



Saisir les opportunités  
pour faire un bon « coût »!

Le jeudi 27 octobre 2011

BEST WESTERN PLUS Hôtel Universel, Drummondville

# Utiliser la génomique pour maximiser les profits des élevages laitiers

**Jacques P. Chesnais**, Ph.D.  
Généticien principal

L'Alliance Semex et L'Alliance Boviteq  
Saint-Hyacinthe

*Conférence préparée avec la collaboration de :*

**Mario Séguin**, agronome  
Centre d'insémination artificielle du Québec



Centre de référence en agriculture  
et agroalimentaire du Québec

---

Comité bovins laitiers

# UTILISER LA GÉNOMIQUE POUR MAXIMISER LES PROFITS DES ÉLEVAGES LAITIERS

## FAITS SAILLANTS

- La génomique a révolutionné en peu de temps l'amélioration génétique des bovins laitiers.
- Elle a le potentiel de faire passer le taux annuel de progrès génétique de 150 points à 240 points d'IPV, un accroissement considérable de la productivité.
- Un troupeau peut maximiser ses profits soit en utilisant des taureaux sélectionnés grâce à la génomique, soit en sélectionnant ses génisses avec des outils de génomique.
- La sélection génomique a déjà créé une augmentation rapide du niveau génétique des jeunes taureaux testés depuis 2008-2009 et cette augmentation se reflétera chez les nouveaux taureaux éprouvés à partir de 2012-2013.
- Pour trouver un bon équilibre entre un progrès génétique rapide et le risque inhérent à une fiabilité réduite, il est recommandé d'utiliser à la fois des jeunes taureaux génomiques et des taureaux éprouvés dans une proportion qui dépend de la situation de l'élevage.
- Pour les troupeaux d'élite qui sont source de mères à taureaux, l'emploi du panel de 50 000 SNP (50 k) ou de 3 000 SNP (3 k) pour les femelles s'impose pour orienter la sélection.
- Pour les autres troupeaux, le génotypage systématique des génisses grâce au panel de 3 k est rentable économiquement dans la mesure où le nombre de génisses disponibles dépasse les besoins de renouvellement avec une marge suffisante. Dans le cas contraire, le panel de 3 k peut être utilisé de façon plus ponctuelle pour mieux déterminer la valeur génétique de certains sujets.
- De nombreux développements de génomique sont en cours qui affecteront l'amélioration génétique des bovins laitiers au cours des cinq prochaines années.

## INTRODUCTION

Depuis l'année 2008, la génomique a révolutionné la sélection des bovins laitiers. Nous en sommes encore au tout début de son application, mais il est clair qu'elle générera des retombées économiques importantes, tant au niveau de la productivité des races laitières qu'au niveau des bénéfices économiques réalisés par les élevages qui sauront l'utiliser efficacement. Le but de ce texte est de faire le point sur ces gains et de passer rapidement en revue les nouveaux développements sur lesquels la génomique pourrait déboucher à court et à moyen terme dans le secteur laitier.

## **RAPPEL SUR LA GÉNOMIQUE**

La génomique se définit essentiellement comme l'étude du matériel génétique, c'est-à-dire de l'ADN des individus. C'est une branche relativement récente de la génétique qui s'est développée au fur et à mesure que nos connaissances sur les chromosomes et les molécules d'ADN qu'ils contiennent ont augmenté.

On a réussi à découvrir des variations dans certains gènes qui correspondent à des défauts génétiques, comme BLAD, CVM ou plus récemment Brachyspina, ou qui affectent des caractères comme les propriétés de coagulation du lait ou la couleur de la robe en race Holstein. Cependant, les variations génétiques qui expliquent complètement un phénotype particulier sont relativement rares et difficiles à découvrir et on n'en connaît qu'un nombre limité. De plus, les caractères que l'on sélectionne aujourd'hui, comme la production, la conformation, la longévité ou la fertilité, sont sous le contrôle d'un grand nombre de gènes. Il est pratiquement impossible de découvrir toutes les variations génétiques qui les affectent dans le but de faire une sélection efficace.

Cependant, deux avancées ont permis de faire des progrès rapides : le séquençage du génome bovin, soit la connaissance de l'ordre exact des trois milliards de molécules d'ADN contenues dans les 30 chromosomes des bovins et la mise au point de panels de génotypage permettant de déterminer le profil génomique (le génotype) des individus. Ce profil correspond à l'identification de milliers de molécules d'ADN qui peuvent varier dans une race, et qu'on appelle des SNP (simples nucléotides polymorphiques). En particulier, il est possible de déterminer, à un coût inférieur à 150 \$, la nature de 40 000 à 50 000 SNP répartis à espaces réguliers sur les chromosomes d'un animal. En comparant les SNP d'un nombre suffisamment élevé de taureaux à leurs épreuves sur descendance pour un caractère donné, on peut estimer l'effet de chaque SNP pour ce caractère. L'effet de chaque SNP reflète les effets des variations génétiques autour du SNP sur un même chromosome. Si le nombre de SNP est assez grand, le génotype permet de calculer une approximation des effets de l'ensemble des variations génétiques que possède l'individu.

Au Canada, à chaque évaluation génétique, les génotypes de plus de 9000 taureaux éprouvés en Amérique du Nord sont ainsi comparés à leurs épreuves pour divers caractères, de façon à estimer les effets des 40 000 à 50 000 SNP. Une fois les effets des SNP estimés, on peut génotyper de jeunes sujets et utiliser leur génotype pour faire une meilleure prédiction de leur valeur génétique qu'on ne pouvait le faire avec une moyenne de parents. En pratique, on combine la valeur génomique directe (VGD) de l'animal, qui correspond à la somme des effets de ses SNP, à sa moyenne de parents (MP) pour obtenir une moyenne de parents génomique (MPG). Pour les animaux avec des valeurs d'élevage estimées (VÉE), comme des taureaux éprouvés ou des vaches avec une évaluation génétique traditionnelle, l'inclusion de la VGD permet le calcul d'une valeur d'élevage estimée génomique (VÉEG).

Plusieurs études de validation au Canada, aux États-Unis et dans le reste du monde ont montré que les MPG sont nettement plus précises que les moyennes de parents pour les jeunes sujets. Par contre, pour les sujets qui ont déjà beaucoup de données dans leur évaluation génétique traditionnelle, tels que les taureaux éprouvés, l'augmentation de la fiabilité est faible.

Le tableau 1 montre l'augmentation de la fiabilité dans la race Holstein pour de jeunes taureaux ou génisses, selon les résultats obtenus par le Réseau laitier canadien en avril 2011.

**Tableau 1. Gains de fiabilité réalisés grâce à la génomique en race Holstein pour les principaux caractères sélectionnés (Réseau laitier canadien, avril 2011)**

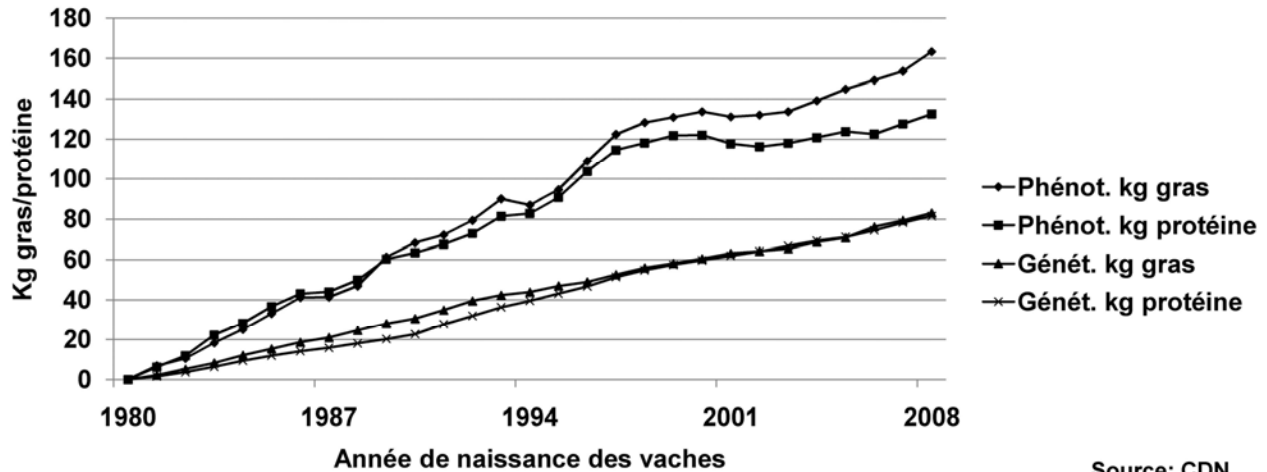
Caractère	Fiabilité moyenne		
	Moyenne de parents (MP)	Moyenne de parents génomique (MPG)	Gain avec la génomique
Indice de profit à vie (IPV)	36	64	28
Rendement en lait	38	68	30
Rendement en gras	38	68	30
Rendement en protéine	38	67	29
Conformation	36	63	27
Système mammaire	37	64	27
Pieds et membres	35	59	24
Puissance laitière	36	64	28
Durée de vie	31	58	27
Cellules somatiques	37	65	28
Fertilité des filles	30	54	24
Facilité de vêlage	38	66	28
Facilité de vêlage des filles	30	52	22

Pour les races Jersey et Suisse Brune, les augmentations de fiabilité dues à la génomique sont plus faibles, car il y a moins de taureaux éprouvés disponibles pour estimer les effets des SNP. Pour les jeunes taureaux ou génisses de ces races, en août 2011, cette augmentation se situait à 16 points de fiabilité pour l'IPV, soit environ 55 % de l'augmentation qu'on observe en race Holstein. Il n'y a pas encore d'évaluations génomiques pour la race Ayrshire au Canada au moment de la préparation de ce texte. Cependant, le développement et l'emploi de panels de haute densité offre l'espoir d'augmenter la fiabilité dans toutes les races à des niveaux se rapprochant de celui de la Holstein, comme nous le verrons plus loin.

## **VALEUR ÉCONOMIQUE GLOBALE DE LA SÉLECTION GÉNOMIQUE**

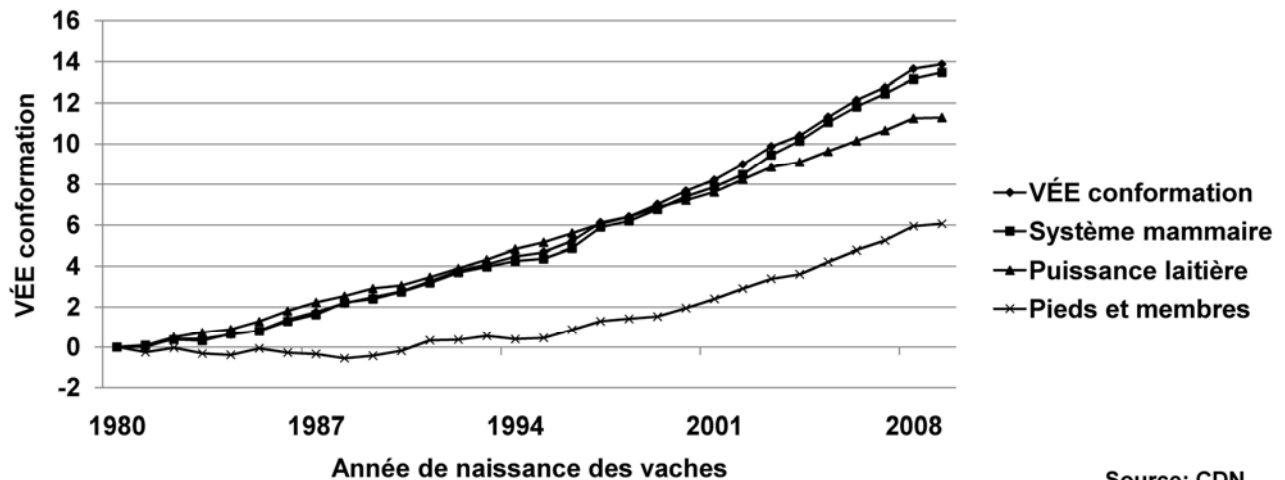
La sélection génomique correspond à l'emploi des profils génomiques pour augmenter la vitesse du progrès génétique. Comme l'évaluation des jeunes sujets est plus précise, on peut utiliser ces jeunes sujets comme parents dès qu'ils sont prêts à se reproduire, ce qui fait beaucoup diminuer l'intervalle entre générations et accroît le progrès génétique annuel. Différentes études effectuées au Canada et dans le reste du monde (Schaeffer, 2006; Konig *et al.*, 2009; Buch *et al.*, 2010; Pryce *et al.*, 2010; McHugh *et al.*, 2011) montrent que l'augmentation annuelle du progrès génétique qui est attribuable à l'emploi de la génomique varie entre 60 % et 200 % selon le schéma. Il s'agit d'une augmentation considérable si l'on considère que l'amélioration génétique traditionnelle est déjà responsable d'une très grande partie des gains de productivité chez les bovins laitiers au Canada (voir figures 1 à 3 pour la race Holstein). En effet, les gains actuels de productivité correspondent

principalement à des gains pour la production et la durabilité, tandis que la fertilité a enregistré une faible baisse et les caractères de santé sont restés stables. Pour la production, les gains génétiques pour le gras et la protéine représentent 51 % et 62 % du progrès total pour ces caractères (Figure 1). Le reste, soit 49 % et 38 %, correspond à l'effet combiné des améliorations de la régée, de l'environnement et de l'alimentation. Pour la durabilité, qui reflète en grande partie des caractères de conformation comme le système mammaire et les pieds et membres, les améliorations sont principalement associées à la génétique. L'amélioration génétique a donc été le « moteur » des gains de productivité au Canada pour les caractères où ces gains ont eu lieu.



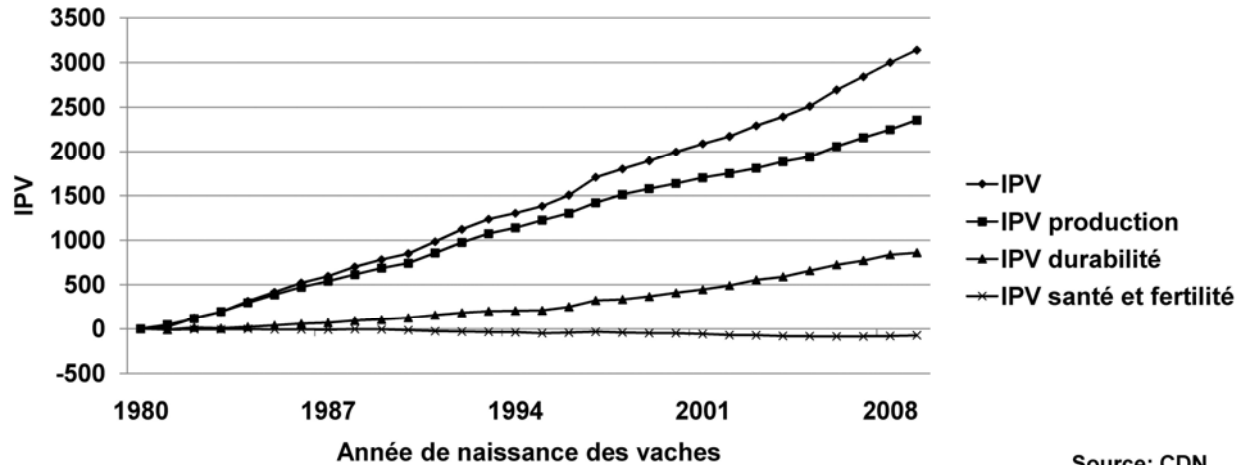
Source: CDN

Figure 1. Progrès génétique et phénotypique au Canada depuis 1980 : gras et protéine



Source: CDN

Figure 2. Progrès génétique en race Holstein au Canada depuis 1980 : conformation



**Figure 3. Progrès génétique depuis 1980 au Canada : IPV et ses composantes**

Le progrès génétique annuel de 150 points d'IPV observé au cours des cinq dernières années pour les vaches de race Holstein au Canada correspond déjà à des bénéfices annuels économiques nets de près de 209 M\$, si l'on tient compte du fait que le progrès génétique est cumulatif et qu'on utilise une estimation conservatrice de la valeur économique de 100 points d'IPV (soit 29 \$ par vache et par an, d'après l'étude de Van Beek *et al.*, 2009 sur la valeur économique des caractères de l'IPV). Une amélioration de 60 %, soit l'estimation la plus basse des gains réalisables grâce à la sélection génomique, correspond donc à 125 M\$ annuellement qui s'ajoutent aux 209 M\$ actuels (voir tableau 2).

**Tableau 2. Valeur économique nette annuelle du progrès génétique réalisé chez les bovins laitiers au Canada**

Progrès et valeur de la sélection	Taux actuel (5 dernières années)	Taux attendu avec la génomique
Progrès génétique annuel (points d'IPV par an)	142	227
Valeur annuelle de ce progrès génétique pour le cheptel laitier canadien (millions de dollars par an)*	209	334

\*Valeur exprimée en prix courant, après soustraction des coûts moyens de semence et selon une estimation de 29 \$ par 100 points d'IPV (van Beek *et al.*, 2009)

Il faudra cependant quelques années avant que ces gains se matérialisent complètement, car la sélection génomique n'a démarré qu'au cours des deux à trois dernières années. Elle n'a pas atteint son utilisation maximale et tous ses effets sont encore loin d'être apparents. Les producteurs qui bénéficieront le plus de la génomique seront ceux qui sauront utiliser ce nouvel outil rapidement et à bon escient. À plus long terme, comme c'est le cas avec la plupart des avancées technologiques, les bénéfices liés à cette augmentation de productivité seront transmis en majeure partie au consommateur de produits laitiers.

Un autre avantage important de la génomique est qu'elle ouvre la porte à une sélection plus efficace des caractères à faible héritabilité comme la fertilité, la longévité et, à l'avenir, la santé. En effet, avec la génomique, il devient possible de faire porter la sélection de ces caractères sur des sujets plus jeunes, ce qui la rend beaucoup plus efficace. Cette meilleure efficacité est un atout qui arrive à point, car il permettra de mieux contrebalancer les effets négatifs que la sélection pour la production exerce sur ces caractères.

## **UTILISER LA GÉNOMIQUE POUR MAXIMISER LES PROFITS DANS LE TROUPEAU**

La valeur économique globale de la sélection génomique est une chose, mais que peut faire le producteur laitier pour tirer le meilleur parti de ces nouveaux outils dans son troupeau et maximiser ses bénéfices? Essentiellement, l'amélioration génétique du troupeau se fait de deux façons : la voie mâle, soit l'emploi de taureaux génétiquement supérieurs, et la voie femelle, soit l'emploi de génisses de remplacement génétiquement supérieures. Commençons par la voie mâle.

### **Sélection des mâles pour maximiser les profits**

#### *Niveau génétique des taureaux*

Au Canada, la génomique est déjà systématiquement utilisée pour la sélection des taureaux, qu'ils soient jeunes ou éprouvés. Par exemple, l'Alliance Semex a génotypé plus de 1950 jeunes mâles en 2010, qui eux-mêmes provenaient des meilleurs pères et mères à taureaux disponibles pour les objectifs de sélection canadiens. Seuls les 300 meilleurs de ces jeunes mâles d'après leurs moyennes de parents génomiques (MPG) ont été placés dans le programme d'épreuve sur progéniture (PEP). En fait, depuis l'arrivée de la génomique, la sélection des jeunes taureaux a été beaucoup plus intense que par le passé et le niveau génétique des taureaux mis en testage a augmenté très rapidement. Le niveau génétique des taureaux testés par l'Alliance Semex au Canada s'est accru de 630 points d'IPV entre 2008, la première année où on a utilisé les MPG, et 2010. Cet accroissement dépasse de beaucoup celui de la MP pour les groupes successifs de taureaux mis en testage avant 2008. Pour le programme de l'Alliance Semex aux États-Unis, la MPG a augmenté de 350 points de TPI et de 286 points de Mérite Net de 2008 à 2010. Les taureaux éprouvés à partir de 2012-2013 seront donc de beaucoup supérieurs aux taureaux qui les ont précédés, et on doit s'attendre à ce que, par la suite, le niveau génétique des taureaux éprouvés augmente à une cadence plus rapide qu'auparavant. Les producteurs vont principalement bénéficier de ces augmentations de niveau génétique, car une fois éprouvés, les taureaux entreront en compétition les uns avec les autres et avec ceux d'autres compagnies concurrentes, si bien que le prix de la semence des meilleurs taureaux éprouvés risque de demeurer à un niveau comparable au prix actuel. Si on estime la valeur économique de 100 points d'IPV à 29 \$ par vache et par an, comme dans la section précédente, et que le niveau génétique des meilleurs taureaux reflète la différence de 630 points d'IPV entre les taureaux mis en testage en 2008 et en 2010 par l'Alliance Semex, les filles de ces taureaux bénéficieront en moyenne d'un avantage économique net de 322 \$ sur 3 lactations, en supposant un intervalle entre vêlage de 14 mois ( $1/2 \times 29 \times 3 \times 14/12$ ), ou 32 300 \$ pour un troupeau de 100 vaches. À ces bénéfices s'ajoutent ceux correspondant aux descendants des filles dans le troupeau qui verront aussi leur niveau génétique augmenter.

L'utilisation des taureaux avec les meilleures évaluations génétiques pour les caractères recherchés par le producteur constitue donc le moyen le plus sûr de bénéficier de la génomique par la voie mâle. Chaque taureau transmet en moyenne la moitié de sa supériorité génétique à ses descendants, et les bénéfices associés à cette supériorité ne dépendent pas du nombre de génisses disponibles dans le troupeau, comme nous le verrons plus loin pour la voie femelle.

### *Taureaux éprouvés ou jeunes taureaux génomiques*

Depuis l'arrivée de la génomique, deux types de taureaux sont disponibles : les jeunes taureaux génomiques offerts dans le PEP ou commercialisés comme tels (ex. Genomax), et les taureaux éprouvés. Les jeunes taureaux génomiques ont en moyenne un niveau génétique supérieur à celui des taureaux éprouvés. Par contre, la fiabilité de leurs évaluations est plus faible, et de ce fait leur valeur génomique réelle peut s'éloigner beaucoup plus de leur évaluation que pour les taureaux éprouvés, comme on peut le voir au tableau 3. Ainsi, pour un taureau avec une MPG de + 50 kg de protéine, son potentiel génétique réel se situera entre + 25 kg et + 75 kg dans 90 % des cas, alors que s'il s'agissait d'un taureau éprouvé à + 50 kg avec 100 filles, son potentiel réel se situera entre + 39 kg et + 61 kg.

**Tableau 3. Gamme des écarts prévus dans 90 % des cas entre l'évaluation génétique d'un taureau et sa valeur réelle, selon la fiabilité de l'évaluation**

Type d'évaluation	Fiabilité moyenne (%)	Gamme des écarts possibles avec la valeur réelle, en plus ou en moins, dans 90 % des cas	
		Protéine (kg)	Conformation (points)
Moyenne des parents	36-38	34	6,8
Moyenne des parents génomique	63-67	25	5,2
Épreuve avec 100 filles	90-93	11	2,7
Épreuve avec 1000 filles	98-99	4	1,2

### *Quels taureaux les producteurs ont-ils avantage à utiliser?*

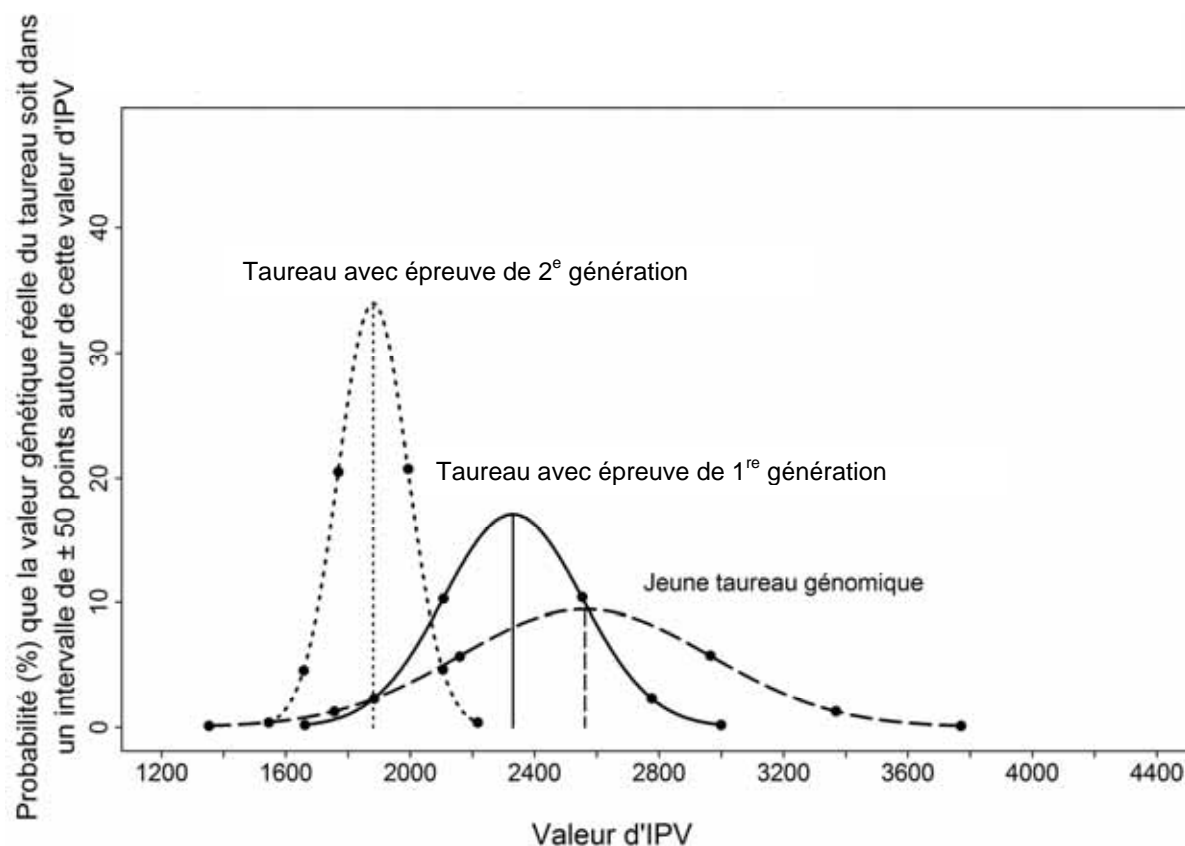
Pour répondre à cette question, on a fait figurer au tableau 4 l'IPV et la fiabilité moyenne de 3 groupes de taureaux sélectionnés à partir des évaluations officielles d'avril 2011 : les 10 meilleurs taureaux pour l'IPV avec une épreuve de 2<sup>e</sup> génération, les 10 meilleurs taureaux pour l'IPV avec une épreuve de 1<sup>re</sup> génération, et les 30 meilleurs jeunes taureaux génomiques. Les taureaux éprouvés devaient être actifs pour figurer dans leur groupe et les jeunes taureaux devaient être âgés d'au moins douze mois. Un effectif plus élevé de jeunes taureaux a été utilisé parce que ces taureaux ont généralement moins de semence disponible par taureau et qu'il est préférable de les utiliser en groupe.



**Tableau 4. Moyennes des évaluations pour l'IPV et de la fiabilité des 10 à 30 meilleurs taureaux dans trois catégories (selon les évaluations génétiques du Réseau laitier canadien, avril 2011)**

Meilleurs taureaux au Canada	IPV moyen	Fiabilité moyenne de l'IPV
10 meilleurs taureaux avec une épreuve de 2 <sup>e</sup> génération	1 881	97
10 meilleurs taureaux avec une épreuve de 1 <sup>re</sup> génération	2 330	89
30 meilleurs jeunes taureaux génomiques	2 841	65

La probabilité que la valeur génétique réelle d'un taureau de chaque groupe soit égale à une valeur donnée d'IPV est représentée à la figure 4. Dans cette figure, on a aussi corrigé la moyenne des jeunes taureaux génomiques pour tenir compte de l'écart moyen (le biais) qui existe entre leur MPG et leur évaluation une fois éprouvés sur descendance. Cet écart correspond à 279 points d'IPV selon une étude réalisée par l'Alliance Semex, comparant les MPG d'environ 500 taureaux et leurs évaluations génétiques une fois éprouvés. Les MPG des jeunes taureaux ont en effet tendance à être surestimées parce qu'elles reflètent en partie la moyenne des parents, qui elle-même est souvent surestimée pour les fils de vaches d'élite.



**Figure 4. Valeur génétique attendue de l'IPV de trois taureaux, chacun à la moyenne d'une des catégories du tableau 1, après correction pour le biais observé pour la MPG des jeunes taureaux**

On peut voir à la figure 4 qu'en moyenne les meilleurs jeunes taureaux ont une valeur génétique de 230 points d'IPV au-dessus de celle des meilleurs taureaux avec une épreuve de 1<sup>re</sup> génération, après la correction ci-avant. Cette supériorité n'est pas surprenante puisque les jeunes taureaux sont sélectionnés avec une plus forte intensité (on retient un pourcentage plus faible des candidats) et qu'ils sont plus jeunes d'environ trois ans.

### *Stratégie d'utilisation des taureaux selon les MPG*

La fiabilité plus basse des jeunes taureaux génomiques impose toutefois une utilisation prudente et stratégique. En effet, dans certains cas la valeur génétique réelle de ces taureaux peut être basse, plus basse même que le niveau le plus bas que peut atteindre un taureau avec une épreuve de 1<sup>re</sup> génération. De plus, nous sommes au tout début de l'emploi de la génomique pour la sélection des bovins laitiers et les fiabilités des évaluations génomiques reposent encore en grande partie sur des calculs théoriques. Si la fiabilité réelle des MPG était plus faible que prévu, la valeur réelle des meilleurs jeunes taureaux génomiques pourrait varier encore plus que ce que montre la figure 4. Étant donné qu'on s'intéresse aux meilleurs taureaux, leurs IPV ont plus de chances de descendre que de monter. Par exemple, combien de jeunes taureaux auront-ils un IPV de plus de 3800 points une fois éprouvés? Probablement très peu, car quand on sélectionne les meilleurs taureaux sur MPG parmi les milliers qui sont génotypés, on les sélectionne aussi pour des facteurs que l'on ne contrôle pas et qui peuvent faire artificiellement monter leur IPV. Ces facteurs relèvent de la chance, mais incluent également la surévaluation possible du père si son évaluation domestique ou étrangère n'est pas suffisamment précise, ou la surévaluation de la mère si celle-ci est sujette à des traitements préférentiels. Ces problèmes s'atténuent une fois que le taureau a suffisamment de filles en production, mais ils peuvent affecter les MPG des meilleurs jeunes taureaux avant leur épreuve.

Pour ces raisons, et aussi parce que les jeunes taureaux ont en règle générale beaucoup moins de données sur la fertilité de la semence et sur la facilité de vêlage que les taureaux avec une épreuve de 1<sup>re</sup> génération, il est prudent d'utiliser un mélange de taureaux éprouvés et de jeunes taureaux génomiques, par exemple de 40 % à 60 % de jeunes taureaux, y compris ceux du PEP, et de 40 % à 60 % de taureaux éprouvés. Cette proportion pourra évoluer vers davantage d'utilisation des jeunes taureaux si leurs résultats sont encourageants dans les années qui viennent et davantage d'utilisation des taureaux éprouvés dans le cas contraire. Cette proportion devrait aussi varier en fonction des objectifs du producteur. Si le producteur veut éviter que dans son troupeau certaines filles soient issues de taureaux avec une épreuve très inférieure, il doit utiliser une plus forte proportion de taureaux éprouvés. Si ce n'est pas un souci pour lui, par exemple dans un grand troupeau commercial, il peut utiliser davantage de jeunes taureaux sélectionnés de type Genomax. Dans tous les cas, une bonne stratégie d'utilisation des jeunes taureaux génotypés consiste à les utiliser en groupe pour réduire le risque associé à leur plus faible fiabilité. En pratique, on doit utiliser plusieurs jeunes taureaux différents et n'utiliser chacun que de façon modérée. Il est important de ne pas surutiliser un jeune taureau en particulier, même s'il a une magnifique MPG. Le tableau suivant présente un exemple type de l'emploi de 100 doses de semence lorsque 50 % de ces doses proviennent de jeunes taureaux génomiques.

**Tableau 5. Utilisation de la semence dans un troupeau qui utilise 50 % de jeunes taureaux génomiques**

<b>Taureaux éprouvés = 50 doses</b>	<b>Jeunes taureaux MPG = 50 doses</b>
5 taureaux différents	12 jeunes taureaux différents
5 à 15 doses/taureau	3 à 5 doses/jeune taureau

Pour conclure sur cette question, les jeunes taureaux génotypés peuvent jouer un rôle utile dans la plupart des troupeaux laitiers. Comme ils sont plus jeunes, en moyenne ils sont génétiquement supérieurs, un avantage qui augmentera au fur et à mesure que l'emploi de la génomique fera s'accroître le taux de progrès génétique annuel. Cependant, les taureaux éprouvés ont des évaluations plus précises et ont donc aussi un rôle important à jouer.

### **Sélection des femelles pour maximiser les profits**

Dans un schéma traditionnel d'amélioration génétique des bovins laitiers, où les taureaux issus des meilleurs pères et mères à taureaux sont éprouvés sur descendance en utilisant environ 30 % de la population de vaches et les meilleurs taureaux éprouvés utilisés en insémination artificielle sur le restant de la population, la sélection des génisses pour le renouvellement des troupeaux ne contribue qu'à environ 3 à 5 % du progrès génétique total de la race. La principale raison pour cette contribution relativement faible est que leur intensité de sélection est faible (on doit en conserver un fort pourcentage pour le renouvellement) et leur précision limitée (seule une moyenne de parents est disponible pour les génisses). L'emploi de la génomique permet d'augmenter la précision de la sélection des génisses, mais il augmente aussi la précision des autres voies de sélection (pères à taureaux, mères à taureaux, et pères des vaches) et réduit l'intervalle entre générations, si bien qu'en fin de compte la contribution relative de la sélection des génisses pour le renouvellement des troupeaux augmente relativement peu pour se situer de 5 à 7 % du total.

Malgré cela, la génomique offre de nouvelles possibilités pour la sélection des femelles. En particulier, les producteurs laitiers canadiens peuvent bénéficier du programme Genotest, développé conjointement par Holstein Canada, Semex et ses partenaires, dont le CIAQ. Ce programme permet l'emploi de panels de 3 k ou de 50 k sur deux types d'échantillons collectés à la ferme, soit du poil ou des écouvillons nasaux. Les échantillons sont envoyés à Holstein Canada, puis au laboratoire. Le Réseau laitier canadien utilise alors les génotypes produits par le laboratoire pour calculer des évaluations génomiques, publiées tous les mois, pour les sujets correspondants.

Le panel de 50 k, utilisé actuellement pour la sélection des taureaux, peut aussi servir à la sélection des vaches. À cause de son coût relativement élevé (140 \$ par sujet dans le programme Genotest), il sert principalement à l'évaluation des femelles d'élite, particulièrement les mères à taureaux potentielles et les vaches utilisées pour la production d'embryons. Depuis septembre 2010, un autre panel, cette fois de 3 000 SNP (3 k) est devenu disponible au coût de 47 \$ par test. Une fois l'animal génotypé, on peut reconstituer son génotype de 50 k avec une fiabilité élevée (généralement plus de 97 %) dans la mesure où cet animal provient de familles avec des ancêtres génotypés au 50 k. C'est ce qu'on appelle l'imputation de 3 k à 50 k. Le panel de 3 k permet donc de sélectionner les génisses avec une fiabilité comparable à celle du panel de 50 k, soit une fiabilité beaucoup plus élevée que la moyenne de parents dont on disposait autrefois.

On peut voir au tableau 6 une comparaison entre la fiabilité de l'IPV pour des génisses génotypées avec le panel de 3 k et pour des femelles non génotypées (Réseau laitier canadien, avril 2011). On notera en particulier qu'une génisse génotypée a un IPV plus précis qu'une vache de 1<sup>re</sup> lactation non génotypée.

**Tableau 6. Fiabilité moyenne de l'IPV pour différentes catégories de femelles (Réseau laitier canadien, avril 2011)**

Type de femelle	Fiabilité moyenne de l'IPV
Jeune vache génotypée en 1 <sup>re</sup> ou 2 <sup>e</sup> lactation	70
Génisse génotypée avec panel de 3 k	61
Jeune vache non génotypée en 1 <sup>re</sup> ou 2 <sup>e</sup> lactation	54
Génisse non génotypée	37

Le génotypage des femelles est un outil que le producteur peut employer selon ses besoins. Par exemple, il peut l'utiliser pour génotyper les meilleures vaches ou génisses du troupeau, dans le but de mieux les accoupler ou de préciser leur valeur marchande. À l'opposé, il peut génotyper les génisses avec les MP les plus basses dans le but de décider lesquelles éliminer du renouvellement. Cependant, la stratégie que nous discuterons en plus de détails ici consiste à tester toutes les génisses du troupeau, de préférence quand elles sont encore jeunes, et à conserver les meilleures pour le renouvellement. En effet, le coût d'élevage des génisses est généralement élevé. Au Québec, la source Agritel-Web montre qu'il se chiffrait en moyenne à 3 075 \$ en 2008. Élever toutes les génisses constitue donc un assez gros risque pour le producteur, car à moins que leur prix de vente après vêlage soit suffisant pour compenser leur coût d'élevage, chaque génisse en surplus représente une perte économique.

Le tableau 7 présente une estimation des bénéfices économiques nets réalisables dans un troupeau de 100 vaches en lactation grâce à l'emploi du panel de 3 k. Ces bénéfices sont exprimés au prix courant et après soustraction du coût de génotypage, en fonction du taux de renouvellement et du taux de mortalité ou d'élimination involontaire des femelles de la naissance au 1<sup>er</sup> vêlage, quand toutes les génisses disponibles sont génotypées.

**Tableau 7. Bénéfices économiques nets (\$) du génotypage des génisses pour un troupeau de 100 vaches en lactation, exprimés au prix courant et après soustraction du coût de génotypage, quand toutes les génisses disponibles sont génotypées\***

Mortalité des veaux femelles de la naissance au génotypage (%)		Taux de renouvellement du troupeau (%)			
		25	30	35	40
5	Nb génisses disponibles	46	47	48	49
	Bénéfices (\$)	7 500	5 300	3 150	940
10	Nb génisses disponibles	44	45	46	47
	Bénéfices (\$)	6 870	4 560	2 260	(240)
15	Nb génisses disponibles	41	42	43	44
	Bénéfices (\$)	6 170	3 730	1 200	(1 860)

\* Les chiffres entre parenthèses indiquent une perte.

Ces bénéfiques correspondent à l'accroissement de la performance des génisses sélectionnées au 3 k et de leurs filles, comptabilisés sur 3 lactations, moins les coûts de génotypage. Le tableau est basé sur les hypothèses suivantes :

- fiabilité de 62 % de l'IPV avec le panel de 3 k (2 % de moins qu'avec le panel de 50 k);
- écart type génétique vrai de l'IPV de 550 points pour les génisses du troupeau (correspondant à l'écart type dérégressé des moyennes de parents dans les troupeaux du Québec inscrits à Valacta);
- valeur économique nette de 100 points d'IPV de 29 \$ (d'après Van Beek *et al*, 2009);
- coût de génotypage de 47 \$ par animal;
- taux annuel d'inflation de 5 % par an pour ramener les bénéfiques en valeur courante (puisque'ils ont lieu plus tard que l'investissement dans le génotypage);
- intervalle entre vêlages de 14 mois;
- 30 % des vaches réformées vêlant dans l'année;
- marge de sécurité de 10 % de génisses en plus du nombre requis d'après le taux de renouvellement, pour tenir compte des génisses qui pourraient être infertiles ou de besoins accrus si plus de vaches sont réformées que prévu, ou si la taille du troupeau doit être ajustée en raison de l'accroissement du quota.

Il est important de noter que les gains économiques présentés au tableau 7 excluent les économies réalisées en élevant moins de génisses quand le coût d'élevage de ces génisses est supérieur à leur prix de vente (par exemple, si le coût d'élevage des génisses est de 3 075 \$ par génisse, tel que calculé dans Agritel-Web, mais que leur prix de vente est inférieur à ce chiffre). Par contre, si le prix de vente prévu pour les génisses est supérieur au coût d'élevage, comme dans le cas d'un troupeau d'élite qui a un marché assuré pour celles-ci, le producteur a intérêt à garder celles qu'il ne conserve pas pour le renouvellement et à les vendre.

L'examen du tableau 7 révèle que les gains économiques varient beaucoup en fonction du taux de renouvellement du troupeau. Plus celui-ci est faible, plus le producteur a de chances de réaliser des gains importants. Le degré de supériorité génétique des génisses dépend de l'intensité de sélection, et donc du nombre de génisses nécessaires au renouvellement par rapport au nombre de génisses disponibles. Si toutes les génisses génotypées doivent être utilisées pour le renouvellement, il n'y a pas de sélection possible et le résultat est une perte économique correspondant au coût du génotypage. Par contre, si le nombre de génisses disponibles est nettement plus élevé que le nombre nécessaire au renouvellement, les bénéfiques peuvent être élevés, et dépasser de beaucoup l'investissement dans le génotypage. C'est particulièrement le cas d'un troupeau qui utiliserait la semence sexée pour accoupler ses génisses et qui n'est pas en phase d'expansion, mais de nombreux troupeaux peuvent aussi en bénéficier sans utiliser la semence sexée. Le nombre de génisses disponibles dépend de plusieurs facteurs comme l'intervalle entre les vêlages et le taux de mortalité des veaux femelles de la naissance au génotypage et c'est d'après ces variables qu'il est calculé dans le tableau 7.

Par exemple, dans un troupeau de 100 vaches en lactation, avec un taux de renouvellement de 35 % et un intervalle entre les vêlages de 426 jours, on doit s'attendre à 102 vêlages par an en moyenne si 30 % des taures réformées vêlent dans l'année et qu'on garde une marge de sécurité

correspondant à 10 % des besoins de renouvellement. La moitié de ces veaux seront des femelles, soit 51 veaux. Si l'effet combiné des mort-nés et de la mortalité des veaux réduit ce nombre de 10 %, on aura 46 veaux femelles disponibles en moyenne. Si le producteur géotype ces 46 veaux avec le panel de 3 k, qu'il sélectionne les 39 meilleurs pour le renouvellement sur la base de leur MPG, en se donnant une marge de sécurité de 4 veaux de plus que ses besoins, il peut s'attendre à des revenus supplémentaires de 4 420 \$ environ de la part de ses génisses et de leurs filles. Cela lui aura coûté 2 160 \$ en géotypage (46 x 47 \$), donc il réalisera un bénéfice net de 2 260 \$. À cela s'ajouteront les économies réalisées en élevant moins de génisses, si les frais d'élevage de ces génisses sont supérieurs aux prix qu'elles auraient apportées sur le marché. S'il en coûte au producteur 3 075 \$ pour élever une génisse, que son prix de vente n'est que de 2 400 \$ en moyenne et qu'il en élève 39 plutôt que 46, il fera un bénéfice additionnel de  $(3\,075 - 2\,400) \times (46-39) = 4\,725$  \$, soit un bénéfice total de 6 985 \$ ou environ 70 \$ par vache en lactation.

Plus l'intervalle entre vêlages est réduit et plus le taux de mortalité des veaux femelles et génisses est faible, plus les gains économiques sont importants. Si on reprend l'exemple précédent, mais que l'intervalle entre vêlages est de 13 mois, les gains économiques se chiffrent à 2 910 \$ par 100 vaches pour la partie supériorité des génisses et de leurs filles.

De préférence, on peut tester les génisses dans les 2 à 3 mois après leur naissance et les sélectionner selon un niveau minimal de MPG pour le troupeau. Si on les élimine tôt, il est toujours prudent d'en garder quelques-unes en réserve comme marge de sécurité au cas où plus de vaches que prévu sont réformées ou si la taille du troupeau doit être ajustée pour diverses raisons telles que la quantité de quota disponible. Dans le tableau 7, cette marge de sécurité était de 10 %, mais on pourrait la faire varier en fonction de la situation du troupeau et en mesurer l'effet sur les bénéfices économiques. Le producteur pourrait aussi décider d'élever toutes les génisses géotypées et de vendre les génisses en surplus, mais comme nous l'avons indiqué plus haut, cela comporte un risque économique important dans bien des cas étant donné le coût élevé de l'élevage des génisses.

Le tableau 7 compare les bénéfices économiques résultant de la sélection des génisses sur MPG par rapport à une situation où les génisses ne sont pas sélectionnées. Ces gains seraient plus faibles si on les comparait à une situation où le producteur utilisait systématiquement les moyennes de parents (MP) pour sélectionner les génisses. En règle générale, cependant, les MP ont été peu utilisées jusqu'ici par les producteurs québécois pour cet objectif, d'une part parce que la sélection s'est faite sur d'autres critères et, d'autre part, parce que l'aptitude des MP à classer les génisses à l'intérieur d'un même troupeau est limitée. En contrepartie, le tableau ne tient pas compte des bénéfices liés à la supériorité transmise par les génisses et leurs filles à tous leurs descendants futurs.

Pour conclure cette section, contrairement à l'utilisation des taureaux, les bénéfices correspondant au géotypage des génisses dépendent de la situation du troupeau. Le producteur devrait géotyper toutes ses génisses uniquement si le nombre de génisses disponibles est suffisamment élevé par rapport à ses besoins de renouvellement. Il importe donc au producteur d'analyser la situation de son troupeau pour déterminer si cet investissement en vaut la peine. Sinon, le géotypage peut être réservé à l'évaluation des meilleurs sujets présumés du troupeau pour

décider comment les accoupler ou déterminer leur valeur et même dans certains cas à la partie inférieure du troupeau si l'objectif du producteur est d'éliminer les moins bons sujets. L'emploi de panels de génotypage par les producteurs laitiers en est encore à ses débuts, surtout pour les producteurs commerciaux, mais on peut s'attendre à ce que la pratique devienne de plus en plus commune. Le panel de 3 k lui-même risque d'évoluer vers un outil encore plus fiable, possiblement moins onéreux et contenant en plus des 3000 SNP actuels des marqueurs pour divers gènes d'intérêt qui pourraient, par exemple, affecter la reproduction ou la résistance aux maladies.

## **FUTURS DÉVELOPPEMENTS EN GÉNOMIQUE DES BOVINS LAITIERS**

Dans les années à venir, il faut s'attendre à de nombreux développements, dont quelques-uns sont brièvement décrits ci-dessous.

- Le panel de 3 k sera bientôt remplacé, durant l'automne 2011, par un panel de 6 k (6000 SNP) à un coût comparable, mais avec une fiabilité légèrement supérieure et moins de rejets au laboratoire.
- La découverte récente de groupes de SNP (haplotypes) contenant des gènes causant une mortalité embryonnaire quand deux parents porteurs sont croisés. Ceci devrait déboucher dans un proche avenir à la modification des programmes d'accouplement pour éviter de tels croisements.
- La mise en marché, déjà commencée, de deux panels de haute densité (HD) pour les bovins, l'un de 780 000 SNP et l'autre de 600 000 SNP. Le Consortium nord-américain (Canada et États-Unis), auquel se sont maintenant joints la Grande-Bretagne et l'Italie, prévoit de faire le génotypage de 2 000 taureaux avec l'un ou l'autre de ces panels pendant l'automne 2011, puis d'imputer les 77 000 génotypes de taureaux et de vaches déjà présents dans la banque commune de génotypes 50 k à un génotype réunissant les 2 panels, contenant 1,1 M de SNP. Dès 2012, les évaluations génomiques du Canada et des États-Unis pourraient se baser non plus sur 50 000 SNP, mais sur 1 100 000 SNP. Cependant, il ne faut pas s'attendre immédiatement à une augmentation de fiabilité des évaluations dans chaque race, car de nouvelles méthodes statistiques devront être développées pour tirer parti efficacement du nombre plus élevé de SNP.
- L'introduction des nouveaux panels HD devrait toutefois être particulièrement utile pour les races autres que la Holstein. En effet, avec les panels HD, on pourra probablement faire une évaluation génomique conjointe des différentes races laitières et estimer ainsi les effets de petits groupes de SNP qui sont communs à travers les races. Ceci pourrait augmenter significativement l'efficacité de la sélection génomique pour les races avec des effectifs plus petits que la Holstein qui n'ont pas assez de taureaux génotypés à 50 k actuellement pour obtenir de forts accroissements de fiabilité.

- Certains groupes de recherche dans le monde, dont Boviteq au Québec, sont en train de mettre au point des méthodes permettant de génotyper les embryons à partir de biopsies. À l'avenir, ces méthodes pourraient augmenter l'intensité de sélection des veaux mâles ou femelles des vaches d'élite et diminuer les coûts relatifs aux receveuses et à l'élevage des veaux pour les éleveurs qui produisent des jeunes sujets mâles comme candidats pour l'insémination artificielle.
- Les données du projet canadien de collecte des données sur la santé, qui a commencé il y a quelques années, et les données de DS@HR au Québec serviront dans l'avenir à calculer les évaluations génétiques des taureaux pour les caractères de santé. Ces évaluations seront alors associées aux génotypes des taureaux de façon à estimer les effets des SNP pour la santé et éventuellement permettre la sélection de jeunes sujets d'après un MPG pour ces caractères. La participation volontaire des producteurs à la collecte des données sur la santé à travers ces programmes est donc une étape nécessaire au développement d'outils de génomique efficaces pour les caractères de santé.
- À plus long terme, la génomique sera probablement utilisée pour la sélection de nouveaux caractères comme les composantes du lait affectant la santé humaine ou l'efficacité alimentaire des vaches. À ce titre, il est important de se rappeler que les données phénotypiques et les évaluations génétiques traditionnelles sont essentielles pour l'estimation et la réestimation continue des effets des SNP. Le maintien des programmes de contrôle laitier et de classification est donc nécessaire à la poursuite de la sélection génomique. De plus, la sélection génomique pour de nouveaux caractères n'est possible que si des données pour ces caractères sont collectées chez un nombre élevé de sujets.
- Plusieurs autres projets sont en cours, comme le développement de mesures plus précises de la consanguinité grâce aux nouveaux outils de génomique, la vérification et la découverte de la parenté à partir de panels de SNP et le séquençage des taureaux les plus influents de chaque race (c'est-à-dire l'identification des trois milliards de molécules d'ADN contenues dans leurs chromosomes). Certains taureaux, comme Goldwyn, ont déjà été séquencés.
- Un même traitement vétérinaire, ou une même ration alimentaire, peut avoir des effets différents en fonction du génome d'un animal. On peut donc s'attendre à ce qu'à plus long terme les profils génomiques servent aussi à guider le traitement, la nutrition et la régie des vaches laitières.
- Au Canada, la génomique signifie l'utilisation d'une meilleure connaissance du génome des bovins laitiers pour mieux les sélectionner et non l'introduction de gènes provenant d'autres espèces. Le lait est un produit naturel, ce qui constitue une caractéristique importante pour le consommateur, si bien que le secteur ne voit pas l'utilisation de sujets génétiquement modifiés pour produire du lait comme une alternative viable. Cependant, cette stratégie pourrait varier dans d'autres pays. Par exemple, des gènes humains ont récemment été implantés dans le génome de bovins laitiers en Chine et en Argentine dans le but de produire du lait dont la composition se rapproche davantage de celle du lait humain.

Pour conclure, l'emploi de la génomique dans le secteur laitier va s'accélérer et de nombreuses nouvelles utilisations verront le jour pendant les années qui viennent.



## CONCLUSION

La génomique a révolutionné l'amélioration génétique des bovins laitiers en très peu de temps. Son application permet une augmentation rapide du taux annuel de progrès génétique pour tous les caractères sélectionnés. Pour en tirer le meilleur parti et maximiser ses profits, le producteur peut soit utiliser des taureaux supérieurs sélectionnés à partir de ces nouveaux outils, soit les utiliser lui-même pour la sélection de ses génisses. L'emploi de taureaux supérieurs pour les caractères recherchés continue de constituer le moyen le plus efficace d'améliorer le troupeau génétiquement. Selon ses besoins, le producteur peut utiliser des taureaux éprouvés ou des jeunes taureaux génomiques. Un mélange des deux est recommandé pour équilibrer progrès et risque. Le génotypage systématique des femelles avec le panel de 3 k, ou bientôt celui de 6 k, est rentable dans de nombreuses situations mais pas dans toutes. En effet, son efficacité dépend du nombre de génisses disponibles par rapport au nombre de génisses nécessaires au renouvellement. La génomique va rapidement déboucher sur de nombreuses applications et il deviendra de plus en plus important pour le producteur laitier de s'informer pour prendre des décisions éclairées sur celles qui conviennent le mieux à son troupeau. La génomique fait maintenant partie intégrante de l'amélioration génétique et donc de l'élevage des bovins laitiers. Les producteurs québécois et canadiens sont parmi les mieux placés dans le monde pour en tirer parti.

## LEXIQUE

BLAD : déficience d'adhésion des leucocytes bovins

CVM : malformation vertébrale complexe

CIAQ : Centre d'insémination artificielle du Québec

IPV : indice de profit à vie

MP : moyenne des parents

MPG : moyenne des parents génomique

PEP : programme d'épreuve de progéniture

VÉE : valeur d'élevage estimée

VÉEG : valeur d'élevage estimée génomique

VGD : valeur génomique directe

TPI : indice de performance totale, utilisé aux É.-U.

Mérite Net \$ : indice économique, utilisé au É.-U.

## RÉFÉRENCES

- Buch, L. H., M.K. Sorensen, J. Lassen, P. Berg et A. C. Sorensen. 2010. *Dairy cattlebreeding schemes with or without genomic selection and progeny testing*. In Proc. 9th World Congr. Genet. Appl. Livest. Prod. Leipzig, 1-6, August 2010. Ed. Gesellschaft fur Tierzuchtwissenschaften e. V. Leipzig, Germany, CD-Rom, Comm. 0418.
- König, S., H. Simianer et A. Willam. 2009. *Economic evaluation of genomic breeding programs*. J. Dairy Sci. 92: 382-391.
- McHugh, N., T.H.E. Meuwissen, A. Cromie, A. Sonesson et M. Nofima. 2011. *Use of female information in dairy cattle breeding programs*. J. Dairy Sci. 94: 4109-4198.
- Pryce, J.E., M.E. Goddard et B.J. Hayes. 2010. *Breeding scheme designs for dairy cows under genomic selection: what can we do?* In Proc. 9th World Congr. Genet. Appl. Livest. Prod. Leipzig, 1-6, August 2010. Ed. Gesellschaft fur Tierzuchtwissenschaften e. V. Leipzig, Germany, CD-Rom, Comm. 0291.
- Schaeffer, L.R. 2006. *Strategy for applying genome-wide selection in dairy cattle*. J. Anim. Breed. Genet. 123: 218-223.
- van Beek, P., J.P. Chesnais et N. Caron. 2009. *Derivation of economic values and selection indices for the Holstein breed in Canada*. MSc Thesis, Animal Sciences, Wageningen University and Research Centre, The Netherlands.