

# 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 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.

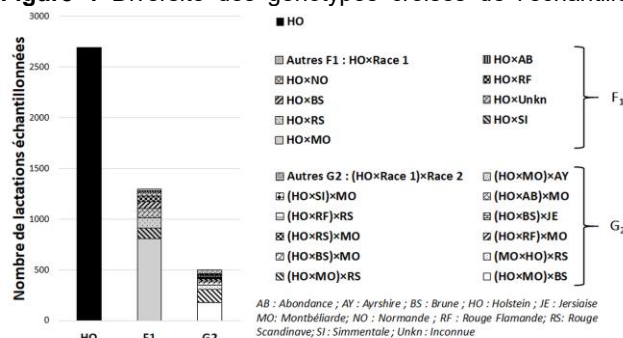
## 1. MATERIEL ET METHODES

Cette étude s'appuie sur un échantillon de 14 troupeaux bovins lait issus de 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<sub>2</sub>) 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 3** Description des deux jeux de données utilisés

Classe génétique	Jeu de données n°1		Jeu de données n°2	
	Lactations	Femelles	Lactations	Femelles
HO	2 695	1 257	2 738	1 277
F <sub>1</sub>	1 296	540	1 287	512
G <sub>2</sub>	496	254	451	221
<b>Total</b>	<b>4 487</b>	<b>2 051</b>	<b>4 476</b>	<b>2 010</b>

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<sub>1</sub>, 50% de gènes HO et 100% d'hétérosis) et de croisées trois voies de deuxième génération (G<sub>2</sub>, 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 3) : 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 réalisées 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<sub>1</sub> et G<sub>2</sub>) pour constituer un troupeau de 100 individus, à la manière d'un plan de mélanges (Snee, 1979).

Nous avons ainsi généré  $C_{100+3-1}^3 = C_{102}^3 = 5151$  compositions de troupeau différentes (Tableau 4).

**Tableau 4** Compositions en classes génétiques (HO, F<sub>1</sub> et G<sub>2</sub>) des 5151 troupeaux simulés

N° de la composition de troupeau	Composition du troupeau		
	% HO	% F <sub>1</sub>	% G <sub>2</sub>
#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<sub>1</sub>, %G<sub>2</sub> les pourcentages respectifs de HO, F<sub>1</sub> et G<sub>2</sub> de la composition et  $P_{HO}$ ,  $P_{F_1}$  et  $P_{G_2}$  les performances moyennes des classes génétiques HO, F<sub>1</sub> et G<sub>2</sub> (Tableau 5). 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 5) montrent que les trois classes génétiques définies (HO, F<sub>1</sub> et G<sub>2</sub>) présentent des profils de performances laitières significativement différents : la production laitière est supérieure pour les HO comparé aux F<sub>1</sub> (7513 vs. 7289 kg/VL/lactation) et supérieure pour les F<sub>1</sub> comparé aux G<sub>2</sub> (6697 kg/VL/lactation). La tendance s'inverse pour les taux : les G<sub>2</sub> présentent des valeurs plus élevées que les F<sub>1</sub> (+ 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<sub>1</sub>, ni entre HO et G<sub>2</sub>. En revanche, les F<sub>1</sub> présente un SCS significativement inférieur à celui des G<sub>2</sub> (- 0,19). Enfin, aucune différence significative n'a pu être montrée entre F<sub>1</sub> et G<sub>2</sub> pour l'IVIAF. Cependant, l'IVIAF des F<sub>1</sub> et des G<sub>2</sub> 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<sub>1</sub>, 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<sub>1</sub>

**Tableau 5** Moyennes ajustées (erreur standard entre parenthèses) des performances de production, santé de la mamelle et fertilité des classes génétiques Holstein pures (HO), première (F<sub>1</sub>) et deuxième génération de croisement trois voies (G<sub>2</sub>).

Classe génétique	PL (kg/VL/lactation)	TB (g/kg/lactation)	TP (g/kg/lactation)	SCS	IVIAF (jours)
HO [100% gènes HO]	7 513 <sup>a</sup> (34,8)	38,2 <sup>a</sup> (0,14)	31,3 <sup>a</sup> (0,10)	2,77 <sup>ab</sup> (0,041)	143 <sup>a</sup> (1,6)
F <sub>1</sub> [50% de gènes HO]	7 289 <sup>b</sup> (42,4)	40,4 <sup>b</sup> (0,17)	32,4 <sup>b</sup> (0,10)	2,72 <sup>a</sup> (0,049)	127 <sup>b</sup> (2,3)
G <sub>2</sub> [25% de gènes HO]	6 697 <sup>c</sup> (62,3)	41,4 <sup>c</sup> (0,24)	33,0 <sup>c</sup> (0,15)	2,91 <sup>b</sup> (0,073)	129 <sup>b</sup> (3,7)

(Clasen *et al.*, 2019). Nos résultats montrent également la supériorité des HO par rapport aux G<sub>2</sub> concernant la quantité de lait produite, même si nos résultats montrent un différentiel HO vs. G<sub>2</sub> moins prononcé que ceux de Shonka-Martin *et al.* (2019). Enfin, nos résultats comparatifs des performances laitières entre F<sub>1</sub> et G<sub>2</sub> montrent des valeurs de taux significativement plus élevées pour les G<sub>2</sub>, contrairement aux travaux de Malchiodi *et al.* (2014) qui n'ont pas montré de différences significatives entre F<sub>1</sub> et G<sub>2</sub>. Nos résultats montrent également que les F<sub>1</sub> 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<sub>2</sub> sont peu nombreuses (Hazel *et al.*, 2014) mais aboutissent également à conclure sur la meilleure fertilité des G<sub>2</sub>. 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 aux 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<sub>1</sub> ; G<sub>2</sub>} 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<sub>1</sub> et F<sub>1</sub>-G<sub>2</sub> ainsi que celles 100 % F<sub>1</sub> et 100 % G<sub>2</sub> (Figure 2). De plus, le pourcentage de HO dans les troupeaux sélectionnés n'excède jamais 18 % tandis que les pourcentages de HO et F<sub>1</sub> 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 5). 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<sub>1</sub>} (Figure 3), pour lequel la valeur d'IVIAF

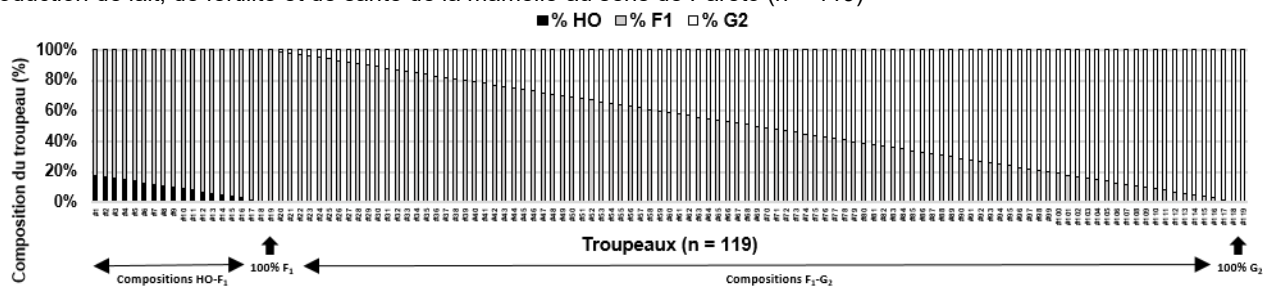
est minimale (127 j) et la valeur de PL proche de la PL maximale (7289 kg/VL, - 40 kg). Les troupeaux aux compositions mixtes HO-F<sub>1</sub> présentent des PL moyennes supérieures mais un IVIAF moyen plus long. Les compositions mixtes F<sub>1</sub>-G<sub>2</sub> ont des PL moyennes inférieures et un IVIAF moyen plus long que le troupeau 100% F<sub>1</sub>. L'augmentation du pourcentage de G<sub>2</sub> dans les troupeaux conduit à une baisse de la PL moyenne, de 7283 kg/VL pour le troupeau {99% F<sub>1</sub> ; 1% G<sub>2</sub>} à 6697 kg/VL pour le troupeau {100% G<sub>2</sub>}. Les meilleures performances moyennes pour les taux sont obtenues par le troupeau {100 % G<sub>2</sub>} (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<sub>2</sub> 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 multip performances 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<sub>1</sub> et G<sub>2</sub>, et que la combinaison de ces classes génétiques engendre des profils de multip performances 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

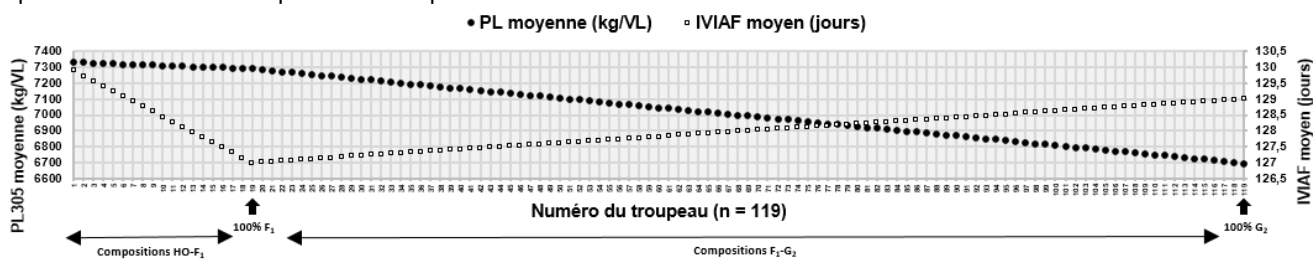
Dans cette étude, nous avons construit des classes génétiques basées sur la valeur théorique d'hétérosis et le pourcentage de gènes HO. Cette classification est moins précise mais plus adaptée aux données de fermes réelles et a permis d'identifier des profils de performances cohérents avec les résultats 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<sub>2</sub>. 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 efficaces présente l'avantage opérationnel de ne pas pondérer les critères de performances à

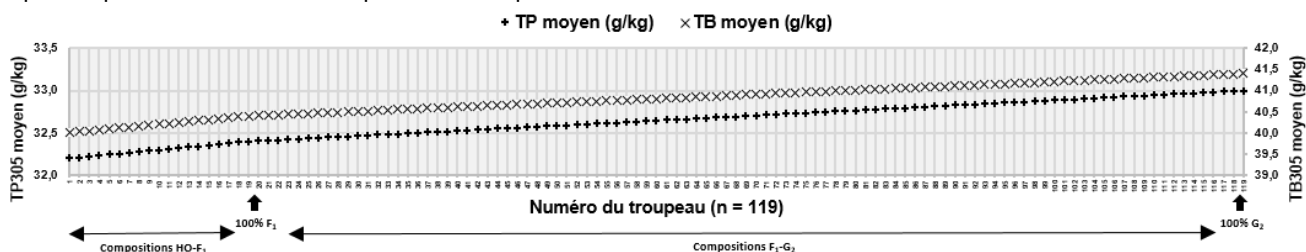
**Figure 2** Compositions { % HO ; % F<sub>1</sub> ; % G<sub>2</sub> } des troupeaux sélectionnés sur l'IVIAF < 130 j et optimisant les performances de production de lait, de fertilité et de santé de la mamelle au sens de Pareto (n = 119)



**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. Palhière, 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., Trommschläger J.-M., Colette-Leurent S., Blanc F. 2016. Liv. Sci., 183, 98-107  
Puillet L., Sauvart 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