédominance du maïs ensilage (+0,50) et à l'inverse, une part des surfaces en herbe faible dans la SFP (-0,50). L'augmentation de la production laitière du troupeau est également associée positivement à l'agrandissement du troupeau (+0,70) et au maintien du système en agriculture conventionnelle (+0,55) et, inversement, négativement associée à sa conversion à l'agriculture biologique au cours de la période d'étude (-0,60) : ainsi la production laitière du troupeau augmente d'autant plus que le système d'élevage reste basé sur un mode de production « conventionnel » et un système fourrager riche en maïs ensilage. L'association forte et positive entre l'augmentation de la production laitière du troupeau et l'appartenance au groupe de trajectoire de transition technique n°3 (+0,71) va aussi dans le même sens : en effet, ces éleveurs ont mis en place le croisement laitier au sein de troupeaux ayant un haut niveau de production laitière, sans effectuer d'autre changement (système fourrager stable, système en agriculture conventionnelle stable) et avec l'objectif de ne pas dégrader la production laitière du troupeau, y compris la productivité laitière par vache. En ce qui concerne les variables explicatives relevant de la composition du troupeau en croisées, l'évolution de la production laitière du troupeau est associée positivement à l'évolution de la part de vaches de race pure dans le troupeau (+0,60) et, à l'inverse, est associée négativement à l'évolution de la part de vaches croisées dans le troupeau(-0,60) : la production laitière du troupeau augmente d'autant moins, voire diminue d'autant plus, que la part de croisées dans le troupeau augmente *i.e.* que la

mise en place du croisement est rapide. L'augmentation de la production laitière du troupeau est également associée positivement à l'augmentation de la part de G_3 de croisement trois voies au cours de la période d'étude (+0,60), et négativement à la part de G_3 de croisement trois voies à l'état initial (-0,62). En effet, les vaches G_3 de croisement trois voies correspondent à des animaux issues d'un accouplement croisé en retour sur la race initiale qui, dans le cas de l'échantillon, correspond très majoritairement la race Holstein (voir Annexe 5.1) : ces vaches bénéficient donc d'un apport de gènes Holstein par la voie mâle à hauteur de 50%, ce qui permet une augmentation du potentiel laitier de ces animaux, en raison de l'orientation de la sélection de la race Holstein. Cependant, les individus des générations de croisement trois voies suivantes (G_4 et plus) sont issus des accouplements croisés à partir de G_3 et bénéficieront d'un apport de gènes par la voie mâle d'une race autre que Holstein, au potentiel laitier vraisemblablement moins élevé. Ainsi, une part de vaches croisées G_3 de croisement trois voies élevée à l'état initial s'interprète comme une diminution de celles-ci au cours de la période d'étude, au profit de vaches de croisement trois voies des générations suivantes au potentiel laitier moindre. La comparaison des valeurs de coefficients d'association entre les variables explicatives et l'évolution de la production laitière met donc en évidence que la mise en place et la gestion du croisement (à travers la variable *Ev.Croisee*) a un effet significatif sur la production laitière du troupeau, qu'elle contribue à réduire (-0,60). Cet effet du croisement est cependant moins fort que celui de pratiques relevant de la gestion démographique du troupeau et de sa taille (+0,70 pour *Ev.EffTroup*) ou de la trajectoire de transition technique du croisement (+0,71 pour *GrpTrajTech3*) et l'absence de changements systémiques associés.

L'analyse des coefficients d'association entre l'évolution de la part de vaches en 3ème lactation et plus dans le troupeau et les variables explicatives montre que l'augmentation de la longévité des vaches du troupeau est associée positivement à des troupeaux dont la taille décroit au cours de la période d'étude (-0,65, Figure 56 a), dont le système a été converti par l'éleveur·euse à l'agriculture biologique (+0,53) ainsi qu'à l'augmentation de la part de croisées dans le troupeau (+0,53) et, à l'inverse, à la diminution de la part de vaches de race pure dans le troupeau au cours de la période d'étude (-0,53) : ainsi, contrairement à la production laitière, la longévité des vaches du troupeau augmente d'autant plus que l'éleveur·euse procède à des changements

systémiques profonds au cours de la période d'étude : conversion à l'agriculture biologique, introduction du croisement sur une grande part du troupeau. Ceci est conforté par l'association élevée et négative entre l'augmentation de la longévité des vaches du troupeau et l'appartenance au groupe de trajectoire de transition technique n°3 (-0,63), laquelle renvoie à la mise en place du croisement sans changement systémique associé. L'augmentation de la longévité des vaches du troupeau est également associée négativement à l'augmentation de la part de G_3 de croisement trois voies au cours de la période 2009-2017 (-0,53), et positivement à la part de G_3 de croisement trois voies à l'état initial (+0,55). En effet, les vaches G_3 de croisement trois voies bénéficient d'un apport de gènes Holstein par la voie mâle à hauteur de 50%, ce qui peut occasionner une diminution de la longévité de ces animaux, en raison de l'orientation de la sélection de la race Holstein. Cependant, les individus des générations suivantes bénéficieront d'un apport de gènes par la voie mâle de races aux aptitudes de longévité vraisemblablement plus élevées. La comparaison des valeurs de coefficients d'association entre les variables explicatives et l'évolution de la longévité des vaches du troupeau met donc en évidence que la mise en place et la gestion du croisement a un effet significatif sur la longévité du troupeau, qu'elle contribue à augmenter (+0,53). La comparaison des valeurs des coefficients d'association montre que l'effet du croisement est aussi fort que celui de changements plus systémiques concomitants à la l'introduction du croisement dans le troupeau, comme la conversion à l'agriculture biologique du système.

5.3.3.2. Résultats de la composante 2 : associations entre évolution des performances de TMU, de fertilité et de santé de la mamelle et variables explicatives

Pour la composante 2, les évolutions du TMU (*Ev.TMU*), de la fertilité (*Ev.Fertilite*) et de la santé du troupeau (*Ev.LactSain*) sont respectivement associées à 6 variables explicatives (Figure 56 b), dont 2 relatives à la composition du troupeau, 2 à sa gestion technique et 2 à l'état initial de performances.

L'évolution du TMU et l'évolution de la part de vaches lactations saines au sein du troupeau sont associées aux mêmes variables explicatives, et avec des coefficients d'association sensiblement identiques. Ainsi, l'augmentation du TMU et celle de la part

de vaches à lactation saine au sein du troupeau sont associées à des troupeaux qui, à l'état initial, avaient des performances de fertilité élevées (respectivement +0,51 et +0,49), des niveaux de productivité laitière par vache faibles (respectivement -0,48 et -0,43) et des performances de TMU faible (respectivement -0,43 et -0,42). Elles sont également positivement associées à l'évolution de la productivité laitière par vache *i.e.* variable *Ev.LaitVL* (respectivement +0,47 et +0,46), laquelle ne prend que des valeurs négatives (voir 1.3.2 et Figure 54 g). Par conséquent, l'augmentation du TMU et celle de la part des vaches à lactation saine du troupeau sont associées non pas à une augmentation de la productivité laitière par vache mais à son maintien. Cela signifie que les troupeaux qui améliorent leurs performances de TMU et de santé de la mamelle sont ceux qui ont en 2009, de « bonnes » performances initiales de fertilité (part des vaches avec de bonnes performances de fertilité dans le troupeau > 64%) et une productivité laitière par vache modérée (< 8000 kg lait/VL) et/ou une productivité laitière par vache qui diminue au cours de la période d'étude. Autrement dit, il s'agit des troupeaux d'éleveur·euse·s qui ont consenti avant la période d'étude à une productivité laitière modérée et/ou consentent à sa diminution au cours de la période d'étude. A l'inverse, les troupeaux qui dégradent leurs performances de TMU et de santé de la mamelle sont ceux qui, à l'état initial, avaient une productivité laitière par vache élevée (> 8000 kg lait/VL) associée à des performances de fertilité des vaches dégradées (part des vaches avec de bonnes performances de fertilité dans le troupeau < 64%), et qui maintiennent ce niveau de productivité laitière entre 2009 et 2017 ; il s'agit donc de troupeaux d'éleveurs qui ne consentent pas à une réduction de la productivité laitière par vache. En ce qui concerne les variables explicatives relevant de la composition du troupeau en croisées, l'augmentation du TMU et celle de la part de vaches à lactation saine du troupeau sont associées à des troupeaux qui ont une part de vaches F_1 à l'état initial élevée (variable *I.F1*, respectivement +0.46 et +0,45) et, à l'inverse, à des troupeaux dont la part de vaches F_1 dans le troupeau diminue au cours de la période d'étude (variable *Ev.F1*, respectivement -0,54 et -0,48). Comme les vaches F_1 sont la première classe génétique de vaches obtenues par la mise en place du croisement, une valeur élevée d'*I.F1* correspond à un troupeau qui a mis en place le croisement avant la période d'étude, et qui va donc voir la part de vaches croisées de générations suivantes augmenter, et par conséquent la part relative de vaches F_1 diminuer au cours de la période d'étude.

L'augmentation de la fertilité du troupeau est quant à elle positivement associée à des troupeaux qui avaient à l'état initial des performances de fertilité des vaches dégradées (-0,47), des performances de TMU élevée (+0,40), une productivité laitière des vaches élevée (+0,41) et qui diminue ensuite au cours de la période d'étude (-0,41). Il s'agit donc de troupeaux d'éleveur·euse·s qui consentent à une diminution du niveau de productivité laitière de leurs vaches entre 2009 et 2017. A l'inverse, la fertilité du troupeau augmente d'autant moins – se maintient – pour les troupeaux ayant en 2009 des vaches fertiles et peu productives, et dont le niveau de productivité laitière se maintient jusqu'en 2017. Il s'agit donc de troupeaux d'éleveur·euse·s qui consentent à une diminution du niveau de productivité laitière par vache au cours de la période d'étude. En ce qui concerne les variables explicatives relevant de la composition du troupeau en croisées, la fertilité du troupeau est associée à des troupeaux qui ont une part de vaches F_1 à l'état initial faible (-0,43) et, à l'inverse, à des troupeaux dont la part de vaches F_1 dans le troupeau augmente entre 2009 et 2017 (+0,47).

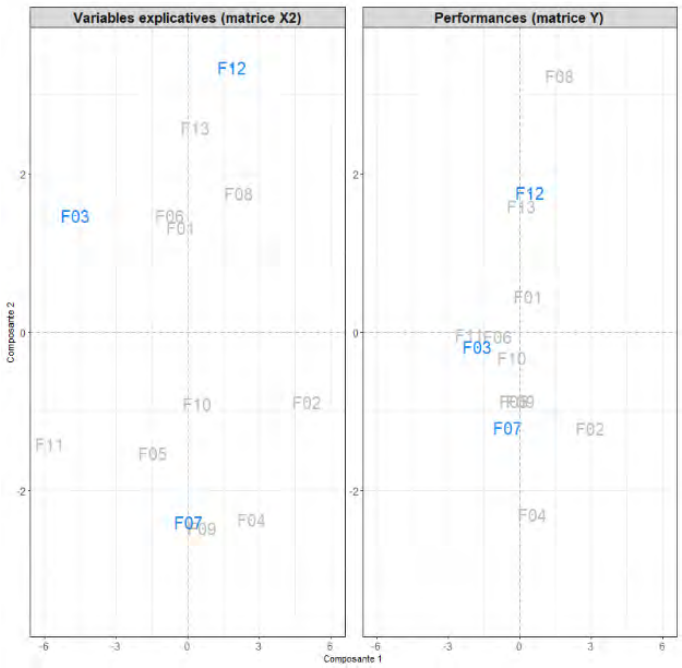


Figure 57 : Résultats de la PLS n°2 et projection projection de trois indvidus sur les 2 composantes retenues selon les variables explicatives (à gauche) ou de réponse (à droite) : F03, F07 et F12

	Variable	*Valeur de la variable pour l'individu (comparaison à la moyenne de l'échantillon)*			*Moyenne échantillon*
		F03	**F07**	**F12**	
Composante 1	**Ev.LaitTroup (kg/an)**	**+ 40 302 (>)**	**+ 218 (<)**	**- 12 313 (<)**	**+ 1770**
	Ev.L3etc (%/an)	**- 0,4 (<)**	**- 0,8 (<)**	**+ 0,4 (=)**	**+ 0,6**
	I.LaitTroup (kg)	838 338 (>)	337 725 (<)	355 456 (<)	425 208
	I.EffTroup (VL)	85 (>)	48 (<)	39 (<)	50
	I.Croisee (%)	0 (<)	18 (>)	0 (<)	8
	I.MaisSFP (%)	84 (>)	8 (>)	0 (=)	0
	Ev.EffTroup (VL/an)	+ 7 (>)	+ 2 (=)	+ 1 (<)	+ 2
	Ev.Croisee (%/an)	+ 3 (<)	+ 5 (<)	+ 5 (<)	+ 7
	Ev.G3_3V (%/an)	+ 1 (=)	0 (<)	0 (<)	+ 1
	Système d'élevage	Conventionnel stable	AB stable	Conversion AB	Conventionnel stable (5/13) AB stable (3/13) Conversion AB (5/13)
	Groupe de trajectoire technique	GrpTrajTech3	GrpTrajTech2	GrpTrajTech2	GrpTrajTech1 (3/13) GrpTrajTech2 (7/13) GrpTrajTech3 (3/13)
Composante 2	**Ev.TMU (g/kg/VL/an)**	**+ 0,3 (>)**	**+ 0,5 (>)**	**- 0,3 (<)**	**+ 0,1**
	Ev.LactSain (%/an)	**- 0,3 (<)**	**+ 1,5 (>)**	**- 1,0 (<)**	**- 0,1**
	Ev.Fertilite (%/an)	**+ 2 (=)**	**+ 1 (<)**	**+4 (>)**	**+ 2**
	I.LaitVL (kg/VL)	9 764 (<)	6 948 (<)	9 100 (>)	8 220
	I.TMU (g/kg/VL)	67,9 (<)	67,5 (<)	74,3 (>)	70,8
	I.Fertilite (%)	40 (<)	73 (>)	40 (<)	60
	Ev.LaitVL (kg/VL/an)	-177 (>)	-184 (>)	-404 (<)	- 207
	Ev.F1 (%/an)	+ 6 (<)	- 3 (<)	+12 (>)	+ 8

Tableau 19 : comparaison des troupeaux selon l'évolution de leurs performances zootechniques (variable en gras) en comparaison de la moyenne de l'échantillon. Les variables explicatives sont présentées par composantes.

5.3.4. Analyse de la projection d'individus caractéristiques sur les composantes de la PLS : description de l'évolution des performances et des systèmes

L'analyse de la projection des individus sur les composantes de la PLS n°2 permet d'illustrer les tendances d'évolution des performances zootechniques (projection selon le bloc Y, Figure 55 b) et des variables explicatives (projection selon le bloc X, Figure 55 b) décrites précédemment. Les individus F03, F07 et F12 en constituent des exemples caractéristiques. L'individu F03 est projeté à gauche sur la composante 1 et est au milieu sur la composante 2 sur le plan des Y (Figure 57). L'individu F07 est projeté au milieu sur la composante 1 et projeté vers le bas sur la composante 2 sur le plan des Y. L'individu F12 est légèrement décentré à droite sur la composante 1 et projeté vers le haut sur la composante 2 sur le plan des Y. L'évolution des performances zootechniques de ces trois troupeaux est ainsi décrite et comparée aux valeurs moyennes d'évolution des performances observées dans l'échantillon (Figure 57)

L'individu F03 se caractérise par une augmentation de la production laitière du troupeau très supérieure à la moyenne de l'échantillon (*Ev.LaitTroup* = +40 302 *vs.* +1 770 kg/an) au cours de la période 2009-2017 associée à une diminution de la longévité des vaches du troupeau opposée à la tendance moyenne de l'échantillon (*Ev.L3etc* = - 0,4 *vs.* +0,6%/an). De plus, l'individu F03 présente des évolutions peu différentes des moyennes de l'échantillon pour les performances de TMU (*Ev.TMU* = +0,3 *vs.* +0,1 g/kg/VL/an), de santé de la mamelle (*Ev.LactSain* = -0,3 *vs.* -0,1 %/an) et de fertilité (*Ev.Fertilite* = +2 *vs.* +2 %/an) du troupeau. A l'état initial, F03 était, en comparaison de la moyenne de l'échantillon, un grand troupeau (*I.EffTroup* = 85 *vs.* 50 VL) avec une production laitière totale importante (*I.LaitTroup* = 838 338 *vs.* 425208 kg) et un niveau de productivité laitière par vache élevé (*I.LaitVL* = 9 764 *vs.* 8 220 kg/VL), au sein d'un système conduit en agriculture conventionnelle. Les performances de fertilité (*I.Fertilite* = 40 *vs.* 60% du troupeau avec un IVIAF ≤ 117 jours) ainsi que de TMU (*I.TMU* = 67,9 *vs.* 70,8 g/kg/VL) du troupeau en Holstein pure (*I.Croisee* = 0%) étaient initialement faibles. Au cours de la période 2009-2017, le croisement a été introduit dans F03 à un rythme faible (*Ev.Croisee* = +3 *vs.* +7 %/an), sans procéder à d'autres changements sur le système (*Conventionnel stable*), mais en augmentant très fortement la taille du troupeau (*Ev.EffTroup* = +7 *vs.* +2 VL/an) : ce faisant, il a compensé la perte de productivité laitière liée aux vaches croisées du troupeau

(*Ev.LaitVL* = - 177 kg/VL/an) et a augmenté la production de lait totale du troupeau (*Ev.LaitTroup* = +40 302 kg/an *vs.* +1 770 kg/an). L'augmentation de la taille du troupeau a été rendue possible par l'augmentation de la fertilité du troupeau (*Ev.Fertilite* = +2%/an), qui a elle-même permis d'appliquer un taux de renouvellement élevé, conduisant à un rajeunissement du troupeau (*Ev.L3etc* = -0,4 *vs.* +0,3%/an).

L'individu F07 se caractérise par un maintien – *i.e.* une très faible augmentation – de la production laitière du troupeau (*Ev.LaitTroup* = +218 *vs.* +1 770 kg/an), une augmentation supérieure à la moyenne de l'échantillon du TMU (*Ev.TMU* = +0,5 *vs.* +0,1 g/kg/VL/an) et de la santé de la mamelle (*Ev.LactSain* = +1,5 *vs.* -0,1 %/an) et, à l'inverse, une moindre amélioration de la fertilité du troupeau (*Ev.Fertilite* = +1,0 *vs.* +1,8 %/an). A l'état initial en 2009, F07 a un troupeau de taille moyenne (*I.EffTroup* = 48 *vs.* 50 VL) relativement peu productif par rapport à la moyenne de l'échantillon (*I.LaitTroup* = 337 725 kg *vs.* 425 208 kg et *I.LaitVL* = 6 948 *vs.* 8 220 kg/VL) et au sein duquel la part de vaches croisées est élevée (*I.Croisee* = 18% *vs.* 8%). L'introduction du croisement a eu lieu avant 2009 pour adapter les animaux à une conversion à l'agriculture biologique du système (AB stable) et à une transition vers un système fourrager très herbager. En 2009, les performances de fertilité du troupeau étaient élevées (*I.Fertilite* = 73 *vs.* 60% du troupeau avec un IVIAF ≤ 117 jours), en lien avec la part élevée de vaches croisées; en revanche, les performances de TMU étaient relativement faibles (*I.TMU* = 67,5 *vs.* 70,8 g/kg/VL). Au cours de la période 2009-2017, F07 a poursuivi la gestion du croisement a un rythme modéré (*Ev.Croisee* = +5 *vs.* +7 %/an) en remplaçant les F_1 par des croisées de générations suivantes (*Ev.F1* = -3 *vs.* +8 %/an), sans procéder à d'autres changements sur le système (AB stable) et en augmentant faiblement l'effectif du troupeau (*Ev.EffTroup* = +2 *vs.* +2 VL/an) : ce faisant, la perte de productivité laitière liée à l'augmentation de la part de vaches croisées dans le troupeau (*Ev.LaitVL* = - 184 kg/VL/an) s'est répercutée sur sa production totale, mais a été dans ce cas faiblement compensée par l'augmentation modérée de sa taille (*Ev.LaitTroup* = +218 kg/an *vs.* +1 770 kg/an). L'augmentation de la fertilité du troupeau est modérée comparée à la moyenne (*Ev.Fertilite* = +1 *vs.* +2%/an) en lien avec le remplacement des F_1 par les croisées de générations suivantes. Les performances de TMU (*Ev.TMU* = + 0,5 *vs.* +0,1 g/kg/VL/an) et de santé de la mamelle (*Ev.LactSain* = +1,5 *vs.* -0,1 %/an) ont quant à elles fortement augmenté. L'individu F07 est un exemple de système ayant procédé à des change-

-ments profonds avant la période d'étude 2009-2017 (agriculture biologique, système herbager, croisement) et dont les conséquences sur l'évolution des performances zootechniques du troupeau pendant la période d'étude sont « atténuées ». Ainsi, l'introduction du croisement et la conversion à l'agriculture biologique avant 2009 ont occasionné une chute de production laitière, amortie par l'augmentation de l'effectif du troupeau : l'éleveur·euse a souhaité maintenir un niveau global de production laitière pour son troupeau. Les performances de fertilité ont augmenté, mais la fertilité du troupeau F07 était déjà élevée avant 2009 (*I.Fertilite* = 73% *vs. 6*0%), en lien avec l'introduction du croisement dans les troupeaux avant 2009 et donc une part de F_1 initialement élevée au sein du troupeau. Par conséquent, au cours de la période 2009-2017, le bénéfice « immédiat » du croisement sur les performances de fertilité du troupeau s'est « estompé » pour F07 (*Ev.Fertilite* = +1% *vs.* +2%/an) en lien avec la diminution de la part de F_1 au sein du troupeau (*Ev.F1* = -3%/an *vs.* +8%/an). L'augmentation du TMU (*Ev.TMU* = +0,5 *vs.* +0,1 g/kg/VL/an) et de la santé de la mamelle (*Ev.LactSain* = +1,5 *vs.* -0,1 %/an) du troupeau peut s'interpréter comme une conséquence de l'apparition des animaux de génération *post*-F_1 dans le troupeau (*Ev.F1* = -3%/an *vs.* +8%/an) et d'une conduite alimentaire et/ou du système fourrager stabilisée au cours de la période d'étude (*AB stable*).

L'individu F12 se caractérise par une forte dégradation de la production laitière du troupeau comparée à la moyenne de l'échantillon (*Ev.LaitTroup* = -12 313 *vs.* +1 770 kg/an), une dégradation importante du TMU (*Ev.TMU* = -0,3 *vs.* +0,1 g/kg/VL/an) et de la santé de la mamelle (*Ev.LactSain* = -1,0 *vs.* -0,1%/an) et une amélioration importante de la fertilité du troupeau (*Ev.Fertilite* = +4,2 *vs.* +1,7 %/an). A l'état initial, F12 est un petit troupeau (*I.EffTroup* = 39 *vs.* 50 VL) avec une productivité laitière par vache élevée (*I.LaitVL* = 9 100 kg *vs.* 8 220 kg) exclusivement composé de vaches de race pure Holstein (*I.Croisee* = 0% *vs.* 8%). Initialement, les performances de fertilité du troupeau étaient faibles (*I.Fertilite* = 40 *vs.* 60% du troupeau avec un IVIAF ≤ 117 jours) et les performances de TMU relativement élevées (*I.TMU* = 74,3 *vs.* 70,8 g/kg/VL), en lien avec l'intensivité de la conduite alimentaire (*I.MaisSFP* = 84 *vs.* 0%). Au cours de la période 2009-2017, le croisement a été introduit dans F12 à un rythme modéré (*Ev.Croisee* = +5 *vs.* +7 %/an) pour améliorer les performances de fertilité du troupeau. En parallèle F12 a été également converti à l'agriculture biologique (*Conversion AB*), a procédé à l'arrêt du maïs grain dans l'alimentation de son troupeau

en 2013 et a augmenté de façon modérée l'effectif du troupeau (*Ev.EffTroup* = +1 *vs.* +2 VL/an). La perte de productivité laitière par vache a été importante (*Ev.LaitVL* = -407 vs. – 207 kg/VL/an) et s'est répercutée sur la production laitière totale du troupeau (*Ev.LaitTroup* = - 12 313 kg/an *vs.* +1 770 kg/an). La fertilité du troupeau a fortement augmenté comparé à la moyenne (*Ev.Fertilite* = +4 *vs.* +2%/an), mais les performances de TMU (*Ev.TMU* = -0,3 *vs.* +0,1 g/kg/VL/an) et de santé de la mamelle (*Ev.LactSain* = -1,0 *vs.* -0,1 %/an) ont quant à elles fortement diminué, vraisemblablement en raison du changement de conduite liée à la conversion à l'agriculture biologique. L'individu F12 est un exemple de système ayant procédé à des changements profonds au cours de la période d'étude 2009-2017 (conversion à l'agriculture biologique, croisement, arrêt du maïs grain). Les conséquences de ces changements sur l'évolution des performances zootechniques du troupeau pendant la période d'étude sont très marquées : l'introduction du croisement et la conversion à l'agriculture biologique au cours de la période d'étude ont occasionné une chute de production laitière, qui n'a pas été compensée par l'augmentation de la taille du troupeau, du moins pas encore : la perte de production laitière est « consentie » par l'éleveur·euse car l'objectif est autre. La fertilité du troupeau, initialement faible et qui a motivé la mise en place du croisement, a augmenté très fortement (*Ev.Fertilite* = +4 *vs.* +2%/an). La dégradation des performances de TMU (*Ev.TMU* = -0,3 *vs.* +0,1 g/kg/VL/an) et de la santé de la mamelle (*Ev.LactSain* = -1,0 *vs.* -0,1%/an) sont liées à la transition alimentaire opérée au cours de la période d'étude et au fait que F12 est peu avancé dans le croisement et qu'il y a peu de vaches croisées *post*-F_1 (*Ev.F1* = +12%/an).

5.4. Discussion

5.4.1. Le croisement rotatif contribue à l'amélioration des performances zootechniques du troupeau

Tout d'abord, nos résultats ont montré des tendances d'évolution des performances zootechniques au sein des troupeaux échantillonnés qui diffèrent selon la performance zootechnique considérée. Ainsi, les performances de fertilité se sont améliorées dans tous les troupeaux échantillonnés au cours de la période où a été mis en place et géré le croisement, amélioration qui constitue une des motivations déclarées par les

éleveur·euse·s d'adopter le croisement laitier (Weigel et Barlass, 2010; Buckley et al., 2014; Magne et al., 2020 ; Magne et Quénon, accepté). A l'inverse, la productivité laitière moyenne des vaches a diminué dans tous les troupeaux, mais sans que la production totale du troupeau diminue nécessairement. Basés sur les données de troupeaux au sein de fermes « commerciales », ces résultats confortent ceux obtenus à l'échelle de l'animal (Dezetter et al., 2019) et ceux obtenus par modélisation et simulation de troupeaux croisés ou transition vers le croisement (Dezetter et al., 2017; Clasen et al., 2020). En revanche, les tendances d'évolution des performances de longévité, de taux de matières utiles et de santé de la mamelle des vaches sont plus contrastées au sein des troupeaux de notre échantillon que ce que l'on retrouve dans ces études. Ensuite, nos résultats montrent que l'effet du croisement rotatif constitue un facteur explicatif dont le poids relatif varie selon la performance zootechnique considérée : il est prépondérant dans l'évolution des performances de fertilité, de TMU et de santé de la mamelle et il est élevé mais non prépondérant dans l'évolution de la production laitière et de la longévité du troupeau, ou d'autres facteurs ont un poids relatif supérieur (*e.g.*, évolution de l'effectif du troupeau). Cela souligne que le croisement rotatif a un effet significatif sur l'évolution des performances zootechniques des troupeaux, mais qu'il ne constitue qu'un facteur explicatif parmi d'autres qui relèvent de pratiques d'élevage plus systémiques ou de la situation initiale des performances du troupeau. Ainsi, si la mise en place et la gestion du croisement dans les troupeaux de l'échantillon s'accompagne d'une augmentation de la production laitière totale des troupeaux c'est avant tout via l'augmentation des effectifs de vaches laitières pour compenser des pertes de productivité laitière par vache liée au croisement. Il ressort que moins il y a de changement dans le niveau d'intensivité du système et plus le croisement est introduit à la marge dans le troupeau d'une part, plus la production laitière du troupeau augmente ou se maintient d'autre part. Cela suggère que le croisement constitue un levier de gestion du système bovin lait et de ses performances qui permet de générer des animaux qui, en dépit d'une plus faible productivité, répondent à d'autres objectifs visés par l'éleveur·euse (*e.g.*, fertilité) et sont donc conservées dans le troupeau par celui/celle-ci. De ce fait, la longévité des vaches croisées dans le troupeau est supérieure, ce que plusieurs travaux sur le croisement ont également mis en évidence, mais à l'échelle de l'animal et sur la base des performances potentielles – valeurs d'hétérosis pour des traits de longévité –

(Jönsson, 2015; Clasen et al., 2017) et de leurs conséquences économiques sur la carrière totale des vaches (Lopez-Villalobos et al., 2000; Heins et al., 2012).

L'état initial des pratiques et leur évolution rend compte d'une diversité des modes de gestion adaptative des conséquences de l'introduction et de la gestion du croisement au sein du troupeau sur l'évolution de sa multi-performance (augmentation de la fertilité du troupeau, diminution de la productivité laitière des vaches du troupeau). Ces modes de gestion adaptative diffèrent en fonction des compromis entre performances que font les éleveur·euse·s et donc en fonction des objectifs qu'ils/elles poursuivent et affectent au troupeau. Ces modes de gestion adaptative mettent ainsi en jeu des combinaisons de pratiques cohérentes visant à mettre en œuvre les compromis entre performances du troupeau au cours de la transition technique vers le croisement. Pour les éleveur·euse·s qui cherchent à maintenir et/ou augmenter la production laitière du troupeau, la gestion adaptative consiste à maintenir le système d'élevage inchangé et/ou à introduire le croisement afin d'exploiter l'amélioration de la fertilité du troupeau permise par les vaches croisées F_1 pour augmenter l'effectif du troupeau et donc sa production laitière totale, compensant ainsi la perte de productivité laitière par vache. Pour les éleveur·euse·s qui cherchent à améliorer en priorité la fertilité du troupeau pour adapter les animaux à un changement de système vers une conduite plus extensive (conversion à l'agriculture biologique, passage à un système herbager) et qui acceptent que la production laitière du troupeau diminue, la gestion adaptative consiste à introduire le croisement rapidement pour engendrer des animaux adaptés aux changements du système d'élevage. Ces éleveur·euse·s compensent la perte économique liée à la diminution de production laitière du troupeau par un prix du lait supérieur lié à la conduite en agriculture biologique (FranceAgriMer, 2016b) ou aux bonus liés aux taux de matière du lait supérieurs (Courleux et Gaudoin, 2018).

Nos résultats obtenus supportent ainsi l'idée que le croisement laitier constitue une pratique dont les bénéfices sur la multi-performance des troupeaux tiennent moins des objectifs et du niveau d'intensité du système que de la cohérence globale des modes de gestion. En considérant les performances phénotypiques des troupeaux, ils rejoignent ceux de Kargo et al. (2012) qui attestent de l'intérêt économique du croisement – à travers la valeur d'hétérosis pour les traits de production laitière – quel que soit le niveau d'intensité du système, et ceux de Clasen et al. (2020) qui concluent à l'intérêt économique du croisement en système d'élevage en agriculture biologique

comme en agriculture conventionnelle. Nos résultats mettent également en évidence que les contraintes de modélisation adoptées par Dezetter et al. (2017) ou Clasen et al. (2020) imposant un effectif de troupeau constant au cours de la période de simulation constitue un biais méthodologique dans la mesure où il ne rend pas compte des stratégies mises en place par les éleveur·euse·s souhaitant pallier à la baisse de productivité laitière des vaches croisées.

5.4.2. Le croisement rotatif améliore les performances zootechniques du troupeau différemment selon le stade d'avancement dans la pratique du croisement

Nos résultats mettent en évidence un effet du croisement sur les performances zootechniques qui s'inscrit dans le temps, plus précisément qui s'inscrit différemment selon les générations de croisement. Ainsi, l'introduction du croisement qui a pour effet de substituer des vaches F_1 aux vaches RP du troupeau, génère un gain immédiat de fertilité à l'échelle du troupeau : cela met en évidence empiriquement la dégradation des performances de fertilité en race Holstein liée à l'orientation de la sélection jusqu'aux années 2000's (Lucy, 2001) ; ce gain de fertilité relatif s'estompe ensuite pour les générations *post*-F_1, ce qui confirme nos résultats du chapitre 4 qui mettaient en évidence une durée de l'IVIAF des vaches F_1 significativement inférieure à celle des HO et ne mettaient pas en évidence de différence significative entre la durée de l'IVIAF de vaches F_1 et de vaches G_2 de croisement trois voies. Si Dezetter et al. (2019) montrent également un gain de fertilité (diminution du nombre d'IA par vache nécessaire à la fécondation) marqué entre la conduite en race pure et l'apparition de F_1 au sein du troupeau, l'effet des vaches de programme de croisement trois voies de générations *post*-F_1 (G_2 et générations suivantes) reste important au sein des troupeaux avec prévalence faible des problèmes de fertilité.

Le gain de TMU des vaches du troupeau n'est pas observé au cours du passage de vaches RP à des vaches F_1, mais pour les générations post-F_1. Ces résultats rejoignent ceux de Dezetter et al. (2017) qui mettaient en évidence un gain de taux butyreux et protéique liés à l'apparition dans le troupeau de vaches G_2 de croisement trois voies (programmes HO x Montbéliarde x Normande et HO x Montbéliarde x Rouge scandinave) supérieur à celui des troupeaux conduit en croisement deux voies.

Ces résultats convergent également ceux présentés dans le chapitre 4 comparant les taux butyreux et protéique entre F_1 et G_2 de croisement trois voies et qui concluaient à des valeurs significativement supérieures pour les G_2. Par conséquent, l'augmentation du TMU et celle de la part de vaches à lactation saine du troupeau apparaissent comme des performances qui ne sont pas améliorées dès l'introduction du croisement, mais progressivement avec l'apparition dans le troupeau des générations de croisement *post*-F_1 (G_2, G_3, *etc.*).

Enfin, nos résultats montrent que, si l'effet global de la mise en place et de la pratique du croisement dégrade effectivement la production laitière du troupeau, cet effet diffère selon le stade d'avancement dans la gestion du croisement auxquels se situent les troupeaux à l'état initial. Ainsi, un troupeau initialement peu avancé dans la gestion du croisement (*i.e.* qui n'a pas de G3_3V à l'état initial) et dont le pourcentage de G3_3V augmente au cours de la période d'étude verra sa production laitière augmenter davantage par rapport à un troupeau plus avancé dans la gestion du croisement (*i.e.* avec des G3_3V à l'état initial). Ainsi, la gestion de programmes de croisement rotatif trois voies à partir de race pure HO permet de générer régulièrement – *i.e.* à chaque croisement de retour – des vaches au potentiel laitier élevé. Si ces résultats semblent cohérents avec l'orientation laitière des programmes de sélection en race HO et les propriétés théoriques du croisement trois voies (*i.e.* part de gènes mâles issus de la race HO utilisée en retour, Dezetter et al. (2019)), leur mise en évidence n'a, à notre connaissance, été faite ni par simulation, ni sur la base de données empiriques avant notre étude.

Nos résultats montrent également qu'améliorer conjointement les cinq performances zootechniques du troupeau n'est pas possible dans le même laps de temps : l'augmentation de la production laitière du troupeau est opposée à l'augmentation de la longévité des vaches qui le constituent, et l'augmentation de la fertilité du troupeau est opposée à l'augmentation du TMU et de la part de vaches à lactation saine du troupeau. Nos résultats illustrent ainsi les conséquences à l'échelle du troupeau bovin laitier de la diversité de profils individuels de *trade-offs* (Blanc et al., 2013; Ollion et al., 2016), et donc les conséquences des corrélations génétiques négatives entre production laitière et traits fonctionnels (Pryce et Veerkamp, 2001). Ce faisant, ils montrent que l'évolution de la multi-performance du troupeau est contrainte par la diversité des éléments biotechniques – performance (*i.e.* phénotype) et génotype – qui

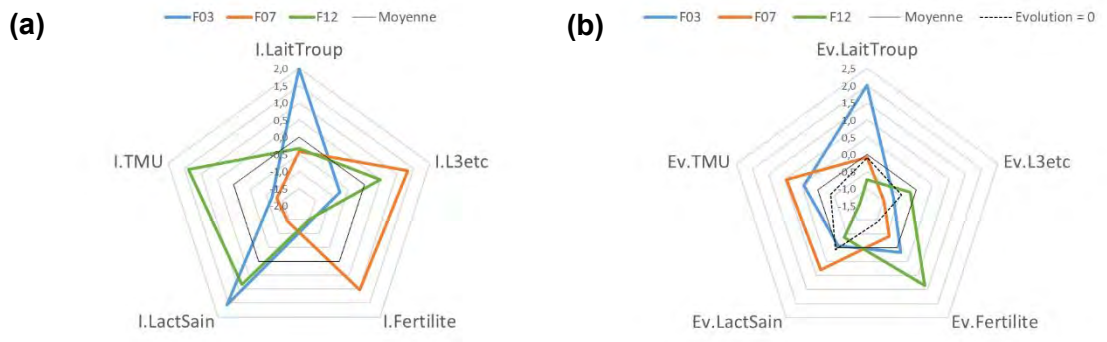


Figure 58 : Représentation de la situation initiale **(a)** et de l'évolution au cours de la période d'étude **(b)** de la multi-performance de trois troupeaux de l'échantillon (variables centrées réduites). La situation initiale de la multi-performance des trois troupeaux F03, F07 et F12 est comparée à la multi-performance moyenne des 13 troupeaux de l'échantillon. L'évolution de la multi-performance des troupeaux F03, F07 et F12 est comparée à l'évolution moyenne de la multi-performance des 13 troupeaux de l'échantillon (trait noir plein) et à une situation de maintien des performances (Ev.Performance = 0) au cours de la période d'étude (trait noir en tirets).

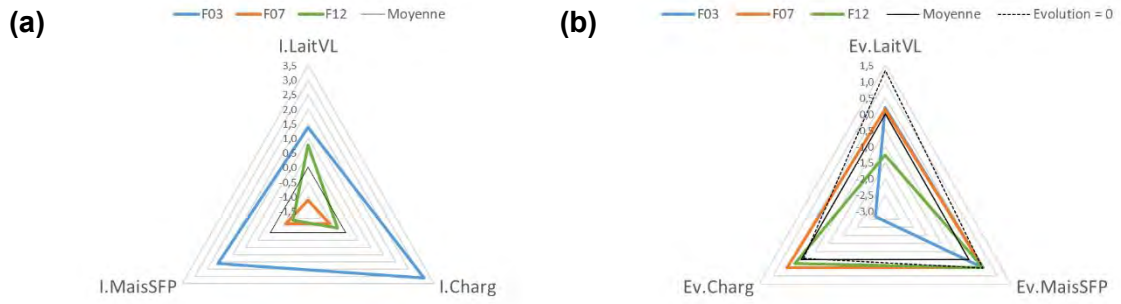


Figure 59 : Représentation de la situation initiale **(a)** et de l'évolution au cours de la période d'étude **(b)** de trois variables rendant compte du niveau d'intensification du système d'élevage des trois troupeaux de l'échantillon (variables centrées réduites). La situation initiale de la gestion technique des trois troupeaux F03, F07 et F12 est comparée à la gestion technique des troupeaux moyenne des 13 troupeaux de l'échantillon. L'évolution de la gestion technique des troupeaux F03, F07 et F12 est comparée à l'évolution moyenne de la gestion technique des 13 troupeaux de l'échantillon (trait noir plein) et à une situation de maintien des variables de gestion technique des troupeaux (Ev.Variable = 0) au cours de la période d'étude (trait noir en tirets).

relèvent des niveaux d'organisation inférieurs constitutifs du troupeau – animal et gène (Magne et al., 2019) – et que les éleveur·euse·s doivent gérer pour en tirer profit (Tichit et al., 2011; Magne et al., 2016). Ce choix de priorisation différentielle est éminemment lié à la situation initiale des performances zootechniques et donc de la situation initiale de la multi-performance du troupeau car cette dernière reflète « la marge de manœuvre » dont dispose l'éleveur·euse pour arbitrer ce choix. Nos résultats, comme ceux de Dezetter et al. (2017), soulignent le rôle majeur que joue la situation initiale d'une performance zootechnique donnée sur son évolution suite à la mise en place du croisement dans le troupeau, et la différence de cet effet de l'état initial selon la performance considérée. Ainsi, ce sont les troupeaux qui avaient à l'état initial la plus grande production laitière totale pour lesquelles celle-ci a le plus augmenté (*e.g.,* troupeau F03 Figure 58) ; inversement, pour le TMU, la santé de la mamelle et la fertilité, ce sont les troupeaux qui présentaient la situation la plus dégradée initialement pour ces performances qui les ont le plus améliorées (*e.g.* troupeaux F07 et F12, Figure 58).

5.4.3. Retours sur la méthode

5.4.3.1. Une méthode d'analyse intégrative prometteuse

La méthode adaptée de Martin et al. (2017) employée dans cette étude a permis d'analyser l'effet du croisement sur l'évolution des performances zootechniques du troupeau selon une approche holistique : en ne se limitant pas uniquement à l'analyse des facteurs explicatifs relevant *stricto sensu* de la pratique du croisement mais en intégrant au contraire des facteurs explicatifs relevant de multiples pratiques d'élevage – gestion du troupeau, du système fourrager, de l'intensivité de la production, *etc.* –. Ce faisant, elle permet de rendre compte de modes de gestion complexes et diversifiés concomitants à la mise en place du croisement par les éleveur·euse·s, lesquels combinent l'ensemble de ces pratiques (y compris de croisement) pour gérer de manière adaptative leur système pour assurer leur cohérence avec leurs objectifs. De plus, l'emploi de cette méthode permet de tenir compte de l'état initial des situations d'élevage, laquelle conditionne l'évolution des performances du troupeau : elle présente donc un intérêt pour l'analyse des données de troupeaux croisés au sein de

fermes « commerciales », pour lesquelles la comparaison dynamique à des systèmes homologues conduits en race pure n'est pas possible, à la différence de données issues de systèmes expérimentaux (Shonka-Martin et al., 2018) ou de résultats de simulation (Dezetter et al., 2017).

5.4.3.2. Les limites de la méthode

L'utilisation de cette méthode aurait gagné à intégrer comme performances zootechniques à expliquer des indicateurs de l'état sanitaire du troupeau, de la mortalité ou mortinatalité afin de proposer une évaluation plus complète de la multi-performance des troupeaux, telle que proposée par Dezetter et al. (2017). De même, des travaux sur le croisement laitier ont montré qu'un des bénéfices du croisement consistait en l'amélioration de l'efficience alimentaire (définie comme le rapport entre la quantité de produit et la quantité d'intrants alimentaires consommés) à l'échelle de l'animal (Shonka-Martin et al., 2019) et du troupeau (Dezetter et al., 2019). De plus, nous discutons dans cette étude de l'évolution de la multi-performance de troupeaux sur la base de cinq indicateurs quantitatif de performances zootechniques. Cela permet d'expliciter les tensions qui existent entre l'augmentation conjointe de ces performances et leurs facteurs explicatifs et ainsi de rendre compte de l'existence de multiples « optimums » de multi-performance en fonction des objectifs et des compromis de l'éleveur·euse. A l'inverse, l'usage d'indicateurs quantitatifs agrégés – généralement économiques (Dezetter et al., 2017; Clasen et al., 2020; McClearn et al., 2020b) – permet une évaluation plus univoque, ou à défaut plus synthétique des conséquences de l'introduction et de la mise en place du croisement sur les performances du troupeau. Si l'usage d'indicateurs économiques présentent un intérêt certain pour de telles évaluations multicritères, l'intérêt de l'emploi d'autres indicateurs agrégés a été démontré pour évaluer les bénéfices d'une pratique ou d'un changement technique en général : quantification et qualification du travail (Cournut et al., 2018), évolution de la satisfaction retirée par l'éleveur·euse (Perrin et al., 2020), *etc.* D'autre part, nous n'avons pas pu obtenir des informations nous permettant d'intégrer comme facteurs – potentiellement – explicatifs de l'évolution des performances zootechniques l'état initial et l'évolution des pratiques alimentaires (*e.g.* quantité de concentrés distribuée par vache, quantité d'ensilage de maïs distribuée par vache). De telles

données auraient permis de relier plus rigoureusement le niveau d'intensification de la gestion de l'alimentation du troupeau et ses conséquences potentielles sur les performances laitières qualitatives et quantitatives mais également sur les troubles sanitaires (*e.g.* acidose et cétose).

Nos résultats pâtissent en outre d'un échantillon de taille limitée, liée au nombre restreint de troupeaux étudiés in fine sur la cohorte des 26 fermes échantillonnées au départ ; toutes les fermes d'étant pas adhérentes au contrôle laitier d'une part et pour celles qui adhèrent sur l'entièreté de la période, il manquait des données de reproduction avant 2009 dans les bases de données issues du Contrôle Laitier. Du fait de la faible durée de la période d'étude, le recours à des régressions linéaires pour modéliser l'évolution des variables explicatives et à expliquer peut s'avérer inadéquat si l'on considère des variables qui vont présenter un sens de variation variable au cours de la période d'étude. C'est particulièrement vrai dans le cas de l'évolution de la part de vaches d'une génération donnée de croisement qui, par nature, est amenée à croître dans un premier temps avant de diminuer dans un second temps car remplacée par les vaches de la génération de croisement suivante. De plus, la durée réduite de la période d'étude nous a contraint à combiner approches synchronique et diachronique pour analyser l'évolution des performances des troupeaux et les facteurs qui l'expliquent, car les éleveur·euse·s des troupeaux échantillonnés ont par exemple mis en place le croisement et/ou ont procédé à des changements profonds du système (conversion à l'agriculture biologique, passage à un système herbager, *etc.*) à des dates différentes, y compris en dehors de la période d'étude. Cela milite pour la mise en place de dispositifs de suivi de troupeaux, qui sont toutefois coûteux en temps, en particulier dans le cas du croisement qui est un processus lent à se mettre en place.

5.5. Conclusion

Dans cette étude, nous montrons que la mise en place du croisement rotatif dans des troupeaux de race pure contribue à améliorer les performances de fertilité des troupeaux au détriment de la productivité laitière par vache ; que dans la très grande majorité des troupeaux cette baisse de productibilité laitière s'accompagne d'un agrandissement de la taille du troupeau pour la compenser. Les effets sur les taux de

matières utiles, la santé de la mamelle des vaches et leur longévité ressortent comme dépendant davantage de la ferme, de son état initial, des changements systémiques qui sont mis en place de manière concomitante au croisement et de la phase de transition de laquelle part le troupeau et dans lesquelles ils se trouvent durant la période d'étude. Ces résultats fournissent des modèles d'évolution des performances zootechniques de troupeaux au cours de la mise en place du croisement rotatif : ils soulignent que la mise en place du croisement rotatif induit à la fois des « points de passage systématiques » - *i.e.* augmentation rapide de la fertilité et dégradation de la productivité laitière – mais également que certaines performances dépendent bien davantage de l'articulation du croisement avec les autres pratiques de conduite du système. Ces modèles peuvent être mobilisés par les éleveur·euse·s qui envisagent d'introduire le croisement rotatif et alimenter leur discussion avec les conseiller·ère·s qui les accompagnent, afin d'identifier si et comment le croisement peut être un levier d'action cohérent par rapport à leur situation d'élevage et leur projet. Nos résultats nécessitent d'être confortés sur un plus grand échantillon de fermes, mais également et surtout avec des données généalogiques suffisamment précises pour adopter une entrée par génotype croisé et non pas par la catégorisation employée dans cette étude. En outre, ces résultats bénéficieraient de l'utilisation d'indicateurs agrégés de performances, afin de permettre de discuter de l'intérêt du croisement rotatif au regard de sa rentabilité économique ou d'un indicateur de travail, mais également au regard des bénéfices du croisement rotatif déclarés par les éleveur·euse·s.

5.6. Références

Les références spécifiques au chapitre 5 sont intégrées à la section *Références bibliographiques* du manuscrit

Chapitre 6 – Discussion générale

L'objectif de ce travail de thèse était de répondre à la question : *comment évoluent les pratiques de configuration du troupeau bovin laitier et ses performances suite à l'introduction et la gestion du croisement rotatif ?* Nous avons caractérisé trois trajectoires types de transition vers un troupeau croisé (voir chapitre 3), qui diffèrent selon l'ampleur des changements systémiques associés à l'introduction du croisement dans le troupeau (changements de faible ampleur *i.e.* maintien du système en place inchangé *vs.* changements de forte ampleur *i.e.* reconception du système via une conversion à l'AB ou une transition vers un système herbager et/ou économe) et selon le rythme auquel le croisement a été introduit et la gestion de ses effets différés qu'il induit (introduction rapide induisant un changement de la démographie du troupeau et nécessitant des éleveur·euse·s d'adapter leurs pratiques de configuration du troupeau *vs.* introduction lente et ne nécessitant pas d'ajustements des pratiques de configuration du troupeau). Ces résultats nous ont permis d'instruire la première partie de la question de recherche, à savoir comment évoluaient les pratiques de configuration du troupeau au cours de la période d'introduction puis de gestion du croisement rotatif. Ensuite, nous avons investigué l'évolution des performances au cours de cette période, aux échelles animal et troupeau. A l'échelle animal tout d'abord, à partir du pourcentage de gènes Holstein et du coefficient théorique d'hétérosis, nous proposons une catégorisation de trois classes génétiques générées par l'introduction et la gestion du croisement rotatif dans un troupeau de race pure Holstein (voir chapitre 4) : HO (100% gènes Holstein), F1 (50% gènes Holstein) et G2 (25% de gènes Holstein). Nous avons montré que ces classes génétiques avaient des performances de production laitière, de reproduction et de santé de la mamelle différentes. Nous avons mis en évidence que leur agrégation à l'échelle du troupeau induisait un compromis entre performances en fonction de leurs proportions relatives dans le troupeau, suggérant que les entités génétiques générées par l'utilisation du croisement rotatif supportaient une diversité fonctionnelle. Enfin, toujours à l'échelle troupeau, nous avons montré que le croisement rotatif a un effet significatif sur l'évolution des performances zootechniques des troupeaux (voir chapitre 5), mais qu'il ne constitue qu'un facteur explicatif parmi d'autres, tels que les changements systémiques mis en place de façon concomitante au croisement, l'état initial des

performances du troupeau ou le stade d'avancement dans la pratique du croisement. Plus spécifiquement, il ressort que la mise en place du croisement rotatif dans des troupeaux de race pure contribue à améliorer leurs performances de fertilité au détriment de la productivité laitière par vache, que la grande majorité des éleveur·euse·s compensent en augmentant l'effectif du troupeau. Les effets du croisement sur l'évolution des taux de matière utile (*TMU* ci-après), de la santé de la mamelle et la longévité des vaches ressortent comme plus contrastés. Enfin, l'effet du croisement rotatif constitue un facteur explicatif dont le poids relatif – en comparaison d'autres facteurs – varie selon la performance considérée. Il est prépondérant dans l'évolution des performances de fertilité, de TMU et de santé de la mamelle. Il est élevé mais non prépondérant dans l'évolution de la production laitière du troupeau et de la longévité du troupeau, où d'autre facteurs ont un poids relatif supérieur (*e.g.*, évolution de l'effectif du troupeau).

J'ai discuté en partie les résultats de ce travail de thèse lors de leur présentation dans les chapitres 3, 4 et 5. Cette discussion générale vise donc à remettre en interaction les apports de ces trois chapitres d'un point de vue théorique et méthodologique. Dans un premier temps, je discuterai les contributions scientifiques de la thèse et j'identifierai les perspectives de recherche qui en émergent selon deux angles : (i) le fonctionnement dynamique des systèmes d'élevage selon le modèle d'action et (ii) le fonctionnement des systèmes d'élevage basés sur la diversité animale et leurs performances. Les contributions plus spécifiques à la thématique de recherche du croisement laitier seront discutées selon ces deux angles. Les perspectives scientifiques que j'identifie ne feront pas l'objet d'une sous-partie dédiée mais seront présentées à la suite de chaque contribution. Puis, je discuterai des atouts et des limites méthodologiques de ce travail de recherche. Enfin, j'identifierai des perspectives opérationnelles afin de contribuer à la réflexion des acteur·rice·s de l'élevage bovin laitier impliqué·e·s plus ou moins directement dans l'utilisation du croisement rotatif dans les fermes d'élevage.

6.1. Contributions scientifiques de la thèse

6.1.1. Caractériser le croisement rotatif comme un cas d'étude pour analyser la coévolution des pratiques de configuration du troupeau et de ses performances zootechniques

Le croisement rotatif, une pratique de configuration du troupeau. La formalisation des trajectoires de changement de pratiques suivies par des troupeaux bovins laitiers au cours de la période où était mis en place et géré le croisement rotatif par les éleveur·euse·s (voir chapitre 3) constitue une première originalité de la thèse au regard de la littérature traitant du croisement laitier en élevage bovin (voir chapitre 1). En effet, l'immense majorité des études portant sur le croisement laitier évalue ses bénéfices *via* l'estimation des paramètres génétiques associés (Dezetter et al., 2015; Clasen et al., 2017), la comparaison des performances des vaches croisées par rapport à leurs congénères en race pure (Buckley et al., 2014; Shonka-Martin et al., 2018; Clasen et al., 2019) et la modélisation de la rentabilité technico-économique des troupeaux utilisant certains schémas de croisement (Dezetter et al., 2017; Clasen et al., 2020). Dans ces travaux, les modes de gestion des troupeaux sont peu pris en compte, généralement réduits au niveau d'intensification de la production laitière (Dezetter et al., 2017; Clasen et al., 2019) et/ou des systèmes d'élevage dans lesquels le croisement est utilisé – *e.g.*, système herbager *vs.* système en confinement basé sur l'utilisation d'intrants alimentaires (Buckley et al., 2014), système en AB *vs.* système conventionnel (Clasen et al., 2020) pour les résultats à l'échelle animale.. Ce faisant, ces travaux considèrent le croisement davantage comme une *technique* au sens de Landais et al. (1988) et visent la *transmissibilité* des résultats plutôt que leur ancrage à des situations concrètes d'élevage hétérogènes. A l'inverse, nos résultats s'appuient sur une conception du croisement comme une *pratique* de configuration du troupeau (Landais et al., 1988) dont les modalités varient au cours de la conduite du croisement et selon les éleveur·euse·s et leur logiques d'action propres. Tout l'enjeu consiste ensuite à en extraire des régularités, des éléments de généricité : les trois trajectoires types de mise en place et de gestion du croisement dans le troupeau bovin lait que nous avons conceptualisées (voir chapitre 3) relèvent de cette démarche et constituent à ce titre des connaissances sur les évolutions des modes de gestion des troupeaux adoptant le croisement. Elles enrichissent ainsi la formalisation des modes de gestion de troupeaux conduits en croisement – telle qu'elle est faite par les chercheur·euse·s

dans les études de simulation technico-économiques par exemple – en identifiant notamment l'existence de rythmes d'introduction du croisement variables entre troupeaux et dans le temps, l'existence de phases d'essai-erreur pour le choix de programmes de croisement qui conduisent à une diversité résiduelle des génotypes croisés dans le troupeau, les changements systémiques concomitants à la mise en place du croisement, les stratégies de gestion du surplus de femelles liée à l'augmentation de la fertilité (agrandissement du troupeau, croisement industriel, vente d'animaux, adaptation des critères de renouvellement et de réforme). Inclure ces éléments dans des modèles de simulation tels que celui de Dezetter et al. (2017) et simuler le fonctionnement de systèmes bovins laitiers mettant en place le croisement rotatif selon les trajectoires types que nous avons identifié nous paraît constituer une perspective de recherche intéressante pour évaluer les performances zootechniques et technico-économiques que ces différentes trajectoires induisent.

La caractérisation des trajectoires types d'introduction et de gestion du croisement au sein des troupeau (voir chapitre 3) et l'analyse des facteurs expliquant l'évolution des performances zootechniques de ces troupeaux (voir chapitre 5) ont permis de rendre compte de la complexité fonctionnelle des systèmes où le croisement est mis en place, liée à l'emboîtement des niveaux d'organisation qui les constituent et leurs interrelations. En construisant un cadre d'analyse nous permettant de tenir compte de ces changements ou de l'absence de changements au-delà du troupeau, nous nous sommes donné les moyens de comprendre la cohérence fonctionnelle et stratégique globale des systèmes (Osty, 1998; Moulin et al., 2008). Cela permet d'enrichir les connaissances sur les modes de gestion des systèmes bovins laitiers qui mettent en place le croisement rotatif, en soulignant que la diversité des options à la disposition des éleveur·euse ne se limite pas au choix d'un schéma et d'un programme de croisement, mais relève bien de leur adéquation avec le fonctionnement global du système d'élevage. De plus, nos résultats montrent que le croisement et les changements de pratiques de configuration de troupeaux associés sont mis en œuvre le plus souvent de manière concomitante à des changements plus systémiques et/ou structurels (*e.g.*, changement du système fourrager, du mode de production) – groupes de trajectoire 1 et 2 – mais que certains éleveur·euse·s, à l'inverse, maintiennent le système en place à l'identique – groupe 3 – et visent principalement à travers l'utilisation du croisement une augmentation de l'efficience du troupeau

(Veysset et al., 2017, 2018). Ces résultats concordent avec la distinction que font certaines études pour évaluer l'intérêt du croisement entre systèmes bas intrants et systèmes confinés plus intensifs (Kargo et al., 2012; Dezetter et al., 2017; Clasen et al., 2019). Ces deux types de trajectoires correspondent respectivement aux niveaux de *substitution* et de *reconception* du *cadre efficience-substitution-reconception* (*ESR*) développé par Hill et MacRae (1995), qui a été mobilisé par des travaux portant sur les transitions de systèmes de cultures (Lamine, 2011; Mawois et al., 2019; Merot et al., 2019) mais beaucoup moins sur celles de systèmes d'élevage (Padel et al., 2019). Dans notre échantillon, les éleveur·euse·s ayant géré une transition de type *reconception* étaient très majoritaires (22 sur 26), ce qui pourrait suggérer que l'utilisation du croisement contribue généralement une transition de système relevant d'une modernisation écologique profonde (Duru et Therond, 2015). Toutefois, les résultats issus de l'analyse de l'évolution des performances des troupeaux (voir chapitre 5) sont venus nuancer ce point : ceux-ci ont en effet mis en évidence que les éleveur·euse·s des groupes 2 et 3 (*i.e.* transition de *reconception*) s'inscrivaient comme le reste de l'échantillon dans une tendance générale à l'agrandissement de l'effectif du troupeau, pour contrebalancer la baisse de productivité laitière des femelles croisées. Néanmoins, nos résultats ne nous permettent pas de trancher sur le fait que le croisement favorise ou non des formes fortes d'agroécologisation des systèmes d'élevage. Il faudrait pour cela intégrer à l'analyse des pratiques d'autres éléments de la conduite de ces systèmes (*e.g.*, conduite alimentaire et de la santé du troupeau), dont le rôle dans l'agroécologisation des systèmes est essentiel (Dumont et al., 2013, 2014). De plus, il faudrait également compléter l'analyse des performances par des indicateurs d'évaluation environnementale, afin d'estimer les conséquences en termes d'émission de GES de l'agrandissement des troupeaux mentionné plus-haut, ou de l'efficience dans l'utilisation des intrants (Dollé et al., 2013).

L'introduction et la gestion du croisement rotatif, une transition technique. Nos résultats (voir chapitre 3) mettent en évidence que la mise en place et la gestion du croisement au sein du troupeau, loin de consister en un simple changement de modalité d'une conduite de la reproduction comme on pourrait le penser *a priori* (*i.e.* substituer la race du reproducteur mâle par une autre), induit de multiples changements techniques en chaîne relevant de pratiques plus générales de

Phase du cycle	Description par Sutherland et al. (2012)	Application au cas du croisement rotatif
1. Path dependency *(dépendance au chemin)*	Fonctionnement du système en rythme « de croisière ». Les investissements (en compétences, connaissances, technologies, etc.) réalisés auparavant sont intégrés au capital culturel de la ferme, ce qui **lie l'agriculteur·ice à une conduite ou approche particulière et limite donc l'incitation à un changement majeur** (bien que des changements mineurs puissent survenir) : le système reste dans cet état pendant une période indéfinie	**Conduite en race pure**, principalement Holstein. Les **problèmes de fertilité** rencontrés donnent lieu à des **changements mineurs – c'est-à-dire qui ne remettent pas en question la conduite intra race pure** : utilisation de taureaux améliorateurs en fertilité, technologies de surveillance et détection des chaleurs, compléments alimentaires, etc. L'environnement sociotechnique des élevages bovins laitiers – organisé pour et autour de la race pure – limite le recours à d'autres solutions.
2. Trigger events *(évènements déclencheurs)*	L'agriculteur·ice gestionnaire du système "dépendant au chemin" fait l'expérience ou anticipe un ou plusieurs **évènements qui aboutissent à la prise de conscience qu'un changement de système est nécessaire** pour atteindre les objectifs de gestion agricole et/ou exploiter de nouvelles opportunités. Ces éléments déclencheurs peuvent être perçus comme positifs ou négatifs.	Plusieurs évènements déclencheurs, potentiellement combinés entre eux : - **Impasse technique** : inefficacité des moyens mis en œuvre pour régler les problèmes de fertilité du troupeau, impact économique et moral de cette impasse - **Changement de système d'élevage** (e.g., conversion à l'AB) et adaptation du troupeau Holstein difficile : subie ou anticipée par l'éleveur·euse (e.g., système « néozélandais » requérant des vaches très fertiles pour regrouper les vêlages) - **Volonté/besoin de s'écarter du modèle d'élevage dominant**, perte de confiance dans les acteur·ice·s sociotechniques
3. Active assessment *(évaluation active)*	Correspond à la phase où l'agriculteur·ice explore les différentes implications (économiques, managériales, sociales) d'un changement du système en place. Il s'agit d'un processus itératif où **l'agriculteur·ice évalue concrètement les options et les ressources actuelles du système, teste et expérimente certaines options**, échange avec d'autres agriculteur·ice·s ou conseiller·ère·s	Les éleveur·euse·s évaluent les implications de la conduite du troupeau en croisement : - **Absence d'index** - **Peu de références** techniques et économiques (en particulier dans les années 2000) - **Perte de productivité laitière** - **Marginalisation** vis-à-vis de l'environnement professionnel sociotechnique
4. Implementation *(mise en œuvre)*	Choix arrêté et **mise en œuvre du changement, d'un "nouveau système" par l'agriculteur·ice**. Celui-ci l'engage à investir financièrement dans le changement mais aussi à développer de nouvelles compétences et connaissances et à établir de nouveaux réseaux sociaux et commerciaux autour du nouveau système.	**Test de programmes de croisement par l'éleveur·euse, constitution de références propres**, seul ou par le biais de collectifs d'éleveur·euse·s, d'entreprises de génétique proposant des offres commerciales « clé en main », etc.
5. Consolidation *(renforcement)*	**Evaluation des changements mis en œuvre et du « nouveau système » au regard du constat de départ** et des déclencheurs identifiés. S'ils permettent de régler le problème identifié, le système revient à un état stable (phase 1). Si non, l'agriculteur·ice repassera à une phase d'essais et d'évaluation de leurs effets sur le système (phase 3)	**Le croisement permet une amélioration univoque de la fertilité** (en particulier lorsque la situation initiale est dégradée) dès la 1ère génération de croisement : cela **consolide le choix fait du recours au croisement**. Une fois la capacité du troupeau à se reproduire acquise, les éleveur·euse·s diffèrent dans l'orientation stratégique qu'ils/elles donnent au système croisé, sans remettre en question leur choix de conduire un troupeau croisé (phase 1)

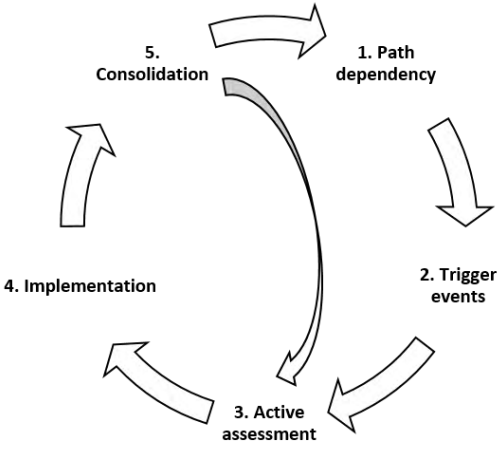


Figure 60 : Application du modèle du cycle de déclenchement du changement (*triggering change cycle*) des systèmes agricoles proposé par Sutherland et al. (2012) au cas de la transition d'une conduite du troupeau en race pure vers une conduite en croisement rotatif

configuration du troupeau (*i.e.* reproduction, renouvellement, réforme), relevant donc d'une transition technique, c'est-à-dire d'un processus de changement profond du fonctionnement du troupeau. Le facteur explicatif central de cette transition technique est le niveau de fertilité supérieur des vaches croisées comparé aux vaches HO – majoritaires au sein des troupeaux de l'échantillon avant la mise en place du croisement –, d'abord attesté sur la base des déclarations des éleveur·euse·s enquêté·e·s (voir chapitre 3) et de la littérature (Lucy, 2001; Buckley et al., 2014), puis confirmé par nos résultats à l'échelle animale (comparaison des valeurs moyennes d'IVIAF entre vaches HO, vaches F_1 et vaches G_2, voir chapitre 4) et à l'échelle troupeau (identification de l'augmentation de la part de vaches F_1 comme facteur explicatif de l'augmentation de la part de vaches très fertiles, voir chapitre 5). Ainsi, nous avons identifié – sur une base déclarative (voir chapitre 3) puis en analysant le niveau initial de fertilité des troupeaux (voir chapitre 5) – que le croisement était généralement mis en place par les éleveur·euse·s comme recours à une situation dégradée de la fertilité et des performances de reproduction en général du troupeau, que d'autres pratiques mises en place précédemment n'avait pas permis d'améliorer (*e.g.*, choix de taureaux HO améliorateurs pour les traits de reproduction, surveillance des chaleurs et des vêlages). Autrement dit, le croisement de races a généralement constitué un changement de pratiques « de dernier recours », les autres solutions testées – n'impliquant pas de sortir d'une conduite en race pure – n'ayant pas permis d'améliorer la fertilité du troupeau. Ces éléments illustrent les concepts de *dépendance au chemin* (*path dependency*) et d'*évènements déclencheurs* (*trigger events*) et concordent ainsi avec le modèle conceptuel du cycle de changement des exploitations agricoles proposé par Sutherland et al. (2012) (Figure 60). Ils l'étendent ainsi sur la base de preuves empiriques aux changements survenant au sein de systèmes d'élevage, ce qui a peu été fait à notre connaissance (Padel et al., 2019). L'amélioration de la fertilité constitue à la fois un effet de l'utilisation du croisement mais également un « *changement d'état du troupeau* » (Dedieu et al., 2008), qui constitue une information (Magne, 2007) sur laquelle l'éleveur·euse s'appuie pour adapter sa conduite à ce changement d'état : les trajectoires de transition technique vers le croisement rotatif (voir chapitre 3) mettent en évidence que l'augmentation de la fertilité du troupeau induit des stratégies d'adaptation contrastées (*e.g.* gestion du renouvellement par l'utilisation de croisement terminal ou la vente d'animaux, évolution des critères de sélection en voie femelle) qui reposent sur des combinaisons de

pratiques de configuration cohérentes avec les objectifs de l'éleveur·euse (*e.g.*, augmentation *vs.* maintien de l'effectif du troupeau, transition vers un système herbager et/ou conversion à l'AB *vs.* maintien du système en l'état).

Le rôle central qu'occupe la fertilité dans la transition technique induite par l'introduction et la gestion du croisement rotatif illustre l'effet rétroactif des performances du troupeau sur l'adaptation des pratiques par l'éleveur·euse. Il s'agit ici d'une perspective dynamique et évolutive du concept de système d'élevage, vu comme l'articulation d'un sous-système d'élaboration des décisions et d'un sous-système biotechnique d'élaboration de la production (Landais et al., 1988). Au-delà de sa théorisation, cette perspective dynamique du système d'élevage a finalement peu été étudiée sur la base de données empiriques (Moulin, 1993). La marge de manœuvre dont dispose l'éleveur·euse pour mettre en œuvre une stratégie de renouvellement et de réforme tant d'un point de vue quantitatif – à travers les taux de renouvellement et de réforme – que d'un point de vue qualitatif – à travers le choix des critères de renouvellement et de réforme – dépend intrinsèquement du nombre de génisses à sa disposition et donc des performances de reproduction du troupeau. La mise en œuvre d'une sélection génétique par la voie femelle efficace – au sens qu'elle répond aux objectifs de l'éleveur·euse – repose donc sur la capacité du troupeau à se reproduire. Il en va de même pour la sélection par la voie mâle. Or, dans une situation où les performances de fertilité du troupeau sont trop dégradées – situation standard dans les troupeaux Holstein dans les années 2000 (Lucy, 2001; Le Mézec et Barbat-Leterrier, 2008) –, les bénéfices de la révision des index mâles en faveur des traits fonctionnels (Miglior et al., 2017) sont susceptibles de ne pas pouvoir être exploités efficacement par les éleveur·euse·s. A cela s'ajoute que le progrès génétique en race pure par la voie mâle n'a un effet que progressif sur la fertilité, qu'il a un coût non négligeable pour les éleveur·euse·s, et que ceux/celles-ci ont un pouvoir de décision sur son orientation qui reste limité : dans ces conditions, les moyens extrinsèques mis en place par l'environnement sociotechnique des élevages de bovins laitiers pour améliorer la capacité des troupeaux à se reproduire peuvent ne bénéficier que d'une adoption partielle par certain·e·s éleveur·euse·s. Ainsi, la configuration du troupeau et sa dynamique constitue une mécanique fondamentale pour comprendre la transition technique induite par l'utilisation du croisement rotatif. Cette mécanique repose sur la combinaison de pratiques de configuration du troupeau (gestion des accouplements,

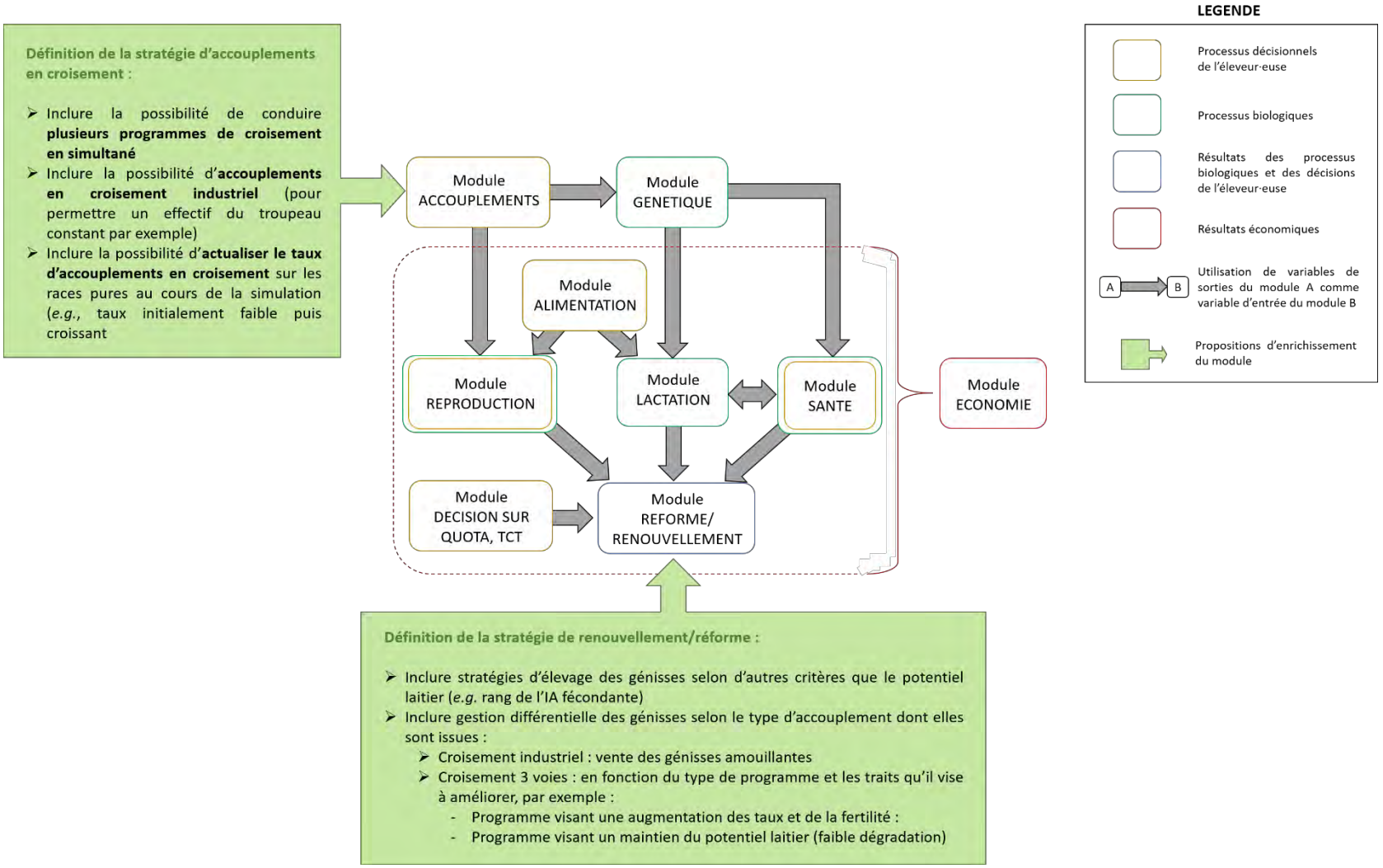


Figure 61 : Propositions d'enrichissement du modèle de simulation ECOMAST (Hortet, 2000 ; Robert-Briand, 2006, cité·e·s par Dezetter, 2015) et de son application au cas de l'introduction et de la gestion du croisement rotatif dans le troupeau bovin laitier (d'après Dezetter, 2015)

renouvellement, réforme), lesquelles ne peuvent cependant prendre leur pleine *efficacité* (*e.g.*, critères de renouvellement) que lorsque la fertilité du troupeau le permet. Le croisement rotatif fait ainsi office de levier de « déblocage » de la gestion de la configuration du troupeau et de sa dynamique interne. Les études sur le croisement laitier, en faisant généralement le choix d'une analyse à l'échelle de l'animal et non du troupeau, discutent peu leurs résultats à l'aune des conséquences des performances du croisement sur le fonctionnement dynamique du troupeau ou des systèmes d'élevage. Les travaux de modélisation qui adoptent l'échelle troupeau dans une perspective dynamique formalisent quant à eux généralement des conduites-types *a priori*, dont les modalités n'évoluent pas au cours du temps, en fonction de l'évolution des performances au cours des simulations réalisées (Dezetter, 2015; Dezetter et al., 2017). En adoptant une approche compréhensive, les trajectoires-types de transition technique vers le croisement que nous avons identifiées (voir chapitre 3) permettent de rendre compte de la dynamique du processus itératif entre évolution des pratiques et des performances de reproduction du troupeau, et leur effet rétroactif sur les pratiques. Loin d'opposer ces deux approches – *i.e.* modélisation-simulation et approche compréhensive –, celles-ci sont au contraire complémentaires (Martin et al., 2018). Nos résultats constituent des éléments de calibration et de formalisation intéressants pour enrichir les modèles de simulation avec des trajectoire-types, mais aussi enrichir les modules relatifs à la prise de décision, le choix de pratiques mises en œuvre et leur actualisation dynamique en fonction des performances simulées (Figure 61). Les travaux de modélisation permettraient quant à eux « une exploration des possibles » : l'évaluation des conséquences de combinaisons originales de pratiques (stratégies de renouvellement et de réforme évolutives, programmes de croisement en parallèle, *etc.*), la possibilité de tester plusieurs scénarii contrastés dans lesquels le croisement serait mis en place, *etc.*

Le croisement rotatif reconfigure l'articulation entre performances à l'échelle animal et à l'échelle du troupeau, Nos résultats portant sur les performances du croisement ont également été obtenus en intégrant plusieurs niveaux d'organisation du système d'élevage et en les articulant ensemble. Ainsi, nous avons mis en évidence, à l'échelle de l'animal, des différences de profils de performances zootechniques moyennes entre des vaches de génotype HO et des vaches croisées

de première et seconde génération, puis analysé comment les différentes combinaisons de ces classes influait sur les performances moyennes du troupeau et identifié les compositions de troupeaux qui optimisaient ces performances (voir chapitre 4). En analysant les conséquences sur les performances du troupeau de différences de performances à l'échelle de l'animal (moyen), nos résultats diffèrent de la majorité des travaux portant sur le croisement, qui se limitent en général à la comparaison des performances à l'échelle animale (Buckley et al., 2014; Coffey et al., 2016; Hazel et al., 2020), à l'exception des travaux de modélisation cités précédemment (Dezetter et al., 2017; Clasen et al., 2020). Or, la comparaison des performances moyennes de vaches de générations de croisement différente et issues de programmes de croisement variés ne suffit pas pour discuter de l'intérêt du croisement pour les éleveur·euse·s qui le mettent en place et le gèrent au sein du troupeau. D'une part, les performances zootechniques du troupeau peuvent varier en fonction de sa composition relative en vaches de race pure et des différentes générations de croisement (voir chapitres 4 et 5) : il y a donc un intérêt à identifier les compositions de troupeaux qui permettent d'optimiser ces performances, pour ensuite identifier les modes de gestion technique du croisement (rythme d'introduction, programme, *etc.*) qui permettent d'atteindre ces compositions de troupeau « optimales ». De plus, la gestion du croisement rotatif engendre de fait un renouvellement continu de la composition du troupeau en génotypes croisés dont les performances moyennes diffèrent, ce qui par conséquent reconfigure continuellement l'articulation entre les performances des animaux et du troupeau.

Au-delà du sujet du croisement en lui-même et de la littérature qui lui est consacrée, nos résultats reposent sur l'analyse dynamique d'un processus de changement de pratiques et des performances que celui-ci induit. L'analyse dynamique des systèmes d'élevage a donné lieu à un très grand nombre d'études, qui diffèrent à la fois dans le type d'informations qu'elles mobilisent pour décrire la dynamique des systèmes (caractéristiques structurelles, pratiques, performances) et la manière dont elles formalisent l'évolution dynamique des systèmes (analyse longitudinale, trajectoire). Une approche fréquemment adoptée par les travaux qui étudient la dynamique des systèmes d'élevage consiste en l'analyse longitudinale des caractéristiques structurelles de fermes. La plupart de ces travaux portent sur des trajectoires

d'évolution à très long terme – plusieurs dizaines d'années *i.e. temps long* (Landais et al., 1988) – des surfaces et de l'assolement, de la conduite générale du système fourrager ou de l'alimentation du troupeau, des pratiques de commercialisation, de la main d'œuvre, du financement, *etc.* Certains de ces travaux visent à décrire de grandes tendances structurelles ou fonctionnelles au sein de population de fermes et ainsi de dresser un état des lieux d'un territoire agricole donné (García-Martínez et al., 2009; Rueff et al., 2012; Morin et al., 2017). D'autres cherchent à identifier des facteurs explicatifs de de durabilité (Ryschawy et al., 2013) ou d'adaptation au changement (Cialdella et al., 2009) des systèmes. En adoptant le système d'élevage comme niveau d'analyse des pratiques et en considérant les trajectoires de fermes en lien avec leur environnement socioéconomique, ces travaux intègrent des modalités et opportunités plus globales que celles considérées dans cette thèse. Ces travaux ne cherchent pas à décrire les changements relatifs à la mise en place d'une pratique d'intérêt en particulier – comme nous le faisons dans le cas du croisement rotatif – mais à plutôt à permettre de dresser une représentation de la structure ou de la conduite globale des systèmes d'un territoire au cours de la période étudiée. Ce type d'approche longitudinale peut également être étendue à l'analyse de l'évolution des performances de ces systèmes, qu'elles soient zootechniques ou technico-économiques. Dans la plupart de ces travaux, le lien entre évolution des pratiques et évolution des performances n'est pas contenue dans les résultats, mais émerge par inférence sur la base de la mise en regard des résultats de pratiques et de performances et de l'analyse des auteur·rice·s (Benoit et Laignel, 2011; Perrot et al., 2011; Veysset et Delaby, 2018). A l'inverse, l'approche que nous avons adoptée dans le chapitre 5 a visé à produire des résultats permettant par eux-mêmes d'évaluer la part explicative de l'évolution des pratiques dans l'évolution des performances du troupeau, en adaptant la méthode proposée par Martin et al. (2017) : toutefois, alors que la description des pratiques que nous faisons se fait à l'échelle du troupeau et selon une formalisation de trajectoires-types, celle de Martin et al. (2017) se fait à l'échelle de la ferme par un suivi longitudinal de variables structurelles relevant de la conduite du système fourrager et de l'alimentation du troupeau. Il en est de même pour les études de Bouttes et al. (2019) et Perrin et al. (2020), qui analysent respectivement l'évolution de la vulnérabilité d'élevages bovins laitiers et l'évolution de la satisfaction des éleveur·euse·s au cours de la conversion à l'AB.

Il existe des études qui adoptent comme nous l'échelle du troupeau et décrivent la dynamique de sa gestion technique par les éleveur·euse·s en matière de reproduction (Ingrand et Dedieu, 2007) ou d'alimentation (Gibon, 1981) mais ils considèrent ces dynamiques à l'échelle du *temps rond* (Landais et al., 1988), c'est-à-dire du cycle de production annuel, échelle qui n'est pas adaptée pour l'étude du croisement rotatif dont les effets s'expriment sur le temps long. Notre approche, en adoptant le troupeau comme niveau d'organisation et le temps long comme échelle de temps principale, est originale par rapport aux travaux qui traitent de la dynamique des changements techniques en systèmes d'élevage. Dans sa thèse, Perucho (2018) analyse la dynamique aux échelles de temps rond et de temps long des « *pratiques de gestion génétique* » et de leurs modalités, c'est-à-dire des pratiques de configuration du troupeau ovin, similaires à celles que j'ai étudiées en bovin laitier (renouvellement, réforme, croisement). Son approche approfondit néanmoins davantage l'analyse des opportunités de ces pratiques que je ne l'ai fait dans ce travail ; en revanche, mon travail intègre l'évaluation de l'évolution des performances induites par l'évolution de ces pratiques, ce que ne fait pas Perucho (2018). Enfin, au-delà des travaux de zootechnie, on trouve également des travaux d'agronomie système qui traitent de la dynamique des changements techniques à des échelles organisationnelle et temporelle semblables aux nôtres *i.e.* système de culture et temps long : ainsi, Chantre et al. (2015) ont analysé les trajectoires de changement de pratiques vers la réduction d'intrants d'agriculteurs au cours de leur carrière et Mawois et al. (2019) les trajectoires de changement de pratiques associées à l'introduction de légumineuses dans le système de culture. Néanmoins, ces travaux ne traitent pas des performances induites par les trajectoires techniques que leurs autrices caractérisent.

Outre des approches qui consistent à décrire et qualifier les processus de changement, on trouve dans le champ de recherche sur les transitions des approches compréhensives visant davantage à identifier les déterminants et freins de ces transitions, parmi lesquels le cadre *Multi-Level-Perspective* (*MLP*, Rip et Kemp, 1998; Geels, 2002; Geels et Schot, 2007). Ce cadre, régulièrement mobilisé dans des études portant sur les transitions de systèmes variés (Elzen et al., 2012), dont les systèmes agri-alimentaires (Diaz et al., 2013) et agricoles (Magrini et Duru, 2015) est sous-tendu par une conception des systèmes à l'échelle de sociétés comprises comme « *un ensemble d'acteurs, de connaissances, de règles, de valeurs et d'artefacts qui régis-*

-*sent un modèle de production en place* » (Magrini et al., 2019, d'après Geels, 2004). Au regard du contexte du dispositif d'amélioration génétique des bovins laitiers organisé intra-race (voir chapitre 1), la conduite en race pure peut être considérée comme le régime sociotechnique dominant (Geels, 2002; Geels et Schot, 2007), c'est-à-dire l'ensemble d'acteurs (organismes et entreprises de sélection, associations de races, recherche, instituts techniques, enseignement et conseil agricoles, *etc.*), de connaissances (génétique quantitative, *etc.*), de règles, de valeurs et d'artefacts (index, codes race, *etc.*) qui guident et coordonnent leurs activités, innovent au sein du régime (*e.g.*, sexage, génomique) et confèrent ainsi au système une stabilité, ce qui entraîne des phénomènes de verrouillage qui empêchent l'émergence et le développement d'innovations hors du régime dominant (David, 1985). En poursuivant l'application du cadre MLP dans des travaux réalisés en marge de cette thèse, nous avons montré que le croisement laitier peut être considéré comme une innovation de niche (Magne et Quénon, 2021; Magne et al., 2020). Ces résultats ont permis de mettre en évidence que les freins au développement du croisement rotatif d'ordre organisationnel, cognitif et culturel étaient prépondérants, notamment par rapport aux freins d'ordre économique ou technologique. Ainsi, il semblerait que le manque de références techniques ou technico-économiques sur les performances du croisement, explicitement ou implicitement considéré comme la raison principale du caractère marginal de cette pratique par la littérature (Dezetter et al., 2017; Shonka-Martin et al., 2018; Clasen et al., 2019), ne suffise pas à développer la pratique du croisement. La caractérisation des *chemins* – ou *voies* – *de transition technique* identifiés (voir chapitre 3) suggère que s'opèrent des changements dans l'identité professionnelle et personnelle des éleveur·euse·s. Ainsi, les trajectoires révèlent que les éleveur·euse·s adoptent des stratégies différentes de gestion de l'incertitude et de sécurisation de leur système pour opérer cette transition (Magne et Quénon, 2021; Magne et al., 2020). Ces stratégies sont elles-mêmes sous-tendues par des reconfigurations dans les normes et les valeurs des éleveur·euse·s – ce à quoi ils/elles tiennent (Lemery et al., 2005; Fiorelli et al., 2007) –, leurs modes de raisonnement et d'action – *i.e.* ce qu'ils/elles tiennent pour vrai et influence leur action (Darnhofer et al., 2005; Pastré, 2011, cité par Cristofari, 2018). Elles rendent compte, ce faisant, de degrés d'émancipation différents vis-à-vis du régime dominant de l'élevage bovin laitier, vis-à-vis des normes, de l'organisation des acteur·rice·s, des instruments qu'ils véhiculent. La description des trajectoires 3 et 2 qui correspondent aux éleveur·euse·s

Chemin-type de transition technique		Type 2	Type 3
Stratégie de gestion de l'incertitude et de sécurisation du système	**Ce qui limite le risque**	Introduire le croisement progressivement	Choisir un programme de croisement connu et référencé
	Ce qui est risqué	Personnaliser les programmes de croisement via des essai-erreurs	Appliquer le schéma à un rythme rapide et intense
	Modes de raisonnement /de pensée	Les connaissances fiables sont celles produites en contexte et qui font leurs preuves	Les connaissances fiables demeurent celles produites par la recherche
Emancipation vis-à-vis du régime dominant	**Degré d'émancipation**	Fort	Faible
	Vis-à-vis des normes professionnelles	- Ils/elles changent de mode de production (AB, herbager) - Ils/elles acceptent de perdre en productivité laitière par vache et recherchent des animaux robustes - Ils/elles revendiquent une meilleure organisation du travail et une autonomie décisionnelle	- Ils/elles restent dans un mode de production conventionnel - La productivité laitière par vache demeure une norme importante
	Vis-à-vis des réseaux d'acteurs	- Ils/elles sortent du contrôle laitier - Ils/elles créent/s'insèrent dans des groupes d'éleveur·euse·s pratiquant le croisement ou des formes de conseil *ad hoc*	Ils/elles restent au contrôle laitier et dans les réseaux des entreprises de sélection
	Vis-à-vis des techniques	- Ils/elles choisissent leur(s) programme(s) de croisement - Certain·e·s pratiquent la monte naturelle avec un mâle croisé pour tout ou partie des accouplements	Ils/elles utilisent les programmes de croisement offerts par les ES et les outils de la génétiques disponibles

Tableau 20 : Description des stratégies de gestion de l'incertitude et de sécurisation du système mises en œuvre par les éleveur·euse·s des groupes 2 et 3 lors de la transition vers la gestion de troupeau en croisement et des degrés et preuves d'émancipation de ces éleveurs vis-à-vis du régime sociotechnique dominant en élevage bovin lait (Magne et Quénon, accepté)

s'émancipant respectivement le moins et le plus du régime dominant (la trajectoire 1 étant intermédiaire) permettent d'illustrer ce résultat (Tableau 20). Ainsi les quatre éleveurs du groupe 3 s'émancipent peu du régime dominant. Ils mettent en place le croisement laitier sans changer le système d'élevage par ailleurs, qui reste géré en agriculture conventionnelle et maintiennent un niveau de productivité laitière équivalent à ce qu'ils obtenaient en race pure Holstein. Ils choisissent un programme de croisement dont les bénéfices sont référencés et correspondent à l'intensivité de la conduite qu'ils maintiennent, et le mettent en place dans leur troupeau, et ce, de manière importante dès le début – *i.e.* pourcentage d'insémination croisées élevé sur les vaches Holstein – afin de bénéficier rapidement des effets du croisement. Leur stratégie de sécurisation repose sur le fait de restreindre le changement au croisement et de choisir un programme de croisement pour lequel des références techniques sont produites par des entreprises de sélection et correspondent à une offre commerciale – *i.e.* programme de croisement rotatif trois voies (Holstein × Montbéliarde) × Rouge Scandinave, sous la dénomination commerciale de croisement « Procross ». Ils s'émancipent peu du régime dominant (race pure et hyper-spécialisation) car ils restent dans une logique d'efficience des animaux, restent dans les réseaux d'acteurs « conventionnels » et continuent d'utiliser les techniques de l'élevage conventionnel en dehors des index femelles qui n'existent pas pour les animaux croisés. A l'inverse, les 12 éleveur·euse·s du groupe 2 s'émancipent fortement du régime dominant. Le croisement laitier supporte une transition de leur système d'élevage vers un système bas intrants, herbager ou en AB et pour laquelle ils/elles acceptent une perte de productivité laitière par vache. Ce qu'ils recherchent en termes technique c'est de gagner en fertilité, en qualité de lait et en robustesse. Mais ces éleveurs recherchent aussi à améliorer leur organisation du travail – *e.g.* à travers l'amélioration de la fertilité et de la robustesse du troupeau – et à retrouver une autonomie décisionnelle sur leurs fermes vis-à-vis des acteur·rice·s et organisations de leur environnement sociotechnique. Ainsi ils font de nombreux essais-erreurs pour construire un ou des programmes de croisement qui sont adaptés aux changements de leur système, mais peu voire pas connus et référencés. Certain·e·s se forment pour pouvoir réaliser les inséminations indépendamment des inséminateur·ice·s. Certain·e·s choisissent même de renoncer pour partie à l'insémination animale et d'opter pour de la monte naturelle *via* des taureaux croisés issus de leur élevage ou achetés à d'autres éleveur·euse·s. La prise de risque liée à cette personnalisation du programme de

croisement et l'incertitude qu'elle génère sont « compensées » par une mise en place progressive dans le troupeau – *i.e.* pourcentage d'insémination croisées modéré à faible –, ce qui leur permet d'évaluer leurs essais en contexte et chemin faisant. Ces éleveurs se détachent aussi du réseau acteur·rice·s du régime dominant : certains sortent du contrôle laitier car ils estiment ne plus rien en retirer et plus de la moitié de ces éleveur·euse·s s'inscrit dans des groupes de pair·e·s accompagnés ou non par des conseiller·ère·s pour se construire des références techniques *ad-hoc*. Ces résultats mériteraient d'être approfondis notamment en étudiant la transition vers le croisement à l'échelle du sous-système décisionnel, à l'image des travaux traitant des transitions vers des pratiques innovantes en analysant les changements des modes de raisonnement (Darnhofer et al., 2005), de l'apprentissage (Chantre, 2011; Cristofari, 2018) ou des « mondes professionnels » (Coquil et al., 2017) des agriculteur·ice·s. De même, il nous semble intéressant d'étudier les modes d'accompagnement des éleveur·euse·s qui introduisent le croisement et des dynamiques collectives qui se mettent en place autour, comme cela a été fait pour d'autres pratiques innovantes (Lamine et Bellon, 2009; Meynard et al., 2014; Lacombe, 2018). Plus généralement, notre approche du croisement rotatif dans cette thèse s'ancre en zootechnie système, dont l'héritage de la pensée systémique nous a permis de mettre à jour des éléments de perspectives de déblocage du régime sociotechnique de l'élevage hyperspécialisé en race pure. Ils nécessitent d'être investigués par des analyses transdisciplinaires, convoquant par exemple la sociologie des organisations à l'échelle des filières (Vanloqueren et Baret, 2009; Labatut et Tesnière, 2017; De Herde et al., 2019), la sociologie du travail à l'échelle des systèmes d'élevage, ou plus précisément du sous-système décisionnel (Cournut et Dedieu, 2005).

6.1.2. Caractériser le croisement rotatif comme un cas d'étude prometteur pour analyser la gestion de de la diversité animale dans les systèmes d'élevage

La recherche de modèles alternatifs, parmi lesquels l'agroécologie, a conduit à formuler l'hypothèse que la diversité animale en élevage (*diversité animale* ci-après) constitue un levier majeur pour accroître les capacités d'adaptation des systèmes d'élevage et leur durabilité au sein d'environnements non-optimaux et variables (Darnhofer et al., 2010; Dumont et al., 2013, 2020). Cependant, comme le relèvent

Chapitre de la thèse et résultat principal		**Chapitre 3 :** trajectoires types de transition technique	**Chapitre 4 :** profils de performances de classes génétiques	**Chapitre 5 :** Facteurs explicatifs de l'évolution des performances du troupeau
Type d'approche scientifique développée	A dire d'éleveur·euse·s	×		×
	Données troupeaux, animaux		×	×
Fronts de recherche	Caractériser la diversité animale et comprendre les mécanismes sous-jacents	*	***	***
	Caractériser les modes de gestion de la diversité animale	***	*	**
	Evaluer les bénéfices de la gestion de la diversité animale	**	**	***

Tableau 21 : Types d'approche scientifique adoptée dans chacune des trois chapitres de résultats de la thèse selon le cadre et la contribution de chacune d'eux à trois fronts de recherche identifiés par Magne et al. (2019) pour analyser de manière intégrée la diversité animale en élevage. Le nombre d'étoiles traduit le degré de contribution de chaque chapitre de résultats aux trois fronts de recherche identifiés comme structurant les travaux menés sur la gestion de la diversité animale en élevage : * marginal ; ** important ; *** très important

Magne et al. (2019), les études qui en font la preuve empirique restent encore aujourd'hui peu nombreuses, ce qui offre de multiples perspectives de recherche. Dans cette thèse, nous avons adopté comme objet de recherche le croisement rotatif entre races laitières – qui, par principe, constitue une pratique de diversification génétique des vaches et du troupeau (voir chapitre 1) – et mobilisé des approches qui tenaient compte de la diversité animale, au travers des questions de sa caractérisation, de sa gestion technique et de l'évaluation de ses bénéfices, et ce, en intégrant à l'analyse différents niveaux d'organisation – animal et troupeau – et une perspective évolutive dans le temps de la transition vers un troupeau croisé. Nous allons ici revenir sur nos résultats et montrer comment ceux-ci viennent ainsi contribuer à la fois au champ de recherche portant sur le croisement, en proposant une approche de la diversité animale que son utilisation génère complémentaire à celle généralement adoptée, mais également au champ de recherche sur la diversité animale en élevage, en caractérisant le croisement rotatif comme une cas d'étude prometteur. Pour cela, nous examinerons les contributions de nos résultats aux trois enjeux de recherche sur la diversité animale identifiés par Magne et al., (2019) : (i) approfondir la caractérisation et la compréhension de la diversité animale pour la gérer en élevage, (ii) caractériser les modes de gestion de la diversité animale pertinents pour en tirer parti et (iii) évaluer les bénéfices retirés de celle-ci (Tableau 21)

Caractériser la diversité animale induite par l'utilisation du croisement rotatif. Le premier enjeu concernant la diversité animale est de la catégoriser, afin de l'appréhender plus facilement : en psychologie sociale, le processus de catégorisation renvoie à une activité mentale qui consiste à organiser et à ranger les éléments d'information et conduit à une simplification de la réalité (Edith and Salès-Wuillemin, 2006) De façon élémentaire, catégoriser la diversité au sein d'un troupeau conduit à distinguer des cohortes en fonction de leur sexe, leur âge ou de traits morphologiques. Depuis l'essor de la génétique quantitative et de la mise en place du dispositif d'amélioration génétique, les sciences animales s'appuient sur des artefacts (Hevner et al., 2004) génétiques pour caractériser – et gérer – la diversité animale. L'artefact génétique le plus classiquement utilisé est la race pure, qui constitue le mode de catégorisation sur lequel s'appuie traditionnellement les travaux de recherche en zootechnie (Delaby et al., 2009; Magne et al., 2016) mais aussi ceux des acteur·rice·s

de terrain (Idele et France Conseil Elevage, 2018) pour comparer les performances des animaux entre eux. C'est donc assez logiquement que la catégorisation de la diversité induite par le croisement s'appuie sur des artefacts génétiques similaires : ainsi les comparaisons des valeurs des paramètres de croisement (VanRaden et Sanders, 2003; Dechow et al., 2007; Penasa et al., 2010; Dezetter et al., 2015; Clasen et al., 2017) et de performances (Heins et al., 2012; Malchiodi et al., 2014a; Hazel et al., 2017; Adamczyk et al., 2018; Shonka-Martin et al., 2018; Clasen et al., 2019; McClearn et al., 2020a) s'appuient sur une catégorisation des femelles basée sur leur génotype racial, c'est-à-dire la génération de croisement et la combinaison des races employée (*i.e.* programme de croisement).

Dans cette thèse, les approches que nous avons adoptées pour catégoriser les femelles croisées des troupeaux échantillonnés et comparer leur performances moyennes (voir chapitre 4) et les performances de leurs troupeaux (voir chapitre 5) ne diffèrent pas fondamentalement de celle exposée précédemment : elles se basent respectivement sur le pourcentage de race initiale *i.e.* Holstein, et sur la valeur théorique d'hétérosis et la combinaison de races (*i.e.* nombre de races différentes et ordre). Il s'agit donc d'une méthode de catégorisation plus intégrative, puisqu'elle conduit à assimiler ensemble des individus de même génération de croisement et même schéma de croisement (*e.g.*, G_2 d'un programme de croisement rotatif 3 voies) mais issus de programmes de croisement différents (*e.g.*, Holstein × Montbéliarde × Rouge Scandinave et Holstein × Brune × Jersiaise). Ces modes de catégorisation intégratifs sont peu utilisés dans la littérature sur le croisement (De Haas et al., 2013). Nous avons fait ce choix en raison des limites de notre échantillon (sur lesquelles je reviendrai en 6.2) mais aussi sur la base des résultats des enquêtes en fermes sur les pratiques de croisement (voir chapitre 3). Premièrement, ils ont révélé que le croisement avait été mis en place en raison d'une insatisfaction liée à la faible fertilité et la faible robustesse – sur une base déclarative – des vaches Holstein, qui s'étaient immédiatement améliorées dès la première génération de croisement chez tous les élevages échantillonnés, ce qui était soutenu par la littérature (Buckley et al., 2014; Dezetter et al., 2019) et a été confirmé ensuite par nos résultats (voir chapitres 4 et 5). Deuxièmement, plusieurs éleveur·euses (14 sur 26, appartenant aux groupes de trajectoire de transition technique 1 et 2) géraient de façon transitoire ou constante plusieurs programmes de croisement rotatif en parallèle, ce qui générait une très gran-

-de diversité de génotypes au sein des troupeaux, que les éleveur·euse·s appréhendaient à travers une catégorisation par générations (F_1, G_2, G_3, *etc.*), quelles que soient les races combinées. Cela nous a amené à chercher à tester si l'effet de la valeur théorique d'hétérosis suffisait à elle seule à expliquer en partie les différences de performances entre générations de croisement, quels que soient les programmes considérés. Cette méthode de catégorisation, bien qu'intégrative et donc s'affranchissant de l'effet des races utilisées sur les paramètres du croisement, a permis de mettre en évidence des différences de performances moyennes entre les catégories ainsi définies similaires à celles issues de travaux portant sur des vaches générations de programmes de croisement spécifiques. S'il demande bien sûr à être testé sur d'autres jeux de données pour être consolidé et validé, ce mode de caractérisation s'avère utile pour des approches de type étude de cas (De Haas et al., 2013) et les situations – comme pour cette thèse – où l'échantillon de troupeaux est constitué avant de pouvoir avoir accès aux données généalogiques et de type racial des vaches de ces troupeaux.

Outre ces méthodes de catégorisation de la diversité, nous avons également utilisé un indicateur de quantification de la diversité intra-troupeau en appliquant au cas du troupeau croisé l'indice de Rao (Rao, 1982). Nos résultats ont montré que cet indicateur augmentait continuellement avec l'avancement dans la transition technique vers le croisement et l'évolution de la composition du troupeau induite, et ce dans tous les troupeaux de l'échantillon (voir chapitre 5). Cependant, nos résultats n'ont pas permis de mettre en évidence un lien entre l'évolution de cet indice et l'évolution des performances de troupeaux croisés (voir chapitre 5). Le recours à ce type d'indicateurs mobilisés traditionnellement en écologie pour évaluer la diversité spécifique d'un écosystème (Rocchini et al., 2017) reste rare en zootechnie, ce qui peut être relié au fait que la diversité animale en élevage reste une thématique de recherche peu investiguée (Magne et al., 2019). Tichit et al. (2011) mobilisent l'indice de Shannon-Wiener (Shannon, 1948; Nagendra, 2002; Kok et al., 2020) pour évaluer l'impact de la composition du troupeau de chèvres laitières en groupes de femelles aux profils de performance laitière et d'efficience alimentaire différents mais n'ont pas non plus mis en évidence un lien entre cet indice et le profil de performance. De même, Martin et al. (2017) n'ont pu mettre en évidence une relation entre l'indice de Shannon de troupeaux bovins – laitiers, allaitants et mixtes – et la vulnérabilité des fermes à la variabilité

climatique et économique de l'environnement de production. L'application de tels indicateurs pour caractériser quantitativement la diversité – phénotypique comme dans cette thèse et fonctionnelle dans le cas de l'étude de Tichit et al. (2011) – reste donc une question ouverte et renvoie à des verrous méthodologiques. Néanmoins, nous identifions plusieurs perspectives de recherche, à combiner entre elles. La première est l'adaptation d'autres indicateurs de mesure de la diversité issus du champ de l'écologie ou la construction d'indicateurs propres à la diversité animale en élevage. La deuxième consiste en la mise à l'épreuve de leur caractère explicatif voire prédictif des performances en appliquant leur calcul à des entités animales à différents niveaux d'organisation, identifiées par des études déjà existantes – *e.g.* profils de trade-offs (Ollion et al., 2016), profils *spécialiste/généraliste* (Magne et al., 2016) – ou qui restent à caractériser dans les troupeaux, qu'ils soient croisés, multi-races ou conduit en race pure.

La *diversité fonctionnelle* est reconnue comme étant la forme de diversité la plus intéressante à étudier en zootechnie (Tichit et al., 2011; Magne et al. (2019), en agronomie (Duru et al., 2014) et en écologie (Petchey et al., 2004), au sens qu'elle est la forme de diversité potentiellement valorisable pour l'humain et ses activités impactant les (agro)écosystèmes. Elle est définie par Tichit et al. (2011) comme « *une variété de fonctions assurées par des entités de production individuelles impliquées dans la performance globale* », qui repose donc sur l'association des entités animales à l'échelle du troupeau dans une perspective de combiner leurs aptitudes et de jouer sur les potentielles complémentarités entre elles (Nozières et al., 2011; Blanc et al., 2013). La diversité fonctionnelle est donc une résultante potentielle de la diversité phénotypique ; son émergence dépend de la façon dont l'éleveur·euse associe, gère et valorise cette diversité phénotypique, et donc des modes de gestion à l'échelle du troupeau. Du fait qu'elle prend rarement en compte l'échelle troupeau et encore moins les modes de gestion associés, la littérature sur le croisement rotatif n'a pas investiguée à proprement parler la question de la diversité fonctionnelle. Nos résultats mettent en évidence à travers une approche statique (chapitre 4) et une approche dynamique (chapitre 5) le continuum existant entre la diversité génétique que le croisement génère, la diversité phénotypique qu'elle induit, et enfin la diversité fonctionnelle au sein du troupeau qu'elle supporte. Ainsi, nous avons identifié des classes génétiques *a priori*, sur la base d'indicateurs génétiques (valeur théorique

d'hétérosis, pourcentage de race Holstein, combinaison de races) et montré que ces classes génétiques avaient des profils de performances zootechniques différents concordants avec la théorie du croisement (*e.g.*, maximisation de l'hétérosis en première génération de croisement) et les résultats de la littérature : les F_1 ont des performances de fertilité significativement supérieures aux vaches de race pure (chapitres 4 et 5) et intermédiaires quant à la production laitière et aux taux (chapitre 4), les G_2 de programmes de croisement trois voies ont des performances de fertilité comparables à celles des F_1, des performances laitières inférieures aux F_1 et les performances de taux les plus élevées (chapitre 4). Nous avons également mis en évidence des stratégies d'association à travers des compositions de troupeaux optimales (chapitre 4), identifié des rythmes et modalités de mise en place du croisement différents induisant des modes d'association variés de cette diversité phénotypique (chapitre 3 et 5) qui suggèrent que la méthode de caractérisation de la diversité des entités animales générées par le croisement que nous proposons supporte bien une diversité fonctionnelle. Néanmoins, cette hypothèse demande à être vérifiée en mobilisant un jeu de données issu d'un échantillon plus conséquent.

Caractériser les modes de gestion de la diversité animale induits par l'utilisation du croisement rotatif. L'ancrage de cette thèse dans la zootechnie système et plus particulièrement dans la zootechnie des pratiques (Landais et al., 1988) nous a conduit à caractériser les modes de gestion associés à l'utilisation du croisement rotatif dans le troupeau bovin laitier, selon une perspective temporelle depuis son introduction jusqu'à un troupeau intégralement constitué de vache croisées. Les trois trajectoires-types de transition technique vers l'utilisation du croisement ont permis d'approfondir les connaissances sur les pratiques d'élevage qui génèrent de la diversité animale en mettant en évidence les effets de rythmes d'introduction du croisement différents sur la génération dans le temps d'animaux croisés (voir chapitre 3). Ces trajectoires-types rendent également compte de pratiques d'élevage de gestion des effets différés de cette diversification – *i.e.* l'augmentation de la fertilité du troupeau – qui relèvent de modes de gestion adaptative (Darnhofer et al., 2010). Selon le rythme d'introduction du croisement et les objectifs de l'éleveur·eus·e, ils consistent en une adaptation de la taille du troupeau, des changements dans la gestion du renouvellement du troupeau (taux, critères, usage du croisement viande pour réduire le taux de renouvellement) et

de la réforme (taux, critères). Ainsi, à travers l'exemple de la transition technique induite par la mise en place et la gestion du croisement rotatif dans le troupeau bovin laitier, nos résultats contribuent à caractériser les leviers de génération et de gestion de la diversité animal dans le temps et à différents niveaux organisationnels du système d'élevage.

Cependant, nos résultats s'appuient sur les pratiques de gestion des effets de la diversité animale qui relèvent de la configuration du troupeau (reproduction, renouvellement, réforme) uniquement. Or, d'autres pratiques d'élevage contribuent à la gestion des effets de la diversité animale et n'ont pas été prise en compte dans notre analyse, et notamment les pratiques de conduite alimentaire du troupeau, d'organisation des bâtiments ou de gestion de la traite. Dans la littérature sur le croisement laitier, la diversification des composantes animales au sein du troupeau est davantage vue comme une contrepartie des bénéfices théoriques qui lui sont attribués – hétérosis et complémentarité fonctionnelle – (Dezetter et al., 2019). On parle plus volontiers d'*hétérogénéisation* plutôt que de *diversification*, du fait que l'utilisation du croisement peut engendrer une diversité phénotypique intra-troupeau en matière d'efficience alimentaire (Heins et al., 2008a; Olson et al., 2011; Shonka-Martin et al., 2018) ou de morphologie (Heins et al., 2008b; Blöttner et al., 2011b; Hazel et al., 2014; Shonka-Martin et al., 2018), et entraîner des difficultés dans les modes de conduite du troupeau au quotidien. Ainsi, l'hétérogénéisation morphologique (*e.g.*, gabarit, mamelle) induite par le croisement peut conduire à une valorisation des veaux mâles croisés faible, nécessiter la réorganisation des logettes en stabulation, de la salle de traite ou des appareils de traites (Reinhardt, 2018 ; Magne et al., soumis). L'hétérogénéisation en termes de réponse à la conduite alimentaire peut quant à elle conduire l'éleveur·eus·e à adapter la gestion de celle-ci, selon qu'il/elle souhaite individualiser la conduite alimentaire ou au contraire la généraliser à l'intégralité du troupeau indifféremment : dans le premier cas, cela peut générer un coût en travail – *e.g.*, temps nécessaire à la planification et la gestion d'une telle conduite et charge mentale et associée – et/ou un coût économique – *e.g.*, agriculture de précision : distributeur automatique de concentré, robot de traite – ; dans le second cas, cela peut conduire à un manque d'efficience d'utilisation des ressources alimentaires du système d'élevage. Ces éléments, qui ont été évoqués lors des entretiens réalisés auprès des éleveurs pendant la thèse, mériteraient néanmoins d'être approfondis pour

étudier les reconfigurations du travail en élevage – physique et cognitif – qu'induit la diversification animale associée à la mise en place et la gestion du croisement. Plusieurs travaux suggèrent en effet que les systèmes gérant la diversité requièrent une reconfiguration du travail par leurs gestionnaires (Jouven et Baumont, 2008; Darnhofer et al., 2010; Duru et Therond, 2015).

Evaluer les bénéfices de la diversité animale induite par l'utilisation du croisement rotatif. Comme nous l'avons exposé précédemment, l'utilisation du croisement rotatif supporte une diversité fonctionnelle qui est supposée pouvoir apporter des bénéfices, définis comme les « *avantages que l'éleveur·euse retire de la gestion des processus biologiques et écologiques assurés/supportés par la diversité animale* » (Magne et al., 2019). Le premier bénéfice potentiel de la diversité fonctionnelle générée par le croisement correspond à l'amélioration de la fourniture de produits et coproduits d'élevage, qu'illustre la diversité des profils de performances laitières des différentes classes génétiques que nous avons identifiées (*i.e.* HO, F1 et G2, voir chapitre 4) : la combinaison de ces trois classes génétiques permet la cohabitation au sein du troupeau d'animaux très productifs en volume de lait mais avec des taux de matière relativement faibles (HO), d'animaux au profil inverse, c'est-à-dire peu productifs en volume de lait et aux taux de matière relativement élevés (G_2) et enfin d'animaux au profil intermédiaire (F_1). Cette cohabitation permet en théorie une amélioration de la valorisation de la production laitière du troupeau (Magne et al., 2016), qui reste cependant tributaire de l'environnement socio-économique – marché, grilles de paiement du lait (Courleux et Gaudoin, 2018) des exploitations. Néanmoins, les performances laitières ne constituent pas le seul critère selon lequel sont évalués les bénéfices du croisement (Buckley et al., 2014), ce qui nous a amené à prendre en compte des performances relatives à des traits antagonistes à la production laitière, comme la fertilité ou la santé de la mamelle, dans l'évaluation des bénéfices de la diversité fonctionnelle induite par le croisement à l'échelle du troupeau. Nous avons étudiés les conséquences de ces mécanismes de trade-offs (Ollion et al., 2016) à l'échelle des performances des troupeaux, selon une perspective statique (voir chapitre 4) et une perspective dynamique (voir chapitre 5).

L'analyse des performances des troupeaux selon une perspective statique a consisté à identifier par *surclassement* (*outranking*) des compositions de troupeaux optimisant

les indicateurs de performances zootechniques considérés (productivité laitière des vaches du troupeau, TB et TP moyens, IVIAF moyen et SCS moyen). Nous avons utilisé pour cela l'*optimum de Pareto* (Williams et Kendall, 2017), pris comme un artefact de compromis entre performances formulé par l'éleveur·euse sans pondération *i.e.* sans prioriser l'une ou l'autre performance, ceci afin d'éviter de biaiser le surclassement par des pondérations que nous aurions formulées *ex ante*. Nos résultats ont ainsi mis en évidence des profils de performances optimaux et privilégiant la production laitière pour les compositions de troupeaux HO-F1 et des compromis optimaux et privilégiant les taux et la fertilité pour les compositions de troupeaux F1-G2. Le compromis optimisant le mieux toutes les performances étaient le troupeau intégralement constitué de F1. Ces résultats illustrent que les bénéfices du croisement et de la diversité fonctionnelle qu'il induit à l'échelle du troupeau se discutent au regard de compromis entre performances qu'il n'est pas possible de maximiser toutes simultanément. C'est aussi ce qui constitue une limite à notre travail car la sélection des troupeaux « optimaux » » se base sur un équilibre de performances choisies *a priori*, et dont l'optimalité s'abstrait d'éléments contextuels déterminants dans l'évaluation des performances du troupeau. Ainsi, l'intégration d'une pondération différentielle des critères de performances selon des stratégies-types, obtenues par exemple par une analyse des préférences déclarées par les éleveur·euse·s, pourrait fournir des éléments de discussion opérationnels. En outre, la mobilisation d'indicateurs agrégés économiques, comme c'est généralement le cas pour des évaluations multicritères de troupeaux (Dezetter et al., 2017; Clasen et al., 2020; McClearn et al., 2020b), ou relatifs au temps de travail permettrait de proposer une analyse synthétique et dont les conséquences opérationnelles seraient mieux appréhendables.

L'analyse des performances des troupeaux selon une perspective dynamique a consisté à identifier par régression PLS (*Partial Least Square*) les facteurs explicatifs de l'évolution de performances zootechniques – production laitière totale du troupeau, taux de matière utile moyen, pourcentage de vaches du troupeau très fertiles, pourcentages de vaches du troupeau à lactation saine, pourcentage de vache en troisième lactation et plus – (voir chapitre 5). Nos résultats ont mis en évidence que l'effet du croisement rotatif constituait un facteur explicatif dont le poids relatif variait selon la performance zootechnique considérée et qui ne constituait qu'un facteur

explicatif parmi d'autres relevant de pratiques d'élevage plus systémiques ou de la situation initiale des performances du troupeau, ce qui a été également relevé par Dezetter et al., (2017). Ces résultats soulignent donc que le croisement rotatif constitue une pratique dont les bénéfices sur la multi-performance des troupeaux tiennent moins des objectifs et du niveau d'intensité du système que de la cohérence globale des modes de gestion. Ils rejoignent ainsi ceux de Kargo et al. (2012) qui attestent de l'intérêt économique du croisement quel que soit le niveau d'intensité du système, et ceux de Clasen et al. (2020) qui concluent à l'intérêt économique du croisement en système d'élevage en agriculture biologique comme en agriculture conventionnelle. Nos résultats mettent également en évidence que les contraintes de modélisation adoptées par Dezetter et al. (2017) ou Clasen et al., (2020) imposant un effectif de troupeau constant au cours de la période de simulation constituent un biais. Ensuite, nos résultats mettent en évidence un effet du croisement sur les performances zootechniques qui s'inscrit dans le temps, plus précisément qui s'inscrit différemment selon les générations de croisement, soulignant par-là l'intérêt d'approches dynamiques des effets sur les performances des troupeaux de la diversité fonctionnelle générée par le croisement.

6.2. Analyse critique de la stratégie et du dispositif de recherche

Nous avons construit un dispositif de recherche (voir chapitre 2), qui reposait sur (i) une approche rétrospective d'études de cas de fermes commerciales et l'enrôlement de ces dernières pour constituer l'échantillon par méthode boule de neige et (ii) l'extraction de données de lactations, de généalogies et de types raciaux des troupeaux échantillonnés pour la période de transition technique. Ces choix ont cependant occasionné certaines limites méthodologiques qui seront discutées ici, avec pour ambition de proposer des méthodes et approches alternatives pour les dépasser.

Tout d'abord, l'approche par étude de cas, nous a permis de décrire de façon approfondie les trajectoires techniques selon lesquelles les éleveur·euse·s mettaient en place et géraient le croisement rotatif au sein du troupeau. D'autre part, elle s'avérait adéquate dans la mesure où le croisement est une pratique atypique et que, par conséquent, les systèmes qui la mettent en œuvre méconnus des travaux qui

traitent du croisement selon des approches centrées sur l'analyse des performances. Cependant, en recrutant ces cas d'études parmi des fermes commerciales et en appliquant une méthode d'échantillonnage non-probabiliste (méthode boule de neige), notre dispositif repose sur un échantillon dont la représentativité statistique n'est pas assurée *a priori*, et reste difficile à attester *a posteriori*, dans la mesure où il n'existe pas de base de référence portant sur les pratiques des élevages conduits en croisement. Notre échantillon initial est constitué de 26 fermes, soit 3% des élevages pratiquant le croisement rotatif en France (Dezetter, 2015). Cette limite de l'approche par étude de cas est d'autant plus prégnante dans ce travail que nous avons associé à l'étude des pratiques l'analyse des performances pour ces mêmes troupeaux échantillonnés : aussi, nous avons constitué notre échantillon avant de pouvoir avoir accès aux données généalogiques, raciales et de lactations des troupeaux échantillonnées. Cela nous a conduit à devoir gérer la question – somme toute classique – des données manquantes dans l'échantillon, mais sans disposer d'une marge de manœuvre pour effectuer des ré-échantillonnages moins sélectifs qui aurait pu nous permettre de constituer un échantillon plus conséquent. Néanmoins, la possibilité de réaliser l'échantillonnage en appliquant un tri sur les données des bases du contrôle laitier et du SNIG ne nous a pas semblé adéquate pour traiter notre question : en effet, une fois échantillonnées les lactations des femelles satisfaisant nos critères, nous n'aurions pas pu dans un deuxième temps identifier les fermes et les éleveur·euse·s desquelles elles étaient issues. Or l'étude des modes de conduite nécessitaient de pouvoir contacter et interroger ces éleveur·euse·s car ces informations ne sont pas renseignées dans les bases du contrôle laitier et du SNIG. De plus, la représentativité d'un tel échantillon serait restée discutable, dans la mesure où 60% des élevages bovins laitiers français conduits en agriculture conventionnelle sont inscrits au contrôle laitier (Idele et France Conseil Elevage, 2018) tandis qu'ils sont 53% parmi les élevages conduits en AB (Le Mézec, communication personnelle). La question de la représentativité de notre échantillon se pose notamment à l'aune de l'ambition de cette thèse et de la posture de recherche adoptée : or, comme je l'ai précisé dans le chapitre 2, les résultats de cette thèse visent à enrichir d'une nouvelle perspective la compréhension des implications de l'utilisation du croisement sur les pratiques de configuration du troupeau (chapitre 3), sur la diversification phénotypique et fonctionnelle du troupeau qu'elle génère (chapitre 4) et sur l'évolution des performances du troupeau qu'elle induit (chapitre 5). Mes résultats, même lorsqu'ils

consistent en une catégorisation ou une typologie (*e.g.*, chapitre 3) – dont la forme pousse à la considérer comme « représentative de quelque chose » –, ont bien plus vocation à relever des points de vigilance qui semblent émerger (*e.g.*, les conséquences de l'amélioration de la fertilité sur le fonctionnement démographique du troupeau, la difficulté à valoriser les veaux croisés), à souligner la récurrence ou l'homogénéité de certains éléments (*e.g.*, les conséquences de l'amélioration de la fertilité sur le fonctionnement démographique du troupeau) ou au contraire à rendre compte de l'hétérogénéité d'autres éléments (*e.g.*, le nombre et le type de programmes de croisement mis en place et géré). Nous reviendrons sur ce point au moment où nous examinerons les contributions opérationnelles de nos résultats (voir 6.3).

Ensuite, l'impossibilité d'étudier la mise en place et la gestion du croisement rotatif « en temps réel » dans le temps imparti de la thèse nous a conduit à réaliser une analyse rétrospective, laquelle présente différents biais. Concernant l'analyse rétrospective des pratiques, le dispositif d'enquêtes semi-directives s'est confronté aux risques inhérents de ce type d'approche, à savoir la difficulté de se rappeler de modalités de pratiques ou de logiques d'action remontant parfois 15 années avant la date d'entretien et la reconstruction *a posteriori*. De plus, cette approche rétrospective a rendu les entretiens relativement longs, ce qui nous a conduit à retirer du guide d'entretien une section relative à la conduite alimentaire et sanitaire du troupeau, laquelle fait défaut à ce travail, en particulier parce qu'elle aurait – vraisemblablement – fourni à la fois des facteurs explicatifs de l'évolution des performances zootechniques des troupeaux (*e.g.*, des taux butyreux et protéique) mais également permis d'intégrer aux indicateurs de performances analysés l'efficience en utilisation d'intrants (*e.g.*, concentré ou médicaments). Néanmoins, le risque d'erreur lié à l'approche rétrospective aurait également été élevé dans le recueil de ces informations quantitatives.

Une autre limite de ce travail est la grande diversité de génotypes croisés contenus dans l'échantillon. C'est une autre conséquence de notre choix d'avoir adopté une approche par étude de cas et de l'impossibilité d'évaluer en amont la qualité des données généalogiques pour les femelles des troupeaux échantillonnés. En effet, étant donné que les femelles croisées sont toutes identifiées par le code de type racial 39 – à l'exception des vaches ¾ Holstein (code 60), ¾ Normande (code 50) et ¾ Montbéliarde (code 40) –, la reconstruction de la séquence génétique (*i.e.* de la combi-

-naison ordonnée des types raciaux) de chaque femelle croisée s'est faite en s'appuyant sur les types raciaux parentaux, grand-parentaux et ainsi de suite jusqu'à expliciter entièrement son génotype racial. Outre le temps nécessaire à réaliser une telle opération – pour un échantillon somme toute réduit –, cette opération a conduit à écarter un certain nombre de femelles en raison de l'incomplétude de leur séquence génétique. Elle a également conduit à devoir écarter l'option initialement envisagée de combiner deux entrées pour catégoriser les femelles croisées, par programme de croisement et par génération de croisement correspondante, pour ne finalement conserver que la seconde. En effet, à la difficulté de gérer les séquences génétiques croisées incomplètes s'est ajoutée l'extrême diversité des génotypes croisés d'une exploitation à l'autre, mais aussi et surtout au sein d'une même exploitation. Il a révélé que de nombreux·ses· éleveur·euse·s conduisaient plusieurs programmes de croisement en parallèle, que d'autres ne testaient que transitoirement et sur peu d'animaux certaines combinaisons de races, que certaines contraintes logistiques (*e.g.* pas assez de paillettes d'IA d'une race donnée le jour du passage de l'inséminateur) conduisaient à des écarts à l'application du programme de croisement à la lettre : bref, que de manière générale, se tenir *stricto sensu* à un programme de croisement appliqué sans écart aux femelles du troupeau relevait bien souvent davantage de la théorie que d'une réalité de terrain. Or, dès lors que les produits de ces croisements s'écartant du programme dominant (de départ) sont conservés par l'éleveur·euse puis mis à la reproduction, on comprend vite que les séquences génétiques finissent par être très diverses au sein des troupeaux. Aussi, la catégorisation « classique » utilisée dans les travaux sur le croisement, qui combine programme de croisement et génération de croisement, s'est rapidement avérée insuffisante pour notre échantillon, ce qui nous a conduit à proposer une autre catégorisation de « classes génétiques » que celle centrée sur le programme de croisement. Cela pose la question de la taille de notre échantillon, dont l'extension et/ou la redéfinition pourrait permettre de contourner ces difficultés. Il nous semble cependant plus judicieux de « faire le deuil » d'un échantillon construit sur critères relevant des représentations du croisement par des chercheur·euse·s – *e.g.*, programmes de croisement conduits à la lettre – dès lors que celles-ci s'écartent d'une réalité opérationnelle. Pour venir néanmoins nuancer ceci, le fait que l'échantillon soit en partie constitué d'éleveur·euse·s « pionnier·ère·s » dans la pratique du croisement peut également expliquer la diversité des génotypes croisés de l'échantillon, laquelle pourrait être moindre dans un environnement d'éleva-

-ge où certain·e·s acteur·rice·s proposent aujourd'hui des références et du conseil pour certains programmes de croisement spécifiques, ce qui n'était pas le cas il y a dix ans.

6.3. Implications et perspectives opérationnelles

Les résultats de cette thèse sont issus d'analyses rétrospectives de trajectoires de pratiques et de performances suivies par des troupeaux bovins laitiers au sein desquels est introduit et géré le croisement rotatif. De par la situation de verrouillage de l'environnement sociotechnique des élevages bovins laitiers en race pure, les éleveur·euse·s qui ont opéré cette transition, dont ceux que nous avons échantillonné, constituent des « pionnier·ère·s » de cette pratique en France. A l'issue de ce travail, la question des perspectives opérationnelles de tels résultats pourrait alors se poser en ces termes : « Faut-il conseiller la pratique du croisement rotatif aux éleveur·euse·s de bovins laitiers en général ? » Cette question me parait cependant insuffisante pour rendre compte de l'enjeu que cette pratique constitue et qui renvoie à son caractère hors-norme. Les résultats de cette thèse constituent ainsi des connaissances sur des systèmes alternatifs au modèle dominant de l'élevage bovin laitier, et par conséquent ont une vocation critique à son égard. Au moment d'évaluer les implications et perspectives opérationnelles de ces résultats, un effort de réflexivité m'apparaît nécessaire pour qualifier leur statut et se garder de toute posture normative ou prescriptive quant à leur éventuelle valorisation.

Les modèles de chemins de transition technique vers le croisement rotatif (voir chapitre 3) ont bien sûr un intérêt d'ordre typologique et peuvent à ce titre alimenter la réflexion d'éleveur·euse·s qui envisagent l'introduction du croisement rotatif dans leur troupeau en permettant de se situer par rapport à différentes transitions types, et pour alimenter leurs discussions avec des collègues où des conseiller·ère·s. En caractérisant une diversité de systèmes bovins laitier qui mettent en place le croisement rotatif en France, les résultats de cette thèse vise à enrichir les connaissances sur une pratique – méconnue voire *a priori* dépréciée – que les éleveur·euse·s peuvent mobiliser selon des logiques d'action diverses et au sein de systèmes variés. Ce faisant, ces résultats permettent de généraliser des connaissances qui peuvent être vues comme singulières et par conséquent considérées comme non pertinentes à considérer pour

les éleveur·euse·s ou à suggérer pour les conseiller·ère·s. Par ailleurs, les régularités mises en évidence pour les trois chemins de transition me semblent présenter encore davantage d'intérêt d'un point de vue opérationnel : l'amélioration de la fertilité du troupeau induite par l'introduction du croisement (voir chapitre 5) a ceci d'important qu'elle n'était généralement pas anticipée par les éleveur·euse·s, notamment en raison de l'échec des solutions testées précédemment. Or les conséquences de ce gain de fertilité sur le nombre de génisses à élever – place en bâtiment, alimentation – et l'adaptation de la gestion du renouvellement et de la réforme qui en découle constituent un point de vigilance, en particulier pour des éleveur·euse·s qui souhaiteraient introduire rapidement le croisement.

La méthode de catégorisation des génotypes croisés que nous avons proposée (voir chapitres 4 et 5), bien qu'elle soit moins précise génétiquement parlant que celle consistant à combiner programme et génération de croisement, a montré qu'elle était opérante pour caractériser des vaches au profils de performances contrastés. Cette catégorisation est déjà utilisée en pratique par de nombreux·euses éleveur·euse·s, qui raisonnent sur la base des générations de croisement – et donc indirectement sur le coefficient d'hétérosis et la part de sang de la race pure initiale – pour appréhender la diversité génétique de leur troupeau que génère la conduite de plusieurs programmes de croisement en parallèle. D'autre part, sur la base de cette catégorisation, les compositions de troupeaux aux performances « optimales » que nous avons identifiées nécessitent d'être discutées avec les éleveur·euse·s et les conseiller·ère·s. La méthode de sélection de ces troupeaux et donc d'évaluation de leurs performances zootechnique demande d'intégrer des systèmes de pondération afin de rendre compte des performances zootechniques que priorisent les éleveur·euse·s et des compromis auxquels ils/elles consentent, en fonction de leur système, de leurs objectifs, *etc.* Des ateliers participatifs invitant des éleveur·euse·s gérant le croisement selon des stratégies contrastées pourraient permettre de susciter des discussions sur ce qui fait ou est considéré comme performance dans leur système, comment celle-ci est évaluée (indicateurs, satisfaction, *etc.*), l'importance qui leur est accordée, *etc.*

Enfin, j'identifie quelques pistes d'utilisation des résultats de la thèse dans l'enseignement de la zootechnie. Premièrement, le croisement rotatif en élevage bovin laitier constitue un cas d'étude d'une pratique « hors-norme », dont la présentation constitue une opportunité pour sensibiliser des étudiant·e·s à développer des postures

réflexives sur le contexte et les projets de transformation agricoles. D'autre part, de par l'approche et le dispositif mis en place, les résultats de cette thèse constituent une approche concrète et située du croisement rotatif, c'est-à-dire comme une pratique. Or l'étude de pratiques d'agriculteur·rice·s constitue une porte d'entrée privilégiée pour appréhender les approches systémiques (Sebillotte et Soler, 1988b; Ison, 2012) et présente donc un intérêt pédagogique.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail de thèse était de répondre à la question : *comment évoluent les pratiques de configuration du troupeau bovin laitier et ses performances suite à l'introduction du croisement rotatif ?* Nous avons caractérisé trois trajectoires types de transition vers un troupeau croisé (chapitre 3), qui diffèrent selon l'ampleur des changements systémiques associés à l'introduction du croisement dans le troupeau (changements de faible ampleur *i.e.* maintien du système en place inchangé *vs.* changements de forte ampleur *i.e.* reconception du système *via* une conversion à l'AB ou une transition vers un système herbager et/ou économe) et selon le rythme auquel le croisement a été introduit et la gestion de ses effets différés qu'il induit (introduction rapide induisant un changement de la démographie du troupeau et nécessitant des éleveur·euse·s d'adapter leurs pratiques de configuration du troupeau *vs.* introduction lente et ne nécessitant pas d'ajustements des pratiques de configuration du troupeau). Ces résultats nous ont permis d'instruire la première partie de la question de recherche, à savoir comment évoluent les pratiques de configuration du troupeau au cours de la période d'introduction puis de gestion du croisement rotatif. Ensuite, nous avons analysé l'évolution des performances au cours de cette période à l'échelle du troupeau de deux manières. Premièrement, à partir du pourcentage de gènes Holstein et du coefficient théorique d'hétérosis, nous proposons une catégorisation de trois classes génétiques générées par l'introduction et la gestion du croisement rotatif dans un troupeau de race pure Holstein (chapitre 4) : HO (100 % gènes Holstein), F1 (50 % gènes Holstein) et G2 (25 % de gènes Holstein). Nous avons mis en évidence que ces classes génétiques avaient des performances de production laitière, de reproduction et de santé de la mamelle différentes. Nous avons montré que des troupeaux combinant 60-65% F1 and 35-40% de G2 présentaient des compromis entre performances zootechniques intéressants, en ce sens qu'ils minimisent la perte de volume de lait et maximisent les taux et les performances de reproduction. Nous avons montré que des troupeaux mixant HO-F1 et F1-G2 permettent de jouer sur la complémentarité fonctionnelle des entités génétiques générées par le croisement pour améliorer les multi-performances du troupeau, l'amélioration restant à l'appréciation de l'éleveur·euse et du compromis entre performances qu'il/elle est prêt·e à faire. Deuxièmement, nous avons mis en évidence que le croisement rotatif a un effet significatif sur l'évolution des performances zootechniques des troupeaux (chapitre 5),

mais qu'il constitue un facteur explicatif parmi d'autres, notamment ceux relatifs à des changements systémiques mis en place de façon concomitante au croisement, l'état initial des performances du troupeau ou le stade d'avancement dans la pratique du croisement. Plus spécifiquement, il ressort que la mise en place du croisement rotatif dans des troupeaux de race pure contribue à améliorer leurs performances de fertilité au détriment de la productivité laitière par vache, que la grande majorité des éleveur·euse·s compensent en augmentant l'effectif du troupeau. Les effets du croisement sur l'évolution des taux de matière utile (*TMU* ci-après), de la santé de la mamelle et la longévité des vaches ressortent comme plus contrastés. Enfin, l'effet du croisement rotatif constitue un facteur explicatif dont le poids relatif – en comparaison d'autres facteurs – varie selon la performance considérée. Il est prépondérant dans l'évolution des performances de fertilité, de TMU et de santé de la mamelle. Il est élevé mais non prépondérant dans l'évolution de la production laitière du troupeau et de la longévité du troupeau, où d'autre facteurs ont un poids relatif supérieur (*e.g.*, évolution de l'effectif du troupeau). Ces résultats viennent tout d'abord compléter les connaissances sur le croisement laitier par une analyse des modes opérationnels de son introduction et de sa conduite. Ensuite, ces résultats rendent compte de l'articulation entre les dimensions biologiques et décisionnelles qui construisent sur le long terme la multiperformance des troupeaux. Cette thèse contribue ce faisant à approfondir les connaissances sur la transition de systèmes d'élevage basés sur la valorisation de la diversité animale. En termes opérationnels, cette thèse produit des résultats – modèles-types de trajectoires techniques de transition et modèles d'évolution des performances des troupeaux – mobilisables par les éleveur·euse·s et les conseiller·ère·s qui les accompagnent dans la mise en place de la pratique du croisement laitier.

Références bibliographiques

Abdi H and Valentin D 2007. Multiple correspondence analysis. In Encyclopedia of measurement and statistics (ed. N. Salkind), pp. 1–14. SAGE Publications, Thousand Oaks, CA, USA.

Adamczyk, K., W. Jagusiak, and J. Makulska. 2018. Analysis of lifetime performance and culling reasons in Black-and-White Holstein-Friesian cows compared with crossbreds. Ann. Anim. Sci. 18:1061–1079. doi:10.2478/aoas-2018-0036.

Agreste. 2013. Les exploitations laitières bovines en France métropolitaine - Recensement Agricole 2010. Agreste Primeur 308:1–8.

Ahlborn-Breier, G., and W.D. Hohenboken. 1991. Additive and Nonadditive Genetic Effects on Milk Production in Dairy Cattle: Evidence for Major Individual Heterosis. J. Dairy Sci. 74:592–602. doi:10.3168/jds.S0022-0302(91)78206-4.

Ahlman, T., B. Berglund, L. Rydhmer, and E. Strandberg. 2011. Culling reasons in organic and conventional dairy herds and genotype by environment interaction for longevity. J. Dairy Sci. 94:1568–1575. doi:10.3168/jds.2010-3483.

Allain, C., A. Chanvallon, P. Clement, R. Guatteo, and N. Bareille. 2014. Scope, applications and prospective of precision dairy and beef farming 3–10.

Allaire, F.R., and J.P. Gibson. 1992. Genetic Value of Herd Life Adjusted for Milk Production. J. Dairy Sci. 75:1349–1356. doi:10.3168/jds.S0022-0302(92)77886-2.

Altieri, M.A. 2002. Agroecology: The Science of Natural Resource Management for Poor Farmers in Marginal Environments. Agric. Ecosyst. Environ. 93:1–24. doi:10.1016/S0167-8809(02)00085-3.

Amaratunga, D., D. Baldry, M. Sarshar, and R. Newton. 2002. Quantitative and qualitative research in the built environment: application of “mixed” research approach. Work Study 51:17–31. doi:10.1108/00438020210415488.

Aubry, C., and Y. Chiffoleau. 2009. Le développement des circuits courts et l’agriculture périurbaine: histoire, évolution en cours et questions actuelles. Innov. Agron. 5:53–67.

de Bakker, E., and H. Dagevos. 2012. Reducing Meat Consumption in Today’s Consumer Society: Questioning the Citizen-Consumer Gap. J. Agric. Environ. Ethics 25:877–894. doi:10.1007/s10806-011-9345-z.

Barlatier, P.-J. 2018. Les études de cas. Collection. F. Chevalier, ed. EMS Editions.

Barnes, A., L.A. Sutherland, L. Toma, K. Matthews, and S. Thomson. 2016. The effect of the Common Agricultural Policy reforms on intentions towards food production: Evidence from livestock farmers. Land use policy 50:548–558. doi:10.1016/j.landusepol.2015.10.017.

Barrientos-Blanco, J.A., N.M. Thompson, N.J.O. Widmar, C.A. Wolf, and L. Unruh Snyder. 2018. Expected value of crossbred dairy cattle artificial insemination breeding strategies in virgin heifers and lactating cows. Livest. Sci. 211:66–74. doi:10.1016/j.livsci.2018.03.005.

Beaumard, D., E. Apper-Bossard, Y. Lautrou, and S. Couvreur. 2010. Les stratégies de croisement entre races laitières et leurs déterminants dans les élevages bovins français Current trends of crossbreeding use within French dairy farms. Rencontres Rech. Ruminants 17:435.

Benoit, M., and G. Laignel. 2011. Analyse sur le long terme de systèmes d'élevage ovins allaitants en France. Quelles trajectoires et quels facteurs de réussite économique?. Prod. Anim. 24:211–220. doi:10.20870/productions-animales.2011.24.3.3256.

Berry, D.P., E. Wall, and J.E. Pryce. 2014. Genetics and genomics of reproductive performance in dairy and beef cattle 105–121. doi:10.1017/S1751731114000743.

Bidanel, J.-P. 2020. L'apport du croisement et les plans de croisement. E. Verrier, D. Milan, and C. Rogel-Gaillard, ed. Quae.

Bidanel, J. 1992. Comment exploiter la variabilité génétique entre races : du croisement simple à la souche synthétique To cite this version : Comment exploiter la variabilité génétique souche synthétique (effets effets.

Biernacki, P., and D. Waldorf. 1981. Snowball Sampling: Problems and Techniques of Chain Referral Sampling. Sociol. Methods Res. 10:141–163. doi:10.1177/004912418101000205.

Bigaret, S., and R.E. Hodgett. 2017. Supporting the Multi-Criteria Decision Aiding process : R and the MCDA package. EURO J. Decis. Process. 5:25. doi:0000-0002-4351-7240.

Blanc-Pamard, C., J.-P. Deffontaines, and C. Friedberg. 1992. Techniques et pratiques : à la jonction du naturel et du social. M. Jollivet, ed. CNRS Editions, Paris.

Blanc, F., E. Ollion, L. Puillet, L. Delaby, S. Ingrand, M. Tichit, and N.C. Friggens. 2013. Evaluation quantitative de la robustesse des animaux et du troupeau : quels principes retenir ? Principles for a quantitative evaluation of robustness at the animal and herd levels. Rencontres Rech. Ruminants 265–272.

Blöttner, S., B.J. Heins, M. Wensch-Dorendorf, L.B. Hansen, and H.H. Swalve. 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. J. Dairy Sci. 94:5212–5216. doi:10.3168/jds.2011-4255.

Blöttner, S., B.J. Heins, M. Wensch-Dorendorf, L.B. Hansen, and H.H. Swalve. 2011b. Brown Swiss × Holstein crossbreds compared with pure Holsteins for calving traits, body weight, backfat thickness, fertility, and body measurements. J. Dairy Sci. 94:1058–1068. doi:10.3168/jds.2010-3305.

Boichard, P.D., S. Mattalia, and S. Fritz. 2017. Selection of cattle: Situation and perspectives [La sélection dans l'espèce bovine et ses perspectives]. Bull. Acad. Vet. Fr. 170:215–221. doi:10.4267/2042/66513.

Van den Borne, B.H.P., J.C.M. Vernooij, A.M. Lupindu, G. van Schaik, K. Frankena, T.J.G.M. Lam, and M. Nielen. 2011. Relationship between somatic cell count status and subsequent clinical mastitis in Dutch dairy cows. Prev. Vet. Med. 102:265–273. doi:10.1016/j.prevetmed.2011.07.013.

Bougouin, M.H., and P. Le Mézec. 2010. Le croisement entre races laitières en France vu par les bases de données. Dairy crossbreeding in France : first pictures from data bases. Rencontres Rech. Ruminants 17:464.

Bourgeois, L., and M. Demotes-Mainard. 2000. Les cinquante ans qui ont changé l'agriculture française. Econ. Rural. 14–20.

Bouttes, M., N. Bize, G. Maréchal, G. Michel, M.S. Cristobal, and G. Martin. 2019. Conversion to organic farming decreases the vulnerability of dairy farms. Agron. Sustain. Dev. 39. doi:10.1007/s13593-019-0565-3.

Bouttes, M., I. Darnhofer, and G. Martin. 2018. Converting to organic farming as a way to

enhance adaptive capacity. Agron. Sustain. Dev. 9:235–247.

Brandt, G.W., C.C. Brannon, and W.E. Johnston. 1974. Production of Milk and Milk Constituents by Brown Swiss, Holsteins, and Their Crossbreds. J. Dairy Sci. 57:1388–1393. doi:10.3168/jds.S0022-0302(74)85072-1.

Brochard, M., D. Boichard, V. Ducrocq, and S. Fritz. 2013. La sélection pour des vaches et une production laitière plus durables : Acquis de la génétique et opportunités offertes par la sélection génomique. INRA Prod. Anim. 26:145–156.

Brun, J.-M. 1992. Définition et mesure des paramètres du croisement. INRA Prod. Anim. Hors série:101–105.

Brussaard, L., P. Caron, B. Campbell, L. Lipper, S. Mainka, R. Rabbinge, D. Babin, and M. Pulleman. 2010. Reconciling biodiversity conservation and food security: Scientific challenges for a new agriculture. Curr. Opin. Environ. Sustain. 2:34–42. doi:10.1016/j.cosust.2010.03.007.

Buckley, F., N. Lopez-Villalobos, and B.J. Heins. 2014. Crossbreeding: implications for dairy cow fertility and survival. Animal 8:122–133. doi:10.1017/S1751731114000901.

Buttel, F.H. 2006. Sustaining the unsustainable: agro-food systems and environment in the modern world. P. Cloke, T. Mardsen, and P.H. Mooney, ed. SAGE Publications Ltd.

Caron, P., E. Biénabe, and E. Hainzelin. 2014. Making transition towards ecological intensification of agriculture a reality: The gaps in and the role of scientific knowledge. Curr. Opin. Environ. Sustain. 8:44–52. doi:10.1016/j.cosust.2014.08.004.

Chantre, E. 2011. Apprentissages des agriculteurs vers la réduction d'intrants en grandes cultures : Cas de la Champagne Berrichonne dans les années 1985-2010. AgroParisTech,.

Chantre, E., M. Cerf, and M. Le Bail. 2015. Transitional pathways towards input reduction on French field crop farms. Int. J. Agric. Sustain. 13:69–86. doi:10.1080/14735903.2014.945316.

Cialdella, N., L. Dobremez, and S. Madelrieux. 2009. Livestock farming systems in urban mountain regions: Differentiated paths to remain in time. Outlook Agric. 38:127–135. doi:10.5367/000000009788632412.

Clark, B., G.B. Stewart, L.A. Panzone, I. Kyriazakis, and L.J. Frewer. 2016. A Systematic Review of Public Attitudes, Perceptions and Behaviours Towards Production Diseases Associated with Farm Animal Welfare. J. Agric. Environ. Ethics 29:455–478. doi:10.1007/s10806-016-9615-x.

Clasen, J.B., W.F. Fikse, M. Kargo, L. Rydhmer, E. Strandberg, and S. Østergaard. 2020. Economic consequences of dairy crossbreeding in conventional and organic herds in Sweden. J. Dairy Sci. 103:514–528. doi:10.3168/jds.2019-16958.

Clasen, J.B., A. Fogh, and M. Kargo. 2019. Differences between performance of F1 crossbreds and Holsteins at different production levels. J. Dairy Sci. 102:436–441. doi:10.3168/jds.2018-14975.

Clasen, J.B., E. Norberg, P. Madsen, J. Pedersen, and M. Kargo. 2017. Estimation of genetic parameters and heterosis for longevity in crossbred Danish dairy cattle. J. Dairy Sci. 100:6337–6342. doi:10.3168/jds.2017-12627.

CNRTL. Définition de Race. Accessed July 29, 2020a. https://www.cnrtl.fr/definition/race/substantif.

CNRTL. Définition d'anomalie. Accessed November 19, 2020b.

https://www.cnrtl.fr/definition/Anomalie.

Coffey, E.L., B. Horan, R.D. Evans, and D.P. Berry. 2016. Milk production and fertility performance of Holstein, Friesian, and Jersey purebred cows and their respective crosses in seasonal-calving commercial farms. J. Dairy Sci. 99:5681–5689. doi:10.3168/jds.2015-10530.

Cole, J.B., and P.M. VanRaden. 2018. Symposium review: Possibilities in an age of genomics: The future of selection indices1. J. Dairy Sci. 101:3686–3701. doi:10.3168/jds.2017-13335.

Commission Européenne. 2018. RAPPORT DE LA COMMISSION AU CONSEIL ET AU PARLEMENT EUROPÉEN relatif à la mise en œuvre de la directive 91/676/CEE du Conseil concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles, sur la base des rapports ét.

Coquil, X., B. Dedieu, and P. Béguin. 2017. Professional transitions towards sustainable farming systems: The development of farmers' professional worlds. Work 57:325–337. doi:10.3233/WOR-172565.

Cordellier, S. 2013. Autonomie, dépendance et division du travail paysan. Pour 218:22–30. doi:10.3917/pour.218.0022.

Courleux, F., and C. Gaudoin. 2018. Les enseignements de la politique laitière américaine en matière de partage de la valeur ajoutée; Une voie de réforme de la PAC pour réorganiser la production laitière française.

Cournut, S., S. Chauvat, P. Correa, J. Carneiro, D. Santos, F. Dieguez, N. Hostiou, D.K. Pham, M.T. Sraïri, A. Turlot, S. Cournut, S. Chauvat, P. Correa, J. Carneiro, D. Santos, and F. Dieguez. 2018. Analyzing work organization on livestock farm by the Work Assessment Method. Agron. Sustain. Dev. 38:16.

Cournut, S., and B. Dedieu. 2005. Simplification des conduites d'élevage en bovins laitiers. Cah. Agric. 14:541–547.

Cristofari, H. 2018. Une analyse pragmatiste des processus d'apprentissage en agroécologie : le cas de l'agriculture de conservation. Université Toulouse 3 Paul Sabatier,.

Cristofini, B., J.-P. Deffontaines, C. Raichon, and B. De Verneuil. 1978. Pratiques d'élevage en Castagniccia. Exploration d'un milieu naturel et social en Corse. Etud. Rurales 71:89–109. doi:10.3406/rural.1978.2423.

Crowe, S., K. Cresswell, A. Robertson, G. Huby, A. Avery, and A. Sheikh. 2011. The Case Study Approach. BMC Med. Res. Methodol. 11. doi:10.1177/108056999305600409.

DairyNZ. 2018. Economic Values - DairyNZ. Accessed February 10, 2021. https://www.dairynz.co.nz/animal/animal-evaluation/interpreting-the-info/economic-values/.

DairyNZ. 2020. Animal Evaluation: Cow and Herd Averages. Accessed November 25, 2020. https://www.dairynz.co.nz/animal/animal-evaluation/animal-and-herd-averages/#category=sires&breed=all&status=ras Accessed: 05/05/2020.

Darnhofer, I., S. Bellon, B. Dedieu, and R. Milestad. 2010. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. Agron. Sustain. Dev. 30:545–555.

Darnhofer, I., W. Schneeberger, and B. Freyer. 2005. Converting or not converting to organic farming in Austria: Farmer types and their rationale. Agric. Human Values 22:39–52.

Darré, J.-P., A. Mathieu, and J. Lasseur. 2004. Le Sens Des Pratiques; Conceptions d'agriculteurs et Modèles d'agronomes. INRA Editions, Versailles, France.

Dassonneville, R., A. Barbat-Leterrier, A. Gion, H. Larroque, and V. Ducrocq. 2009. Estimation de paramètres génétiques de nouveaux caractères fonctionnels pour les bovins laitiers. Page 301 in 16èmes Rencontres Recherches Ruminants.

David, P.A. 1985. Clio and the Economy of QWERTY. Am. Econ. Rev. 75:332–337. doi:10.2104/ha080079.

Dechow, C.D., G.W. Rogers, J.B. Cooper, M.I. Phelps, and A.L. Mosholder. 2007. Milk, Fat, Protein, Somatic Cell Score, and Days Open Among Holstein, Brown Swiss, and Their Crosses. J. Dairy Sci. 90:3542–3549. doi:10.3168/jds.2006-889.

Dedieu, B., P. Faverdin, J.-Y. Dourmad, and A. Gibon. 2008. Système d'élevage, un concept pour raisonner les transformations de l'élevage. INRA Prod. Anim. 21:45–58.

Dedieu, B., S. Gérard, S. Madelrieux, L. Dobremez, and S. Cournut. 2006. Comment appréhender conjointement les changements techniques et les changements du travail en élevage ?. Cah. Agric. 15:506–513.

Delaby, L., P. Faverdin, G. Michel, C. Disenhaus, and J.-L. Peyraud. 2009. Effect of different feeding strategies on lactation performance of holstein and normande dairy cows. Animal 3:891–905. doi:10.1017/S1751731109004212.

Delanoue, E., A. Dockes, C. Roguet, and P. Magdelaine. 2015. Points de vue et attentes des acteurs de la société envers l'élevage Un regard sur les principales controverses. Page 8 in Rencontres Recherches Ruminants.

Dervillé, M., and G. Allaire. 2014. Quelles perspectives pour les filières laitières de montagne après la suppression des quotas laitiers? Une approche en termes de régime de concurrence. Prod. Anim. 27:17–30. doi:10.20870/productions-animales.2014.27.1.3051.

Dezetter, C. 2015. Evaluation de l'intérêt du croisement entre races bovines laitières. Université Nantes-Angers-Le Mans,.

Dezetter, C., N. Bareille, D. Billon, C. Côrtes, C. Lechartier, and H. Seegers. 2017. Changes in animal performance and profitability of Holstein dairy operations after introduction of crossbreeding with Montbéliarde, Normande, and Scandinavian Red. J. Dairy Sci. 100:8239–8264. doi:10.3168/JDS.2016-11436.

Dezetter, C., D. Boichard, N. Bareille, B. Grimard, P. Le Mézec, and V. Ducrocq. 2019. Le croisement entre races bovines laitières : intérêts et limites pour des ateliers en race pure Prim ' Holstein ?. INRA Prod. Anim. 32:359–378.

Dezetter, C., H. Leclerc, S. Mattalia, A. Barbat, D. Boichard, and V. Ducrocq. 2015. Inbreeding and crossbreeding parameters for production and fertility traits in Holstein, Montbéliarde, and Normande cows. J. Dairy Sci. 98:4904–4913. doi:10.3168/jds.2014-8386.

Diaz, M., I. Darnhofer, C. Darrot, and J.-E. Beuret. 2013. Green tides in Brittany: What can we learn about niche-regime interactions?. Environ. Innov. Soc. Transitions 8:62–75. doi:10.1016/j.eist.2013.04.002.

Dollé, J.B., L. Delaby, S. Plantureux, S. Moreau, B. Amiaud, A. Charpiot, V. Manneville, A. Chanseaume, H. Chambaut, and A. Le Gall. 2013. Impact environnemental des systèmes bovins laitiers français. INRA Prod. Anim. 26:207–220.

Droz, Y., V. Miéville-Ott, D. Jacques-Jouvenot, and G. Lafleur. 2014. Malaise En Agriculture; Une Approche Interdisciplinaire Des Politiques Agricoles : France-Québec-Suisse.

Dumont, B., L. Fortun-Lamothe, M. Jouven, M. Thomas, and M. Tichit. 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. Animal

7:1028–1043. doi:10.1017/S1751731112002418.

Dumont, B., E. González-García, M. Thomas, L. Fortun-Lamothe, C. Ducrot, J.-Y.Y. Dourmad, and M. Tichit. 2014. Forty research issues for the redesign of animal production systems in the 21st century. Animal 8:1382–1393. doi:10.1017/S1751731114001281.

Dumont, B., L. Puillet, G. Martin, D. Savietto, J. Aubin, S. Ingrand, V. Niderkorn, L. Steinmetz, and M. Thomas. 2020. Incorporating Diversity Into Animal Production Systems Can Increase Their Performance and Strengthen Their Resilience. Front. Sustain. Food Syst. 4:15. doi:10.3389/fsufs.2020.00109.

Duncan, O.D., and B. Duncan. 1955. A Methodological Analysis of Segregation Indexes. Am. Sociol. Rev. 20:210–217. doi:10.2307/2088328.

Duru, M. 1988. Le concept de modèle général et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole. Comptes rendus l'Académie d'agriculture Fr. 74:81–93.

Duru, M., C. Jouany, X. Le Roux, M.L. Navas, and P. Cruz. 2014. From a conceptual framework to an operational approach for managing grassland functional diversity to obtain targeted ecosystem services: Case studies from French mountains. Renew. Agric. Food Syst. 29:239–254. doi:10.1017/S1742170513000306.

Duru, M., and O. Therond. 2015. Livestock system sustainability and resilience in intensive production zones: which form of ecological modernization?. Reg. Environ. Chang. 15:1651–1665. doi:10.1007/s10113-014-0722-9.

Duru, M., O. Therond, and M. Fares. 2015. Designing agroecological transitions; A review. Agron. Sustain. Dev. 35:1237–1257. doi:10.1007/s13593-015-0318-x.

Edith, S.-W., and E. Salès-Wuillemin. 2006. La Catégorisation et Les Stéréotypes En Psychologie Sociale. Psycho Sup Psychologie sociale. Dunod, Paris.

Elzen, B., B. Van Mierlo, and C. Leeuwis. 2012. Anchoring of innovations: Assessing Dutch efforts to harvest energy from glasshouses. Environ. Innov. Soc. Transitions. doi:10.1016/j.eist.2012.10.006.

FAO. 2006. Livestock's long shadow.

FAO. 2015. The Second Report on the State of the World's Animal Genetic Resources for Food and Agriculture. B.D. Scherf and P. D., ed. FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments., Rome.

Ferris, C.P., P.J. Purcell, A.W. Gordon, T. Larsen, and M. Vestergaard. 2018. Performance of Holstein and Swedish-Red × Jersey/Holstein crossbred dairy cows within low- and medium-concentrate grassland-based systems. J. Dairy Sci. 101:7258–7273. doi:10.3168/jds.2017-14107.

Fiorelli, C., J. Porcher, and B. Dedieu. 2007. Pourquoi faire de l'élevage quand on a un autre travail ?. Rencontre Rech. Ruminants 14:389–392.

Foley, J.A., R. Defries, G.P. Asner, C. Barford, G. Bonan, S.R. Carpenter, F.S. Chapin, M.T. Coe, G.C. Daily, H.K. Gibbs, J.H. Helkowski, T. Holloway, E.A. Howard, C.J. Kucharik, C. Monfreda, J.A. Patz, I.C. Prentice, N. Ramankutty, and P.K. Snyder. 2005. Global Consequences of Land Use. Science (80-.). 8:570–574. doi:10.1126/science.1111772.

Fourichon, C., H. Seegers, F. Beaudeau, L. Verfaille, and N. Bareille. 2001. Health-control costs in dairy farming systems in western France. Livest. Prod. Sci. 68:141–156. doi:10.1016/S0301-6226(00)00248-7.

France Génétique Elevage. 2010. Dispositif Génétique Chiffres clés.

FranceAgriMer. 2013. Les filières de l'élevage français.

FranceAgriMer. 2016a. Évolution des structures de production laitière en France Dernière image sous le régime des quotas laitiers.

FranceAgriMer. 2016b. La filière du lait de vache biologique en France 2016.

Freyer, G., S. König, B. Fischer, U. Bergfeld, and B.G. Cassell. 2008. Invited Review: Crossbreeding in Dairy Cattle From a German Perspective of the Past and Today. J. Dairy Sci. 91:3725–3743. doi:10.3168/jds.2008-1287.

Le Gal, P.Y., P. Dugué, G. Faure, and S. Novak. 2011. How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level? A review. Agric. Syst. 104:714–728. doi:10.1016/j.agsy.2011.07.007.

García-Martínez, A., A. Olaizola, and A. Bernués. 2009. Trajectories of evolution and drivers of change in European mountain cattle farming systems. Animal 3:152–165. doi:10.1017/s1751731108003297.

Garrido, A., B. Brümmer, R. M'Barek, M. Meuwissen, and C. Morales-Opazo eds. . 2016. Agricultural Markets Instability: Revisiting the Recent Food Crises. 1st Editio. Routledge.

Gauly, M., H. Bollwein, G. Breves, K. Brügemann, S. Dänicke, G. Daş, J. Demeler, H. Hansen, J. Isselstein, S. König, M. Lohölter, M. Martinsohn, U. Meyer, M. Potthoff, C. Sanker, B. Schröder, N. Wrage, B. Meibaum, G. Von Samson-Himmelstjerna, H. Stinshoff, and C. Wrenzycki. 2013. Future consequences and challenges for dairy cow production systems arising from climate change in Central Europe - A review. Animal 7:843–859. doi:10.1017/S1751731112002352.

Geels, F.W. 2002. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. Res. Policy 31:1257–1274. doi:10.1016/S0048-7333(02)00062-8.

Geels, F.W. 2004. From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. Res. Policy 33:897–920. doi:10.1016/j.respol.2004.01.015.

Geels, F.W., and J. Schot. 2007. Typology of sociotechnical transition pathways. Res. Policy 36:399–417. doi:10.1016/j.respol.2007.01.003.

Gibon, A. 1981. Pratiques d'éleveurs et résultats d'élevage dans les Pyrénées Centrales, logique de la conduite des troupeaux et possibilités d'amélioration. INA Paris-Grignon, Paris,.

GIEC. 2013. Résumé à l'intention des décideurs, Résumé technique et Foire aux questions.

Girard, N., M. Duru, L. Hazard, and D. Magda. 2008. Categorising farming practices to design sustainable land-use management in mountain areas. Agron. Sustain. Dev. 28:333–343. doi:10.1051/agro:2007046.

Gliessman, S.R., E. Engles, and R. Krieger. 1998. Agroecology : Ecological Processes in Sustainable Agriculture. E. Engles, ed. Lewis Publishers.

Goddard, M. 2009. Genomic selection: Prediction of accuracy and maximisation of long term response. Genetica 136:245–257. doi:10.1007/s10709-008-9308-0.

Goodman, L.A. 1961. Snowball Sampling. Ann. Math. Stat. 32:148–170.

Goreaud, F. 2004. Introduction à la Modélisation stochastique en écologie. Page 152 in Mastère Ecologie, Biodiversité et Evolution Module "Ecologie Théorique et statistiques de l'écologie," Paris 6 - Paris XI - ENS - INAPG.

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 7:655–664. doi:10.1017/S1751731112002042.

Halachmi, I., and M. Guarino. 2016. Editorial: Precision livestock farming: A “per animal” approach using advanced monitoring technologies. Animal 10:1482–1483. doi:10.1017/S1751731116001142.

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

Hazel, A.R., B.J. Heins, and L.B. Hansen. 2017. Fertility, survival, and conformation of Montbéliarde × Holstein and Viking Red × Holstein crossbred cows compared with pure Holstein cows during first lactation in 8 commercial dairy herds. J. Dairy Sci. 100:9447–9458. doi:10.3168/jds.2017-12824.

Hazel, A.R., B.J. Heins, and L.B. Hansen. 2020. Fertility and 305-day production of Viking Red-, Montbéliarde- , and Holstein-sired crossbred cows compared with Holstein cows during their first 3 lactations in Minnesota dairy herds. J. Dairy Sci.. doi:10.3168/jds.2020-18196.

Hazel, A.R., B.J. Heins, A.J. Seykora, and L.B. Hansen. 2014. Production, fertility, survival, and body measurements of Montbéliarde-sired crossbreds compared with pure Holsteins during their first 5 lactations. J. Dairy Sci. 97:2512–2525. doi:10.3168/jds.2013-7063.

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. doi:10.3168/jds.2011-4523.

Heins, B.J., L.B. Hansen, and A.J. Seykora. 2006. Fertility and Survival of Pure Holsteins Versus Crossbreds of Holstein with Normande, Montbeliarde, and Scandinavian Red. J. Dairy Sci. 89:4944–4951. doi:10.3168/jds.s0022-0302(06)72545-0.

Heins, B.J., L.B. Hansen, A.J. Seykora, A.R. Hazel, D.G. Johnson, and J.G. Linn. 2008a. Crossbreds of Jersey x Holstein compared with pure Holsteins for body weight, body condition score, dry matter intake, and feed efficiency during the first one hundred fifty days of first lactation. J. Dairy Sci. 91:3716–3722. doi:10.3168/jds.2008-1094.

Heins, B.J., L.B. Hansen, A.J. Seykora, A.R. Hazel, D.G. Johnson, and J.G. Linn. 2011. Short communication: Jersey × Holstein crossbreds compared with pure Holsteins for production, mastitis, and body measurements during the first 3 lactations. J. Dairy Sci. 94:501–506. doi:10.3168/jds.2010-3232.

Heins, B.J., L.B. Hansen, A.J. Seykora, D.G. Johnson, J.G. Linn, J.E. Romano, and A.R. Hazel. 2008b. Crossbreds of Jersey×Holstein Compared with Pure Holsteins for Production, Fertility, and Body and Udder Measurements During First Lactation. J. Dairy Sci. 91:1270–1278. doi:10.3168/jds.2007-0564.

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. doi:10.3168/jds.2011-4525.

De Herde, V., K. Maréchal, and P. V. Baret. 2019. Lock-ins and agency: Towards an embedded approach of individual pathways in the Walloon dairy sector. Sustain. 11:1–19. doi:10.3390/su11164405.

Hevner, A.R., S.T. March, J. Park, and S. Ram. 2004. Design science in information systems research. MIS Q. Manag. Inf. Syst. 28:75–105. doi:10.2307/25148625.

Hill, S.B., and R.J. MacRae. 1995. Conceptual Framework for the Transition from Conventional to Sustainable Agriculture. J. Sustain. Agric. 7:81–87. doi:10.1300/j064v07n01_07.

Hoffmann, I. 2010. Climate change and the characterization, breeding and conservation of animal genetic resources. Anim. Genet. 41:32–46. doi:10.1111/j.1365-2052.2010.02043.x.

Husson, A.F., and J. Josse. 2020. Package “missMDA”. Handling Missing Values with Multivariate Data Analysis 41.

ICBF. 2018. What Is EBI? - ICBF. Accessed February 10, 2021. https://www.icbf.com/wp/?p=5772.

Idele. 2017. Le Point Sur l’IPE En 2017. Accessed August 19, 2020. http://idele.fr/no_cache/recherche/publication/idelesolr/recommends/le-point-sur-lipe-en-2017.html.

Idele. 2019. Les chiffres clés du GEB - Bovins 2019 - Productions lait et viande 12.

Idele, and FCEL. 2015. Résultats CL Bovins 2015. Accessed.

Idele, and France Conseil Elevage. 2018. Résultats De Contrôle Laitier - Espece Bovine France 2018.

Inchaisri, C., R. Jorritsma, P.L.A.M. Vos, G.C. van der Weijden, and H. Hogeveen. 2010. Economic consequences of reproductive performance in dairy cattle. Theriogenology 74:835–846. doi:10.1016/j.theriogenology.2010.04.008.

Ingram, J. 2008. Agronomist-farmer knowledge encounters : an analysis of knowledge exchange in the context of best management practices in England. Agric. Human Values 405–418. doi:10.1007/s10460-008-9134-0.

Ingrand, S., and B. Dedieu. 1996. Diversité des formules d’allotement en élevage bovin viande. Le cas d’exploitations du Limousin. INRA Prod. Anim. 9:189–199.

Ingrand, S., and B. Dedieu. 2007. Représenter graphiquement la conduite d’élevage pour la comprendre et l’analyser : principes de construction des schémas d’allotement.. Cah. Tech. Inra 61:17–36.

Ingvartsen, K.L., R.J. Dewhurst, and N.C. Friggens. 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. Livest. Prod. Sci. 83:277–308. doi:10.1016/S0301-6226(03)00110-6.

Institut de l’Elevage, and France Conseil Elevage. 2016. Résultats du contrôle laitier en espèce bovine.

Ison, R. 2012. Systems practice : making the systems in Farming Systems Research effective. I. Darnhofer, D. Gibbon, and B. Dedieu, ed. Springer, New York London.

Itier, B., and B. Seguin. 2007. La sécheresse : caractérisation et occurrence, en lien avec le climat et l’hydrologie. Fourrages 190:147–162.

Jönsson, R. 2015. Estimation of heterosis and performance of crossbred Swedish dairy cows. Swedish University of Agricultural Sciences,.

Jouven, M., and R. Baumont. 2008. Simulating grassland utilization in beef suckler systems to investigate the trade-offs between production and floristic diversity. Agric. Syst. 96:260–272. doi:10.1016/j.agsy.2007.10.001.

Kargo, M., P. Madsen, and E. Norberg. 2012. Short communication: Is crossbreeding only

beneficial in herds with low management level?. J. Dairy Sci. 95:925–8. doi:10.3168/jds.2011-4707.

Katz, R.W., and B.G. Brown. 1992. Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages. Clim. Change 21:289–302.

Keating, B.A., P.S. Carberry, P.S. Bindraban, S. Asseng, H. Meinke, and J. Dixon. 2010. Eco-efficient agriculture: Concepts, Challenges, And opportunities. Crop Sci. 50:S-109-S-119. doi:10.2135/cropsci2009.10.0594.

Kirchherr, J., and K. Charles. 2018. Enhancing the sample diversity of snowball samples : Recommendations from a research project on anti-dam movements in Southeast Asia 1–17. doi:10.1371/journal.pone.0201710.

Knaus, W. 2009. Dairy cows trapped between performance demands and adaptability. J. Sci. Food Agric.. doi:10.1002/jsfa.3575.

Kok, A., E.M. de Olde, I.J.M. de Boer, and R. Ripoll-Bosch. 2020. European biodiversity assessments in livestock science: A review of research characteristics and indicators. Ecol. Indic. 112:105902. doi:10.1016/j.ecolind.2019.105902.

Kremen, C., A. Iles, and C. Bacon. 2012. Diversified Farming Systems : An Agroecological , Systems-based. Ecol. Soc. 17:44. doi:http://dx.doi.org/10.5751/ ES-05103-170444 Guest.

Labatut, J. 2009. Gérer des biens communs. Processus de conception et régimes de coopération dans la gestion des ressources génétiques animales 1–382.

Labatut, J. 2010. Les marchés de la sélection génétique. Presse des Mines, Paris.

Labatut, J., and G. Tesnière. 2017. La race bovine Holstein , institution de la modernisation de l'agriculture entre bien marchand et bien commun De la Hollandaise à la Prim'Holstein, chronique de la construction d'une race . Quae. G. Allaire and B. Daviron, ed.

Lacombe, C. 2018. Approche pragmatiste de l'accompagnement d'une transition agroécologique : une recherche action avec une association d'éleveurs et conseillers dans le rayon de Roquefort. Université de Toulouse,.

Lamine, C. 2011. Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM. J. Rural Stud. 27:209–219. doi:10.1016/j.jrurstud.2011.02.001.

Lamine, C., and S. Bellon. 2009. Transitions Vers l'agriculture Biologique. Pratiques et Accompagnements Pour Des Systèmes Innovants. Éducagri éditions, « Sciences en partage ».

Le Lan, B., V. Jegou, J.Y. Porhiel, P. Cadoret, A. Bras, S. Tirard, M. Le Guenic, and A. Quefflec. 2007. Coût de renouvellement du troupeau en élevage laitier Dairy herd replacement cost. Rencontres Rech. Ruminants 74223.

Landais, E. 1992. Principes de modélisation des systèmes d'élevage. Les Cah. la Rech. Développement 82–95.

Landais, E. 1994. Système d'élevage. D'une intuition holiste à une méthode de recherche.

Landais, E., and J.-P. Deffontaines. 1989. Les pratiques des agriculteurs. Point de vue sur un courant de la recherche agronomique. J. Brossier, B. Vissac, and J.-L. Le Moigne, ed. INRA Editions, Versailles, France.

Landais, E., J.-P. Deffontaines, and M. Benoît. 1988. Les pratiques des agriculteurs. Point de vue sur un courant nouveau de la recherche agronomique. Etud. Rurales 109:125–158.

doi:10.3406/rural.1988.3226.

Landais, E., and J. Lasseur. 1993. V. Une application du concept de “modèle d’action”. Pour une lecture zootechnique des pratiques d’élevage. Etud. Rurales 131:165–180. doi:10.3406/rural.1993.4780.

Lauvie, A. 2007. Gérer les populations animales locales à petits effectifs : approche de la diversité des dispositifs mis en oeuvre 377.

Lê Cao, K.-A., F. Rohart, I. Gonzalez, and S. Dejean. 2016. mixOmics: Omics Data Integration Project.

Lembeye, F., N. López-Villalobos, J.L. Burke, and S.R. Davis. 2016. Breed and heterosis effects for milk yield traits at different production levels, lactation number and milking frequencies. New Zeal. J. Agric. Res. 59:156–164. doi:10.1080/00288233.2016.1156551.

Lemery, B., S. Ingrand, B. Dedieu, and B. Dégrange. 2005. Agir en situation d’incertitude : le cas des éleveurs de bovins allaitantsBeef cattle farmer’s strategies in the face of uncertainty. Économie Rural. 57–69. doi:10.4000/economierurale.2718.

Leroy, G., R. Baumung, P. Boettcher, B. Scherf, and I. Hoffmann. 2015. Review: Sustainability of crossbreeding in developing countries; definitely not like crossing a meadow.... Animal 10:262–273. doi:10.1017/S175173111500213X.

Leroy, G., and C. Danchin-Burge. 2020. La préservation de la biodiversité et des ressources génétiques. E. Verrier, D. Milan, and C. Rogel-Gaillard, ed. Quae.

LIC, and DairyNZ. 2019. New Zealand Dairy Statistics.

Lipkens, Z., S. Piepers, J. Verbeke, and S. De Vliegher. 2019. Infection dynamics across the dry period using Dairy Herd Improvement somatic cell count data and its effect on cow performance in the subsequent lactation. J. Dairy Sci. 102:640–651. doi:10.3168/jds.2018-15130.

Lokie, S. 2002. “The Invisible Mouth”: Mobilizing “the Consumer” in Food Production-Consumption Networks.. Sociol. Ruralis 42:278–294.

Lopez-Villalobos, N., D.J. Garrick, C.W. Holmes, H.T. Blair, and R.J. Spelman. 2000. Profitabilities of Some Mating Systems for Dairy Herds in New Zealand. J. Dairy Sci. 83:144–153. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)74865-X.

Lucy, M.C. 2001. Reproductive Loss in High-Producing Dairy Cattle: Where Will It End?. J. Dairy Sci. 84:1277–1293. doi:10.3168/jds.S0022-0302(01)70158-0.

Lune, H., and B.L. Berg. 2017. Methods for the Social Sciences Global Edition. 9th Editio. Pearson Education Limited, Essey, England.

Lynch, M., and B. Walsh. 1998. Genetics and Analysis of Quantitative Traits. Sinauer.

Mackey, D.R., A.W. Gordon, M.A. McCoy, M. Verner, and C.S. Mayne. 2007. Associations between genetic merit for milk production and animal parameters and the fertility performance of dairy cows. Animal. doi:10.1017/S1751731107257921.

Magda, D., N. Girard, V. Angeon, C. Cholez, N. Raulet-croset, N. Salliou, C. Barnaud, C. Monteil, N. Peyrard, R. Sabbadin, N. Salliou, C. Barnaud, C. Monteil, N. Peyrard, R. Sabbadin, N. Salliou, C. Barnaud, C. Monteil, and N. Peyrard. 2019. A Plurality of Viewpoints Regarding the Uncertainties of the Agroecological Transition. J.-E. Bergez, E. Audouin, and O. Therond, ed. Springer International Publishing, Cham.

Magne, M.-A. 2007. Modéliser le système d ’ information des agriculteurs - Le cas des éleveurs de bovins allaitants -.

Magne, M.-A., and M. Cerf. 2010. How Information Becomes a Resource for Action in an Uncertain and Complex World. Outlook Agric. 38:157–165. doi:10.5367/000000009788632331.

Magne, M.-A., M.-O. Nozières, S. Cournut, E. Ollion, L. Puillet, D. Renaudeau, and L. Fortun-Lamothe. 2019. Gérer la diversité animale dans les systèmes d'élevage : laquelle , comment et pour quels bénéfices ?. INRA Prod. Anim. 32:263–280.

Magne, M.-A., and J. Quénon. Dairy crossbreeding on cattle farms challenges the mainstream sociotechnical system locked into pure-breeding and high-specialization paradigms . A case study in France. Agron. Sustain. Dev.

Magne, M.-A., J. Quenon, and A. Doré. 2020. Analyse socio-technique des changements induits par le développement du croisement laitier dans les pratiques des professionnels de l'élevage bovin lait français. Cépaduès. C. Gardiès, L. Fauré, and S. Sognos, ed.

Magne, M.-A.M.A.M.-A., V. Thénard, and S. Mihout. 2016. Initial insights on the performances and management of dairy cattle herds combining two breeds with contrasting features. Animal 10:892–901. doi:10.1017/S1751731115002840.

Magrini, M.-B., and M. Duru. 2015. Trajectoire D'Innovation Dans Les Systèmes Laitiers Français : Une Analyse Socio-Technique de la Démarche "Bleu-Blanc-Coeur". Innovations 48:187–210. doi:10.3917/inno.048.0187.

Magrini, M.-B., G. Martin, M.-A. Magne, M. Duru, N. Couix, L. Hazard, and G. Plumecocq. 2019. Agroecological Transition from Farms to Territorialised Agri-Food Systems: Issues and Drivers. J.-E. Bergez, E. Audouin, and O. Therond, ed. Springer International Publishing, Cham.

Malchiodi, F., A. Cecchinato, and G. Bittante. 2014a. Fertility traits of purebred Holsteins and 2- and 3-breed crossbred heifers and cows obtained from Swedish Red, Montbéliarde, and Brown Swiss sires. J. Dairy Sci. 97:7916–7926. doi:10.3168/jds.2014-8156.

Malchiodi, F., A. Cecchinato, M. Penasa, C. Cipolat-Gotet, and G. Bittante. 2014b. Milk quality, coagulation properties, and curd firmness modeling of purebred Holsteins and first- and second-generation crossbred cows from Swedish Red, Montbéliarde, and Brown Swiss bulls. J. Dairy Sci. 97:4530–4541. doi:10.3168/jds.2013-7868.

Martin, C., and M. Legret. 2005. La méthode multicritère ELECTRE III Définitions, principe et exemple d'application à la gestion des eaux pluviales en milieu urbain. Bull. des Lab. des Ponts Chaussees 29–46.

Martin, G., S. Allain, J.-E. Bergez, D. Burger-Leenhardt, J. Constantin, M. Duru, L. Hazard, C. Lacombe, D. Magda, M.-A. Magne, J. Ryschawy, V. Thénard, H. Tribouillois, and M. Willaume. 2018. How to address the sustainability transition of farming systems? A conceptual framework to organize research. Sustainability 10:1–20. doi:10.3390/su10062083.

Martin, G., M.-A. Magne, and M.S. Cristobal. 2017. An Integrated Method to Analyze Farm Vulnerability to Climatic and Economic Variability According to Farm Configurations and Farmers' Adaptations. Front. Plant Sci. 8:1–16. doi:10.3389/fpls.2017.01483.

Mattalia, S., A. Barbat-Leterrier, C. Danchin-Burge, M. Brochard, P. Le Mézec, S. Minery, G.B. Jansen, B.J. Van Doormaal, and E. Verrier. 2006. La variabilité génétique des huit principales races bovines laitières françaises : quelles évolutions, quelles comparaisons internationales ?. Rencontres Rech. Ruminants 13:239–246.

Maurmayr, A., S. Pegolo, F. Malchiodi, G. Bittante, and A. Cecchinato. 2018. Milk protein composition in purebred Holsteins and in first/second-generation crossbred cows from Swedish Red, Montbeliarde and Brown Swiss bulls. Animal 1–7.

doi:10.1017/S1751731117003640.

Mawois, M., A. Vidal, E. Revoyron, M. Casagrande, M.-H. Jeuffroy, and M. Le Bail. 2019. Transition to legume-based farming systems requires stable outlets, learning, and peer-networking. Agron. Sustain. Dev. 39. doi:10.1007/s13593-019-0559-1.

Mazoyer, M. 1982. Origines et mécanismes de reproduction des inégalités régionales de développement agricole en Europe. Économie Rural. 150:25–33. doi:10.3406/ecoru.1982.2879.

McAllister, A.J. 2002. Is Crossbreeding the Answer to Questions of Dairy Breed Utilization?. J. Dairy Sci. 85:2352–2357. doi:10.3168/jds.s0022-0302(02)74315-4.

McAllister, A.J., A.J. Lee, T.R. Batra, C.Y. Lin, G.L. Roy, J.A. Vesely, J.M. Wauthy, and K.A. Winter. 1994. The Influence of Additive and Nonadditive Gene Action on Lifetime Yields and Profitability of Dairy Cattle. J. Dairy Sci. 77:2400–2414. doi:10.3168/jds.S0022-0302(94)77183-6.

McClearn, B., L. Delaby, T.J. Gilliland, C. Guy, M. Dineen, F. Coughlan, F. Buckley, and B. McCarthy. 2020a. An assessment of the production, reproduction, and functional traits of Holstein-Friesian, Jersey × Holstein-Friesian, and Norwegian Red × (Jersey × Holstein-Friesian) cows in pasture-based systems. J. Dairy Sci.. doi:10.3168/jds.2019-17476.

McClearn, B., L. Shalloo, T.J. Gilliland, F. Coughlan, and B. McCarthy. 2020b. An economic comparison of pasture-based production systems differing in sward type and cow genotype. J. Dairy Sci. 103:4455–4465. doi:10.3168/jds.2019-17552.

McDowell, R.E., and B.T. McDaniel. 1968. Interbreed Matings in Dairy Cattle. I. Yield Traits, Feed Efficiency, Type and Rate of Milking. J. Dairy Sci. 51:767–777. doi:10.3168/jds.S0022-0302(68)87069-9.

Merot, A., A. Alonso Ugaglia, J.-M. Barbier, and B. Del'homme. 2019. Diversity of conversion strategies for organic vineyards. Agron. Sustain. Dev. 39. doi:10.1007/s13593-019-0560-8.

Meyer, C. 2020. Définition d'espèce. Accessed September 21, 2020. http://dico-sciences-animales.cirad.fr/liste-mots.php?fiche=10636&def=espèce.

Meynard, J.-M., J.-Y. Dourmad, C. De Grignon, A. Ouest, J.-M. Meynard, J.-Y. Dourmad, C. De Grignon, and A. Ouest. 2014. L'innovation en élevage : de nouvelles démarches pour de nouveaux enjeux. INRAE Prod. Anim. 27:77–88. doi:10.20870/productions-animales.2014.27.2.3056.

Le Mézec, P. 2012. Le croisement laitier en France 1–14.

Le Mézec, P. 2018. Génomique, sexage, croisement : impacts sur la conduite du troupeau 43.

Le Mézec, P. 2019. Evolution in First Inseminations of Dairy Females between 2010 and 2018 (SIG Data). Accessed June 21, 2019. http://idele.fr/no_cache/recherche/publication/idelesolr/recommends/le-croisement-en-elevage-laitier-en-2017.html.

Le Mézec, P., and A. Barbat-Leterrier. 2008. La fertilité des femelles laitières en France : regard sur 10 années et 37 millions d 'IA 24.

Le Mézec, P., and C. Dezetter. 2015. Le croisement laitier.

Miglior, F., A. Fleming, F. Malchiodi, L.F. Brito, P. Martin, and C.F. Baes. 2017. A 100-Year Review: Identification and genetic selection of economically important traits in dairy cattle. J. Dairy Sci. 100:10251–10271. doi:10.3168/jds.2017-12968.

Miglior, F., B.L. Muir, and B.J. Van Doormaal. 2005. Selection Indices in Holstein Cattle of Various Countries. J. Dairy Sci. 88:1255–1263. doi:10.3168/jds.S0022-0302(05)72792-2.

Milleville, P. 1987. Recherches sur les pratiques des agriculteurs. Les Cah. la Rech. Développement 3–7.

Minery, S., M. Brochard, and S. Mattalia. 2008. Use of National and International EBVs of female fertility in Total Merit Index. Interbull Annu. Meet. Niagara Falls (NY), June 16-19 2008 113–118.

Morin, G., D. Coulibaly, C. Corniaux, R. Poccard Chapuis, S.I. Sidibé, and C.-H. Moulin. 2017. Dynamiques des unités de production laitière dans le bassin d'approvisionnement de la ville de Ségou au Mali. Rev. d'élevage médecine vétérinaire des pays Trop. 60:89. doi:10.19182/remvt.9981.

Moulin, C.-H., and F. Bocquier. 2005. Adaptation de l'enseignement supérieur en sciences animales à un monde en mutation : conséquences sur la pédagogie et la transmission des savoirs. Rencontres Rech. Ruminants 12:53–56.

Moulin, C.-H., S. Ingrand, J. Lasseur, S. Madelrieux, M. Napoléone, J. Pluvinage, and V. Thénard. 2008. Comprendre et analyser les changements d'organisation et de conduite de l'élevage dans un ensemble d'exploitations : propositions méthodologiques.

Moulin, C.H. 1993. Performances animales et pratiques d'élevage en Afrique Sahélienne. La diversité du fonctionnement des troupeaux de petits ruminants dans la Communauté Rurale de Ndiagne (Sénégal). INA PG, Paris Grignon, France,.

Nagendra, H. 2002. Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity. Appl. Geogr. 22:175–186. doi:10.1016/S0143-6228(02)00002-4.

Nauta, W.J., A.F. Groen, R.F. Veerkamp, D. Roep, and T. Baars. 2005. Animal breeding in organic dairy farming: An inventory of farmers' views and difficulties to overcome. NJAS - Wageningen J. Life Sci. 53:19–34. doi:10.1016/S1573-5214(05)80008-9.

Newton, J.E., and D.P. Berry. 2020. On-farm net benefit of genotyping candidate female replacement cattle and sheep. Animal 1565–1575. doi:10.1017/S1751731120000208.

Niggli, U., J. Plagge, S. Reese, T. Fertl, O. Schmid, U. Brändli, D. Bärtschi, G. Pöpsel, H. Hermanowski, Robert Hohenester, and G. Grabmann. 2015. Towards modern sustainable agriculture with organic farming as the leading model. A discussion document on Organic 3.0.

Novak, S., F. Chargelegue, R. Delagarde, J.C. Emile, A. Farruggia, J.L. Fiorelli, L. Guichard, and F. Liagre. 2014. Une stratégie d'élevage innovante pour un système laitier bioclimatique. Rencontres Rech. Ruminants, Paris 21:357.

Nozières, M.-O., C.-H. Moulin, and B. Dedieu. 2011. The herd, a source of flexibility for livestock farming systems faced with uncertainties?. Animal 5:1442–1457. doi:10.1017/S1751731111000486.

Ollion, E. 2015. Evaluer la robustesse des vaches laitières : Entre aptitudes biologiques des animaux et stratégies de conduite des éleveurs. Université d'Auvergne, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand,.

Ollion, E., S. Ingrand, L. Delaby, J.M. Trommenschlager, S. Colette-Leurent, and F. Blanc. 2016. Assessing the diversity of trade-offs between life functions in early lactation dairy cows. Livest. Sci. 183:98–107. doi:10.1016/j.livsci.2015.11.016.

Olori, V.E., T.H.E. Meuwissen, and R.F. Veerkamp. 2002. Calving interval and survival breeding values as measure of cow fertility in a pasture-based production system with

seasonal calving. J. Dairy Sci. 85:689–696. doi:10.3168/jds.S0022-0302(02)74125-8.

Olson, K.M., B.G. Cassell, M.D. Hanigan, and R.E. Pearson. 2011. Short communication: Interaction of energy balance, feed efficiency, early lactation health events, and fertility in first-lactation Holstein, Jersey, and reciprocal F1 crossbred cows. J. Dairy Sci. 94:507–511. doi:10.3168/jds.2010-3433.

Oltenacu, P.A., and B. Algers. 2005. Selection for Increased Production and the Welfare of Dairy Cows: Are New Breeding Goals Needed?. AMBIO A J. Hum. Environ.. doi:10.1579/0044-7447-34.4.311.

Østergaard, S., J.T. Sørensen, and A.R. Kristensen. 2000. A stochastic model simulating the feeding-health-production complex in a dairy herd. J. Dairy Sci. 83:721–733. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)74934-4.

Osty, P.-L. 1998. Comment analyser les transformations de l'activité productrice. Etudes Rech. sur les Systèmes Agraires le Développement 31:397–413.

Padel, S., L. Levidow, and B. Pearce. 2019. UK farmers' transition pathways towards agroecological farm redesign: evaluating explanatory models. Agroecol. Sustain. Food Syst. 3565. doi:10.1080/21683565.2019.1631936.

Pellegrini, P., and M.-D. Ribereau-Gayon. 2020. Qu'est-ce qu'une « race animale pure » ? 0–25.

Penasa, M., M. De Marchi, R.D. Zotto, G. de Jong, G. Bittante, and M. Cassandro. 2010. Heterosis effects in a black and white dairy cattle population under different production environments. Livest. Sci. 131:52–57. doi:10.1016/j.livsci.2010.02.027.

Peretti-Watel, P. 2001. La crise de la vache folle : Une épidémie fantôme?. Sci. Soc. Sante 19:1–36. doi:10.3406/sosan.2001.1510.

Perrin, A., M.S. Cristobal, R. Milestad, and G. Martin. 2020. Identification of resilience factors of organic dairy cattle farms. Agric. Syst. 183:102875. doi:10.1016/j.agsy.2020.102875.

Perrot, C., D. Caillaud, and H. Chambaut. 2011. Économies D'Échelle Et Économies De Gamme En Élevage Bovin Laitier.

Perucho, L. 2018. Rôle des pratiques de gestion génétique dans l'adéquation entre troupeaux de races locales et conduites pastorales. Université de Montpellier,.

Petchey, O.L., A. Hector, and K.J. Gaston. 2004. How Do Different Measures of Functional Diversity Perform?. Ecology 85:847–857. doi:10.1890/03-0226.

Pflimlin, A., P. Faverdin, and C. Béranger. 2009. Un demi-siècle d'évolution de l'élevage bovin. Bilan et perspectives. Fourrages 200:429–464.

Phocas, F., J. Agabriel, M. Dupont-Nivet, I. Geurden, F. Médale, S. Mignon-Grasteau, H. Gilbert, and J.-Y. Dourmad. 2014a. Le phénotypage de l'efficacité alimentaire et de ses composantes, une nécessité pour accroître l'efficience des productions animales. INRA Prod. Anim. 27:235–248.

Phocas, F., C. Belloc, J. Bidanel, L. Delaby, J.-Y. Dourmad, B. Dumont, P. Ezanno, L. Fortun-Lamothe, G. Foucras, B. Frappat, E. González-García, D. Hazard, C. Larzul, S. Lubac, S. Mignon-Grasteau, C. Moreno-Romieux, M. Tixier-Boichard, and M. Brochard. 2017. Quels programmes d'amélioration génétique des animaux pour des systèmes d'élevage agro-écologiques ?. INRA Prod. Anim. 30:31–46.

Phocas, F., C. Belloc, L. Delaby, J.-Y. Dourmad, C. Ducrot, B. Dumont, P. Ezanno, G. Foucras, E. González-García, D. Hazard, L. Lamothe, C. Larzul, S. Mignon-Grasteau, C. Moreno-Romieux, M. Tixier-Boichard, M. Brochard, J. Bidanel, B. Frappat, and S. Lubac. 2016.

Outils et leviers pour favoriser le développement d'une génétique animale adaptée aux enjeux de l'agroécologie.

Phocas, F., J. Bobe, L. Bodin, B. Charley, J.-Y. Dourmad, N.C. Friggens, J.F. Hocquette, P.Y. Le Bail, E. Le Bihan-Duval, P. Mormède, P. Quéré, and F. Schelcher. 2014b. Des animaux plus robustes: Un enjeu majeur pour le développement durable des productions animales nécessitant l'essor du phénotypage fin et à haut débit. INRA Prod. Anim. 27:181–194.

Pinedo, P.J., A. De Vries, and D.W. Webb. 2010. Dynamics of culling risk with disposal codes reported by Dairy Herd Improvement dairy herds.. J. Dairy Sci. 93:2250–61. doi:10.3168/jds.2009-2572.

Pluvinage, J. 2015. L'exploitation agricole, entre famille et entreprise : 60 ans de débats et d'itinéraire de recherche personnel. P. Gasselin, J.-P. Choisis, S. Petit, F. Purseigle, and S. Zasser-Bedoya, ed. EDP Sciences, France.

Pomiès, D., P.G. Marnet, S. Cournut, F. Barillet, J. Guinard-Flament, and B. Rémond. 2008. Les conduites de traite simplifiées en élevage laitier Vers la levée de l'astreinte biquotidienne. Prod. Anim. 21:59–70. doi:10.20870/productions-animales.2008.21.1.3375.

Prendiville, R., K.M. Pierce, and F. Buckley. 2010. A comparison between Holstein-Friesian and Jersey dairy cows and their F1 cross with regard to milk yield, somatic cell score, mastitis, and milking characteristics under grazing conditions. J. Dairy Sci. 93:2741–2750. doi:10.3168/jds.2009-2791.

Prével, M. 2008. Le productivisme agricole: Socioanthropologie de l'industrialisation des campagnes françaises. Etud. Rurales 115–132. doi:10.4000/etudesrurales.8675.

Pryce, J.E., M.D. Royal, P.C. Garnsworthy, and I.L. Mao. 2004. Fertility in the high-producing dairy cow. Livest. Prod. Sci. 86:125–135. doi:10.1016/S0301-6226(03)00145-3.

Pryce, J.E., and R.F. Veerkamp. 2001. The incorporation of fertility indeces in genetic improvement programmes. BSAS Occas. Publ. Fertil. High Prod. Dairy Cow, Br. Soc. Anim. Sci. 26:227–250.

Puillet, L., D. Sauvant, and M. Tichit. 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.

Puppel, K., E. Bogusz, M. Gołębiewski, T. Nałęcz-Tarwacka, B. Kuczyńska, J. Slósarz, A. Budziński, P. Solarczyk, M. Kunowska-Slósarz, and T. Przysucha. 2018. Effect of Dairy Cow Crossbreeding on Selected Performance Traits and Quality of Milk in First Generation Crossbreds. J. Food Sci. 83:229–236. doi:10.1111/1750-3841.13988.

Purfield, D.C., R.D. Evans, T.R. Carthy, and D.P. Berry. 2019. Genomic Regions Associated With Gestation Length Detected Using Whole-Genome Sequence Data Differ Between Dairy and Beef Cattle. Front. Genet. 10:1–16. doi:10.3389/fgene.2019.01068.

Quénon, J., S. Ingrand, and M.-A. Magne. 2020. Managing the transition from purebred to rotational crossbred dairy cattle herds : three technical pathways from a retrospective case-study analysis. Animal 14:1293–1303. doi:10.1017/S1751731119003458.

Quénon, J., and M.-A. Magne. 2017. Le croisement entre races laitières: pour quelles raisons et comment? Avec quels résultats? 4.

Quénon, J., E. Ollion, M. Basset, and M.-A. Magne. 2018. Pourquoi et comment les éleveurs bovin lait adoptent-ils le croisement laitier ? Why and how dairy cattle farmers adopt dairy crossbreeding in their herd ? 27:1.

R Core Team. 2020. R : A language and environment for statistical computing.

Rao, C.R. 1982. Diversity and Dissimilarity Coefficients A Unified Approach. Theor. Popul. Biol. 21:24–43. doi:10.1016/0040-5809(82)90004-1.

Ray, D.K., J.S. Gerber, G.K. Macdonald, and P.C. West. 2015. Climate variation explains a third of global crop yield variability. Nat. Commun. 6. doi:10.1038/ncomms6989.

Recensement Agricole. 2010. Recensement Agricole. Accessed October 19, 2020. http://recensement-agricole.agriculture.gouv.fr/index.php?module=fiche&metier=frontoffice&geo_id=1&the_id=3&cha_id=2.

Reinhardt, J. 2018. Frein & leviers à la transition vers la pratique du croisement laitier.

Reproscope. 2017. Reproscope Homepage. Accessed July 12, 2019. http://164.177.30.205/pentaho/api/repos/:public:reproscope:accueil_reproscope.wcdf/generatedContent?&userid=public_user&password=_Repr0sc0pe_Pu.

Rinell, E., and B. Heringstad. 2018. The effects of crossbreeding with Norwegian Red dairy cattle on common postpartum diseases, fertility and body condition score. Animal 12:2619–2626. doi:10.1017/S175173111800037X.

Rip, A., and R. Kemp. 1998. Technological change. S. Rayner and E.L. Malone, ed. Battelle Press, Columbus, OH.

Rocchini, D., M. Marcantonio, and C. Ricotta. 2017. Measuring Rao's Q diversity index from remote sensing: An open source solution. Ecol. Indic. 72:234–238. doi:10.1016/j.ecolind.2016.07.039.

Roinsard, A., and P. Le Mézec. 2017. Les élevages de ruminants bio en France : choix de conduite , choix génétiques et résultats techniques 1–40.

Roschinsky, R. 2013. Crossbreeding As Innovation for dairy cattle keepers in the tropics. Adoption, adaptation and impacts on smallholder farms in Ethiopia, Uganda and India.

Roschinsky, R., M. Kluszczynska, J. Sölkner, R. Puskur, and M. Wurzinger. 2015. Smallholder experiences with dairy cattle crossbreeding in the tropics: from introduction to impact. Animal 9:150–157. doi:10.1017/S1751731114002079.

Le Roy, P., A. Ducos, and F. Phocas. 2019. Quelles performances pour les animaux de demain ? Objectifs et méthodes de sélection. INRA Prod. Anim. 32:233–246.

RStudio Team. 2020. RStudio: Integrated Development Environment for R.

Rueff, C., J.-P.P. Choisis, G. Balent, and A. Gibon. 2012. A Preliminary Assessment of the Local Diversity of Family Farms Change Trajectories Since 1950 in a Pyrenees Mountains Area. J. Sustain. Agric. 36:564–590. doi:10.1080/10440046.2012.672547.

Rupp, R., and D. Boichard. 2000. Relationship of early first lactation somatic cell count with risk of subsequent first clinical mastitis. Livest. Prod. Sci. 62:169–180. doi:10.1016/S0301-6226(99)00056-1.

Ryschawy, J., N. Choisis, J.-P. Choisis, and A. Gibon. 2013. Paths to last in mixed crop-livestock farming: Lessons from an assessment of farm trajectories of change. Animal 7:673–681. doi:10.1017/S1751731112002091.

Saha, S., N. Amalfitano, G. Bittante, and L. Gallo. 2020. Milk coagulation traits and cheese yields of purebred Holsteins and 4 generations of 3-breed rotational crossbred cows from Viking Red, Montbéliarde, and Holstein bulls. J. Dairy Sci. 103:3349–3362. doi:10.3168/jds.2019-17576.

Saha, S., L. Carraro, G. Bittante, and L. Gallo. 2018. Body and milk quality traits of purebred holstein and three-generation crossbred cows from viking red, Montbéliarde, and Holstein sires. J. Cent. Eur. Agric. 19:760–765. doi:10.5513/JCEA01/19.4.2334.

Saha, S., F. Malchiodi, C. Cipolat-Gotet, G. Bittante, and L. Gallo. 2017. Effects of cossbreeding of holsteins cows with Montbéliarde and Swedish red in first and second generation on cheese yield traits. Agric. Conspec. Sci. 82:241–244.

Salembier, C. 2019. Stimuler la conception distribuée de systèmes agroécologiques par l ' étude de pratiques innovantes d ' agriculteurs To cite this version : HAL Id : tel-02305973 Stimuler la conception distribuée de systèmes agroécologiques par l ' étude de pratiques inno.

Schlecht, S., and A. Spiller. 2012. Identification of Employment Concentration and Specialization Areas : Theory and Application. Agribusiness 28:121–134. doi:10.1002/agr.20293.

Sebillotte, M., and L.-G. Soler. 1988a. Le concept de modele general et la comprehension du comportement de l'agriculteur.. Comptes rendus l'Académie d'agriculture Fr. 74:59–70.

Sebillotte, M., and L.-G. Soler. 1988b. Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur. Comptes rendus l'Académie d'agriculture Fr. 74:59–70.

Seguin, E. 2002. La crise de la vache folle au Royaume-Uni - Quelques explications possibles. Rev. française Sci. Polit. 52:273–289.

Selmi, A., and P.-B. Joly. 2014. Les régimes de production des connaissances de la sélection animale. Ontologies, mesures, formes de régulation. Sociol. Trav. 56:225–244. doi:10.1016/j.soctra.2014.03.020.

Sewalem, A., F. Miglior, G.J. Kistemaker, P. Sullivan, and B.J. Van Doormaal. 2008. Relationship Between Reproduction Traits and Functional Longevity in Canadian Dairy Cattle. J. Dairy Sci. 91:1660–1668. doi:10.3168/jds.2007-0178.

Shannon, C.E. 1948. A Mathematical Theory of Communication. Bell Syst. Tech. J. 27:623–656. doi:10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x.

Shonka-Martin, B.N., A.R. Hazel, B.J. Heins, and L.B. Hansen. 2018. Three-breed rotational crossbreds of Montbéliarde, Viking Red, and Holstein compared with Holstein cows for dry matter intake, body traits, and production. J. Dairy Sci. 102:871–882. doi:10.3168/jds.2018-15318.

Shonka-Martin, B.N., B.J. Heins, and L.B. Hansen. 2019. Three-breed rotational crossbreds of Montbéliarde, Viking Red, and Holstein compared with Holstein cows for feed efficiency, income over feed cost, and residual feed intake. J. Dairy Sci. 102:3661–3673. doi:10.3168/jds.2018-15682.

Shook GE 2006. Major advances in determining appropriate selection goals. Journal of Dairy Science 89, 1349–1361.

Singh, J.S., V.C. Pandey, and D.P. Singh. 2011. Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. Agric. Ecosyst. Environ. 140:339–353. doi:10.1016/j.agee.2011.01.017.

Snee, R.D. 1979. Experimental designs for mixture systems with multicomponent constraints. Commun. Stat. - Theory Methods 8:303–326. doi:10.1080/03610927908827762.

Solano, C., H. León, E. Pérez, and M. Herrero. 2001. Characterising objective profiles of Costa Rican dairy farmers. Agric. Syst. 67:153–179. doi:10.1016/S0308-521X(00)00054-8.

Sørensen, A.C., P. Madsen, M.K. Sørensen, and P. Berg. 2006. Udder health shows inbreeding depression in Danish Holsteins.. J. Dairy Sci. 89:4077–4082. doi:10.3168/jds.S0022-0302(06)72452-3.

Sørensen, M.K., E. Norberg, J. Pedersen, and L.G. Christensen. 2008. Invited Review: Crossbreeding in Dairy Cattle: A Danish Perspective. J. Dairy Sci. 91:4116–4128. doi:10.3168/jds.2008-1273.

Souchère, V., C. King, N. Dubreuil, V. Lecomte-Morel, Y. Le Bissonnais, and M. Chalat. 2003. Grassland and crop trends: Role of the European Union Common Agricultural Policy and consequences for runoff and soil erosion. Environ. Sci. Policy 6:7–16. doi:10.1016/S1462-9011(02)00121-1.

Sutherland, L.A., R.J.F. Burton, J. Ingram, K. Blackstock, B. Slee, and N. Gotts. 2012. Triggering change: Towards a conceptualisation of major change processes in farm decision-making. J. Environ. Manage. 104:142–151. doi:10.1016/j.jenvman.2012.03.013.

Tenenhaus, M. 1998. La Régression PLS. Théorie et Pratique. Technip, Paris.

Thompson, J., and I. Scoones. 2009. Addressing the dynamics of agri-food systems: an emerging agenda for social science research. Environ. Sci. Policy 12:386–397. doi:10.1016/j.envsci.2009.03.001.

Tichit, M., L. Puillet, R. Sabatier, and F. Teillard. 2011. Multicriteria performance and sustainability in livestock farming systems: Functional diversity matters. Livest. Sci. 139:161–171. doi:10.1016/j.livsci.2011.03.006.

Tirel, J.-C. 1983. Le débat sur le productivisme. Économie Rural. 155:23–30. doi:10.3406/ecoru.1983.2961.

Tisdell, C. 2003. Socioeconomic causes of loss of animal genetic diversity: Analysis and assessment. Ecol. Econ. 45:365–376. doi:10.1016/S0921-8009(03)00091-0.

Tixier-Boichard, M., E. Verrier, X. Rognon, and T. Zerjal. 2015. Farm animal genetic and genomic resources from an agroecological perspective. Front. Genet. 6:2013–2015. doi:10.3389/fgene.2015.00153.

UMT eBis, and Geneval. 2019. Évaluation génétique des taureaux Prim'Holsteins et Pie-Rouges. Production laitière - Morphologie - Caractères fonctionnels.

Vance, E.R., C.P. Ferris, C.T. Elliott, H.M. Hartley, and D.J. Kilpatrick. 2013. Comparison of the performance of Holstein-Friesian and Jersey×Holstein-Friesian crossbred dairy cows within three contrasting grassland-based systems of milk production. Livest. Sci. 151:66–79. doi:10.1016/j.livsci.2012.10.011.

Vanloqueren, G., and P. V Baret. 2009. How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations 38:971–983. doi:10.1016/j.respol.2009.02.008.

VanRaden, P.M. 1992. Accounting for Inbreeding and Crossbreeding in Genetic Evaluation of Large Populations. J. Dairy Sci. 75:3136–3144. doi:10.3168/jds.S0022-0302(92)78077-1.

Vanraden, P.M., J.B. Cole, and K.L. Parker Gaddis. 2018. Lifetime Net Merit 2018. Accessed February 10, 2021. https://aipl.arsusda.gov/reference/nmcalc-2018.htm.

VanRaden, P.M., and A.H. Sanders. 2003. Economic Merit of Crossbred and Purebred US Dairy Cattle. J. Dairy Sci. 86:1036–1044. doi:10.3168/jds.S0022-0302(03)73687-X.

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

doi:10.3168/jds.2006-704.

Vermersch, P. 2009. Describing the practice of introspection. J. Conscious. Stud. 16:20–57.

Verrier, E., P. Le Mézec, D. Boichard, and S. Mattalia. 2010. Evolution des objectifs et des méthodes de sélection des bovins laitiers. Bull. Acad. Vet. Fr.

Verrier, E., X. Rognon, G. Leroy, and T. Heams. 2009. Le croisement : apports potentiels du croisement, principaux plans de croisement.

Veysset, P., and L. Delaby. 2018. Diversité des systèmes de production et des filières bovines en France 68:129–150.

Veysset, P., M. Gautier, J. Grenier, P. Veysset, M. Gautier, and J. Grenier. 2018. L'efficience des exploitations d'élevage de ruminants en agriculture biologique du Massif Central : avantage aux spécialisés herbagers. Pages 58–61 in Rencontres Recherches Ruminants.

Veysset, P., M. Lherm, J.-P. Boussemart, and P. Natier. 2017. Formation et répartition des gains de productivité en élevage bovin viande. Qui sont les gagnants et les perdants entre 1980 et 2015 ?Generation and Distribution of Productivity Gains in Beef Cattle Farming. From 1980 to 2015, Who Are the Winners and the . Économie Rural. 71–91. doi:10.4000/economierurale.5294.

Vissac, B. 1993. Société, race animale et territoire entre les théories et l'Histoire: Réflexions sur une crise. Nat. Sci. Sociétés 1:282–297.

Vissac, B. 2002. Les Vaches de La République; Saisons et Raison d'un Chercheur Citoyen. 1st Editio. INRA-Quae, ed.

De Vries, A. 2014. Cow longevity economics: The cost benefit of keeping the cow in the herd.

De Vries, A. 2017. Economic trade-offs between genetic improvement and longevity in dairy cattle. J. Dairy Sci. 100:4184–4192. doi:10.3168/jds.2016-11847.

Walsh, S., F. Buckley, K. Pierce, N. Byrne, J. Patton, and P. Dillon. 2008. Effects of Breed and Feeding System on Milk Production, Body Weight, Body Condition Score, Reproductive Performance, and Postpartum Ovarian Function. J. Dairy Sci. 91:4401–4413. doi:10.3168/jds.2007-0818.

Weigel, K.A., and K.A. Barlass. 2010. Results of a Producer Survey Regarding Crossbreeding on US Dairy Farms. J. Dairy Sci. 86:4148–4154. doi:10.3168/jds.s0022-0302(03)74029-6.

Weigel, K.A., R.W. Palmer, and D.Z. Caraviello. 2003. Investigation of Factors Affecting Voluntary and Involuntary Culling in Expanding Dairy Herds in Wisconsin using Survival Analysis. J. Dairy Sci. 86:1482–1486. doi:10.3168/jds.S0022-0302(03)73733-3.

Wezel, A., S. Bellon, T. Doré, C. Francis, D. Vallod, and C. David. 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. Sustain. Agric. 29:503–515. doi:10.1007/978-94-007-0394-0_3.

WHFF. 2016. Statistics - WHFF • World Holstein Friesian Federation. Accessed August 1, 2019. http://www.whff.info/documentation/statistics.php#go1.

Wiggans, G.R., and G.E. Shook. 1987. A Lactation Measure of Somatic Cell Count. J. Dairy Sci. 70:2666–2672. doi:10.3168/jds.S0022-0302(87)80337-5.

Willett, W., J. Rockström, B. Loken, M. Springmann, T. Lang, S. Vermeulen, T. Garnett, D. Tilman, F. DeClerck, A. Wood, M. Jonell, M. Clark, L.J. Gordon, J. Fanzo, C. Hawkes, R. Zurayk, J.A. Rivera, W. De Vries, L. Majele Sibanda, A. Afshin, A. Chaudhary, M. Herrero,

R. Agustina, F. Branca, A. Lartey, S. Fan, B. Crona, E. Fox, V. Bignet, M. Troell, T. Lindahl, S. Singh, S.E. Cornell, K. Srinath Reddy, S. Narain, S. Nishtar, and C.J.L. Murray. 2019. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. Lancet 393:447–492. doi:10.1016/S0140-6736(18)31788-4.

Williams, P.J., and W.L. Kendall. 2017. A guide to multi-objective optimization for ecological problems with an application to cackling goose management. Ecol. Modell. 343:54–67. doi:10.1016/j.ecolmodel.2016.10.010.

Zahm, F., A. Alonso Ugaglia, H. Boureau, B. Del, J.-M. Barbier, P. Gasselin, M. Gafsi, L. Guichard, C. Loyce, V. Manneville, A. Menet, and B. Redlingshofer. 2015. Agriculture et exploitation agricole durables: état de l'art et proposition de définitions revisitées à l'aune des valeurs, des propriétés et des frontières de la durabilité en agriculture. Innov. Agron. 46:105–125.

Annexes

Annexe 1 : Résumé accepté à l'EAAP 2020

Combining categories of crossbred females to improve the overall performance of a dairy cattle herd

J. Quénon, M.-A. Magne and S. Ingrand

INRAE, 24 chemin de Borderouge, 31320 Castanet-Tolosan, France; julien.quenon@inrae.fr

There is renewed interest in rotational crossbreeding in Western countries to improve reproductive performance of dairy cattle cows, especially for the Holstein (HO) breed. To our knowledge, few studies are interested in the impact on the overall performance at herd scale of genetic diversification, which is involved in the transition of a herd towards rotational crossbreeding. Our hypothesis is that there are herd compositions of crossbred categories that optimise its multi-criteria performance. The objective of the present study was twofold: (1) to define and compare performance of various categories of crossbred females; and (2) to assess the best combinations of these categories within a herd to optimise its performance. We used milk record data of 19 French commercial dairy crossbred herds from 2008 to 2018. The HO breed was the initial breed from which sampled dairy farmers managed rotational crossbreeding. The dataset was made up of 5,110 lactations from 2,448 cows, for which milk yield and contents and fertility performance data were available. First, we defined categories of crossbred females [a; b] according to two indicators: a, the percentage of Holstein genes from 25 to 100% and b, the theoretical value of heterosis from 0 to 100%. Secondly, we used linear models to compare performance profiles of each category of crossbred females. We showed for example that 305-days milk yield was greatest for HO (7,823 kg) and lower for F1 (7,748 kg), 3-way G2 (7,394 kg) and 2-way G2 (6,211 kg). In a third step, based on the mean performance we built multi-criteria performance profiles for each category. We simulated all herd compositions as combinations of the different categories following a design of experiment approach and modelled the resulting multi-criteria performance for each herd composition. Then we assessed the best herd composition according to three sets of constraints: (1) 'Milk yield ≥8,000 kg/cow'; (2) 'Milk yield ≥6,000 kg/cow'; and (3) 'CCI≤60 days'. These results bring new evidence of the benefits of rotational crossbreeding on the whole herd performance rather than solely on individual performances. It allows us to discuss the implications for managing the transition from purebred HO to crossbred herd.

Annexe 2 : Résumé accepté à l'IFSA 2020

MANAGING TRANSITION TOWARDS DIVERSIFIED LIVESTOCK SYSTEMS: LESSONS FROM EXPERIENCE OF DAIRY CATTLE FARMERS WHO ADOPTED DAIRY CROSSBREEDING

Julien Quénon[a], Stéphane Ingrand[b], Marie-Angélina Magne[c]
[a] Université de Toulouse, INRAE, UMR AGIR, F-31320 Castanet-Tolosan, France, julien.quenon@inrae.fr
[b] Université Clermont Auvergne, AgroParisTech, INRAE, VetAgro Sup, UMR Territoires, F-63000 Clermont-Ferrand, France, stephane.ingrand@inrae.fr
[c] Université de Toulouse, INRAE, ENSFEA, UMR AGIR, F-31320 Castanet-Tolosan, France, marie-angelina.magne@inrae.fr

Abstract

The growing interest in dairy crossbreeding in Western countries is due to its potential to improve reproductive and health performances of cows. While a large amount of research focuses on defining crossbreeding schemes that maximises animal performances, knowledge is needed on how to implement it within an initially purebred herd. Hence, implementation is not self-evident and creates uncertainties for farmers, which may limit its adoption on commercial farms. This study aimed at characterising different technical pathways to move from a purebred herd to a rotational-crossbred herd, based on a retrospective analysis of French dairy farmers who went through the transition process. Semi-directive interviews were performed in 2018 among 26 French dairy cattle farmers. Data about the changes in their breeding, replacement and culling management practices during the transition were collected and analysed. We characterised three technical transition pathways that differ according to: (i) the depth of change (i.e. systemic vs. limited) that introduction of dairy crossbreeding to the herd represents in the whole-farm trajectory and (ii) the rate of introduction (i.e. at the beginning vs. distributed over time) and its delayed effects on breeding management. Based on these results, we then presented the three types of technical pathways toward rotational crossbreeding, in order to extract some key lessons on the implications of taking one pathway or another on herd management practices and decision-making under uncertainty, while transitioning toward rotational crossbreeding.

Annexe 3 : Actes de la « présentation flash » acceptée aux 3R 2020

Performances zootechniques du croisement rotatif trois voies en élevage bovin laitier : une évaluation aux échelles individuelle et troupeau

QUÉNON J. (1), INGRAND S. (2), MAGNE M.-A. (3)
(1) UMR AGIR, Université de Toulouse, INRAE, INPT, 31320 Castanet-Tolosan, France
(2) UMR Territoires, Université Clermont Auvergne, AgroParisTech, INRAE, VetAgro Sup, 63000 Clermont-Ferrand, France
(3) UMR AGIR, Université de Toulouse, INRAE, ENSFEA, INPT, 31320 Castanet-Tolosan, France

RESUME - Le croisement rotatif trois voies entre races laitières constitue un levier d'amélioration des performances des vaches, en particulier celles relatives aux traits fonctionnels. Son introduction dans un troupeau bovin lait génère une cohabitation d'une diversité de génotypes. L'objectif de cette étude est d'évaluer comment les combinaisons de ces génotypes au sein d'un troupeau modifient ses performances globales, afin d'identifier les compositions de troupeaux croisés optimales.

The performances of three-breed rotational crossbreeding in dairy cattle herds: an assessment from individual to herd level

QUÉNON J. (1), INGRAND S. (2), MAGNE M.-A. (3)
(1) Université de Toulouse, INRAE, UMR AGIR, 31320 Castanet-Tolosan, France

SUMMARY - Three-breed rotational crossbreeding between dairy breeds is a lever for improving cow performance, especially for functional traits. Its introduction in a dairy cattle herd generates a cohabitation of a diversity of genotypes. The objective of this study is to evaluate how combinations of these genotypes within a herd modify its overall performance, in order to identify optimal crossbred herd compositions.

INTRODUCTION

En élevage bovin laitier, le croisement rotatif consiste à alterner à chaque génération les races des taureaux laitiers utilisés pour l'accouplement et ce, de manière cyclique. On parle de croisement rotatif trois voies (nommé « croisement » ci-après) lorsque trois races sont utilisées. On appelle schéma de croisement la combinaison ordonnée des races utilisées. Cette pratique demeure assez marginale en France (Le Mézec, 2018). Outre la situation de verrouillage socio-technique (Magne *et al.*, 2020), cet état de fait est généralement attribué au manque de références disponibles sur les performances du croisement. Il est progressivement comblé par de nombreux travaux français et internationaux portant sur les performances théoriques i.e. génétiques, phénotypiques et économiques (Dezetter *et al.*, 2019) du croisement. Ces travaux adoptent généralement une entrée par schéma de croisement et comparent entre elles les performances d'individus moyens d'un génotype croisé donné et celles des populations parentales de race pure. Cette approche permet de fournir un comparatif des atouts et limites des différents schémas de croisement et de dresser un panorama de l'offre génétique disponible en matière de croisement, pour des systèmes de production divers (Clasen *et al.*, 2019). En revanche, peu de travaux ont jusqu'ici porté sur les performances du croisement à l'échelle du troupeau bovin lait (Dezetter *et al.*, 2017 ; Clasen *et al.*, 2020). Ceux-ci ont procédé en modélisant puis simulant des troupeaux de race pure dans lesquels un seul schéma de croisement était introduit sur l'intégralité du troupeau. Cependant, de nombreux·euses éleveur·euse·s introduisent le croisement par essai-erreur, ce qui les conduit à devoir gérer temporairement voire durablement plusieurs schémas de croisement au sein de leur troupeau (Quénon *et al.*, 2020), qui est alors composé d'une grande diversité de génotypes croisés. D'autre part, certaines stratégies d'éleveur·euse·s ne visent pas nécessairement à terme un troupeau constitué intégralement de vaches croisées (Dezetter *et al.*, 2017). Ces situations intermédiaires sont communes en contexte de fermes réelles et posent la question de l'évaluation des performances du croisement dans ces troupeaux. Cette communication vise donc à (i) appréhender la grande diversité de génotypes croisés et caractériser leurs profils de performances zootechniques pour définir des classes d'animaux, et (ii) de simuler des troupeaux constitués de combinaisons de ces classes d'animaux afin de sélectionner celles qui optimisent le compromis entre performances de production (lait, taux), de fertilité et de santé de la mamelle.

1. MATERIEL ET METHODES

Cette étude s'appuie sur un échantillon de 14 troupeaux bovins lait issus de de grandes régions laitières françaises : Bretagne (n = 4), Auvergne-Rhône-Alpes (n = 4), Hauts-de-France (n = 3) et Normandie (n = 3). Ils ont été échantillonnés selon les critères suivants : (i) troupeau initialement constitué exclusivement de vaches de race Prim'Holstein (HO), (ii) au moins 1/3 du troupeau constitué de vaches croisées en 2018 toutes générations de croisement confondues (au plus 2/3 de vaches HO) et (iii) présence de croisées de deuxième génération (G_2) en lactation. La période d'étude inclut les campagnes 2009 à 2018.

1.1. DEFINITION DES CLASSES GENETIQUES

Les informations raciales et généalogiques des femelles présentes dans les 14 troupeaux au cours de la période d'étude ont été extraites du Système National d'Information Génétique et mises à notre disposition. Nous avons utilisé ces informations pour reconstruire le génotype de chaque femelle croisée (code race 39). La grande diversité de génotypes croisés i.e. de combinaisons de races au sein des 14 troupeaux (Figure 1), mais également la diversité de génotypes présents au sein de chaque troupeau nous a conduit à définir des classes génétiques plus inclusives en nous appuyant sur deux indicateurs : le pourcentage de

Figure 1 Diversité des génotypes croisés de l'échantillon

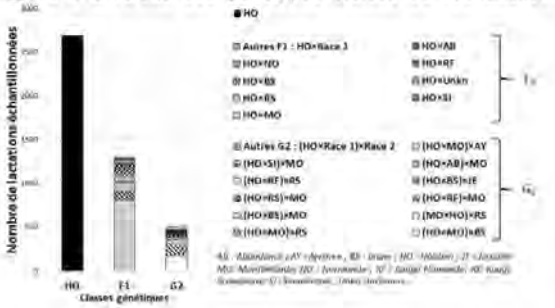


Tableau 1 Description des deux jeux de données utilisés

	Jeu de données n°1		Jeu de données n°2	
Classe génétique	**Lactations**	**Femelles**	**Lactations**	**Femelles**
HO	2 695	1 257	2 738	1 277
F_1	1 296	540	1 287	512
G_2	496	254	451	221
Total	4 487	2 051	4 476	2 010

gènes HO de l'individu (unique race initiale des troupeaux) et la valeur théorique d'hétérosis, calculée selon la méthode de Dechow et al. (2007) comme suit : $H = 1 - \sum s_i d_i$, avec s_i et d_i les proportions de gènes de la race i issues respectivement du père et de la mère. Puis les lactations relatives aux individus des classes génétiques insuffisamment représentées au sein des 14 troupeaux ont été écartées, ce qui nous a conduit à ne conserver que trois classes génétiques : les HO pures, les croisées de première génération (F_1, 50% de gènes HO et 100% d'hétérosis) et de croisées trois voies de deuxième génération (G_2, 25% de gènes HO et 100% d'hétérosis). Ce faisant, l'indicateur de valeur théorique d'hétérosis est devenu superflu.

1.2. TRAITEMENT DES DONNEES BRUTES

Nous avons extrait les données de contrôle laitier de ces 14 troupeaux pour les campagnes 2009 à 2018. Ces données incluaient les performances de production standardisées à 305 jours de lactation pour la quantité de lait (PL en kg/VL/lactation), les taux butyreux (TB en g/kg/lactation) et protéique (TP en g/kg/lactation). Nous avons calculé les scores de cellules somatiques (SCS) en utilisant les données de comptes de cellules somatiques (CSC) avec le calcul suivant : $SCS = log_2(CSC/10^5) + 3$.. L'intervalle vêlage-IA fécondante (IVIAF) a été calculé en s'appuyant les données de vêlages et d'inséminations. En raison de données de reproduction manquantes pour certaines femelles dont les données de production étaient disponibles, nous avons construit deux jeux de données distincts (Tableau 1) : le premier (n = 4487 lactations de 2051 femelles) contenait les données de production (PL, TB et TP) et de SCS ; le second (n = 4476 lactations de 2010 femelles) contenait les données de reproduction (IVIAF).

1.3. MODELISATION ET ESTIMATION DES PERFORMANCES PAR CLASSE GENETIQUE

Nous avons analysé sept traits de performances : 4 liés à la production laitière (PL, TB et TP), 1 à la santé de la mamelle (SCS) et 2 à la fertilité (IVIAF). Nous avons utilisé des modèles linéaires et estimé, pour chaque performance, la moyenne ajustée de chacune des classes génétiques, toutes parités confondues. Pour chaque performance, nous avons ensuite comparé les moyennes ajustées entre classes génétiques par des tests appariés de Tukey (P < 5 %). Toutes les analyses ont été réalisés en utilisant le logiciel RStudio (version 1.1.463) et le package emmeans (Lenth, 2019). En nous basant sur les modèles d'évaluation génétique (Geneval, 2019), nous avons construit deux modèles linéaires. Le premier, pour les traits de production et de santé de la mamelle, intégrait comme effets fixes les effets troupeau-année, classe génétique × parité, mois de vêlage × parité, âge au vêlage × parité et durée du tarissement précédent × parité. Le second, pour l'IVIAF, intégrait les effets troupeau-année, classe génétique × parité, mois de vêlage × année et âge au vêlage.

1.4. SIMULATION DE DE TROUPEAUX ET SELECTION SUR LEURS PERFORMANCES MOYENNES

Nous avons simulé des compositions fictives de troupeaux définies par toutes les combinaisons possibles des 3 classes génétiques (HO, F_1 et G_2) pour constituer un troupeau de 100 individus, à la manière d'un plan de mélanges (Snee, 1979). Nous avons ainsi généré $C^3_{100+3-1} = C^3_{102} = 5151$ compositions de troupeau différentes (Tableau 2).

Tableau 2 Compositions en classes génétiques (HO, F_1 et G_2) des 5151 troupeaux simulés

N° de la composition de troupeau	Composition du troupeau		
	% HO	% F_1	% G_2
#1	100	0	0
#2	99	1	0
…	…	…	…
#2576	0	100	0
…	…	…	…
#5150	0	1	99
#5151	0	0	100

Chaque performance moyenne P de chaque composition ont été calculées comme suit :

$P = \frac{(\%HO \times P_{HO}) + (\%F_1 \times P_{F_1}) + (\%G_2 \times P_{G_2})}{100}$ avec $\%HO$, $\%F_1$, $\%G_2$ les pourcentages respectifs de HO, F_1 et G_2 de la composition et P_{HO}, P_{F_1} et P_{G_2} les performances moyennes des classes génétiques HO, F_1 et G_2 (Tableau 3). En procédant ainsi pour tous les traits de performances étudiés, nous avons modélisé les profils de performances moyennes pour chaque composition de troupeau générée.

Nous avons procédé à une sélection parmi les 5151 troupeaux simulés. Premièrement, nous avons sélectionné les troupeaux avec un IVIAF moyen inférieur à 130 jours (Reproscope, 2017), en considérant que le croisement est usuellement introduit en troupeau de vaches HO pour améliorer leur fertilité (Dezetter et al., 2019). Cette étape nous a permis de sélectionner 1286 troupeaux. Deuxièmement, nous avons sélectionné parmi ces 1286 troupeaux les solutions optimales au sens de Pareto (Williams et Kendall, 2017) selon cinq fonctions d'objectifs, choisies pour explorer les compromis entre performances (dont certaines corrélées négativement) de production quantitative et qualitative, de reproduction et de santé de la mamelle: PL, TB, TP, IVIAF et SCS. Un troupeau est une solution optimale de Pareto s'il n'est pas possible de trouver un autre troupeau dont une performance moyenne est supérieure sans en dégrader une autre au moins. Cette seconde étape nous a permis de sélectionner un groupe final de 119 troupeaux.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. PERFORMANCES DES CLASSES GENETIQUES

Nos résultats (Tableau 3) montrent que les trois classes génétiques définies (HO, F_1 et G_2) présentent des profils de performances laitières significativement différents : la production laitière est supérieure pour les HO comparé aux F_1 (7513 vs. 7289 kg/VL/lactation) et supérieure pour les F_1 comparé aux G_2 (6697 kg/VL/lactation). La tendance s'inverse pour les taux : les G_2 présentent des valeurs plus élevées que les F_1 (+ 1,0 g/kg/lactation pour le TB et + 0,6 g/kg/lactation pour le TP), celles-ci surpassant quant à elles les HO (+ 2,2 g/kg/lactation pour le TB et + 1,1 g/kg/lactation pour le TP). Concernant les performances de santé de la mamelle, aucune différence significative n'a été mise en évidence pour les SCS, ni entre HO et F_1, ni entre HO et G_2. En revanche, les F_1 présente un SCS significativement inférieur à celui des G_2 (- 0,19). Enfin, aucune différence significative n'a pu être montrée entre F_1 et G_2 pour l'IVIAF. Cependant, l'IVIAF des F_1 et des G_2 est significativement inférieur à celui des HO. La discussion de nos résultats au regard de la littérature s'appuie sur une sélection des études des performances du croisement pour des schémas de croisement qui sont ceux les plus représentés dans notre échantillon (Figure 1). Concernant la comparaison des performances laitières entre HO et F_1, nos résultats convergent avec ceux dont la littérature fait état, à savoir une production quantitative de lait supérieure pour les HO et des valeurs de taux butyreux et protéique à l'avantage des F_1

Tableau 3 Moyennes ajustées (erreur standard entre parenthèses) des performances de production, santé de la mamelle et fertilité des classes génétiques Holstein pures (HO), première (F_1) et deuxième génération de croisement trois voies (G_2).

Classe génétique	PL (kg/VL/lactation)	TB (g/kg/lactation)	TP (g/kg/lactation)	SCS	IVIAF (jours)
HO [100% gènes HO]	7 513^{a} (34,8)	38,2^{a} (0,14)	31,3^{a} (0,10)	2,77^{ab} (0,041)	143^{a} (1,6)
F_1 [50% de gènes HO]	7 289^{b} (42,4)	40,4^{b} (0,17)	32,4^{b} (0,10)	2.72^{a} (0,049)	127^{b} (2,3)
G_2 [25% de gènes HO]	6 697^{c} (62,3)	41,4^{c} (0,24)	33,0^{c} (0,15)	2,91^{b} (0,073)	129^{b} (3,7)

(Clasen *et al.*, 2019). Nos résultats montrent également la supériorité des HO par rapport aux G_2 concernant la quantité de lait produite, même si nos résultats montrent un différentiel HO *vs*. G_2 moins prononcé que ceux de Shonka-Martin *et al.* (2019). Enfin, nos résultats comparatifs des performances laitières entre F_1 et G_2 montrent des valeurs de taux significativement plus élevées pour les G_2, contrairement aux travaux de Malchiodi *et al.* (2014) qui n'ont pas montré de différences significatives entre F_1 et G_2. Nos résultats montrent également que les F_1 ont une meilleure fertilité que les HO, ce qui concorde avec la littérature (Clasen *et al.*, 2019). Les études comparant les performances de fertilité entre HO et G_2 sont peu nombreuses (Hazel *et al.*, 2014) mais aboutissent également à conclure sur la meilleure fertilité des G_2. En revanche, l'étude irlandaise de McClearn *et al.* (2020) a fait état de l'absence différence significative pour les valeurs d'IVIAF entre HO et croisées. Cependant, cela peut s'expliquer par les choix d'orientation de l'index de sélection en race Holstein, qui sont davantage favorables au traits de fertilité pour l'index irlandais comparé à l'index français.

2.2. PERFORMANCES A L'ECHELLE TROUPEAU

Parmi l'ensemble des compositions {HO ; F_1 ; G_2} possibles, le processus de sélection (IVIAF < 130 j et optimisation des performances PL, TB, TP, SCS et IVIAF) a abouti à ne retenir que les troupeaux aux compositions bi-catégorielles HO-F_1 et F_1-G_2 ainsi que celles 100 % F_1 et 100 % G_2 (Figure 2). De plus, le pourcentage de HO dans les troupeaux sélectionnés n'excède jamais 18 % tandis que les pourcentages de HO et F_1 varie entre 0 et 100 %. C'est une conséquence directe du seuil de sélection sur l'IVIAF, les HO ayant un IVIAF moyen de 143 jours (Tableau 3). L'absence de compositions tri-catégorielles parmi celles retenues par le processus de sélection suggère que la stratégie d'introduction du croisement qui aboutirait à ce type de composition (introduction du croisement sur une part faible du troupeau) ne permet pas de maximiser le compromis entre les performances considérées (PL, TB, TP, SCS et IVIAF). A l'inverse, les compositions bi-catégorielles sont susceptibles d'être obtenues via une introduction rapide du croisement, ce qui suggère que cette stratégie fournirait de meilleurs résultats. Cette conclusion est toutefois à relativiser, pour deux raisons : la première est le choix de la méthode d'évaluation des performances et de classement des troupeaux i.e. solutions optimales au sens de Pareto, sur lequel nous reviendrons par la suite. Le second est relatif aux avantages de la stratégie d'introduction « partielle » du croisement en considérant d'autres aspects que les performances zootechniques *stricto sensu*. En effet cette stratégie de transition moins rapide vers le croisement requiert moins de changement et d'adaptation de la part des éleveur·euse·s en matière de gestion du renouvellement et de la réforme (Quénon *et al.*, 2020), ce qui peut venir contrebalancer l'incertitude quant aux bénéfices escomptés d'une telle transition.

L'examen des performances des troupeaux sélectionnés montre que les troupeaux sélectionnés ont des performances de PL moyennes comprises entre 6700 et 7329 kg/VL (Figure 3), des performances d'IVIAF moyen comprises entre 127 et 130 jours (Figure 3), des performances de TB moyen comprises entre 40,0 et 41,4 g/kg et des performances de TP comprises entre 32,2 et 34,0 g/kg (Figure 4). Le compromis entre performance laitière et fertilité est maximisé par le troupeau {100% F_1} (Figure 3), pour lequel la valeur d'IVIAF est minimale (127 j) et la valeur de PL proche de la PL maximale (7289 kg/VL, – 40 kg). Les troupeaux aux compositions mixtes HO-F_1 présentent des PL moyennes supérieures mais un IVIAF moyen plus long. Les compositions mixtes F_1-G_2 ont des PL moyennes inférieures et un IVIAF moyen plus long que le troupeau 100% F_1. L'augmentation du pourcentage de G_2 dans les troupeaux conduit à une baisse de la PL moyenne, de 7283 kg/VL pour le troupeau {99% F_1 ; 1% G_2} à 6697 kg/VL pour le troupeau {100% G_2}. Les meilleures performances moyennes pour les taux sont obtenues par le troupeau {100 % G_2} (Figure 4). Le compromis entre la quantité de lait et les taux tend à l'avantage de ces derniers au détriment de la quantité de lait lorsque le pourcentage de G_2 augmente dans le troupeau.

En considérant l'évolution de la composition raciale d'un troupeau dans lequel est introduit le croisement, ceci conduit à affirmer que le croisement trois voies modifie le profil de multiperformances du troupeau vers une moindre production laitière quantitative, mais aux bénéfices des taux, et, dans une moindre mesure, de la fertilité. De tels compromis traits sont généralement considérés à l'échelle individuelle, désignés sous le terme de *trade-offs* (Ollion *et al.*, 2016). Nos résultats aux échelles individuelle et troupeau montrent ainsi que l'existence de trade-offs différents entre HO, F_1 et G_2, et que la combinaison de ces classes génétiques engendre des profils de multiperformances différents à l'échelle troupeau. Or la composition du troupeau dépend des pratiques d'introduction et de gestion du croisement. En outre, l'évaluation des performances à l'échelle troupeau se discute à l'aune des compromis entre performances qu'un·e éleveur·euse est disposé·e à accepter, en fonction des objectifs affectés au troupeau et/ou au système dans son ensemble. Nos résultats contribuent ce faisant à souligner les bénéfices de la diversité fonctionnelle que génère le croisement à l'échelle du troupeau bovin lait, à condition d'adapter sa gestion au regard de déterminants internes – e.g. valeurs, normes et objectifs – et externes – e.g. valorisation des taux sur les grilles de paiement du lait – (Magne *et al.*, 2019).

2.3. PERSPECTIVES

Dans cette étude, nous avons construit des classes génétiques basées sur la valeur théorique d'hétérosis et le pourcentage de gènes HO. Cette classification est moins précise mais plus adaptée aux données de fermes réelles et a permis d'identifier des profils de performances cohérents avec les résultats d'études basées sur des schémas de croisement. Elle demande cependant à être consolidée en la testant sur un échantillon de ferme plus grand, ce qui permettrait d'intégrer une plus grande diversité de systèmes et de niveaux de production ainsi que d'intégrer les générations de croisement trois voies au-delà de la G_2. Plus généralement, le croisement génère génération après génération une multiplication des profils génétiques diversifiés au sein du troupeau, bien qu'un retour à un troupeau en race pure soit possible. L'évaluation du profil de performances de chacune de ces générations et leur potentiel impact sur les performances du troupeau en fonction de leur représentativité fournirait des éléments pour discuter de l'intérêt du croisement à plus long terme et gagneraient à être complétées d'analyse longitudinales de fermes réelles.

L'utilisation de l'optimum de Pareto pour sélectionner les troupeaux les plus efficients présente l'avantage opérationnel de ne pas pondérer les critères de performances à

Figure 2 Compositions {% HO ; % F_1 ; % G_2} des troupeaux sélectionnés sur l'IVIAF < 130 j et optimisant les performances de production de lait, de fertilité et de santé de la mamelle au sens de Pareto (n = 119)

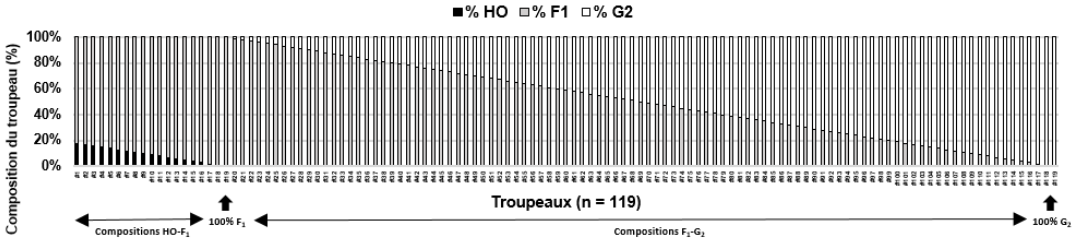


Figure 3 Performances moyennes pour la production laitière (PL) et l'IVIAF des troupeaux sélectionnés (n = 119). A chaque troupeau en abscisse correspondent deux points.

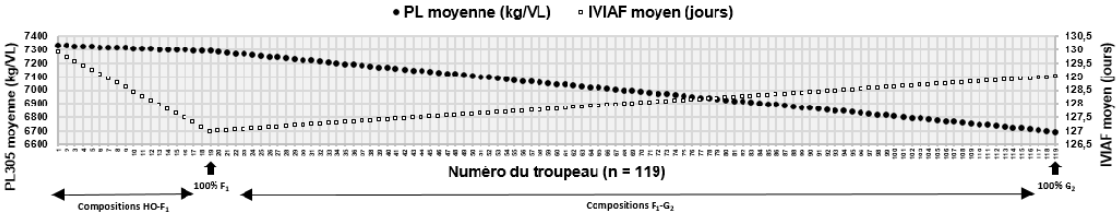
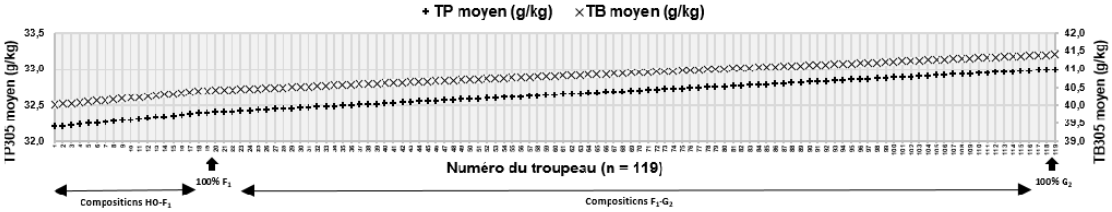


Figure 4 Performances moyennes pour les taux butyreux (TB) et protéique (TP) des troupeaux sélectionnés (n = 119). A chaque troupeau en abscisse correspondent deux points.



maximiser, alors que ceux-ci sont hautement circonstanciels et peuvent varier dans le temps et selon les stratégies individuelles des éleveur·euse·s. C'est aussi ce qui constitue une limite à notre travail car la sélection des troupeaux « optimaux » se base sur un équilibre de performances choisies *a priori*, et dont l'optimalité s'abstrait d'éléments contextuels déterminants dans l'évaluation des performances du troupeau. Ainsi, l'intégration d'une pondération différentielle des critères de performances selon des stratégies-types pourrait fournir des éléments de discussion opérationnels. En outre, il serait intéressant d'approfondir l'analyse des performances zootechniques à leurs implications économiques et sur le travail e.g. diminution des frais de reproduction et de l'astreinte liée aux gains de fertilité. Enfin notre évaluation des performances des troupeaux s'appuie sur les valeurs moyennes sans tenir compte de l'écart-type lié à la variabilité inter-individuelle des performances, qui permettrait d'affiner la gestion et la combinaison des profils de performances intra-troupeau (Puillet *et al.*, 2010).

Ce travail a bénéficié des financements du département ACT, de la région Occitanie, du Comité Scientifique de l'ENSFEA, du projet PSDR4 ATA-RI. Les données ont été fournies par les Chambres d'Agriculture, INRAE, les organismes de contrôle de performances et d'insémination artificielle et les organismes de sélection aux Systèmes Nationaux d'Information Génétique. Nous remercions les éleveur·euse·s de nous avoir autorisé à accéder à leurs données. Nous remercions également G. Galipaud, I. Palhiere, H. Larroque, C. Pontet et J.-E. Bergez pour leur contribution au traitement et aux analyses des données.

Clasen J., Fogh A., Kargo M., 2019. Jour. Dairy Sci., 102, 436-441
Clasen J., Fikse W., Kargo M., Rydhmer L., Strandberg E., 2020. Jour. Dairy Sci., 103, 514-528
Dechow C. D., Rogers G. W., Cooper J. B., Phelps M. I., Mosholder A. L., 2007. Jour. Dairy Sci., 90, 3542-3549
Dezetter C., Leclerc H., Mattalia S., Barbat A., Boichard D., Ducrocq V., 2015. Jour. Dairy. Sci., 98, 4904-4913
Dezetter C., Bareille N., Billon D., Côrtes C., Lechartier C., Seegers H., 2017. Jour. Dairy. Sci., 100, 8239-8264
Dezetter C., Boichard D., Bareille N., Grimard B., Le Mézec P., Ducrocq V., 2019. INRA Prod. Anim., 32, 359-378
Geneval. 2019. https://www.geneval.fr/indexations-races-bovines
Hazel, A. R., Heins, B. J., Seykora, A. J., Hansen, L. B. 2014. Jour. Dairy Sci., 97, 2512-2525
Le Mézec, 2018. Génomique, sexage, croisement : impacts sur la conduite du troupeau
Lenth R. 2019. https://CRAN.R-project.org/package=emmeans
Magne M.-A., Quénon J., Doré A. A paraitre. Analyse socio-technique des changements induits par le développement du croisement laitier dans les pratiques des professionnels de l'élevage bovin lait français. In Changement et professionnalisation. Ed Cépaduès
Magne M.-A., Nozières, M.-O., Cournut S., Ollion E., Puillet L., Renaudeau D., Fortun-Lamothe L. 2019. INRA Prod. Anim, 32, 263-280
Malchiodi F., Cecchinato A., Penasa M., Cipolat-Gotet C., Bittante G. 2014. Jour. Dairy Sci., 97, 4530-4541
McClearn B., Delaby L., Gilliland T. J., Guy C., Dineen M., Coughlan F., Buckley F., McCarthy B., 2020. Jour. Dairy Sci., 103, 5200-5214
Ollion E., Ingrand S., Delaby L., Trommenschlager J.-M., Colette-Leurent S., Blanc F. 2016. Liv. Sci., 183, 98-107
Puillet L., Sauvant D., Tichit M., 2010. INRA Prod. Anim, 23, 255-268
Quénon J., Magne M.-A., Ingrand S., 2020. Animal, 14, 1293-1303
Reproscope, 2017. http://www.reproscope.fr/ consultée le 17/06/2020
Shonka-Martin B. N., Hazel A. R., Heins B. J., Hansen L. B., 2019. Jour. Dairy Sci., 102, 871-882
Snee R., 1979. Commun. Stat. – Theor. Meth., 8, 303-326
Williams P. J., Kendall W. L., 2017. Ecol. Modell., 343, 54-67

Annexe 4 : Affiche acceptée aux 3R 2018

Pourquoi et comment les éleveurs bovin lait adoptent-ils le croisement laitier ?
Why and how dairy cattle farmers adopt dairy crossbreeding in their herd?

QUÉNON J. (1), OLLION E., (2), BASSET M. (1,3), MAGNE M.-A. (4),
(1) INRA, UMR 1248 AGIR, 31326 Castanet-Tolosan, France
(2) ISARA Lyon, 69364 Lyon, France
(3) Adresse actuelle : Chambre d'Agriculture du Gers, 32003 Auch, France
(4) AGIR, Université de Toulouse, ENSFEA, INRA, INPT, INP- El PURPAN, Castanet-Tolosan, France

INTRODUCTION

En France, la pratique du croisement entre races laitières au sein du troupeau bovin lait est en constante progression depuis 2010, bien qu'encore minoritaire (1,5 % des inséminations en 2015 (Le Mézec, 2016)). Or, à ce jour, peu de références existent sur les motivations des éleveurs à pratiquer le croisement laitier et la manière dont ils le mettent en place. Cette étude a visé à caractériser une diversité de trajectoires de mise en place du croisement laitier.

1. MATERIEL ET METHODES

De mai à juin 2016, 17 entretiens ont été menés auprès d'éleveurs dans trois zones pour explorer différents contextes de production laitière et de dynamiques collectives autour du croisement laitier : 2 en Aveyron (A), 8 en Finistère (F) et 7 Rhône-Alpes (RA). Tous les éleveurs pratiquent le croisement « stratégique et volontaire » (part de femelles croisées > 10 % et pratique du croisement rotationnel). Les élevages de l'échantillon ont une part de surface en herbe élevée (> 80 % de la SAU) et sont pour la plupart conduits en agriculture biologique (13 en AB sur 17). Une analyse factorielle en composantes multiples (AFCM) a été réalisée sur 7 variables (V), construites à partir de trois questions : i) *Pourquoi les éleveurs ont adopté la pratique de croisement ?* (V1-Enjeu du croisement) ; ii) Quelle a été la dynamique d'évolution du croisement dans le troupeau ? (V2-Vitesse de la prise de décision ; V3 et V4-Effectif initial et final de vaches croisées respectivement ; V5-Évolution du schéma de croisement) ; iii) *Quels résultats retirent les éleveurs de cette transition et quelles perspectives d'évolution ?* (V6-Satisfaction et V7-Perspectives d'évolution du croisement). Une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été réalisée pour identifier des groupes d'élevages.

2. RESULTAT: TROIS TYPES DE TRAJECTOIRES DE MISE EN PLACE DU CROISEMENT LAITIERS

Trois Trajectoires types de Mise en place du Croisement (TMC) au sein des élevages ont été identifiées (Figure. 1).

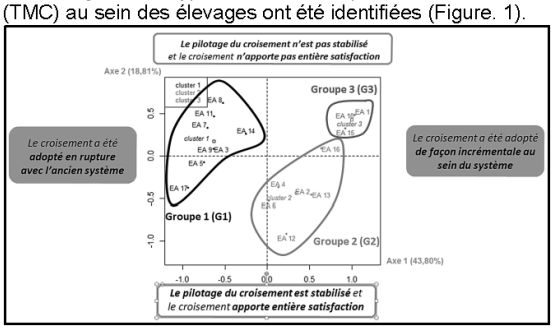


Figure 1 : Plan factoriel de l'AFCM des trois groupes de trajectoires issus de la CAH

Elles sont structurées autour de deux axes factoriels représentant 62% de la variabilité observée. L'axe 1 renvoie à la profondeur des changements opérés en lien avec l'adoption du croisement et au rythme auquel il s'est mis en place dans l'élevage. L'axe 2 rend compte du degré de stabilisation de la pratique de croisement dans le troupeau et du niveau de satisfaction de l'éleveur vis-à-vis du croisement.

G1 : Les 8 élevages (5F, 3RA et 5 en AB) de ce groupe présentent une ***TMC en rupture avec l'élevage conduit en races pures et visant l'intégralité du troupeau.*** La part de croisement a été importante dès l'adoption de cette pratique et la part de vaches croisées en 2015 est supérieure à 70%. Le type de croisement choisi est le rotationnel à 3 ou 4 voies. Le croisement a été un moyen pour une reconception de l'ensemble du système d'élevage (changements du système fourrager et de l'organisation du travail). Le croisement n'est pas encore stabilisé dans le troupeau, des ajustements étant poursuivis pour mieux répondre aux objectifs des éleveurs.

G2 : Les 6 élevages (3F, 3RA, 6 en AB) de groupe présentent une ***TMC progressive et visant à terme l'intégralité du troupeau.*** Le croisement a été mis en place sur une part faible du troupeau puis a progressivement augmenté. La part actuelle de vaches croisées est encore inférieure à 70% du troupeau bien que 100% soit visé à terme. Ceci est révélateur des hésitations et doutes des éleveurs quant à l'adoption de cette pratique. Le type de croisement choisi est le croisement 3 voies majoritairement.

G3 : Les 3 élevages (2A, 1RA, 2 en AB) de ce groupe présentent une ***TMC marginale et non stabilisée***. Dans ces élevages, il n'y a pas de types de croisement privilégié. Les effectifs initial et final de vaches croisées dans le troupeau sont faibles et n'ont pas vocation à s'accroître. Les éleveurs tâtonnent, soit par manque de références soit car le croisement ne constitue pas à long terme un levier stratégique d'intérêt selon eux.

DISCUSSION - CONCLUSION

Différentes TMC dans les élevages ont été caractérisée selon le rythme et la profondeur du changement opéré par rapport à la conduite du troupeau en race pure. Ceci est en accord avec les travaux sur l'adoption des innovations en élevage (Ingrand et al., 2014). Le croisement peut-être : i) un moyen pour adapter les animaux au pâturage ou pour corriger des aptitudes fonctionnelles dégradées ; ii) étendu à l'ensemble du troupeau ou seulement une partie y compris à long terme. Les éleveurs aveyronnais se retrouvent dans ce G3 alors que les bretons se retrouvent majoritairement dans le G1. Ceci peut s'expliquer par les dynamiques locales autour du croisement dans ces zones (faible en A et forte dans le F). Quel que soit le groupe, les éleveurs citent l'amélioration des traits fonctionnels des vaches et la complexification des raisonnements des choix techniques comme l'avantage et l'inconvénient principal du croisement respectivement. Pour approfondir ces points, une thèse en cours à l'UMR AGIR analyse la coévolution des performances du troupeau et des pratiques d'élevage durant la transition vers des troupeaux conduits intégralement ou partiellement en croisement.

Merci aux éleveurs enquêtés pour leur contribution ainsi qu'aux conseillers pour leur appui

Le Mézec P., 2016. SPACE
Ingrand, S., Lurette, A., Gouttenoire, L., Devun, J., Moulin, CH., 2014. INRA Prod. Animales, 27 (2), 147-160

Annexe 5 : Affiche présentée à la Journée du projet ATA-RI – 03/10/19

Trois trajectoire-types pour passer d'un troupeau bovin lait conduit en race pure vers une conduite en croisement trois voies.

J. Quénon, S. Ingrand, M.-A. Magne

Journée ATA-RI

3 octobre 2019

VR2

PROBLEMATIQUE SOCIO-ECONOMIQUE

L'utilisation de la diversité des aptitudes individuelles des animaux est identifiée comme un levier d'action intéressant pour tamponner les effets variables de l'environnement sur la capacité de production des systèmes d'élevage et permettre ainsi leur adaptation aux changements du contexte de production. Pour améliorer la multiperformance et la robustesse de leur troupeau bovin lait, certain·e·s éleveur·euse·s choisissent de combiner différents types génétiques par croisement de races laitières. En France, bien qu'encore minoritaire en comparaison de la conduite en race pure – et plus particulièrement en race Prim'Holstein –, la pratique du croisement laitier est en croissance constante depuis près de dix ans.

Les éleveur·euse·s qui optent pour le croisement rotationnel se retrouvent **en marge non seulement du dispositif de sélection génétique** qui, en France comme dans le monde entier, est organisé autour de la race pure, **mais également de la plupart des organismes de conseil** pour ce qui relève du suivi des performances du troupeau. **Les éleveur·euse·s opèrent ainsi des changements de composition et de conduite du troupeau sans références « institutionnalisées ».** La question qui se pose alors est : **comment les éleveur·euse·s gèrent le passage d'un troupeau en race pure vers un troupeau en croisement rotationnel ?**

QUESTIONS DE RECHERCHE / STRATEGIE CHOISIE

La plupart des travaux sur le croisement laitier comparent les performances des vaches croisées à celles des vaches de race pure. En revanche, peu s'intéressent à la façon dont les éleveur·euse·s gèrent des troupeaux en croisement et aucun, à notre connaissance, n'étudie la façon dont les éleveur·euse·s mettent en œuvre la transition du troupeau initialement en race pure vers une conduite en croisement.

L'objectif de cette étude a donc été de **caractériser des trajectoires-types de transition technique de troupeau bovin lait vers le croisement trois voies** (trois races).

Pour cela nous avons recueilli et **analysé l'évolution des pratiques de configuration du troupeau (reproduction, renouvellement, réforme)** d'éleveur·euse·s bovin lait français·e **sur la période allant de l'année d'introduction du croisement jusqu'à 2018,** date à laquelle le troupeau laitier est en partie composé d'animaux croisés de deuxième génération

Etude de cas réels ; analyse retrospective

RESULTATS D'INTERET POUR ATA-RI

1. Deux axes majeurs des trajectoires de transition d'un troupeau bovin vers le croisement laitier

- **Axe 1 (Fig. 1) : L'ampleur de la transition** : le croisement est un moyen pour adapter le troupeau à une reconception globale de la ferme *vs.* le croisement comme changement majeur pour améliorer les performances du système en place
- **Axe 2 (Fig. 1) : Le rythme de mise en œuvre de la transition et la gestion des effets différés :** une transition prudente et progressive *vs.* une transition prévue et rapide.

2. Trois trajectoires-types de transition du troupeau bovin vers le croisement laitier

- Trajectoire 1 : **le croisement supporte une conversion à l'agriculture biologique ou une transition vers un système plus herbager**. Les éleveur·euse·s choisissent **en amont un schéma de croisement pour rester productif en lait et l'introduisent rapidement** au sein du troupeau, ce qui les conduit à **devoir réajuster les pratiques de configuration** (croisement industriel, achat/vente de génisses, Fig. 2) pour gérer le surplus d'animaux lié à l'amélioration des performances de reproduction.
- Trajectoire 2 : **le croisement supporte une conversion à l'agriculture biologique ou une transition vers un système plus herbager**. Les éleveur·euse·s procèdent par **essai-erreur pour trouver un schéma de croisement adapté à leurs nouveaux objectifs**, lesquels incluent l'acceptation d'une réduction du volume de lait produit. Iels l'introduisent donc **progressivement au sein du troupeau**. De ce fait, les **pratiques de configuration restent stables** car les effets du croisement sur les performances de reproduction sont amortis dans le temps.
- Trajectoire 3 : la transition du troupeau vers **le croisement constitue le seul changement majeur au sein du système d'élevage qui reste stable**. Le schéma de croisement est choisi en amont et **introduit rapidement pour améliorer les performances de reproduction du troupeau sans dégrader celles de production.** Ce rythme rapide conduit les éleveur·euse·s à **réajuster les pratiques de configuration** au cours de la transition pour **s'adapter à l'afflux d'animaux, conséquence de l'amélioration des performances de reproduction du troupeau**.

3. Deux points de passage caractéristiques et communs aux trois trajectoires : l'évaluation des performances de reproduction des vaches

- **Un point de blocage commun sous-tendant le recours au croisement (A, Fig. 2) :** des performances de reproduction faibles lorsque le troupeau était conduit en race pure, qui motive une recherche d'adaptation
- **Un constat d'amélioration en cours de transition (B, Fig. 2) :** un indicateur justifiant la réussite du choix opéré permettant de maintenir l'engagement des éleveur·euse·s dans la transition et qui les amène éventuellement à devoir adapter leurs pratiques pour gérer le surplus d'animaux.

Fig 1. Trois trajectoires-types de transition du troupeau bovin vers le croisement laitier

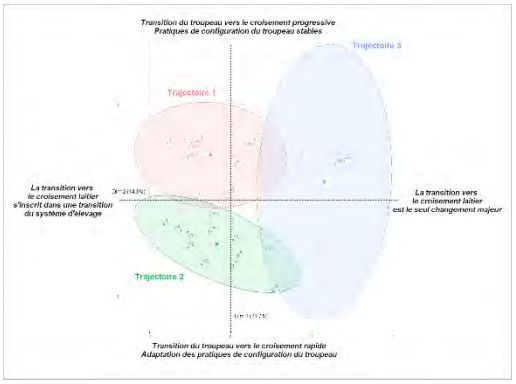
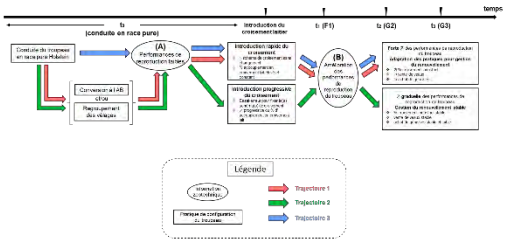


Fig 2. Modélisation conceptuelle des trois trajectoires-types de transition du troupeau bovin vers le croisement laitier



TERRAIN – fiche d'identité

Zone géographique : France entière – 3 zones majeures : Bretagne, Hauts-de-France et Auvergne-Rhône-Alpes

Acteurs impliqués : 26 éleveur·euse·s bovins lait pratiquant le croisement laitier sur au moins 1/3 du troupeau

Méthodologie utilisée : entretiens semi-directifs (~1h30), codage de variables et analyse statistique (analyse des correspondances multiples puis classification hiérarchique sur composantes principales)

Période de l'étude : août – septembre 2018 (2 mois)

Nom du doctorant : Julien QUÉNON

Quel impact de ces résultats ?

- Production de références techniques sur la gestion du croisement laitier mobilisables par des éleveur·euse·s bovins lait qui souhaiteraient l'introduire au sein de leur troupeau, par des conseillers en élevage qui les accompagnent
- Propose une modélisation conceptuelle de trajectoires de transition technique à l'échelle du troupeau qui intègre des pratiques qui changent et d'autres invariantes, des points de passage commun et des effets directs et indirects du croisement

Le projet ATA-RI travaille sur et pour la conception de l'Accompagnement à la Transition Agroécologique par une Recherche-Intervention

Annexe 6 : Ecarts de valeurs moyennes pour plusieurs indicateurs de performances de production entre vaches F_1 et vaches de race pure, issus de la revue de littérature effectuée dans la thèse

Auteurs	Année	Pays	Type de données	Race pure	F_1	Parité	Niveau de production	Lait *(kg/lactation/vache)*	Matière grasse *(kg/vache)*	Matière protéique *(kg/vache)*	Matière Utile *(kg/vache)*	TB *(g/kg lait/vache)*	TP *(g/kg lait/vache)*	SCS
Brandt et al.	1974	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × BS	L1		-788	*-18,1*	*-24*		+4	+1,2	
					BS × HO	L1		*-296*	*-4,1*	*-9,7*		*+1,2*	*+0,2*	
				BS	HO × BS	L1		*+585*	*+25,7*	*+20,3*		*+1,2*	*-0,6*	
					BS × HO	L1		+1077	+39,7	+34,6		-1,6	-1,6	
Heins et al.	2006a	Etats-Unis	Fermes commerciales	HO	HO × MO	L1		-596	-12	-12	-24			
					HO × NO	L1		-1227	-27	-28	-55			
					HO × RS	L1		-476	*-6*	-8	*-14*			
Waurich	2007	Allemagne	Expérimentation	HO	HO × JE			-680				+6,3	+2,6	+0,13
				JE	HO × JE			+1604				-1,05	-3,3	-0,03
Fischer et al.	2008	Allemagne	Expérimentation	HO	HO × BS	L1		-183				+1,9	+1,5	
						L2		-305				+1,6	+1	
Heins et al.	2008	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × JE	L1		-558	*-3*	-15	-18			*+0,27*
Walsh et al.	2008	Irlande	Expérimentation	HO	HO × MO			*-136*	-7	*-4*		*-0,5*	*+0*	
					HO × NO			*-130*	*-4*	*-4*		*+0,8*	*+0,3*	
Heins et al.	2011	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × JE	L1-L3		-909	-9	-19				+0,26
Blöttner et al.	2011a	Allemagne	Expérimentation	HO	HO × BS	L1		-170	+5	+4	+9			-0,18
						L2		-190	+10	+6	+17			-0,25
						L3		-347	+5	+1	+6			+0,26
Heins et al.	2012	Etats-Unis	Fermes commerciales	HO	HO × NO	L1-L5		-1574	-42	-32	-75			*-0,02*
					HO × MO	L1-L5		-673	-12	-11	-24			-0,29
					HO × RS	L1-L5		-790	-15	-13	-29			-0,15
Vance et al.	2013	Royaume-Uni	Expérimentation	HO	HO × JE	L1-L4		-625	*+8*	*-4*	*+4*	+5,8	+2,9	*-0,33*

Les valeurs des performances moyennes des F_1 sont exprimées relativement aux valeurs moyennes des races pures. Les valeurs en italique et en orange correspondent à celles qui sont non significativement différentes de celles des vaches de race pure.

Auteurs	Année	Pays	Type de données	Race pure	F_1	Parité	Niveau de production	Lait (kg/lactation /vache)	Matière grasse (kg/vache)	Matière protéique (kg/vache)	Matière Utile (kg/vache)	TB (g/kg lait/vache)	TP (g/kg lait/vache)	SCS
Hazel et al.	2014	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × MO	L1		*-340*						
						L2		*-37*						
						L3-L5		*-63*						
Jönnson	2015	Suède	Fermes commerciales	HO	HO × RS	L1		-260	+10,9	+1,78				+0,23
						L2		-470	+4,38	-3,19				+0,13
						L3		-539	+1,4	-4,8				+0,16
Ezra et al.	2016	Israël	Fermes commerciales	HO	HO × RS	L1		-939	-26,9	-21,5		*+0,5*	+0,7	*+0,03*
						L2		-1487	-41,8	-35,8		+1	+1	+0,12
						L3		-1354	-37,2	-33,3		+1,1	+0,9	-0,05
Hazel et al.	2017	Etats-Unis	Fermes commerciales	HO	HO × MO	L1-L3		*-16*	*+9*	+10	+19	*+0,9*	+0,9	*+0,07*
					HO × RS	L1-L3		-433	*+5*	*+3*	*+8*	+1,9	+1,4	*+0,04*
Clasen et al.	2019	Danemark	Fermes commerciales	HO	HO × RS	L1	Faible		+3	*+0*				
							Moyen		+7	*+0*				
							Haut		+9	-2				
						L2	Faible		*-2*	-5				
							Moyen		-4	-8				
							Haut		+3	-7				
Hazel et al.	2020	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × MO	L1		*+67*	+11	+13	+23			
						L2		*-3*	*+6*	+14	+19			
						L3		*-72*	*+1*	+12	*+13*			
					HO × RS	L1		-419	*+7*	*+4*	*+11*			
						L2		-790	-1	-3	-5			
						L3		-665	*-1*	*+0*	*+0*			
McClearn et al.	2020	Irlande	Expérimentation	HO	HO × JE	L1-L3		-244	+9	*+0*	*+9*	+3,4	+1,5	*-0,11*

Les valeurs des performances moyennes des F_1 sont exprimées relativement aux valeurs moyennes des races pures. Les valeurs en italique et en orange correspondent à celles qui sont non significativement différentes de celles des vaches de race pure .

Annexe 7 : Ecarts de valeurs moyennes pour plusieurs indicateurs de performances de reproduction entre vaches F_1 et vaches de race pure, issus de la revue de littérature effectuée dans la thèse

Auteurs	Année	Pays	Type de données	Race pure	F_1	Parité	Niveau de production	Nb IA pour IAf	Taux réussite IA1 *(%)*	Taux de gestation *(%)*	IVIAF *(j)*
Brandt et al.	1974	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × BS	L1					-34
					BS × HO	L1					*-13*
				BS	HO × BS	L1					-45
					BS × HO	L1					*-24*
Heins et al.	2006b	Etats-Unis	Fermes commerciales	HO	HO × NO	L1			+13		-27
					HO × MO	L1			+9		-19
					HO × RS	L1			*+8*		-21
Waurich	2007	Allemagne	Expérimentation	HO	HO × JE			-0,13			+15
				JE	HO × JE			-0,03			
Fischer	2008	Allemagne	Expérimentation	HO	HO × BS	L1		-0,16			-17,7
						L2		-0,3			-7,8
Heins et al.	2008	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × JE	L1				*-5*	-23
Walsh et al.	2008	Irlande	Expérimentation	HO	HO × MO	L1-L5		*-0,01*			*-3,2*
					HO × NO	L1-L5		*-0,15*			*-2*
Heins et al.	2011	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × JE	L1-L3					-35
Blöttner et al.	2011b	Allemagne	Expérimentation	HO	HO × BS	L1		*-0,3*			*-13*
						L2		*-0,3*			*-13*
						L3		*-0,4*			*-2*
Heins et al.	2012	Etats-Unis	Fermes commerciales	HO	HO × NO	L1-L4			+5,3	+4,5	-20
					HO × MO	L1-L4			+10,1	+5,3	-26
					HO × RS	L1-L4			+6,2	+2,8	-12
Vance et al.	2013	Royaume-Uni	Expérimentation	HO	HO × JE	L1-L5				+0,16	*-7,4*
Hazel et al.	2014	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × MO	L1-L5			+18,2	+10,8	-39
Buckley et al.	2014	Irlande	Expérimentation	HO	HO × RS	L1-L3		-0,15	+0,08		-4
Jönnson	2015	Suède	Fermes commerciales	HO	HO × RS	L1		-0,06			
						L2		-0,09			
						L3		-0,1			
Ezra et al.	2016	Israël	Fermes commerciales	HO	HO × RS	L1				+2,4	
						L2				+3,2	
						L3				+4,7	
Rinell et Heringstad	2018	Israël	Fermes commerciales	HO	HO × RS	L1-L6					-12
Clasen et al.	2019	Danemark	Fermes commerciales	HO	HO × RS	L1	Faible				-16
							Moyen				-10
							Haut				-9
						L2	Faible				-11
							Moyen				-10
							Haut				-8
Hazel et al.	2020	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × MO	L1			+6	+4	-12
						L2			+11	+9	-22
						L3			+11	+9	-23
					HO × RS	L1			+8	+8	*-7*
						L2			+7	+4	-11
						L3			*+1*	*+1*	*-4*
McClearn et al.	2020	Irlande	Expérimentation	HO	HO × JE	L1-L3			*+7,8*		*+1*

Les valeurs des performances moyennes des F_1 sont exprimées relativement aux valeurs moyennes des races pures. Les valeurs en italique et en orange correspondent à celles qui sont non significativement différentes de celles des vaches de race pure.

Annexe 8 : Ecarts de valeurs moyennes pour plusieurs indicateurs de performances de traits de santé et de longévité entre vaches F_1 et vaches de race pure, issus de la revue de littérature effectuée dans la thèse

Auteurs	Année	Pays	Type de données	Race pure	F_1	Parité	Niveau d'intensivité	Taux de réforme en L1 *(%)*	Durée gestation *(j)*	Poids à la naissance *(kg)*	Difficulté de mise bas *(%)*	Mortinatalité mère (%)	Mortinatalité veaux *(%)*	Score de condition d'état	Poids vif *(kg)*
Heins et al.	2006c	Etats-Unis	Fermes commerciales	HO	HO × MO	L1					-11		-8		
					HO × NO	L1					-6		*-12*		
					HO × RS	L1					-14		-9		
Waurich	2007	Allemagne	Expérimentation	HO	HO × JE			-0,13							
				JE	HO × JE			-1,13							
Heins et al.	2008	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × JE	L1								+0,09	-60
Heins et al.	2010	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × MO	L2-L3			+4,8	+5	*+3,5*		*+0,2*		
Blöttner et al.	2011	Allemagne	Expérimentation	HO	HO × BS	L1			*+2*		*+4*		*+0*		-26,9
						L2-L3			+6		*-13*		*+0*		+18,65
Vance et al.	2013	Royaume-Uni	Expérimentation	HO	HO × JE	L1-L5								+0,17	-44
Hazel et al.	2014	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × MO	L1-L5						-12,6		+0,49	+39
Jönnson	2015	Suède	Fermes commerciales	HO	HO × RS	L1							-2		
						L2							-1		
						L3							*-1*		
Ezra et al.	2016	Israël	Fermes commerciales	HO	HO × RS	L1-L3							*-0*		
Hazel et al.	2017	Etats-Unis	Expérimentation	HO	HO × MO	L1			+3		*+2*		-5		
					HO × RS	L1			+4		+4		-4		
Rinell et Heringstad	2018	Israël	Fermes commerciales	HO	HO × RS	L1-L6								+0,27	
Clasen et al.	2019	Danemark	Fermes commerciales	HO	HO × RS	L1	Faible						-35		
							Moyen						-38		
							Haut						-30		
McClearn et al.	2020	Irlande	Expérimentation	HO	HO × JE	L1-L3					*+3,6*			*-0,0*	-52

Les valeurs des performances moyennes des F_1 sont exprimées relativement aux valeurs moyennes des races pures. Les valeurs en italique et en orange correspondent à celles qui sont non significativement différentes de celles des vaches de race pure.

Annexe 9 : Ecarts de valeurs moyennes pour plusieurs indicateurs de performances de production entre vaches G_2, vaches F_1 et vaches de race pure, issus de la revue de littérature effectuée dans la thèse

Auteurs	Année	Pays	Type de données	Schéma de croisement	Race pure	F_1	G_2	Parité	Lait *(kg/lactation/vache)*	Matière grasse *(kg/vache)*	Matière protéique *(kg/vache)*	Matière Utile *(kg/vache)*	TB *(g/kg lait/vache)*	TP *(g/kg lait/vache)*	SCS
Hazel et al.	2014	Etats-Unis	Expérimentation	3 voies	HO		(HO × JE) × MO	L1	-781			-23			
								L2	-420			*+5*			
								L3-L5	-913			*+18*			
Ferris et al.	2018	Irlande	Expérimentation	3 voies	HO		(HO × JE) × RS	L2-L5	-932	*-8*	-18	*-26*	+4,8	+2	+0,44
Shonka-Martin et al.	2018	Etats-Unis	Expérimentation	3 voies	HO		(HO × MO) × RS	L1	-206			*+2*			
								L2-L3	-372			*+4*			
Hazel et al.	2020	Etats-Unis	Expérimentation	3 voies	HO		(HO × MO) × RS	L1	-1202	-23	-15	-38			
								L2	-1326	-29	-16	-44			
								L3	-1466	-38	-17	-56			
							(HO × RS) × MO	L1	-932	-14	-8	-22			
								L2	-850	-16	*-2*	-16			
								L3	-1087	-24	*-3*	-27			
McClearn et al.	2020	Irlande	Expérimentation	3 voies	HO		(HO × JE) × RS	L1-L3	-354	*-2*	*-4*	*-7*	+2,3	+1,6	*-0,21*
						HO × JE	(HO × JE) × RS	L1-L3	*-110*	-11	*-4*	-16	*-1,1*	*+0,1*	*-0,10*

Les valeurs des performances moyennes des G_2 sont exprimées relativement aux valeurs moyennes des races pures ou des vaches F_1. Les valeurs en italique et en orange correspondent à celles qui sont non significativement différentes de celles des vaches de race pure ou des vaches F_1.

Annexe 10 : Ecarts de valeurs moyennes pour plusieurs indicateurs de performances de reproduction entre vaches G_2, vaches F_1 et vaches de race pure, issus de la revue de littérature effectuée dans la thèse

Auteurs	Année	Pays	Type de données	Schéma de croisement	Race pure	F_1	G_2	Parité	Taux réussite IA1 *(%)*	Taux de gestation *(%)*	IVIAF *(j)*
Hazel et al.	2014	Etats-Unis	Expérimentation	3 voies	HO		(HO × JE) × MO	L1-L5	+23	+12,8	-39
Hazel et al.	2020	Etats-Unis	Expérimentation	3 voies	HO		(HO × MO) × RS	L1	+9	+7	-15
								L2	+7	+6	-20
								L3	*+7*	+11	-15
							(HO × RS) × MO	L1	+8	+9	-16
								L2	+12	+8	-17
								L3	+13	+15	-25
McClearn et al.	2020	Irlande	Expérimentation	3 voies	HO		(HO × JE) × RS	L1-L3	*+0,4*		*-1*
						HO × JE	(HO × JE) × RS	L1-L3	*-7,4*		*-2*

Les valeurs des performances moyennes des G_2 sont exprimées relativement aux valeurs moyennes des races pures ou des vaches F_1. Les valeurs en italique et en orange correspondent à celles qui sont non significativement différentes de celles des vaches de race pure ou des vaches F_1.

Annexe 11 : Ecarts de valeurs moyennes pour plusieurs indicateurs de performances de traits de santé et de longévité entre vaches G_2, vaches F_1 et vaches de race pure, issus de la revue de littérature effectuée dans la thèse

Auteurs	Année	Pays	Type de données	Schéma de croisement	Race pure	F_1	G_2	Parité	Durée gestation *(j)*	Poids à la naissance *(kg)*	Difficulté de mise bas *(%)*	Mortinatalité veaux *(%)*	Score de condition d'état	Poids vif *(kg)*	Mortinatalité mère *(%)*
Heins et al.	2010	Etats-Unis	Expérimentation	3 voies	HO		(HO × JE) × MO	L1	+2,6	-1,3	[illegible]	[illegible]			
								L2	+3,6	[illegible]	[illegible]	[illegible]			
Hazel et al.	2014	Etats-Unis	Expérimentation	3 voies	HO		(HO × JE) × MO	L1-L5					+0,46	-18	[illegible]
Ferris et al.	2018	Irlande	Expérimentation	3 voies	HO		(HO × JE) × RS	L2-L5					+0,26	-30	
Shonka-Martin et al.	2018	Etats-Unis	Expérimentation	3 voies	HO		(HO × MO) × RS	L1					+0,26		
								L2-L3					+0,19		
McClearn et al.	2020	Irlande	Expérimentation	3 voies	HO		(HO × JE) × RS	L1-L3			-1,1		+0,06	-31	
						HO × JE	(HO × JE) × RS	L1-L3			-4,7		+0,05	+21	

Les valeurs des performances moyennes des G_2 sont exprimées relativement aux valeurs moyennes des races pures ou des vaches F_1. Les valeurs en italique et en orange correspondent à celles qui sont non significativement différentes de celles des vaches de race pure ou des vaches F_1.

Annexe 12 : Guide d'entretien

A. INFORMATIONS GÉNÉRALES SUR LA PERSONNE ENQUÊTÉE

A.01. Date de l'entretien : __ /__ /____
A.02. Heure de début de l'entretien : __ h __
A.03. Heure de fin de l'entretien : __ h __
A.04. Durée de l'entretien : __ h __
A.05. Prénom de la personne enquêtée :
A.06. Nom de la personne enquêtée :
A.07. Nom de l'exploitation :
A.08. Statut juridique :
A.09. Adresse postale :
A.10. Code postal :
A.11. Commune :
A.12. Département :
A.13. Téléphone 1 :
A.14. Téléphone 2
A.15. Adresse mail :
A.16. Remarques :

B. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE L'EXPLOITATION

Pouvez-vous me présenter votre exploitation ? Les grandes évolutions depuis que vous vous êtes installé·e : les évolutions structurelles et techniques (ateliers, surfaces, etc.) ? Les évolutions stratégiques (type de production, objectifs généraux, etc.) ? D'autres évolutions (humaines, juridique, etc.) ? (NB : « I/2018/F = installation/2018/futur »)

B.01. Année d'installation :
B.02. Installation (*CF/HCF*) :
B.03. Formation initiale :
B.04. Expérience(s) professionnelle(s) antérieure(s) :
B.05. Ateliers autres que bovin lait *(I/2018/F, création/disparition)* :
B.06. Activités extra- ou para-agricoles *(I/2018/F, gîte/vente directe/semi-activité/…)*
B.07. Effectif total du troupeau *(I/2018/F, ↗/↘/→)* :
B.08. Production laitière de l'exploitation *(I/2018/F, ↗/↘/→)* :
B.09. Production laitière par vache *(I/2018/F, ↗/↘/→)* :
B.10. Type de production laitière (*Conv, AB, AOP, etc.*) :
B.11. Lait livré :
B.11.a Nom de la laiterie :
B.11.b % du lait produit livré :
B.12. Autre(s) mode(s) de valorisation du lait
B.12.a Mode(s) de valorisation (*transfo, vente directe, etc.*) :
B.12.b % du lait produit valorisé :
B.13. Main d'œuvre *(MOf/MOnf, I/2018/F, ↗/↘/→)* :
B.14. SAU *(I/2018/F, ↗/↘/→)* :
B.15. SFP *(I/2018/F, ↗/↘/→)* :
B.15.a SEH :
B.15.b SEM :
B.16. SCOP *(I/2018/F, ↗/↘/→)* :
B.17. Objectifs généraux pour l'exploitation et/ou l'éleveur·euse *(I/2018/F*, changement ou non*)* :

- *Être techniquement performant*
- *Être économiquement performant*
- *S'assurer un revenu*
- *Être constant & homogène*
- *Expérimenter souvent*
- *Être satisfait du système dans lequel je travaille*
- *Avoir un cadre de vie agréable*
- *Tranquillité au travail*
- *Autre, préciser :*

C. LE TROUPEAU : LES EFFECTIFS

On va s'intéresser à l'évolution de votre troupeau en lien avec le croisement : on va d'abord parler de sa composition actuelle, puis on fera un retour en arrière pour que vous m'expliquiez comment la composition de votre troupeau a évolué avec le temps.

C.01. Actuellement (2018)

C.01.a **Effectifs (ou %) :**

Type génétique						
VL	1ère lactation					
	2ème					
	3ème					
	4ème					
	> 4ème					
G2						
G1						
Taureaux						

On n'attend pas nécessairement qu'il remplisse toutes les cases de C.01.a, mais on note dans quelle mesure il est précis, comment l'éleveur apprécie la diversité de son troupeau ? A l'œil ? Comment fait-il le suivi de ses effectifs ? Hyp : la conduite d'un troupeau en croisement amène à un mode de suivi des effectifs différent (+ précis ?) de la conduite en race(s) pure(s).

C.01.b **Suivi des effectifs :** *Comment faites-vous le suivi des effectifs et des différentes catégories d'animaux (carnet, codage « maison », etc.) ?*

C.02. Avant la mise en place du croisement :

Et avant la mise en place du croisement, pourriez-vous me dire comment était composé votre troupeau ?

C.02.a **Effectifs (ou %)**

Type génétique						
VL	1ère lactation					
	2ème					
	3ème					
	4ème					
	> 4ème					
G2						
G1						
Taureaux						

C.03. Dates-clés de l'évolution du troupeau : *Quelles sont selon vous les étapes-clés dans l'évolution de votre troupeau ?*

Evènement/étape	1er croisement	1ères F1 en lactation	1ères G2 en lactation	1ères G3 en lactation	…			
Année								

Choisir le mode de représentation le plus adapté (tableau vs. frise). Les repères du tableau sont à titre indicatif, l'idée est de d'abord le laisser proposer ses propres jalons, ses propres étapes-clés. Cela permet d'apprécier le rythme auquel le croisement a été mis en place. L'idée n'est pas forcément d'utiliser le tableau ou la frise, mais que ça puisse servir dans un second temps pour l'analyse.

D. LE TROUPEAU : GESTION DU CROISEMENT

Vous m'avez décrit la composition de votre troupeau et présenté dans les grandes lignes son évolution. À présent, on va s'intéresser à comment vous vous y êtes pris pour le construire ainsi, c'est-à-dire à votre conduite du croisement et son évolution. Pouvez-vous me raconter comment vous êtes passé d'un troupeau conduit en race(s) pure(s) à un troupeau conduit – partiellement ou intégralement – en croisement ? Vous m'avez parlé des grandes évolutions de votre exploitation. Comment le croisement s'inscrit là-dedans ?

D.01. Avant la mise en place du croisement : *Comment avez-vous eu l'idée de croiser ? Est-ce que vous avez procédé à des tests, des essais ? Sur quoi (race, schéma, %) ? Pourquoi c'était important pour vous de faire ces essais ?*

D.01.a Source/origine de l'idée de croiser :
D.01.b Tests en croisement (O/N) ? :
D.01.c Date des 1ers tests en croisement :
D.01.d Durée entre idée de croiser et 1ers tests : *Qu'est-ce que vous attendiez de ces essais ?*
D.01.e Objet des tests et essais sur le croisement (race, schéma, %, *etc.*) ? :
D.01.f Objectifs/attentes des tests et essais sur le croisement : *Qu'est-ce qui a fonctionné ? Qu'est-ce qui n'a pas fonctionné ? Comment expliquez-vous que cela ait/n'ait pas fonctionné ? Qu'est-ce que vous en avez retiré ?*
D.01.g Enseignements des tests et essais sur le croisement : *Est-ce que cela vous a amené à modifier certaines choses (pratiques, objectifs, etc.) ? Est-ce que cela vous a conforté sur certaines choses (pratiques, objectifs, etc.) ?*
D.01.h Conséquences des tests et essais sur les pratiques de croisement :
D.01.i Conséquences des tests et essais sur les objectifs de croisement : *Comment avez-vous vérifié que ça fonctionnait/ne fonctionnait pas ? Qu'est-ce que vous avez utilisé pour vérifier cela ? (indicateurs, observations, expertise extérieure, etc.).*
D.01.j Indicateurs utilisés pour évaluer le résultat des essais :
D.01.k Sources mobilisées pour évaluer le résultat des essais :

D.02. La stratégie et la conduite initiales du croisement : *Est-ce que vous pouvez m'expliquer votre stratégie de croisement au début ?*

D.02.a Schéma choisi et pratiqué :
D.02.b Motivations pour choix des races :
D.02.c Attentes du croisement / objectifs (troupeau/système/…) :
D.02.d Date des 1ers « vrais » croisements :
D.02.e Durée entre 1ers tests et croisements : *Avez-vous commencé à croiser directement sur une part importante du troupeau ? Si non, sur quelles vaches en particulier ?*
D.02.f % de croisement initial :
D.02.g Critères de choix des vaches (s'ils existent) :

D.03. La conduite du croisement et son évolution (objectifs, pratiques, évaluation) : *Comment avez–vous décidé de continuer à croiser ? Est-ce que vous avez directement croisé sur les VL F1 ? (i.e. de ne pas faire du backcross après la F1)*

D.03.a Délai entre croisement F1 et F2 : *Est-ce que votre schéma de croisement a évolué ? Pour quelle(s) raison(s) ? Qu'est-ce que vous avez changé ? Qu'est-ce que vous en attendiez ?*
D.03.b Evolution(s) du schéma de croisement jusqu'à aujourd'hui :
D.03.c Evolution des objectifs et attentes liées au croisement *(troupeau/système/…)* : *Litrage, Taux, Constant & homogène, Troupeau qui se reproduit bien / renouvellement facile/ au moment désiré, Troupeau économe, Aptitude au pâturage, Troupeau "autonome" (= peu de f.véto, « troupeau qu'on ne voit pas »), Longévité des animaux, Autre :*

Selon vous, à partir de quelle part au sein du troupeau l'impact du croisement s'est fait ressentir ? De quelle manière ? Sur quels aspects (production, gabarit, santé, reproduction, fertilité, etc.) ? Comment l'avez-vous remarqué ? Qu'est-ce qui a changé ?

D.03.d Seuil d'impact du croisement (*%, génération*) :
D.03.e Nature des impacts (*production, gabarit, santé, reproduction, fertilité, etc.*) :

E. TROUPEAU : GESTION DES ACCOUPLEMENTS ET DE LA REPRODUCTION

L'objectif ici c'est d'obtenir tout d'abord des éléments factuels sur la conduite de la reproduction (qui auront peut-être déjà été évoqués dans les items précédents) mais également sur le profil du troupeau recherché, comment l'éleveur construit « son troupeau » et les objectifs qu'ils cherchent à atteindre, ceux relatifs au troupeau s.s. et éventuellement en quoi ils s'inscrivent dans des objectifs plus généraux du système et de son fonctionnement.

E.01. La reproduction aujourd'hui

E.01.a Est-ce que vous pouvez m'expliquer comment vous avez géré les accouplements cette année ? *Question large, on le laisse parler de ce qu'il veut. On le relance et/ou on passe aux questions suivantes s'il a besoin de questions plus précises.*
E.01.b Combien de périodes de mise à la reproduction (*nombre, étendue, saison ; si 2 périodes, relié à un type génétique ou non*)?
E.01.c MN *vs.* IA ? % ? Règle(s) de décision ?
E.01.d Semences sexées ou non ? % ? Règle(s) de décision ?
E.01.e Âge au 1er vêlage ? Dépend du type génétique ?
E.01.f Comment faites-vous les choix des reproducteurs, à quoi faites-vous attention (*critères par race, indicateurs*) ? À quoi vous fiez-vous ? (s*ources = catalogue ES, inséminateur, expérience perso, voisins/collègues, etc.*)
E.01.g Qu'est-ce que vous cherchez à obtenir en faisant ces choix ? Qu'est-ce que vous en attendez ? Quels objectifs ?
E.01.h Est-ce que vous trouvez ce que vous recherchez (*quantitativement, qualitativement*) ?
E.01.i Est-ce que vous raisonnez les accouplements individu par individu ou plus globalement (par type génétique, par lot) ? *Ici je cherche à savoir s'il mène une stratégie déterminée en amont et à laquelle il ne déroge pas vs. il y a davantage de gestion adaptative et de « pas à pas ».*
E.01.j Est-ce que vous préférez gérer la reproduction campagne par campagne, en fonction des aléas ? Ou essayez-vous de vous en tenir à une stratégie, à un plan élaboré par le passé ?
E.01.k Est-ce que vous avez une idée précise de ce à quoi votre troupeau doit ressembler ? Vers quoi vous essayez de le faire tendre ? Qu'est-ce que serez votre « troupeau idéal » selon vous ? En quoi en est-il éloigné aujourd'hui ?
E.01.l Est-ce que vous êtes satisfait de la campagne de reproduction cette année ? Qu'est-ce qui est (serait) important pour vous pour en être satisfait ?
E.01.m Est-ce que vous rencontrez des difficultés particulières aujourd'hui ? À quelle fréquence ? *(offre génétique insatisfaisante, problème de taureaux/doses, retour en chaleur, échec IA, semences sexées, etc.)*

E.02. La reproduction en race pure

E.02.a Est-ce que vous gériez les accouplements différemment quand vous étiez en RP ? Si oui, pouvez m'expliquer comment ? *Question large, on le laisse parler de ce qu'il veut. On le relance et/ou on passe aux questions suivantes s'il a besoin de questions plus précises.*
E.02.b Combien de périodes de mise à la reproduction (*nombre, étendue, saison ; si 2 périodes, relié à un type génétique ou non*)?
E.02.c MN *vs.* IA ? % ? Règle(s) de décision ?
E.02.d Semences sexées ou non ? % ? Règle(s) de décision ?
E.02.e Âge au 1er vêlage ? Dépend du type génétique (si troupeau multi-race) ?
E.02.f Comment faisiez-vous les choix des reproducteurs, à quoi faisiez-vous attention (*critères par race, indicateurs*) ? Sur la base de quelles sources (s*ources = catalogue ES, inséminateur, expérience perso, voisins/collègues, etc.*) ?
E.02.g Qu'est-ce que vous cherchiez à obtenir en faisant ces choix ? Qu'est-ce que vous en attendiez ? Quels étaient vos objectifs ?
E.02.h Est-ce que vous trouviez ce que vous recherchiez (*quantitativement, qualitativement*) ?
E.02.i Est-ce que vous raisonniez les accouplements individu par individu ou plus globalement (par type génétique, par lot) ? *Ici je cherche à savoir si la stratégie de gestion des accouplements a changé avant la mise en place du croisement, en même temps, après ?*

E.02.j Est-ce que vous gériez la reproduction campagne par campagne, en fonction des aléas ? Ou essayez-vous de vous en tenir à une stratégie, à un plan élaboré par le passé ?

E.02.k Est-ce que vous aviez une idée précise de ce à quoi votre troupeau devait ressembler ? Vers quoi vous essayiez de le faire tendre ? À quoi ressemblait votre « troupeau idéal » à cette époque ?

E.02.l En général, vous étiez satisfait des campagnes de reproduction ? Qu'est-ce qui était (aurait été) important pour vous pour en être satisfait ?

E.02.m Est-ce que vous rencontriez des difficultés particulières aujourd'hui ? À quelle fréquence ? (*offre génétique insatisfaisante, problème de taureaux/doses, retour en chaleur, échec IA, semences sexées, etc.*)

E.03. La transition entre RP et aujourd'hui : objectifs, pratiques, évaluation : *Comment êtes-vous passé de cette situation à aujourd'hui ? Est-ce qu'il y a eu des étapes intermédiaires ? Est-ce que ça a évolué et si oui comment ? C'est lié à la mise en place du croisement ou non ? Est-ce que c'est plus difficile ou non de gérer la reproduction et les accouplements depuis que vous faites du croisement ? Depuis quand ? Comment expliquez-vous que ce soit à partir de ce moment-là ?*

E.03.a Particularités de la gestion des accouplements et de la reproduction en troupeau croisé : *Est-ce que vous avez procédé à des tests, des essais ? Sur quoi (période, choix de reproducteurs, type d'insémination, etc.) ?*

E.03.b Essais : gestion de la reproduction et/ou des accouplements (O/N) ? :

E.03.c Date des essais :

E.03.d Durée des essais : *Pourquoi c'était important pour vous de faire ces essais ? Qu'est-ce que vous attendiez de ces essais ?*

E.03.e Objet des tests et essais (*période, choix de reproducteurs, type d'insémination, etc.*)? :

E.03.f Objectifs/attentes des tests et essais. *Qu'est-ce qui a fonctionné ? Qu'est-ce qui n'a pas fonctionné ? Comment expliquez-vous que cela ait/n'ait pas fonctionné ? Qu'est-ce que vous en avez retiré ?*

E.03.g Enseignement des tests et essais sur la reproduction : *Est-ce que ça vous a amené à modifier certaines choses (pratiques, objectifs, etc.) ? Est-ce que cela vous a conforté sur certaines choses (pratiques, objectifs, etc.) ?*

E.03.h Conséquences des tests et essais sur les pratiques de reproduction :

E.03.i Conséquences des tests et essais sur les objectifs de reproduction : *Comment avez-vous vérifié que ça fonctionnait/ne fonctionnait pas ? Qu'est-ce que vous avez utilisé pour vérifier cela ? (indicateurs, observations, expertise extérieure, etc.).*

E.03.j Indicateurs utilisés pour évaluer le résultat des essais sur la reproduction :

E.03.k Sources mobilisées pour évaluer le résultat des essais sur la reproduction : *Est-ce que votre conduite de la reproduction et des accouplements a évolué ? Pour quelle(s) raison(s) ? Qu'est-ce que vous avez changé ? Qu'est-ce que vous en attendiez ?*

E.03.l Evolution(s) de la gestion des accouplements et de la reproduction :

E.03.m Evolution des objectifs et attentes liées à la reproduction et aux accouplements :

- *Regroupement/étalement des vêlages*
- *Mises bas faciles, autonomes*
- *Peu d'avortements*
- *Peu de mortalité des veaux*
- *Renouvellement assuré*
- *Autre :*

Sur quoi vous êtes-vous appuyé au cours de cette évolution? (indicateurs, observations, expertise extérieure, etc.). Est-ce que ce sur quoi vous vous êtes appuyé a changé entre le moment où vous étiez en RP, au début du croisement, maintenant ?

E.03.n Indicateurs utilisés pour faire évoluer la conduite de la reproduction :

E.03.o Sources mobilisées pour faire évoluer la conduite de la reproduction :

E.04. La conduite future de la reproduction *Qu'est-ce que vous envisagez pour la suite (autres types de reproducteurs, etc.) ?*

F. TROUPEAU GESTION DU RENOUVELLEMENT

F.01. Le renouvellement aujourd'hui (2018)

F.01.a Est-ce que vous pouvez m'expliquer comment vous gérez le renouvellement du troupeau aujourd'hui ? *Question large, on le laisse parler de ce qu'il veut. On le relance et/ou on passe aux questions suivantes s'il a besoin de questions plus précises.*

Combien de génisses de renouvellement avez-vous actuellement ? Est-ce que vous arrivez à en avoir suffisamment ? Si non, combien en achetez-vous ?

F.01.b Nombre de génisses de renouvellement (2018) :
F.01.c Dont achetées à l'extérieur (2018) :
F.01.d Taux de renouvellement ? (2018) :

Quels sont les critères de sélection des génisses pour le renouvellement ? Est-ce que vous gérez ça tout·e seul·e ? Pouvez-vous m'expliquer à quoi vous faites attention ?

F.01.e Critères de sélection de génisses pour renouvellement (2018) :
F.01.f Qu'est-ce que vous cherchez à obtenir en faisant ce choix ? Qu'est-ce que vous en attendez ? Quels objectifs ?
F.01.g Est-ce que vous êtes satisfait de la campagne de renouvellement cette année ? Qu'est-ce qui est (serait) important pour vous pour en être satisfait ?
F.01.h Est-ce que vous rencontrez des difficultés particulières aujourd'hui ? À quelle fréquence ? (*nombre insuffisant de génisses de renouvellement, etc.*)

F.02. Le renouvellement en race pure

F.02.a Est-ce que vous gériez le renouvellement différemment lorsque vous étiez en RP ? *Question large, on le laisse parler de ce qu'il veut. On le relance et/ou on passe aux questions suivantes s'il a besoin de questions plus précises.*

Combien de génisses de renouvellement aviez-vous ? Est-ce que vous arriviez à en avoir suffisamment ? Si non, combien en achetiez-vous ?

F.02.b Nombre de génisses de renouvellement (RP) :
F.02.c Dont achetées à l'extérieur (RP) :
F.02.d Taux de renouvellement (RP) :

Quels étaient les critères de sélection des génisses pour le renouvellement ? À quoi faisiez-vous attention ? (indicateurs & sources)

F.02.e Critères de sélection de génisses pour renouvellement (RP) :
F.02.f Qu'est-ce que vous cherchiez à obtenir en faisant ce choix ? Qu'est-ce que vous en attendiez ? Quels objectifs ?
F.02.g Est-ce que vous étiez satisfait des campagnes de renouvellement ? Qu'est-ce qui était (aurait) important pour vous pour en être satisfait ?
F.02.h Est-ce que vous rencontriez des difficultés particulières ? À quelle fréquence ? (*nombre insuffisant de génisses de renouvellement, etc.*)

F.03. La transition entre RP et aujourd'hui : objectifs, pratiques, évaluation : *Comment êtes-vous passé de cette situation à aujourd'hui ? Est-ce qu'il y a eu des étapes intermédiaires ? Est-ce que ça a évolué et si oui comment ? C'est lié à la mise en place du croisement ou non ?*

Est-ce que c'est plus difficile ou non de gérer le renouvellement depuis que vous faites du croisement ? Depuis quand ? Comment expliquez-vous que ce soit à partir de ce moment-là ?

F.03.a Particularités de la gestion du renouvellement en troupeau croisé

Est-ce que vous avez procédé à des tests, des essais ? Sur quoi (taux de renouvellement, achats de génisses, etc.) ?

F.03.b Essais : renouvellement (O/N) ?
F.03.c Date des essais :
F.03.d Durée/fréquence des essais :

Pourquoi c'était important pour vous de faire ces essais ? Qu'est-ce que vous attendiez de ces essais ?

F.03.e Objet des tests et essais :

F.03.f Objectifs/attentes des tests et essais :

Qu'est-ce qui a fonctionné ? Qu'est-ce qui n'a pas fonctionné ? Comment expliquez-vous que cela ait/n'ait pas fonctionné ? Qu'est-ce que vous en avez retiré ?

F.03.g Enseignement des tests et essais sur le renouvellement :

Est-ce que ça vous a amené à modifier certaines choses (pratiques, objectifs, etc.) ? Est-ce que cela vous a conforté sur certaines choses (pratiques, objectifs, etc.) ?

F.03.h Conséquences des tests et essais sur les pratiques de renouvellement :
F.03.i Conséquences des tests et essais sur les objectifs du renouvellement :

Comment avez-vous vérifié que ça fonctionnait/ne fonctionnait pas ? Qu'est-ce que vous avez utilisé pour vérifier cela ? (indicateurs, observations, expertise extérieure, etc.).

F.03.j Indicateurs utilisés pour évaluer le résultat des essais sur le renouvellement :
F.03.k Sources mobilisées pour évaluer le résultat des essais sur le renouvellement :

Est-ce que votre conduite du renouvellement a évolué ? Pour quelle(s) raison(s) ? Qu'est-ce que vous avez changé ? Qu'est-ce que vous en attendiez ? Est-ce que ces changements sur le renouvellement ont été faciles ou non ?

F.03.l Evolution des pratiques de gestion des accouplements et de la reproduction :

F.03.m Evolution des objectifs et attentes liées au renouvellement :

- *↗/↘/→ du troupeau*
- *Objectifs pour le troupeau*
- *Autres :*

Sur quoi vous êtes-vous appuyé au cours de cette évolution? (indicateurs, observations, expertise extérieure, etc.). Est-ce que ce sur quoi vous vous êtes appuyé a changé entre le moment où vous étiez en RP, au début du croisement, maintenant ?

F.03.n Indicateurs utilisés pour faire évoluer la conduite du renouvellement :
F.03.o Sources mobilisées pour faire évoluer la conduite du renouvellement :

F.04. La conduite future du renouvellement

Qu'est-ce que vous envisagez pour la suite (taux de renouvellement, achats de génisses, etc.) ?

G. TROUPEAU : GESTION DE LA RÉFORME

G.01. La réforme aujourd'hui (2018)

G.01.a Est-ce que vous pouvez m'expliquer comment vous gérez la réforme du troupeau aujourd'hui ? *Question large, on le laisse parler de ce qu'il veut. On le relance et/ou on passe aux questions suivantes s'il a besoin de questions plus précises.*

Quelle est la longévité (nb de lactation ou âge) des vaches dans votre exploitation en général ? Est-ce que vous voyez une différence entre les vaches en RP et croisées ? Entre les différentes générations de croisées ?

G.01.b Âge moyen de réforme normale (2018) :
G.01.c Taux de réforme ? (2018)

Quels sont les causes de réforme dans votre exploitation ? Quels sont les critères qui font que vous réformez ou non (production laitière, n° de lactation, santé, fertilité, etc.) ? Est-ce que vous voyez une différence entre RP et croisées ? Entre générations de croisement différentes ?

G.01.d Causes de réforme (2018) :

Vous avez beaucoup de réformes involontaires ? Pour quelle(s) raison(s) ? Une différence entre RP et croisées ? Entre générations de croisement différentes ?

G.01.e Nombre/taux de réformes involontaires (2018) :
G.01.f Âge de réforme involontaire (2018) :
G.01.g Causes de réforme involontaire (2018) :
G.01.h Pour vous, pourquoi est-ce important de gérer la réforme comme vous le faites ? Qu'est-ce que vous cherchez à faire en menant la gestion des réformes de cette façon ? Quels objectifs ?
G.01.i Est-ce que vous êtes satisfait de la campagne de réforme cette année ? Qu'est-ce qui est (serait) important pour vous pour en être satisfait ?
G.01.j Est-ce que vous rencontrez des difficultés dans la gestion de la réforme ?

G.02. La réforme en race pure

G.02.a Est-ce que vous gériez la réforme différemment lorsque vous étiez en RP ? Est-ce que vous pouvez m'expliquer ce qui a changé ? *Question large, on le laisse parler de ce qu'il veut. On le relance et/ou on passe aux questions suivantes s'il a besoin de questions plus précises.*

Quelle était la longévité (nb de lactation ou âge) des vaches dans votre exploitation en général ?

G.02.b Âge moyen de réforme normale (RP) :
G.02.c Taux de réforme ? (RP) :

Quels étaient les causes de réforme dans votre exploitation ? Quels étaient les critères qui faisaient que vous réformiez ou non (production laitière, n° de lactation, santé, fertilité, etc.) ?

G.02.d Causes de réforme (RP) :

Vous avez beaucoup de réformes involontaires ? Pour quelle(s) raison(s) ? Une différence entre RP et croisées ? Entre générations de croisement différentes ?

G.02.e Nombre/taux de réformes involontaires (RP) :
G.02.f Âge de réforme involontaire (RP) :
G.02.g Causes de réforme involontaire (RP) :
G.02.h Pour vous, pourquoi était-ce important de gérer la réforme comme vous le faisiez ? Qu'est-ce que vous cherchiez à faire en menant la gestion des réformes de cette façon ?
G.02.i L'état des réformes vous convenait-il ? (*NEC, prix des réformes, etc.*)
G.02.j Est-ce que vous rencontriez des difficultés dans la gestion de la réforme ? Concernant quoi ? Selon vous à quoi était-ce dû ? (*nombre de lactation, généalogie, etc.*)

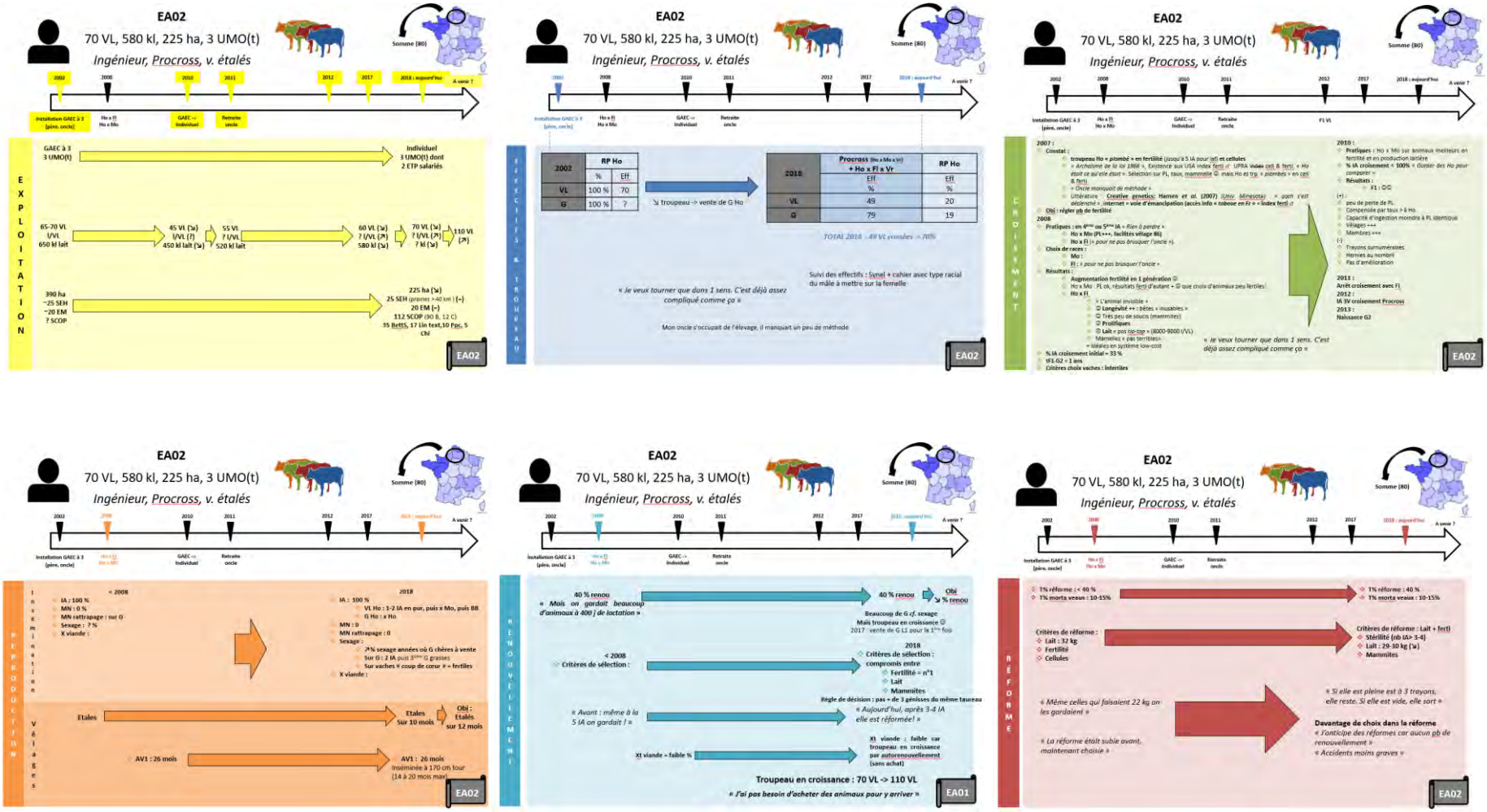
G.03. La transition entre RP et aujourd'hui : objectifs, pratiques, évaluation

G.03.a L'état des réformes vous convient-il ? Est-ce que vous voyez une différence entre RP et croisées à ce niveau ? Qu'est-ce qui change ? (*NEC, prix des réformes, etc.*)
G.03.b Est-ce que vous rencontrez des difficultés dans la gestion de la réforme ? Est-ce que vous constatez une différence entre animaux en RP (quand vous en aviez ou si vous en avez encore) et animaux croisés ? Est-ce que vous constatez une différence entre animaux F1, F2, F3 ?

Comment êtes-vous passé de cette situation à aujourd'hui ? Est-ce qu'il y a eu des étapes intermédiaires ? Concernant les critères de choix ?

G.04. La conduite de la réforme future : *Qu'est-ce que vous envisagez pour la suite ?*

Annexe 13 : Exemple de monographie construite à partir des données d'enquête



Transitioning from purebred to rotational crossbred dairy cattle herds: what are the changes in farmers' management practices and induced herd performances?

Abstract: The specialisation of dairy cows has been enabled through the pure-breed organisation of genetic system and its orientation towards milk productivity per cow mainly, particularly in the worldwide-distributed Holstein breed. However, this has been to the expense of cows' fertility and robustness, which now question the sustainability and resilience of dairy cattle farms. While selection programmes in most countries have included functional traits since 2000s, some dairy farmers adopt crossbreeding between dairy breeds (dairy crossbreeding), relying on both heterosis and complementarity of traits in dairy breeds as a faster and effective solution to enhance functional traits. By doing this, however, they generate genetic diversity within the herd, which raises the question of its management and the performance it induces. Therefore, this work aims at analysing the evolution of both herd configuration practices and its zootechnical performances during the transition period from pure- to rotational crossbreeding management. We developed an analytical framework to analyse the changes in herd management practices and the performances it induce. We based our research on a sample of 26 dairy farmers who have implemented rotational crossbreeding for more than six years. Based on multivariate analysis of the changes in farmers' herd configuration practices, we collected through semi-directive surveys among sampled farmers, we characterised three technical transition pathways towards rotational crossbreeding, which differ according to the depth and scale of change associated to the introduction of rotational crossbreeding in the herd and the pace of its introduction. Then, based on extracted lactations, genetics and pedigree data from herds enrolled in milk recording among the sampled 26 herds we assessed and explained the evolution of herd performances. Based on cow performances data from 14 sampled herds, we categorised the cows into three genetic classes generated by crossbreeding according to % of heterosis and % of Holstein genes: HO, F1 and G2. We showed that they have different performances profiles and that herds mixing HO-F1 and F1-G2 make it possible to take advantage of their functional complementarity to improve trade-offs in herd's performances. Finally, based on data on the evolution of herd management practices and animal performance from 13 farms (out of the 26), we showed that rotational crossbreeding has a significant effect on the evolution of herd performances. Besides, we showed that rotational crossbreeding constitutes one explanatory factor among others, the main ones being related to systemic changes implemented concomitantly with the use of crossbreeding, the initial state of herd performances and the stage of progress in crossbreeding management. Our results provide new insights on dairy crossbreeding by analysing its introduction and management over time. They also stress the interrelation between the biological and decision-making components of dairy livestock systems that build herd performances in the long run. Thus, this PhD thesis provides empirical evidence on the transition of livestock farming systems based on animal diversity. Rather than turnkey solutions, our results provide empirical evidence that can support decision-making by dairy farmers who intend to use rotational crossbreeding and discussion with advisers.

Keywords: dairy crossbreeding, dairy cattle, herd management, performances trade-offs, animal diversity, livestock farming systems

Auteur : Julien QUÉNON

Titre : La mise en place du croisement rotatif dans un troupeau bovin laitier de race pure : quelle évolution des pratiques d'élevage et des performances associées ?

Directeur de thèse : Michel DURU

Co-encadrant·e·s : Marie-Angélina MAGNE et Stéphane INGRAND

Lieu et date de soutenance : Toulouse, le 1er février 2020

Résumé : La spécialisation des vaches laitières a été permise via un dispositif génétique organisé en race pure et orienté principalement sur la productivité laitière par vache particulièrement dans la race mondialement diffusée qu'est la Prim'Holstein. Elle s'est faite au détriment de la fertilité et robustesse des vaches qui remet en cause aujourd'hui la durabilité et résilience des élevages. La pratique du croisement entre races laitières (croisement laitier) s'est développée chez certain·e·s éleveur·euse·s comme une voie plus efficace que la sélection en race pure pour améliorer la multi-fonctionnalité des vaches, en tirant partie de l'effet d'hétérosis et de la complémentarité entre les races. Cependant, le recours au croisement rotatif (qui maximise l'hétérosis dans le temps) génère une diversification génétique au sein du troupeau, qui pose la question de sa gestion opérationnelle et des performances qui lui sont associées. L'objectif de cette thèse est d'analyser l'évolution des pratiques d'élevage et des performances des troupeaux au cours de la période de transition entre une conduite en race pure et une conduite partielle ou intégrale en croisement rotatif. Le dispositif de recherche s'appuie sur des entretiens semi-directifs menés auprès de 26 éleveurs bovin laitier utilisant le croisement rotatif depuis au moins six ans et les performances zootechniques des vaches d'un sous-ensemble de cet échantillon. L'analyse multivariée des données d'enquêtes sur l'évolution des pratiques de configuration du troupeau a permis de caractériser trois trajectoires types de mise en place et de gestion du croisement rotatif ; ces trajectoires diffèrent par l'ampleur des changements associés à l'introduction du croisement dans le troupeau et par le rythme de sa mise en place. A partir des données de performances des vaches dans 14 élevages sur les 26 enquêtés, nous avons catégorisé les vaches selon trois classes génétiques générées par le croisement selon le % d'hétérosis et le % de gènes Holstein : HO, F1 et G2. Nous montrons qu'elles présentent des profils de performances différents et que les troupeaux mixant HO-F1 et F1-G2 permettent de tirer parti de leur complémentarité fonctionnelle pour améliorer la multi-performance du troupeau. Enfin, à partir des données de pratiques d'élevage et de performances des animaux de 13 élevages (sur les 26 de départ), nous avons montré que le croisement rotatif a un effet significatif sur l'évolution des performances zootechnique des troupeaux, et qu'il constitue un facteur explicatif parmi d'autres, dont les principaux sont relatifs à des changements systémiques mis en place de façon concomitante au croisement, l'état initial des performances du troupeau et le stade d'avancement dans la pratique du croisement. Ces résultats enrichissent les connaissances sur le croisement laitier par une analyse des modalités opérationnelles de sa mise en place et de sa conduite dans le temps en prenant en compte conjointement les dimensions biologiques et décisionnelles qui construisent sur le long terme la multi-performance des troupeaux et la diversification génétique induite dans les troupeaux par l'utilisation du croisement. Ce faisant, cette thèse enrichit les connaissances sur la transition vers des systèmes d'élevage basés sur la diversité animale. En termes opérationnels, elle produit des références sur le fonctionnement des élevages durant la phase de transition entre un troupeau en race pure et un troupeau croisé, qui peuvent être utiles pour aider les éleveur·euse·s et les conseiller·ère·s à identifier si et comment le croisement peut être un levier d'action cohérent par rapport à leur situation d'élevage et leur projet.

Mots-clefs : croisement laitier, troupeau bovin lait, multi-performance, diversité animale, systèmes d'élevage

---

Discipline administrative : Zootechnie

Laboratoire : UMR AGIR (Agroécologie, Innovations et teRritoires)