

Les enjeux de la génétique pour l'adaptation au changement climatique

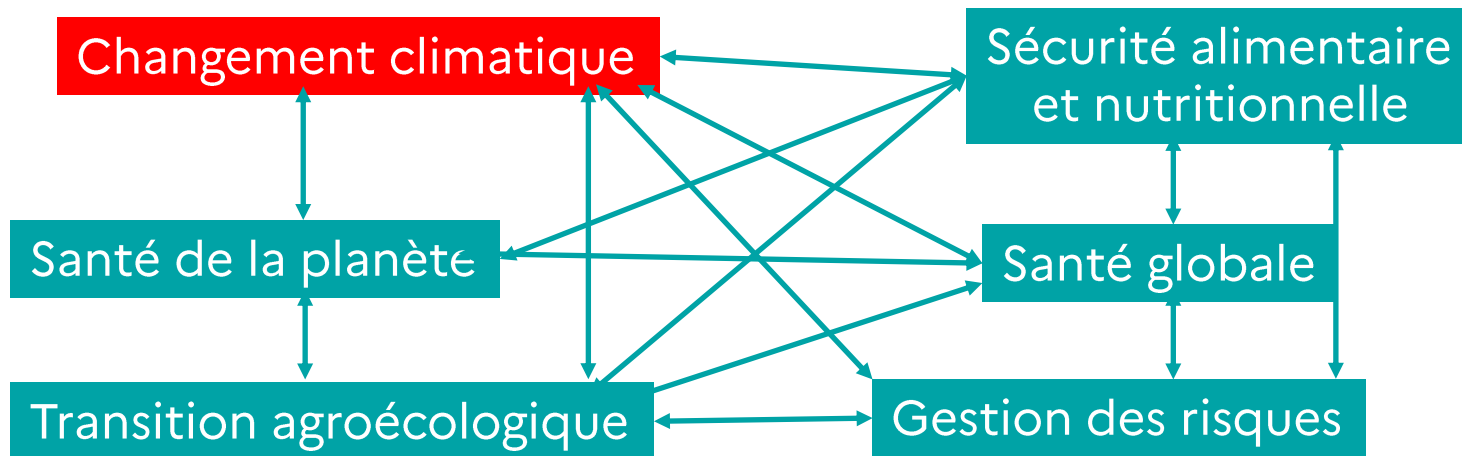


Jean-Pierre BIDANEL *Chef de département adjoint
génétique animale, INRAE*



Les défis de l'agriculture et de l'élevage

CC : un des défis majeurs auxquels l'agriculture et l'élevage sont confrontés, mais ces défis majeurs sont interdépendants et ne peuvent être abordés indépendamment les uns des autres

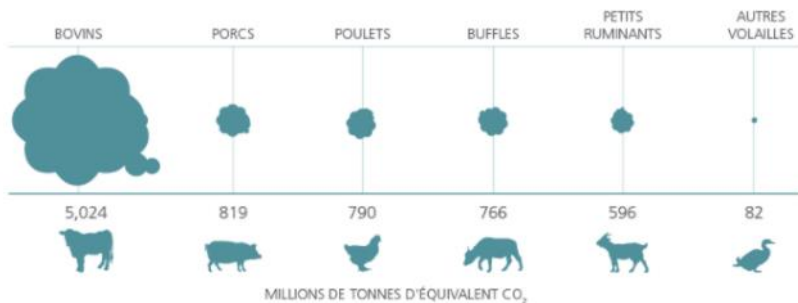


Elevage et changement climatique

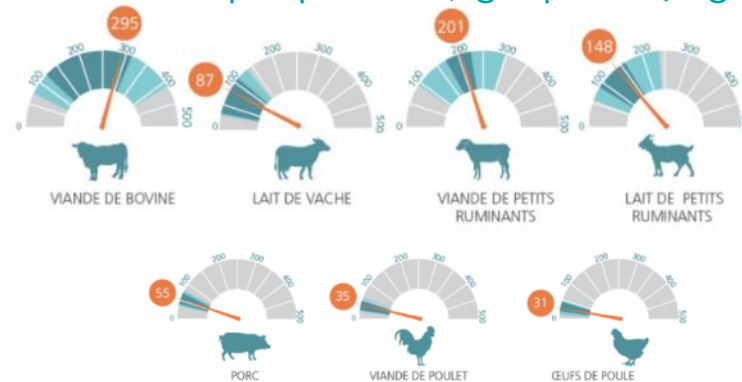
L'élevage est aujourd'hui un contributeur important au changement climatique

14,5% des émissions de GES au niveau mondial

Emissions par espèce (Gt eq. CO₂)

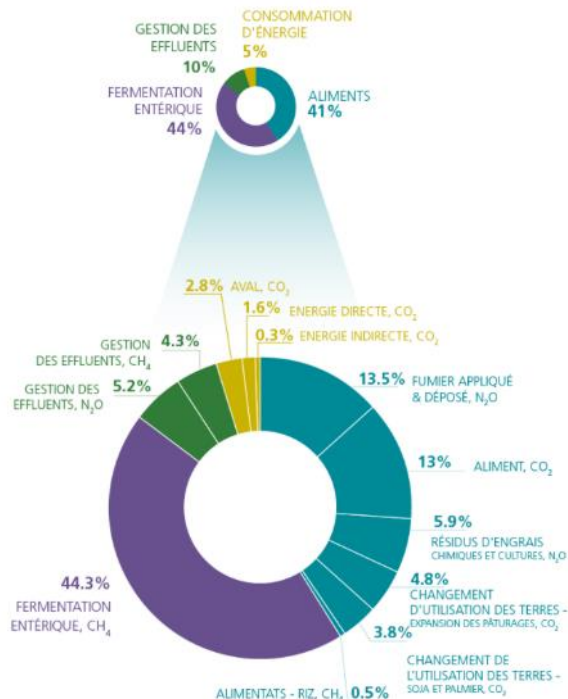


Emissions par produit (kg eq. CO₂ / kg Pt)

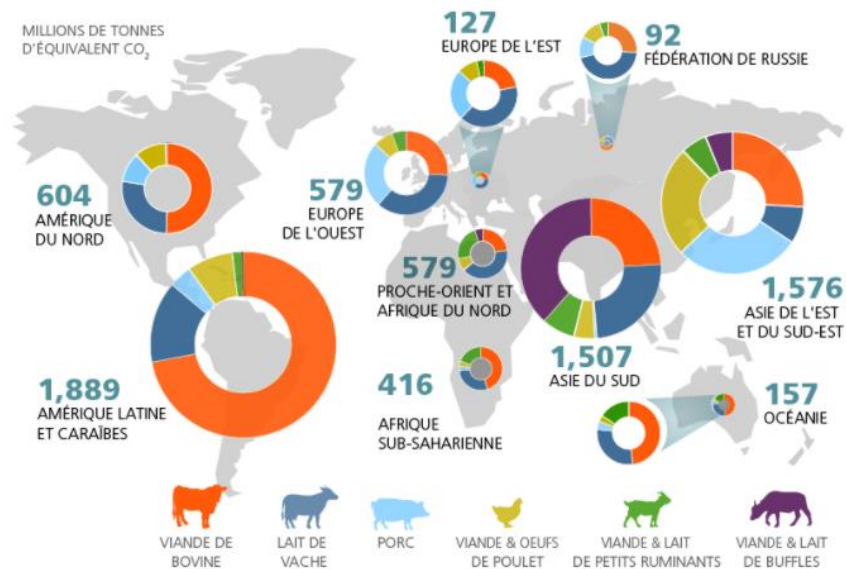


Elevage et changement climatique

Emissions par source (%)

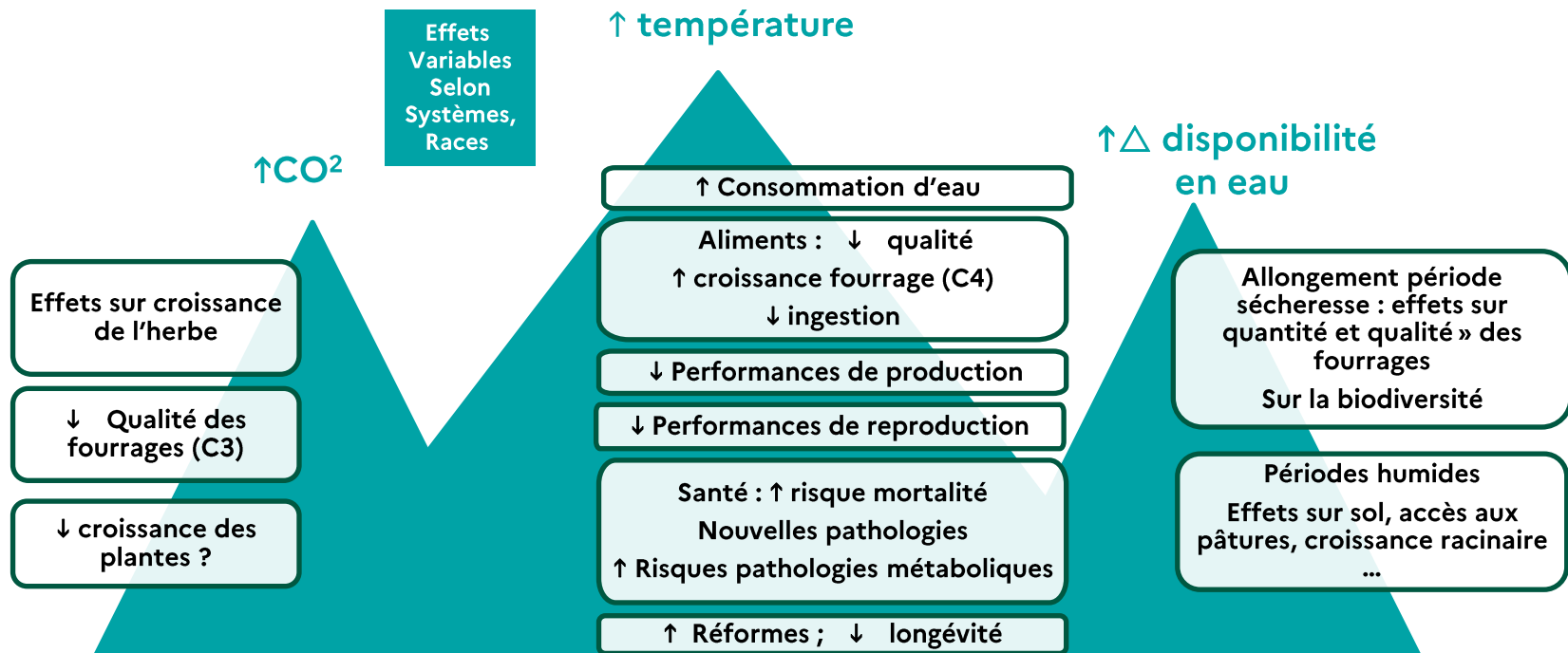


Emissions par grande région



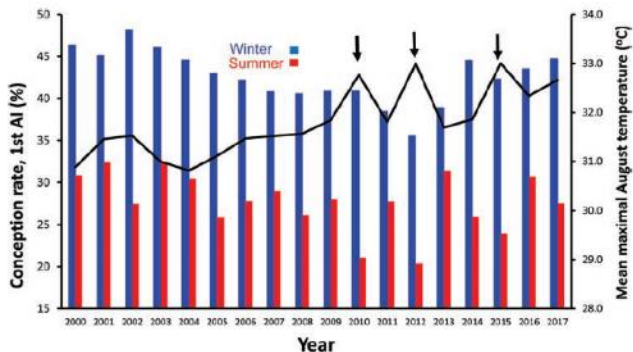
Elevage et changement climatique

Impact du changement climatique sur les animaux



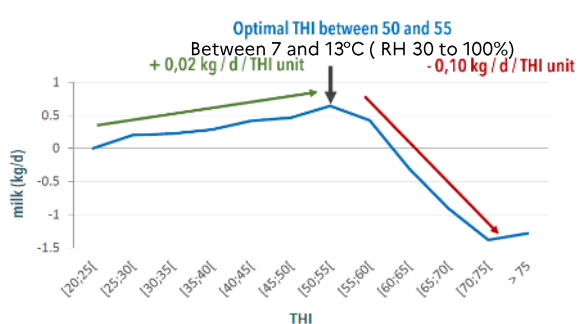
Effets du CC – quelques exemples

Fertilité de vaches inséminées en hiver vs été (Israël)

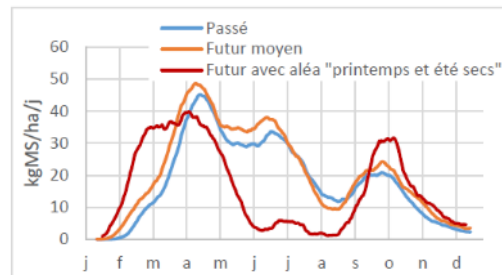


Source : Wolfenson & Roth, 2019, doi: 10.1093/af/vfy027

Effet de l'index THI sur la production de lait de vaches de race Montbéliarde (A. Vinet, EAAP 2021)



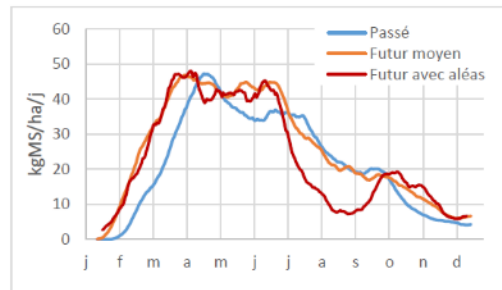
Effet du CC sur la production d'herbe (projet Climait; Moreau, Madrid et al. 2019)



1971-2000
vs
2030-2050

Nord
Ardèche

Pousse moyenne d'une prairie à base de graminées sur sol profond, selon la période d'étude envisagée.



1971-2000
vs
2060-2099

Cotentin

Amélioration génétique animale

Principes de base

Exploitation de la variabilité génétique existante

Entre races / populations



Intra-race / population



Choix des races 250 lignées / races dans la cryobanque nationale

Croisements

- Différents systèmes de croisement (discontinus, continu)
- Permettent ou non de tirer parti des effets additifs et non additifs, de la complémentarité
- Accroissement variance? génétique et phénotypique
- Amélioration / création de populations
- Evolutions qui peuvent être rapides, mais ne sont pas cumulables

Choix (sélection) et accouplement des meilleurs reproducteurs

- Sur la base d'orientations définies (*objectif de sélection*)
- Tri sur la base d'un « note » de synthèse (*indice de sélection*)
$$IS = a_1 VGE_1 + \dots + a_n VGE_n$$
 - VGE_i calculées
 - à partir des phénotypes, paramètres génétiques & généalogie
 - en incluant des informations sur le génome des individus
- Processus lent (gain de l'ordre de 1 à 3 % par an), mais cumulatif
- Très performant à moyen / long terme

Utilisation conjointe du croisement et de la sélection

Amélioration génétique animale

Nécessité de connaître la variabilité génétique des caractères que l'on souhaite sélectionner

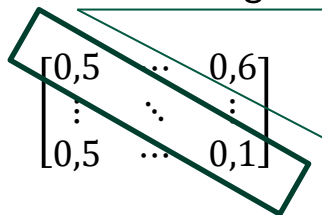
Approche classique

Entre races

Performances moyennes + évolution sous l'effet de la sélection
Aptitude au croisement

Intra race

Paramètres génétiques de la population



Corrélations génétiques et phénotypiques

Héritabilités

Bien connus pour les grandes races dans les systèmes de production actuels pour les caractères d'efficacité économique

Connaissance beaucoup plus partielle

- pour les caractères liés à l'impact environnemental, au BEA, aux aspects non marchands ...
- sur l'aptitude au croisement et, plus globalement sur les effets non additifs des gènes
- dans les systèmes d'élevage du futur

Amélioration génétique animale

Apports de la génomique

Sélection génomique (SG)

Accroît l'efficacité de la sélection et facilite la sélection de caractères difficiles à mesurer à grande échelle

Connaissance croissante des QTL / des gènes et de leurs effets à différentes échelles du vivant

Expression des gènes/allèles au niveau de la cellule, du tissu, de l'organe, ..., de l'animal

⇒ Epigénétique : étude des facteurs qui régulent l'activité des gènes

Grands Programmes internationaux d'annotation du génome

Objectif de connaissance des un 1^{er} temps, mais permettront d'accroître l'efficacité de la sélection



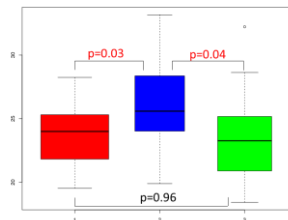
Connaissance des métagénome

Les microbiomes peuvent affecter de façon importante les performances

ex : microbiome du rumen et GES, microbiome intestinal et digestion, rôle dans l'immunité ...

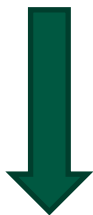
La composition des microbiomes peut avoir une base génétique

Leur prise en compte doit également permettre d'accroître l'efficacité de la sélection



Les enjeux de la génétique animale

Systèmes actuels axés sur l'efficacité productive des animaux et économique du système



Systèmes du futur plus diversifiés et durables, mobilisant une plus grande combinaison d'aptitudes chez les animaux

Enjeux d'atténuation du changement climatique

Comment réduire les émissions de GES de l'élevage (directes ou via les aliments)?
Qu'apporte l'amélioration de l'efficacité productive de l'animal ?

Enjeux d'adaptation

A des contraintes multiples (changement climatique et ses aléas

Comment assurer cette adaptation des animaux ?

Adaptation des races / des populations actuellement utilisées ?

- Quelle est leur vulnérabilité / changement climatique ?
- Peut-on les adapter, et, si oui, comment ?
- Y a-t-il de la variabilité génétique pour certains caractères, aujourd'hui non utilisée, et susceptible de présenter un intérêt dans les systèmes du futur ?

Génétique et atténuation

La sélection pratiquée depuis des décennies a permis de réduire les émissions de GES à l'échelle de l'animal (réponse corrélative à la sélection)

Un facteur majeur : ↑ efficacité alimentaire (EA)

(Mollenhorst & de Haas, 2019, WLR Report 1156 – études basées sur ACV)

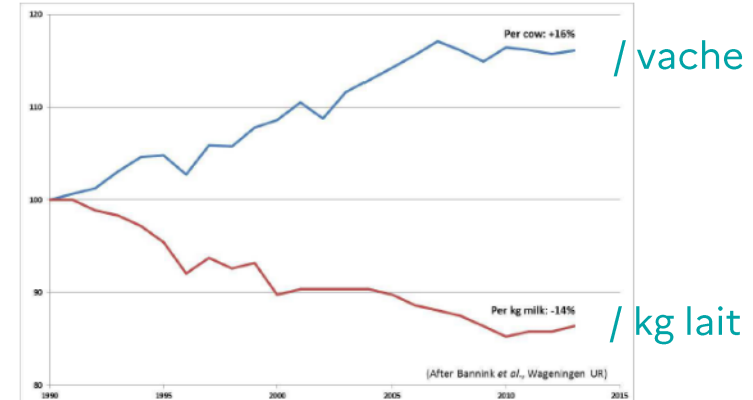
- **Poulet de chair** -1,7 % / an
- **Poule** : -0,8 à -1% de réduction / an selon lignée
- **Porc** : -0,6% à -0,7% / an
- **Vache laitière**
- **Poissons** : ↑ eff. Alim. => ↓ GES
- **Bovin à viande** : lien EA – GES mal connu

(Besson et al., 2020; doi: 10.1186/s12711-020-0524-0)

Relation faible

(Renand et al, 2019; doi.org/10.3390/ani9121136)

Emissions entériques de CH₄



Génétique et atténuation

Peut-on sélectionner plus efficacement pour réduire les GES ?

Rapport UE : McLeod et al, 2019; doi:10.2760/731326)

Projections basées sur la poursuite des tendances actuelles

Vaches laitières : 0 à 0,5% /an lié à l' ↑ production lait /vache

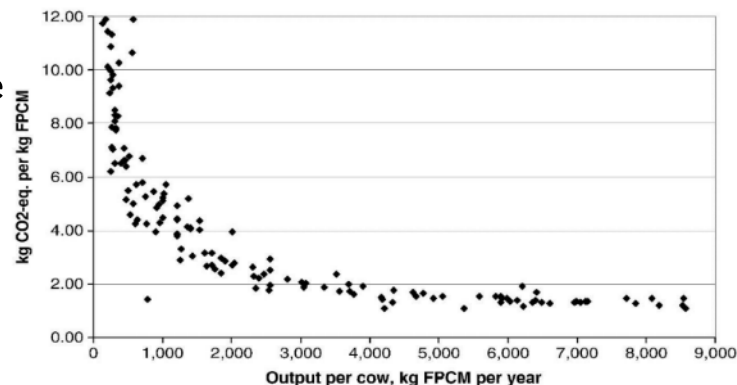
Bovins à viande: 0 à 0,25%/an lié à l' ↑ efficacité alimentaire
Nécessité de sélectionner pour réduire les émissions de CH4

Porcs: 0,8%/an possible en lien avec l' ↑ efficacité alimentaire

Poulets : on approche de limites physiologiques
- poulet de chair : gain de 10% encore possible
- œufs : gain de 7% encore possible

Le développement de systèmes de production moins intensifs, plus respectueux du BEA,
risque dans un premier temps de freiner cette évolution

Figure 5. Relationship between total greenhouse gas emissions and output per cow. Each dot represents a country (Gerber et al. 2011)



Génétique et atténuation

Peut-on sélectionner plus efficacement pour réduire les GES ?

Changement des objectifs de sélection

- prise en compte de la réduction de CH₄ dans les objectifs de sélection

=> on peut augmenter sensiblement le rythme de réduction de CH₄

vache laitière : ↓ de 24% d'ici 2050 (de Haas et al. 2021; doi: [10.1016/j.animal.2021.100294](https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100294))

Difficulté majeure : phénotypage de la production de méthane

- Mesure directe très coûteuse
- Mesures indirectes (proxies) actuellement étudiés en bovins
 - Revue de Negussie et al (2017; doi.org/10.3168/jds.2016-12030)
 - Ingestion, comportement alimentaire, temps de rumination, mesures sur rumen
composition du lait, fèces, ...**Composition du microbiote ruminal, Spectres MIR du lait**

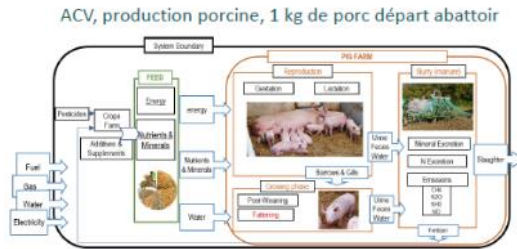
Génétique et atténuation

Peut-on sélectionner plus efficacement pour réduire les GES ?

Changements des systèmes de production

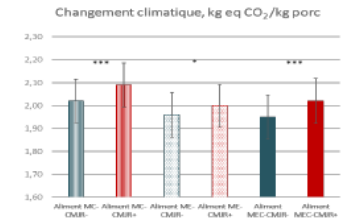
- Avancement de l'âge au 1^{er} vêlage en bovins allaitants
- Systèmes bovins moins spécialisés (production de lait et de viande)
 - Augmentation de la production de CH₄/kg de lait, mais forte diminution pour la production de viande + systèmes utilisant davantage les fourrages
- Utilisation de ressources alimentaires plus locales (réduction importation soja ...)
 => Sélectionner pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de ces ressources locales

Génétique et élevage de précision



Evaluations individuelles environnementales et économiques à l'échelle du système

=> Alimentation de précision optimisée → Pour les animaux à profil plus efficace (CMJR-)
 pour réduire l'impact environnemental → Pour des aliments optimisés (ME et MEC)



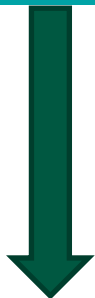
Impacts environnementaux réduits

→ Pour les animaux à profil plus efficace (CMJR-)

→ Pour des aliments optimisés (ME et MEC)

Les enjeux de la génétique animale

Systèmes actuels
axés sur l'efficacité
économique



Systèmes du futur
plus variés
Multiperformants
et durables

Enjeux d'atténuation du changement climatique

Comment réduire les émissions de GES de l'élevage ?
Qu'apporte l'amélioration de l'efficacité de production de l'animal
et du système

Enjeux d'adaptation

A la multiperformance et aux changements climatiques et ses
aléas

Comment assurer cette adaptation ?

Adaptation des races / des populations actuellement utilisées ?

- Quelle est leur vulnérabilité / changement climatique ?
- Peut-on les adapter, et, si oui, comment ?
- Y a-t-il de la variabilité génétique, aujourd'hui non utilisée, susceptible
de présenter un intérêt dans les systèmes du futur ?

Evolution des objectifs de sélection pour répondre aux défis du CC et de la transition agroécologique

- Revisiter la diversité génétique pour adapter les populations et les systèmes
- Adapter les animaux à mieux utiliser une plus grande variabilité des ressources, ressources fourragères moins « gourmandes » en eau (pâturage, ressources ligneuses), co-produits... améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau
- Améliorer la résilience des animaux :
 - longévité, reproduction
 - résistance aux maladies (réduction utilisation antibiotiques, extension pathologies (parasitisme, maladies métaboliques/canicule...), nouvelles pathologies ...
- Améliorer la résistances aux stress abiotiques (thermotolérance, ...)
- Contribuer à la mise en place de systèmes améliorant le BEA (systèmes moins contraints, animaux en groupe => relations entre animaux, animal-homme
 - ⇒ Vaste sujet , qui va également être traité dans les autres exposés
 - ⇒ abordé à partir de quelques considérations générales et d'exemples d'actions en cours

Evolution des objectifs de sélection pour répondre aux défis du CC et de la transition agroécologique

Les objectifs de sélection souvent formalisé par une équation, le plus souvent une combinaison linéaire De caractères à améliorer. Dans le contexte à venir

$$\text{OS} = \alpha \underbrace{\text{car. d'efficacité et d'adaptation}}_{a_1 \text{ car}_1 + \dots + a_m \text{ car}_m} + \beta \underbrace{\text{car. d'impact env.}}_{b_1 \text{ car}_1 + \dots + b_n \text{ car}_n} + \gamma \underbrace{\text{car. impact}}_{b_1 \text{ car}_1 + \dots + b_p \text{ car}_p} \text{ sociétal}$$

Choix des pondérations

- différentes approches (économique, bioéconomique, gains désirés ...)
- Classiquement sur la base de modèle à l'échelle de l'animal, de plus en plus à l'échelle des systèmes (en incluant des approches de type ACV, ...)
- Pondération des caractères non marchands

**Domaine
de recherche
Très actif**

Nombreux caractères dont faudra connaître les composantes de la variabilité / le déterminisme génétique dans des environnements / des systèmes de production variés

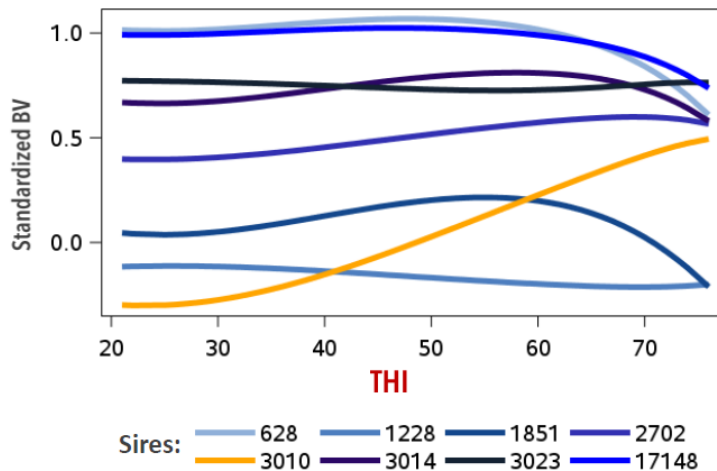
Evolution des objectifs de sélection pour répondre aux défis du CC et de la transition agroécologique

Utilisation d'une même race /population vs races /populations adaptées

- Va dépendre de l'ampleur des différences entre milieux => si elles sont suffisamment grandes
 - l'expression d'un caractère va être différente (interaction génotype x milieu I-GxE)
- On peut chercher à améliorer une **population** pour qu'elle soit **efficace dans différents systèmes**
 - Uniquement si les I-GxE sont faibles à modérées
 - Non optimal dans chacun des systèmes, mais amélioration possible en ayant des index spécifique à un ou plusieurs systèmes
- On peut créer/sélectionner **des populations spécifiques** (et adaptées) à un système
 - Les besoins en reproducteurs sont-ils suffisants pour que le coût du schéma de sélection puisse être amorti et l'efficacité de la sélection suffisante

Génétique et adaptation

Evolution des valeurs génétiques pour la production laitière de pères de race Montbéliarde en fonction d'un index Température – humidité (THI)



Le groupe des 4 meilleurs pères reste inchangé
Quelques reclassements et des évolutions différents

L'existence de données (climatiques + performances) et le développement d'outils de modélisation / prédiction pertinents permettent de connaître la sensibilité des pères au THI

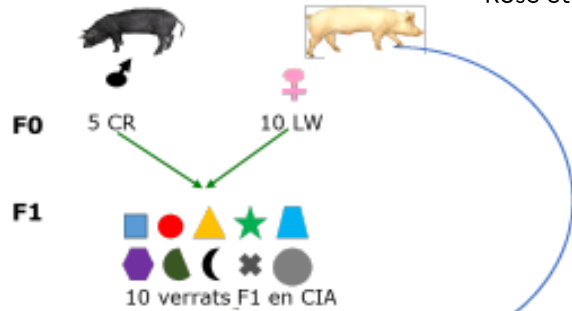
Peut être utilisé pour le choix des reproducteurs les plus adaptés à chaque condition de milieu

A. Vinet, EAAP 2021

Génétique et adaptation

Comparaison de descendance de porcs croisés en milieu tempéré / tropical

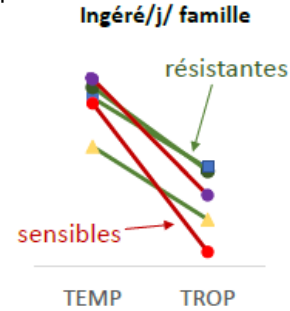
Rose et al, 2017; doi: 10.2527/jas2017.1611



Descendants « backcross » LW x (CR x LW)

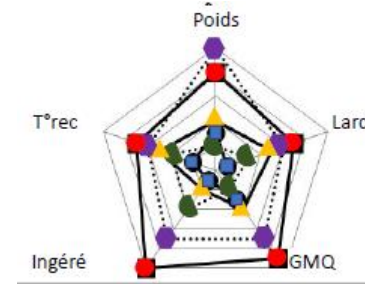
664 porcs
en milieu tempéré
INRAE GENESI

664 porcs
en milieu tropical
INRAE PTEA



Les descendance
de certains pères
Sont plus sensibles
Au milieu que d'autres

Ecart entre milieux par famille
et caractère



Les descendance
plus sensibles le
sont souvent pour
plusieurs caractères

Ces résultats démontrent l'existence d'interactions génotype x milieu, avec reclassement des pères
 ⇒ Les pères les plus performants en milieu tempéré ne le sont plus en milieu tropical
 ⇒ Certaines familles sont moins sensibles à la modification d'environnement

Génétique et adaptation

Résistance au parasitisme gastro-intestinal

Climat plus chaud et humide => prolifération des parasites au pâturage

Principal moyen de lutte actuel : les traitements chimiques

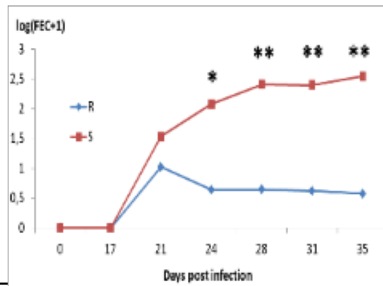
Problèmes associés :

- Multirésistance à tous les traitements dans certains élevages
- Ecotoxicité des traitements chimiques pour la biodiversité des sol

Autres solution : **sélectionner des animaux faiblement porteurs et excréteurs de parasites**

Protocole d'infestation expérimentale en unité expérimentale INRAE (P3R Bourges)

La sélection polygénétique est efficace : 10 x plus d'œufs excrétés chez les sensibles



- Infestation expérimentale des meilleurs Béliers Manech tête rousse (MTR)
- $h^2=0,3$ => sélection possible
- Transfert aux sélectionneurs avec déclaration d'invention

Conclusion

Le changement climatique = défi majeur pour l'agriculture, l'élevage ... et la planète

- Des évolutions fortes et rapides sont nécessaires; il faut plus que jamais anticiper: la sélection et les changements de systèmes de production se sont sur un temps long
- La diversité génétique est une ressource dont il faut valoriser tout le spectre et tout le potentiel (et qu'il faut préserver pour l'avenir)
- Les outils scientifiques à notre disposition sont de plus en plus performants et commencent à permettre des avancées inenvisageables il y a quelques années :
 - Notamment en matière de phénotypage à haut débit et de mesures précises des conditions d'ambiance, qui vont permettre à terme de modéliser les réponses à l'échelle de l'animal, de l'élevage ou du système
 - Des méthodes de prédiction de plus en plus sophistiqué, permettant d'intégrer différentes sources de variation dans la prédiction des performances
- De façon à caractériser et utiliser le potentiel d'atténuation et d'adaptation, et plus globalement, la multiperformance des ressources animales disponibles dans des environnements changeants et variés