



**HAL**  
open science

# Intégration de la variabilité des porcs en croissance dans la modélisation des besoins nutritionnels et recherche de stratégies alimentaires permettant de maîtriser l'hétérogénéité des porcs en élevage

Bertrand Vautier

► **To cite this version:**

Bertrand Vautier. Intégration de la variabilité des porcs en croissance dans la modélisation des besoins nutritionnels et recherche de stratégies alimentaires permettant de maîtriser l'hétérogénéité des porcs en élevage. Sciences du Vivant [q-bio]. AGROCAMPUS OUEST, 2013. Français. NNT: . tel-02806757

**HAL Id: tel-02806757**

**<https://hal.inrae.fr/tel-02806757>**

Submitted on 6 Jun 2020

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

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



N° ordre : 2013-6

N° série : B-237

## **THESE / AGROCAMPUS OUEST**

Sous le label de l'Université Européenne de Bretagne  
pour obtenir le diplôme de :

**DOCTEUR DE L'INSTITUT SUPERIEUR DES SCIENCES AGRONOMIQUES,  
AGRO-ALIMENTAIRES, HORTICOLES ET DU PAYSAGE**

Spécialité : Biologie et Agronomie

**Ecole Doctorale : Vie – Agro – Santé**

Présentée par :

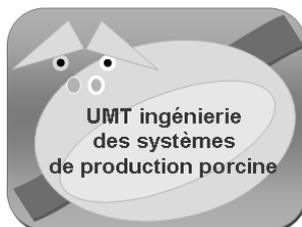
**Bertrand VAUTIER**

**INTEGRATION DE LA VARIABILITE DES PORCS EN CROISSANCE  
DANS LA MODELISATION DES BESOINS NUTRITIONNELS  
ET RECHERCHE DE STRATEGIES ALIMENTAIRES PERMETTANT  
DE MAITRISER L'HETEROGENEITE DES PORCS EN ELEVAGE**

Soutenu le 20 mars 2013 devant la commission d'Examen

Composition du jury :

Causeur David, Professeur Agrocampus Ouest	Président
Lamothe Laurence, DR2 INRA Toulouse	Rapporteur
Verrier Etienne, Professeur AgroParisTech	Rapporteur
Agabriel Jacques, IR INRA Clermont-Ferrand Theix	Examineur
Brossard Ludovic, IE INRA Saint-Gilles	Co-directeur de thèse
Quiniou Nathalie, Ingénieur IFIP Le Rheu	Directrice de thèse



UMT Porcin



Pôle Techniques d'Elevage



UMR1348 Pegase



« Le mot de la soirée ? Pour toi Bertrand, ce sera mystère. Car plus tu apprendras, plus tu te rendras compte qu'il te reste des choses à découvrir. »

Jean-Pierre Thomas

« Avant de te fixer des limites, demande-toi quels rêves tu veux poursuivre. »

Candido Pomar

« Le problème avec les bouilloires c'est que, quand elles s'arrêtent, l'eau bout. »

Florence Garcia-Launay – master of the obvious



## REMERCIEMENTS

Afin de ne pas créer un ordre dans les remerciements qui serait susceptible de froisser quelques amours-propres, la liste présentée ici est le résultat d'une permutation obtenue aléatoirement par la fonction sample du logiciel R.

Mes sincères remerciements s'adressent :

A Julie, ma compagne que je n'ai pas eu le temps d'appeler ma femme, sans qui ce travail n'aurait jamais été possible. Merci pour le morceau de vie que nous avons passé ensemble et pour le reste à venir, pour sa présence à mes côtés, sa patience, pour ce qu'elle m'a donné et me donnera, merci pour sa protection, ses encouragements et son courage face aux difficultés.

Au clan Bineau pour m'avoir accueilli et avoir partagé tant de bonheur ensemble, merci particulièrement à Maxime que je considère doté d'une grande intelligence émotionnelle.

Aux membres du Comité de thèse : David Causeur (Agrocampus Ouest), Candido Pomar (Agriculture et Agroalimentaire Canada), Gilles Langeoire (Provimi France), Mathieu Monziols (IFIP), Yvon Salaün (IFIP), Jaap van Milgen (INRA).

Aux amis tels que Charline, Gwenaëlle, Maud, Melen, Romain, Sylvain, Xavier, Charline et Mathieu, Daisy et Nico, Fabien et Pauline, Hans et Gwen, Jeff et Tiphaine, Yann et Flavie, Yuna et Nico pour les bons moments passés ensemble.

A l'ANRT pour le financement CIFRE de la thèse.

A Philippe Lecouvey (directeur de l'IFIP) et Yvon Salaün (directeur du Pôle techniques d'Elevage de l'IFIP) pour leur accueil et la mise à disposition des moyens de recherche.

A Argantaël, Brendan, David et Pol-Julien (ordre alphabétique) pour m'avoir offert le cadre nécessaire à ma propre définition (les joies de l'adolescence) et pour le bonheur partagé.

A Thierry, Marie et Arthur pour la joie qu'ils ont su me transmettre.

A Nathalie Quiniou (IFIP) et Ludovic Brossard (INRA), co-directeurs de la thèse.



Aux hommes et femmes de Mandello del Lario pour la confection de biventricules qui chaque jour insufflent la vie à leurs possesseurs.

A David et Yvon, dont les paroles pouvaient être celles d'un père.

Au Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche pour le financement du projet de recherche.

Aux directeurs successifs de l'UMR de St-Gilles pour leur accueil : Jean Noblet (directeur de SENAH jusqu'au 31/12/11) et Jaap van Milgen (directeur de PEGASE depuis le 01/01/12).

A David Causeur et Sébastien Lê pour les judicieux conseils fournis quant à l'orientation de ce travail. Ainsi qu'à Candido Pomar de m'avoir convaincu d'améliorer la génération de variables contre la montagne de mauvaise foi dont je suis capable.

A Laurence Lamothe (INRA Toulouse) et Etienne Verrier (AgroParisTech), pour avoir accepté d'être rapporteurs de la thèse.

A toute ma famille et notamment à mes parents qui m'ont permis de devenir ce que je suis. Merci de m'avoir forgé un corps « accidentproof » et de m'avoir soutenu dans tous mes choix afin que je me réalise. Merci aussi à Martin, pour avoir ouvert la porte de mes projets futurs.

A Jacques Agabriel (INRA Clermont-Ferrand Theix), Hervé Cardot (Université de Bourgogne) et David Causeur (Agrocampus Ouest) pour avoir accepté d'être examinateurs de la thèse.

A Pascal Lorent (IFIP) et Henri Flageul (INRA) pour la mise à disposition des outils informatiques et connexions réseaux ayant permis un travail de thèse en alternance sur les sites de Le Rheu et St-Gilles.

A Breva pour la ronronthérapie.

Au personnel de la station expérimentale de Romillé (IFIP) pour les soins apportés aux animaux expérimentaux, pour m'avoir accueilli parmi eux et fait profiter de pauses aussi sérieuses que le recueil des données.

Et à tous les autres auxquels vont mes pensées mais qui ne figurent pas sur cette liste, laquelle ne peut être exhaustive sans menacer la forêt amazonienne.

*Avertissement au lecteur : Toutes les pages de ce manuscrit sont numérotées, recto et verso même quand ce dernier est vierge.*

# SOMMAIRE

<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>VII</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>XI</b>
<b>LISTE DES ANNEXES</b>	<b>XV</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b>	<b>XVII</b>
<b>LISTE DES PUBLICATIONS</b>	<b>XIX</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>5</b>
<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>1.1 La croissance du porc</b>	<b>7</b>
1.1.1 Aspects généraux de la croissance chez le porc	7
1.1.1.1 Composition corporelle du porc en fin de croissance	7
1.1.1.2 Evolution des caractéristiques corporelles au cours de la croissance	9
1.1.1.3 Dépôts journaliers de constituants chimiques et gain de poids	11
1.1.2 Besoins nutritionnels du porc en croissance	13
1.1.2.1 Mode d'expression des apports en énergie et acides aminés	15
1.1.2.2 Estimation des besoins par l'approche factorielle	17
1.1.3 Facteurs de variation de la croissance	23
1.1.3.1 Facteurs intrinsèques	23
Effet du stade de croissance	23
Effet du type génétique	25
Effet du type sexuel	27
1.1.3.2 Facteurs extrinsèques	29
Caractéristiques de l'aliment	29
Niveau d'alimentation ou rationnement	31
Conditions d'élevage	31
<b>1.2 La modélisation du porc en croissance</b>	<b>35</b>
1.2.1 Les types de modèles	35
1.2.1.1 Modèle empirique vs mécaniste	35
1.2.1.2 Modèle statique vs dynamique	37
1.2.1.3 Modèle déterministe vs stochastique	37
1.2.2 Modélisation empirique de l'évolution du poids avec l'âge	39

1.2.3	Modélisation empirique de l'ingéré	43
1.2.4	Les modèles mécanistes de la croissance du porc	45
1.2.4.1	Le premier modèle nutritionnel de croissance du porc	45
1.2.4.2	Les modèles actuels de croissance du porc	49
	Dépôt protéique maximal	51
	Modélisation de l'ingéré et dépôt de lipides	53
1.2.4.3	Des nutriments aux tissus	55
1.2.5	L'intégration de la variabilité en modélisation	57
1.2.5.1	Influence de la variabilité individuelle sur les réponses des modèles de croissance	59
1.2.5.2	Méthodes d'intégration de la variabilité dans les modèles	63
<b>1.3</b>	<b>La variabilité chez le porc en croissance</b>	<b>69</b>
1.3.1	Description de l'hétérogénéité d'une population	71
1.3.2	Conséquences de l'hétérogénéité des animaux pour la filière porcine	71
1.3.2.1	Conséquences sur la conduite de l'alimentation	71
1.3.2.2	Conséquences sur la gestion des salles d'engraissement	73
1.3.2.3	Conséquences pour l'abatteur	73
1.3.3	Facteurs mis en cause	73
1.3.3.1	Influence du poids à la naissance	75
1.3.3.2	Influence de l'utilisation des nutriments	75
1.3.3.3	Influence de la position hiérarchique dans le groupe	75
1.3.4	Champs d'action possibles	77
1.3.4.1	Répartition des animaux dans les cases	77
1.3.4.2	Augmentation de l'encombrement gastrique de l'aliment	77
1.3.4.3	Modification du mode d'alimentation	77
1.3.5	Conséquences de la variabilité interindividuelle sur les besoins	79
1.3.6	Les enjeux d'une nutrition adaptée aux besoins	81
1.3.6.1	Enjeu écologique	81
1.3.6.2	Enjeu économique	83
	<b>Conclusion</b>	<b>85</b>
	 <b>2 ETAPE 1 - ETUDE DE LA VARIABILITE DES POPULATIONS DE PORCS</b>	 <b>87</b>
	<b>Introduction</b>	<b>89</b>
<b>2.1</b>	<b>Acquisition des données zootechniques</b>	<b>91</b>
2.1.1	Dispositif expérimental	91
2.1.2	Choix des animaux à l'entrée en engraissement	91

2.1.3	Conduite des animaux	93
2.1.4	Conditions de logement et d'alimentation pendant le post-sevrage	95
2.1.5	Conditions de logement et d'alimentation pendant l'engraissement	95
2.1.5.1	Logement	95
2.1.5.2	Alimentation	95
2.1.5.3	Soins aux animaux	97
2.1.6	Abattage	97
2.1.7	Mesures	99
2.1.8	Calculs et analyses statistiques	99
2.1.8.1	Données de consommation d'aliment individuelle	101
	Corrections réalisées en cas d'écart de bilan relatif hebdomadaire important	101
	Corrections réalisées en cas de semaine(s) sans enregistrement par le DAC	103
	Corrections réalisées en cas de non attribution d'aliment ingéré	103
2.1.8.2	Poids initial à l'entrée en engraissement	105
	Calcul d'un poids vif initial commun à toutes les bandes	105
	Distributions du poids vif initial commun	105
2.1.8.3	Performances de croissance moyennes en engraissement	107
2.1.8.4	Caractérisation des profils de croissance et de consommation individuels	107
	Fourniture des données pour le calibrage de InraPorc	107
	Estimation des valeurs individuelles des variables par calibration	109
	Vecteur individuel des variables descriptives d'un profil animal	111
<b>2.2</b>	<b>Méthodes mises en œuvre pour étudier la variabilité</b>	<b>113</b>
2.2.1	Détermination du niveau de regroupement	115
2.2.1.1	Utilisation de la classification ascendante hiérarchique	115
2.2.1.2	Utilisation du modèle de Flury	115
2.2.2	Analyse des structures de variance-covariance	117
2.2.2.1	Importance du centrage et de la réduction des données intra groupe	117
2.2.2.2	Observation préliminaire des corrélations entre variables par analyse en composantes principales	117
2.2.2.3	Observation des corrélations entre variables par analyse factorielle multiple duale	117
2.2.2.4	Elaboration de la matrice de variance-covariance moyenne	117
2.2.2.5	Evaluation de la matrice de variance-covariance moyenne	123
2.2.3	Analyse du vecteur moyen des variables	123
2.2.4	Générateur de bandes	123
2.2.4.1	Génération classique de population virtuelle	125
2.2.4.2	Génération évoluée de population virtuelle	125
2.2.4.3	Vérification des populations générées	131

<b>2.3 Résultats</b>	<b>133</b>
2.3.1 Construction des bases de données	133
2.3.2 Choix de l'équation $CMJ = f(PV)$	139
2.3.2.1 Choix de l'équation	139
2.3.3 Choix des porcs en fin de post-sevrage	141
2.3.3.1 Mise en lot classique à l'entrée en engraissement	141
2.3.3.2 Mise en lot prenant en compte le $CV_{PV}$ en fin de post-sevrage	143
2.3.4 Performances de croissance moyennes	147
2.3.4.1 Performances des porcs issus de verrat LWxPP	147
Performances de croissance	147
Caractéristiques de carcasse	149
2.3.4.2 Effet du verrat intra-bande	149
Performances de croissance et caractéristiques de carcasse	149
2.3.5 Définition d'un groupe de porcs	153
2.3.5.1 Par classification ascendante hiérarchique	153
2.3.5.2 Par le modèle hiérarchique de Flury	153
Cas des matrices de variance-covariance issues de mâles castrés	155
Cas des matrices de variance-covariance issues de femelles	155
2.3.6 Corrélation entre variables au sein de la population étudiée	157
2.3.6.1 Analyse en composantes principales	157
2.3.6.2 Analyse factorielle multiple duale	159
Corrélations entre variables descriptives du profil	159
Corrélations avec les performances zootechniques	159
Stabilité des corrélations	159
2.3.7 Vecteur moyen des performances	161
2.3.8 Prise en compte de la variabilité	161
2.3.8.1 Matrice de covariance retenue pour résumer la variabilité	161
2.3.8.2 Matrice de covariance moyenne	163
2.3.8.3 Comparaison avec la matrice de variance-covariance initiale	163
Comparaison avec la matrice issue de la base de données de calibrage	163
Comparaison avec la matrice issue de la base de données d'évaluation	163
Comparaison avec la matrice issue des deux bases de données	163
2.3.9 Génération de bandes de porcs virtuelles	165
2.3.9.1 Taille des populations à générer	165
2.3.9.2 Choix du générateur de bande	165
2.3.9.3 Fonctionnement du générateur de bande	167
2.3.9.4 Evaluation (à partir de la base de données d'évaluation)	169

<b>Discussion</b>	<b>169</b>
<b>Conclusion</b>	<b>183</b>

### **3 ETAPE 2 - SIMULATION DE L'EFFET DE STRATEGIES ALIMENTAIRES APPLIQUEES A UNE POPULATION VIRTUELLE 185**

<b>Introduction</b>	<b>187</b>
<b>3.1 Matériel et méthodes</b>	<b>187</b>
3.1.1 Séquences alimentaires	187
3.1.1.1 Niveaux nutritionnels	187
3.1.1.2 Formulation des aliments	187
3.1.2 Plans d'alimentation	189
3.1.3 Simulations	189
3.1.3.1 Performances de croissance moyennes	191
3.1.3.2 Performances économiques	191
<b>3.2 Résultats et discussion</b>	<b>191</b>
3.2.1 Conduite alimentaire et variabilité du poids	191
3.2.2 Performances moyennes	193
3.2.3 Différences de marge	195
3.2.4 Bilan azoté	195
<b>Conclusion</b>	<b>199</b>

### **4 ETAPE 3 - EVALUATION *IN VIVO* DES RESULTATS *IN SILICO*201**

<b>Introduction</b>	<b>203</b>
<b>4.1 Matériel et méthodes</b>	<b>203</b>
4.1.1 Dispositif expérimental	203
4.1.2 Conduite des animaux	205
4.1.2.1 Conduite alimentaire	205
4.1.2.2 Logement	205
4.1.2.3 Modalités de départ pour l'abattoir	205
4.1.3 Mesures	207
4.1.3.1 Mesures réalisées sur tous les animaux	207
4.1.3.2 Mesures réalisées uniquement sur les porcs en loges individuelles (essai 2)	207
4.1.4 Calculs et traitement statistique des données	209
<b>4.2 Résultats</b>	<b>209</b>
4.2.1 Hétérogénéité de la consommation d'aliment et du poids	211

4.2.2 Performances zootechniques moyennes	211
4.2.3 Caractéristiques de carcasse	215
<b>Discussion</b>	<b>215</b>
<b>Conclusion</b>	<b>223</b>
<b>DISCUSSION GENERALE</b>	<b>225</b>
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE LA THESE</b>	<b>247</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>255</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>275</b>
<b>RESUME</b>	<b>289</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>290</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Composition tissulaire de porcs (% du poids vif vide) selon la race, le type sexuel et le poids d'abattage (d'après Noblet <i>et al.</i> , 1994a).....	8
Tableau 2 - Composition chimique des compartiments tissulaires (% de tissus frais dans le poids vif vide (PVV)) chez un mâle castré Large White à 90 kg de PVV (Karege, 1991) .....	8
Tableau 3 - Composition chimique d'un mâle castré Large White selon son poids vif vide (% du poids vif vide (PVV), d'après Karege, 1991).....	8
Tableau 4 - Profil en acides aminés du besoin d'entretien selon la fonction considérée .....	20
Tableau 5 - Profil en acides aminés (AA) des protéines corporelles et de la protéine idéale (d'après InraPorc®, 2006) .....	20
Tableau 6 - Composition du gain de poids vif vide (PVV) entre 20 et 95 kg et coefficients d'allométrie correspondant pour les différents constituants chimiques chez des mâles entiers Piétrain (Noblet <i>et al.</i> , 1994a) .....	24
Tableau 7 - Performances et composition de la croissance de porcs selon le type génétique (LS : lignée synthétique, PP : Piétrain, LW : Large White) et le type sexuel (M : mâle entier, F : femelle, MC : mâle castré) (Noblet <i>et al.</i> , 1994a).....	24
Tableau 8 - Effet du rationnement sur les performances de croissance de mâles castrés LWxLD entre 45 et 90 kg (Campbell et Taverner, 1988).....	30
Tableau 9 - Exemples d'équations utilisées pour décrire la relation entre poids vif (PV) et âge (t) .....	38
Tableau 10 - Exemples d'équations ajustées à des données expérimentales pour prédire l'ingéré volontaire (kg/j ou MJ/j) (d'après Black, 2009).....	42
Tableau 11 - Grille de paiement des carcasses sur la base du poids et du taux de muscle des pièces appliquée depuis le 4 juin 2007 (Uniporc Ouest).....	72
Tableau 12 - Evolution des performances de croissance et de carcasse selon le poids de naissance.....	74
Tableau 13 - Effet de la teneur en matières azotées totales sur les performances entre 30 et 102 kg de PV et sur les rejets d'azote (Dourmad <i>et al.</i> , 1993) .....	82
Tableau 14 - Périodes d'engraissement et types de verrats <sup>1</sup> utilisés en essai.....	90
Tableau 15 - Descriptif des verrats terminaux utilisés (Agence de la Sélection Porcine, 2012) .....	90
Tableau 16 - Calendrier d'étude des différentes bandes de porcs .....	92
Tableau 17 - Composition et valeurs nutritionnelles (exprimées sur la base de l'aliment frais) des aliments croissance et finition .....	94
Tableau 18 - Proportion de porcs exclus de la base de données selon la bande, le type de verrat ou le sexe ..	132
Tableau 19 - Devenir des porcs mis en essai (partie 1/2) .....	134
Tableau 20 - Devenir des porcs mis en essai (partie 2/2) .....	135
Tableau 21 - Nombre d'enregistrements de CMJ (jours x porcs) réalisés et conservés dans la base de données après procédure de vérification des données et corrections des enregistrements DAC (partie 1/2).....	136
Tableau 22 - Nombre d'enregistrements de CMJ (jours x porcs) réalisés et conservés dans la base de données après procédure de vérification des données et corrections des enregistrements DAC (partie 2/2).....	137

Tableau 23 - Valeur moyenne de l'erreur d'ajustement (RMSEP, MJ EN cumulés/porc) selon l'équation utilisée et le type sexuel .....	138
Tableau 24 - Evaluation de la normalité des distributions de poids vif (PV) corrigé à 65 jours d'âge pour l'effectif complet de porcs à la sortie de post-sevrage et pour ceux entrés en engraissement selon la bande, le croisement et le type sexuel .....	140
Tableau 25 - Comparaison du coefficient de variation du poids ( $CV_{PV}$ ) en fin de post-sevrage des porcs de l'ensemble de la population et des animaux entrés en engraissement selon la bande, le croisement et le sexe (en Annexe 3 : selon la bande et le croisement) .....	142
Tableau 26 - Tests réalisés <sup>1</sup> entre les groupes mis en lot et leur population d'origine (bandes 7 et 8) .....	144
Tableau 27 - Performances de croissance et de carcasse moyennes des porcs <sup>1</sup> issus de verrat LWxPP sur l'ensemble de la période d'engraissement selon la bande .....	148
Tableau 28 - Performances de croissance moyennes des porcs issus de différents types de verrat sur l'ensemble de la période d'engraissement selon la bande.....	150
Tableau 29 - Caractéristiques <sup>1</sup> moyennes des carcasses selon des porcs issus de différents types de verrat selon la bande.....	151
Tableau 30 - Valeurs moyennes ( $\mu$ ) et écarts-types ( $\sigma$ ) des variables des ensembles A, B et C indiqués dans la Figure 35.....	152
Tableau 31 - Comparaisons de matrices de variance-covariance calculées selon différents niveaux de regroupement à l'aide du test de Fleury <sup>1</sup> .....	154
Tableau 32 - Coefficients de corrélation de Pearson ( $r$ ) entre les variables brutes <sup>1</sup> descriptives d'un profil de porc .....	156
Tableau 33 - Corrélations entre variables telles que montrées par l'analyse factorielle multiple duale, calculées sur les variables standardisés centrés réduites et des performances zootechniques par groupe <sup>1</sup> .....	158
Tableau 34 - Moyennes ( $\mu$ ) et écarts-types ( $\sigma$ ) des variables <sup>1</sup> décrivant les cinétiques de croissance et d'ingestion par groupe et effets <sup>2</sup> des caractéristiques du groupe .....	162
Tableau 35 - Matrice de variance-covariance <sup>1</sup> moyenne calculée à partir des individus des bandes 1 à 8 .....	164
Tableau 36 - Evaluation de la capacité de deux matrices de variance-covariance candidates à représenter la structure de variance-covariance de la population.....	164
Tableau 37 - Evaluation des écarts de moyenne (Moy), variance (Var) et distribution (Dis) entre les valeurs des variables obtenues à partir de la population générée virtuellement et celles de la population de référence .....	168
Tableau 38 - Valeurs du profil moyen des femelles et des mâles castrés de la population virtuelle de référence et performances moyennes associées .....	186
Tableau 39 - Prix moyens sur 12 mois des matières premières utilisées dans la formulation des aliments (€/tonne, correspondant à cinq campagnes, IFIP, 2005-2010) <sup>1</sup> .....	188
Tableau 40 - Teneur en protéines (Nx6,25, %) des aliments de base non Corpen, correspondant à quatre niveaux de lysine digestible par MJ d'énergie nette dans cinq contextes de prix <sup>1</sup> .....	188

Tableau 41 - Performances de croissance et caractéristiques de carcasse moyennes d'une population de 2000 porcs, obtenues par simulations avec différentes stratégies alimentaires pour un poids moyen d'abattage de 115 kg .....	194
Tableau 42 - Ecart de marge <sup>1</sup> par porc selon la stratégie alimentaire appliquée à l'ensemble des porcs, le contexte de prix des matières premières <sup>2</sup> et l'application d'une contrainte de formulation Corpen sur la teneur en matières azotées totales (MAT).....	196
Tableau 43 - Composition et valeur nutritionnelle (sur la base de l'aliment frais) des aliments croissance et finition utilisés dans les deux essais .....	204
Tableau 44 - Evolution du coefficient de variation (CV) de l'ingéré moyen selon le plan d'alimentation .....	210
Tableau 45 - Evolution du coefficient de variation (CV) du poids vif au sein des lots selon le plan d'alimentation .....	210
Tableau 46 - Performances de croissance et d'abattage moyennes des porcs de l'essai 1 selon la conduite alimentaire .....	212
Tableau 47 - Performances de croissance et d'abattage moyennes des porcs de l'essai 2 selon la conduite alimentaire .....	214
Tableau 48 - Comparaison des résultats obtenus <i>in vivo</i> avec ceux d'une simulation réalisée sous InraPorc...	216
Tableau 49 - Performances zootechniques moyennes de porcs élevés en case collective de six animaux ou en loge individuelle (Quiniou <i>et al.</i> , 2013) .....	216



## LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Augmentation du poids en fonction de l'âge chez le porc (d'après Quiniou <i>et al.</i> , 2010).....	6
Figure 2 - Evolution des compartiments tissulaires au cours de la croissance entre 20 et 90 kg de poids vif vide (PVV), Q5 : 5 <sup>ème</sup> quartier, Autre : peau, os, tête, pieds, queue (exemple : mâle castré Large White, d'après Noblet <i>et al.</i> , 1994a).....	10
Figure 3 - Composition chimique corporelle entre 20 et 90 kg de du gain de poids vif vide (PVV). a : en % du PVV total, b : en % de la matière sèche du PVV (exemple : mâle castré Large White, d'après Noblet <i>et al.</i> , 1994a) .....	10
Figure 4 - Evolution de la vitesse de croissance (a : GMQ selon l'âge) et de la consommation moyenne journalière d'aliment (b : CMJ selon le PV) au cours de la croissance chez des mâles castrés Large White (fiches IFIP n °8, <a href="http://www.ifip.asso.fr">www.ifip.asso.fr</a> ).....	12
Figure 5 - Systèmes d'évaluation de l'énergie et niveaux relatifs pour un régime moyen pour porc en croissance entre systèmes énergétiques, exprimés avec l'énergie digestible en base 100 (d'après Noblet <i>et al.</i> , 1994b) .....	14
Figure 6 - Systèmes d'évaluation de l'utilisation des acides aminés (AA) et teneurs correspondantes pour le maïs (en italique) et la graine de soja extrudée (en souligné) (Tables INRA-AFZ, 2004) .....	16
Figure 7 - Evolution du dépôt de protéines (PD) et du dépôt de lipides selon l'apport en énergie métabolisable (d'après Campbell et Taverner (1988) et Quiniou <i>et al.</i> (1996a)) .....	22
Figure 8 - Evolution du besoin en lysine digestible (LYSd) par MJ d'énergie nette selon le poids vif chez deux types de porcs (Noblet et Quiniou, 1999) .....	22
Figure 9 - Courbes d'ingéré quotidien de porcs issus de différentes lignées de verrat (d'après Fàbrega <i>et al.</i> , 2003 ; Green <i>et al.</i> , 2003 ; Schinckel <i>et al.</i> , 2012).....	24
Figure 10 - Evolution de la vitesse de croissance (GMQ) avec l'âge selon le type de porc (fiches IFIP n° 19 et 30, <a href="http://www.ifip.asso.fr">www.ifip.asso.fr</a> ) .....	26
Figure 11 - Vitesse de croissance (GMQ) et rapport entre les lipides déposés (LD) et protéines déposées (PD) dans le gain de poids selon le type génétique (LS : lignée synthétique, PP : Piétrain, LW : Large White, MSh : Meishan, DU : Duroc) et le type sexuel des animaux (M : mâle entier, MC : mâle castré, F : femelle) .....	26
Figure 12 - Evolution de la consommation d'aliment (CMJ) et du gain de poids (GMQ) quotidiens chez les trois types sexuels (M : mâle entier, MC : mâle castré, F : femelle, Quiniou <i>et al.</i> , 2010).....	28
Figure 13 - Effet de la teneur en énergie nette de l'aliment (EN) sur la quantité d'EN ingérée (MJ/j) et l'indice de consommation (IC, exprimé en kg/kg) (Quiniou et Noblet, 2012) .....	28
Figure 14 - Effet de l'apport en énergie sur la relation entre les acides aminés (AA) ingérés et le dépôt de protéines (a, d'après Bikker <i>et al.</i> , 1994) et sur la relation entre dépôt protéique (PD) et lipidique (LD) et l'apport d'énergie quand les apports en AA ne sont pas limitants (b, d'après Quiniou <i>et al.</i> , 1996a).....	30
Figure 15 - Effet du rationnement sur les performances zootechniques d'un porc gras (a) ou maigre (b) (Quiniou et Massiot, 2008).....	32

Figure 16 - Effet du nombre de porcs par case sur la consommation moyenne journalière (CMJ) et le gain moyen quotidien (GMQ) selon la taille de groupe initiale (synthèse bibliographique de Quiniou et Massiot, 2008 ; gamme de poids indiquée entre parenthèses) .....	32
Figure 17 - Relation linéaire plateau entre énergie ingérée et dépôt protéique (PD) chez le porc en croissance, comme proposé par Whittemore et Fawcett (1976). La pente de la partie linéaire dépend d'un rapport minimal entre dépôt lipidique et dépôt protéique. PDmax : limite maximale du dépôt protéique .....	46
Figure 18 - Représentation générale des concepts de répartition des nutriments utilisés dans la plupart des modèles de croissance du porc, d'après de Lange (1995) et van Milgen <i>et al.</i> (2012). Les nutriments ingérés sont répartis entre dépôt de protéines et dépôt de lipides, à partir desquels le poids (via le gain de poids) et les caractéristiques de carcasses sont calculés (→ flux de matière, => flux d'énergie, --> relations) .....	48
Figure 19 - Relation curvilinéaire-plateau entre dépôt protéique (PD, ligne pleine), dépôt lipidique (LD, pointillés) et énergie ingérée chez le porc en croissance (van Milgen <i>et al.</i> , 2008). Les points indiquent les PD et LD réalisés par un animal nourri à volonté. Le positionnement de ces points sur la courbe change durant la croissance .....	52
Figure 20 - Effet de la variabilité des variables du modèle entre les individus (0, 0,5, 1,0, 1,5 et 2,0 fois l'écart-type de la population de référence) et de la quantité de protéine idéale ingérée sur le dépôt protéique (PD) moyen journalier pour des populations de porcs de 50 kg de poids vif (d'après Pomar <i>et al.</i> , 2003b)60	
Figure 21 - Consommation moyenne journalière (CMJ) moyenne, premier et dernier quartiles d'un groupe de 2938 porcs issus d'un même croisement et type sexuel (d'après Lorenzo Bermejo <i>et al.</i> , 2003b) .....	70
Figure 22 - Distribution des poids de carcasses des 20 millions de porcs abattus et contrôlés en 2011 en abattoir commercial par Uniporc Ouest (Uniporc Ouest, 2012).....	70
Figure 23 - Distribution des besoins prédits en lysine digestible chez des porcs en croissance d'après la moyenne et l'écart-type (e.t.) obtenus expérimentalement à 24,5 kg de poids moyen (adapté de Bertolo <i>et al.</i> , 2005) .....	78
Figure 24 - Réponse simulée du gain moyen quotidien (GMQ, kg/j) et du pourcentage d'animaux dont le besoin en lysine digestible est couvert en fonction de l'apport en lysine digestible (% du besoin moyen de la population) chez une population de 192 porcs suivis entre 65 jours d'âge et 110 kg de PV selon une stratégie alimentaire à deux phases ou dix phases (d'après Brossard <i>et al.</i> , 2009).....	78
Figure 25 : Niveaux moyen, minimal et maximal du besoin en acides aminés dans les populations de porcs étudiés par différents auteurs.....	80
Figure 26 - Photo d'un distributeur automatique ACEMO, identique à celui utilisé pendant l'essai.....	96
Figure 27 - Schéma de DAC Acema 64 en fonctionnement .....	96
Figure 28 - Principe du modèle hiérarchique de Flury permettant de hiérarchiser les niveaux de ressemblance entre matrices de variance-covariance. Chaque ellipse représente une matrice projetée dans un plan défini par des composantes principales. ....	114
Figure 29 - Schéma des trois étapes du générateur évolué de population virtuelle .....	126

Figure 30 - Fonctions de répartition de l'erreur RMSEP (MJ EN cumulées/porc) selon l'équation de prédiction de l'ingéré.....	138
Figure 31 - Proportion de porcs légers (pesant moins de 18 kg) et diminution du coefficient de variation du poids ( $CV_{PV}$ ) entre la population initiale de porcs et celle entrée en engraissement selon le poids moyen en fin de post-sevrage dans la population initiale des porcs LWxPP de chaque bande.....	144
Figure 32 - Diminution du coefficient de variation du poids ( $CV_{PV}$ ) entre la population initiale de porcs et celle entrée en engraissement selon le poids vif (PV) moyen et le type de croisement de chaque bande (chaque trait relie les porcs LWxPP en rond noir à l'autre type de verrat étudié dans la bande) .....	144
Figure 33 - Distribution du poids vif corrigé à 65 jours d'âge dans la population d'origine (en haut) et dans le groupe mis en lot (en bas) selon le type de verrat et le sexe dans la bande 7 .....	145
Figure 34 - Distribution du poids vif corrigé à 65 jours d'âge dans la population d'origine (en haut) et dans le groupe mis en lot (en bas) selon le type de verrat et le sexe dans la bande 8 .....	146
Figure 35 - Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des profils selon leurs variables centrées et réduites ( $PV_{70}$ , $PDm'$ , $DUREE'$ , $B_{Gompertz}$ , $QI50$ , $QI100$ ). .....	152
Figure 36 - Analyse en composantes principales de l'ensemble des variables descriptives des profils, (vue des individus selon la bande d'origine ou le sexe avec ellipses de confiance à 80%).....	154
Figure 37 - Analyse en composantes principales de l'ensemble des variables descriptives brutes des profils (vue avant standardisation) .....	156
Figure 38 - Analyse factorielle multiple duale des variables décrivant les profils selon les performances zootechniques (en pointillés : GMQ, CMJ, IC, TMP, G2) ou les variables standardisées de caractérisation d'un profil animal (trait continu : $PV_{70}$ , $PDm'$ , $B_{Gompertz}$ , $QI50$ , $QI100$ , $DUREE'$ ) .....	158
Figure 39 - Boîtes à moustaches montrant la dispersion du coefficient de corrélation de Pearson entre variables parmi les 32 groupes étudiés .....	160
Figure 40 - Ecart relatif (%) obtenus entre les moyennes (à gauche) et les variances (à droite) des populations de mâles castrés LWxPP générées et les valeurs de consigne pour $PV_{70}$ (en haut) et $B_{Gompertz}$ (en bas) selon les effectifs générés. Chaque point représente une population virtuelle.....	166
Figure 41 - Illustration des niveaux relatifs d'indice de consommation (IC) et de vitesse de croissance (GMQ) selon le type de verrat utilisé intra-bande (10 bandes, moyenne des mâles castrés et des femelles) avec en base 100 les performances des porcs croisés LWxPP (entre parenthèses : le numéro de la bande) .....	168
Figure 42 - Comparaison de l'évolution de l'énergie nette (EN) ingérée quotidiennement avec le poids vif lorsqu'elle est calculée avec une équation asymptotique ou une équation gamma de l'entretien pour une même quantité ingérée (QI) à 50 et 100 kg de poids vif .....	172
Figure 43 - Evolution avec le poids du besoin en lysine par MJ d'énergie nette (EN) estimé avec InraPorc à partir du profil moyen des femelles et des mâles castrés décrit dans le Tableau 38, et niveaux utilisés en stratégie multiphase de référence (F100) ou biphasé .....	186
Figure 44 - Consommation <i>ad libitum</i> moyenne selon le sexe et plans de rationnement étudiés (non représenté : 90% ad lib) .....	190

Figure 45 - Coefficient de variation du poids vif ( $CV_{pV}$ ) selon la séquence alimentaire et le plan d'alimentation R1 = max 2,4 kg/j pour les femelles et mâles castrés R2 = max 2,4 kg/j pour les femelles et 2,7 kg/j pour les mâles castrés).....	192
Figure 46 - Rejet N moyen par porc dans cinq contextes de prix selon la séquence alimentaire, le plan d'alimentation (Figure 3) et l'application d'une contrainte de formulation Corpen ou non ( <i>résultats confondus pour les plans d'alimentation avec plateau</i> ).....	192
Figure 47 – Composantes du patron de variance-covariance final et démarche suivie pour générer une population virtuelle .....	232

## LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 - Nombre de consommations moyennes journalières (CMJ) individuelles de la base de données corrigées et types de correction apportée (partie 1/2) .....	257
Annexe 2 - Nombre de consommations moyennes journalières (CMJ) individuelles de la base de données corrigées et types de correction apportée (partie 2/2) .....	258
Annexe 3 - Comparaison du coefficient de variation (CV) du poids vif (PV) en fin de post-sevrage des porcs de l'ensemble de la population en fin de post-sevrage et celle entrée en engraissement selon la bande et le croisement .....	259
Annexe 4 - Illustration des niveaux relatifs d'indice de consommation (IC) et de vitesse de croissance (GMQ) d'une bande à l'autre (10 bandes) chez les porcs issus de verrat LWxPP (moyenne des MC et des F) avec deux échelles différentes pour les axes X et Y. Dans le graphique de droite, les symboles utilisés correspondent aux saisons d'élevage : × printemps, ○ été, △ automne, ■ Hiver .....	260
Annexe 5 - Performances de croissance moyenne des porcs <sup>1</sup> issus de verrat LWxPP selon la bande et le type sexuel .....	261
Annexe 6 - Performances de croissance en périodes de croissance-finition des porcs <sup>1</sup> issus de verrat LWxPP selon la bande .....	262
Annexe 7 - Performances de croissance en périodes de croissance-finition des porcs <sup>1</sup> issus de verrat LWxPP selon la bande et le type sexuel .....	263
Annexe 8 - Caractéristiques de carcasse moyennes des porcs <sup>1</sup> issus de verrat LWxPP selon la bande et le type sexuel .....	264
Annexe 9 - Performances moyennes sur l'ensemble de la période de croissance selon la bande, le croisement et le type sexuel.....	265
Annexe 10 - Performances de croissance en périodes de croissance (Crois.) et finition (Fini°) selon la bande et le croisement .....	266
Annexe 11 - Performances de croissance en périodes de croissance (Crois.) et finition (Fini°) selon la bande, le croisement et le type sexuel .....	267
Annexe 12 - Caractéristiques de carcasse selon la bande, le type de verrat et le type sexuel.....	268
Annexe 13 - Moyennes ( $\mu$ ) et écart-type ( $\sigma$ ) des quantités d'énergie nette ingérées à 50 et 100 kg, calculées à partir de l'équation gamma et effets <sup>2</sup> des caractéristiques du groupe. ....	269
Annexe 14 - Fonctions indépendantes de répartition cumulée empirique ( $P(x<X)$ ) des variables centrées réduites, établies à partir des porcs des bandes 1 à 8 et utilisées dans par le générateur de bande évolué .....	270
Annexe 15 - Effet du plan d'alimentation ( <i>ad libitum</i> : AL vs rationné : RA) et du sexe (femelle : F vs mâle castré : MC) sur les performances de croissance moyennes par case des porcs de l'essai 1 de l'étape 3 .....	271
Annexe 16 - Effet du plan d'alimentation ( <i>ad libitum</i> : AL vs rationné : RA) et du sexe (femelle : F vs mâle castré : MC) sur les performances de croissance moyennes des porcs de l'essai 2 de l'étape 3 .....	272

Annexe 17 - Caractéristiques de carcasse moyenne selon le plan d'alimentation (*ad libitum* : AL vs rationné : RA) et le sexe (femelle : F vs mâle castré : MC) dans les essais 1 et 2 de l'étape 3..... 273

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

$\alpha$	Variable d'échelle utilisée dans l'équation d'allométrie : $\alpha PV^\beta$
a	Variable utilisée dans la relation $CMJ = f(PV)$
AA	Acides aminés
ACP	Analyse en composantes principales
AFMD	Analyse factorielle multiple duale
AL	Nom du lot des porcs alimentés à volonté (étape 3)
$\beta$	Variable d'échelle utilisée dans l'équation d'allométrie : $\alpha PV^\beta$
b	Variable utilisée dans la relation $CMJ = f(PV)$
$B_{Gompertz}$	Variable de précocité dans l'équation de Gompertz
CAH	Classification ascendante hiérarchique
CMJ	Consommation moyenne journalière
CMJR	CMJ résiduelle
CRN	Coefficient de rétention de l'azote
CV	Coefficient de variation
DAC	Distributeur automatique de concentré
DIA	Digestibilité iléale apparente
DIS	Digestibilité iléale standardisée
DU	Duroc
DUREE	Nombre de jours entre le début et la fin de la période d'engraissement
DUREE'	Nombre de jours entre l'âge initial de 70 jours et l'âge à 110 kg de poids vif
EB	Energie brute
ED	Energie digestible
EM	Energie métabolisable
EMm	Besoin en énergie métabolisable pour l'entretien
EMp	Besoin en énergie métabolisable pour la production
EN	Energie nette
ESR	Erreur standard résiduelle
ETM	Ecart-type moyen
F	Femelle
G2	Epaisseur de gras dorsal
GMQ	Gain moyen quotidien
GNA	Générateur de nombres aléatoires
IC	Indice de consommation
$k_f$	Rendement d'utilisation de l'énergie pour le dépôt sous forme de lipides
$k_p$	Rendement d'utilisation de l'énergie pour le dépôt sous forme de protéines

LD	Landrace
LD	Lipides déposés
LS	Lignée synthétique
LW	Large White
LYSm	Besoin en lysine pour l'entretien
M	Mâle entier
M2	Epaisseur de muscle dorsal
MAT	Matières azotées totales
MC	Mâle castré
MS	Matière sèche
MSh	Meishan
PD	Protéines déposées
PDm	Dépôt protéique moyen pendant la phase de croissance
PDm'	Dépôt protéique moyen entre 70 jours d'âge et 110 kg de poids vif
PDmax	Dépôt maximal de protéines
PP	Piétrain
PV	Poids vif
$PV_{PDmax}$	Poids vif à partir duquel les porcs ne sont pas limités par l'ingestion d'énergie pour exprimer leur potentiel de dépôt protéique
$PV_{65j}$	Poids vif à 65 jours d'âge
$PV_{70}$	Poids vif à 70 jours d'âge
PVi	Poids vif initial
PVf	Poids vif final
PVV	Poids vif vide
QI50	Quantité d'EN ingérée à 50 kg de PV
QI100	Quantité d'EN ingérée à 100 kg de PV
RA	Nom du lot des porcs rationnés (étape 3)
RM	Rendement marginal d'utilisation des acides aminés pour le dépôt
RMSEP	Residual mean square error of prediction (erreur quadratique moyenne de prédiction)
TMP	Taux de muscle des pièces

## LISTE DES PUBLICATIONS

### Publication soumise dans une revue internationale

- Bertrand VAUTIER, Nathalie QUINIOU, Jaap VAN MILGEN, Ludovic BROSSARD, 2013. Characterisation of the individual variability within populations of pigs through the relationships among parameters describing feed intake and growth of a deterministic growth model.  
Animal, doi:10.1017/S1751731113000554

### Participation à un congrès international

- Bertrand VAUTIER, Nathalie QUINIOU, Jaap VAN MILGEN, Ludovic BROSSARD, 2011. Modelling the dynamics of feed intake in growing pigs: interest for modelling populations of pigs.  
In: Book of abstracts of the 62<sup>nd</sup> annual meeting of the European federation of animal science. Wageningen (NLD), Wageningen Academic Publisher (EAAP Book of Abstracts n°17, 2011). p. 105.
- Nathalie QUINIOU, Bertrand VAUTIER, Yvon SALAUN, Jaap VAN MILGEN, Ludovic BROSSARD, 2012. Modelling the effect of feeding strategy and feed prices on a population of pigs. In: Book of abstracts of the 63<sup>rd</sup> annual meeting of the European federation of animal science. Wageningen (NLD), Wageningen Academic Publisher (EAAP Book of Abstracts n°18, 2012). p. 211.

### Participation à un congrès en France

- Bertrand VAUTIER, Nathalie QUINIOU, Jaap VAN MILGEN, Ludovic BROSSARD, 2011. Modélisation de la cinétique de consommation en fonction du poids chez le porc en croissance selon le mode d'expression de l'ingéré.  
Journées de la Recherche Porcine, 43, 139-140.
- Bertrand VAUTIER, Ludovic BROSSARD, Jaap VAN MILGEN, Nathalie QUINIOU, 2012. Du porc à la bande : étude des liens entre paramètres individuels pour modéliser la croissance à l'échelle de la population.  
Journées de la Recherche Porcine, 44, 147-152.
- Nathalie QUINIOU, Bertrand VAUTIER, Yvon SALAUN, Jaap van MILGEN et Ludovic BROSSARD, 2013. Modélisation de l'effet de la stratégie alimentaire et du contexte de prix des matières premières sur les performances moyennes, leur variabilité et les rejets azotés à l'échelle d'une population de porcs.  
Journées de la Recherche Porcine, 45, 155-160.

### Autres participations

- Séminaire RMT modélisation « Utilisation de la modélisation pour les Instituts techniques agricoles des filières animales », 22/11/11.  
Présentation orale de 15 minutes devant 33 participants, intitulée «Prise en compte de la variabilité individuelle des besoins au sein du modèle InraPorc».
- Journée « Actions en modélisation dans le département PHASE » - 21/03/11 -  
Présentation orale de 15 minutes devant 34 personnes, intitulée « Modélisation de la cinétique de consommation en fonction du poids chez le porc en croissance selon le mode d'expression de l'ingéré ».



## INTRODUCTION

Le principal objectif de l'alimentation du porc est d'apporter les nutriments nécessaires pour couvrir les besoins de l'animal, eux-mêmes variables selon les objectifs de production. En 2011, l'alimentation a représenté en moyenne 68% du coût de revient en élevage naisseur-engraisseur (IFIP, 2012). Au-delà de ces objectifs zootechniques, des composantes socio-économiques sont prises en compte. En effet, la production porcine est l'une des filières incriminées dans les problèmes environnementaux posés par les rejets azotés. Au cours de ces quinze dernières années, des travaux de la recherche ont démontré qu'il était possible de réduire fortement ces rejets par une diminution de la teneur en protéines totales de l'aliment sans modifier ni les performances de croissance ni les caractéristiques de carcasse (Dourmad *et al.*, 1993 ; Cahn *et al.*, 1997). Il s'agit d'améliorer l'adéquation des apports en acides aminés (AA) essentiels aux besoins du porc. Cette stratégie repose donc sur une bonne connaissance du besoin en AA des porcs. La maîtrise des coûts alimentaires passe également par une bonne connaissance de la réponse des animaux aux apports nutritionnels, et donc de leurs besoins, notamment en AA et en énergie, mais également de la variabilité de ces derniers (Brossard *et al.*, 2012).

Au sein d'un élevage porcin, les porcs en croissance sont le plus souvent issus d'un même croisement. A un moment donné, des lots d'animaux sont présents à des stades de croissance différents. La conduite en bandes consiste à regrouper dans une même salle les animaux qui sont à un stade similaire. Ceci représente de nombreux avantages en termes d'organisation du travail de l'éleveur et de gestion de la santé des animaux. Cependant, même quand ils sont issus d'un type génétique donné et élevés dans des conditions de logement et de statut sanitaire similaires, tous les animaux ne présentent pas le même niveau de performances. Une variabilité est ainsi observée à tous les stades de la vie de l'animal (Quiniou *et al.*, 2012). La variabilité du poids à un âge donné complique la conduite d'élevage, tant au niveau de la gestion des transitions alimentaires que du tri des porcs dans l'élevage avant le départ à l'abattoir.

En 2006, l'INRA a conçu un logiciel de modélisation regroupant des résultats acquis au cours de ces 20 dernières années. Il permet d'estimer les besoins nutritionnels du porc à partir de la connaissance de son profil de croissance et de consommation d'aliment (Brossard *et al.*, 2006) en conditions d'élevage respectueuses des normes d'élevage (Mémento de l'éleveur de porc, 2000). Une fois que le profil est caractérisé, les besoins nutritionnels correspondants peuvent être estimés par modélisation.



Outre la connaissance du niveau moyen des besoins nutritionnels pour un lot de porcs donné, sa variabilité joue un rôle important dans le choix des apports nutritionnels. La pertinence de la stratégie alimentaire peut être évaluée au regard du niveau de performance atteint par le lot avec le coût alimentaire et les rejets azotés associés, ainsi que par sa capacité à réduire l'hétérogénéité entre les individus. Brossard *et al.* (2009) ont montré que l'évolution des besoins établie à partir d'un profil de croissance moyen permet de couvrir les besoins pour seulement la moitié des animaux d'une population. Ce profil moyen n'est donc pas pertinent pour raisonner la conduite alimentaire. Se pose alors la question de la caractérisation de la variabilité au sein des populations et des facteurs qui induisent cette variabilité.

Ce travail de thèse a pour objectifs (i) de produire des données permettant de décrire la variabilité entre individus issus de différents croisements terminaux élevés en France, (ii) d'analyser les données obtenues afin de décrire la structure de la variabilité de ces populations et l'exploiter en modélisation, et enfin (iii) de proposer et tester des stratégies alimentaires adaptées permettant de concilier les objectifs de production et de protection de l'environnement.

Après une étude bibliographique permettant de décrire la croissance chez le porc, ses besoins nutritionnels et leur modélisation, les trois étapes du travail de thèse seront présentées et discutées.



## **1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

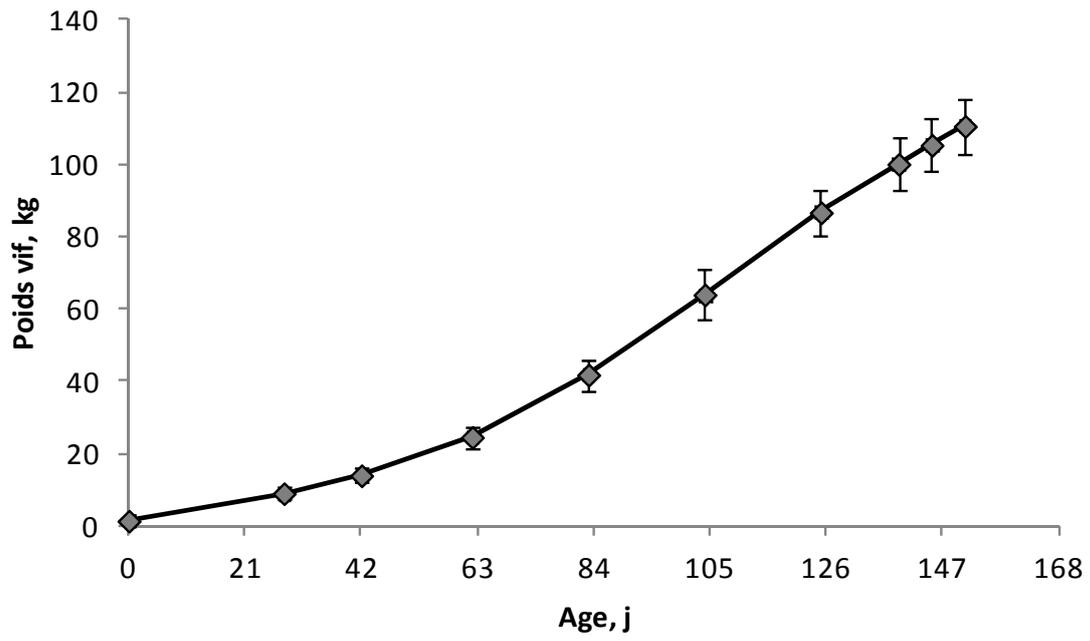


Figure 1 - Augmentation du poids en fonction de l'âge chez le porc (d'après Quiniou *et al.*, 2010)

## INTRODUCTION

Pendant la croissance, la nature et la quantité des constituants chimiques déposés dépendent tout d'abord des caractéristiques intrinsèques de l'animal, ainsi que décrit dans la première partie de ce chapitre. Les dépôts corporels dépendent également des quantités de nutriments ingérées, principalement AA et énergie et de l'équilibre relatif entre ces deux constituants de l'aliment. L'un des objectifs de la modélisation est d'intégrer les connaissances disponibles (deuxième partie). Actuellement, il est encore difficile d'intégrer la variabilité entre les porcs dans cette approche, pourtant son impact sur la conduite d'élevage est majeur (troisième partie).

## 1.1 LA CROISSANCE DU PORC

### 1.1.1 Aspects généraux de la croissance chez le porc

A sa naissance, le porcelet pèse en moyenne 1,4 kg. Il est allaité par la truie pendant trois à quatre semaines, ce qui lui permet d'atteindre un poids vif (PV) d'environ 7,5 à 9,0 kg, respectivement à 21 et 28 jours d'âge. Après le sevrage, les porcs sont élevés dans des cases de post-sevrage jusqu'à un PV d'environ 25 kg. Pendant cette période, les porcs sont le plus souvent alimentés à volonté. Ensuite, dans la plupart des élevages à l'exception de ceux équipés de salles dites en Wean-to-Finish, les animaux sont transférés dans des salles d'engraissement, qui diffèrent des salles de post-sevrage par les systèmes de gestion de l'ambiance et de l'alimentation et par la taille des cases (Mémento de l'Éleveur de Porc, 2000). A ce stade, le porc est alors désigné sous le terme de "porc en croissance" ou de "porc en engraissement", et ce jusqu'à l'abattage qui intervient autour de 115 kg de PV entre 23 et 26 semaines d'âge (IFIP, 2012 ; Figure 1). La plupart des informations rassemblées dans l'étude bibliographique qui suit concernent le porc pendant la phase de croissance.

#### 1.1.1.1 Composition corporelle du porc en fin de croissance

##### ***Notion de poids vif vide***

Le poids vif vide (PVV) correspond au PV sans les contenus digestifs. Il s'agit de la somme des poids du cinquième quartier (sang, abats rouges et blancs et soies) et de la carcasse comprenant le muscle, le gras, la peau et les os (Noblet *et al.*, 1994a). Exprimer la composition corporelle sur la base du PVV plutôt que du PV permet de s'affranchir de l'effet éventuel que le facteur étudié aurait sur le remplissage du tube digestif.

**Tableau 1 - Composition tissulaire de porcs (% du poids vif vide) selon la race, le type sexuel et le poids d'abattage (d'après Noblet *et al.*, 1994a)**

Race	Piétrain		Large White				Meishan			
	Mâle entier		Mâle entier		Femelle		Mâle castré		Mâle castré	
Type sexuel										
Poids vif vide, kg	20	90	20	90	20	90	20	90	20	90
5 <sup>ème</sup> quartier	16,6	10,5	21,8	15,0	20,9	13,2	20,9	13,5	20,4	15,3
Carcasse	83,4	89,5	78,2	85,0	79,1	86,8	79,1	86,5	79,6	84,7
Muscles	50,9	56,6	40,8	46,2	43,5	46,2	42,5	42,5	30,8	25,7
Gras	11	16,5	12	18,9	11,8	22,2	10,8	25,8	18,8	37,6
Peau	3,3	2,9	3,9	4,2	3,8	3,4	4,1	3,1	7,7	7,1
Os	8,5	6,8	3	2,4	9,9	7,8	9,4	6,8	8,8	6,3

**Tableau 2 - Composition chimique des compartiments tissulaires (% de tissus frais dans le poids vif vide (PVV)) chez un mâle castré Large White à 90 kg de PVV (Karege, 1991)**

Compartiment tissulaire	5 <sup>ème</sup> quartier	Carcasse			
		Muscles	Gras	Peau	Os
Eau	63,9	72,6	20,8	46,4	41,8
Matière sèche	36,1	27,4	79,2	53,6	58,2
Protéines	17,1	19,7	5,6	35,9	20,2
Lipides	13,7	6,6	72,9	19,2	15,8
Minéraux	4,2	1,1	0,2	0,7	22,0

**Tableau 3 - Composition chimique d'un mâle castré Large White selon son poids vif vide (% du poids vif vide (PVV), d'après Karege, 1991)**

PVV	Eau	Matière sèche	Protéines	Lipides	Minéraux
20 kg	70,1	29,9	16,5	9,8	3,1
90 kg	53,7	46,3	15,9	27,1	3,1

### **Composition tissulaire et chimique du poids vif vide**

La carcasse représente entre 85 et 90% du PVV (Tableau 1) en fin de croissance. Cette proportion, aussi appelée rendement de carcasse, dépend notamment du type sexuel des porcs, le développement de l'appareil reproducteur entraînant une diminution de 1 point du rendement en moyenne (Noblet *et al.*, 1994a). Cette valeur est plus élevée que celles obtenues en abattoir commercial (79% du PV, Badouard et Berthelot, 2012). Plusieurs raisons expliquent cette différence, notamment le mode d'expression du rendement en proportion du PVV (dans la littérature) ou du PV (en abattoir commercial) et les conditions d'ajournement avant l'abattage. Les opérations de préparation de la carcasse commercialisée, qui conduisent à retirer certains tissus tels que le diaphragme avant la pesée à chaud, en expliquent une autre part. D'après les résultats de Noblet *et al.* (1994a) obtenus chez des mâles castrés Large White (LW), le muscle représente plus de 40% du PVV, le gras sous-cutané et intermusculaire représente moins de 30%, le reste étant constitué des os, de la peau et du cinquième quartier (Tableau 1).

Le muscle est majoritairement composé d'eau (73%) et de protéines (20%), alors que le gras est principalement composé de lipides (73%) (Tableau 2). Compte tenu de la composition tissulaire du PVV et de la composition chimique de ces deux compartiments tissulaires, un mâle castré LW pesant 90 kg est constitué d'environ 50% d'eau, 30% de lipides, 16% de protéines et 3% de minéraux (Tableau 3).

#### *1.1.1.2 Evolution des caractéristiques corporelles au cours de la croissance*

##### **Développement des compartiments tissulaires**

Chaque tissu se développe avec le PVV selon une cinétique spécifique. Ce développement peut être décrit à l'aide d'une équation d'allométrie ( $Y = \alpha PV^\beta$ , Huxley, 1932), où  $\beta$  est le coefficient d'allométrie et  $\alpha$  un coefficient d'échelle (Gu *et al.*, 1992). Un compartiment est dit précoce si son coefficient d'allométrie est inférieur à 1. C'est le cas du cinquième quartier dont la part dans le PVV diminue quand le porc s'alourdit ( $\beta = 0,71$  chez le mâle castré LW ; Noblet *et al.*, 1994a). A l'inverse, un compartiment dont le coefficient d'allométrie est supérieur à 1 est considéré comme tardif. C'est le cas du tissu gras ( $\beta = 1,58$ ) dont la proportion dans le PVV augmente avec le poids (Tableau 3). La proportion du compartiment musculaire dans le PVV reste stable au cours de la croissance, ce qui correspond à un coefficient d'allométrie égal à 1. En d'autres termes, la masse de muscle se développe proportionnellement au PVV ; elle représente par ailleurs la majeure partie du gain de poids (Figure 2).

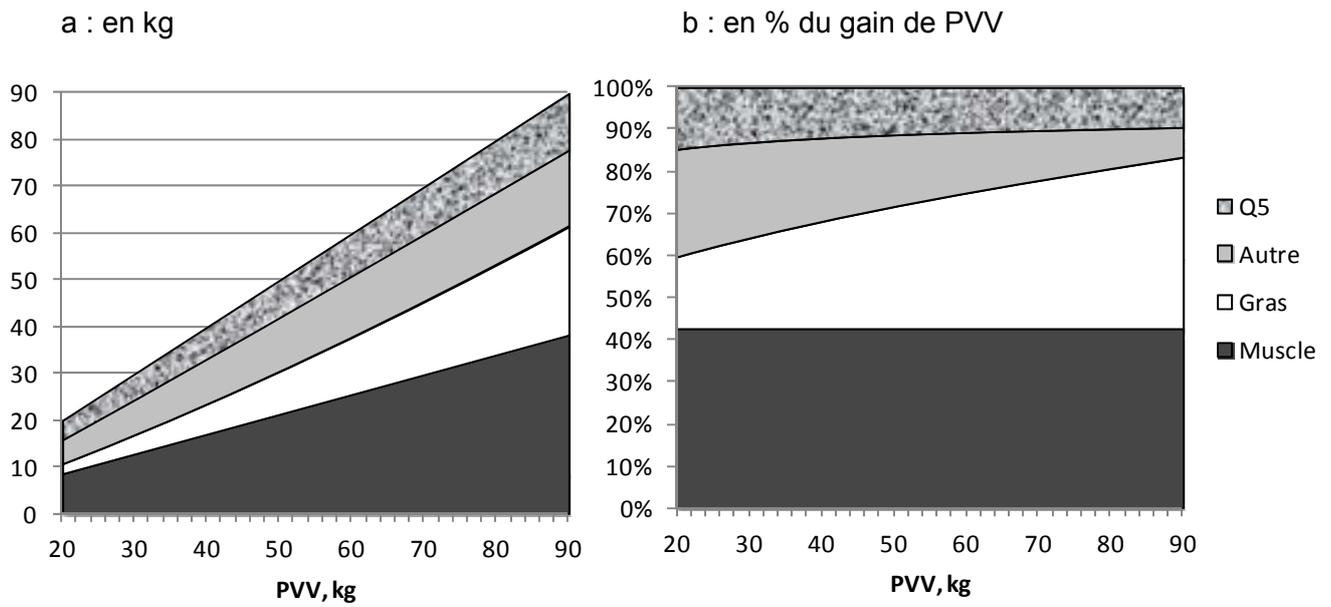


Figure 2 - Evolution des compartiments tissulaires au cours de la croissance entre 20 et 90 kg de poids vif vide (PVV), Q5 : 5<sup>ème</sup> quartier, Autre : peau, os, tête, pieds, queue (exemple : mâle castré Large White, d'après Noblet *et al.*, 1994a)

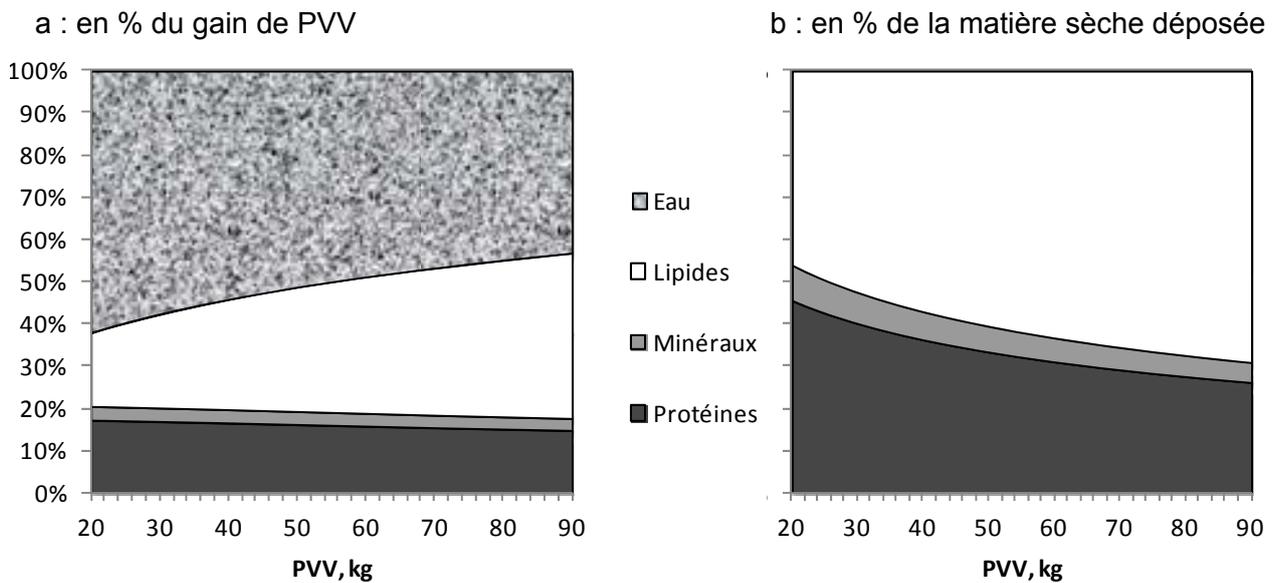


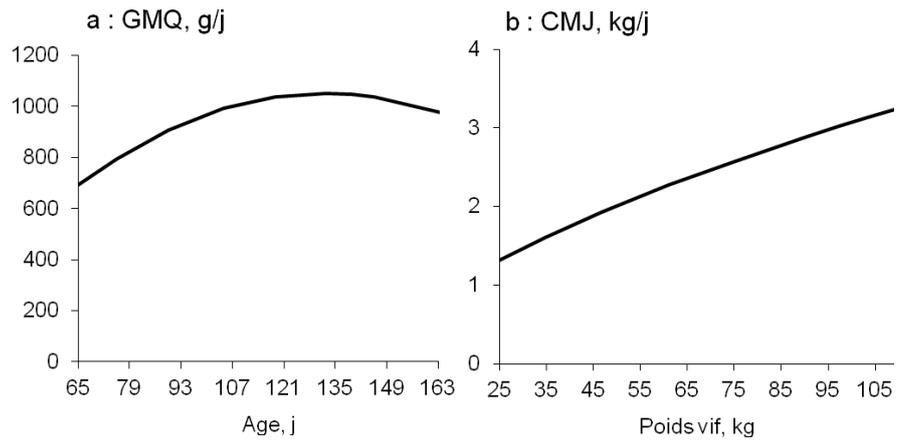
Figure 3 - Composition chimique corporelle entre 20 et 90 kg de du gain de poids vif vide (PVV). a : en % du PVV total, b : en % de la matière sèche du PVV (exemple : mâle castré Large White, d'après Noblet *et al.*, 1994a)

### ***Développement des compartiments chimiques***

Au cours de la croissance, l'évolution de la composition tissulaire du PVV s'accompagne d'une évolution de la composition chimique corporelle du fait de la composition chimique spécifique de chaque tissu. De même que pour les compartiments tissulaires, le développement des compartiments chimiques avec le poids peut être décrit par une relation d'allométrie. Au cours de la croissance, la teneur en lipides du PVV augmente (Figure 3a), ce qui résulte d'un développement tardif de ce compartiment ( $\beta = 1,62$  chez le mâle castré LW ; Noblet *et al.*, 1994a). Au contraire, la proportion de protéines dans le gain de poids est stable (Figure 3a), son coefficient d'allométrie étant proche de 1 ( $\beta = 0,98$ ). Toutefois, quand le poids augmente, la teneur en eau du gain de poids diminue ( $\beta = 0,84$ , Noblet *et al.* 1994a), et il semble que le cumul des compartiments hydriques et lipidiques reste stable autour de 80%. Quand on considère le gain de matière sèche (MS) et non plus le gain de PVV total, la teneur en protéines dans le gain de MS diminue tant l'effet de dilution des lipides est important (Figure 3b). Les résultats obtenus par Noblet *et al.* (1994a) entre 20 et 90 kg sont en accord avec ceux de Whittemore *et al.* (1988) sur une gamme de poids plus étendue (20 - 200 kg). Compte-tenu des différences de cinétiques, ou allométrie, des compartiments lipidiques et protéiques, le rapport lipides / protéines dans le gain de poids augmente avec le PVV : de 0,91 à 1,44 entre 20 et 90 kg PVV selon Karege (1991), de 1,03 à 1,78 entre 25 et 105 kg PVV selon de Greef *et al.* (1992). Or, plus le rapport lipides/protéines dans le gain de poids est élevé, plus la teneur en énergie du gain de poids est importante. En effet, la teneur en énergie brute de 1 g de lipides est en moyenne de 39,8 kJ/g, tandis qu'elle est de 23,5 kJ/g de protéines (Kotarbinska et Kielanowski, 1967).

#### ***1.1.1.3 Dépôts journaliers de constituants chimiques et gain de poids***

La description des compartiments chimiques relativement au PVV ou au gain de PVV permet de s'affranchir des niveaux instantanés de vitesse de croissance pour caractériser la composition du gain de poids. Au contraire, pour décrire l'évolution des quantités déposées quotidiennement, il est nécessaire de disposer de cette information. La vitesse de croissance moyenne, ou gain moyen quotidien (GMQ) dépend du potentiel de croissance du porc. Sur l'ensemble de la période de croissance elle n'est pas constante (Figure 4a), et son évolution avec le poids dépend du type de porc (voir § 1.1.3.1). Le dépôt journalier des constituants chimiques évolue donc à la fois selon leur contribution relative au gain de poids et selon le GMQ. En moyenne, le dépôt de 1 g de protéines s'accompagne du dépôt de 3,5 à 4 g d'eau et de minéraux, dont la teneur en énergie est nulle, tandis que le gain de poids associé au dépôt de 1 g de lipides est proche de 1 g (Quiniou et Noblet, 1995).



**Figure 4 - Evolution de la vitesse de croissance (a : GMQ selon l'âge) et de la consommation moyenne journalière d'aliment (b : CMJ selon le PV) au cours de la croissance chez des mâles castrés Large White (fiches IFIP n °8, [www.IFIP.asso.fr](http://www.IFIP.asso.fr))**

### **1.1.2 Besoins nutritionnels du porc en croissance**

Quand les apports de nutriments couvrent les besoins, les performances de croissance du porc dépendent de son potentiel intrinsèque si aucun autre facteur limitant n'est constaté. Parmi ces derniers citons les conditions de logement (Quiniou et Massiot, 2008) ou le statut sanitaire de l'élevage. Toutefois, dans l'évaluation du potentiel des porcs et des besoins nutritionnels associés, nous ferons l'hypothèse que les conditions d'élevage ne limitent pas les performances de croissance. Le besoin de croissance du porc correspond alors aux apports nutritionnels permettant l'expression de son potentiel de croissance. Parmi les différents constituants de l'aliment, l'énergie et les AA sont les deux composantes considérées de façon prioritaire dans la suite de ce mémoire. L'énergie est la composante la plus onéreuse de l'aliment. Or, le gras est le tissu le plus coûteux à déposer en énergie et le moins bien valorisé économiquement. Ces deux points expliquent l'ampleur des travaux portant sur l'étude des besoins énergétiques du porc. Le muscle est le tissu le mieux valorisé économiquement. Il est riche en protéines, c'est à dire en AA. Si l'apport en AA doit être suffisant pour l'expression du potentiel de dépôt protéique, il ne doit pas être pléthorique. En effet, les quantités d'AA, donc d'azote, ingérées en excès par rapport au besoin ne sont pas retenues par l'animal. Elles sont rejetées et susceptibles d'entraîner des problèmes environnementaux. Ces deux points expliquent l'ampleur des travaux portant sur l'étude des besoins azotés du porc en croissance.

L'ingestion des nutriments dépend de la quantité d'aliment ingérée et des caractéristiques nutritionnelles de l'aliment. L'ingestion d'aliment par un porc est très variable d'une journée à l'autre. Néanmoins, il est possible de décrire son évolution moyenne avec le PV (Figure 4b). Le niveau moyen d'ingestion et la cinétique dépendent du type de porc (voir § 1.1.3.1).

Le porc n'utilise pas l'énergie et les acides aminés apportés par l'aliment avec un rendement de 100%. Il est donc nécessaire d'intégrer les différentes étapes de l'utilisation digestive et métabolique des nutriments afin de pouvoir exprimer les apports dans le système le plus proche de leur utilisation.

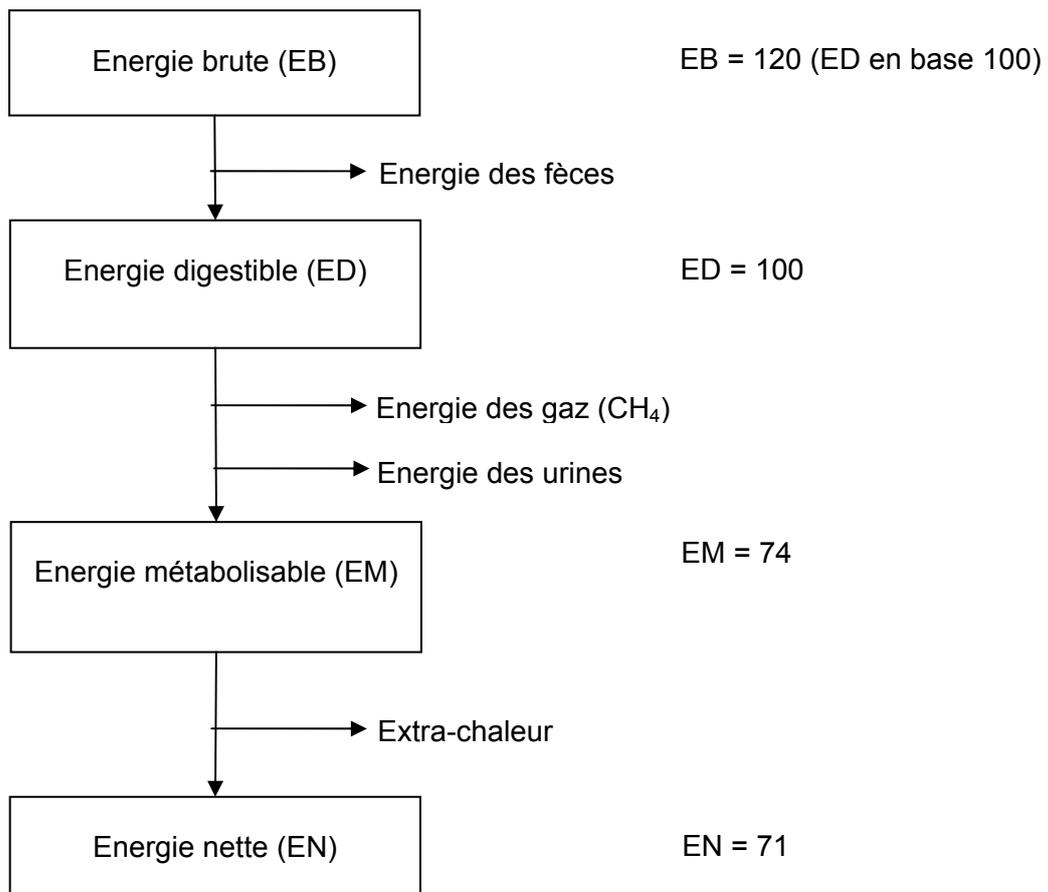


Figure 5 - Systèmes d'évaluation de l'énergie et niveaux relatifs pour un régime moyen pour porc en croissance entre systèmes énergétiques, exprimés avec l'énergie digestible en base 100 (d'après Noblet *et al.*, 1994b)

### 1.1.2.1 Mode d'expression des apports en énergie et acides aminés

#### **Apports énergétiques**

L'utilisation de l'énergie brute apportée par l'aliment dépend de l'efficacité de la digestion et du métabolisme, qui eux-mêmes dépendent en grande partie de la composition chimique de l'aliment et du stade physiologique de l'animal (Noblet et van Milgen, 2004). Les pertes intervenant lors des étapes de digestion et d'utilisation métabolique sont prises en compte différemment selon le système énergétique considéré (Figure 5). Une partie de l'énergie brute (EB) de l'aliment n'est pas digérée par l'animal et est excrétée dans les fèces. La part d'énergie restante constitue l'énergie digestible (ED). Une partie de cette ED n'est pas utilisée par l'animal mais perdue sous forme de gaz (CH<sub>4</sub>) lors des fermentations bactériennes qui interviennent dans le gros intestin. Par ailleurs, de l'énergie est également perdue dans les urines. La différence entre l'ED et les pertes d'énergie sous forme de gaz et dans les urines correspond à l'énergie métabolisable (EM). Une partie de l'EM est perdue sous forme d'extra-chaleur, celle-ci dépend de l'utilisation métabolique des nutriments. L'énergie nette (EN) correspond à la différence entre l'EM et ces pertes de chaleur.

L'amélioration des connaissances des matières premières au cours des 20 dernières années permet désormais d'utiliser l'EN comme système énergétique de référence pour formuler les aliments (Tables INRA-AFZ, 2004). Auparavant, la formulation était réalisée en France sur la base de l'ED. Les pays anglo-saxons utilisent encore largement le système EM (NRC, 2012).

#### **Apports azotés**

Les protéines sont constituées d'une vingtaine d'AA. Chez le porc, une dizaine d'AA sont considérés comme essentiels (ou indispensables) car l'animal ne dispose pas de l'équipement enzymatique permettant leur synthèse. Ces AA essentiels doivent donc impérativement être apportés par l'alimentation. Il s'agit de la lysine, de la thréonine, des AA soufrés (méthionine et cystine), du tryptophane, de la valine, de l'isoleucine, de la leucine, de la phénylalanine et de la tyrosine (Wang et Fuller, 1989).

Les AA bruts (totaux) de l'aliment sont plus ou moins digestibles. La digestibilité d'un AA est la proportion de ce qui est absorbé par rapport à la quantité totale ingérée (Figure 6). La digestibilité iléale apparente (DIA) est mesurée en collectant le contenu intestinal à

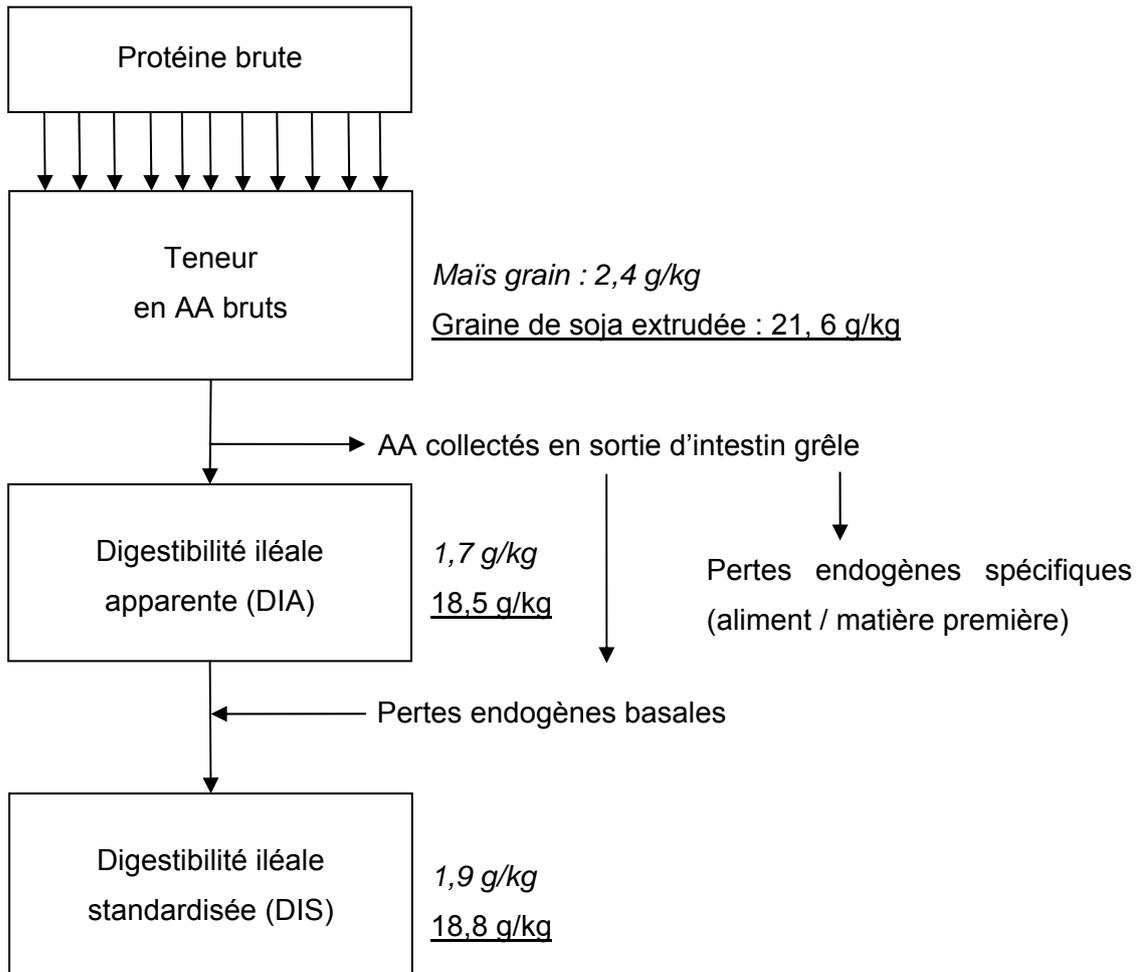


Figure 6 - Systèmes d'évaluation de l'utilisation des acides aminés (AA) et teneurs correspondantes pour le maïs (en italique) et la graine de soja extrudée (en souligné) (Tables INRA-AFZ, 2004)

l'extrémité de l'intestin grêle, elle permet d'éviter le biais induit par le remaniement du profil en AA des contenus digestifs par les fermentations bactériennes dans le gros intestin. Les AA collectés en sortie de l'intestin grêle ont deux origines : une partie est liée à l'animal et à son niveau d'ingestion alimentaire (pertes endogènes basales) et une partie est due à l'aliment selon la concentration et le type de parois végétales et la présence de facteurs anti-nutritionnels (pertes spécifiques). La digestibilité iléale standardisée (DIS) correspond à la proportion d'un AA qui est absorbée par le porc, corrigée pour les pertes endogènes. C'est à l'heure actuelle le meilleur critère pour raisonner l'apport en AA (Stein *et al.*, 2005) ; l'amélioration des connaissances sur la disponibilité des AA digérés sera une prochaine étape pour améliorer la précision des connaissances sur l'utilisation des AA.

#### 1.1.2.2 Estimation des besoins par l'approche factorielle

Pendant longtemps, les besoins nutritionnels des porcs ont été étudiés suivant une méthode empirique. Celle-ci consiste à évaluer la quantité minimale de nutriment permettant de maximiser ou minimiser la réponse moyenne des porcs étudiés selon un ou plusieurs critères de performance. Les résultats obtenus présentaient l'inconvénient d'être souvent difficilement applicables ou extrapolables à des conditions d'élevage différentes de celles de l'étude (Hauschild *et al.*, 2010).

L'approche factorielle repose sur une démarche analogue à l'analyse cartésienne. Elle consiste à « *diviser chacune des difficultés que j'examinerais, en autant de parcelles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour mieux les résoudre* » (Descartes, 1637). Elle ne s'appuie pas sur la caractérisation une à une de la réponse des animaux à tous les niveaux d'apports envisageables et dans toutes les conditions tel que pouvant être exigé par une approche empirique. Au contraire, l'approche factorielle consiste à compartimenter le besoin en composantes (ou compartiments) supposées indivisibles et additives, puis à étudier l'effet de facteurs de variation sur ces composantes. Suivant l'approche factorielle, le besoin total est considéré comme la somme du besoin d'entretien et du besoin de production, c'est-à-dire besoin de croissance au stade qui nous intéresse. Le besoin d'entretien dépend essentiellement du stade de croissance tandis que le besoin de production dépend du gain de poids et de la part relative des compartiments chimiques qui le composent. L'animal est dit à l'entretien quand il ne perd et ne gagne pas de poids, que son niveau d'activité physique est faible et qu'il est élevé en condition de thermoneutralité (NRC, 1998).



## **Besoins en énergie**

Le besoin en énergie a surtout été étudié en se référant au système EM.

Le besoin en EM pour l'entretien (EM<sub>m</sub>) est estimé à 1,07 MJ par kg de poids métabolique PV<sup>0,60</sup> (Noblet *et al.*, 1999). En théorie, le besoin d'entretien est proportionnel au volume de l'animal et inversement proportionnel à sa surface d'échange avec le milieu. Il devrait être évalué en fonction du poids métabolique PV<sup>2/3</sup>. Les travaux menés chez des animaux adultes de plusieurs espèces ont conduit à un exposant de 0,75 (Brouwer, 1965), probablement du fait d'une moindre importance du turnover des protéines (van Milgen et Noblet, 1999). Chez le porc en croissance, l'exposant 0,60 semble plus adéquat, probablement pour la raison inverse (un turn over plus intense).

Le besoin en EM de production (EM<sub>p</sub>) dépend du niveau de dépôt des différents compartiments chimiques. Il peut être évalué à partir des quantités de protéines (PD) et de lipides (LD) déposées, de la teneur en énergie de ces constituants et du rendement d'utilisation de l'EM pour ces dépôts. Ainsi, la teneur en énergie d'1 g de protéines est de 23,8 kJ et celle d'1 g de lipides est de 39,6 kJ (Kotarbinska et Kielanowski, 1967). Le rendement moyen d'utilisation de l'EM est de 64% pour le dépôt de protéines (k<sub>p</sub>) et de 83% pour le dépôt de lipides (k<sub>f</sub>, Noblet *et al.*, 1999). Le besoin EM<sub>p</sub> pour PD est donc de 23,8 / 0,64 = 37,0 kJ/g, tandis que pour LD il est de 39,6 / 0,83 = 47,7 kJ/g.

Le besoin en EM total peut être estimé à partir de PD et LD à un PV donné selon l'équation :

$$\text{Besoin en EM (MJ/j)} = \text{EM}_m + \text{EM}_p = 1,07 \text{ PV}^{0,60} + (37,0 \text{ PD} + 47,7 \text{ LD}) / 1000$$

Compte-tenu de la composition chimique du gain de poids présentée précédemment, le besoin moyen d'un mâle castré LW pesant en moyenne 55 kg et dont PD et LD s'élèvent respectivement à 115 et 218 g/j (Noblet *et al.*, 1994a) correspond à :

$$\text{Besoin en EM} = 1,07 \times 55^{0,60} + (37,0 \times 115 + 47,7 \times 218) / 1000 = 26,50 \text{ MJ/j.}$$

Le GMQ de ce porc étant de 751g/j, il faut 35,29 MJ EM par kg de gain de poids. Sur la base d'une teneur en EM de 12,84 MJ/kg d'aliment (= 9,5 MJ EN/kg), l'IC exprimé en kg/kg est alors de 2,75. La présentation détaillée de l'approche factorielle permet alors de comprendre pourquoi l'IC est d'autant plus élevé que l'adiposité (ou rapport LD/PD) du gain de poids est importante.

**Tableau 4 - Profil en acides aminés du besoin d'entretien selon la fonction considérée**

Auteurs	Fuller <i>et al.</i> (1989)	van Milgen <i>et al.</i> (2008, InraPorc)		
Composante	Total	Desquamation	Turn-over minimal	Endogène basal
Unité	mg/ kg PV <sup>0,75</sup>	mg/kg PV <sup>0,75</sup> /j	mg/kg PV <sup>0,75</sup> /j	g/kg MS ingérée
Lysine, voir unités utilisées	36	4,5	23,9	0,313
Besoin, % de la lysine				
Méthionine	21	22	29	28
Cystéine	147	104	20	45
Thréonine	139	73	58	105
Tryptophane	29	20	15	37
Isoleucine	44	56	52	82
Leucine	71	118	113	136
Valine	52	84	69	114
Phénylalanine	63	67	57	87
Tyrosine	61	42	38	71
Histidine	-	29	43	42
Arginine	-	0	0	89

**Tableau 5 - Profil en acides aminés (AA) des protéines corporelles et de la protéine idéale (d'après InraPorc®, 2006)**

	Profil en AA des protéines corporelles, g/100 g ou % <sup>1</sup>	Rendement d'utilisation maximal, %	Profil en AA de la protéine idéale, g/100 g ou % <sup>2</sup>
Lysine	6,96	72	7,0
Méthionine	27	64	30
Cystéine	55	37	100
Thréonine	359	61	217
Tryptophane	26	57	28
Isoleucine	364	67	306
Leucine	207	76	182
Valine	65	71	70
Phénylalanine	81	82	71
Tyrosine	76	67	90
Histidine	98	93	71
Arginine	224	154	131

1. En mg/100 g de protéines pour la lysine et en % du besoin en lysine pour les autres acides aminés.

2. A partir du profil en AA du besoin d'entretien et du besoin pour la croissance.

## **Besoin en acides aminés**

Chez le porc, l'AA limitant primaire est la lysine. Cet AA sert donc de référence pour l'estimation des besoins en AA. La littérature indique que les besoins des autres AA respectent des niveaux relatifs par rapport à la lysine qui sont à-peu-près stables pour une fonction donnée. Aussi, une fois le besoin en lysine défini, les apports des autres AA sont raisonnés relativement à l'apport en lysine en s'appuyant sur des proportions déterminées.

Le besoin d'entretien en AA correspond au besoin de renouvellement des protéines corporelles de l'animal à poids stable. Le profil en AA du besoin d'entretien a été longtemps été considéré comme stable et différent du profil en AA du besoin de production (Baker *et al.*, 1966). Ainsi, Fuller *et al.* (1989) ont évalué que le besoin d'entretien en lysine digestible iléale standardisée (LYSd) était de 36 mg par kg de poids métabolique ( $PV^{0,75}$ ). Plus récemment, van Milgen *et al.* (2008) ont suggéré de considérer trois composantes pour ce besoin. Cette approche prend en compte, d'une part, les besoins liés au renouvellement protéique et, d'autre part, les besoins liés à la désquamation des cellules du tube digestif (riches en AA soufrés) et ceux liés aux sécrétions endogènes basales. Les deux premières composantes dépendent du poids de l'animal, tandis que la troisième dépend de la quantité de MS ingérée (Tableau 4).

Le besoin de croissance en AA dépend de la quantité de protéines déposées, de leur profil en AA et du rendement d'utilisation des AA pour le dépôt. Le profil en AA des protéines corporelles du porc dépend du tissu considéré, toutefois à l'échelle de l'organisme complet ce profil est relativement stable (Tableau 5) d'un type génétique à l'autre (Duée *et al.*, 1980) ou d'un type sexuel à l'autre (Kyriazakis et Emmans, 1993). Ainsi la teneur en lysine des protéines corporelles est proche de 7% (Tableau 5).

Le besoin total en AA suppose de connaître le poids de l'animal, son niveau d'ingestion (exprimé en MS) et PD. Ainsi, un porc pesant 45 kg qui consomme 1,5 kg MS/j, aura un besoin d'entretien en lysine (LYSm) égal à :

$$LYSm = (4,5 \times 45^{0,75} + 23,9 \times 45^{0,75}) / 1000 + 0,313 \times 1,5 = 0,96 \text{ g/j}$$

Pour un dépôt de protéines moyen de 169 g/j, la quantité de lysine déposée sera égale à  $169 \times 6,96 / 100 = 11,76$  g. Compte-tenu du rendement d'utilisation de la lysine de 72% (Tableau 4), ce dépôt correspond à un besoin de  $11,76 / 0,72 = 16,33$  g de lysine par jour, soit 94% du besoin total de 17,29 g/j. Le besoin de ce porc sera donc couvert avec une teneur de  $17,29 / 1,5 = 11,5$  g de lysine par kg MS, ou 10,0 g par kg d'aliment frais sur la base d'une teneur en MS de 87% dans l'aliment.

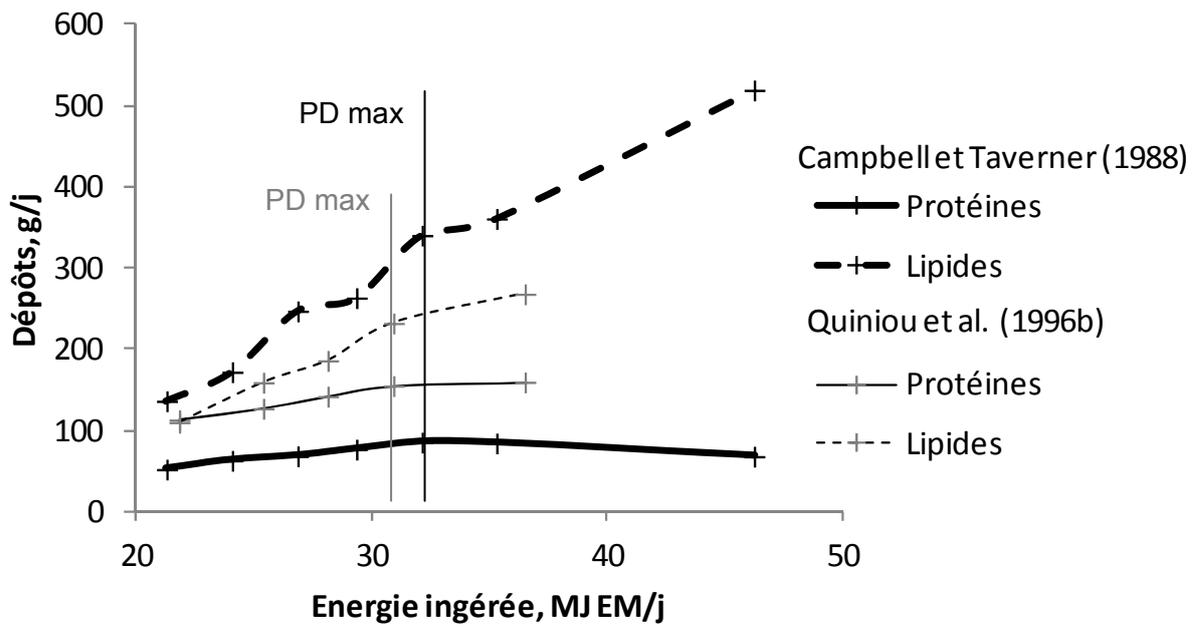


Figure 7 - Evolution du dépôt de protéines (PD) et du dépôt de lipides selon l'apport en énergie métabolisable (d'après Campbell et Taverner (1988) et Quiniou *et al.* (1996a))

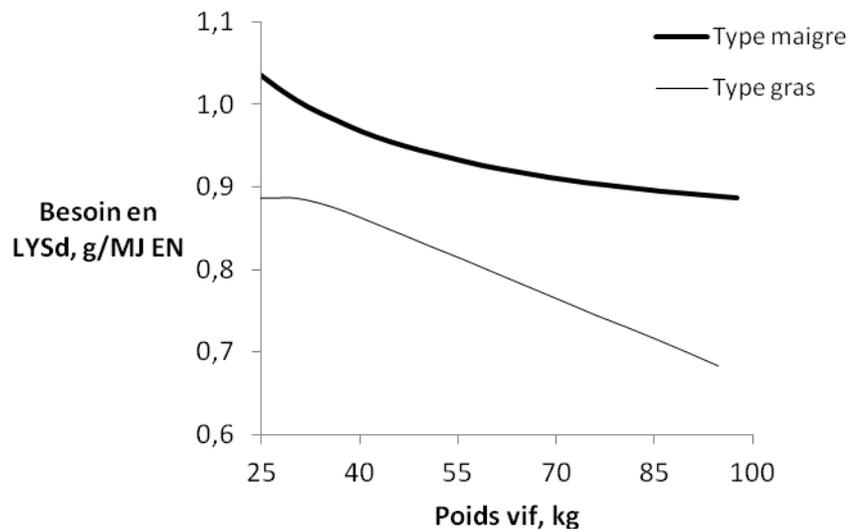


Figure 8 - Evolution du besoin en lysine digestible (LYSd) par MJ d'énergie nette selon le poids vif chez deux types de porcs (Noblet et Quiniou, 1999)

Les teneurs minimales des autres AA dans l'aliment sont ensuite calculées à partir de la teneur en lysine de l'aliment et du profil en AA de la protéine idéale (Tableau 4). Celle-ci tient compte des profils en AA des besoins d'entretien et de croissance ainsi que des rendements d'utilisation des différents AA (Henry, 1993),

### ***Besoin en acides aminés relativement à l'apport d'énergie***

Le dépôt protéique dépend de la quantité d'AA ingérés (phase AA dépendante) mais également de la quantité d'énergie ingérée (phase énergie dépendante). Tant que l'apport en AA reste en deçà du besoin, un apport supplémentaire d'AA permet d'augmenter PD jusqu'à un niveau qui dépend alors de la quantité d'énergie ingérée. Un apport supplémentaire d'énergie permet d'atteindre un plafond plus élevé de PD si les apports en AA sont également augmentés. En effet, une relation de type linéaire-plateau existe entre PD et l'énergie ingérée (Figure 7, Noblet *et al.*, 1999). Tant que le potentiel de PD n'est pas atteint et que l'apport en AA le permet, tout apport supplémentaire d'énergie s'accompagne d'une augmentation de PD et de LD. Dès que le potentiel de PD est atteint, tout apport supplémentaire d'énergie induit un dépôt lipidique accru mais le dépôt de protéines reste constant. Cette relation implique que les besoins en AA et en énergie ne sont pas indépendants. Ainsi, plus le gain de poids est maigre (rapport LD/PD bas), plus le besoin en AA par MJ d'énergie ingérée est élevé. Le rapport LYSd/EN diminue donc quand le PV augmente et est plus élevé pour les porcs maigres que pour les porcs gras (Figure 8). Lors de la formulation de l'aliment, l'objectif du nutritionniste est donc de combiner ces deux besoins et pour ce faire il raisonne les apports d'AA par leur concentration relativement à l'énergie (LYSd/EN) dans l'aliment.

### **1.1.3 Facteurs de variation de la croissance**

Les performances de croissance sont influencées par des facteurs intrinsèques à l'animal (stade de croissance, type génétique et sexuel) et par des facteurs extrinsèques, liés aux conditions de logement et d'alimentation.

#### ***1.1.3.1 Facteurs intrinsèques***

##### ***Effet du stade de croissance***

La CMJ augmente avec le PV (Figure 4b). Certains auteurs proposent de calculer la CMJ en fonction du PV en utilisant des équations allométriques (Kemmer *et al.*, 1991 ; NRC, 1998) ou des fonctions exponentielles du PV (Kanis et Koops, 1990).

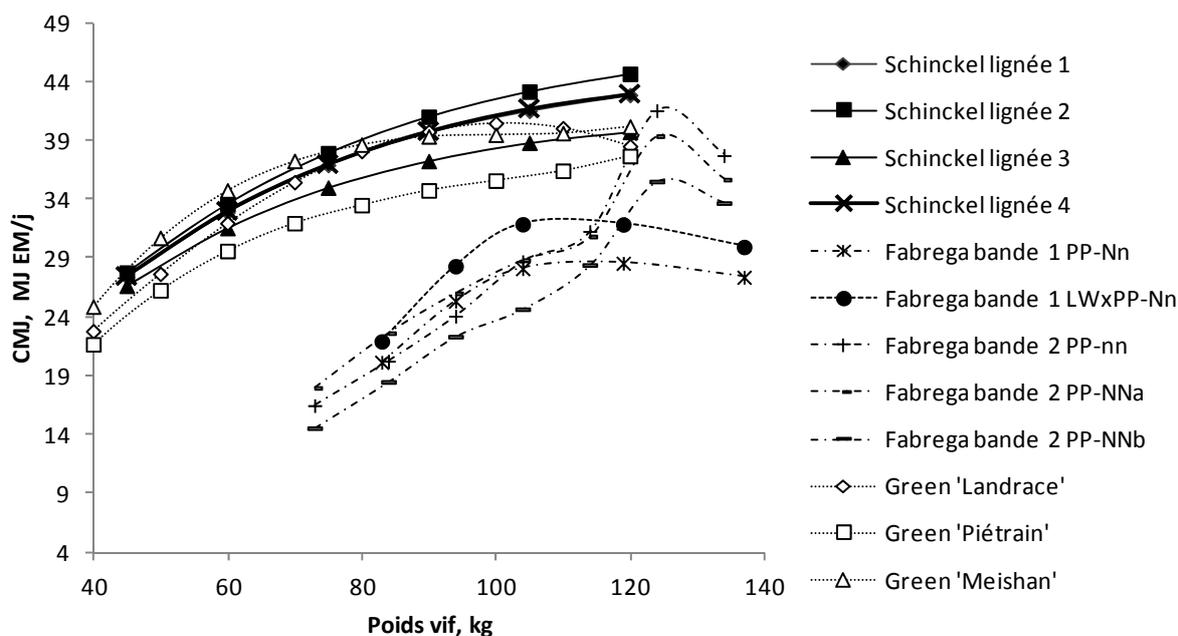


Figure 9 - Courbes d'ingéré quotidien de porcs issus de différentes lignées de verrat (d'après Fàbrega et al., 2003 ; Green et al., 2003 ; Schinckel et al., 2012)

Tableau 6 - Composition du gain de poids vif vide (PVV) entre 20 et 95 kg et coefficients d'allométrie correspondant pour les différents constituants chimiques chez des mâles entiers Piétrain (Noblet et al., 1994a)

Constituants chimiques	% du PVV à 20 kg	% du PVV à 95 kg	Composition du gain de poids, %	Coefficient d'allométrie $\beta$
Eau	70,9	63,6	61,6	0,93
Matières minérales	2,7	2,6	2,6	0,97
Protéines	16,1	17,1	17,4	1,04
Lipides	9,8	16,4	18,2	1,34
Energie	7,7	10,4	11,2	1,20

Tableau 7 - Performances et composition de la croissance de porcs selon le type génétique (LS : lignée synthétique, PP : Piétrain, LW : Large White) et le type sexuel (M : mâle entier, F : femelle, MC : mâle castré) (Noblet et al., 1994a)

Type génétique	LS	PP	LW			Meishan x LW	Meishan
Type sexuel	M	M	M	F	MC	MC	MC
GMQ, g/j	960	804	881	726	751	880	458
Dépôt, g/j							
Muscles	489	443	401	315	301	272	107
Gras	140	138	175	177	222	298	198
Protéines	158	133	142	111	115	107	49
Lipides	137	139	179	175	218	282	215
IC, MJ EM/kg	26,8	29,4	29,9	37,4	38,3	36,6	50,9

Le GMQ n'est pas constant pendant la période de croissance (Figure 4a). Ainsi chez des mâles castrés LW pesant en moyenne 31, 52, 69 et 89 kg, Noblet et van Milgen (2004) observent une évolution curvilinaire du GMQ avec le PV : respectivement de 648, 826, 837 et 767 g/j sur un intervalle de temps de 10 jours. Chez des mâles entiers Goland, Schiavon *et al.* (2007) observent que le GMQ mesuré sur une période plus longue (70 jours) augmente pendant toute la phase de croissance : 389, 871 et 1010 g/j aux PV moyens respectivement de 16, 54 et 107 kg. L'évolution du GMQ avec le PV dépend en fait du type de porc (voir plus loin).

Karege (1991) a montré que la part de protéines dans le gain de poids pendant la phase de croissance était stable, en relation avec un coefficient d'allométrie proche de 1 (Tableau 6). Elle représente entre 16 et 17% du gain de poids chez les types de porcs maigres (Noblet *et al.*, 1994a). A l'inverse, le dépôt de lipides augmente au cours de la croissance, ce qui correspond à un coefficient d'allométrie de 1,25 pour le gras et 1,29 pour les lipides chez des mâles entiers issus d'une lignée très maigre (Tableau 6). L'augmentation du dépôt de lipides observée en fin de croissance peut se poursuivre jusqu'à 145-150kg (Kloareg *et al.*, 2006).

### **Effet du type génétique**

Un effet du type génétique sur la consommation moyenne journalière (CMJ) est montré par différents auteurs. Green *et al.* (2003) ont comparé des animaux issus de truies LWxLD et de verrats de type 'Landrace' (3/4 LD, 1/4 PP), 'Piétrain' (1/2 PP, 1/4 LD, 1/4 LW) et 'Meishan' (1/4 Meishan, 3/8 LD, 3/8 LW). Ces auteurs observent une CMJ significativement plus faible chez les porcs de type 'Piétrain' par rapport aux types 'Landrace' et 'Meishan'. Par ailleurs, ils montrent que la cinétique d'évolution de la CMJ avec le PV dépend du croisement. Ainsi, entre 20 et 30 kg PV, les porcs 'Landrace' se distinguent des 'Piétrain' et 'Meishan' par une CMJ plus élevée. Entre 40 et 50 kg PV, la CMJ augmente avec le PV mais moins fortement chez les porcs 'Piétrain' et leur CMJ devient significativement inférieure à celle des deux autres types génétiques. Entre 40 et 70 kg PV, la CMJ des porcs de type 'Landrace' est inférieure à celle du type 'Meishan' (Figure 9). Fàbrega *et al.* (2003) observent également que les animaux issus de verrat PP ont une CMJ inférieure à celle des animaux issus de verrat LWxPP tout au long de la croissance. Schinckel *et al.* (2012) ont étudié des porcs issus de truies PIC Camborough et de quatre lignées commerciales de verrats. Ils indiquent que, outre l'effet sur la moyenne, le croisement influence également le coefficient de variation (CV) de la CMJ. Ainsi, entre 45 et 120 kg de PV, le CV augmente de 1,7 à 4,8 points selon le croisement considéré.

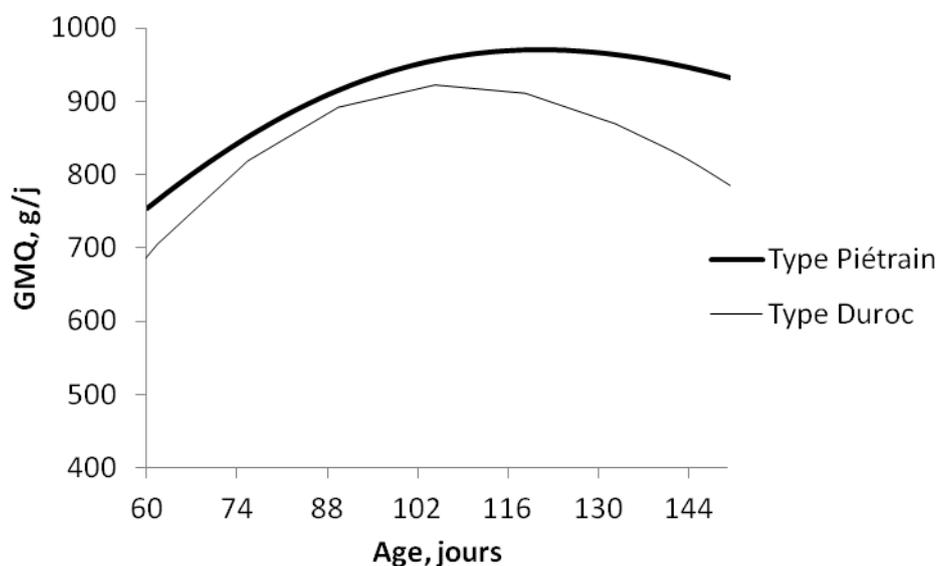


Figure 10 - Evolution de la vitesse de croissance (GMQ) avec l'âge selon le type de porc (fiches IFIP n° 19 et 30, [www.ifip.asso.fr](http://www.ifip.asso.fr))

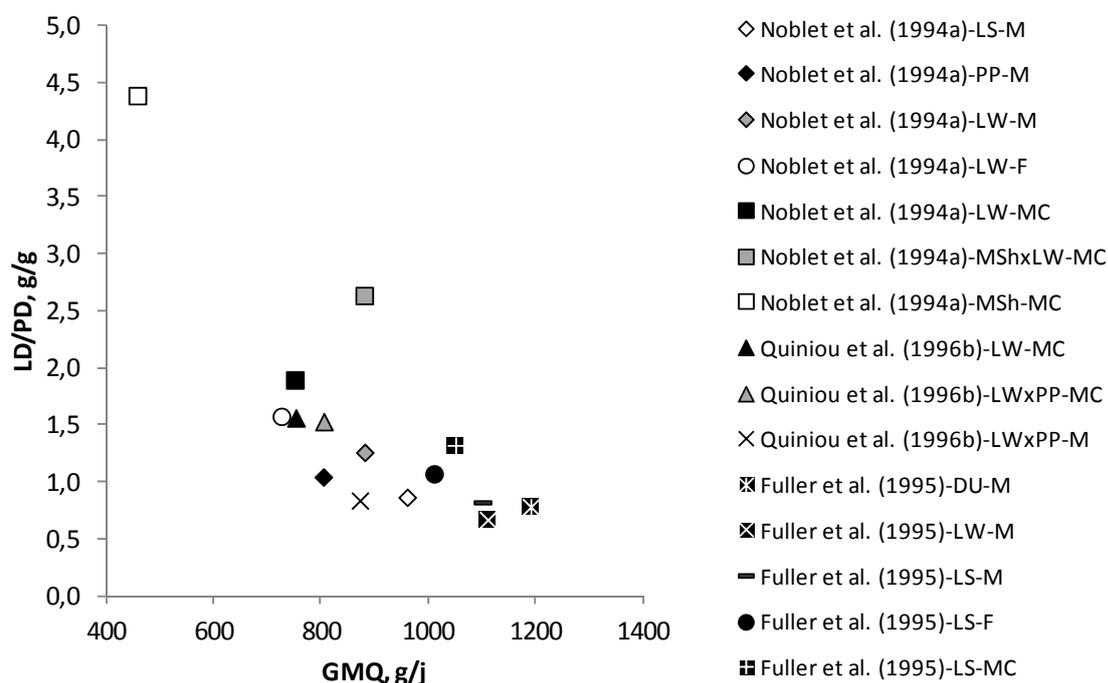


Figure 11 - Vitesse de croissance (GMQ) et rapport entre les lipides déposés (LD) et protéines déposées (PD) dans le gain de poids selon le type génétique (LS : lignée synthétique, PP : Piétrain, LW : Large White, MSh : Meishan, DU : Duroc) et le type sexuel des animaux (M : mâle entier, MC : mâle castré, F : femelle)

En plus de l'ingéré, le type génétique des animaux détermine le niveau moyen de croissance des animaux, son évolution au cours de l'engraissement (Figure 10) et la composition du gain de poids (Figure 11, Tableau 7). La comparaison de porcs LW avec des porcs croisés LWxPP par Quiniou *et al.* (1996b) montre que le GMQ des porcs LWxPP est plus élevé que celui des porcs LW (805 vs 753 g/j) mais avec une composition du gain de poids semblable (LD/PD = 1,54 vs 1,56). La comparaison de porcs issus d'une lignée synthétique, de races LW ou Duroc menée par Fuller *et al.* (1995) montre des GMQ différents (respectivement 1100, 1110 et 1190 g/j) associés à une composition du gain de poids différente (respectivement LD/PD = 1,21, 1,49 et 1,28 g/g).

### ***Effet du type sexuel***

Le type sexuel des porcs influence leur CMJ (Figure 12). Les trois sexes ont été comparés par Noblet *et al.* (1994a, porcs LW), Fuller *et al.* (1995, porcs LW ou croisés Duroc) et par Quiniou *et al.* (2010, porcs (LWxLD)x(LWxPP)) : les mâles castrés ont la CMJ la plus élevée, suivis par les femelles, puis les mâles entiers. Le sexe des porcs influence leur GMQ et sa composition. D'après les données de Noblet *et al.* (1994a) obtenues chez des porcs LW entre 20 et 95 kg PV, les mâles entiers ont un GMQ de 881 g/j dont 142 g de protéines et 179 g de lipides, les mâles castrés ont un GMQ de 751 g/j dont 115 g de protéines et 218 g de lipides et les femelles ont un GMQ de 726 g/j dont 111 g de protéines et 175 g de lipides. Un effet similaire du type sexuel est obtenu par Kemm *et al.* (1991) chez des porcs LD, ainsi que par Hyun et Ellis (2000) chez des porcs PIC dont les mâles castrés PIC ont un GMQ supérieur de 6,7% à celui des femelles. Les GMQ différents et compositions du gain de poids différentes correspondent à des besoins nutritionnels différents. A 65 kg de PV, à partir des porcs étudiés par Noblet *et al.* (1994a), le besoin en EN estimé par l'approche factorielle est pour les mâles entiers, mâles castrés et femelles de respectivement 26,6, 27,5 et 25,3 MJ/j et le besoin relatif en lysine de, respectivement, 0,56, 0,45 et 0,47 g/MJ EN en moyenne pendant la phase d'engraissement. Les différences de composition du gain de poids entre types sexuels expliquent les différences de composition de la carcasse à l'abattage. Ainsi, la carcasse des femelles est plus grasse que celle des mâles entiers mais moins grasse que celle des mâles castrés (Tableau 1). Elles contribuent également à des différences d'indice de consommation (IC), suivant la même hiérarchie.

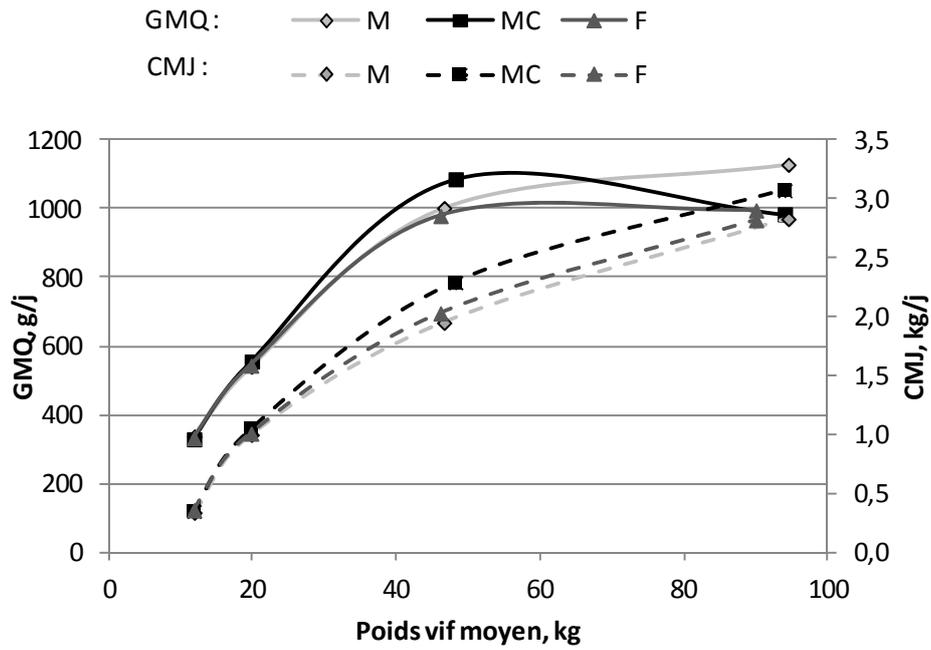


Figure 12 - Evolution de la consommation d'aliment (CMJ) et du gain de poids (GMQ) quotidiens chez les trois types sexuels (M : mâle entier, MC : mâle castré, F : femelle, Quiniou *et al.*, 2010)

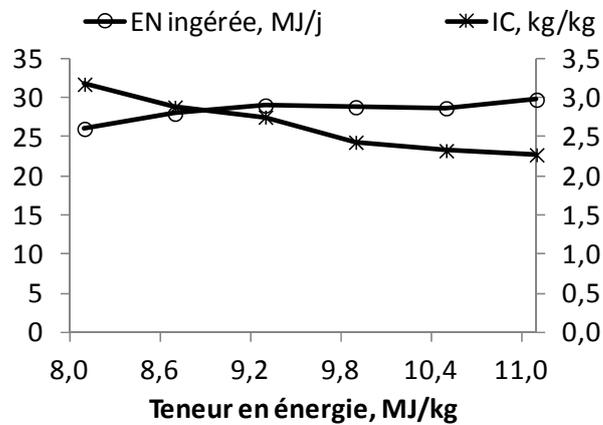


Figure 13 - Effet de la teneur en énergie nette de l'aliment (EN) sur la quantité d'EN ingérée (MJ/j) et l'indice de consommation (IC, exprimé en kg/kg) (Quiniou et Noblet, 2012)

### 1.1.3.2 Facteurs extrinsèques

#### **Caractéristiques de l'aliment**

Les facteurs pris en compte dans ce paragraphe sont principalement la concentration en énergie et en AA dans l'aliment. D'autres critères peuvent cependant être également utilisés pour décrire l'aliment tels que la teneur en parois végétales et la capacité de rétention d'eau associée, la saveur, les traitements technologiques (granulométrie, température de granulation...), mais ils ne seront pas développés ci-dessous.

#### *Concentration en énergie de l'aliment*

En condition d'alimentation à volonté, le porc est capable de réguler son ingéré énergétique lorsque la teneur en énergie varie sur une large plage de concentrations. A partir de 50 kg de PV, cette régulation est observée pour des concentrations entre 8,7 et 10,5 MJ EN/kg. Quand la teneur en EN augmente sur cette plage, la CMJ et l'IC diminuent mais l'EN ingérée reste stable (Figure 13).

#### *Concentration en protéines équilibrées*

La teneur en AA par unité d'EN détermine la quantité de protéines déposées suivant une relation de type linéaire-plateau. Tant que les apports sont en dessous du besoin, tout apport supplémentaire d'AA se traduit par une augmentation du dépôt protéique jusqu'à ce que le porc atteigne le niveau permis par les apports énergétiques ou par son potentiel intrinsèque (Figure 14a). Si l'aliment n'apporte pas suffisamment d'AA ou si les équilibres entre AA ne respectent pas le profil de la protéine idéale, le dépôt de protéines diminue et l'énergie non utilisée pour le dépôt protéique est orientée vers le dépôt de lipides (Henry, 1993). Au final, le porc est plus gras et son GMQ diminue (Noblet *et al.*, 1987). La réduction de l'apport en lysine de 0,79 à 0,67 g/MJ EN, pour un même niveau de protéine digestible, entraîne une diminution du GMQ de 699 à 649 g/j (Noblet *et al.*, 1987). A l'inverse, tant que les besoins en AA ne sont pas couverts, une augmentation de la teneur en AA relativement à l'énergie permet d'augmenter le GMQ par l'augmentation du dépôt de protéines et de diminuer l'IC. L'amélioration marginale de ces deux critères diminue de façon curvilinéaire au fur et à mesure que les apports permettent un dépôt de protéines de plus en plus proche du potentiel et que l'efficacité d'utilisation des AA diminue (Hauschild *et al.*, 2010).

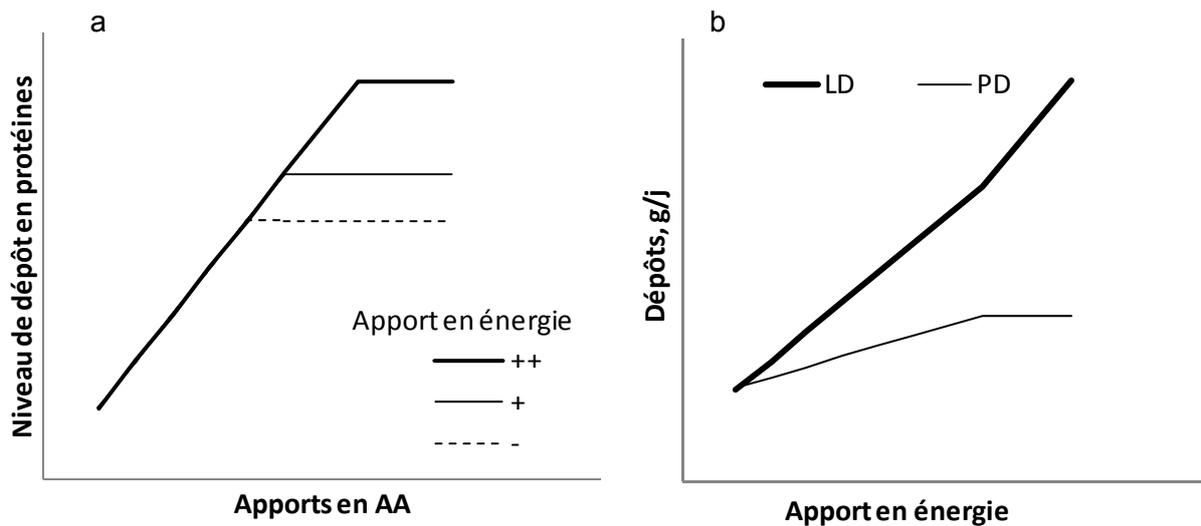


Figure 14 - Effet de l'apport en énergie sur la relation entre les acides aminés (AA) ingérés et le dépôt de protéines (a, d'après Bikker *et al.*, 1994) et sur la relation entre dépôt protéique (PD) et lipidique (LD) et l'apport d'énergie quand les apports en AA ne sont pas limitants (b, d'après Quiniou *et al.*, 1996a)

Tableau 8 - Effet du rationnement sur les performances de croissance de mâles castrés LWxLD entre 45 et 90 kg (Campbell et Taverner, 1988)

Niveau de rationnement, % de l'à volonté	74	82	90	100
CMJ, kg/j	1,84	2,03	2,22	2,47
GMQ, g/j	545	727	824	900
IC	3,36	2,80	2,70	2,82

## **Niveau d'alimentation ou rationnement**

En condition d'alimentation restreinte, il est préférable de raisonner en termes de réponse de l'animal aux apports d'énergie au-delà de la couverture des dépenses d'entretien (Noblet *et al.*, 1994a). Dans ces conditions, le dépôt de protéines évolue avec l'apport en énergie suivant une réponse de type linéaire-plateau, le plateau correspondant au dépôt protéique permis par le potentiel de l'animal. Le dépôt de lipides augmente linéairement avec l'apport en énergie avec une pente très proche pendant les deux phases (Figure 14b).

Lorsque l'énergie ingérée spontanément excède la quantité minimale permettant l'expression du potentiel de dépôt protéique, le dépôt de protéines n'augmente plus contrairement aux lipides. Afin de diminuer l'adiposité du gain de poids et améliorer l'IC, le rationnement peut être envisagé (Quiniou *et al.*, 1996a). Un rationnement modéré permet de diminuer le dépôt de lipides sans modifier le dépôt protéique : l'IC diminue tandis que le GMQ est stable (Figure 15a). Quand l'apport d'énergie devient inférieur à la quantité requise pour exprimer le potentiel de dépôt protéique, ce dernier diminue et le GMQ est fortement réduit. En rationnant des porcs à 55% des quantités ingérées *ad libitum*, Boddicker *et al.* (2011) observent une baisse de 49% du GMQ (491 vs 894 g/j). Cette limitation des dépôts en fonction du niveau de rationnement a été vérifiée dans les essais de Campbell et Taverner (1988) et Serrano *et al.* (2009).

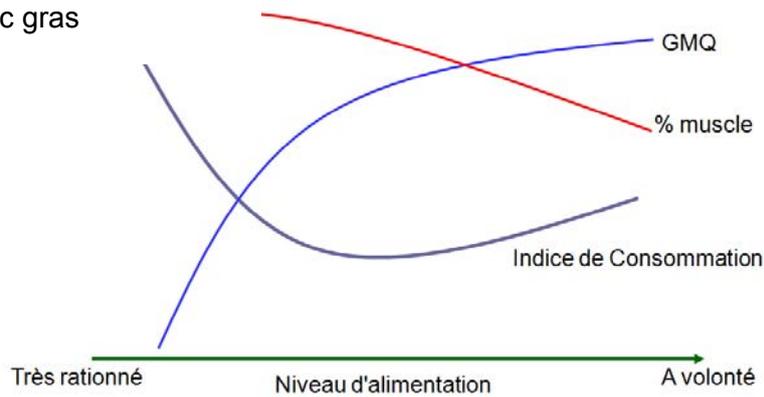
Cependant, si en condition d'alimentation à volonté, les porcs n'ont toujours pas atteint un plateau de dépôt protéique, le rationnement entraîne une diminution simultanée des dépôts de protéines et de lipides. Dans ce cas, le GMQ diminue et l'IC ne change pas voire même augmente (Tableau 8, Figure 15b). En effet, en cas de très fort rationnement, la part de nutriments utilisés pour la croissance devient très faible par rapport à l'entretien.

## **Conditions d'élevage**

### *Surface allouée par animal et taille du groupe*

Les interactions entre animaux et leurs conséquences sur l'accès à l'aliment et le niveau d'activité physique ont un impact sur les performances de croissance. Lorsque le nombre de porcs par case augmente de deux à douze, Hyun et Ellis (2001) notent que la CMJ diminue de 1,86 à 1,70 kg/j tandis que le GMQ diminue de 783 à 733 g/j, conséquence directe de l'ingestion moindre d'aliment. Au-delà de 20 animaux dans le groupe les performances n'évoluent plus avec la taille du groupe (Figure 16).

a - Chez un porc gras



b - Chez un porc maigre

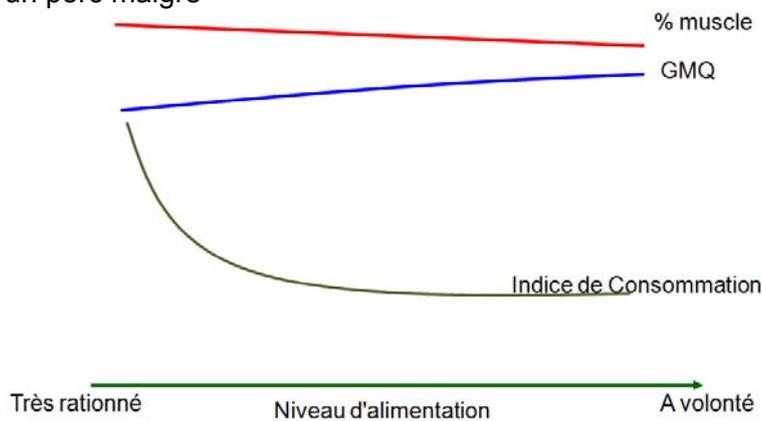
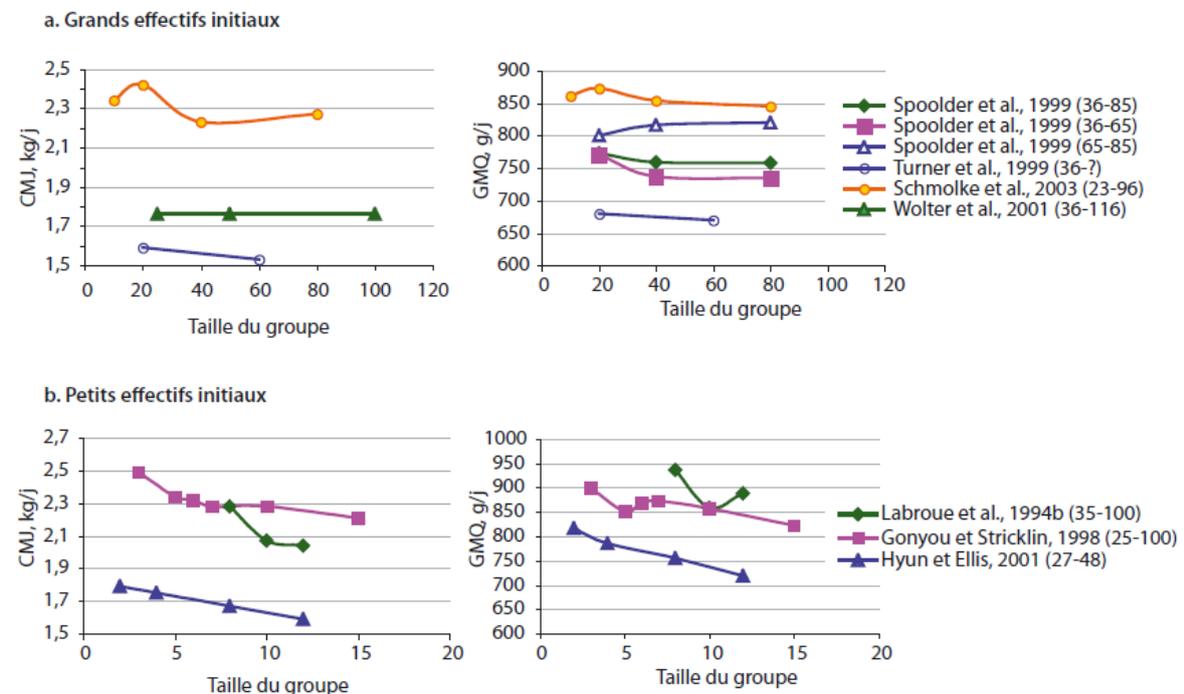


Figure 15 - Effet du rationnement sur les performances zootechniques d'un porc gras (a) ou maigre (b) (Quiniou et Massiot, 2008)



Il n'y a pas d'interaction entre la taille du groupe et la densité (surface par porc) sur les performances. La CMJ augmente avec la surface allouée par porc jusqu'à 1 m<sup>2</sup> puis se stabilise. Une diminution de la surface disponible de 1,52 à 0,51 m<sup>2</sup> par porc induit une baisse de CMJ (de 2,67 à 2,51 kg/j) et de GMQ (de 780 à 640 g/j, Meunier-Salaün *et al.*, 1987). L'espace disponible dans la case diminue quand le PV des porcs de la case augmente. Il apparaît alors plus pertinent d'exprimer l'espace disponible par porc en m<sup>2</sup> par kg de PV ou de poids métabolique. Gonyou *et al.* (2006) observent que les performances de croissance diminuent linéairement avec la surface ramenée au PV<sup>0,667</sup>. Ainsi, en-dessous de 0,0336 m<sup>2</sup>/kg<sup>0,667</sup>, le GMQ diminue de 18% pour 10% d'espace en moins.

### *Température ambiante*

La zone de thermoneutralité est une plage de température délimitée par une température critique inférieure en deçà de laquelle les porcs ont froid et utilisent de l'énergie pour réguler leur température interne (besoin de thermorégulation), et une température critique supérieure au-delà de laquelle les porcs ont chaud et mettent en place des adaptations permettant d'augmenter les pertes de chaleur ou de diminuer leur production de chaleur. Entre 20 et 25°C, la CMJ du porc reste relativement stable (Quiniou *et al.*, 1997).

En dessous de la température critique inférieure, la CMJ augmente avec le besoin de thermorégulation. La surconsommation d'aliment peut parfois excéder le strict besoin de thermorégulation et provoquer une augmentation de l'adiposité du porc (Lefaucheur *et al.*, 1991). Un débit de ventilation élevé aura un effet aggravant celui du froid sur la CMJ, en renouvelant plus rapidement l'air au contact du porc et les pertes de chaleur par convection (Massabie et Granier, 1996).

Au chaud, la CMJ diminue ainsi que les dépôts protéiques et lipidiques, et l'effet sur l'IC est similaire à celui d'un rationnement énergétique (Lopez *et al.*, 1991 ; Massabie *et al.*, 1996). L'évacuation de l'extra-chaleur produite lors de l'utilisation métabolique de l'aliment est plus difficile et le porc régule son ingéré en fonction de la quantité d'extra-chaleur qu'il peut évacuer. Les limites de la zone de confort thermique évoluent avec le poids des animaux. Ainsi, la température critique inférieure est d'autant plus élevée que les porcs sont légers. Au contraire, la température critique supérieure est plus basse chez les animaux plus lourds. Compte-tenu de ces résultats, la température de consigne en élevage est le plus souvent fixée entre 22 et 24°C.



**Les connaissances disponibles sur la croissance du porc et les besoins nutritionnels associés sont abondantes dans la littérature. De façon empirique, elles ont déjà permis d'orienter les recommandations de conduite d'élevage apportées aux éleveurs (Mémento de l'éleveur de porc, 2000). Des progrès peuvent encore être réalisés pour affiner leur utilisation au profit des performances d'élevage. Une démarche d'intégration de ces connaissances abondantes a donc été entamée depuis une trentaine d'années, qui a conduit à la mise au point de modèles de prévision des performances.**

## **1.2 LA MODÉLISATION DU PORC EN CROISSANCE**

Dans le cas du porc en croissance, les modèles permettent selon le cas de prédire la CMJ, le PV, les besoins en AA et les changements de composition corporelle au cours du temps. Ils sont des outils de simulation pour l'étude des stratégies alimentaires. Ils constituent une alternative à l'expérimentation animale et deviennent un outil d'expérimentation virtuelle. Les modèles sont alors des outils d'aide à la décision. Plus généralement, si la modélisation permet d'intégrer l'ensemble des connaissances disponibles dans un domaine, elle permet également d'identifier des domaines pour lesquelles les connaissances sont insuffisantes.

### **1.2.1 Les types de modèles**

Trois clefs typologiques sont en général utilisées pour classer les différents modèles (France et Thornley, 1984) : empirique vs mécaniste, statique vs dynamique et déterministe vs aléatoire. Sauvante (2005) utilise cette classification pour recenser différents modèles de la réponse des porcs aux pratiques alimentaires et d'élevage.

#### *1.2.1.1 Modèle empirique vs mécaniste*

La modélisation est une représentation mathématique simplifiée des mécanismes biologiques. Comme rappelé par Sauvante (2005), les modèles empiriques considèrent le système objet d'étude (par exemple l'organisme) comme une «boîte noire». Ils peuvent ainsi servir à prédire les sorties de ce système à partir de la connaissance des entrées alimentaires. Ces modèles peuvent également être utilisés dans une démarche inverse, par exemple pour prédire les quantités ingérées à partir du PV et du niveau de performance (Whittemore *et al.*, 1995). La modélisation empirique consiste en l'ajustement d'une loi de réponse sur un ensemble de points mesurés. La dépendance du calibrage obtenu aux conditions expérimentales de l'étude constitue une limite à la généralisation des lois



obtenues. Le développement de la méta-analyse au cours des dix dernières années a permis de lever en partie cette limitation. En effet, la méta-analyse permet de traiter statistiquement des données issues d'expérimentations publiées et possiblement très diverses, tout en différenciant les variations inter et intra-expériences. Ceci permet d'établir des lois générales de réponse. Les modèles empiriques ont permis des avancées essentielles par l'amélioration de la compréhension de nombreux mécanismes et par l'obtention de modèles de prédiction de plus en plus précis (Sauvant, 2005). Ils peuvent également être combinés, par exemple dans des modèles de « flux », pour composer des modèles de plus en plus complets.

Les modèles mécanistes intègrent les différentes relations biologiques les plus déterminantes afin de prévoir les réponses de l'objet d'étude, par exemple l'animal (Sauvant, 2005). Ils permettent d'organiser l'ensemble des connaissances d'un phénomène complexe, par exemple la croissance, en une unité fonctionnelle. Les modèles mécanistes s'appuient pour beaucoup sur une représentation en compartiments et une formalisation par équation différentielle dynamique déterministe qui s'applique au niveau de chacun des compartiments. Ce type de modélisation s'est largement développé au cours des dernières années notamment car ils permettent d'intégrer des données obtenues à des niveaux d'organisation sous-jacents.

Les modèles mécanistes et empiriques sont complémentaires. Les seconds fournissent les relations associant les compartiments et les flux entre ces compartiments.

#### *1.2.1.2 Modèle statique vs dynamique*

Le fonctionnement des modèles intègre ou non l'évolution des processus avec le temps. Un modèle statique prédit un état indépendant du temps en fonction de valeurs moyennes au lieu de valeurs instantanées. Le modèle de prédiction de la composition corporelle du porc en croissance décrit par Quiniou et Noblet (1995) en est un exemple. A l'inverse, un modèle intégrant l'influence du temps et donc fonctionnant par pas de temps et dont le résultat dépend de la succession d'états est dit dynamique.

#### *1.2.1.3 Modèle déterministe vs stochastique*

De par leur fonctionnement, les modèles peuvent aussi être déterministes ou stochastiques selon qu'ils intègrent ou pas l'incertitude des valeurs des variables utilisées. Ainsi, un modèle déterministe utilise des valeurs fixes pour chaque variable et produira toujours les mêmes résultats pour un même ensemble de valeurs de variables. Les modèles

**Tableau 9 - Exemples d'équations utilisées pour décrire la relation entre poids vif (PV) et âge (t)**

Nom de la fonction	Equation $PV = f(t)^1$	Nombre de variables	Auteurs
Monomoléculaire	$f(t) = PV_f - (PV_f - PV_0) \cdot \exp(-kt)$	3	
Gompertz	$f(t) = PV_f \cdot (\exp(1 - \exp(-kt)) \cdot \log(PV_f/PV_0))$	3	Gompertz (1825)
Logistique	$f(t) = PV_f \cdot PV_0 / (PV_0 - (PV_f - PV_0) \cdot \exp(-kt))$	3	Robertson (1908)
Richards	$f(t) = PV_f \cdot PV_0 / (PV_0^n + (PV_f^n - W_0^n) \cdot \exp(-kt))^{1/n}$	4	Richards (1959)
von Bertalanffy	$f(t) = (PV_f^n - (PV_f^n - PV_0^n) \cdot \exp(-kt))^{1/n}$	4	von Bertalanffy (1957)
Bridges	$f(t) = PV_0 + PV_f \cdot (1 - \exp(-kt^n))$	4	Bridges <i>et al.</i> (1986)
Lopez	$f(t) = (PV_0 \cdot K^n + PV_f \cdot t^n) / (K^n + t^n)$	4	Lopez <i>et al.</i> (2000)

<sup>1</sup>  $PV_0$ : PV initial (kg);  $PV_f$ : PV final (kg);  $K$ : âge (jour) auquel l'animal attend approximativement la moitié de son poids maximal;  $k$ : constante de taux ( $\text{jour}^{-1}$ );  $n$ : exposant sans dimension.

seulement les valeurs moyennes des variables mais également leurs variations. Cela implique que les variables du modèle, ou du moins certaines d'entre elles, sont décrites chacune non pas par une valeur unique mais par une loi de distribution déterminée à partir de données bibliographiques ou expérimentales. Cette loi de distribution permet d'effectuer des tirages pseudo-aléatoires d'une simulation à l'autre ou au cours de la simulation pour obtenir la valeur utilisée pour les calculs. Ces modèles stochastiques permettent alors de reproduire l'incertitude d'une mesure par le caractère aléatoire du résultat et par exemple de fournir un intervalle de confiance autour de leur résultat.

### **1.2.2 Modélisation empirique de l'évolution du poids avec l'âge**

La modélisation de la croissance est un sujet d'étude depuis très longtemps. Ainsi, le modèle de Gompertz a été proposé en 1825 pour décrire la croissance d'une population. La plupart des modèles de croissance, notamment chez le porc, utilisent une fonction de croissance comme point de départ. Cette fonction détermine l'évolution du PV de l'animal au cours du temps, ainsi que son potentiel de croissance, c'est-à-dire le taux maximal de croissance que l'animal peut atteindre dans des conditions non limitantes. Ce potentiel peut ensuite être utilisé pour prédire la croissance attendue selon les conditions de croissance. Dans le cas des modèles empiriques, différentes équations ont été utilisées pour décrire l'évolution du PV avec le temps. Elles peuvent être groupées en différentes catégories : celles qui représentent un comportement de rendement décroissant (ex. : monomoléculaire), celles avec un comportement sigmoïde avec un point d'inflexion fixe (ex. : Gompertz, logistique), et celles englobant le comportement sigmoïde avec un point d'inflexion flexible (ex. : Richards, Bridges, Lopez, von Bertalanffy). Les différentes fonctions citées ici sont décrites dans le Tableau 9. La fonction de Gompertz a été très étudiée et a été favorisée par de nombreux modélisateurs (ex. : Emmans et Kyriazakis, 1999). Wellock *et al.* (2004a) ont décrit et discuté quinze équations dont celles décrites dans le Tableau 9 (à l'exception de l'équation monomoléculaire). Pour juger de la pertinence de l'utilisation des différentes équations, ces auteurs se sont basés sur certains critères dont les principaux sont les suivants :

- La fonction doit comporter un nombre limité de variables, selon le principe du rasoir d'Ockham (Thorburn, 1915) qui privilégie la parcimonie dans la construction des modèles,
- Une préférence est donnée aux équations dont les variables ont un sens biologique. Ceci permet d'attribuer les valeurs d'une variable à un type de porc et de relier les variations des variables à un facteur biologique,



- Les équations doivent permettre d'exprimer le taux de croissance (donc la dérivée du PV selon le temps) en fonction de l'état, donc du PV. Ainsi le PV, et non uniquement le temps, est la force motrice de la croissance. Le temps étant commun à tous les individus, la différence de croissance ne provient donc plus uniquement de la valeur des variables de l'équation, mais de l'état de l'animal à un temps donné. France et Thornley (1984) parlent à ce sujet de formalisme « taux-état » (rate-state formalism) où « le taux d'un processus est fonction de l'état du système »,

- Une préférence est donnée aux fonctions avec un point d'inflexion, c'est à dire avec une taille pour laquelle le taux de croissance atteint un maximum. Ceci permet de représenter l'augmentation puis la diminution du taux de croissance avec le PV et implique un comportement sigmoïde de l'évolution du poids en fonction du temps.

Selon ces critères et au vu de l'ajustement aux données utilisées, Wellock *et al.* (2004a) concluent que la fonction de Gompertz est la plus appropriée pour décrire le potentiel de croissance, notamment par son faible nombre de variables ( $n = 3$ ) qui présentent une signification biologique et qui peuvent être estimées assez simplement à partir de données obtenues dans des conditions non limitantes ou proches de l'être. La fonction de Gompertz permet également, selon l'écriture de sa dérivée, d'exprimer le taux de croissance en fonction du PV (état) et du temps (dérivée 1 ci-dessous proposée par France et Thornley, 1984), ou seulement du PV (dérivée 2, proposée par van Milgen *et al.*, non publié) :

$$\text{Dérivée 1 : } dPV / dt = k \cdot PV \cdot \log (PV_f / PV)$$

$$\text{Dérivée 2 : } dPV / dt = PV \cdot k \cdot \log (PV_f / PV_0) \cdot \exp(-k \cdot t)$$

où  $PV_0$  est le PV initial,  $PV_f$  le PV final, et  $k$  une constante de taux. La conclusion sur le choix de la fonction à utiliser varie cependant selon les auteurs, notamment selon les équations comparées. Andersen et Pedersen (1996) ont ainsi préféré utiliser des polynômes pour décrire l'évolution du PV. Schulin-Zeuthen *et al.* (2008) ont comparé la fonction de Gompertz aux fonctions de Schumacher et de Weibull (non montrées ici) et concluent à un meilleur ajustement de la fonction de Weibull aux données utilisées. Schinckel *et al.* (2006) et Strathe *et al.* (2010) concluent quant à eux sur l'obtention de meilleurs ajustements avec la fonction de Lopez. Comme discuté par Strathe (2009), les écarts d'ajustements entre fonctions peuvent se révéler faibles et les différences de conclusions entre études peuvent provenir en partie de la nature des données utilisées (gamme de PV couverte, fréquence des données). Selon les données disponibles, des fonctions à trois ou quatre variables, avec ou sans flexibilité du point d'inflexion, peuvent ainsi être les plus adéquates. Strathe (2009) conclue ainsi qu'il n'y a pas de fonction de croissance universelle et que différentes fonctions peuvent être utilisées selon le jeu de données et les objectifs de modélisation.

**Tableau 10 - Exemples d'équations ajustées à des données expérimentales pour prédire l'ingéré volontaire (kg/j ou MJ/j) (d'après Black, 2009)**

Forme de l'équation <sup>1</sup>	Référence
$a + b \cdot PV$	Tullis (1982)
$a + b \cdot PV + c \cdot PV^2$	NRC (1998, 5-15 kg), Quiniou <i>et al.</i> (2000)
$a + b \cdot PV + c \cdot PV^2 + d \cdot PV^3$	NRC (1998)
$a \cdot (1 - \exp(-b \cdot PV))$	ARC (1981), NRC (1998)
$a \cdot PV^b$	Cole <i>et al.</i> (1967), ARC (1981), Whittemore (1983a)
$a \cdot \exp(-b \cdot PV - c / PV)$	Ramaekers (1996)
$a + b \cdot \ln(PV + c)$	Eissen <i>et al.</i> (1999)
$y_m \cdot \exp(-\ln(2) \cdot PV_n / PV) \cdot ((PV - PV_m) / (PV_n - PV_m))^2$	TMV (1994)
$a / (1 + \exp(b - c \cdot PV))$	Lorenzo-Bermejo <i>et al.</i> (2000, 2003a)

1. *a, b, c et d* : constantes ; *PV* : poids vif (kg) ; *PV<sub>m</sub>* : poids vif quand le maximum d'ingéré est atteint ; *PV<sub>n</sub>* : poids vif à la moitié du maximum de l'ingéré ; *y<sub>m</sub>* : ingéré maximum attendu ; *X* : durée depuis le début des mesures.

La modélisation de la croissance uniquement comme une fonction de l'état ou du temps est quelque peu limitée selon les nutritionnistes comme l'expliquent van Milgen *et al.* (2012). Parks (1982) considère ce type de modèle comme un modèle uniquement de sortie et a développé une théorie sur la relation entre quantité ingérée cumulée et gain de PV. Il considère ainsi la croissance comme le résultat de changements d'efficacité alimentaire et de quantité ingérée :

$$dPV / dt = (dPV / dQI) \cdot (dQI / dt)$$

où  $dPV / dQI$  est l'efficacité alimentaire et  $dQI / dt$  l'ingéré. Une équation spécifique pour l'efficacité alimentaire sera nécessaire afin de prendre en compte une efficacité qui devient proche de 0 quand l'animal approche de la maturité. Deux écoles de pensée existent concernant la relation entre croissance et ingéré. L'équation ci-dessus indique que l'animal grossit car il mange (approche « push »). L'équation pourrait aussi être retournée et l'ingéré considéré comme le résultat d'une croissance attendue, ce qui correspond à l'approche « pull ». La relation entre ingéré et croissance est donc très importante et très régulée.

### 1.2.3 Modélisation empirique de l'ingéré

Les équations publiées pour prédire l'ingéré des porcs en croissance à partir de données expérimentales ont été revues et discutées notamment par Whittemore *et al.* (2001) et Black (2009). Les équations utilisées présentent des formes diverses : régressions linéaires à cubiques, formes exponentielles ou logistiques... (Tableau 10). L'ingéré peut être exprimé en fonction du PV, comme les exemples présentés dans le Tableau 10, mais également en fonction de l'âge (Kyriazakis et Emmans, 1999 ; Whittemore *et al.*, 2001). Cependant, Whittemore *et al.* (2001) expliquent qu'il est illusoire de prédire l'ingéré en fonction de l'âge, notamment dans le contexte de la production commerciale où les porcs croissent à des taux différents et sont de PV très différents pour un même âge. Whittemore *et al.* (2001) proposent également des équations permettant de décrire l'ingéré en tenant compte, en plus du PV, de facteurs tels que la température d'élevage, la capacité de digestion de l'animal, la composition ou les caractéristiques physiques de l'aliment.

Comme résumé par Kyriazakis et Emmans (1999), Whittemore *et al.* (2001) et Black (2009), l'utilisation des différentes équations proposées dépend de plusieurs points. Les équations simples de type linéaire ont une application pratique mais sont limitées aux conditions d'obtention des données (gamme de PV plus ou moins restreinte) et toute extrapolation en dehors de ces conditions peut se révéler hasardeuse. Les équations les plus complexes peuvent s'appliquer à des jeux de données spécifiques mais leur utilisation générale peut



être limitée. Les équations de type exponentiel ( $a(1 - \exp(-b \cdot PV))$  ou  $a \cdot PV^b$ ) sont utilisées dans nombre de modèles actuellement (ex. : NRC, 1998 ; van Milgen *et al.*, 2008). Elles permettent de représenter la réponse linéaire ou curvilinéaire - plateau de l'ingéré en fonction du PV. Aucune de ces équations ne prend en compte les mécanismes sous-jacents régulant l'ingéré ou des facteurs tels que la composition de l'aliment ou des facteurs environnementaux. De ce fait, les valeurs déterminées pour ces variables ne peuvent pas être généralisés à d'autres conditions ou d'autres génotypes. Kyriazakis et Emmans (1999) remarquent également que ces équations peuvent ne pas pouvoir tenir compte d'une valeur maximale puis d'une diminution de l'ingéré avec l'évolution du PV. Pour répondre à ce constat, la fonction gamma de l'entretien a été proposée récemment par van Milgen *et al.* (2008). Cette fonction exprime l'ingéré volontaire relativement au besoin énergétique d'entretien et permet de décrire une diminution de l'ingéré avec l'augmentation du poids. Elle peut être écrite comme suit :

$$\text{ingéré} = a (b \cdot PV \cdot \exp(-b \cdot PV) + 1) \cdot c \cdot PV^{0,60}$$

Comme pour le PV, la prédiction de l'ingéré à partir d'équations empiriques est donc possible avec différentes équations selon les objectifs recherchés et les données utilisées.

#### **1.2.4 Les modèles mécanistes de la croissance du porc**

Depuis les années 1970, différents modèles pour la plupart dynamiques, déterministes et plus ou moins complexes de la croissance du porc ont été développés en intégrant à la fois des équations empiriques et des représentations mécanistes des fonctions physiologiques et/ou biochimiques de l'animal. Ces modèles, leurs concepts et leurs équations ont été résumés et comparés par plusieurs auteurs, notamment Bastianelli et Sauvart (1997), Ferguson (2006), Kyriazakis et Sandberg (2006), Luiting et Knap (2006) ou van Milgen *et al.* (2012).

##### *1.2.4.1 Le premier modèle nutritionnel de croissance du porc*

Whittemore et Fawcett (1974) ont proposé un des premiers modèles nutritionnels décrivant la croissance du porc. Leur objectif était de permettre la prédiction de la direction et de l'amplitude de la réponse de porcs en croissance à différents niveaux d'ingestion d'énergie et de protéines. Les principes utilisés par ces auteurs sont à la base de nombreux autres modèles.

Dans le modèle de Whittemore et Fawcett (1974), l'animal est caractérisé par quatre compartiments : les protéines, les lipides, l'eau et les minéraux (cendres). Comme l'eau et

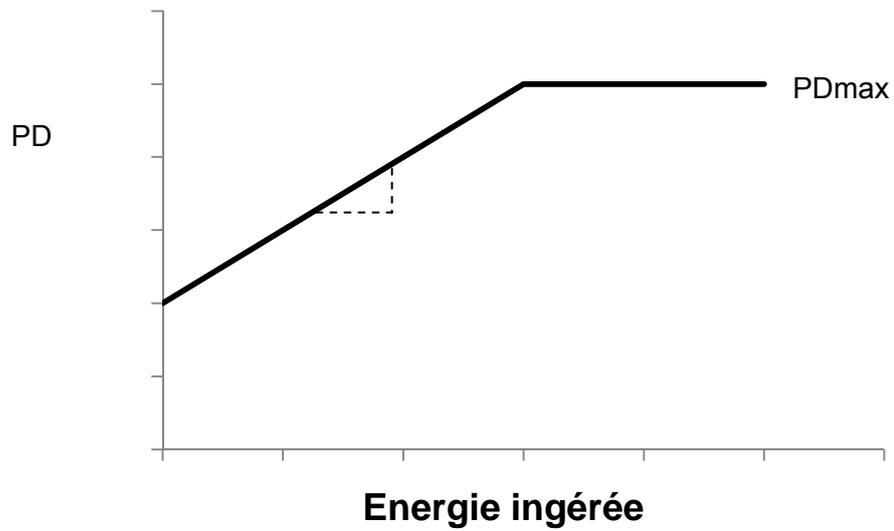


Figure 17 - Relation linéaire plateau entre énergie ingérée et dépôt protéique (PD) chez le porc en croissance, comme proposé par Whittemore et Fawcett (1976). La pente de la partie linéaire dépend d'un rapport minimal entre dépôt lipidique et dépôt protéique. PDmax : limite maximale du dépôt protéique

les minéraux sont supposés être reliés aux protéines par des relations déterminées empiriquement, le système est défini par les compartiments protéiques et lipidiques. A l'aide du modèle, on peut calculer le dépôt de protéines (PD) et le dépôt de lipides (LD).

Le dépôt de protéines est déterminé selon que l'apport alimentaire de protéines est limitant ou non. En condition d'apport protéique limitant, le dépôt de protéines est le produit de l'ingéré et de l'efficacité brute d'utilisation des protéines qui décroît avec l'augmentation du poids. En condition d'excès protéique par rapport au besoin, Whittemore et Fawcett (1974) considèrent que le dépôt de protéines est constant (110 g/j) entre 20 et 100 kg de PV. Le dépôt de lipides est calculé en considérant d'une part l'énergie ingérée et, d'autre part, le besoin en énergie pour l'entretien (exprimé par une fonction  $a \cdot PV^{0,75}$  donc selon le poids métabolique) et les coûts énergétiques de dépôts des protéines et des lipides. Le dépôt de lipides est ici considéré comme un puits d'énergie, toute l'énergie non utilisée pour l'entretien ou le dépôt de protéines étant déposée sous forme de lipides. Le gain de muscle et de gras est ensuite calculé respectivement à partir des dépôts de protéines et de lipides. Le gain total de PV est ensuite calculé comme la somme des gains de tissus, du gain de minéraux et des contenus du tube digestif.

Whittemore et Fawcett (1976) ont affiné leur modèle initial notamment car il n'était pas flexible par rapport à l'entretien et le dépôt protéique, et que la qualité de la protéine n'était pas prise en compte. Pour intégrer le renouvellement (turnover) protéique, ces auteurs ont alors représenté spécifiquement la synthèse protéique, permettant de tenir compte du coût énergétique de la synthèse et du turnover des protéines. Ils ont inclus également la masse protéique corporelle, et non plus seulement le poids métabolique, dans le calcul du besoin énergétique d'entretien. Le coût énergétique du turnover protéique intervient donc dans le coût énergétique de l'entretien et dans le coût de dépôt protéique.

Whittemore et Fawcett (1976) ont également inclus la qualité de la protéine (c'est à dire le profil en AA) comme facteur potentiellement limitant du dépôt protéique. Le dépôt protéique réel est ainsi considéré comme dépendant de l'apport en protéines disponibles, du dépôt protéique maximal (PD<sub>max</sub>) et de l'apport énergétique. Ceci change l'idée que les lipides sont considérés uniquement comme un puits d'énergie, et en condition d'apport limitant en énergie, le dépôt lipidique mais aussi le dépôt protéique sont affectés.

Whittemore et Fawcett (1976) ont établi une relation connue sous le nom de relation linéaire-plateau entre énergie ingérée et dépôt protéique (Figure 17). Un ratio minimum entre dépôts lipidiques et protéiques, supposé égal à 1 par les auteurs, détermine la partie linéaire de la

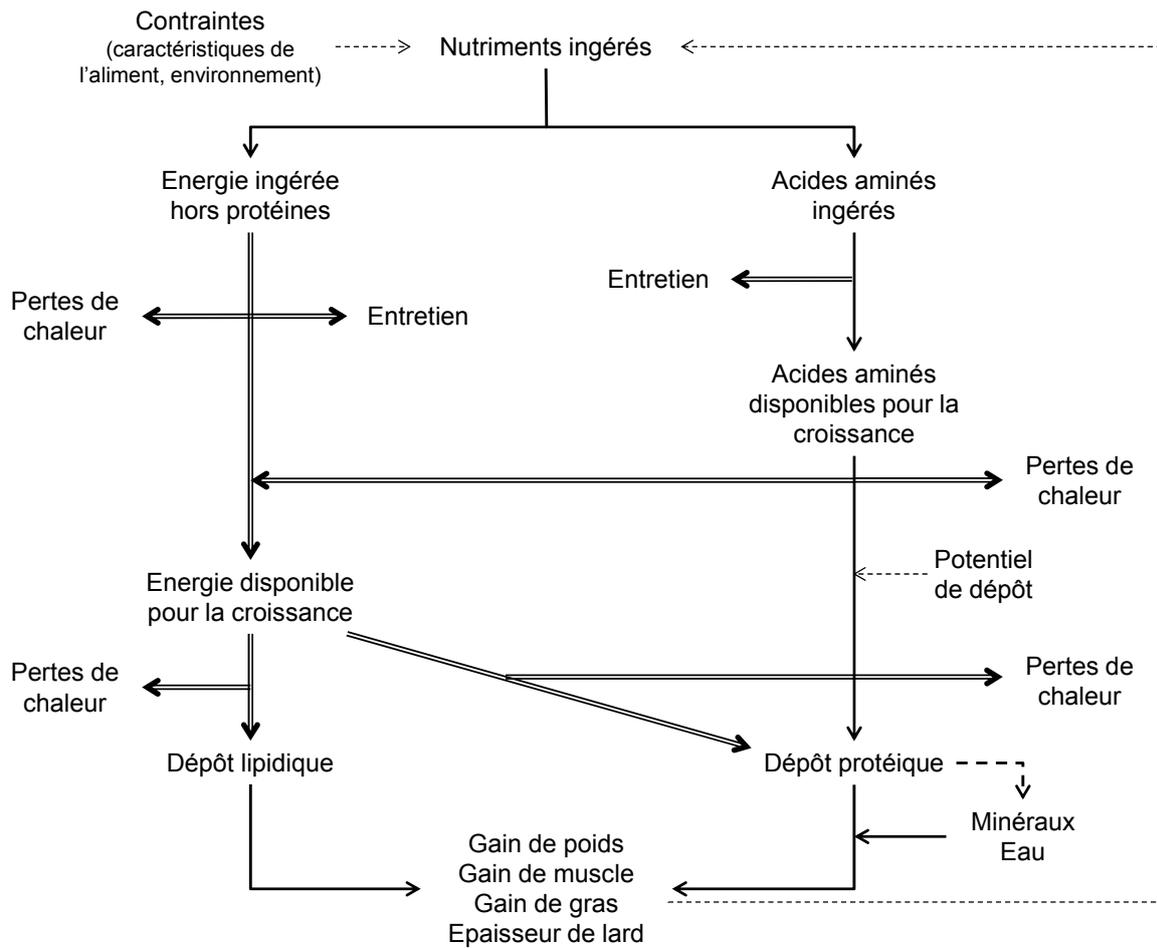


Figure 18 - Représentation générale des concepts de répartition des nutriments utilisés dans la plupart des modèles de croissance du porc, d'après de Lange (1995) et van Milgen *et al.* (2012). Les nutriments ingérés sont répartis entre dépôt de protéines et dépôt de lipides, à partir desquels le poids (via le gain de poids) et les caractéristiques de carcasses sont calculés (→ flux de matière, ⇒ flux d'énergie, --> relations)

relation. Ceci suppose qu'un porc dépose toujours au minimum 1 g de lipides pour un dépôt d'1 g de protéines, indépendamment de son génotype de l'apport en AA. Le plateau de la relation entre dépôt protéique et énergie ingérée est le point de départ d'un concept très largement répandu depuis dans les modèles de croissance et déjà présenté en partie précédemment (voir 1.1.2.2). En effet, ce plateau indique qu'il existe une limite supérieure au dépôt de protéines (PDmax), variable selon le génotype et le sexe. L'apport supplémentaire d'énergie au-delà de l'apport minimal nécessaire pour atteindre le PDmax résulte non pas en un dépôt supplémentaire de protéines mais uniquement de lipides.

Whittemore (1983b) a affiné encore le modèle principalement sur deux aspects. Le modèle précédent supposait une efficacité de 100% pour l'utilisation des protéines si le profil en AA correspondait à celui de la protéine idéale. L'évolution de ce modèle prenait en compte une efficacité allant de 85 à 100%. Whittemore (1983b) a proposé également que le ratio minimal entre dépôts de lipides et de protéines dépende du type de porc.

Les concepts de base des modèles de Whittemore et Fawcett (1974, 1976) peuvent être résumés comme suit (van Milgen *et al.*, 2012) :

- La croissance chez le porc est déterminée en modélisant les dépôts de lipides et de protéines ; le PV, les dépôts d'eau et de minéraux, et les masses de muscle et de gras sont déterminés à partir des masses corporelles de protéines et de lipides,
- Il y a une limite maximale au dépôt protéique chez les porcs en croissance ; cette limite est constante durant la croissance,
- Il y a un ratio minimal entre dépôts de lipides et de protéines,
- Le dépôt protéique réel est déterminé par les deux facteurs précédents ainsi que par la qualité des protéines ingérées, c'est-à-dire l'apport en AA essentiels,
- La quantité ingérée est une entrée du modèle ; l'énergie non utilisée pour l'entretien ou le dépôt protéique sert pour le dépôt lipidique.

#### 1.2.4.2 Les modèles actuels de croissance du porc

Les principes décrits ci-dessus ont été repris et développés par nombre de modèles déterministes, notamment Black *et al.* (1986), Moughan *et al.* (1987), Ferguson *et al.* (1994), de Lange (1995), Emmans (1997), Wellock *et al.* (2003a), van Milgen *et al.* (2008) ou encore Yoosuk *et al.* (2011). Ces modèles reposent principalement sur les concepts de répartition des nutriments énoncés par Whittemore et Fawcett (1974, 1976) et résumés dans la Figure 18.



Différentes évolutions ont été apportées à ces concepts. Ainsi, les besoins en énergie pour l'entretien sont calculés selon une fonction puissance du PV (ex. : van Milgen *et al.*, 2008) ou du poids de protéines corporelles (ex. : Black *et al.*, 1986). L'énergie est exprimée dans la majorité des cas en EM, exceptés van Milgen *et al.* (2008) qui utilisent l'EN. En ce qui concerne l'utilisation des protéines, l'ingéré protéique est défini depuis Black *et al.* (1986) par le contenu en protéines et en AA essentiels digestibles iléaux de l'aliment. L'entretien protéique est exprimé en fonction du poids de protéines corporelles (ex. : Wellock *et al.*, 2003a) ou du poids métabolique (ex. : de Lange, 1995). Les différents constituants de l'entretien protéique (turnover protéique, pertes tégumentaires, pertes endogènes avec expression selon le cas en digestibilité apparente ou standardisée) peuvent également être différenciés et calculés en fonction du poids métabolique ou de l'ingéré (ex. : van Milgen *et al.*, 2008, Tableau 4). Ce calcul d'entretien est effectué pour les protéines totales (ex. : Wellock *et al.*, 2003a) ou pour chaque AA essentiel (ex. : de Lange, 1995 ; van Milgen *et al.*, 2008). Enfin, le gain de poids est calculé à partir des gains de protéines, de lipides, de minéraux et d'eau dans la plupart des modèles, à l'exception de van Milgen *et al.* (2008) qui n'intègrent pas les dépôts en eau et en minéraux. D'autres évolutions concernant le PDmax, la relation entre dépôt de protéines et de lipides et la modélisation de l'ingéré sont détaillées ci-dessous.

### **Dépôt protéique maximal**

Comme Whittmore et Fawcett (1976), Moughan *et al.* (1987) ont supposé que le PDmax était variable entre génotypes et sexes, mais constant durant la période de croissance. Emmans et Kyriazakis (1997) ont critiqué cette approche notamment parce que la croissance d'un animal qui arrive à maturité doit s'arrêter et donc le dépôt protéique doit devenir nul. Black *et al.* (1986) ont proposé que le PDmax varie suivant une fonction qui dépend du PV et du degré de maturité :

$$PD_{max} = k \cdot PV^d \cdot (P_m - P_t) / P_m$$

où  $P_t$  est le poids de protéines corporelles,  $P_m$  le poids de protéines à maturité, et  $k$  et  $d$  des constantes. Cette équation ressemble aux fonctions de Richards et de Gompertz (voir § 1.2.4, Tableau 9). Cette approche a également été critiquée par Emmans et Kyriazakis (1997) pour deux raisons. D'une part, la relation entre PV et PDmax implique que l'augmentation de masse lipidique entraîne une augmentation de PV et donc de PDmax. D'autre part, l'équation nécessite de connaître trois variables ( $k$ ,  $d$  et  $P_m$ ) pour caractériser un génotype. Emmans et Kyriazakis (1997) ont proposé de décrire l'évolution du PDmax en

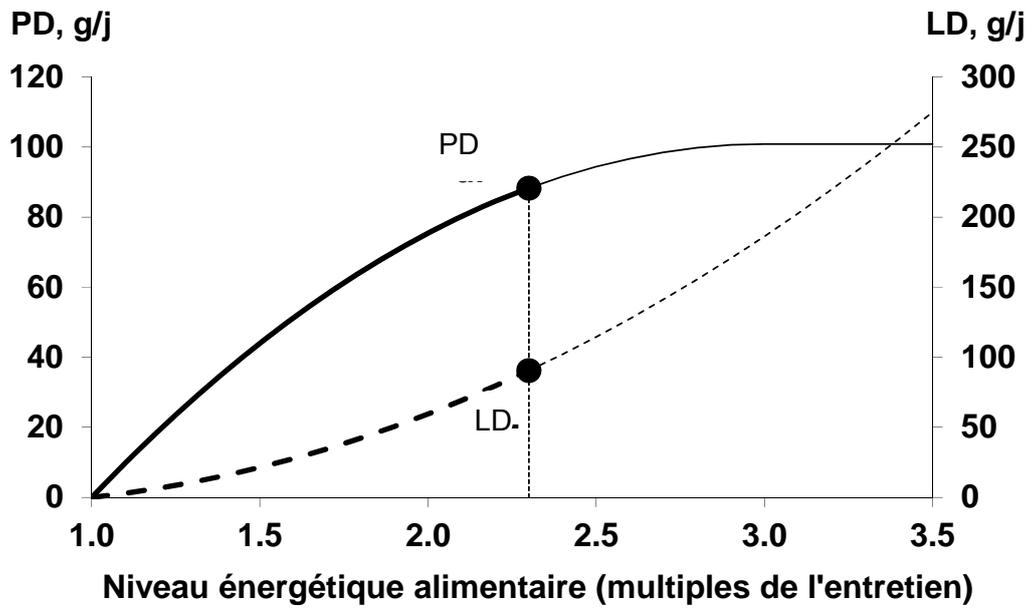


Figure 19 - Relation curvilinéaire-plateau entre dépôt protéique (PD, ligne pleine), dépôt lipidique (LD, pointillés) et énergie ingérée chez le porc en croissance (van Milgen *et al.*, 2008). Les points indiquent les PD et LD réalisés par un animal nourri à volonté. Le positionnement de ces points sur la courbe change durant la croissance

fonction de la masse protéique  $P_t$  selon une fonction de Gompertz, comme déjà fait par Ferguson *et al.* (1994) :

$$PD_{max} = B \cdot P_t \cdot \ln(P_m / P_t)$$

où B représente la précocité. Cette équation est utilisée dans les modèles actuels et présente l'avantage de ne nécessiter que deux variables pour caractériser un génotype.

### **Réponse à l'apport énergétique et relation entre dépôt protéique et dépôt lipidique**

La relation entre dépôt protéique et apport énergétique illustrée à la Figure 17 a été utilisée dans la plupart des modèles de croissance cités auparavant. Son application varie cependant concernant la répartition de l'énergie entre protéines et lipides en situation d'apport énergétique insuffisant. Whittemore et Fawcett (1976) proposaient un ratio minimal constant entre dépôt de lipides et de protéines pour calculer le dépôt lipidique quand  $PD_{max}$  n'était pas atteint. Black *et al.* (1986) ont proposé que ce ratio varie durant la croissance. de Greef et Verstegen (1995) ont proposé un ratio marginal minimal entre dépôt de lipides et de protéines. de Lange (1995) a proposé une autre variante avec un ratio constant entre masse lipidique et masse protéique. Ces différentes approches sont détaillées et discutées par Kyriazakis et Sandberg (2006) et Luiting et Knap (2006), et ne sont pas développées ici. Il est toutefois intéressant de noter le concept introduit par van Milgen *et al.* (2008). Ces auteurs ont proposé de remplacer l'approche linéaire-plateau par une approche curvilinéaire-plateau appliquée à l'énergie ingérée au-delà de l'énergie utilisée pour l'entretien (Figure 9). Dans cette relation, les dépôts de protéines et de lipides sont égaux à 0 quand l'énergie ingérée correspond au besoin d'entretien. Ce concept est fondé sur l'hypothèse que les dépenses énergétique pour l'entretien sont inévitables et que la répartition entre dépôts de protéines et lipides intervient pour des apports énergétiques supérieurs au besoin d'entretien. Un apport supplémentaire d'énergie augmente à la fois le dépôt de protéines et de lipides, avec une réponse du dépôt lipidique d'autant plus important que le dépôt protéique est proche du  $PD_{max}$ . Ce concept a été choisi par les auteurs pour limiter le nombre de variables à utiliser (selon le principe du rasoir d'Occam évoqué plus haut), l'application de ce concept évitant de devoir fournir une valeur d'ordonnée à l'origine pour la relation entre dépôts de protéines et de lipides avec l'énergie.

### **Modélisation de l'ingéré et dépôt de lipides**

Dans les modèles de croissance du porc, l'ingéré peut être considéré comme une entrée du modèle (approche « push ») ou une sortie du modèle (approche « pull »). Parmi les modèles suivant l'approche « push », ceux de Pomar *et al.* (1991), du NRC (1998), et de de Lange



(1995) modélisent l'ingéré *ad libitum* par une fonction :

$$\text{ingéré} = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot \text{PV}))$$

Moughan *et al.* (1987) expriment l'ingéré en un pourcentage de  $\text{PV}^{0.75}$ . van Milgen *et al.* (2008) proposent différentes équations, dont les relations ci-dessus ainsi qu'une relation linéaire et une fonction gamma, toutes selon le PV. Cette approche présente l'inconvénient de virtuellement ne pas présenter de limite à l'ingéré. Comme le dépôt de lipides est considéré comme un puits d'énergie, l'énergie non utilisée pour l'entretien et le dépôt protéique est déposée sous forme de lipides virtuellement de façon illimitée, excepté par l'ingéré à maturité ou par une modélisation de l'ingéré qui tend vers l'entretien à maturité.

Dans leurs modèles, Black *et al.* (1986), Ferguson *et al.* (1994), Emmans (1997), Wellock *et al.* (2003a) ou Yoosuk *et al.* (2011) appliquent une approche « pull » où l'ingéré attendu est prédit pour satisfaire les besoins en termes d'entretien énergétique ou protéique, de dépôt de protéines attendu, de dépôt de lipides attendu ou encore de dépôt de minéraux. Dans ces modèles, une courbe est utilisée pour décrire le potentiel de dépôt protéique mais également pour le dépôt lipidique, généralement selon une fonction de Gompertz de la forme :

$$\text{LD} = P_t \cdot L_m/P_m \cdot f \cdot (P_t / P_m)^{f-1}$$

ou  $P_t$  est le poids de protéines corporelles,  $P_m$  le poids de protéines à maturité,  $L_m$  le poids de lipides à maturité, et  $f$  une constante.

La description d'un génotype dans ces modèles comprend ainsi les variables  $B$  et  $P_m$  issus du dépôt protéique et le ratio  $L_m/P_m$ . L'ingéré effectif est calculé à partir de l'ingéré prédit auquel sont appliquées différentes contraintes telles que la capacité d'ingestion de l'animal, les caractéristiques de l'aliment (composition en nutriments, densité, capacité de rétention en eau) ou encore l'environnement thermique (Figure 18). Les dépôts effectifs de protéines et de lipides sont alors calculés en fonction de l'ingéré effectif. Avec cette approche, quand l'animal tend vers la maturité, les dépôts de protéines et de lipides tendent vers 0 et l'ingéré tend à couvrir uniquement les dépenses énergétiques d'entretien.

#### 1.2.4.3 Des nutriments aux tissus

Dans les modèles présentés ci-dessus, la représentation de l'animal est réalisée essentiellement par des masses de protéines et de lipides corporels. D'autres modèles plus mécanistes ont été développés pour tenir compte de la complexité de la transformation des nutriments alimentaires tels que les lipides, les protéines, les sucres, ou les fibres. Quelques exemples sont évoqués ici succinctement. Pomar *et al.* (1991) ont développé un modèle incluant la quantité d'ADN corporelle et des mécanismes d'accrétion d'ADN, de



synthèse et de dégradation protéique pour décrire les dépôts protéiques et lipidiques. Lovatto et Sauvant (2003) reprenant les principes de Danfaer (1991), ont considéré différents compartiments anatomiques (carcasse, viscères, plasma) et de nutriments (par exemple les AA individuels, le glucose et les acides gras non estérifiés). Ces auteurs ont considéré des régulations à court et long terme de l'anabolisme et du catabolisme des tissus pour décrire le rôle des nutriments dans la croissance. Concernant la composition corporelle, Quiniou et Noblet (1995) ont développé des équations de prédiction de la composition anatomique corporelle (muscle, gras, os, carcasse, ...) à partir de la composition chimique corporelle (protéines et lipides). Halas *et al.* (2004) ont proposé un modèle décrivant la répartition des nutriments digestibles (dont AA, amidon, sucres et acides gras) vers les protéines et lipides corporels *via* le métabolisme intermédiaire. Ceci leur permet de prédire les compositions corporelles chimiques et anatomiques (muscle, organes, os et gras dorsal) en tenant compte des différences de composition chimique et de métabolisme entre tissus. Enfin, Lizardo *et al.* (2002) ont proposé un modèle de répartition des lipides et acides gras corporels entre lipides sous cutanés, lipides inter ou intramusculaires et lipides périphériques, donc entre tissus.

Le développement de modèles très mécanistiques se heurte à des difficultés telles que l'utilisation de différentes échelles de temps, de la minute à la journée voire l'année, comme dans le modèle de Lovatto et Sauvant (2003). Ces approches sont cependant nécessaires pour poser les bases de futurs modèles de recherches.

**Les modèles présentés (§ 1.2.4) permettent de prédire la croissance des porcs en fonction des apports nutritionnels et de déterminer les nutriments limitants et les besoins des animaux. Même si de nombreux modèles ont été proposés, la plupart sont destinés à la recherche. Seuls les modèles TMV (1991), NRC (1998), et InraPorc (van Milgen *et al.*, 2008) ont été mis à disposition sous forme d'outils logiciels à large distribution. Quelques autres ont servi à développer des outils à diffusion professionnelle limitée.**

### **1.2.5 L'intégration de la variabilité en modélisation**

La prise en compte de la variabilité des besoins individuels (voir chapitre suivant) en modélisation de la croissance nécessite des modèles stochastiques. Or les modèles de croissance du porc présentés dans la partie précédente sont déterministes par nature. Des valeurs moyennes des variables utilisées pour caractériser l'animal sont disponibles pour



différents génotypes et sexes, mais elles ne varient pas pendant la simulation ni entre simulations successives et ne prennent pas en compte la variabilité entre individus d'un même groupe. Ces modèles se limitent donc à la description d'un individu moyen et leur paramétrage repose sur l'acquisition d'informations à partir du groupe que cet individu moyen est censé représenter (Pomar *et al.*, 2009a). L'intérêt d'intégrer la variabilité dans les modèles de croissance pour les rendre stochastiques et les modalités adoptées par les modélisateurs pour réaliser cette intégration sont exposés ici en s'appuyant notamment sur la synthèse de Brossard *et al.* (2012).

#### *1.2.5.1 Influence de la variabilité individuelle sur les réponses des modèles de croissance*

Différentes raisons peuvent être avancées pour ne plus considérer uniquement l'individu moyen mais également la variabilité animale dans les modèles. Knap (1995) expose ainsi cinq arguments en faveur de l'intégration de la variabilité pour la simulation et la comparaison de différents stratégies alimentaires ou systèmes de production :

1. La rentabilité des systèmes de production peut être affectée en grande partie par l'ampleur de la variabilité des performances zootechniques,
2. Le passage d'un système de production à un autre peut avoir des effets mineurs sur les niveaux moyens mais des effets importants sur la variabilité. Par exemple, le passage d'une alimentation restreinte à une distribution *ad libitum* en fin de croissance peut présenter un impact faible sur la moyenne du GMQ des animaux mais entraîner une augmentation de la variabilité du GMQ entre animaux. Ceci influencera la distribution des PV de sortie et du TMP, et donc le paiement des carcasses,
3. La connaissance de la variabilité au sein et entre les systèmes est nécessaire pour effectuer des tests statistiques de comparaison entre systèmes ou pratiques de production, la moyenne ne suffisant pas,
4. Les différences entre systèmes peuvent être perçues plus facilement en connaissant la variabilité, notamment en rendant visible les distributions des critères de réponse étudiés,
5. Pour étudier les relations entre les différents critères de performances, il faut créer de la covariance entre ces critères et donc de la variabilité.

Outre ces arguments, il peut être démontré que la réponse moyenne d'une population, par exemple à une stratégie alimentaire, est différente en forme et en ampleur lorsqu'elle est calculée à partir des résultats de tous les individus ou à partir de l'individu moyen (Wellock *et al.*, 2004a). Pomar *et al.* (2003) l'ont illustrée en utilisant un modèle de croissance fondé sur

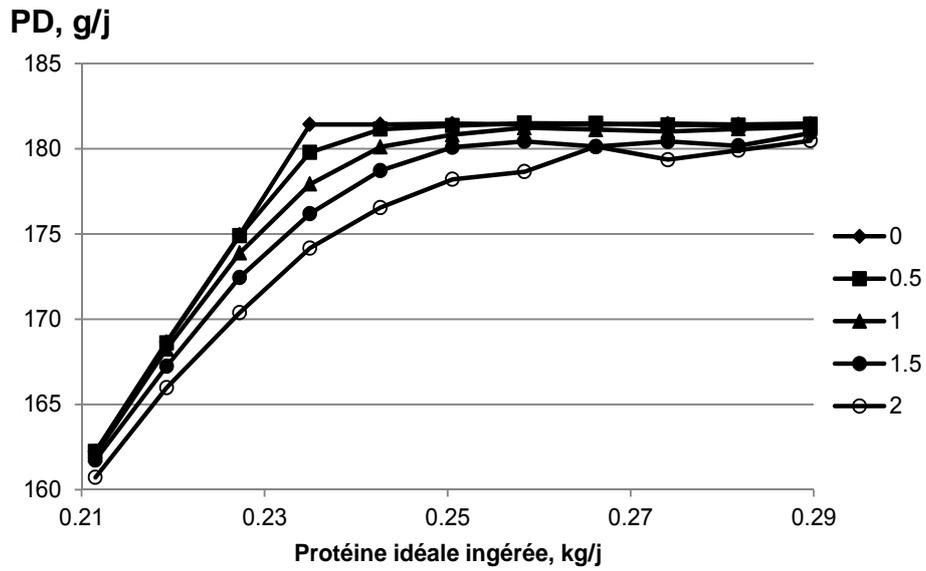


Figure 20 - Effet de la variabilité des variables du modèle entre les individus (0, 0,5, 1,0, 1,5 et 2,0 fois l'écart-type de la population de référence) et de la quantité de protéine idéale ingérée sur le dépôt protéique (PD) moyen journalier pour des populations de porcs de 50 kg de poids vif (d'après Pomar *et al.*, 2003b)

ceux de Knap (1999) et Wellock *et al.* (2003a), le premier étant lui-même inspiré notamment par Moughan *et al.* (1987) et Emmans (1997). La composition du régime et le type génétique du porc sont des entrées du modèle.

Comme décrit au paragraphe 1.2.4., un porc est décrit par trois variables dans ce type de modèle : la masse protéique à maturité ( $P_m$ ), le rapport entre masse lipidique et masse protéique à maturité ( $L_m/P_m$ ), et la précocité  $B$  de la croissance. Pomar *et al.* (2003b) ont utilisé ce modèle pour simuler la croissance de 2500 porcs issus de cinq populations présentant un potentiel génétique moyen de croissance identique, c'est-à-dire des valeurs moyennes identiques pour  $P_m$ ,  $L_m/P_m$ , et une variable  $B^*$  ( $B \cdot P_m^{0,27}$ ), mais distinctes par leur variance génétique. Ferguson *et al.* (1997) ont montré que les corrélations sont très faibles entre  $P_m$ ,  $L_m/P_m$  et  $B^*$ , ce qui n'est pas le cas avec la variable  $B$ . Ce paramétrage permet de générer des valeurs de façon indépendante pour chaque variable à partir de sa moyenne et de son écart-type sans connaissance des covariances entre variables, covariances qui sont difficiles à estimer.

Les populations ont été générées aléatoirement afin d'obtenir pour chaque variable 0, 0,5, 1,0, 1,5 et 2,0 fois la variance génétique estimée d'une population de référence. La population à variance nulle correspond à un animal moyen, unique. La population avec une variance égale à celle de la population de référence correspond à une population d'hétérogénéité normale. Les populations avec des variances inférieures ou supérieures à celle de la population de référence sont respectivement des populations peu ou fortement hétérogènes. En supposant des porcs pesant tous 50 kg PV au début de simulation et une consommation restreinte à 1,9 kg/j, les performances des populations de porcs ont été simulées sur un jour avec onze aliments pour faire varier la quantité de protéine idéale ingérée entre 212 et 290 g/j.

Les résultats montrent que pour la population de variance nulle, la réponse du dépôt protéique à la quantité de protéine idéale consommée est de type linéaire-plateau, selon les principes du modèle (Figure 20). Quand la variabilité augmente, cette réponse devient de type curvilinéaire - plateau avec un maximum atteint pour des valeurs croissantes de protéine idéale ingérée. Ces résultats montrent que le concept de réponse linéaire plateau des individus n'est pas forcément remis en cause par la réponse curvilinéaire d'une population. Pomar *et al.* (2003b) indiquent également que les besoins en protéine idéale pour maximiser le dépôt protéique augmentent avec la variabilité de la population avec des



valeurs de 235, 245 et 251 g/j pour les populations de variances respectives de 0, 0,5 et 1,0 fois la variance de la population de référence. Pour des apports supérieurs, le maximum de dépôt de la population n'est pas atteint.

L'exemple présenté ci-dessus repose sur l'intégration d'une seule source de variabilité entre animaux (potentiel de dépôt protéique). En utilisant le même modèle et les mêmes valeurs de moyenne et d'écart-type pour les variables  $P_m$ ,  $L_m/P_m$  et  $B^*$  que Pomar *et al.* (2003b), Wellock *et al.* (2004b) ont étudié l'effet de l'incorporation d'autres sources de variabilité, comme le PV initial, la température ambiante ou la capacité des animaux à faire face à un stress lié à leur environnement social (défini ici par la taille du groupe, la surface par animal dans la case et au nourrisseur et le mélange entre groupes). Cette dernière source de variabilité a été introduite dans le modèle par une variable EX qui exprime l'intensité du facteur à laquelle l'animal devient stressé et l'étendue de la réduction de performance qui en résulte (Wellock *et al.*, 2003b). Un changement d'une unité de la variable EX induit un écart de 1% par rapport à la performance moyenne. Wellock *et al.* (2004b) ont fait varier l'écart-type soit du poids initial (de 0 à 12 kg), soit de EX (de 0 à 2,5) dans des populations dont la croissance était simulée entre 60 et 100 kg PV. Ces auteurs n'ont pas observé d'effet sur les valeurs moyennes de GMQ ou d'ingéré. Une augmentation de l'écart-type de la quantité ingérée est par contre observée en réponse à la variation du PV initial ou de EX, ainsi qu'une augmentation de la variation du GMQ seulement avec une augmentation de la variation de EX. Ces auteurs ont également observé pour l'individu moyen une réponse de type linéaire-plateau du GMQ à l'augmentation de la surface disponible (de 0,40 à 0,80 m<sup>2</sup> par porc) ou de la température (de 20 à 30°C), alors que la réponse est de forme curvilinéaire - plateau pour la réponse moyenne d'une population de 500 animaux.

Les résultats de Pomar *et al.* (2003b) et Wellock *et al.* (2004b) illustrent l'importance de la prise en compte la variabilité dans les modèles de croissance pour affiner les résultats des simulations. De plus, Wellock *et al.* (2004b) soulignent que cette prise en compte se révèle difficile du fait des différentes sources de variabilité à intégrer et du peu d'informations disponibles actuellement dans la littérature pour en estimer les effets.

#### 1.2.5.2 Méthodes d'intégration de la variabilité dans les modèles

Les méthodes d'intégration de la variabilité entre animaux dans les modèles de croissance du porc reposent toutes sur la connaissance de valeurs moyennes des variables et leur dispersion, voire sur les valeurs individuelles des variables qui caractérisent un animal. Différentes méthodes ont été développées pour déterminer les valeurs de variables telles



que les masses protéiques  $P_m$  et lipidiques  $L_m$  à maturité et la précocité de la croissance  $B$ , variables utilisées dans beaucoup de modèles. Ferguson et Gous (1993) proposent ainsi des abattages en série à différents stades de croissance pour analyser la composition chimique des animaux (protéines, lipides, matières minérales, eau) et ainsi calculer les valeurs recherchées par régression à partir de la fonction de Gompertz. Une estimation de la variabilité individuelle au cours de la croissance peut être obtenue par des mesures répétées de la composition corporelle réalisées *in vivo* pendant la croissance par méthode de mesure aux ultrasons ou tomographie (Schinckel et de Lange, 1996). Des techniques alternatives de modélisation inversée ont également été développées pour obtenir la valeur des variables des modèles (Knap *et al.*, 2003 ; Doeschl-Wilson *et al.*, 2006). Une de ces techniques, dite par optimisation, consiste à ajuster itérativement les variables du modèle en comparant les observations (PV, ingéré, poids de protéines ou lipides corporels...) avec les sorties du modèle afin que les prévisions correspondent au mieux aux observations, l'ajustement pouvant se faire par animal si des données individuelles sont disponibles.

Une fois les valeurs des variables connues, et si possible leur distribution, celles-ci sont utilisées de différentes façons pour inclure la variabilité dans les modèles. Une première méthode consiste à générer des jeux de données de façon aléatoire à partir de la moyenne et de la variance d'un nombre limité de critères. Les variables sont supposées suivre des lois normales indépendantes ainsi que suggéré par Emmans et Fisher (1986). Ferguson *et al.* (1997), Knap (2000), Pomar *et al.* (2003b) ou encore Wellock *et al.* (2004b) utilisent cette méthode en fixant arbitrairement le CV des distributions de chaque variable. Le manque d'information sur les distributions des variables les contraint par ailleurs à ignorer les covariances possibles entre elles (voir § 1.2.5.1).

Ferguson *et al.* (1997) considèrent en effet que le dispositif expérimental est trop lourd et coûteux à mettre en place pour obtenir de façon correcte les CV et corrélations entre variables. Cependant, ne pas considérer les covariances entre variables peut au final conduire à une surestimation de la variabilité simulée. En effet, la variation de critères tels que GMQ et CMJ est en partie indépendante, liée à l'environnement ou à l'individu, et en partie dépendante de la forte corrélation existant entre eux (Pomar *et al.*, 2003a). L'introduction de la variabilité dans les modèles nécessite donc non seulement la connaissance des variances associées aux variables mais aussi des covariances entre variables (Ferguson *et al.*, 1997 ; Kyriazakis, 1999), information qui n'est pas toujours disponible avec les méthodes décrites ci-dessus. D'autres méthodes de modélisation ont été développées pour tenir compte de la covariance entre variables.



Morel *et al.* (2012) utilisent ainsi un modèle dans lequel trois variables permettent de décrire le génotype : le ratio minimal entre lipides et protéines corporels, le PDmax et la proportion d'ED ingérée *ad libitum* par rapport à la courbe NRC (1998). Ces auteurs utilisent dans leurs simulations différentes populations générées en utilisant une matrice de corrélations entre ces trois variables issue de la littérature, différentes valeurs moyennes et en appliquant différents niveaux de CV (le CV et les corrélations permettant le calcul des covariances).

Brossard *et al.* (2009, 2010) ont fondé leur approche de la variabilité sur la génération de populations à partir d'une matrice de variance covariance. Pour obtenir cette matrice, ces auteurs appliquent une approche fondée sur la modélisation inversée (van Milgen *et al.*, 2008). A partir de données individuelles de croissance et d'ingestion, Brossard *et al.* (2009) déterminent ainsi pour chaque individu les valeurs des variables qui permettent de décrire les dynamiques d'ingestion et de croissance. Dans leur modèle, la croissance de chaque animal est caractérisé par trois variables : le poids vif à 65 jours d'âge (PV<sub>65j</sub>), la précocité B<sub>Gompertz</sub> (le dépôt de protéines étant décrit dans ce modèle par une fonction de Gompertz) et le GMQ sur la période 65 jours - 110 kg PV (GMQ<sub>65j-110kg</sub>). L'âge de 65 jours et le poids final de 110 kg PV ont été choisis car ils sont utilisés couramment en élevage comme limites de début et de fin de croissance. La quantité d'aliment ingéré à volonté (QI) est décrite dans cette étude par une fonction puissance du PV :

$$QI = a \cdot PV^b$$

A partir de cette équation, deux variables sont utilisées pour caractériser l'ingéré de chaque animal : la variable de forme de la courbe 'b' et l'ingéré à 50 kg PV (QI50). Brossard *et al.* (2009) ont obtenu ces valeurs pour 192 mâles castrés et femelles issus d'un croisement (LWxLD) x P76, étudiés entre 31 et 113 kg de PV. Cette approche permet d'observer les corrélations entre variables, par exemple les fortes corrélations entre B<sub>Gompertz</sub> et b (-0,63) ou entre QI50 et GMQ<sub>65j-110kg</sub> (0,66). Elle permet également l'obtention de valeurs moyennes et d'une matrice de variance - covariance utilisables pour générer des populations virtuelles. Celles-ci présentent cette fois des caractéristiques identiques à celles de la population d'origine en termes de moyennes et de structure de variabilité mais elles peuvent être de taille différente. Brossard *et al.* (2010) ont ainsi étudié par simulation l'impact de différentes stratégies alimentaires sur les performances d'une population de 1000 porcs générée à partir des données de Brossard *et al.* (2009).

Une dernière approche tenant compte des relations de covariance a été développée par Schinckel *et al.* (2003), et Strathe *et al.* (2009, 2010). Ces auteurs ont développé des



modèles de croissance stochastiques en utilisant des fonctions non linéaires de modèle mixte, intégrant un effet moyen de la population ainsi que des effets aléatoires dus aux animaux. La détermination des valeurs des variables de ces modèles s'appuie sur la modélisation inversée et permet d'obtenir, outre une valeur moyenne, les valeurs individuelles des variables et les structures de corrélations et de variance-covariance entre variables. Ces informations peuvent ensuite être réutilisées pour des simulations stochastiques. Schinckel *et al.* (2003) génèrent ainsi une population en utilisant une loi multi normale entre effets aléatoires liés aux animaux, loi respectant celle obtenue sur les valeurs observées. Ces auteurs incluent ensuite ces effets aléatoires dans leur modèle pour prédire des performances moyennes (ici des caractéristiques de carcasse) et leurs écarts-types.

Ces différentes approches présentent certains avantages mais aussi des limites. Elles permettent de simuler de façon plus réaliste les réponses aux apports alimentaires (voir § 1.2.5.1), cependant l'obtention des valeurs de variables des modèles et plus encore des structures de variance-covariance reste liée à la disponibilité de données. De plus, la question se pose de la possibilité de généralisation de valeurs moyennes ou de structures de variance-covariance obtenues dans une population et des conditions d'élevage données.

**La modélisation est une alternative croissante à l'expérimentation animale. Au début empiriques et statiques, les modèles ont évolué pour être désormais mécanistes et dynamiques. Ils restent pour la plupart déterministes et les efforts se portent sur l'intégration de la variabilité entre individus. Celle-ci est très importante et sa maîtrise est difficile mais représente un enjeu majeur pour la filière porcine, de l'éleveur à l'abatteur.**

### 1.3 LA VARIABILITE CHEZ LE PORC EN CROISSANCE

En dehors des variations dues au type de porc (type génétique et sexuel) qui affecteraient tout un groupe de la même façon, il existe une part de variabilité des performances de croissance entre individus d'un même groupe. Par exemple, au sein d'une population de femelles PP, Saintilan *et al.* (2011) observent un écart-type de 84 g pour le GMQ (en moyenne de 837 g/j). Cette variabilité prend sa source dès la naissance du porcelet avec des PV différents au sein d'une même portée. Les animaux les plus lourds à la naissance ont ensuite tendance à grandir plus vite en maternité, post-sevrage et en engraissement (Quiniou *et al.*, 2002), principalement parce que leur CMJ est plus élevée (Quiniou *et al.*,

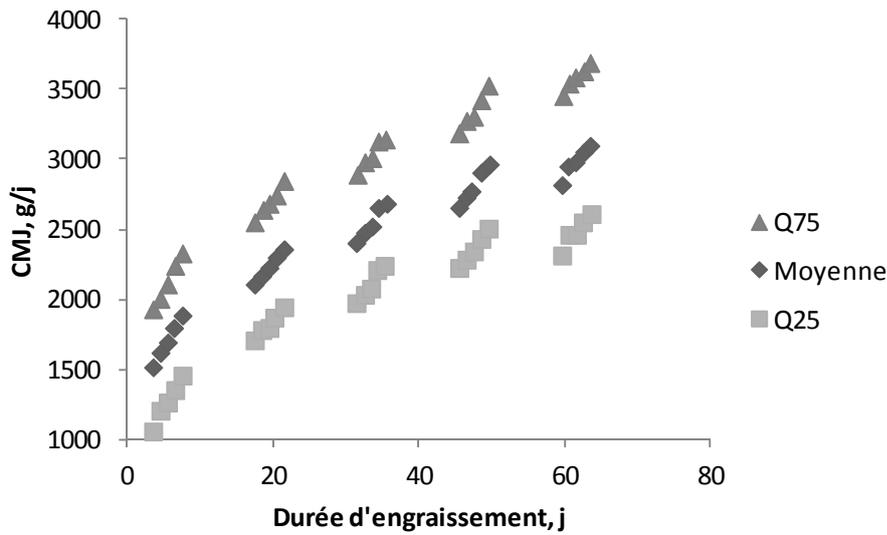


Figure 21 - Consommation moyenne journalière (CMJ) moyenne, premier et dernier quartiles d'un groupe de 2938 porcs issus d'un même croisement et type sexuel (d'après Lorenzo Bermejo *et al.*, 2003b)

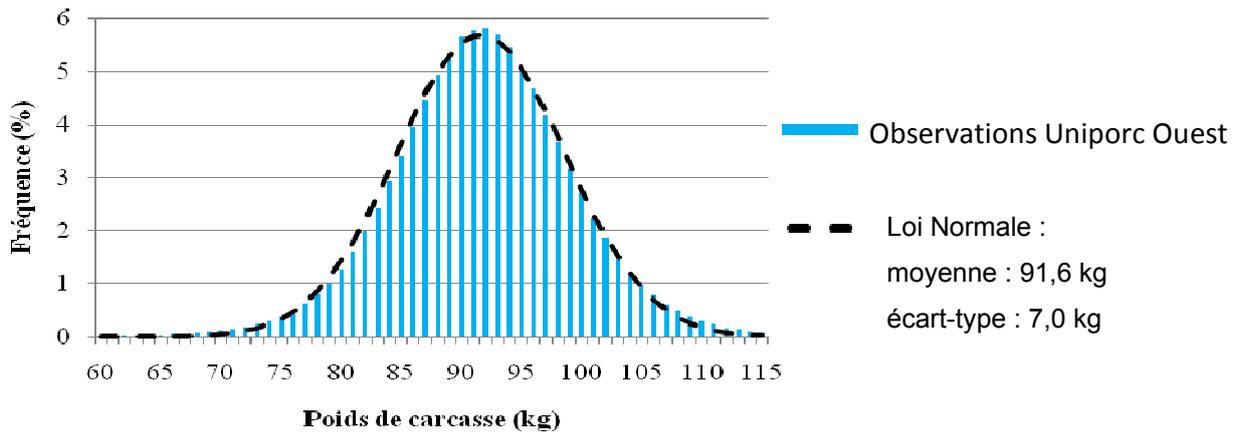


Figure 22 - Distribution des poids de carcasses des 20 millions de porcs abattus et contrôlés en 2011 en abattoir commercial par Uniporc Ouest (Uniporc Ouest, 2012)

2004). Au sein d'une population issue d'un même croisement et type sexuel, Lorenzo Bermejo *et al.* (2003b) montrent que la CMJ varie du simple au double (entre 1 et 2 kg/j au début de l'engraissement, entre 2 et 4 kg/j en fin d'engraissement, Figure 21).

### **1.3.1 Description de l'hétérogénéité d'une population**

L'hétérogénéité du PV des individus d'une population explique en grande partie l'hétérogénéité des poids de carcasses observée par Uniporc Ouest (2012) à partir des pesées systématiques individuelles réalisées en abattoirs commerciaux. En 2011, 94% des porcs contrôlés par Uniporc Ouest présentaient un poids de carcasse compris entre la moyenne et +/- deux écarts-types (soit proche des 96% théoriques, Figure 22). L'écart-type peut être utilisé pour comparer des populations dont la moyenne est comparable, tandis que le CV tient compte de cette notion d'échelle. Le CV permet donc une comparaison de populations différentes au regard de la moyenne du critère. Patience et Beaulieu (2006) ont mesuré l'écart-type et le CV du PV d'une population de 632 porcs du sevrage jusqu'à l'âge de 20 semaines (avant le premier départ pour l'abattoir). Ils observent sur cette période une augmentation de l'écart-type (de 1,21 à 8,31 kg) ainsi qu'une diminution du CV (de 22 à 8%). Ces mêmes auteurs considèrent que les valeurs minimales de CV du PV que l'on peut rencontrer en élevage commercial sont de 20% au sevrage, 12 à 15% à l'entrée en engraissement et 8 à 12% au premier départ pour l'abattoir.

### **1.3.2 Conséquences de l'hétérogénéité des animaux pour la filière porcine**

#### *1.3.2.1 Conséquences sur la conduite de l'alimentation*

Dans les élevages qui utilisent plusieurs aliments successifs au cours de l'engraissement (alimentation en plusieurs phases), le changement d'aliment est souvent motivé par l'âge des animaux, supposé correspondre à un PV théorique. De par l'existence d'une hétérogénéité du PV, Brossard *et al.* (2007) ont montré par la modélisation que cette pratique induit une augmentation de l'hétérogénéité du GMQ et de l'IC, d'autant plus importante que le nombre de phases est élevé. En effet, la teneur en AA de l'aliment diminue d'une phase à l'autre, et au changement d'aliment, les animaux les plus légers sont pénalisés car leurs besoins ne sont pas couverts. Un changement d'aliment selon le PV permet de diminuer l'hétérogénéité des performances de croissance, mais cela impose à l'éleveur de peser régulièrement ses animaux et de pouvoir gérer la distribution d'aliment à une échelle plus petite que celle de la salle ou de la bande entière. Néanmoins, ces

**Tableau 11 - Grille de paiement des carcasses sur la base du poids et du taux de muscle des pièces appliquée depuis le 4 juin 2007 (Uniporc Ouest)**

Plus-value selon le TMP		Plus-value selon le poids de carcasse														
		[45-70[	[70-75[	[75-80[	[80-85[	[85-97]	]97-102]	]102-103]	]103-104]	]104-105]	]105-106]	]106-107]	]107-108]	]108-109]	]109-110]	]110-120]
TMP	€	-0,30	-0,15	-0,05	0,00	0,02	0,00	-0,02	-0,04	-0,06	-0,08	-0,10	-0,12	-0,14	-0,16	-0,20
≥64	0,16	-0,14	0,01	0,11	0,16	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02	0,00	-0,04
63	0,17	-0,13	0,02	0,12	0,17	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05	0,03	0,01	-0,03
62	0,17	-0,13	0,02	0,12	0,17	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05	0,03	0,01	-0,03
61	0,17	-0,13	0,02	0,12	0,17	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05	0,03	0,01	-0,03
60	0,15	-0,15	0,00	0,10	0,15	0,17	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05	0,03	0,01	-0,01	-0,05
59	0,12	-0,18	-0,03	0,07	0,12	0,14	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02	0,00	-0,02	-0,04	-0,08
58	0,08	-0,22	-0,07	0,03	0,08	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02	0,00	-0,02	-0,04	-0,06	-0,08	-0,12
57	0,04	-0,26	-0,11	-0,01	0,04	0,06	0,04	0,02	0,00	-0,02	-0,04	-0,06	-0,08	-0,10	-0,12	-0,16
56	0,00	-0,30	-0,15	-0,05	0,00	0,02	0,00	-0,02	-0,04	-0,06	-0,08	-0,10	-0,12	-0,14	-0,16	-0,20
55	-0,02	-0,32	-0,17	-0,07	-0,02	0,00	-0,02	-0,04	-0,06	-0,08	-0,10	-0,12	-0,14	-0,16	-0,18	-0,22
54	-0,04	-0,34	-0,19	-0,09	-0,04	-0,02	-0,04	-0,06	-0,08	-0,10	-0,12	-0,14	-0,16	-0,18	-0,20	-0,24
53	-0,08	-0,38	-0,23	-0,13	-0,08	-0,06	-0,08	-0,10	-0,12	-0,14	-0,16	-0,18	-0,20	-0,22	-0,24	-0,28
52	-0,12	-0,42	-0,27	-0,17	-0,12	-0,10	-0,12	-0,14	-0,16	-0,18	-0,20	-0,22	-0,24	-0,26	-0,28	-0,32
51	-0,20	-0,50	-0,35	-0,25	-0,20	-0,18	-0,20	-0,22	-0,24	-0,26	-0,28	-0,30	-0,32	-0,34	-0,36	-0,40
≤50	-0,40	-0,70	-0,55	-0,45	-0,40	-0,38	-0,40	-0,42	-0,44	-0,46	-0,48	-0,50	-0,52	-0,54	-0,56	-0,60

conclusions dépendent de la teneur en lysine des aliments. En effet, l'influence du nombre de phases (entre 1 et 10) sur le GMQ et l'IC est significative pour des apports raisonnés en deçà de 110 ou 120% du besoin du porc moyen si le changement se fait selon l'âge, et en deçà de 90 ou 120% du besoin du porc moyen s'il est réalisé selon le PV (Brossard *et al.*, 2007).

#### *1.3.2.2 Conséquences sur la gestion des salles d'engraissement*

Les éleveurs sont incités à commercialiser des porcs de PV homogène. En effet, la plus-value payée par kg de carcasse est fixée en partie selon son poids grâce à une grille incitative (Tableau 11). L'objectif à atteindre est situé entre 85 et 97 kg de carcasse. En parallèle, une grille pour le taux de muscle des pièces (TMP) incite les éleveurs à produire des porcs maigres avec une plus-value maximale pour un TMP compris entre 61 et 63.

La conduite en bandes implique une rotation des porcs dans les salles d'engraissement, suivant un principe de « tout-plein / tout vide », un vide sanitaire étant pratiqué entre le départ de la bande N et l'arrivée de la bande N+1. A cause de l'hétérogénéité de poids pouvant exister au sein d'une bande, tous les porcs n'atteignent pas le poids d'abattage au même âge. Les animaux d'une bande sont donc souvent abattus en plusieurs départs. Or, pour des raisons sanitaires, les porcs trop légers au dernier départ ne peuvent être logés avec les porcs de la bande suivante. L'éleveur doit alors disposer de salles spécifiques pour les loger. D'après Hebert *et al.* (2007), 44% des élevages de l'Ouest de la France disposent de telles salles. Quand l'éleveur n'en dispose pas, il est contraint de livrer tout de même les porcs trop légers, avec une moins-value.

#### *1.3.2.3 Conséquences pour l'abatteur*

Les abattoirs doivent commercialiser des carcasses ou des pièces hétérogènes en poids et composition. Ils doivent donc les trier et trouver des marchés d'approvisionnement auprès de transformateurs qui ont des exigences diverses. L'inconvénient de la situation est lié à la nécessité d'identifier les différents marchés pour écouler les carcasses, tout en étant capable de les approvisionner régulièrement.

### **1.3.3 Facteurs mis en cause**

L'hétérogénéité en engraissement s'explique par la variabilité des performances de croissance des animaux, dont la variabilité de la CMJ est peut-être un facteur. Des facteurs influençant le comportement alimentaire des porcs et leur capacité de consommation y contribuent fortement.

**Tableau 12 - Evolution des performances de croissance et de carcasse selon le poids de naissance**

Alimentation	Poids de naissance (kg)	< 1,0	1,0-1,2	1,2-1,4	1,4-1,6	1,6-1,8	≥ 1,8	Effet Poids
A volonté <sup>(1)</sup>	Age à l'abattage (j)	164	161	160	157	158	155	***
	Poids d'abattage (kg)	105	108	110	112	114	115	**
	TVM (%) <sup>(3)</sup>	61,0	60,8	61,2	61,2	60,4	60,4	ns
Rationnée <sup>(2)</sup>	Age à l'abattage (j)	185	184	182	180	181	177	***
	Poids d'abattage (kg)	101	104	108	110	109	111	**
	TVM (%) <sup>(3)</sup>	60,2	60,2	59,8	59,9	60,1	60,1	ns

1. Quiniou et al. (2004)

2. Le Cozler et al. (2004)

3. Teneur en viande maigre

Signification des tests statistiques : \*\*\*  $P < 0,001$ , \*\*  $P < 0,01$ , ns  $P > 0,05$

### 1.3.3.1 Influence du poids à la naissance

Un faible poids à la naissance conditionne le potentiel de croissance ultérieur du porc, et à terme la qualité de la carcasse (Le Cozler *et al.*, 2004 ; Gondret *et al.*, 2005). Ainsi, les porcs les plus légers présentent un GMQ plus faible et doivent être élevés plus longtemps pour atteindre leur poids d'abattage, par rapport aux porcs les plus lourds à la naissance (Tableau 12). Cela s'explique en partie par une moindre ingestion de nutriments, car un petit porcelet subit la compétition des autres porcelets pour l'accès aux tétines les plus productives. Le poids de naissance influence également la CMJ spontanée en engraissement (Quiniou *et al.*, 2004).

### 1.3.3.2 Influence de l'utilisation des nutriments

La CMJ résiduelle (CMJR) est la différence entre la CMJ observée et celle attendue pour le porc considéré compte tenu de ses besoins d'entretien et de production (Foster *et al.*, 1983 ; cités par Saintillan, 2012). C'est un critère d'efficacité alimentaire indépendant des performances des animaux (Saintillan, 2012). Ainsi pour un même niveau de PD et de LD, le besoin en AA exprimé en g/kg d'aliment ou en g/MJ d'EN sera plus élevé chez un porc présentant une CMJR négative que chez un porc qui présente une CMJR positive. Du point de vue métabolique, la CMJR peut s'expliquer par une utilisation différente des nutriments, notamment en ce qui concerne leur répartition dans les différentes composantes du besoin. De telles différences de métabolisme entre individus ont amené à revoir les besoins nutritionnels du point de vue des individus au lieu du besoin moyen (voir § 1.3.5).

### 1.3.3.3 Influence de la position hiérarchique dans le groupe

Une hiérarchie s'instaure spontanément au sein de la case de porcs. Sa mise en place est à l'origine de combats, principalement durant les 48 h suivant la constitution du groupe. Ils cessent ensuite, sauf dans le cas où les animaux sont soumis à une compétition alimentaire (Courboulay *et al.*, 2002). La position hiérarchique d'un animal (dominant ou dominé) détermine son comportement alimentaire, influant par exemple sur la durée et la taille des repas et la quantité d'aliment ingéré lors de chacun d'entre eux (Levasseur *et al.*, 1996). En cas de rationnement, les porcs dominés ont un accès plus difficile à l'aliment, notamment si le nombre de places à l'auge est inférieur au nombre de porcs dans la case. Les quantités distribuées ne sont donc pas réparties de façon équitable entre les animaux logés en cases collectives. Si, en outre, les dominés sont plus légers que les dominants dès le début de la période, ce moindre accès à l'aliment risque d'accentuer la différence de poids.



### **1.3.4 Champs d'action possibles**

#### *1.3.4.1 Répartition des animaux dans les cases*

Des essais portant sur l'effet de la répartition des porcs dans les cases selon leur PV montrent que des cases homogènes en terme de poids à l'entrée en engraissement le sont encore lors du départ à l'abattoir (O'Connell *et al.*, 2005 ; Brossard *et al.*, 2011, CV initiaux et finaux stables à 7-8%). Si les cases sont hétérogènes en termes de PV initial (CV de 15 à 20%), le CV a tendance à diminuer au cours de l'engraissement mais atteint une valeur qui reste supérieure à celle des cases homogènes (CV final autour de 12%).

La taille du groupe n'a pas d'effet significatif sur l'hétérogénéité des animaux (Brumm *et al.*, 2002 ; Brossard *et al.*, 2011). L'effet de la prise en compte du type sexuel dans la constitution des cases sur l'hétérogénéité du PV dépend du plan d'alimentation. Ainsi, Quiniou et Massiot (2008) ne constatent pas de différence significative sur l'hétérogénéité des poids d'abattage entre les porcs sexés ou non lorsque les animaux sont rationnés en fin d'engraissement. Au contraire, dans le cas où les animaux sont rationnés en début d'engraissement puis alimentés à volonté, le sexage permet d'améliorer significativement l'homogénéité au premier départ et à l'abattage.

#### *1.3.4.2 Augmentation de l'encombrement gastrique de l'aliment*

Maupertuis et Dubois (2005) ont étudié la répartition des PV de porcs nourris avec un aliment concentré (9,71 MJ EN/kg, à base de maïs grain humide) ou avec un aliment plus dilué (9,58 MJ EN/kg, contenant du maïs grain rafle) en période de finition (de 70 kg jusqu'à l'abattage). Le rationnement énergétique pratiqué est le même pour les deux lots, mais l'aliment « dilué » présente un taux de MS plus faible (60 vs 72%), la ration correspondante est donc beaucoup plus volumineuse. Avec l'aliment dilué, les porcs sont plus homogènes à l'abattage (CV de 19 vs 23%), la compétition alimentaire étant moindre.

#### *1.3.4.3 Modification du mode d'alimentation*

La variabilité de la CMJ étant un facteur de l'hétérogénéité, une maîtrise accrue des quantités distribuées devrait permettre de la limiter. Afin de s'assurer que chaque animal ingère la quantité d'aliment qui lui est allouée, notamment en condition d'alimentation restreinte, un système d'alimentation individuel doit être envisagé. Des systèmes de mesure de la consommation individuelle existent déjà, il s'agit de distributeurs automatiques de concentré (DAC). Ce système est mis en place dans les stations de contrôle afin de mesurer

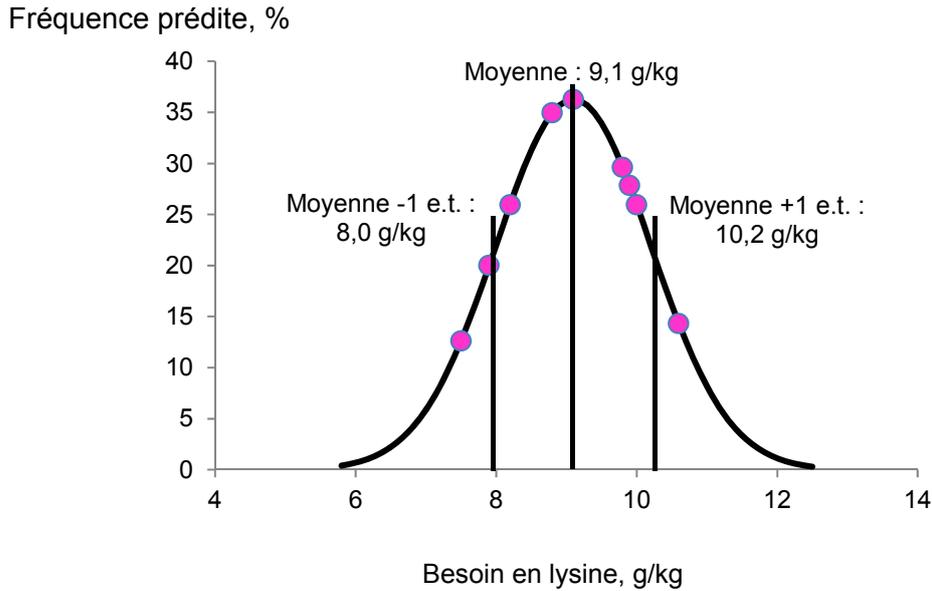


Figure 23 - Distribution des besoins prédits en lysine digestible chez des porcs en croissance d'après la moyenne et l'écart-type (e.t.) obtenus expérimentalement à 24,5 kg de poids moyen (adapté de Bertolo *et al.*, 2005)

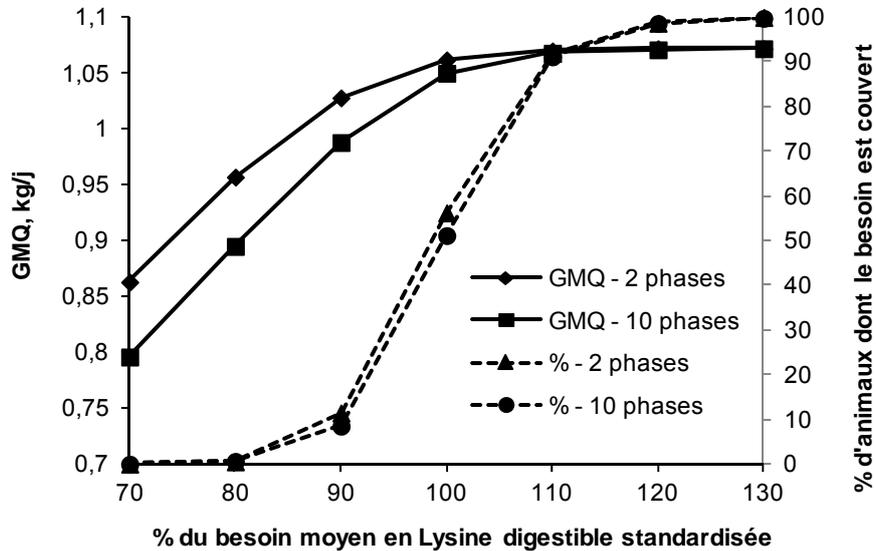


Figure 24 - Réponse simulée du gain moyen quotidien (GMQ, kg/j) et du pourcentage d'animaux dont le besoin en lysine digestible est couvert en fonction de l'apport en lysine digestible (% du besoin moyen de la population) chez une population de 192 porcs suivis entre 65 jours d'âge et 110 kg de PV selon une stratégie alimentaire à deux phases ou dix phases (d'après Brossard *et al.*, 2009)

la CMJ individuelle des animaux logés en groupe (Labroue *et al.*, 1994). Cependant, il n'est actuellement utilisable qu'en condition d'alimentation à volonté et ne permet pas de rationner les porcs de façon satisfaisante (Levasseur *et al.*, 1996).

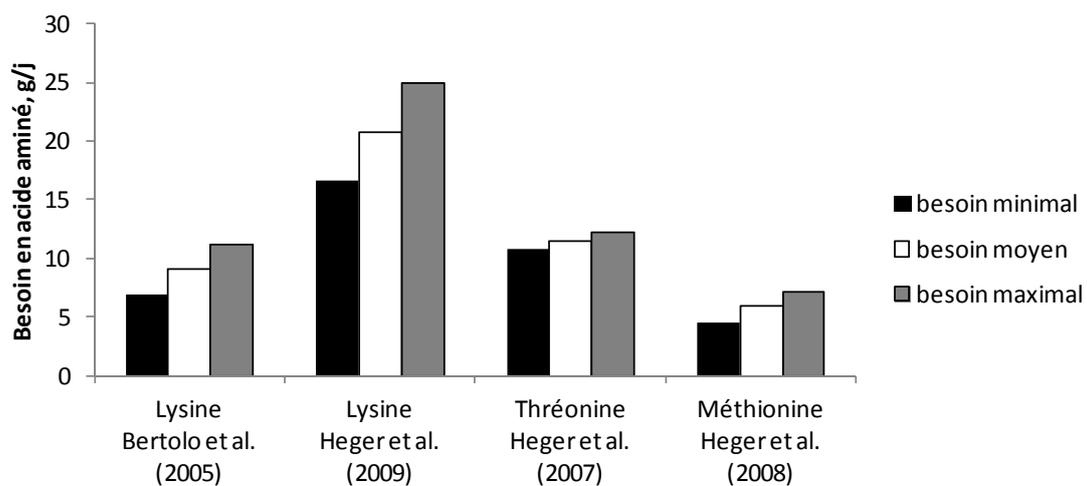
### 1.3.5 Conséquences de la variabilité interindividuelle sur les besoins

Les besoins varient donc non seulement au cours du temps, mais aussi d'un animal à l'autre au sein d'une population (Figure 23). Brossard *et al.* (2007) ont montré par la modélisation qu'un aliment formulé sur la base des besoins du porc moyen, caractérisé à partir des performances moyennes d'une population, couvre en fait les besoins de moins de 50% des animaux (Figure 24). Définir le plan d'alimentation selon les besoins du profil moyen d'un groupe d'animaux ne permet donc pas de respecter les besoins de chaque animal individuellement au sein d'un groupe hétérogène, ni d'optimiser les performances à l'échelle du groupe.

La variabilité s'exprime aussi en termes de besoins nécessaires pour atteindre des performances identiques. Bertolo *et al.* (2005) ont estimé les besoins en lysine de porcelets grâce à un modèle utilisant le PV et la consommation, et ont comparé les résultats obtenus avec le besoin réel, mesuré *in vivo* via la quantification de l'oxydation des acides aminés. Ils observent ainsi que deux porcs peuvent présenter le même besoin estimé et donc les mêmes performances, alors qu'*in vivo* leur besoin en lysine diffère de 30%.

A un PV donné, Schinckel *et al.* (2010) montrent que les porcs les plus légers à la naissance (moins de 1,1 kg) utilisent l'aliment avec une efficacité moindre que les porcs plus lourds. Cela peut résulter d'une moindre efficacité d'utilisation des nutriments. Dans l'étude de Noblet *et al.* (1999), les rendements d'utilisation de l'énergie pour le dépôt sous forme de protéines ou sous forme de lipides ainsi que la valeur du besoin d'entretien en fonction du poids métabolique sont assortis d'un écart-type. Cet écart-type représente la variabilité entre individus ayant permis d'établir les lois de réponse utilisées dans l'approche factorielle. L'étude de la variation individuelle autour des lois moyennes qui régissent les dépôts s'est rapidement centrée sur l'étude de la CMJR.

Les animaux sélectionnés pour une CMJR négative sont plus maigres et présentent un rendement de carcasse plus élevé, et un moindre développement des viscères et un besoin d'entretien plus faible (Boddicker *et al.*, 2011). Leurs besoins plus faibles sont liés à une meilleure efficacité d'utilisation de l'énergie également du fait d'une activité physique plus faible et d'un métabolisme basal réduit (Barea *et al.*, 2010).



**Figure 25 : Niveaux moyen, minimal et maximal du besoin en acides aminés dans les populations de porcs étudiés par différents auteurs**

Bertolo *et al.* (2005) et Heger *et al.* (2009) évaluent que le CV du besoin en lysine est de 12% à 24 kg de PV et de 10% à 47 kg de PV. Heger *et al.* (2007, 2008) évaluent à 3% le CV du besoin en thréonine (à 45 kg de PV) et à 11% le CV du besoin en méthionine (à 50 kg de PV, Figure 25). Cette variabilité du besoin en acides aminés et son changement d'amplitude d'un acide aminé à l'autre incite à réévaluer la composition de la protéine idéale en préservant des marges d'excès par acide aminé lors de l'alimentation d'un groupe de porcs.

La sélection de lignées divergentes en deux populations CMJR positive (CMJR+) et CMJR négative (CMJR-) montre que, si le potentiel de croissance reste similaire pour les deux populations (GMQ de 923 vs 888 g/j,  $P > 0,18$ ), la différence entre ces lignées se situe au niveau de la CMJ (2,13 kg/j pour les CMJR+ vs 1,89 kg/j pour les CMJR-, Barea *et al.*, 2010).

### **1.3.6 Les enjeux d'une nutrition adaptée aux besoins**

#### *1.3.6.1 Enjeu écologique*

L'agriculture, notamment l'élevage porcin, se trouve au centre des débats sur la protection de l'environnement. La concentration de cette activité au sein de bassins de production voire d'une région, combinée avec la concentration des activités avicoles et laitières, est associée à une concentration locale des rejets, notamment azotés et phosphorés. Une meilleure adéquation entre les apports azotés et les besoins est un des moyens permettant de limiter l'impact de l'élevage sur l'environnement, notamment sur la qualité de l'eau.

L'apport d'AA dans les aliments peut être réalisé par incorporation de matières premières riches en protéines (matières azotées totales, MAT), tels que les tourteaux. Il est également possible d'utiliser des AA de synthèse. Cette formulation permet de réduire la teneur en MAT tout en respectant les équilibres entre AA. La formulation de régimes vers une teneur en MAT réduite pour un même apport en AA essentiels permet d'améliorer le coefficient de rétention de l'azote (CRN). Ainsi, Cahn *et al.* (1998) observent une augmentation du CRN de 39 à 48% quand la MAT diminue de 16,5 à 12,5%. En se rapprochant du profil de la protéine idéale, une part plus importante des AA ingérés est retenue et la part d'azote qui est rejetée diminue. Petersen (2010) estime qu'il est possible de réduire de 7 à 10% les rejets azotés par point de MAT en moins dans l'aliment. De telles formules doivent être réalisées dans le système EN afin de prendre en compte les différences d'utilisation métabolique de l'énergie apportée sous forme de protéines, lipides, parois végétales (Noblet *et al.*, 1994b). Il est alors possible de réduire les rejets sans modifier les performances de croissance (Tableau 13).

**Tableau 13 - Effet de la teneur en matières azotées totales sur les performances entre 30 et 102 kg de PV et sur les rejets d'azote (Dourmad *et al.*, 1993)**

Matières azotées totales, %	17,8	15,5	13,6	Statistiques
GMQ, g/j	846	867	852	NS
Taux de muscle des pièces	51,3	52,3	51,6	NS
Azote excrété, kg / porc	3,90	3,10	2,50	***

Aujourd'hui il est possible d'incorporer cinq AA de synthèse dans la formule d'un aliment afin de se rapprocher de la composition de la protéine idéale. Ce sont la lysine, la thréonine, le tryptophane, la méthionine et la valine (Knabe, 1996 ; Le Bellego *et al.*, 2002 ; Quiniou *et al.*, 2011). L'amélioration de l'adéquation entre niveau d'apports en AA et besoin au cours de la croissance intervient également dans la réduction des rejets. Par une alimentation multiphase, l'apport en AA par unité d'EN ingérée diminue quand le PV augmente afin de suivre l'évolution des besoins des animaux avec l'augmentation du PV.

#### 1.3.6.2 Enjeu économique

Le poste "alimentation" dans un élevage peut représenter 60 à 70% des charges. Le rendement économique de la nutrition est donc crucial. En effet, en classant les élevages naisseurs-engraisseurs selon leurs performances économiques, l'écart de marge entre le tiers supérieur et le tiers inférieur des élevages est dû pour 20% au prix de l'aliment contre 11% au prix de vente des porcs (Aubry, 2011). Il est donc primordial de valoriser au mieux l'aliment par la croissance des animaux et par le paiement de ces derniers. La pertinence de la conduite alimentaire repose sur le choix du plan de rationnement, du nombre d'aliments, de leur teneur en nutriments... Parallèlement, les aliments doivent être formulés en prenant en compte le contexte de prix des matières premières, contexte qui peut avoir un rôle déterminant dans le choix des teneurs en nutriments dans l'aliment (Quiniou *et al.*, 2007).

La variabilité des besoins au cours de l'engraissement et d'un individu à l'autre nécessite aussi d'être mieux prise en compte dans l'élaboration d'une stratégie alimentaire optimale. Sur la base du besoin moyen, la variabilité est prise en compte de façon grossière depuis longtemps en appliquant une marge de sécurité à la teneur en AA de l'aliment. Des recherches sont effectuées sur ce sujet avec l'objectif d'affiner les règles de décision. Ainsi, les simulations réalisées par Brossard *et al.* (2009) conduisent à préconiser un apport en AA à 110% du besoin moyen d'un groupe, tandis que les simulations réalisées par Quiniou *et al.* (2007) illustrent le rôle du contexte de prix des matières premières sur les choix de formulation. Pour adapter les apports nutritionnels à des besoins qui sont variables, l'alimentation de précision s'annonce comme une solution d'avenir qui permet de distribuer à chaque porc élevé en case collective un aliment adapté à ses propres besoins (Pomar *et al.*, 2010). L'alimentation de précision peut même s'envisager comme un moyen de réduire l'hétérogénéité des porcs, une hétérogénéité qui est coûteuse à l'élevage (Patience, 2009).



## CONCLUSION

Les connaissances sur la croissance du porc sont nombreuses, tant pour décrire la composition moyenne du gain de poids que les besoins nutritionnels associés. La plupart de ces connaissances ont déjà été intégrées dans des modèles de prédiction des performances ou des besoins pour un individu moyen. Le changement d'échelle vers la modélisation des performances d'une population en est encore à ses balbutiements.

Les chercheurs impliqués dans l'intégration de la variabilité en modélisation s'accordent sur la nécessité de caractériser les valeurs des variables des modèles sans s'arrêter à la détermination des valeurs moyennes. Certains ont recours à des lois normales pour créer de la diversité aléatoirement, mais cela ne permet pas de respecter les relations entre variables du modèle. Or ces relations ne peuvent être ignorées pour reproduire des populations présentant une variabilité cohérente avec celle existant naturellement. L'obtention de ces valeurs et plus encore la caractérisation des structures de variance-covariance entre variables reste limitée par manque de données disponibles. La démarche a été initiée par Brossard *et al.* (2009), mais à partir d'un seul type de porc il n'est pas possible de conclure quant à la généralisation des résultats à des porcs d'un autre croisement.

Les connaissances sur les liens entre les valeurs individuelles des variables permettant de décrire les différentes trajectoires de croissance et d'ingéré au sein des populations de porcs étant succinctes, leur étude fera l'objet de **l'étape 1 de la thèse**. Les résultats obtenus seront utilisés pour générer des populations de porcs virtuelles, utilisables pour modéliser l'impact de stratégies nutritionnelles sur les performances, les rejets et en intégrant la maîtrise de l'hétérogénéité du PV dans les critères d'évaluation (**étape 2 de la thèse**). Enfin, les résultats obtenus par simulation seront comparés à ceux obtenus *in vivo* lorsque les stratégies alimentaires sont appliquées en élevage (**étape 3 de la thèse**).



## **2 ETAPE 1 - ETUDE DE LA VARIABILITE DES POPULATIONS DE PORCS**



## Préambule

Le contenu de l'article présenté lors du congrès EAAP 2011 à Stavanger (Norvège) et de l'article accepté (après corrections mineures, en cours de réalisation) pour publication dans la revue *Animal* sont intégrés dans ce chapitre.

## INTRODUCTION

Dans la bibliographie, les études portant sur la détermination des besoins nutritionnels du porc en croissance sont nombreuses. Les connaissances accumulées au cours des ans ont été rassemblées dans des modèles mécanistes et dynamiques de prédiction de la croissance (ex. : Ferguson *et al.*, 1994; van Milgen *et al.*, 2008). La caractérisation des besoins d'un groupe de porcs est généralement réalisée à partir du suivi de l'évolution des performances d'un porc moyen, supposé représenter cette population. Cependant, l'élaboration de stratégies nutritionnelles sur cette base implique que les apports couvriront au mieux les besoins de la moitié des porcs seulement (Brossard *et al.*, 2009). La prise en compte des différences entre les individus dans la population apparaît comme essentielle dans une agriculture dite de précision, qui devrait permettre d'améliorer les performances économiques de l'élevage et de réduire son impact environnemental (Pomar *et al.*, 2009).

Les modèles déterministes s'appuient sur les lois de réponse moyenne des porcs mais n'intègrent pas de notion de variabilité, contrairement aux modèles stochastiques. Ces derniers sont supposés fournir des prédictions plus proches de la réalité si la variabilité des porcs ayant permis de les construire est décrite avec pertinence. Cette variabilité résulte de la variabilité observée dès le début de la phase de croissance entre les porcs ou de la variabilité de l'évolution des caractéristiques des animaux au cours du temps. Cette dernière approche a été utilisée par Strathe (2009) pour représenter la variabilité du PV et de la CMJ d'un jour à l'autre. Toutefois, le calibrage de tels modèles est compliqué, les processus aléatoires rendent difficiles l'obtention d'une plage de valeurs réaliste pour les variables utilisées pour la modélisation (Knap et Schrama, 1996). La variabilité entre porcs peut être modélisée à partir d'un modèle déterministe en réalisant des simulations successives, réalisées à partir d'autant de jeux de données différents (Brossard *et al.*, 2007). Ces valeurs peuvent être générées par des processus aléatoires multivariés à partir de la moyenne de chaque variable et de leurs corrélations (Ripley, 1987).

Les connaissances requises pour l'intégration de la variabilité dans les modèles de croissance stochastiques sont insuffisantes à l'heure actuelle : elles sont rares et souvent

**Tableau 14 - Périodes d'engraissement et types de verrats<sup>1</sup> utilisés en essai**

Bande	Période d'engraissement	Verrat témoin	Verrat alternatif
1	Mai - août 2007	LWxPP	PP
2	Février - juin 2008	LWxPP	P76
3	Août - novembre 2008	LWxPP	Kantor (Duroc x PP)
4	Décembre 2008 - avril 2009	LWxPP	Maxter
5	Mai - août 2009	LWxPP	PIC
6	Octobre 2009 - Janvier 2010	LWxPP	Duroc A <sup>2</sup>
7	Mars - juin 2010	LWxPP	Duroc N <sup>2</sup>
8	Août - novembre 2010	LWxPP	PP
9	Décembre 2010 - Mars 2011	LWxPP	Virtus
10	Mai - août 2011	LWxPP	LW lignée femelle

1. LW : Large White, PP : Piétrain, les autres types de verrats, à l'exception du Duroc, sont des verrats terminaux (voir Tableau 15).

2. Les deux types de Duroc sont obtenus à partir de deux organisations de sélection génétique différentes.

**Tableau 15 - Descriptif des verrats terminaux utilisés (Agence de la Sélection Porcine, 2012)**

Verrat	Organisation	Descriptif <sup>1</sup>
P76	Pen Ar Lan	Race pure de type lignée composite depuis 2003 (au départ hybride) composé de Laconie et Penshire (Laconie = Large White, Hampshire, Piétrain, Penshire = Hampshire, Large White, Duroc)
Maxter (M2)	Hypor	Race pure, variété de race Piétrain NN
PIC (PIC410)	PIC	Hybride issu du croisement entre GP1120 (Piétrain NN) et GP1125 (Piétrain NN, Duroc, Large White)
Virtus (PIC359)	PIC	Hybride issu du croisement entre GP1109 (Hampshire) et GP1125 (Piétrain NN, Duroc, Large White)

1. GP : grand-parentaux.

incomplètes (Knap, 1995). L'objectif de l'étape 1 de la thèse est d'analyser la structure de variance-covariance entre les variables permettant de décrire un porc. Ces liens peuvent être résumés par une matrice de variance-covariance qui permet de mesurer pour chaque variable, d'une part, sa variance, c'est-à-dire l'étendue de sa variation autour de sa moyenne et, d'autre part, sa covariance avec chacune des autres variables, c'est-à-dire la part de variation liée aux variations des autres variables. Ensuite il s'agit de déterminer dans quelle mesure les résultats obtenus pour une population de porcs peuvent être généralisés à d'autres populations.

## **2.1 ACQUISITION DES DONNEES ZOOTECHNIQUES**

### **2.1.1 Dispositif expérimental**

Un suivi individuel de la croissance et de l'ingestion d'aliment a été réalisé à partir de dix bandes de porcs en croissance issus de différents croisements, à la station expérimentale IFIP de Romillé (35). Les bandes 1 à 8 sont utilisées pour constituer une base de données de calibrage à partir de laquelle la variabilité est étudiée. Les résultats obtenus sont ensuite évalués à l'aide des données des bandes 9 et 10 (base de données d'évaluation). Tous les porcs étaient issus de truies croisées LWxLD. Au sein de chaque bande, la moitié des porcs était issue de verrats croisés LWxPP et l'autre moitié d'un autre type de verrot parmi les principaux types utilisés en France. Par souci de concision, les porcs issus des différents croisements sont désignés *via* le nom du type de leur père, dont la liste est présentée dans les Tableau 14 et Tableau 15. Les dix bandes ont été étudiées entre mai 2007 et août 2011 (Tableau 16).

### **2.1.2 Choix des animaux à l'entrée en engraissement**

Compte-tenu de la dimension des installations expérimentales disponibles, tous les porcs d'une bande n'ont pu être étudiés pendant l'engraissement. En effet, en sortie de post-sevrage, les porcelets de chaque bande sont issus de 24 portées (= truies), soit environ 280 animaux. Parmi ces derniers, seuls 144 peuvent être étudiés en engraissement. L'objectif lors de la mise en lot est de choisir 36 mâles castrés (MC) et 36 femelles (F) de chacun des deux croisements.

**Tableau 16 - Calendrier d'étude des différentes bandes de porcs**

Bande	N° de travail	Date de fin de post-sevrage	Date de 1 <sup>er</sup> départ	Date de dernier départ	Saison
1	226	09/05/07	07/08/07	27/08/07	Eté
2	246	26/02/08	27/05/08	24/06/08	Printemps
3	256	28/07/08	21/10/08	04/11/08	Automne
4	266	22/12/08	24/03/09	07/04/09	Hiver
5	276	12/05/09	11/08/09	01/09/09	Eté
6	286	08/10/09	12/01/10	01/02/10	Hiver
7	296	03/03/10	07/06/10	08/06/10	Printemps
8	306	26/07/10	02/11/10	03/11/10	Automne
9	316	20/12/10	21/03/11	22/03/11	Hiver
10	326	16/05/11	29/08/11	30/08/11	Eté

Pour les bandes 1 à 6 et 9 à 10, le choix des porcs a été réalisé en respectant cinq contraintes principales, qui consistaient :

- 1 - à loger les porcs d'un seul type de croisement dans la case,
- 2 - à loger six femelles et six mâles castrés par case,
- 3 - à disposer de plusieurs fratries par case, tout en limitant les mélanges de porcs issus de cases différentes en post-sevrage (afin de réduire le stress lié à l'instauration d'une nouvelle hiérarchie et les risques sanitaires),
- 4 - à respecter un PV minimal de 18 kg à l'entrée en engraissement, PV permettant l'accès à l'auge,
- 5 - compte-tenu de la contrainte n°4, les porcs les plus lourds ont également été exclus de la mise en lot.

Les bandes 7 et 8 ont fait l'objet d'une mise en lot intégrant une sixième contrainte : l'objectif était de s'assurer que l'hétérogénéité du PV des 144 porcs entrant en engraissement soit identique à celle des effectifs complets. Un tirage spécifique de 36 PV, correspondant à 36 individus de chaque groupe (sexe x croisement) a été réalisé (cf. § 3.1.4). Les animaux ont ensuite été répartis entre les cases en respectant les contraintes précédentes.

### **2.1.3 Conduite des animaux**

Les porcelets sont sevrés vers 28 jours d'âge et sont ensuite élevés pendant cinq à six semaines en salle de post-sevrage. Compte-tenu de la configuration des salles d'engraissement, le PV moyen escompté à l'entrée en engraissement est de 27 kg. Si le PV moyen atteint à 62 jours d'âge respecte cette condition, les porcs entrent en engraissement dès le lendemain, sinon l'entrée en engraissement a lieu une semaine plus tard. Les conditions de logement et d'alimentation à chacun de ces deux stades sont décrites plus loin. Du sevrage à l'abattage, les animaux sont alimentés à volonté. L'acquisition des données débute après une semaine d'adaptation aux conditions d'élevage et au système d'alimentation. Les contraintes d'organisation des abattages (nombre de transports, taille des lots) ont évolué pendant la période expérimentale. Les porcs des bandes 1 à 6 ont été abattus en deux ou trois départs. Ceux des bandes suivantes ont été abattus en un seul départ. Dans tous les cas, l'objectif de PV d'abattage était de 115 kg en moyenne pour la bande.

**Tableau 17 - Composition et valeurs nutritionnelles (exprimées sur la base de l'aliment frais) des aliments croissance et finition**

Aliment	Croissance	Finition
Taux d'incorporation, g/kg <sup>1</sup>		
Blé	582	632
Orge	150	150
Son de blé tendre	40	40
Tourteau de soja 48	128,4	88
Tourteau de colza	35	36,5
Mélasses de canne	20	20
Huile de colza	15	8
Lysine liquide 50%	5,7	5,8
Thréonine	1,2	1,1
Méthio Hydroxy Analogue	0,5	0,4
Tryptophane 10%	0	0,5
Carbonate de calcium	9,5	8,6
Phosphate bicalcique dihydraté	4,6	1
Complément oligo-vitamines	4	4
Phytase microbienne	0,1	0,1
Sel	4	4
Caractéristiques nutritionnelles <sup>2</sup>		
Matière sèche, g/kg	868	866
Matières azotées totales, g/kg	160	148
Lysine totale, g/kg	9,7	8,8
Lysine digestible (LYSd), g/kg	8,6	7,8
Méthionine digestible, % LYSd	30	30
Méthionine +Cystine digestibles, % LYSd	63	65
Thréonine digestible, % LYSd	66	66
Tryptophane digestible, % LYSd	19	20
Isoleucine digestible, % LYSd	61	60
Valine digestible, % LYSd	70	70
Cellulose brute Weende, g/kg	36	35
Amidon, g/kg	430	460
Matières minérales totales, g/kg	48	42
Calcium, g/kg	7,3	5,9
Phosphore total, g/kg	4,8	4,1
Phosphore digestible (granulé), g/kg	2,5	2,0
Matières grasses totales, g/kg	31	8
Energie digestible, kcal/kg	3218	3191
Energie nette (EN), MJ/kg	9,71	9,71
LYSd / EN, g/MJ EN	0,89	0,80

1. Exemple de formules utilisées pour une des bandes.

2. Valeurs calculées lors de la formulation à partir des valeurs nutritionnelles des matières premières estimées à partir de leurs caractéristiques chimiques avec le logiciel Evapig (2008) et tenant des contraintes de formulations fixées de façon identiques pour toutes les bandes.

## **2.1.4 Conditions de logement et d'alimentation pendant le post-sevrage**

Selon la bande, les animaux sont logés par groupes de 8-9 ou 20-22, les mélanges de portée étant limités au maximum et tous les porcs de la case appartenant au même croisement. Les surfaces par porc respectent les normes en vigueur depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1994 (directives du Conseil Européen du 19/11/1991, 0,30 m<sup>2</sup> en post-sevrage). Les salles de post-sevrage sont équipées d'un système de chauffage qui permet d'éviter une diminution de la température ambiante en deçà de la température de consigne qui est fixée à 28°C au sevrage, puis qui diminue régulièrement jusqu'à atteindre 25°C cinq semaines plus tard. En cas de températures extérieures élevées, la température ambiante dans les salles est régulée par le taux de ventilation, mais aucun système de refroidissement de l'air n'est utilisé. Pendant cinq ou six semaines, les porcs sont alimentés avec de l'aliment 1<sup>er</sup> âge et 2<sup>ème</sup> âge du commerce. Les animaux reçoivent de l'aliment 1<sup>er</sup> âge suivant "la règle des 14" :

$$(14 - \text{poids moyen de case}) = \text{quantité allouée / porc}$$

Les deux derniers kilogrammes de 1<sup>er</sup> âge/porc sont distribués en mélange 50/50 avec de l'aliment 2<sup>ème</sup> âge. L'aliment est distribué à sec dans un nourrisseur de deux ou quatre places. L'aliment et l'eau sont disponibles à volonté.

## **2.1.5 Conditions de logement et d'alimentation pendant l'engraissement**

### *2.1.5.1 Logement*

Les 144 porcs sont répartis entre deux salles identiques comportant chacune six cases d'une capacité de douze porcs et d'une surface de 0,65 m<sup>2</sup> par porc. Les salles sont équipées d'un système de chauffage qui permet d'éviter une diminution de la température ambiante en deçà de la température de consigne qui est fixée à 25°C à l'entrée en engraissement, puis elle diminue régulièrement jusqu'à 22°C en deux semaines pour rester à cette valeur jusqu'à la fin de la période d'engraissement. En cas de températures extérieures élevées, la température ambiante dans les salles est régulée par le taux de ventilation et par un système de refroidissement de l'air. Les salles sont éclairées au minimum neuf heures par jour, par lumière naturelle ou artificielle.

### *2.1.5.2 Alimentation*

Une séquence alimentaire en deux phases (croissance et finition) est utilisée. Les aliments croissance et finition sont formulés sur la base d'une teneur en EN de 9,7 MJ/kg. L'aliment croissance est distribué jusqu'à ce que les porcs de la case atteignent en moyenne au moins

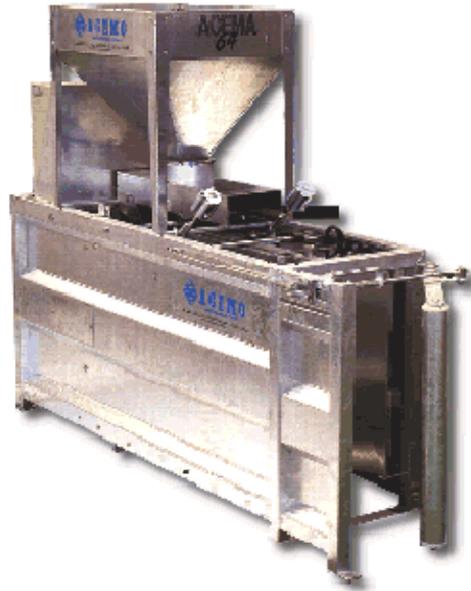


Figure 26 - Photo d'un distributeur automatique ACEMA, identique à celui utilisé pendant l'essai

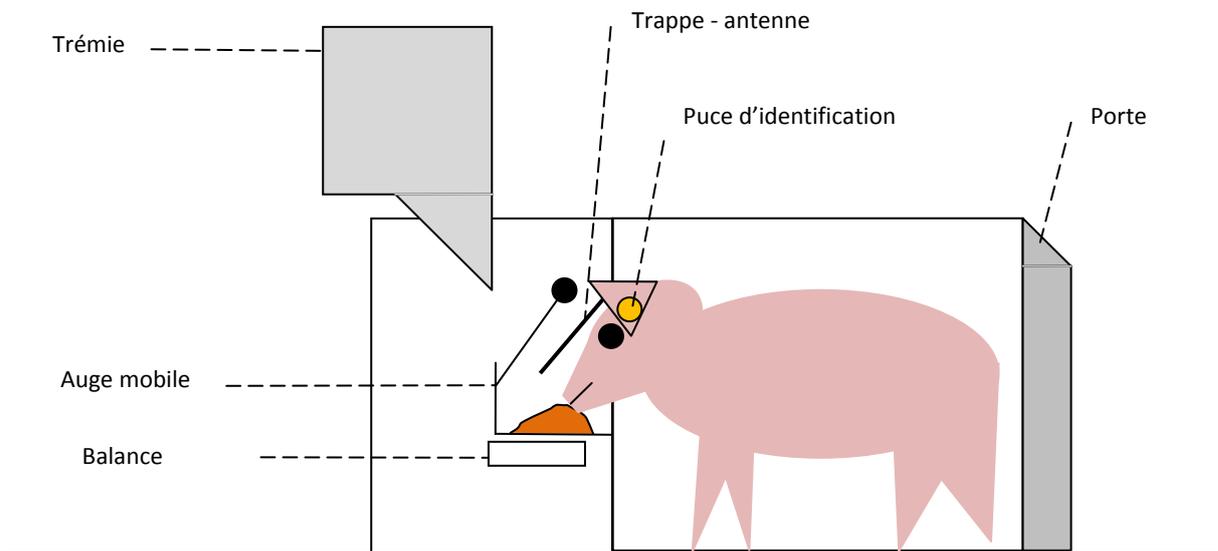


Figure 27 - Schéma de DAC Acema 64 en fonctionnement

63 kg de PV. La teneur en lysine digestible est, respectivement, de 0,9 et 0,8 g par MJ EN dans les aliments croissance et finition (Tableau 17). Ces niveaux sont considérés comme permettant de couvrir le besoin des porcs les plus exigeants en début des phases de croissance et de finition d'après les Tables IFIP (2002). Les teneurs des autres AA essentiels sont raisonnées relativement à la teneur en lysine digestible sur la base des rapports minimaux du profil de la protéine idéale (Tableau 5). Les aliments sont présentés sous forme de granulés, à sec.

Chaque case est équipée d'un abreuvoir automatique et d'un DAC (modèle Acema 64, Acemo, Pontivy, France, Figure 26). Les DAC sont utilisés pour mesurer la CMJ individuelle de porcs logés en groupe. L'auge est placée dans une station d'alimentation, derrière une trappe et placée sur jauges de contraintes. En début de visite, elle contient une quantité d'aliment comprise entre 200 et 1600 g. Lorsqu'un porc se présente dans la station d'alimentation, la porte arrière se referme derrière lui afin d'éviter la présence simultanée de congénères. La visite alimentaire commence lorsque le porc soulève la trappe d'accès à l'auge. L'heure est enregistrée et correspond au début de la visite et son numéro est enregistré à l'aide d'une antenne qui détecte la puce électronique fixée à son oreille (Figure 27). Lorsque le porc retire sa tête de l'auge et que la trappe se referme, l'heure est enregistrée et les jauges de contraintes placées sous l'auge pèsent la quantité d'aliment restante. La quantité d'aliment ingérée pendant la visite est obtenue par différence entre le poids mesuré en fin de visite et celui mesuré en début de visite. Si la quantité d'aliment restant alors dans l'auge est inférieure à 200 g, l'auge est à nouveau remplie à partir de la trémie jusqu'à une quantité maximale de 1600 g.

### *2.1.5.3 Soins aux animaux*

Lorsqu'un animal présente des signes de maladie, les soins nécessaires sont pratiqués et notés dans le cahier de suivi d'élevage. Le numéro du porc est relevé, ainsi que la date, le type de maladie et le traitement. Ces trois derniers éléments sont également notés dans le cahier de suivi d'élevage lors de traitements collectifs réalisés via l'eau de boisson.

## **2.1.6 Abattage**

La veille de l'abattage, l'accès à l'aliment est interrompu à 8h00. Les porcs sont pesés vers 14h00 et mis sur le quai d'embarquement. Le départ pour l'abattoir est réalisé vers 17h00. Les animaux sont abattus dans un abattoir commercial le lendemain après 24 h de mise à jeun. Pendant cette période, l'accès à l'eau reste possible.



### 2.1.7 Mesures

Les animaux sont pesés la veille du sevrage vers 28 jours d'âge et en fin de post-sevrage vers 62 jours d'âge environ. Cette dernière pesée est réalisée après 16 h de mise à jeun. En début d'engraissement, les porcs bénéficient d'une semaine d'apprentissage à l'utilisation du DAC. Des observations préalables réalisées dans les mêmes installations ont montré qu'un arrêt prolongé des DAC avant la pesée pouvait entraîner des retards de reprise de consommation chez certains porcs après la pesée. Les pesées en cours d'engraissement sont donc réalisées sans mise à jeun préalable des animaux. Les DAC sont arrêtés vers 8h00 juste avant la pesée, et remis en fonctionnement dès que la pesée des porcs de la salle est terminée. Les animaux sont ainsi pesés une semaine après leur entrée en engraissement, puis toutes les trois semaines jusqu'à 100 kg de PV moyen pour la bande et ensuite toutes les deux semaines jusqu'à l'abattage.

Les consommations individuelles d'aliment sont enregistrées quotidiennement sur toute la période d'essai. Avant l'entrée des porcs en engraissement, les jauges de contraintes équipant chaque DAC sont étalonnées d'après la méthode fournie par le constructeur, et le fonctionnement du système d'identification des porcs (antenne et puces électroniques) est vérifié. Pendant l'essai, les animaliers vérifient, à partir des enregistrements réalisés par les DAC, si tous les animaux sont allés manger la veille et si aucun n'a perdu sa puce électronique d'identification. En cas de perte ou de dysfonctionnement de la puce, celle-ci est changée. Outre ce suivi sommaire, un bilan hebdomadaire des quantités d'aliment consommées par case est réalisé manuellement ( $Q_{\text{manu}}$ ) afin de détecter une éventuelle dérive des jauges de contraintes, une panne du système de mesure ou une éventuelle perte des enregistrements. A chaque remplissage de la trémie, la quantité d'aliment versée est pesée. Tous les sept jours, la trémie est vidée par aspiration et l'aliment collecté est pesé.

A l'abattage, la carcasse est pesée à chaud. Les épaisseurs de gras (G2) et de muscle *Longissimus dorsi* (M2) sont mesurées entre les troisième et quatrième dernières côtes, à 6 cm de la fente à l'aide d'un Capteur Gras Maigre (Sydel, Lorient, France).

### 2.1.8 Calculs et analyses statistiques

Des calculs sont réalisés avec différents objectifs : (1) pour prendre en compte d'éventuels problèmes rencontrés lors de l'acquisition des données de CMJ, (2) pour caractériser les performances moyennes des porcs étudiés, (3) pour définir leurs profils d'évolution de la CMJ et du PV au cours de la croissance, (4) pour décrire la variabilité à l'échelle de la



population et sa structure et enfin (5) pour produire des populations virtuelles selon le patron de population obtenu. Les trois premières phases de calcul conduisent à la construction de la base de données qui sera exploitée dans les deux dernières phases de calcul, cœur de la thèse.

#### *2.1.8.1 Données de consommation d'aliment individuelle*

La quantité d'aliment consommée par les porcs de la case pendant la semaine est obtenue par différence entre le cumul des quantités allouées manuellement et la quantité aspirée en fin de semaine. Elle est comparée à la somme des consommations d'aliment de la semaine enregistrées par le DAC ( $Q_{DAC}$ ) selon la formule :

$$\text{Ecart de bilan relatif} = (Q_{\text{manu}} - Q_{DAC}) / Q_{DAC}$$

Le bilan hebdomadaire permet également de quantifier chaque jour de la semaine précédente la consommation d'aliment non attribuée à un porc et enregistrée sous le numéro de travail « 999999 ».

Au cours de l'essai, des problèmes de suivi de CMJ par le DAC sont intervenus sur certains DAC, de différentes natures : de la panne générale d'enregistrement aux difficultés d'identification des porcs, en passant par des amplitudes variables de l'écart de bilan relatif hebdomadaire. Ces problèmes sont apparus pendant des périodes parfois très courtes (de un à quelques jours). Afin de ne pas exclure de la base de données tous les porcs dont au moins une journée d'enregistrement de la CMJ était manquante, différentes procédures ont été mises en place.

#### ***Corrections réalisées en cas d'écart de bilan relatif hebdomadaire important***

Un écart de bilan relatif supérieur à  $\pm 4\%$  est considéré comme indicateur d'un problème d'enregistrement par le DAC. Cette valeur seuil a été déterminée lors d'essais réalisés antérieurement à la station expérimentale de Romillé. En deçà de ce seuil, la proportion d'écarts de bilans relatifs considérés comme problématiques devient très importante, alors qu'elle reste stable pour des valeurs supérieures. Après avoir exclu toute autre raison de dysfonctionnements tels que des erreurs humaines lors du remplissage du DAC ou de l'enregistrement de la quantité pesée, les CMJ individuelles sont corrigées par un facteur multiplicatif correspondant à  $1 + \text{écart de bilan}$ .



### ***Corrections réalisées en cas de semaine(s) sans enregistrement par le DAC***

Lorsqu'une semaine d'enregistrement des CMJ individuelles fait défaut, la contribution de chaque porc à la quantité d'aliment consommée par la case ( $Q_{DAC}$ ) pendant la semaine qui précède ( $CONTRI_{S-1}$ ) et pendant la semaine qui suit ( $CONTRI_{S+1}$ ) sont calculées. Pendant la semaine manquante, la contribution de chaque porc à la consommation de la case ( $CONTRI_S$ ) est supposée correspondre à la moyenne des contributions  $CONTRI_{S-1}$  et  $CONTRI_{S+1}$ . Le bilan de consommation  $Q_{manu}$  est réparti au prorata entre les porcs de la case sur la base de leur contribution moyenne. Cela implique qu'une même CMJ est attribuée pour tous les jours de la semaine à chaque porc.

### ***Corrections réalisées en cas de non attribution d'aliment ingéré***

Pour de multiples raisons, des visites alimentaires réalisées au cours de la journée sont enregistrées sans qu'un animal ne soit identifié. La majeure partie de ces consommations non attribuées concerne de petites quantités d'aliment et leur cumul à l'échelle de la journée reste très faible.

Afin de faciliter l'identification des quantités d'aliment nécessitant une réattribution manuelle à un porc, la variation quotidienne de CMJ est calculée comme suit :

$$(CMJ_j - CMJ_{j-1}) / CMJ_{j-1}$$

Les anomalies pouvant mener à des CMJ nulles ou quasi nulles, les valeurs de cette variation peuvent être très élevées. De ce fait, nous ne retenons que les variations de CMJ dont la valeur absolue est inférieure à 1. Dans cet ensemble de valeurs recueillies sur toute la période d'engraissement, la moyenne des valeurs absolues des variations de CMJ est utilisée comme critère de décision concernant la stratégie à appliquer aux données d'ingéré non attribuées.

Quand la quantité cumulée d'aliment non attribuée au cours de la journée reste inférieure à la variation de CMJ moyenne des porcs de la case d'un jour à l'autre, aucune hypothèse ne peut être appliquée pour l'attribuer à un porc plutôt qu'à un autre. La non prise en compte de cette quantité dans la CMJ est plus faible que la variation naturelle de l'ingéré. Bien que ces quantités aient peu d'impact sur la CMJ, elles sont néanmoins réparties à égalité entre les porcs de la case.

Lorsque la quantité d'aliment non attribuée est plus importante, il est alors possible d'identifier graphiquement un creux dans le profil de CMJ d'un des porcs de la case. Lorsque ces creux sont détectés sans équivoque, la quantité d'aliment est attribuée au porc



concerné. L'explication la plus simple est celle d'une journée pendant laquelle un changement de puce a été réalisé. Dans ce cas, les quantités d'aliment non attribuées la veille et le jour même du changement sont affectées au porc dont la puce a été changée. Sinon, quand les consommations ne peuvent pas être attribuées avec certitude à un individu, elles sont également réparties entre les porcs de la case.

#### 2.1.8.2 Poids initial à l'entrée en engraissement

##### **Calcul d'un poids vif initial commun à toutes les bandes**

Si la pesée de fin de post-sevrage était prévue vers 62 jours d'âge, l'échelonnement des mises bas entre truies de la bande, le calendrier (jours fériés) ou le manque de disponibilité du personnel technique explique que cette mesure n'ait pas été réalisée strictement à cet âge pour tous les porcs. Par ailleurs, certaines bandes, bien que pesées initialement à la date prévue, sont rentrées en engraissement plus tard si le PV à 62 jours était jugé insuffisant au regard de l'accès au système d'alimentation utilisé en engraissement.

Afin de pouvoir comparer la distribution du PV des porcs issus des différentes bandes à un âge commun, un PV théorique a été calculé pour chaque porc à cet âge. La valeur du PV est obtenue à partir du PV de fin de post-sevrage, augmenté ou diminué d'autant de fois le GMQ en post-sevrage que l'écart entre l'âge de référence et l'âge réel de sortie de post-sevrage.

##### **Distributions du poids vif initial commun**

La mise en lot des bandes 7 et 8 nécessite de respecter la variabilité de la population de porcelets en sortie de post-sevrage. Cette variabilité des porcs est prise en compte dans la distribution du PV initial commun. Pour chaque population définie par le sexe et le croisement, 10 000 tirages aléatoires sans remise de 36 individus parmi l'effectif sorti de post-sevrage sont réalisés à l'aide de la fonction `sample` (R, 2010). La proximité de distribution de chaque tirage avec la population d'origine est mesurée par la statistique D du test de Kolmorov-Smirnov (Marsaglia *et al.*, 2003), obtenue avec `ks.test` (R, 2010) :

$$D_{n,m} = \sup (| F_{1,n}(x) - F_{2,m}(x) |)$$

où  $F_1$  est la fonction de distribution cumulée du PV initial pour l'effectif complet de  $n$  porcs (soit 72 dans cette étude),  $F_2$  la fonction de distribution cumulée du PV initial des  $m$  porcs choisis (soit 36 dans cette étude). Cette statistique mesure la proximité de deux distributions. Lorsque  $D = 0$ , les deux distributions sont identiques. Une valeur croissante de  $D$  indique des écarts de plus en plus grands entre distributions. Le tirage ayant la plus faible statistique  $D$  est retenu pour composer le lot en essai.



### 2.1.8.3 Performances de croissance moyennes en engraissement

La pesée réalisée une semaine après l'entrée en engraissement correspond au début de l'essai. Certains porcs n'ont pu être suivis jusqu'à la fin de l'essai car morts avant le premier départ pour l'abattoir ou retirés de leur case pour cause de blessure. Par ailleurs, quand des signes cliniques de maladie ou de blessure ont été constatés ou quand le porc a perdu du poids entre deux pesées, ou n'en a pas pris, en parallèle à un très faible ingéré alimentaire, il a été exclu de l'essai.

Pour chaque porc, la CMJ, le GMQ et l'IC sont calculés sur l'ensemble de la période d'engraissement. Le rendement de carcasse est calculé à partir du rapport entre le poids de carcasse chaude et le PV mesuré le matin du départ pour l'abattoir. La teneur en muscle des pièces (TMP) de la carcasse est calculée à partir des valeurs de G2 et M2 à l'aide de l'équation (Daumas *et al.*, 2010) :

$$\text{TMP} = 62,19 - 0,722 \text{ G2} + 0,144 \text{ M2}$$

Les résultats de performances de croissance sont soumises à une analyse de variance avec la bande, le type sexuel, le type de croisement intra bande et l'interaction entre le sexe et le croisement intra bande en effets fixes, et la case intra bande en effet aléatoire (PROC MIXED ; SAS, 2008). Le poids chaud est inclus en covariable dans le modèle pour analyser les caractéristiques de carcasse (rendement, G2, M2, TMP). L'unité expérimentale est la case.

### 2.1.8.4 Caractérisation des profils de croissance et de consommation individuels

Le module de calibrage disponible dans InraPorc est utilisé pour estimer, par analyse statistique, les valeurs individuelles des variables qui décrivent la consommation *ad libitum* et la croissance à partir des données journalières de CMJ et des pesées. La procédure pour ce faire consiste en deux étapes : la première consiste à rentrer les données à utiliser pour le calibrage, la deuxième à estimer les valeurs des variables du modèle par calibrage.

#### **Fourniture des données pour le calibrage de InraPorc**

Chaque ligne de données importées comporte, de façon chronologique, l'âge et le PV jusqu'à l'abattage et/ou la quantité aliment consommée cumulée lorsqu'ils sont disponibles. Dans cette étude, les variables de la relation entre CMJ et PV sont obtenues en supposant qu'il n'y a pas de gaspillage d'aliment.



### **Estimation des valeurs individuelles des variables par calibration**

Le module de calibrage d'InraPorc estime les variables de la courbe de Gompertz et de la courbe d'ingestion en utilisant conjointement les données de suivi du PV et de la quantité d'aliment cumulée au cours de la période étudiée. L'ajustement d'un profil à ces données est réalisé en utilisant la méthode d'optimisation de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno fournie dans les algorithmes de TPMath.

#### *Courbe d'évolution du poids avec l'âge*

Le dépôt de protéines du porc est décrit par une équation de Gompertz en fonction de l'âge. Le dépôt de protéines est ensuite utilisé pour calculer l'évolution du PV avec l'âge. Le module de calibrage détermine les valeurs des variables de l'équation de Gompertz adaptée par van Milgen *et al.* (2008) à partir des X couples Age - PV disponibles pour chaque individu :

$$Prot(AGE) = Prot2 \cdot \left( \frac{Prot2}{Prot1} \right) \cdot \exp\left( \frac{-\left( e^{(-BGompertz \times (Age2 - Age1))} - e^{(-BGompertz \times (AGE - Age1))} \right)}{\left( -1 + e^{(-BGompertz \times (Age2 - Age1))} \right)} \right) \quad (1)$$

où Prot1 et Prot2 sont les quantités de protéines corporelles à deux âges (Age1 et Age2) et  $B_{Gompertz}$  est la précocité. En l'absence de données sur la réponse à un rationnement des porcs de l'étude, le poids à partir duquel l'ingéré énergétique est supposé ne plus limiter le potentiel de dépôt protéique ( $PV_{PDmax}$ ) est fixé à 70 kg pour tous les porcs.

Pour certains porcs dont le profil ne respecte pas l'hypothèse de croissance selon le modèle de Gompertz (porcs n'ayant pas pu exprimer leur potentiel de croissance suite à un évènement), le module de calibrage peut échouer dans la détermination des valeurs des variables ou donne aux variables des valeurs aberrantes, comme par exemple une précocité négative ou un dépôt moyen de protéines (PDM) supérieur à 240 g/j.

#### *Courbe d'évolution de la CMJ avec le PV*

La CMJ peut être exprimée en kg d'aliment ou en MJ d'ED, EM ou EN par jour. Par ailleurs, quatre équations de prédiction de la consommation individuelle (CI) selon le PV sont disponibles dans InraPorc :

- linéaire :  $CI = a + b \cdot PV$  (2)

- puissance :  $CI = a \cdot PV^b$  (3)

- exponentielle :  $CI = a \cdot (1 - \exp(b \cdot PV))$  (4)

- gamma de l'entretien :  $CI = (a \cdot PV \cdot b \cdot \exp(-b \cdot PV) + 1) \cdot c \cdot PV^{0,60}$  (5)



L'écart entre les valeurs de consommation prédites par chaque équation et les valeurs réellement mesurées a été quantifié par équation, par porc et par jour. Puis un écart moyen a été calculé par équation et par porc, pour une cinétique de  $n$  enregistrements, à partir de la racine de l'écart quadratique moyen de prédiction (RMSEP) :

$$RMSEP = \sqrt{\sum \frac{(CI_{prédit} - CI_{mesuré})^2}{n}} \quad (6)$$

Les RMSEP sont soumis à une analyse de variance (PROC MIXED ; SAS, 2008) avec le type d'équation, la bande, le type sexuel, le type de croisement intra bande, et leurs interactions en effets fixes, et la case intra bande en effet aléatoire.

### ***Vecteur individuel des variables descriptives d'un profil animal***

Chaque porc est décrit par un jeu de cinq variables :

#### Pour la croissance :

- le poids vif initial au début de la période de croissance
- le dépôt protéique moyen pendant la période de croissance
- le coefficient de précocité  $B_{\text{Gompertz}}$

Pour la consommation, les deux variables de l'équation, dont les valeurs dépendent de l'équation choisie (et de l'unité). Pour étudier la variabilité des profils des animaux, les variables utilisées seront :

- a (voir équations 1, 2, 3 et 4)
- b

Pour faciliter la comparaison des valeurs obtenues, le résultat de l'équation à deux PV de référence sera utilisé :

- à 50 kg (Q150),
- à 100 kg (Q1100).

Dans un premier temps les valeurs des variables sont obtenues à partir des données collectées entre le début de l'essai (couple AGE<sub>i</sub> - PV<sub>i</sub>) et l'abattage (couple AGE<sub>f</sub> - PV<sub>f</sub>, équivalent à DUREE - PV<sub>f</sub>). Le dépôt de protéines moyen sur cette période est noté PD<sub>m</sub>.

Dans un deuxième temps, l'âge au début de la période considérée est standardisé à 70 jours pour tous les porcs, soit après une semaine d'adaptation aux conditions d'élevage pour des porcs entrés à l'âge escompté au début de ce programme et le poids en début de période est donc le PV à 70 jours d'âge (PV<sub>70</sub>). Lorsqu'un porc entre en essai après 70 jours d'âge, le



profil obtenu est utilisé afin d'extrapoler rétroactivement les valeurs de PV, d'ingéré et de dépôt quotidien de protéines de son âge réel d'entrée en engraissement à l'âge de 70 jours. Pour chaque caractère (PV, ingéré et dépôt de protéines), cette extrapolation est fondée sur un polynôme du troisième degré ajusté sur les 20 premiers jours d'enregistrement. Par ailleurs, le poids de fin de croissance (PVf) est standardisé à 110 kg et la durée nécessaire pour atteindre ce PV depuis l'âge de 70 jours est notée DUREE'. Le dépôt de protéines moyen est alors recalculé entre 70 jours d'âge et 110 kg de PV et noté PDm'.

Ainsi, on peut distinguer les cinq variables nécessaires pour générer un profil :

- $B_{\text{Gompertz}}$
  - $PV_i$  à  $AGE_i$  ou  $PV_{70}$  à 70 jours d'âge
  - PDm (entre  $PV_i$  et PVf) ou PDm' (entre  $PV_{70}$  et 110 kg)
  - a
  - b
- }

→

relation  $PV = f(\text{Age})$
- }

→

relation  $CMJ = f(PV)$

et les trois variables supplémentaires, utilisées pour le décrire de façon plus pratique :

- DUREE (entre  $AGE_i$  et  $AGE_f$ ) ou DUREE' (entre 70 jours d'âge et 110 kg de PV)
- QI50, la CMJ à 50 kg de PV (en MJ EN/j)
- QI100, la CMJ à 100 kg de PV

## 2.2 METHODES MISES EN ŒUVRE POUR ETUDIER LA VARIABILITÉ

La structure de la variabilité d'une population est décrite par un vecteur des moyennes des variables et une matrice de variance-covariance qui détermine les variations autour de ces moyennes. Ces deux éléments sont analysés séparément.

Le but de ce chapitre est de :

- 1 - Décrire les outils utilisés pour définir les contours de la population. En particulier, il s'agit de déterminer le niveau de regroupement qui pourrait représenter l'unité structurale de base intégrant la covariance des variables ;
- 2 - Caractériser la covariance entre variables au sein du groupe ainsi défini ;
- 3 - Définir le vecteur de la valeur moyenne de chaque variable pour chaque groupe (appelé ci-après vecteur moyen) ;
- 4 - Générer des bandes virtuelles de porc à partir du vecteur moyen et de la matrice de variance-covariance obtenus. Cette étape de l'étude est réalisée à partir des porcs de la base de données issue des bandes 1 à 8.

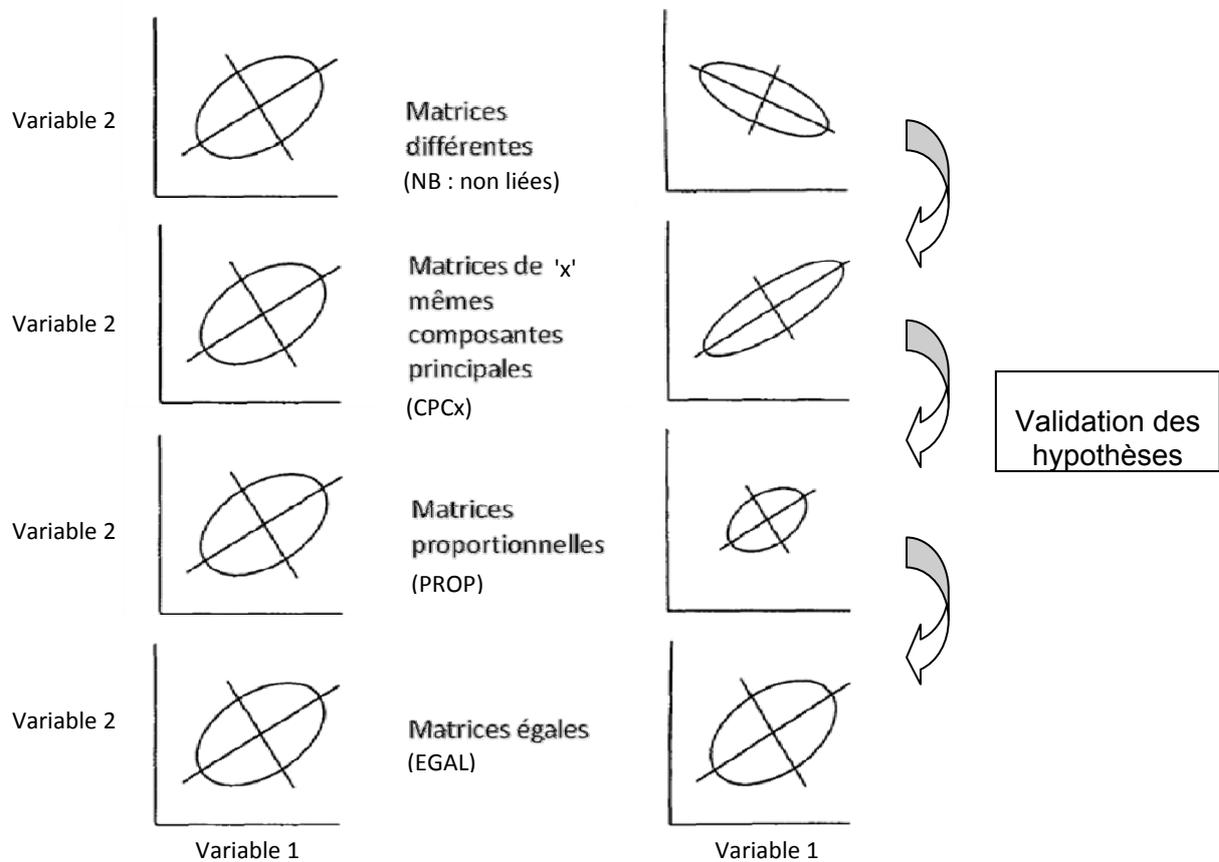


Figure 28 - Principe du modèle hiérarchique de Flury permettant de hiérarchiser les niveaux de ressemblance entre matrices de variance-covariance. Chaque ellipse représente une matrice projetée dans un plan défini par des composantes principales.

## 2.2.1 Détermination du niveau de regroupement

Le dispositif expérimental détermine les différents niveaux de regroupement qui peuvent être envisagés pour définir l'échelle d'étude. Ainsi, le regroupement peut être réalisé sur la base du type sexuel ( $n = 2$ , femelles vs mâles castrés), du type de croisement ( $n = 10$ ) ou de la bande ( $n = 8$ ) comme unité de covariance. Mais le niveau de séparation des groupes peut être envisagé de façon transversale entre ces critères, en regroupant des ensembles de porcs ayant des profils proches entre eux mais distants d'autres groupes transversaux.

### 2.2.1.1 Utilisation de la classification ascendante hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique (CAH) regroupe les individus sur la notion de distance définie par les valeurs des variables. Cette méthode vise à maximiser l'inertie intergroupe et minimiser l'inertie intragroupe. Ce faisant, elle permet d'effectuer une classification non supervisée, indépendante de la structure expérimentale. Elle est réalisée avec la fonction `agnes` du package `cluster` (Maechler *et al.*, 2012), sur l'ensemble des six variables descriptives d'un profil ( $PV_{70}$ ,  $PDm'$ ,  $B_{Gompertz}$ ,  $QI50$  et  $QI100$ , DUREE') puis sur une sélection de cinq variables définissant un profil ( $PV_{70}$ ,  $PDm'$ ,  $B_{Gompertz}$ ,  $QI50$  et  $QI100$ ).

### 2.2.1.2 Utilisation du modèle de Flury

Le modèle de Flury permet de hiérarchiser les niveaux de ressemblance entre matrices. Selon Flury (1988), deux matrices de variance-covariance peuvent ne présenter aucun lien entre elles (NL), ou partager une composante principale en commun (CP1), deux composantes principales (CP2), ou plus jusqu'à posséder toutes leurs composantes principales en commun (CPC). L'étape suivante pour les caractériser correspond à l'évaluation de leur proportionnalité (PROP) puis leur égalité (EGAL) (Figure 28).

Le logiciel `CPC` de Phillips et Arnold (1999) a été utilisé pour comparer les matrices de variance-covariance issues des différents niveaux de regroupement des animaux. Ainsi, en comparant les matrices de variance-covariance de différents groupes, par exemple celles issues des mâles castrés vs femelles, il est possible de déterminer si elles sont égales et si tous les individus font partie d'une même population. Dans le cas contraire, si les deux matrices sont différentes, il faut considérer que chaque type sexuel constitue une population et qu'une matrice de variance-covariance distincte par type sexuel doit être considérée. Les mêmes tests sont réalisés selon le type de croisement, la bande et les différentes combinaisons entre type sexuel, type de croisement et bande.



La colinéarité entre variables, en l'occurrence  $B_{\text{Gompertz}}$  et 'b', rend impossible l'inversion de matrice. Le test CPC doit donc être effectué en se basant sur les variables d'ingéré QI50 et QI100, plutôt que a et b.

## **2.2.2 Analyse des structures de variance-covariance**

### *2.2.2.1 Importance du centrage et de la réduction des données intra groupe*

Si un effet du niveau de groupe est observé sur les valeurs moyennes des variables ou leur covariance, les valeurs au sein de notre base ne peuvent pas être comparées telles quelles, sous peine de confondre la part de covariance interne à chaque groupe avec la covariance globale entre groupes. Les données seront alors centrées et réduites (= standardisées) par groupe afin d'analyser les corrélations entre variables et centrées par groupe afin d'en analyser la matrice de variance-covariance.

### *2.2.2.2 Observation préliminaire des corrélations entre variables par analyse en composantes principales*

L'observation de la covariance entre les variables est d'abord réalisée à travers leurs corrélations par une analyse en composantes principales (ACP, Husson *et al.*, 2010a) à l'aide de la fonction PCA du package FactoMineR (Husson *et al.*, 2010b).

### *2.2.2.3 Observation des corrélations entre variables par analyse factorielle multiple duale*

L'analyse factorielle multiple duale (AFMD, Lê *et al.*, 2007) est utilisée comme seconde méthode d'analyse des corrélations entre variables. Elle s'adapte particulièrement aux données structurées en différents niveaux de groupe. Elle permet la prise en compte d'un niveau de groupe et un centrage et une réduction des données intra-groupe qui réduisent l'impact d'une forte covariance spécifique d'un groupe vis-à-vis des covariances des autres groupes. De ce fait, cet outil permet de mieux observer la covariance commune aux différents groupes étudiés, en d'autres termes d'identifier la part générique de la variabilité.

### *2.2.2.4 Elaboration de la matrice de variance-covariance moyenne*

Dans le cas d'écarts significatifs de matrices de variance-covariance entre les groupes (voir § 2.2), la structure de variance-covariance de référence ne peut pas être la matrice de variance-covariance brute calculée sur l'ensemble des porcs des différents groupes. Une



matrice de variance-covariance moyenne doit être représentative de la part de covariance observée au sein de chaque groupe. Elle doit tenir compte de la structure en groupe de nos données afin de réduire l'influence de groupes particuliers, notamment au regard du nombre d'individus dans le groupe. Le calcul de cette matrice de variance-covariance générique peut se baser sur la définition mathématique de la matrice de variance-covariance, de terme général :

$$\widehat{\text{cov}}(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})^T \quad (7)$$

où X et Y représentent deux variables,  $\bar{X}$  et  $\bar{Y}$  représentent les moyennes de X et Y, N représente le nombre total d'individus de la base sur laquelle est calculée cette covariance et i est le numéro de l'individu auquel les valeurs des variables X et Y correspondent (i allant de 1 à N), l'exposant T indique la transposée d'une matrice ou d'un vecteur.

Afin de respecter le principe décrit dans le paragraphe 2.2.2.1 et dégager une structure de variance-covariance moyenne, une démarche inspirée des principes de pondération et de centrage des données de l'AFMD est appliquée.

Créons notre définition de covariance moyenne (cov') en introduisant une pondération par animal i sous la forme d'un poids  $p_i$  afin de tenir compte du nombre d'animaux par modalité :

$$\widehat{\text{cov}}'(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N p_i (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})^T \quad (8)$$

Afin de conserver l'ordre de grandeur des valeurs de variance et covariance d'une matrice de variance-covariance à l'échelle de la population, les poids sont contraints par :

$$\sum_{i=1}^N p_i = N \quad (9)$$

Il est ensuite possible de regrouper les produits ligne x colonne de la matrice par groupes d'individus :

$$\widehat{\text{cov}}'(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{N_l} p_i (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})^T \quad (10)$$

où L est le nombre de groupes et l est le numéro du groupe (numérotés de 1 à L) et  $N_l$  est le nombre de porcs du groupe l.

Par analogie avec l'AFMD, la covariance doit être évaluée intra-groupe en se basant sur des écarts à la moyenne du groupe, pas sur des écarts à la moyenne globale. Ceci permet



d'étudier la covariance interne à toute population de porcs et non pas la covariance globale de notre échantillon de porcs regroupant plusieurs groupes différents. Ainsi :

$$\widehat{\text{cov}}''(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{N_l} p_l (X_i - \bar{X}_l)(Y_i - \bar{Y}_l)^T \quad (11)$$

Ajoutons que les poids  $p_l$  peuvent varier d'un groupe à l'autre afin de corriger l'impact des effectifs dans l'évaluation d'une matrice de variance-covariance générique, mais qu'ils resteront constants au sein d'un même groupe, afin de conserver une importance égale entre les individus au sein d'un groupe. Nommons les  $p_l$  avec  $p_i = p_l$  pour les individus  $i$  appartenant au groupe  $l$  ( $l$  allant de 1 à  $L$ ), dans ce cas :

$$\widehat{\text{cov}}''(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{N_l} p_l (X_i - \bar{X}_l)(Y_i - \bar{Y}_l)^T \quad (12)$$

D'où

$$\widehat{\text{cov}}''(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^L p_l \sum_{i=1}^{N_l} (X_i - \bar{X}_l)(Y_i - \bar{Y}_l)^T \quad (13)$$

groupe L'estimateur de la covariance par apparaît alors facilement :

$$\widehat{\text{cov}}''(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^L p_l (N_l - 1) \widehat{\text{cov}}(X_l, Y_l) \quad (14)$$

Le produit  $(N_l - 1) \widehat{\text{cov}}(X_l, Y_l)$  implique que la matrice de variance-covariance d'un grand groupe aura plus de poids dans l'estimation de la matrice moyenne qu'une matrice de variance-covariance issue d'un petit groupe. Nous corrigeons cela en définissant les poids  $p_l$  comme le rapport d'une constante  $A$  et de la quantité  $N_l - 1$  :

$$p_l = \frac{A}{(N_l - 1)} \quad (15)$$

Dans ce cas, la valeur de  $A$  est contrainte par (9), ce qui donne :

$$\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{N_l} p_l = N \Leftrightarrow \sum_{l=1}^L \frac{N_l A}{N_l - 1} = N \Leftrightarrow A = \frac{N}{\sum_{l=1}^L \frac{N_l}{N_l - 1}} \quad (16)$$

$$p_l = \frac{N}{(N_l - 1) \sum_{l=1}^L \frac{N_l}{N_l - 1}}$$



Ces poids donnent un estimateur de la covariance interne des populations de porcs à partir des covariances de chaque groupe :

$$\widehat{\text{cov}}''(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^L \frac{N}{\sum_{l=1}^L \frac{N_l}{N_l-1}} \widehat{\text{cov}}(X_l, Y_l) \quad (17)$$

$$\widehat{\text{cov}}''(X, Y) = \frac{N}{(N-1) \sum_{l=1}^L \frac{N_l}{N_l-1}} \sum_{l=1}^L \widehat{\text{cov}}(X_l, Y_l) \quad (18)$$

#### 2.2.2.5 Evaluation de la matrice de variance-covariance moyenne

La matrice ainsi obtenue est comparée à la matrice de variance-covariance brute sur la base de leur proximité avec les matrices de variance-covariance intragroupes issues des bandes 9 et 10 (base de données d'évaluation). La proximité de ces deux matrices candidates aux covariances mesurées est résumée par la distance de  $\chi^2$  obtenue avec le test d'égalité du programme CPC.

### 2.2.3 Analyse du vecteur moyen des variables

Les effets fixes de la bande, du type sexuel et du croisement au sein de la bande et leurs interactions sur le vecteur moyen des variables ont été testés par analyse de variance (PROC MIXED ; SAS, 2008), en considérant comme effet aléatoire la case intra bande.

### 2.2.4 Générateur de bandes

Plusieurs méthodes ont été envisagées pour générer une population virtuelle, la seconde étant une évolution de la première visant à correspondre au mieux à notre patron de population.

La source de l'aléa dans tous procédés de génération aléatoire est un générateur de nombres pseudo-aléatoires (GNA), outil mathématique ayant plusieurs propriétés dont celle de fournir des séries de nombres statistiquement indépendants les uns des autres. Il existe plusieurs types de GNA. Ils ont des propriétés différentes mais n'ont, dans l'absolu, que la capacité de mimer un procédé aléatoire. Il est même possible de contraindre ces GNA



à reproduire la même séquence de valeurs en fixant une racine. La racine est une valeur numérique servant de base au calcul initial du GNA et elle conditionne la suite numérique générée.

La génération aléatoire multi variée de données suivant une matrice de variance-covariance a été décrite dans sa méthode la plus classique par Venables et Ripley (2002). Elle est fondée sur le tirage de valeurs centrées réduites de variables dans une loi normale. La matrice de variance-covariance servant de patron est diagonalisée dans l'espace de ses vecteurs propres suivant la décomposition de Cholesky. La dépendance et les écarts-types sont apportés par produit matriciel entre la matrice de valeurs générées et cette décomposition. La moyenne respective attendue est ensuite ajoutée aux valeurs générées (Ripley, 1987).

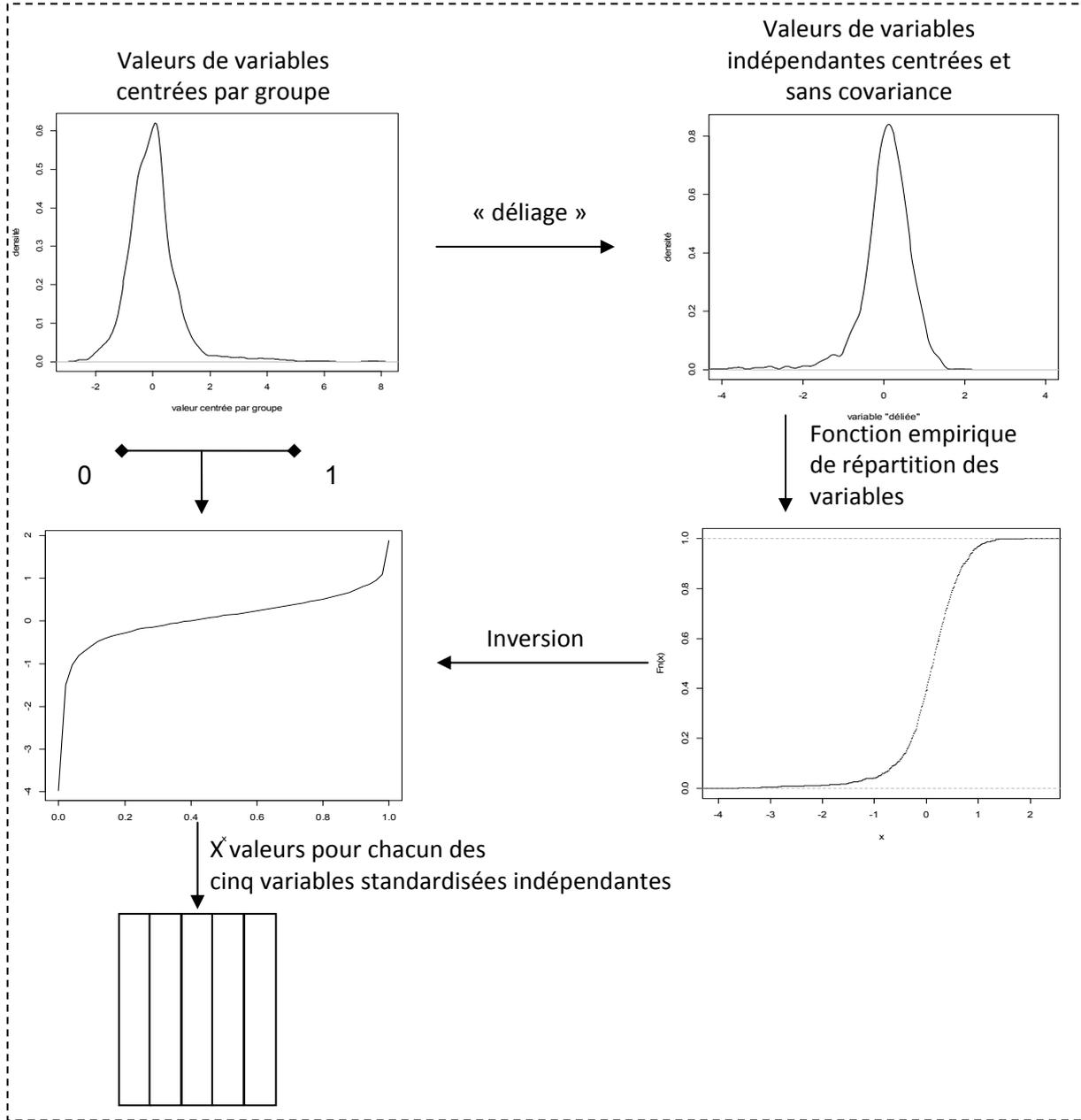
#### *2.2.4.1 Génération classique de population virtuelle*

Pour déterminer la taille de la population à générer, une première méthode a consisté à se baser sur la fonction VNORM incluse dans la PROC IML sous SAS. La racine de la génération aléatoire varie entre 200 et 10 000 par pas de 200 et la taille de population générée varie de 110 à 2200 individus par pas de 110. De cette façon, on observe la sensibilité du tirage à la racine utilisée en fonction de l'effectif du point de vue des écarts entre la moyenne et l'écart-type des valeurs générées et la moyenne et l'écart-type donnés comme consigne à la génération. Une taille suffisamment grande de population doit alors permettre d'atténuer les écarts dus à un trop petit échantillonnage.

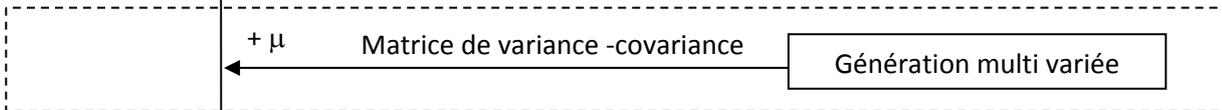
Une population de N1 profils de mâles castrés et femelles LWxPP est générée selon leurs vecteurs moyens respectifs et la matrice de variance-covariance moyenne obtenue en utilisant la fonction VNORM incluse dans la PROC IML sous SAS, les profils comportant des valeurs de  $B_{\text{Gompertz}}$  et de variable d'ingéré 'b' négatives devant ensuite être retirés de cet effectif.

#### *2.2.4.2 Génération évoluée de population virtuelle*

Afin de tenir compte des distributions spécifiques des variables obtenues dans notre population, la seconde méthode de génération ne se base plus sur le tirage de valeurs selon une loi normale. La fonction mvrnorm du package MASS sous R est utilisée pour servir de base à cette méthode. Son code a été utilisé car il comprend les produits matriciels permettant d'inclure la dépendance entre variables, mais la génération initiale de valeurs est modifiée :



ETAPE 2 = GENERATEUR CLASSIQUE<sup>1</sup>



ETAPE 3

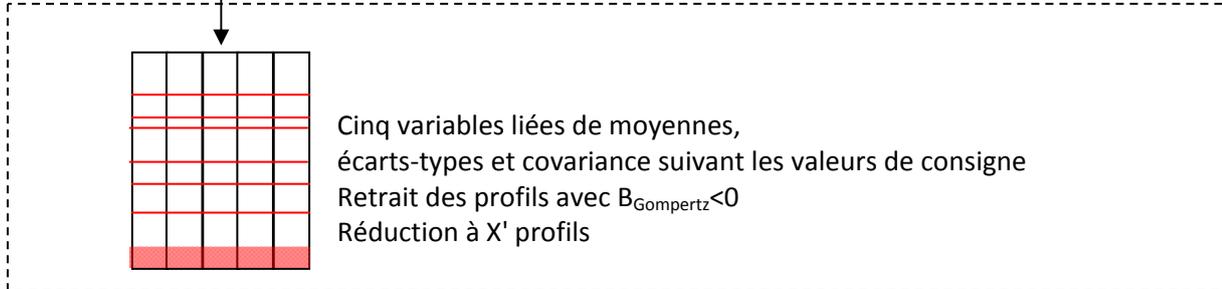


Figure 29 - Schéma des trois étapes du générateur évolué de population virtuelle

1. Habituellement la génération classique s'appuie sur des valeurs de variables générées en supposant qu'elles suivent des distributions de lois normales indépendantes (Ripley, 1987).

- le tirage se fait d'abord dans une fonction de répartition uniforme de 0 à 1 à l'aide de la fonction runif (R, 2010) en utilisant un générateur de nombres pseudo-aléatoires et une racine,
- les fonctions de répartition cumulées empiriques des variables sont alors inversées de sorte à obtenir la valeur correspondant à la probabilité précédemment tirée. Concrètement, en se basant sur la fonction de répartition cumulée  $P(x < X)$  des variables réelles, on cherche  $X$  à partir d'un  $P$  compris entre 0 et 1,
- les séries de valeurs ainsi obtenues subissent le même produit matriciel créant les liens entre variables et le même ajout de la valeur moyenne que lors d'une génération multi variée à partir de lois normales (principe issu de la décomposition de Cholesky).

L'ensemble des générateurs de nombres pseudo-aléatoires fournis avec R ont été utilisés (Wichmann-Hill, Marsaglia-Multicarry, Super-Duper, Mersenne-Twister, Knuth-TAOCP-2002, Knuth-TAOCP, L'Ecuyer-CMRG) et les racines de 1 à 10 000 ont été utilisées pour chacun de ces générateurs de nombres pseudo-aléatoires afin de générer des populations virtuelles de 1 000 individus tel que décrit dans les deux paragraphes suivants. Un modèle linéaire permet alors de déterminer le générateur de nombres aléatoires qui produit le plus faible pourcentage d'écart relatif entre la variance des valeurs générées et celle fournie comme consigne en début de génération. Ensuite, la racine choisie est celle qui a permis, avec ce générateur, d'atteindre la plus petite valeur d'écart relatif de variance.

L'obtention des fonctions de répartition de chaque variable n'est pas directe, puisque nos données sont influencées par le niveau moyen de chaque groupe et par les liens entre variables. Quelques transformations sont nécessaires à partir des valeurs recueillies pour chaque variable dans notre base de données (Figure 29) :

- les valeurs de chaque variable sont standardisées par groupe afin de pouvoir les comparer d'un groupe à l'autre conformément au paragraphe 2.2.1 :
- les valeurs de variables telles qu'elles ont été ajustées dans la population observée sont corrélées entre elles. La génération de profils se base sur des variables indépendantes que l'application de la matrice de variance-covariance rend dépendantes. Il est nécessaire de soustraire les liens entre les variables mesurées en leur « retirant » la covariance qui a été mesurée (étape de « déliage »). Il suffit pour cela de réaliser l'application inverse à la création de dépendance entre les variables à partir de la matrice de variance-covariance.



La génération multi-variée est fondée sur le calcul suivant :

$$Y = (AX^T)^T$$

où Y est la matrice constituée des variables corrélées, X la matrice des variables aléatoires indépendantes et A la matrice de passage permettant de lier les variables entre elles, issue de la décomposition en valeurs singulières de la matrice de variance-covariance.

Notre problème revient à chercher X à partir de Y :

$$Y = (AX^T)^T \Leftrightarrow Y = XA^T$$

d'où  $X = Y(A^T)^{-1}$

et  $X = Y(A^{-1})_T$

C'est avec cette écriture qu'ont été corrigées les valeurs de variables afin d'observer leur distribution « sans lien ».

La fonction de répartition cumulée empirique de ces valeurs est obtenue à l'aide de la fonction `ecdf` du package `stats` (R, 2010). Comme cette fonction de répartition n'a pas d'écriture mathématique, il n'est pas possible d'obtenir son inverse. Une écriture de cette fonction de répartition est alors obtenue par un lissage par splines d'interpolation en utilisant la fonction `interpSpline`. Son inverse est alors obtenu par la fonction `backSpline`. Ces deux fonctions sont issues du package `splines` (R, 2010). La fonction inverse obtenue prend en entrée des valeurs comprises entre 0 et 1 et produit en sortie des valeurs tirées dans les fonctions de répartition standardisées et indépendantes du type de variable étudiée.

Afin de ne pas générer de valeurs hautement improbables, qui sont rares mais pas impossibles à obtenir du fait du processus aléatoire, les domaines des fonctions de répartition empiriques standardisées sont limités à -4 et +4 (soit un domaine représentant 99,9% de probabilité d'une loi normale).

Une fois la génération de valeurs des variables réalisée, la dépendance entre variables est classiquement introduite par produit matriciel avec la décomposition en valeurs singulières de la matrice de variance-covariance attendue.

Une correction des écarts-types par variable est assurée par itération. Pour un objectif de N1 individus, N2 (N2 > N1) profils de cinq variables sont produits ; parmi eux certains ont un  $B_{\text{Gompertz}}$  négatif et/ou une variable d'ingéré 'b' négative.



Les moyennes et écarts-types des N1 premiers profils sans  $B_{\text{Gompertz}}$  ni  $b$  négatifs sont calculés. Afin de correspondre aux moyennes et écarts-types de consigne, les valeurs générées sont centrées et multipliées par le rapport entre l'écart-type attendu et l'écart-type constaté. De cette façon les écarts-types des valeurs générées égalent ceux attendus. La moyenne attendue pour chaque variable est ensuite ajoutée à ces valeurs centrées, la moyenne des valeurs générées égalant celle attendue.

Les profils dont  $B_{\text{Gompertz}}$  ou  $b$  sont négatifs qui restent après cette correction sont éliminés. Mais comme la correction de moyenne et d'écart-type peut induire de nouvelles valeurs de  $B_{\text{Gompertz}}$  ou ' $b$ ' négatifs, leur élimination modifiera moyennes et écarts-types des N1 premiers profils qui ne comprenaient pas de  $B_{\text{Gompertz}}$  ou  $b$  négatifs initialement.

Afin de corriger ce nouvel écart, le procédé recommence à partir de la deuxième étape et ce jusqu'à arrêt de l'obtention des  $B_{\text{Gompertz}}$  ou  $b$  négatifs ou l'épuisement des (N2-N1) profils excédentaires. L'éventuel arrêt de la génération par épuisement des profils excédentaires sera détecté par la présence de  $B_{\text{Gompertz}}$  ou ' $b$ ' négatifs dans le jeu de profils à la fin de la correction par itération.

#### *2.2.4.3 Vérification des populations générées*

Les profils générés doivent correspondre au patron de population précédemment déterminé.

Pour cela, les valeurs obtenues pour chaque variable sont soumises à plusieurs tests :

- une différence de moyenne est évaluée par un test de Student,
- une différence de variance est évaluée par un test de Fisher,
- une différence de distribution est évaluée par un test de Kolmogorov-Smirnov,
- la matrice de variance-covariance obtenue au sein de la population générée est comparée par le test de Flury (programme CPC) au patron de variance-covariance déterminé précédemment. La taille de population utilisée pour ce test est dans un premier temps celle déterminée suivi la méthode décrite dans le paragraphe 2.3.9.1 et la taille de la population ayant servi à la définition de notre patron de variance-covariance, puis correspond à un effectif réaliste de bande fixé à 144 individus.

**Tableau 18 - Proportion de porcs exclus de la base de données selon la bande, le type de verrat ou le sexe**

Item	Modalité	Effectif initial	Morts, %	Malades, %	Profils non établis, %
Bande <sup>1</sup>	1	144	7,6	0,0	0,7
	2	144	2,8	0,0	13,9
	3	144	3,5	0,7	1,4
	4	144	2,8	2,1	0,7
	5	144	2,8	0,7	4,9
	6	144	3,5	2,1	3,5
	7	144	6,3	1,4	2,1
	8	144	1,4	3,5	17,4
	9	144	0,7	0,7	3,5
	10	144	144	2,1	2,1
Sexe <sup>2</sup>	Femelles	721	2,9	1,5	5,7
	Mâles castrés	719	3,8	1,1	5,8
Type de verrat <sup>1</sup>	Duroc A	72	4,2	0,0	6,9
	Duroc N	72	8,3	2,8	1,4
	Kantor	72	2,8	0,0	0,0
	LW	75	1,3	2,7	12,0
	LWxPP	717	3,5	1,5	6,7
	Maxter	72	4,2	2,8	0,0
	P76	72	1,4	0,0	13,9
	PIC	72	2,8	0,0	6,9
	PP	144	2,8	0,7	1,4
	Virtus	72	72	1,4	1,4
Moyenne		1440	3,3	1,3	5,8

## 2.3 RÉSULTATS

### 2.3.1 Construction des bases de données

Sur l'ensemble des dix bandes étudiées, 1440 porcs ont été mis en essai, dont 97% ont été étudiés jusqu'à l'abattage (Tableau 19 et Tableau 20). L'effectif de porcs par croisement et type sexuel par bande diffère parfois de l'objectif prévu (36 individus). Lors du transfert des animaux de la salle de post-sevrage à la salle d'engraissement, des problèmes de hernie ont parfois été constatés, non détectés lors de la pesée de la veille. Il est également arrivé qu'un animal se blesse dès le premier jour en engraissement. Dans ces deux situations, il a fallu remplacer les porcs concernés. Compte tenu des effectifs de porcs restant de la bande, il n'a pas toujours été possible de respecter le type de croisement et/ou le sexe, d'où un nombre de porcs différent de 36, à une ou deux unités près (Tableau 19 et Tableau 20).

Quatre-vingt-neuf pourcents des porcs des bandes 1 à 8 sont conservés pour élaborer la base de données de calibrage. De même, 90% des porcs des bandes 9 et 10 sont conservés pour élaborer la base de données d'évaluation. Les autres porcs ne sont pas retenus pour différentes raisons, dont des problèmes sanitaires ayant entraîné la mort ou non, et des cinétiques d'évolution du PV ou de la CMJ n'ayant pas permis un calibrage du profil animal. Ainsi, pendant l'essai, le taux de pertes avant l'abattage est en moyenne de 3,3% (Tableau 18). Il varie entre 0,7 et 7,6% selon la bande ( $P = 0,06$ ). Compte-tenu du fait que certains croisements sont étudiés seulement sur une bande, l'effet du croisement est partiellement confondu avec l'effet de la bande sur ce critère. Il est comparable chez les deux sexes (respectivement 2,9 et 3,8%,  $P = 0,38$ ). La proportion de porcs ayant présenté des problèmes cliniques sans mortalité est en moyenne de 1,3%. Elle varie entre 0 et 3,5% selon la bande et est comparable entre les femelles et les mâles castrés (respectivement 1,5 et 1,1%).

La vérification approfondie des enregistrements de CMJ par les DAC permet de disposer d'un nombre important d'observations quotidiennes de la CMJ. Le dysfonctionnement prolongé de certains DAC a cependant empêché la caractérisation de la CMJ pour certains porcs, notamment dans les bandes 2 et 8. Pour les autres animaux, une fois l'étape de vérification et de correction manuelle terminée, la CMJ de chaque porc non mort précocement et non malade était disponible tout au long de l'engraissement. Les porcs dont la CMJ n'était pas connue et ceux pour lesquels le calibrage du profil animal a échoué

**Tableau 19 - Devenir des porcs mis en essai (partie 1/2)**

Bande	Verrat	Sexe	Effectif initial <sup>1</sup>		Etudiés jusqu'à l'abattage			Effectif dans la base(6) = (3) - (4) - (5)
			Total (1)	dont morts après entrée en engraissement(2)	Total (3) = (1) - (2)	malade (4)	profil non disponible <sup>1</sup> (5)	
1	LWxPP	F	35	3	32	0	1	31
		MC	37	5	32	0	0	32
	PP	F	36	1	35	0	1	34
		MC	36	2	34	0	0	34
2	LWxPP	F	37	0	37	0	5	32
		MC	35	2	33	0	5	28
	P76	F	37	0	37	0	9	28
		MC	35	2	33	0	2	31
3	LWxPP	F	36	1	35	0	0	35
		MC	36	2	34	1	2	31
	Kantor	F	36	1	35	0	0	35
		MC	36	1	35	0	0	35
4	LWxPP	F	36	1	35	1	0	34
		MC	36	0	36	0	1	35
	Maxter	F	36	0	36	2	0	34
		MC	36	3	33	0	0	33
5	LWxPP	F	36	1	35	1	1	33
		MC	36	1	35	0	1	34
	PIC	F	36	1	35	0	4	31
		MC	36	1	35	0	1	34
6	LWxPP	F	36	1	35	2	0	33
		MC	36	1	35	1	0	34
	Duroc A	F	36	2	34	0	4	30
		MC	36	1	35	0	1	34
7	LWxPP	F	36	0	36	0	1	35
		MC	36	3	33	0	1	32
	Duroc N	F	36	3	33	1	0	32
		MC	36	3	33	1	1	31
8	LWxPP	F	36	1	35	3	9	23
		MC	36	0	36	1	14	21
	PP	F	36	1	35	0	1	34
		MC	36	0	36	1	1	34
Total bandes 1 à 8			1152	44	1108	15	66	1027

1. Porcs dont les valeurs des variables descriptives de l'évolution du PV ou de la CMJ n'ont pu être estimées ou sont apparues aberrantes.

**Tableau 20 - Devenir des porcs mis en essai (partie 2/2)**

Bande	Verrat	Sexe	Effectif initial <sup>1</sup>		Etudiés jusqu'à l'abattage			Effectif dans la base(6) = (3) - (4) - (5)
			Total (1)	dont morts après entrée en engraissement(2)	Total (3) = (1) - (2)	malade (4)	profil non disponible <sup>1</sup> (5)	
9	LWxPP	F	36	0	36	0	1	35
		MC	36	0	35	0	1	35
	Virtus	F	36	0	36	0	1	35
		MC	36	1	35	1	2	32
10	LWxPP	F	35	2	33	0	4	29
		MC	34	0	34	1	1	32
	LW	F	37	1	36	1	1	34
		MC	38	0	38	1	8	29
Total bandes 1 à 10			1440	48	1392	19	85	1288

1. Porcs dont les valeurs des variables descriptives de l'évolution du PV ou de la CMJ n'ont pu être estimées ou sont apparues aberrantes.

**Tableau 21 - Nombre d'enregistrements de CMJ (jours x porcs) réalisés et conservés dans la base de données après procédure de vérification des données et corrections des enregistrements DAC (partie 1/2)**

Bande	Verrat	Sexe	CMJ enregistrées				CMJ dans la base de données		
			nb initial	morts	malades	profils non calibrés	non corrigées	corrigées <sup>1</sup>	total
1	LWxPP	F	3154	66		104	2601	383	2984
		MC	3306	313			2629	364	2993
	PP	F	3610	102			2980	528	3508
		MC	3333	126			2768	439	3207
2	LWxPP	F	3955	118		551	2578	708	3286
		MC	3481	30		528	2293	630	2923
	P76	F	3822			814	2368	640	3008
		MC	3338	18		196	2472	652	3124
3	LWxPP	F	3179	29			2671	479	3150
		MC	2951	34	81	180	2249	407	2656
	Kantor	F	3159				2493	666	3159
		MC	3014	18			2392	604	2996
4	LWxPP	F	3363	23	98		2713	529	3242
		MC	3299			88	2696	515	3211
	Maxter	F	3421		187		2875	359	3234
		MC	3184	226			2601	357	2958
5	LWxPP	F	3307	40	97	97	2634	439	3073
		MC	3052	92		80	2438	442	2880
	PIC	F	3349	91		345	2345	568	2913
		MC	2980	45		96	2317	522	2839
6	LWxPP	F	3469	48	204		2858	359	3217
		MC	3272	59	103		2711	399	3110
	Duroc A	F	3255	155		340	2201	559	2760
		MC	3311	84		78	2577	572	3149
7	LWxPP	F	3307			90	2128	1089	3217
		MC	3232	199		91	1929	1013	2942
	Duroc N	F	3137	101	92		1911	1033	2944
		MC	3187	158	91	92	1895	951	2846
8	LWxPP	F	3343	64	278	845	1600	556	2156
		MC	3375		94	1311	1467	503	1970
	PP	F	3321	35		94	2555	637	3192
		MC	3378		92	94	2554	638	3192

1. Sur une même journée, la CMJ d'un porc peut être corrigée manuellement par un facteur multiplicatif tenant compte d'une dérive des enregistrements DAC par rapport aux quantités réellement versées dans la trémie et/ou par une réattribution porc par porc et/ou une répartition des visites alimentaires non attribuées par le DAC entre porcs de la case. Le détail de ces corrections est reporté en Annexe 1 et Annexe 2.

**Tableau 22 - Nombre d'enregistrements de CMJ (jours x porcs) réalisés et conservés dans la base de données après procédure de vérification des données et corrections des enregistrements DAC (partie 2/2)**

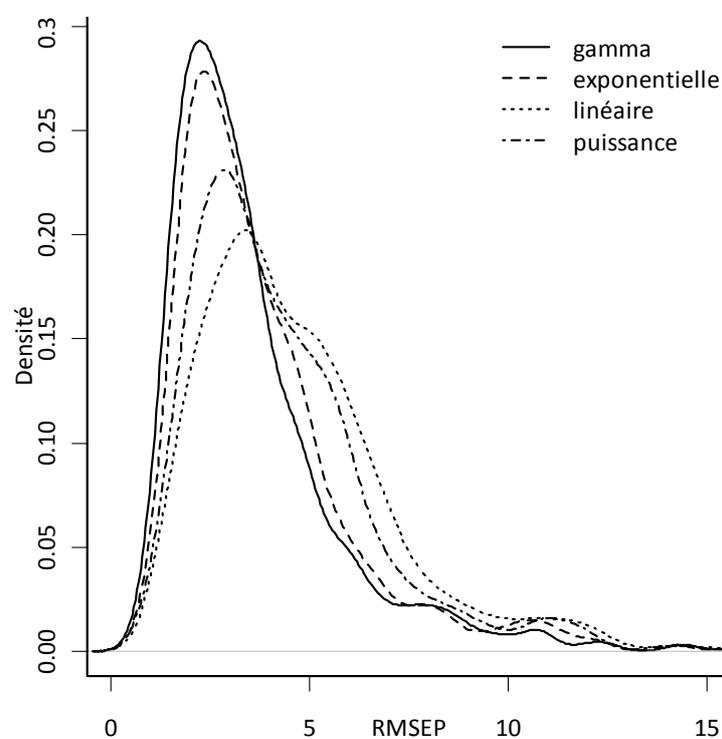
Bande	Verrat	Sexe	CMJ enregistrées				CMJ dans la base de données		
			nb initial	morts	malades	profils non calibrés	non corrigées	corrigées <sup>1</sup>	total
9	LWxPP	F	3119			84	2267	768	3035
		MC	3037			84	2211	742	2953
	Virtus	F	2957			84	1601	1272	2873
		MC	3030	81	80	167	1534	1168	2702
10	LWxPP	F	3358	103		396	2182	677	2859
		MC	3356		99	98	2359	800	3159
	LW	F	3617	71	95	99	2084	1268	3352
		MC	3745		98	786	1819	1042	2861
Total général			132063	2529	1789	7912	97100	22733	119833

1. Sur une même journée, la CMJ d'un porc peut être corrigée manuellement par un facteur multiplicatif tenant compte d'une dérive des enregistrements DAC par rapport aux quantités réellement versées dans la trémie et/ou par une réattribution porc par porc et/ou une répartition des visites alimentaires non attribuées par le DAC entre porcs de la case.

**Tableau 23 - Valeur moyenne de l'erreur d'ajustement (RMSEP, MJ EN cumulés/porc) selon l'équation utilisée et le type sexuel**

Equation	Type sexuel	RMSEP, MJ EN/ porc	ESR	Statistiques <sup>1</sup>
Linéaire	Femelle	4,3	3,2	$E^{P<0,01}, S^{P<0,01}, B^{P<0,01}, C^{NS}$ $E \times S^{P<0,01}$ $E \times B^{P<0,01}$ $E \times C^{NS}$ $B \times S^{P<0,01}$ $C \times S^{P<0,01}$
	Mâle castré	5,5		
Puissance	Femelle	4,1		
	Mâle castré	5,1		
Exponentielle	Femelle	3,9		
	Mâle castré	4,6		
Gamma	Femelle	3,7		
	Mâle castré	4,2		

1. Analyse de la variance (proc MIXED, SAS) avec en effets fixes l'équation (E), la bande (B), le type sexuel (S), le type de croisement intra-bande (C) et les interactions. NS :  $P > 0,05$ . ESR : Erreur standard résiduelle.



**Figure 30 - Fonctions de répartition de l'erreur RMSEP (MJ EN cumulés/porc) selon l'équation de prédiction de l'ingéré**

représentent 6% de l'effectif initial. Cette proportion est semblable chez les femelles et les mâles castrés et est plus élevée chez les croisements étudiés pendant les bandes 2 et 8. Au total, 91% des données initiales exprimées en équivalent jours x porcs (Tableau 21, Tableau 22) sont disponibles dans les deux bases de données. Parmi les données de CMJ conservées, 22% ont fait l'objet d'une correction manuelle, réduisant ainsi la perte brute de données.

### **2.3.2 Choix de l'équation CMJ = f(PV)**

Les données des bandes 1 à 8 ont été utilisées pour étudier l'ajustement des équations linéaire, puissance, exponentielle et gamma de l'entretien aux CMJ mesurées chez les porcs. Quatre ajustements ont été réalisés par animal à partir de ces quatre équations. L'écart moyen (RMSEP) entre les valeurs de CMJ prédites par ces équations et les valeurs réellement mesurées a été quantifié par équation, par unité et par porc. L'énergie nette est l'unité choisie pour exprimer l'ingéré. Dans la mesure où les aliments utilisés pour les différentes bandes présentent tous la même teneur en EN, le dispositif ne permet pas d'étudier l'influence de ce critère sur la qualité d'ajustement de l'équation d'ingestion.

#### *2.3.2.1 Choix de l'équation*

Le type d'équation a un effet significatif sur la qualité de l'ajustement aux données ( $P < 0,01$  ; Tableau 23), la fonction gamma étant celle pour laquelle l'erreur moyenne est la plus faible. L'analyse des fonctions de répartition de l'erreur selon l'équation utilisée indique que la fonction gamma présente une distribution de l'erreur plus centrée sur les valeurs faibles (Figure 30). Les erreurs moyennes, c'est à dire entre 4 et 7 MJ EN/porc, sont moins fréquentes avec la fonction gamma. En d'autres termes, cela témoigne d'un meilleur ajustement des profils individuels avec la fonction gamma qu'avec les autres fonctions. En revanche, pour une RMSEP supérieure à 7 MJ EN/porc, correspondant à des profils d'ingestion très irréguliers, la performance d'ajustement est faible et similaire pour les quatre équations.

**Tableau 24 - Evaluation de la normalité des distributions de poids vif (PV) corrigé à 65 jours d'âge pour l'effectif complet de porcs à la sortie de post-sevrage et pour ceux entrés en engraissement selon la bande, le croisement et le type sexuel**

Type de porc			En sortie de post-sevrage				A l'entrée en engraissement			
			Normalité <sup>1</sup>		Normalité $\sigma^2$		Normalité <sup>1</sup>		Normalité $\sigma^2$	
Bande	Verrat	Sexe	D	P	D	P	D	P	D	P
1	LWxPP	F	0,0748	0,79	0,0598	0,94	0,1405	0,45	0,1795	0,18
		MC	0,0680	0,92	0,0649	0,94	0,0854	0,93	0,1366	0,45
	PP	F	0,0650	0,87	0,0869	0,55	0,0912	0,90	0,2282	0,04
		MC	0,1068	0,41	0,1146	0,33	0,0901	0,91	0,2927	<0,01
2	LWxPP	F	0,0985	0,62	0,1416	0,20	0,1175	0,64	0,2052	0,08
		MC	0,0612	0,98	0,0759	0,90	0,0996	0,84	0,1655	0,26
	P76	F	0,0582	0,93	0,0796	0,65	0,1075	0,75	0,1496	0,34
		MC	0,1303	0,18	0,1297	0,18	0,1650	0,27	0,1672	0,25
3	LWxPP	F	0,0706	0,89	0,0529	0,99	0,0987	0,84	0,1215	0,62
		MC	0,0698	0,87	0,0831	0,70	0,0788	0,97	0,1101	0,73
	Kantor	F	0,0749	0,85	0,0950	0,59	0,1428	0,42	0,1225	0,61
		MC	0,0987	0,45	0,0977	0,46	0,1021	0,81	0,1277	0,56
4	LWxPP	F	0,0866	0,73	0,1067	0,47	0,1031	0,80	0,1802	0,17
		MC	0,0654	0,91	0,0947	0,53	0,1196	0,64	0,1628	0,26
	Maxter	F	0,1031	0,56	0,0995	0,60	0,0827	0,95	0,1655	0,25
		MC	0,0950	0,48	0,0994	0,42	0,1056	0,78	0,1351	0,48
5	LWxPP	F	0,0789	0,88	0,1088	0,53	0,1111	0,72	0,1713	0,21
		MC	0,1234	0,24	0,1284	0,20	0,1447	0,40	0,1694	0,23
	PIC	F	0,1095	0,31	0,1296	0,15	0,0989	0,84	0,2091	0,07
		MC	0,0936	0,69	0,1066	0,52	0,1433	0,45	0,2043	0,10
6	LWxPP	F	0,0948	0,66	0,1136	0,43	0,1281	0,60	0,2012	0,11
		MC	0,0746	0,83	0,0797	0,76	0,1081	0,75	0,1579	0,30
	Duroc A	F	0,0990	0,46	0,1000	0,45	0,1140	0,69	0,1558	0,31
		MC	0,0872	0,70	0,0737	0,86	0,0992	0,84	0,1455	0,39
7	LWxPP	F	0,0926	0,62	0,0900	0,65	0,0798	0,96	0,0574	0,99
		MC	0,0813	0,79	0,0742	0,87	0,0929	0,89	0,0720	0,98
	Duroc N	F	0,0687	0,92	0,0667	0,93	0,0556	0,99	0,0564	0,99
		MC	0,0837	0,60	0,0739	0,75	0,0963	0,86	0,0765	0,97
8	LWxPP	F	0,0753	0,81	0,0891	0,62	0,0650	0,99	0,0670	0,99
		MC	0,0582	0,96	0,0671	0,89	0,0723	0,98	0,0603	0,99
	PP	F	0,0752	0,81	0,0816	0,72	0,0804	0,96	0,1277	0,56
		MC	0,0626	0,96	0,0516	0,99	0,0683	0,99	0,0660	0,99
9	LWxPP	F	0,0705	0,85	0,0683	0,87	0,056	0,99	0,1638	0,24
		MC	0,0870	0,62	0,0846	0,66	0,1290	0,54	0,1684	0,23
	Virtus	F	0,0894	0,62	0,0832	0,71	0,1455	0,41	0,2168	0,06
		MC	0,0475	0,98	0,0482	0,98	0,1135	0,70	0,2089	0,07
10	LWxPP	F	0,0955	0,59	0,0951	0,58	0,1282	0,57	0,1895	0,14
		MC	0,0972	0,68	0,0881	0,77	0,0883	0,93	0,1216	0,65
	LW	F	0,0960	0,57	0,1465	0,12	0,1421	0,37	0,2624	<0,01
		MC	0,0769	0,77	0,1315	0,16	0,1379	0,43	0,2166	0,05

1. La statistique D du test de Kolmogorov-Smirnov est utilisée pour déterminer si l'écart entre la distribution du groupe par rapport à une loi normale de moyenne et écart-type correspondants à ce groupe est significatif (P).

2. La statistique D du test de Kolmogorov-Smirnov est utilisée pour déterminer si l'écart entre la distribution du groupe par rapport à une loi normale de moyenne correspondant à ce groupe et d'écart-type identique à celui calculé à partir de l'ensemble des animaux à la sortie de post-sevrage (= 4,125) est significatif (P).

### **2.3.3 Choix des porcs en fin de post-sevrage**

#### *2.3.3.1 Mise en lot classique à l'entrée en engraissement*

Pour les bandes 1 à 6 et 9 à 10, le choix des porcs a été réalisé en respectant les cinq contraintes habituellement appliquées à la station expérimentale lorsqu'il s'agit de choisir un nombre donné de porcs à partir d'une population plus importante et que ces porcs sont ensuite élevés dans des cases équipées de DAC.

L'âge de référence utilisé pour comparer le PV initial des porcs issus de toutes les bandes est 65 jours. Il correspond à l'âge des porcs les plus jeunes au début de la période expérimentale, c'est à dire après une semaine d'adaptation. A 65 jours, tous les groupes étudiés ont une distribution de PV corrigé à cet âge ( $PV_{65j}$ ) comparable à une loi normale, dans le sens qu'il n'est pas possible de démontrer une différence avec une distribution normale (Tableau 24). A ce stade, l'écart-type des lois normales est en moyenne de 4,125 kg et ne diffère pas significativement d'un groupe à l'autre ; en revanche le PV moyen change d'un groupe à l'autre. Le PV des porcs mis en lot en engraissement suit également une loi normale. Cependant, parmi les bandes 1 à 6, 9 et 10, l'écart entre ces distributions et une loi normale présentant un écart-type de 4,125 est significativement différent pour certains groupes (cas des porcs PP de la bande 1 par exemple, Tableau 24).

La contrainte qui conduit à exclure les porcs les plus légers et les plus lourds lors de la mise en lot induit une diminution systématique du  $CV_{PV}$  dans le groupe de porcs choisis en comparaison à la population initiale (Tableau 25). A partir des porcs croisés LWxPP issus des différentes bandes, la Figure 31 illustre le fait que la diminution du  $CV_{PV}$  est d'autant plus importante que le poids moyen de bande en fin de post-sevrage est bas, car dans une telle situation la proportion de porcs pesant moins de 18 kg s'accroît. La diminution du  $CV_{PV}$  pour les autres types de croisement est comparée à celle des porcs LWxPP dans la Figure 32. La plage de diminution du  $CV_{PV}$  est inférieure à 3 points autour de celle observée chez les porcs LWxPP.

**Tableau 25 -Comparaison du coefficient de variation du poids (CV<sub>PV</sub>) en fin de post-sevrage des porcs de l'ensemble de la population et des animaux entrés en engraissement selon la bande, le croisement et le sexe (en Annexe 3 : selon la bande et le croisement)**

Bande	Verrat	Sexe	En sortie de post-sevrage				A l'entrée en engraissement			
			n	μ, kg	σ, kg	CV, %	n	μ, kg	σ, kg	CV, %
1	LWxPP	F	71	26,2	3,9	14,9	35	27,6	2,6	9,4
		M	61	25,9	4,3	16,5	37	27,4	2,6	9,5
	PP	F	80	25,5	3,3	13,1	36	26,4	2,0	7,6
		M	66	25,6	3,6	14,1	36	26,7	1,7	6,2
2	LWxPP	F	55	23,5	3,0	12,7	37	24,4	2,0	8,3
		M	52	23,2	3,6	15,5	35	24,3	2,3	9,4
	P76	F	82	23,1	3,0	13,2	37	24,6	2,5	10,3
		M	69	23,7	3,7	15,5	35	25,1	2,6	10,4
3	LWxPP	F	63	27,4	4,0	14,7	36	27,7	3,2	11,7
		M	68	27,5	4,1	14,8	36	27,3	3,3	12,2
	Kantor	F	66	27,6	4,0	14,4	36	27,7	3,3	12,0
		M	73	28,1	4,6	16,3	36	27,9	3,7	13,4
4	LWxPP	F	60	28,1	3,6	12,9	36	29,8	2,5	8,5
		M	69	27,9	3,9	13,9	36	29,5	2,7	9,0
	Maxter	F	56	28,1	4,7	16,6	36	29,5	2,6	8,8
		M	75	29,1	4,7	16,2	36	29,9	2,8	9,4
5	LWxPP	F	52	24,0	3,4	14,3	36	23,8	2,2	9,3
		M	67	23,9	4,1	17,3	36	24,4	3,1	12,7
	Pic	F	74	23,9	3,6	15,0	36	24,9	2,5	9,9
		M	58	24,2	3,7	15,2	36	25,1	2,0	8,1
6	LWxPP	F	59	23,6	3,7	15,7	36	25,1	2,4	9,4
		M	70	22,7	3,7	16,1	36	24,7	2,7	10,8
	Duroc A	F	71	25,7	4,0	15,5	36	25,6	2,7	10,5
		M	62	25,5	3,6	14,0	36	24,9	2,8	11,1
7	LWxPP	F	63	24,7	3,6	14,6	36	25,1	3,8	15,3
		M	60	25,1	3,9	15,5	36	25,3	3,7	14,7
	Duroc N	F	62	23,0	4,2	18,1	36	23,6	3,6	15,4
		M	80	23,7	3,6	15,4	36	23,6	3,2	13,7
8	LWxPP	F	68	21,4	4,5	21,0	36	22,9	3,5	15,1
		M	70	21,9	4,1	18,8	36	22,6	3,3	14,6
	PP	F	68	22,0	3,7	16,6	36	22,7	2,8	12,3
		M	61	21,7	4,1	18,7	36	23,1	3,6	15,7
9	LWxPP	F	70	23,2	3,4	14,6	36	24,9	2,1	8,5
		M	71	23,2	3,7	15,9	36	24,7	2,3	9,3
	Virtus	F	65	23,4	4,0	17,3	36	24,2	2,1	8,6
		M	92	23,1	3,8	16,3	36	24,6	2,2	8,9
10	LWxPP	F	66	23,9	4,0	16,9	35	24,6	2,5	10,1
		M	55	22,7	3,6	15,7	34	24,3	2,7	11,3
	LW	F	60	22,3	2,8	12,4	37	23,1	1,9	8,4
		M	68	22,4	2,8	12,5	38	23,3	2,3	9,7
Total			2659	24,5	4,3	17,6	1440	25,4	3,4	13,3

### 2.3.3.2 Mise en lot prenant en compte le $CV_{PV}$ en fin de post-sevrage

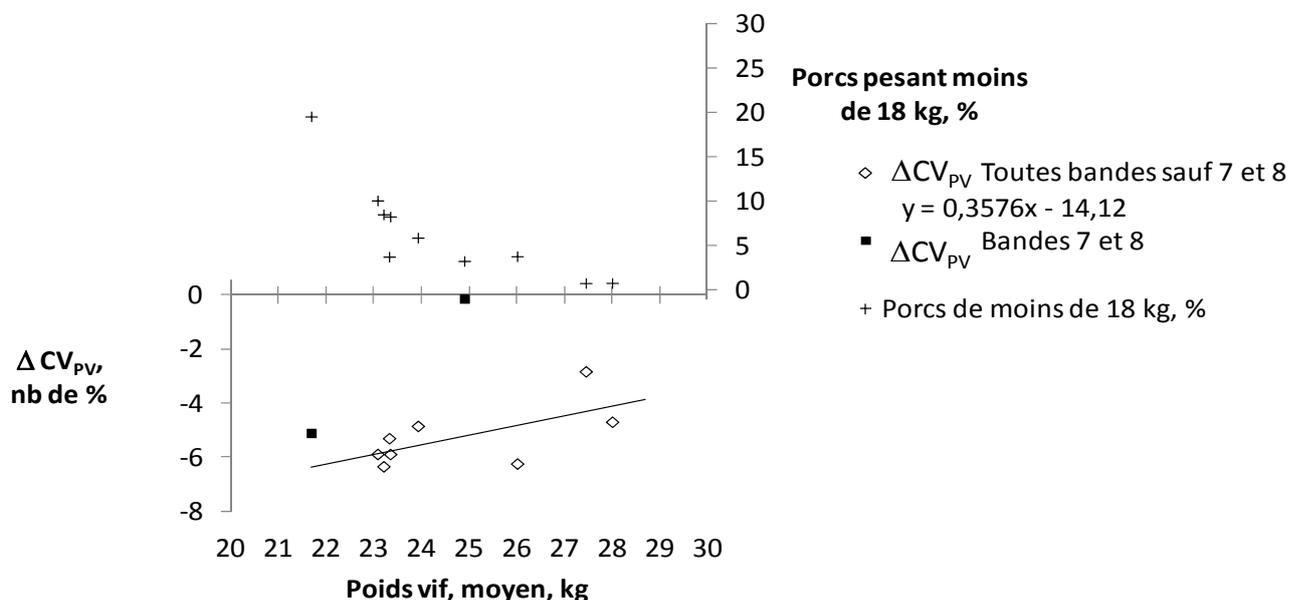
Les porcs des bandes 7 et 8 ont été pesés respectivement à 62 et 60 jours d'âge en moyenne et ont fait l'objet d'une mise en lot intégrant une sixième contrainte : l'objectif était que l'hétérogénéité du PV des 144 porcs entrant en engraissement soit identique à celle des effectifs complets. Selon le test de Kolmogorov-Smirnov, la distribution des  $PV_{65j}$  ne se distingue pas d'une loi normale, quel que soit le groupe considéré (bande x sexe x croisement). Les résultats de tirages aléatoires choisis parmi les combinaisons possibles de 36 animaux dans leur groupe initial ont permis de constituer des lots respectant les contraintes de constitution des cases. Ainsi, les groupes de la bande 7 ainsi que les porcs LWxPP et les mâles castrés PP de la bande 8 ont des valeurs de test de Kolmogorov-Smirnov faibles ( $D = 0,0574 ; 0,0720 ; 0,0564 ; 0,0765 ; 0,0670 ; 0,0603 ; 0,0660$ ) qui traduisent le faible écart entre ces distributions et une loi normale présentant un écart-type de 4,125. En revanche les femelles PP présentent un écart plus important ( $D = 0,1277$ , Tableau 24) qui résulte de la contrainte de respecter un poids minimal pour l'accès au DAC (Tableau 25).

Les distributions du  $PV_{65j}$  dans les populations de porcs des bandes 7 et 8 en sortie de post-sevrage et dans les groupes mis en lot correspondants sont présentées dans les Figure 33 (bande 7) et Figure 34 (bande 8). Le motif des histogrammes est respecté d'une manière générale lors de la mise en lot, sauf dans le cas de PV faibles car les animaux trop petits pour utiliser les DAC étaient exclus de la mise en lot. Cette contrainte peut parfois induire une représentation plus grande des animaux de PV juste supérieur au PV seuil de 18 kg lors de la mise en lot. Le respect de la distribution de  $PV_{65j}$  dans la population de départ pour élaborer l'échantillon de porcs mis en lot se traduit par une statistique de test de Kolmogorov-Smirnov la plus faible possible ( $D = 0,0333$  à  $0,1618$ , Tableau 26). La moyenne de  $PV_{65j}$  est comparable pour le groupe de porcs choisis pour entrer en engraissement et pour ceux présents en fin de post-sevrage selon les tests de Student ( $P$  minimale  $> 0,07$ ). De même, d'après les tests de Fisher, l'écart-type est similaire dans les échantillons et dans les populations initiales ( $P$  minimale  $> 0,09$ ).

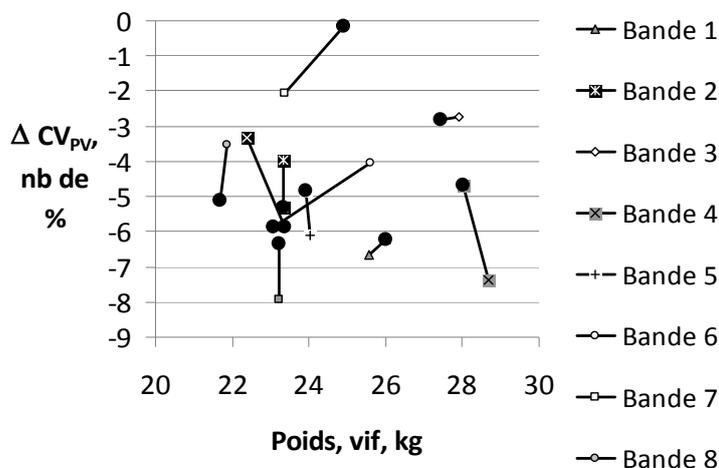
**Tableau 26 - Tests réalisés<sup>1</sup> entre les groupes mis en lot et leur population d'origine (bandes 7 et 8)**

Bande	Type de verrat	Sexe	Statistique D	Test de Student	Test de Fisher
7	LWxPP	F	0,0992	0,6782	0,7613
		MC	0,0333	0,887	0,7223
	Duroc N	F	0,0665	0,6577	0,7552
		MC	0,0694	0,9989	0,4003
8	LWxPP	F	0,1618	0,0781	0,0926
		MC	0,0762	0,3634	0,1553
	PP	F	0,1029	0,3395	0,0973
		MC	0,1444	0,1345	0,6136

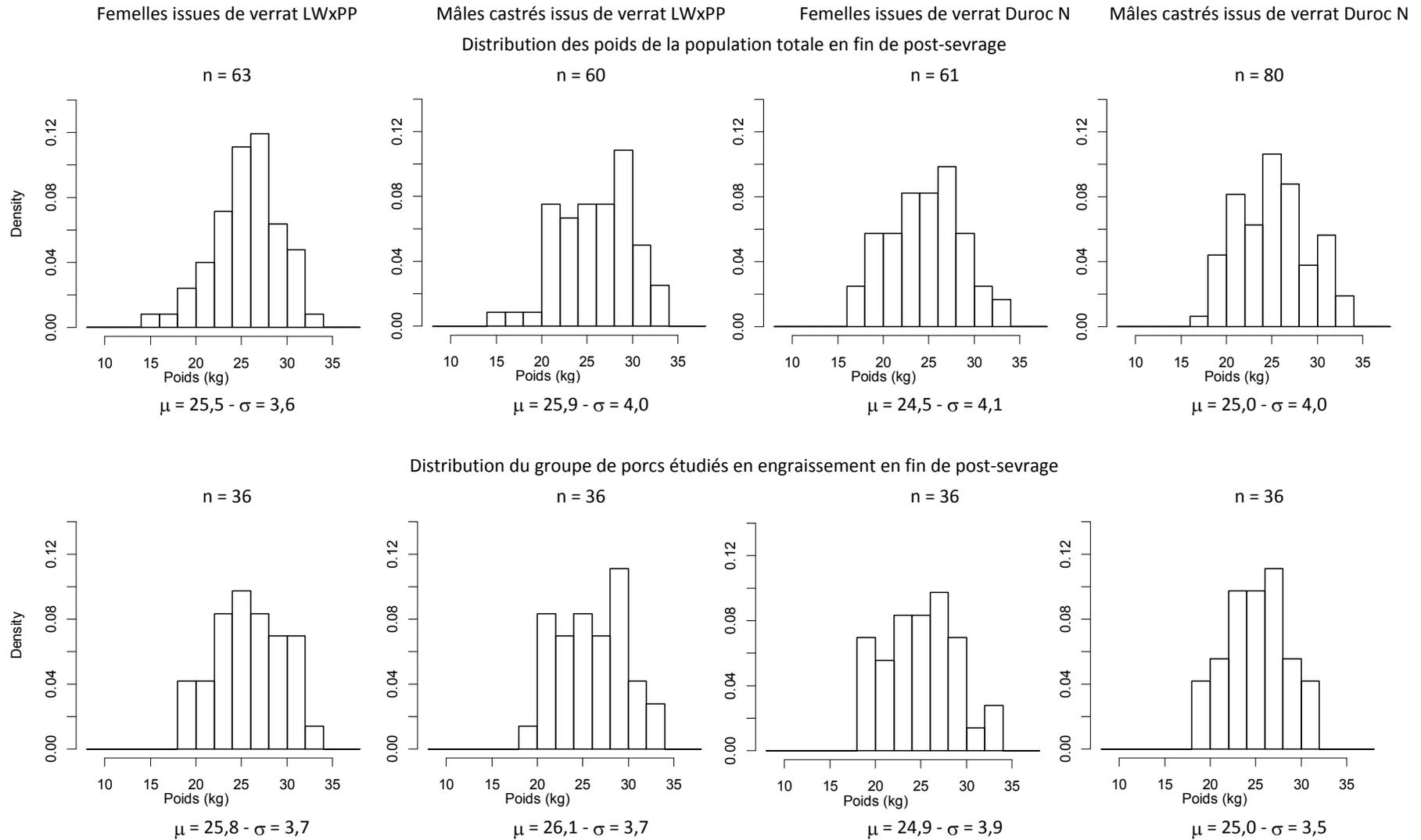
1. Statistique D issue du test de Kolmogorov Smirnov pour tester la différence par rapport à une loi normale ; test de Student pour tester les différences entre moyennes ; test de Fisher pour tester les différences entre les écart-types.



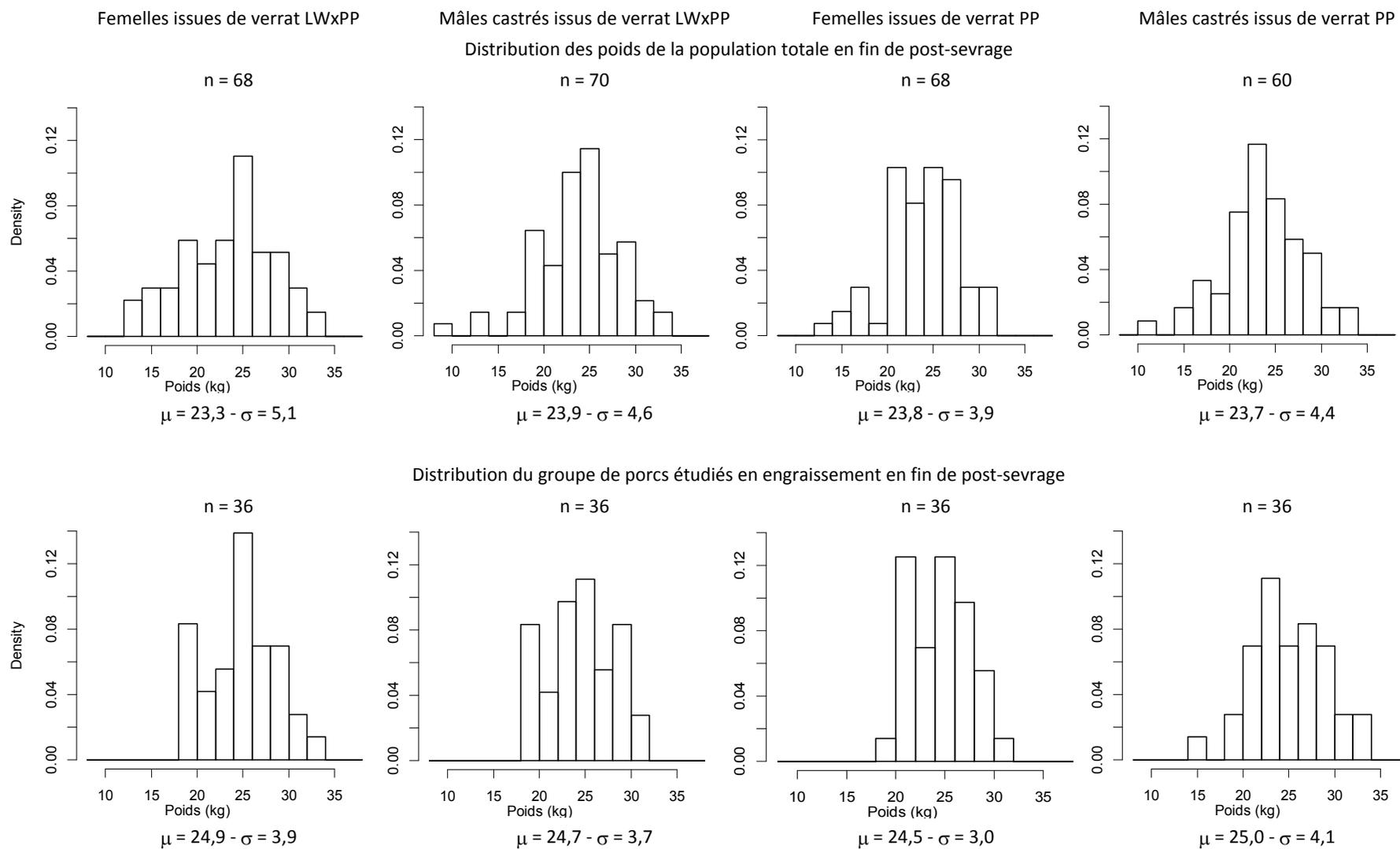
**Figure 31 - Proportion de porcs légers (pesant moins de 18 kg) et diminution du coefficient de variation du poids ( $CV_{PV}$ ) entre la population initiale de porcs et celle entrée en engraissement selon le poids moyen en fin de post-sevrage dans la population initiale des porcs LWxPP de chaque bande**



**Figure 32 - Diminution du coefficient de variation du poids ( $CV_{PV}$ ) entre la population initiale de porcs et celle entrée en engraissement selon le poids vif (PV) moyen et le type de croisement de chaque bande (chaque trait relie les porcs LWxPP en rond noir à l'autre type de verrat étudié dans la bande)**



**Figure 33 - Distribution du poids vif corrigé à 65 jours d'âge dans la population d'origine (en haut) et dans le groupe mis en lot (en bas) selon le type de verrat et le sexe dans la bande 7**



**Figure 34 - Distribution du poids vif corrigé à 65 jours d'âge dans la population d'origine (en haut) et dans le groupe mis en lot (en bas) selon le type de verrat et le sexe dans la bande 8**

### **2.3.4 Performances de croissance moyennes**

Les performances zootechniques des porcs issus des bandes 1 à 10 sont décrites dans ce chapitre.

#### *2.3.4.1 Performances des porcs issus de verrat LWxPP*

Les performances de croissance moyennes par bande sur l'ensemble de la période d'engraissement sont présentées dans le Tableau 27 et les caractéristiques moyennes de carcasses dans le Tableau 29. Les résultats par bande et par type sexuel ou par stade de croissance (croissance / finition) sont reportés en Annexe 4 à Annexe 8.

#### **Performances de croissance**

Une semaine après l'entrée en engraissement, le poids initial est en moyenne de 31,4 kg. Il fluctue entre 28,0 et 36,3 kg selon la bande ( $P < 0,01$ , Tableau 27). Le PV au premier départ pour l'abattoir est en moyenne de 111,4 kg, il varie d'une bande à l'autre notamment selon le nombre de départs. Ainsi, pour les bandes 7 à 10, les porcs sont tous abattus la même semaine et le PV au premier départ est identique au PV en fin d'engraissement. Ce dernier est en moyenne de 116,2 kg. Il est atteint en moyenne à 157,3 jours ou 22,5 semaines d'âge.

Le GMQ des porcs LWxPP est différent d'une bande à l'autre ( $P < 0,01$ , Annexe 4). Il atteint au maximum 1014 g/j (bande 9). La climatisation des salles en été permet d'éviter des chutes de GMQ en deçà de 900 g/j. Pour un même type d'aliment, la CMJ et l'IC varient d'une bande à l'autre ( $P < 0,01$ ). La CMJ est en moyenne de 2,40 kg/j tandis que l'IC est en moyenne égal à 2,57. Le GMQ des femelles est inférieur à celui des mâles castrés quelle que soit la bande ( $P < 0,01$ , Tableau 27). Le GMQ est en moyenne de 908 et 970 g/j respectivement pour les femelles et mâles castrés, cependant l'ampleur de la différence entre sexes diffère d'une bande à l'autre (interaction :  $P = 0,01$ , Annexe 5). Cette différence est en partie liée aux écarts de CMJ entre sexes mais également à une différence d'IC (interaction bande x sexe :  $P = 0,06$ ).

A l'exception de ceux de la bande 7, les porcs présentent un GMQ plus élevé en période de croissance que pendant la période de finition (Annexe 6). Pendant la période de croissance, l'IC ne diffère pas entre les deux sexes, tandis que les femelles présentent un IC significativement plus faible que les mâles castrés pendant la période de finition (Annexe 7).

**Tableau 27 - Performances de croissance et de carcasse moyennes des porcs<sup>1</sup> issus de verrat LWxPP sur l'ensemble de la période d'engraissement selon la bande**

Bande	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ETM <sup>2</sup>	P-values <sup>3</sup>		
												B	S	BxS
N° de travail	226	246	256	266	276	286	296	306	316 <sup>4</sup>	326				
<b>Nb porcs</b>	63	60	66	69	67	67	67	44	70	61				
<b>Age, j</b>														
Initial	69,5	68,7	75,1	76,4	75,1	75,4	69,4	67,0	68,5	68,8	0,3	<0,01	0,90	0,24
Au 1er départ	152,5	152,7	152,1	160,4	152,1	159,4	159,9	159,4	152,0	166,2	0,3	<0,01	0,92	0,24
<i>Nombre de départs</i>	2	3	2	2	2	2	1	1	1	1				
A l'abattage	161,1	166,7	160,6	166,9	162,5	168,4	159,9	159,4	152,0	166,2	1,6	<0,01	<0,01	<0,01
<b>Poids vif moyen (PV), kg</b>														
Initial	33,6	28,1	33,9	36,3	35,7	31,6	28,2	27,9	29,4	28,9	1,1	<0,01	0,62	0,73
Au 1er départ	111,0	103,8	107,0	113,4	108,8	109,7	115,3	112,9	114,1	117,7	2,2	<0,01	<0,01	0,10
A l'abattage	118,0	116,1	115,1	118,0	118,4	116,9	115,3	112,9	114,1	117,7	1,6	0,10	<0,01	<0,01
<b>Performances moyennes jusqu'à l'abattage</b>														
CMJ, kg/j	2,41	2,23	2,43	2,47	2,55	2,38	2,39	2,26	2,54	2,35	0,06	<0,01	<0,01	0,06
GMQ, g/j	929	908	949	907	957	925	961	919	1014	912	21	<0,01	<0,01	0,01
IC, kg/kg	2,60	2,48	2,56	2,73	2,68	2,59	2,49	2,46	2,51	2,57	0,06	<0,01	<0,01	0,03
<b>Caractéristiques de carcasse</b>														
Poids chaud, kg	93,5	91,9	91,6	93,8	93,6	92,5	89,8	88,4	89,3	92,8	1,5	0,04	<0,01	<0,01
Rendement de carcasse, % <sup>4</sup>	79,2	79,1	79,5	79,5	79,1	79,2	78,2	78,3	78,4	78,8	0,4	0,16	0,11	0,44
Épaisseur de lard dorsal G2, mm <sup>4</sup>	16,2	14,7	14,7	14,3	16,3	15,3	14,7	13,3	15,4	14,6	0,7	0,08	<0,01	0,11
Épaisseur de muscle dorsal M2, mm <sup>4</sup>	59,9	60,1	60,9	59,0	59,2	61,7	58,1	60,6	58,5	60,3	0,9	0,02	<0,01	0,22
Taux de muscle des pièces <sup>4</sup>	59,0	59,8	60,2	60,3	58,8	59,9	59,9	61,3	59,4	60,2	0,5	0,03	<0,01	0,10

1. Effectifs retenus dans les bases de données. 2. Maximum de l'erreur type par bande. 3. Analyse de variance (proc MIXED, SAS) avec en effets fixes, la bande (B), le sexe (S), l'interaction BxS, et en effet aléatoire la case.

4. Le poids chaud est introduit en covariable dans le modèle d'analyse du rendement de carcasse, du taux de muscle des pièces et des épaisseurs de lard et de muscle dorsal.

### ***Caractéristiques de carcasse***

La carcasse chaude pèse en moyenne entre 89,8 et 93,8 kg selon la bande ( $P < 0,01$ ), et est dans le cœur de gamme de la grille de paiement ainsi qu'escompté. Le rendement de carcasse est en moyenne de 78,9% et n'est pas influencé significativement par la bande ou le type sexuel (Tableau 27). Le TMP est en moyenne de 59,9 mais diffère significativement d'une bande à l'autre et selon le type sexuel quelle que soit la bande (pas d'interaction significative entre la bande et le type sexuel). L'effet du type sexuel est corrélé à l'IC pendant l'engraissement ( $r = -0,28$ ,  $P < 0,01$ ).

#### ***2.3.4.2 Effet du verrat intra-bande***

Les performances de croissance moyennes par bande, croisement et type sexuel sur l'ensemble de la période d'engraissement sont présentées dans le Tableau 28 et les caractéristiques moyennes de carcasses dans le Tableau 29. Les résultats par bande et par type sexuel ou par stade de croissance (croissance / finition) sont reportés de l'Annexe 9 à l'Annexe 12.

### ***Performances de croissance et caractéristiques de carcasse***

L'âge initial diffère selon le croisement étudié intra-bande ( $P < 0,01$ ). L'écart d'âge moyen initial le plus important est obtenu entre les porcs LWxPP et Duroc N de la bande 7 (respectivement 69,4 et 67,8 jours). Pour les autres bandes, la différence d'âge reste inférieure à un jour. En parallèle, le PV moyen initial n'est pas significativement différent entre croisements ( $P = 0,79$ ). La CMJ moyenne dépend surtout de la bande ( $P < 0,01$ ) et du type sexuel ( $P < 0,01$ ) tandis que l'effet du croisement n'est pas significatif ( $P = 0,14$ ). L'effet du sexe tend à être différent selon le croisement. En fait, la CMJ des femelles est toujours inférieure à celle des mâles castrés mais la différence entre types sexuels tend à dépendre du croisement (Annexe 9). Le GMQ tend à être significativement influencé par le croisement intra-bande ( $P = 0,07$ ) et les écarts entre femelles et mâles castrés sont différents selon le croisement (interaction :  $P = 0,01$ ). Les différences de CMJ et de GMQ étant peu significatives, l'IC n'est pas différent entre les différents croisements étudiés par rapport au témoin LWxPP ( $P = 0,72$ ).

Le rendement de carcasse ajusté pour un même poids chaud n'est pas significativement influencé par le croisement. Ce facteur influence la valeur de M2 ( $P < 0,01$ ) et tend à influencer la valeur de G2 ( $P = 0,07$ ). Au final, le TMP diffère significativement entre les croisements, et l'effet du croisement dépend du type sexuel (interaction :  $P = 0,03$ ).

**Tableau 28 - Performances de croissance moyennes des porcs issus de différents types de verrat sur l'ensemble de la période d'engraissement selon la bande**

Bande	Verrat	Age, j			PV, kg			Performances <sup>1</sup>		
		Initial	1 <sup>er</sup> départ	Départ	Initial	1 <sup>er</sup> départ	Départ	CMJ	GMQ	IC
1	LWxPP	69,5	152,5	161,1	33,6	111,0	118,1	2,41	929	2,60
	PP	70,3	153,3	164,9	32,2	107,0	116,3	2,32	897	2,60
2	LWxPP	68,7	152,5	166,7	28,0	103,8	116,1	2,24	908	2,48
	P76	68,5	152,5	162,5	28,8	106,6	117,3	2,34	951	2,47
3	LWxPP	75,1	152,1	160,8	33,9	106,9	115,1	2,43	952	2,55
	Kantor	75,5	152,5	160,9	34,6	107,4	115,4	2,43	949	2,56
4	LWxPP	76,4	160,4	166,9	36,3	113,5	118,0	2,47	907	2,73
	Maxter	75,4	159,4	164,8	35,5	113,2	117,2	2,45	919	2,67
5	LWxPP	75,1	152,1	162,4	35,7	108,9	118,4	2,55	957	2,68
	Pic	75,2	152,2	162,2	36,1	109,1	117,3	2,58	943	2,75
6	LWxPP	75,4	159,4	168,4	31,6	109,7	116,9	2,38	925	2,59
	Duroc A	75,3	159,3	165,6	32,1	112,4	116,8	2,50	946	2,65
7	LWxPP	69,4	159,9	159,9	28,2	115,1	115,1	2,39	961	2,49
	Duroc N	67,8	158,3	158,3	26,6	113,7	113,7	2,43	962	2,53
8	LWxPP	67,0	159,4	159,4	27,9	112,9	112,9	2,26	919	2,46
	PP	67,5	160,0	160,0	27,2	116,2	116,2	2,30	962	2,39
9	LWxPP	68,5	152,0	152,0	29,4	114,1	114,1	2,54	1014	2,51
	Virtus	68,4	151,9	151,9	29,3	110,7	110,7	2,36	975	2,43
10	LWxPP	68,8	166,2	166,2	28,9	117,8	117,8	2,35	912	2,57
	LW	69,2	166,7	166,7	27,9	111,3	111,3	2,26	855	2,64
Statistiques <sup>2</sup>										
ETM		0,3	0,3	1,7	1,1	2,4	1,8	0,06	23	0,06
	Bande	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
P-Values	Sexe	0,70	0,65	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Croisement	<0,01	<0,01	0,25	0,79	0,07	<0,01	0,14	0,07	0,72
	Bande x Sexe	0,65	0,71	<0,01	0,29	<0,01	<0,01	0,06	<0,01	0,01
	Croisement x Sexe	0,12	0,13	0,08	0,98	0,11	0,16	0,08	0,01	0,51

1. CMJ : consommation moyenne journalière, kg/j ; GMQ : gain moyen quotidien, g/j ; IC : indice de consommation, kg/kg.

2. Analyse de la variance avec la bande, le sexe, le croisement intra-bande et les interactions en effets fixes et la case intra-bande en effet aléatoire (proc MIXED, SAS). ETM : maximum de l'erreur type par bande x croisement x sexe.

**Tableau 29 - Caractéristiques<sup>1</sup> moyennes des carcasses selon des porcs issus de différents types de verrat selon la bande**

Bande	Verrat	Poids chaud, kg	Rendement, %	G2, mm	M2, mm	TMP
1	LWxPP	93,5	79,2	16,2	59,9	58,6
	PP	92,6	79,5	14,8	63,6	60,5
2	LWxPP	91,8	79,1	14,7	60,0	59,8
	P76	92,7	79,0	16,8	58,8	58,4
3	LWxPP	91,6	79,5	14,6	60,9	60,3
	Kantor	92,0	79,7	16,6	61,3	58,9
4	LWxPP	93,8	79,5	14,3	59,0	60,2
	Maxter	93,6	79,9	13,9	61,5	60,9
5	LWxPP	93,6	79,1	16,3	59,2	58,8
	Pic	93,7	79,9	15,7	62,6	59,8
6	LWxPP	92,5	79,2	15,3	61,7	59,9
	Duroc A	91,9	78,7	15,1	58,9	59,7
7	LWxPP	89,8	78,0	14,6	58,0	59,9
	Duroc N	88,9	78,2	15,0	56,9	59,4
8	LWxPP	88,4	78,4	13,2	60,6	61,3
	PP	91,7	78,9	13,6	63,3	61,4
9	LWxPP	89,3	78,4	15,4	58,5	59,4
	Virtus	86,7	78,3	14,1	58,9	60,4
10	LWxPP	92,8	78,8	14,7	60,3	60,1
	LW	86,0	77,3	14,1	53,0	59,5
<b>Statistiques<sup>2</sup></b>						
ETM		1,5	0,5	0,8	1,3	0,6
P- Values	Bande	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Sexe	<0,01	0,07	<0,01	0,08	<0,01
	Croisement	<0,01	0,51	0,07	<0,01	0,01
	Bande x Sexe	<0,01	0,35	0,26	<0,01	0,28
	Croisement x Sexe	0,06	0,60	0,02	0,59	0,03

1. Rendement : rapport entre le poids de carcasse chaude et le poids mesuré lors de la dernière pesée avant le départ pour l'abattoir ; G2 : épaisseur de gras dorsal ; M2 : épaisseur de muscle dorsal ; TMP : taux de muscle des pièces.

2. Analyse de la variance avec la bande, le sexe, le croisement intra-bande et les interactions en effets fixes et la case intra-bande en effet aléatoire (proc MIXED, SAS). ETM : maximum de l'erreur type par bande x croisement x sexe.

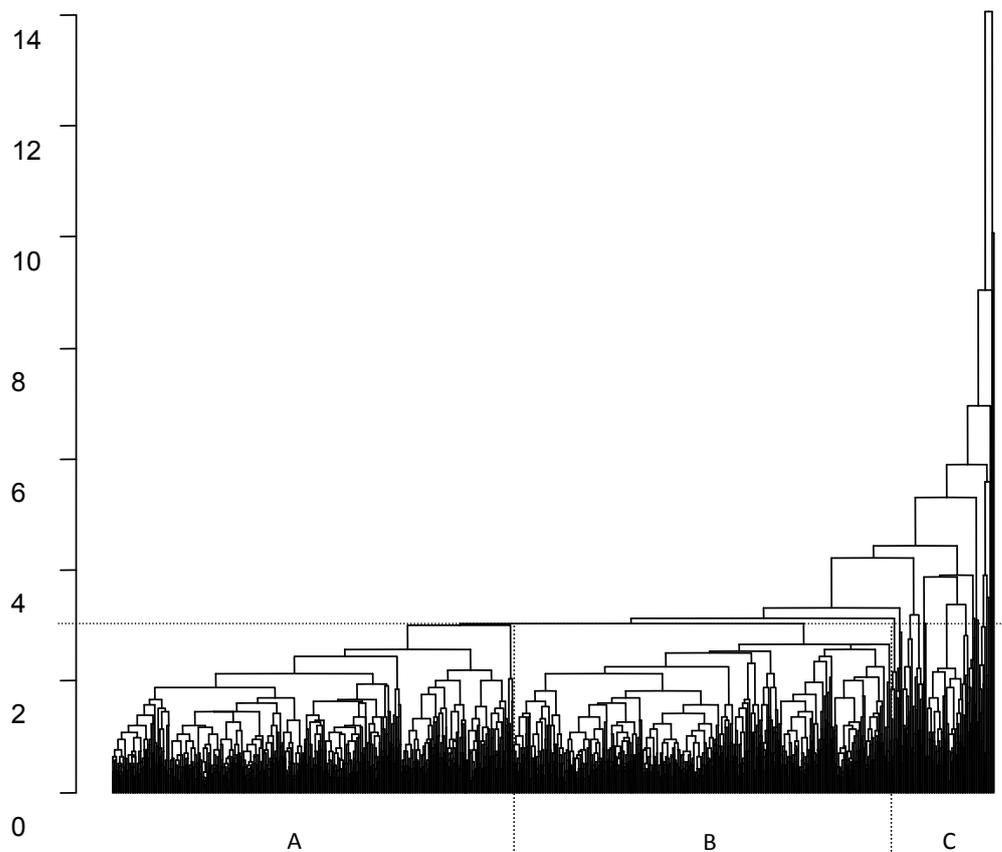


Figure 35 - Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des profils selon leurs variables centrées et réduites ( $PV_{70}$ ,  $PDm'$ ,  $DUREE'$ ,  $B_{Gompertz}$ ,  $QI50$ ,  $QI100$ ).

Tableau 30 - Valeurs moyennes ( $\mu$ ) et écarts-types ( $\sigma$ ) des variables des ensembles A, B et C indiqués dans la Figure 35.

Variable	$PV_{70}$ , kg		$PDm'$ , g/j		$DUREE'$ , j		$B_{Gompertz}$ , $10^{-4}/j$		$QI50$ , MJ EN		$QI100$ , MJ EN	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
A	30	4	142	11	91	8	1547	487	20	2	25	2
B	31	4	157	13	78	6	1786	502	22	2	30	3
C	29	4	124	22	102	19	2582	2543	22	5	25	5

### 2.3.5 Définition d'un groupe de porcs

Les variables des profils de porcs utilisés dans ce chapitre sont ceux obtenus à partir des porcs de la base de données de calibrage, issue des bandes 1 à 8.

#### 2.3.5.1 Par classification ascendante hiérarchique

Par CAH, sur les valeurs des cinq variables pour les 1027 profils, on cherche à regrouper les animaux selon leur proximité, à minimiser la différence intra groupe et à maximiser la différence entre groupes. Le résultat de cette méthode est représenté graphiquement par un dendrogramme. Dans ce dernier, la hauteur des branches représente le gain d'inertie permis par le regroupement des individus situés sous cette branche. Une branche haute indique que les individus regroupés sont très proches entre eux et que les différents groupes sont éloignés les uns des autres. A l'inverse, une branche courte témoigne de difficultés à séparer les individus.

D'après le dendrogramme illustré par la Figure 35, il est difficile de mettre en évidence des ensembles de profils distincts. Les premières séparations (en partant de la droite du graphique) sont constituées d'ensembles d'un seul individu. La hauteur importante de la première branche indique qu'il s'agit de profils très éloignés des autres. Il n'existe pas de grande branche verticale dans l'arbre qui sépare des ensembles de plusieurs individus. Cela indique l'absence de saut d'inertie en passant d'un niveau de coupure à un autre. Ce dendrogramme reflète plutôt un nuage continu de profils.

Un motif peut être repéré qui sépare un ensemble de 467 profils (Figure 35 - Groupe A), d'un second ensemble de 439 profils (Figure 35 - Groupe B) et du reste de 19 ensembles comprenant 121 profils, que nous regroupons malgré leurs grandes différences (Figure 35 - C), mais sans saut d'inertie marqué. L'analyse des valeurs de variables dans les ensembles A, B et C ne montre pas de caractérisation particulière des profils par groupe (Tableau 30).

#### 2.3.5.2 Par le modèle hiérarchique de Flury

La vraisemblance entre les matrices de variance-covariance des variables  $PV_{70}$ , DUREE',  $PDM'$ ,  $B_{Gompertz}$ , QI50, QI100 est calculée selon le sexe, le croisement, la bande ou l'intersection entre ces critères par le programme CPC. L'analyse indique des différences significatives entre matrices de variance-covariance, quel que soit le niveau de regroupement des animaux (Tableau 31). Les matrices n'ont aucune composante commune. Il en résulte que la matrice de variance-covariance calculée sur un groupe de porcs ne semble pas généralisable à un autre groupe. Une analyse plus approfondie, comparant les deux sexes ou croisement par croisement, montre que les matrices de variance-covariance

**Tableau 31 - Comparaisons de matrices de variance-covariance calculées selon différents niveaux de regroupement à l'aide du test de Fleury<sup>1</sup>**

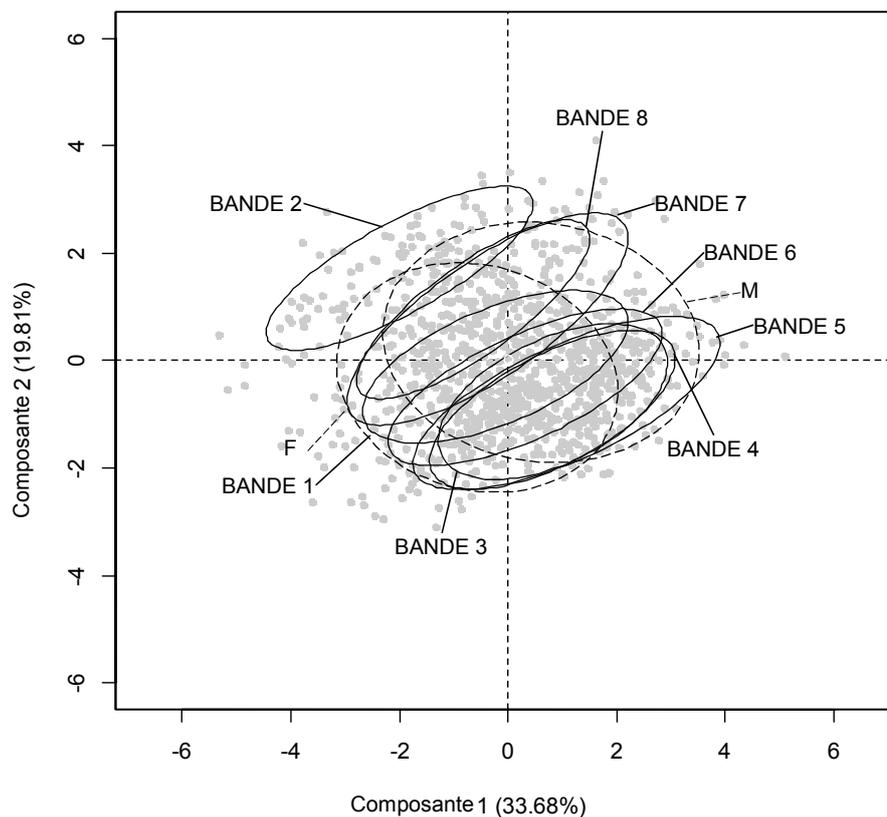
Modalité	Hypothèse d'absence de CPC1 <sup>2</sup>	P du rejet du niveau supérieur <sup>3</sup>
Sexe	validée	<0,01
Croisement <sup>4</sup>	validée	<0,01
Bande	validée	<0,01
Bande x Sexe	validée	<0,01
Bande x Croisement <sup>4</sup>	validée	<0,01
Sexe x Croisement <sup>4</sup>	validée	<0,01
Bande x Sexe x Race	validée	<0,01

1. Regroupement selon les modalités indiquées dans le tableau.

2. Dans le test de Fleury, la première composante en commun entre deux matrices est le premier niveau de ressemblance entre matrices.

3. Calculée par le programme CPC. Une probabilité supérieure à 5% est requise pour valider le niveau de CPC1 et examiner l'hypothèse d'un niveau de vraisemblance supérieur.

4. Considéré intra-bande.



**Figure 36 - Analyse en composantes principales de l'ensemble des variables descriptives des profils, (vue des individus selon la bande d'origine ou le sexe avec ellipses de confiance à 80%)**

obtenues sont toutes non liées, sauf pour les mâles castrés et femelles PP qui partagent leur première composante principale (P de rejet de CPC2 < 0,01) et pour les mâles castrés et femelles P76 qui ont des matrices de variance-covariance égales (P de rejet de EGAL = 0,07). En comparant les matrices des différents croisements sexe par sexe, il apparaît que nombre d'entre elles sont non liées mais présentent des liens dans certains cas. Compte-tenu de la covariance entre les variables, il semble exister plus de différences entre croisements chez les mâles castrés que chez les femelles.

#### ***Cas des matrices de variance-covariance issues de mâles castrés***

Les mâles castrés PP ont une matrice de variance-covariance égale à celle des Duroc N (P = 0,10), dont les composantes principales sont identiques à celles des LWxPP (P < 0,01). Les mâles castrés PP partagent deux composantes principales avec les P76 (P = 0,03) et les Maxter (P = 0,01) et une composante principale avec les Pic (P < 0,01). Les mâles castrés Maxter partagent deux composantes principales avec les P76 (P = 0,04) et LWxPP (P = 0,02) et une composante principale avec les PIC (P < 0,01) et les Kantor (P = 0,01). Les mâles castrés LWxPP partagent trois composantes principales avec les P76 (P = 0,05) et une composante principale avec les PIC (P < 0,01). Enfin, les mâles castrés Kantor partagent une composante principale avec les PIC (P < 0,01).

#### ***Cas des matrices de variance-covariance issues de femelles***

Les femelles Maxter ont une matrice de variance-covariance égale à celle des P76 (P = 0,47), des PP (P = 0,63), des Duroc N (P = 0,14) et des Kantor (P = 0,05). Elles partagent aussi l'ensemble de leurs composantes principales avec les Duroc A (P < 0,01), deux composantes principales avec les LWxPP (P = 0,02) et une composante principale avec les femelles PIC (P = 0,01). Les femelles PP partagent l'ensemble de leurs composantes principales avec les P76 (P = 0,03), les Duroc N (P < 0,01) et les Kantor (P < 0,01) et une composante principale avec les Duroc A (P = 0,02). Les femelles Duroc A partagent quatre composantes principales avec les femelles PIC (P = 0,01) et une composante principale avec les Kantor (P = 0,01) et les LWxPP (P = 0,01). Les femelles Duroc N ont une matrice de variance-covariance égale à celle des P76 (P = 0,13) et des Kantor (P = 0,22). Les femelles PIC partagent deux composantes principales avec les LWxPP (P < 0,01). Les femelles P76 partagent une composante principale avec les Kantor (P = 0,03).

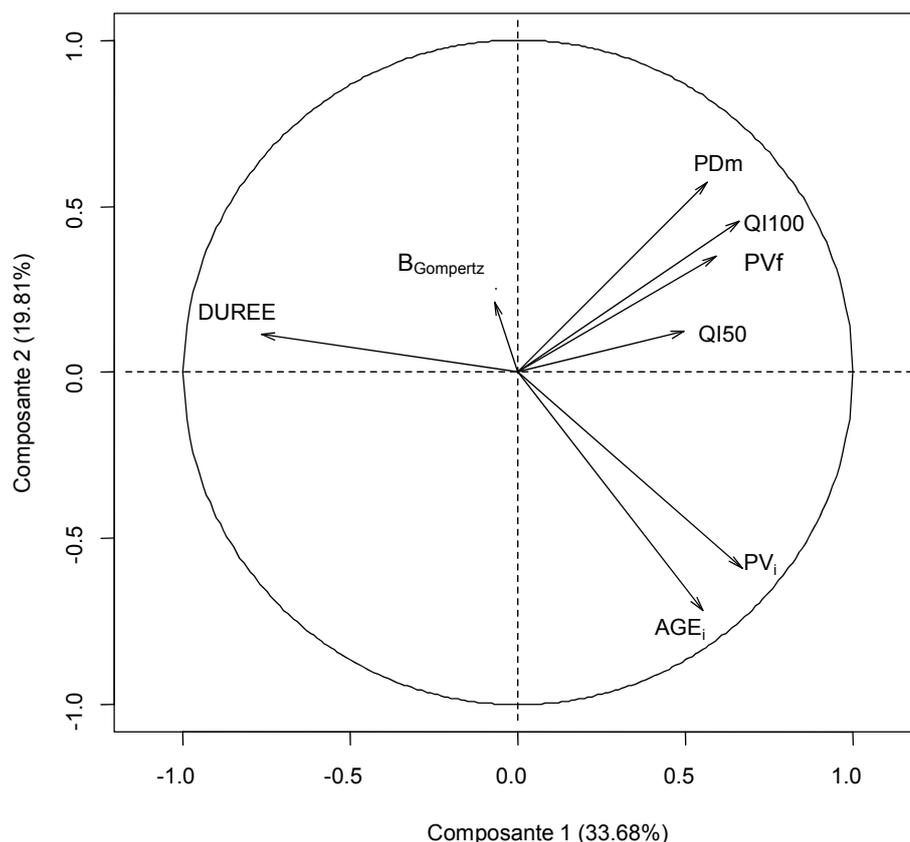


Figure 37 - Analyse en composantes principales de l'ensemble des variables descriptives brutes des profils (vue avant standardisation)

Tableau 32 - Coefficients de corrélation de Pearson (r) entre les variables brutes<sup>1</sup> descriptives d'un profil de porc

		Variable 2 <sup>2</sup>							
		AGE <sub>i</sub>	PV <sub>i</sub>	DUREE	PV <sub>f</sub>	PD <sub>m</sub>	B <sub>Gompertz</sub>	QI50	QI100
Variable 1 <sup>2</sup>	AGE <sub>i</sub>	1	0,68*	-0,43	0,11	-0,01	-0,10	0,13	0,06
	PV <sub>i</sub>		1	-0,51*	0,33*	0,04*	-0,09	0,10*	0,15*
	DUREE			1	0,01*	-0,54*	0,00	-0,33*	-0,46*
	PV <sub>f</sub>				1	0,48*	-0,09*	0,20*	0,43*
	PD <sub>m</sub>					1	0,04	0,07	0,39*
	B <sub>Gompertz</sub>						1	-0,05*	0,03
	QI50							1	0,36*
	QI100								1

1. Une étoile \* indique un effet significatif ( $P < 0,05$ ) de la variable 2 (V2) dans le modèle :  $V1 = \mu + \alpha \times V2 + B + S + C$ , où  $\mu$  est la valeur moyenne de la variable 1 (V1),  $\alpha$  le coefficient de régression de V2 sur V1. La bande (B), le sexe (S), et le croisement (C) sont pris en compte dans le modèle quand leur contribution est significative dans la corrélation entre V1 et V2.

2. AGE<sub>i</sub> et Durée en j, PV<sub>i</sub> et PV<sub>f</sub> en kg, PD<sub>m</sub> en g/j, B<sub>Gompertz</sub> en  $10^{-4}$ /j, QI50 et QI100 en MJ EN

## 2.3.6 Corrélation entre variables au sein de la population étudiée

Les performances zootechniques et les variables descriptives des profils animaux utilisées dans ce chapitre sont celles obtenues à partir des porcs de la base de données de calibrage, issue des bandes 1 à 8.

### 2.3.6.1 Analyse en composantes principales

D'après l'ACP réalisée à partir des différents groupes de porcs étudiés, définis par la bande dont ils sont issus, leur sexe et leur croisement, il apparaît que certaines variables sont liées. Cinquante-trois pourcents de la variation entre profils peuvent être projetés sur les deux premiers axes (Figure 36 et Figure 37). Sur ce plan, les individus issus des différentes bandes, différents sexes et croisements forment des groupes distincts.

Une première composante du plan est relative aux variables qui permettent de caractériser les individus au début de l'engraissement et leurs effets sur la durée d'engraissement : ainsi l'âge initial (AGEi) et le poids initial (PVi) sont opposés à la DUREE. Ces variables permettent de construire la deuxième composante du plan. Elles indiquent que plus un porc est âgé ou lourd à l'entrée en engraissement, plus l'engraissement sera court. Ces variables permettent de discriminer les bandes entre elles (Figure 36), l'âge et le poids au début de l'engraissement étant significativement différents entre elles (Tableau 27).

La deuxième composante du plan est relative aux critères, un peu moins corrélés entre eux, permettant de décrire le porc pendant la phase de croissance (PDm, QI50, QI100) ou en fin d'engraissement (PVf). Elle discrimine les porcs selon les niveaux d'ingéré et de croissance. Cette composante permet ainsi de discriminer les femelles des mâles castrés (Figure 36).

La structure de la corrélation entre les variables est complexe (Tableau 32). Ainsi,  $B_{\text{Gompertz}}$  est faiblement corrélé avec les autres variables ( $r < 0,10$ ). Parallèlement, le PV final est fortement corrélé avec quatre autres variables, avec des coefficients de corrélation de Pearson établis obtenus entre 0,20 et 0,48.

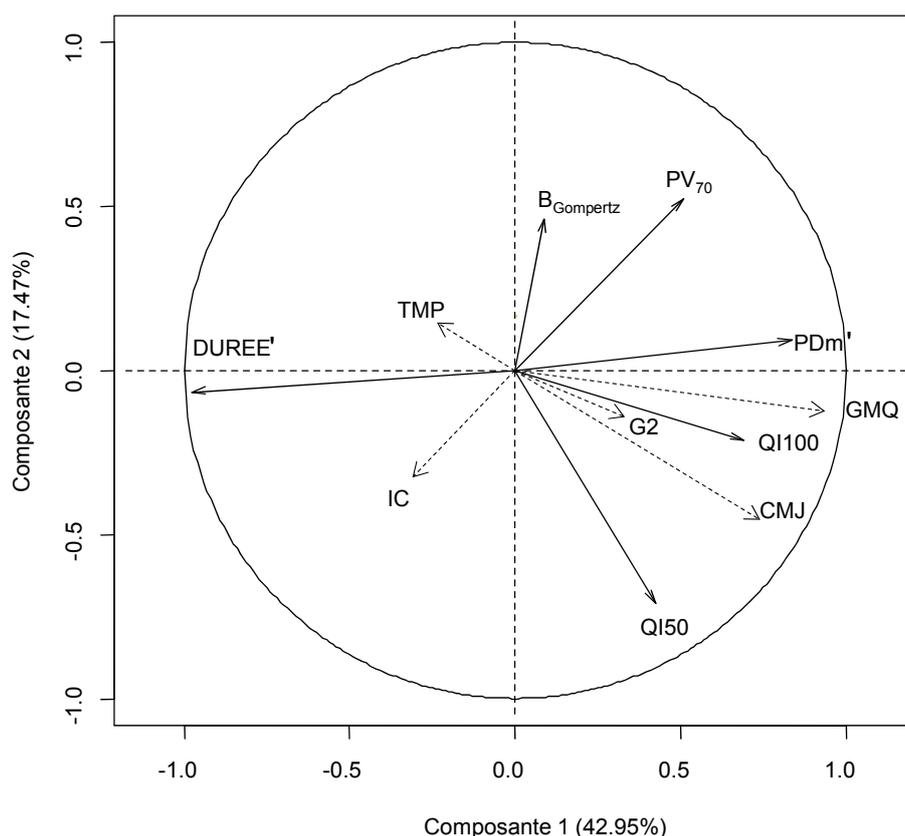


Figure 38 - Analyse factorielle multiple duale des variables décrivant les profils selon les performances zootechniques (en pointillés : GMQ, CMJ, IC, TMP, G2) ou les variables standardisées de caractérisation d'un profil animal (trait continu : PV<sub>70</sub>, PDm', B<sub>Gompertz</sub>, QI50, QI100, DUREE')

Tableau 33 - Corrélations entre variables telles que montrées par l'analyse factorielle multiple duale, calculées sur les variables standardisés centrés réduites et des performances zootechniques par groupe<sup>1</sup>

	Variables standardisées du profil animal						Performances zootechniques				
	PV <sub>70</sub>	DUREE'	PDm'	B <sub>Gompertz</sub>	QI50	QI100	GMQ	IC	CMJ	TMP	G2
PV <sub>70</sub>	1	-0,52	0,21	-0,01	-0,02	0,18	0,22	0,08	0,29	-0,13	0,17
DUREE'		1	-0,87	-0,05	-0,36	-0,57	-0,93	0,41	-0,64	0,18	-0,28
PDm'			1	0,12	0,18	0,40	0,94	-0,74	0,34	-0,02	0,13
B <sub>Gompertz</sub>				1	-0,02	0,01	0,10	-0,08	0,01	0,01	-0,01
QI50					1	0,26	0,44	0,31	0,77	-0,21	0,24
QI100						1	0,60	0,09	0,74	-0,37	0,42
GMQ							1	-0,49	0,64	-0,15	0,26
IC								1	0,32	-0,23	0,16
CMJ									1	-0,38	0,44
TMP										1	-0,94
G2											1

1. PV<sub>70</sub> exprimé en kg, DUREE' en j, PDm' en g/j, B<sub>Gompertz</sub> en 10<sup>-4</sup>/j, QI50 et QI100 en MJ EN ; GMQ : gain moyen quotidien, g/j ; IC : indice de consommation, kg/kg ; CMJ : consommation moyenne journalière, kg/j ; G2 : épaisseur de gras dorsal, mm

### 2.3.6.2 Analyse factorielle multiple duale

Afin de limiter des effets des conditions initiales ou finales sur les variables étudiées, en particulier une variation simultanée des PV et âge en début et fin d'engraissement, le PV à 70 jours a été calculé pour tous les porcs ainsi qu'un âge à 110 kg. Les relations entre variables ont été examinées par les corrélations intra-groupes. L'AFMD est utilisée afin d'analyser la part de corrélation commune aux 32 groupes étudiés, son résultat est illustré par la Figure 38. De par le nombre d'individus, toutes les corrélations sont significativement différentes de zéro selon le test de Pearson ( $P < 0,01$ ). Une forte structure est observée dans nos données car plus de 60% de l'inertie est projetée sur le premier plan.

#### **Corrélations entre variables descriptives du profil**

La DUREE' et le PDm' sont fortement et négativement corrélés ( $r = -0,87$ , Tableau 33). Le PDm' est moyennement corrélé avec QI100 ( $r = 0,40$ ), alors qu'il est peu corrélé avec QI50 ( $r = 0,18$ ) et PV<sub>70</sub> ( $r = 0,21$ ). La variable B<sub>Gompertz</sub> n'est que faiblement lié aux autres variables ( $r$  maximum = 0,21). Il est par ailleurs très mal projeté sur le premier plan et n'est correctement projeté que sur son axe propre, qui ne convient par ailleurs qu'à cette variable.

#### **Corrélations avec les performances zootechniques**

Les valeurs de QI50 et QI100 sont positivement corrélées à la CMJ (respectivement avec un  $r = 0,77$  et  $0,74$ ). Cependant, QI50 est corrélé plus étroitement avec l'IC que QI100 (respectivement,  $r = 0,31$  et  $0,09$ ). Au contraire, QI50 est moins fortement corrélé avec le GMQ que QI100 (respectivement  $r = 0,43$  et  $0,60$ ). Le même résultat est obtenu pour la corrélation avec l'épaisseur de lard dorsal G2 ( $r = 0,24$  et  $0,42$ ) et le TMP ( $r = -0,21$  et  $-0,37$ ).

#### **Stabilité des corrélations**

En échos aux différences mises en évidence par le test CPC, les corrélations entre variables sont assez différentes d'un groupe à l'autre (Figure 39). La corrélation entre la DUREE' et le PDm' est plutôt stable avec un intervalle quartile 25% - quartile 75% égal à  $[-0,94 ; -0,75]$ . Il en est de même pour la corrélation entre PV<sub>70</sub> et B<sub>Gompertz</sub>  $[-0,59 ; -0,29]$ , entre la DUREE' et QI50  $[-0,52 ; -0,21]$  et QI100  $[-0,70 ; -0,39]$ , et entre QI50 et QI100  $[0,07 ; 0,43]$ . A l'opposé, la corrélation entre B<sub>Gompertz</sub> et PDm' varie entre groupes  $[-0,43 ; 0,33]$ , de même que la corrélation entre B<sub>Gompertz</sub> et QI100  $[-0,59 ; 0,10]$ , entre PV<sub>70</sub> et QI100  $[-0,30 ; 0,30]$ , et entre PV<sub>70</sub> et QI50  $[-0,39 ; 0,20]$ .

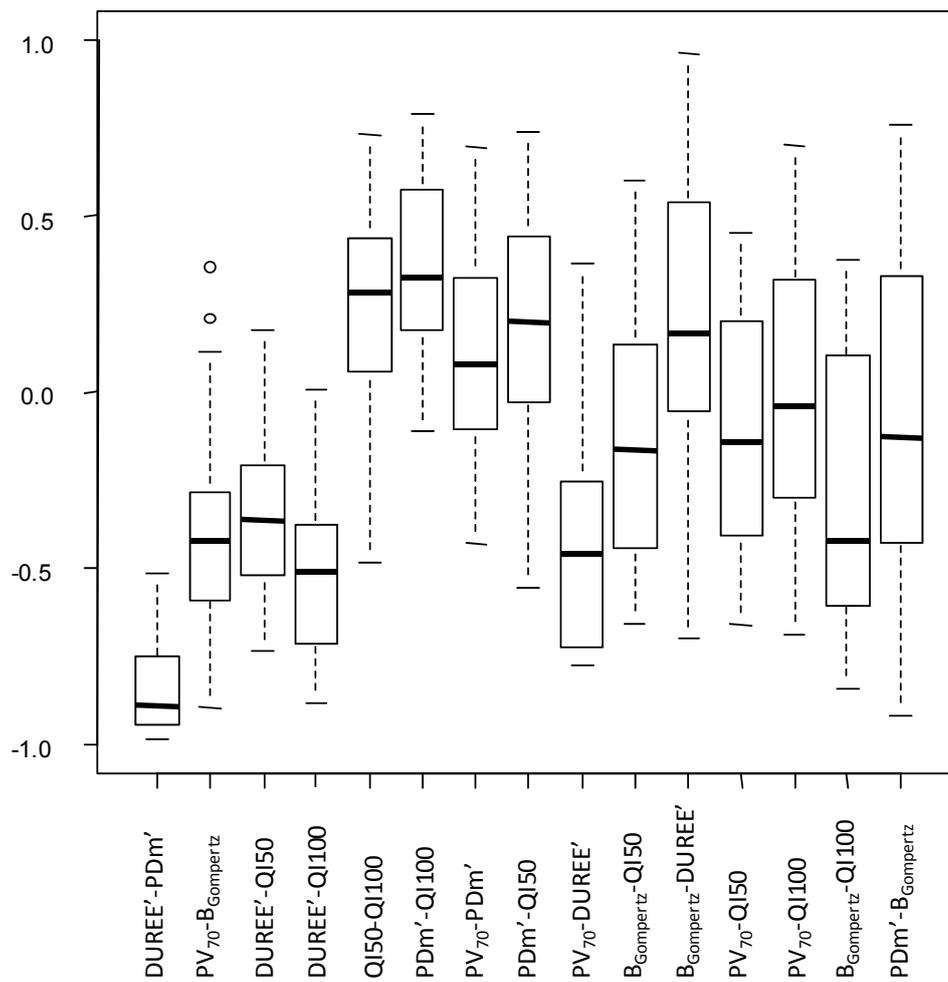


Figure 39 - Boîtes à moustaches montrant la dispersion du coefficient de corrélation de Pearson entre variables parmi les 32 groupes étudiés

### 2.3.7 Vecteur moyen des performances

Les moyennes par variable des valeurs individuelles et les effets des facteurs étudiés sont rapportés dans le Tableau 34. Les moyennes des variables diffèrent significativement d'une bande à l'autre. Le  $PV_{70}$  varie en moyenne entre 28 et 33 kg selon la bande ( $P < 0,01$ ). L'effet de la bande est significatif sur la valeur de  $B_{\text{Gompertz}}$  ( $P < 0,01$ ) qui varie entre 168 et  $199 \times 10^{-4}$  /j et sur les valeurs de la variable 'a' de la fonction gamma ( $P < 0,01$ ). L'effet de la bande est significatif sur la valeur de QI50 ( $P < 0,01$ , Annexe 13) mais pas sur celle de QI100 ( $P = 0,18$ ). L'effet de la bande illustre les conséquences que les conditions d'élevage ont sur le parcours des animaux, même lorsqu'ils sont élevés dans des salles d'engraissement identiques et alimentés avec un aliment présentant des caractéristiques nutritionnelles stables. Il est possible que les effets de la bande sur la précocité des porcs ( $B_{\text{Gompertz}}$ ,  $P < 0,01$ ) et l'ingéré en début d'engraissement (QI50,  $P < 0,01$ ) puissent résulter en partie de l'effet sur  $PV_{70}$ . En revanche, sur l'ensemble de l'engraissement, PDM' n'est pas influencé par la bande.

Le type de croisement des animaux n'a pas d'effet significatif sur le niveau moyen des variables ( $P > 0,26$ ). Les mâles castrés présentent un PDM' (150 vs 142 g/j pour les femelles) et un niveau d'ingestion plus élevés en début (QI50 = 21,9 vs 20,1 MJ EN/j pour les femelles) et en fin d'engraissement (QI100 = 28,9 vs 25,0 MJ EN/j pour les femelles). Les mâles castrés sont également plus précoces ( $B_{\text{Gompertz}} = 189$  vs  $166 \times 10^{-4}$  pour les femelles). L'amplitude de l'écart de PDM' et de QI100 entre sexes dépend de la bande ( $P$  de l'interaction respectivement inférieure à 0,01 et égale à 0,02).

### 2.3.8 Prise en compte de la variabilité

#### 2.3.8.1 Matrice de covariance retenue pour résumer la variabilité

Les différences entre matrices de variance-covariance décrites dans le paragraphe 2.3.5, nous amènent à développer une matrice de variance-covariance dite « moyenne » qui soit un estimateur se plaçant au centre des cas évalués et qui puisse représenter tous les groupes avec le moins d'écart possible avec la réalité. A cette fin, les profils utilisés sont ceux qui ont été obtenus dans les bandes 1 à 8 et qui constituent la base de données de calibrage.

**Tableau 34 - Moyennes ( $\mu$ ) et écarts-types ( $\sigma$ ) des variables<sup>1</sup> décrivant les cinétiques de croissance et d'ingestion par groupe et effets<sup>2</sup> des caractéristiques du groupe**

Bande	Verrat	Sexe	n	PV <sub>70</sub> , kg		DUREE <sup>1</sup> , j		PDm <sup>1</sup> , g/j		B <sub>Gompertz</sub> , x10 <sup>-4</sup> /j		a, kg <sup>-1</sup>		b x10 <sup>-4</sup> /kg	
				$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	" $\mu$	$\sigma$
1	LWxPP	F	31	34	4	84	11	145	14	156	45	4,366	0,551	213	43
		MC	32	34	4	80	10	150	15	173	41	4,986	0,756	194	56
	PP	F	35	31	2	91	9	138	13	161	37	4,348	1,115	226	68
		MC	33	32	3	85	14	145	20	182	52	4,602	0,586	190	41
2	LWxPP	F	32	30	2	92	10	143	15	224	182	4,046	0,562	207	47
		MC	28	30	3	92	17	138	26	224	140	4,569	0,560	200	44
	P76	F	28	30	3	88	12	146	18	154	68	4,131	0,483	186	45
		MC	31	31	3	82	11	150	17	185	84	4,870	0,820	173	42
3	LWxPP	F	35	30	4	89	9	145	12	142	49	4,419	0,634	212	43
		MC	31	30	4	82	10	151	16	182	53	4,999	0,551	192	27
	Kantor	F	35	30	3	89	8	143	9	138	35	4,293	0,723	203	39
		MC	35	31	5	82	8	150	12	155	43	5,005	0,639	184	34
4	LWxPP	F	34	31	3	90	8	138	9	150	39	4,182	0,620	199	40
		MC	35	31	3	83	9	143	16	173	45	5,093	0,712	171	48
	Maxter	F	34	31	3	90	9	141	13	162	59	4,271	0,636	201	48
		MC	33	31	3	80	9	151	17	213	125	4,976	0,602	173	31
5	LWxPP	F	33	31	3	90	11	138	15	133	57	5,075	1,973	235	69
		MC	34	32	3	79	11	153	21	154	63	5,502	1,612	198	64
	PIC	F	31	32	3	92	9	135	12	129	44	4,524	1,576	211	67
		MC	34	32	3	79	10	149	18	181	143	6,006	2,088	194	73
6	LWxPP	F	33	28	3	97	15	137	19	221	246	4,326	0,670	222	52
		MC	34	27	3	87	10	149	16	183	53	4,941	0,649	192	41
	Duroc A	F	30	28	3	90	11	145	17	186	68	5,096	1,345	226	70
		MC	34	28	4	87	17	145	19	207	62	5,456	1,249	198	62
7	LWxPP	F	35	29	4	92	15	142	20	192	153	4,462	0,549	213	53
		MC	32	29	4	81	10	159	18	213	240	5,103	0,675	182	41
	Duroc N	F	32	28	4	91	11	144	13	171	39	4,697	0,681	223	39
		MC	31	29	4	82	18	156	25	213	89	5,368	0,745	182	37
8	LWxPP	F	23	30	5	89	14	147	19	161	50	4,300	0,473	203	45
		MC	21	31	4	85	8	146	12	192	99	4,573	0,520	184	41
	PP	F	34	28	3	90	10	150	13	180	120	3,887	0,444	182	50
		MC	34	30	5	79	10	162	16	189	94	4,741	0,469	159	35
Statistiques															
ETM				1		3		5		24		0,304		14	
P- Values	Bande			<0,01		0,31		0,21		<0,01		<0,01		0,14	
	Sexe			0,08		<0,01		<0,01		<0,01		<0,01		<0,01	
	Croisement			0,85		0,30		0,26		0,34		0,82		0,78	
	Bande x Sexe			0,51		0,05		<0,01		0,65		0,37		0,41	
	Croisement x Sexe			0,96		0,18		0,14		0,62		<0,01		0,95	

1. a et b : variables de l'équation gamma de l'entretien décrivant la relation entre l'énergie nette ingérée et le poids vif.

2. Analyse de la variance avec la bande, le sexe, le croisement intra-bande et les interactions en effets fixes et la case intra-bande en effet aléatoire (proc MIXED, SAS). ETM : maximum de l'erreur type par bande x croisement x sexe.

### 2.3.8.2 Matrice de covariance moyenne

La matrice de variance-covariance moyenne issue de notre calcul est présentée dans le Tableau 35. Au regard des niveaux moyens des variables, ces valeurs de variance correspondent à un CV de 11 % pour  $PV_{70}$ ,  $PDm'$ ,  $QI50$  et  $QI100$ , et de 56 % pour le  $B_{\text{Gompertz}}$ .

### 2.3.8.3 Comparaison avec la matrice de variance-covariance initiale

La distance de  $\chi^2$  correspond à l'écart entre la covariance estimée et celle qui est observée à partir de la base de données utilisée.

#### **Comparaison avec la matrice issue de la base de données de calibrage**

Les distances de  $\chi^2$  entre les matrices de variance-covariance des 32 groupes et la matrice de variance-covariance testée sont plus faibles lorsque la matrice de variance-covariance moyenne est utilisée. La distance de  $\chi^2$  est alors de 87, contre 92 lorsque la matrice brute est utilisée ( $P < 0,01$ , Tableau 36). Parallèlement, la précision de la prédiction est meilleure avec la matrice de variance-covariance moyenne pour 84% des 32 groupes.

#### **Comparaison avec la matrice issue de la base de données d'évaluation**

La comparaison entre covariance prédite et covariance observée a été réalisée à partir de nouveaux profils, c'est à dire n'ayant pas contribué à la construction des matrices de variance-covariance candidates. Ces profils sont issus des bandes 9 et 10. Dans ce cas, la distance de  $\chi^2$  est plus élevée que précédemment. L'écart entre matrices candidates est minime avec une distance de  $\chi^2$  proche de 99 dans les deux cas. Néanmoins, la précision de l'estimation de la covariance reste plus élevée pour 75% des groupes avec la matrice de variance-covariance moyenne qu'avec la matrice de variance-covariance brute.

#### **Comparaison avec la matrice issue des deux bases de données**

Le cumul des deux bases de données (base de calibrage et base d'évaluation) nous permet d'évaluer la covariance à partir de 1288 porcs. Dans ce cas, la distance de  $\chi^2$  moyenne est plus faible de 3,8 pour la matrice de variance-covariance moyenne sur l'ensemble des dix bandes, comparativement à la matrice de variance-covariance brute. Ceci se traduit par une prédiction plus précise avec la matrice de variance-covariance moyenne dans 83% des groupes.

**Tableau 35 - Matrice de variance-covariance<sup>1</sup> moyenne calculée à partir des individus des bandes 1 à 8**

	PV <sub>70</sub>	PDm'	B <sub>Gompertz'</sub>	QI50	QI100
PV <sub>70</sub>	<b>12,0</b>	11,7	5,30 10 <sup>-4</sup>	-0,374	1,92
PDm'		<b>265</b>	7,10 10 <sup>-3</sup>	3,86	19,6
B <sub>Gompertz</sub>			<b>1,00 10<sup>-4</sup></b>	-1,65 10 <sup>-3</sup>	-8,55 10 <sup>-4</sup>
QI50				<b>5,36</b>	1,49
QI100					<b>9,49</b>

1. En police normale : covariances entre variables ; en gras : variance de chaque variable sur sa diagonale (exprimée en kg<sup>2</sup> pour PV<sub>70</sub>, g<sup>2</sup>/j<sup>2</sup> pour PDm', j<sup>2</sup> pour B<sub>Gompertz</sub> et MJ<sup>2</sup> pour QI50 et QI100). PV<sub>70</sub> exprimé en kg, PDm' en g/j, B<sub>Gompertz</sub> en 10<sup>-4</sup>/j, QI50 et QI100 en MJ EN

**Tableau 36 - Evaluation de la capacité de deux matrices de variance-covariance candidates à représenter la structure de variance-covariance de la population**

Base de données	Matrice de covariance		Différence B-M
	Brute (B) <sup>1</sup>	Moyenne (M) <sup>2</sup>	
<b>Base de données de calibrage<sup>3</sup></b>			
Distance du $\chi^2$ moyenne <sup>4</sup>	91,7	87,3	4,4
Précision de la prédiction, % <sup>5</sup>	16	84	66
<b>Base de données d'évaluation<sup>6</sup></b>			
Distance du $\chi^2$ moyenne <sup>4</sup>	99,9	99,2	0,7
Précision de la prédiction, % <sup>5</sup>	25	75	50
<b>Bases de données cumulées<sup>3+6</sup></b>			
Distance du $\chi^2$ moyenne <sup>4</sup>	93,3	89,7	3,8
Précision de la prédiction, % <sup>5</sup>	17	83	66

1. Calculée directement à partir des matrices de variance-covariance obtenues à partir des 32 groupes de la base de données de calibrage.

2. Calculée à partir des matrices de variance-covariance obtenues à partir des 32 groupes de la base de données de calibrage, après pondération prenant en compte le nombre d'individus dans chaque groupe.

3. Issue des profils obtenus dans les bandes 1 à 8 (n = 1027).

4. Obtenue à partir du test d'égalité du programme CPC.

5. Pourcentage des 32 matrices de variance-covariance initiales qui sont estimées avec le plus de précision par la matrice candidate.

6. Issue des profils obtenus dans les bandes 9 et 10 (n = 260).

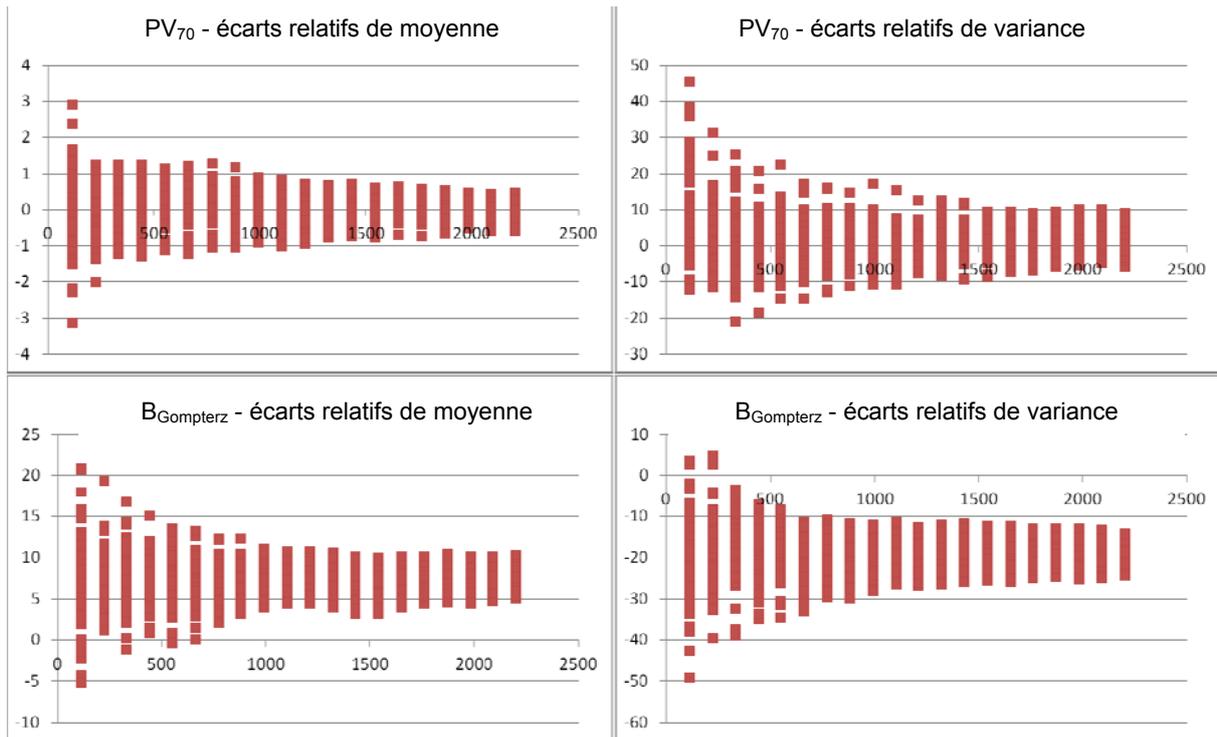
## 2.3.9 Génération de bandes de porcs virtuelles

### 2.3.9.1 Taille des populations à générer

Un essai préliminaire de génération de populations virtuelles est réalisé avec une génération multi variée des variables. Il permet de mettre en évidence que les tirages réalisés se révèlent moins sensibles à la racine utilisée à partir d'un effectif de 1200 individus (ramenée à 1000 une fois retirés les profils où  $B_{\text{Gompertz}}$  ou  $b$  de l'ingéré sont négatifs). Au-delà de cette taille, la diminution de la sensibilité des résultats à la valeur de la racine est presque nulle (Figure 40). De plus grands effectifs apportent trop d'inconvénients par l'augmentation du temps de simulation. En effet, sur la Figure 40, le cône représentant l'ensemble des tirages voit sa section tendre à rester constante pour des effectifs supérieurs à 1000 individus. Ceci est en accord avec le théorème central-limite qui veut que les écarts avec les valeurs attendues soient réduits avec les échantillons de grande taille. Le motif illustré pour les variables  $PV_{70}$  et  $B_{\text{Gompertz}}$  est le même pour les variables  $\text{PDM}'$ ,  $\text{QI50}$  et  $\text{QI100}$ , ainsi que pour l'ensemble des variables chez les femelles (seules les valeurs consignées qui sont utilisées changent). Ces résultats sont obtenus avec un générateur imparfait comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, mais ils permettent d'établir de façon empirique la taille de la population à générer quel que soit le générateur de population.

### 2.3.9.2 Choix du générateur de bande

Une dérive est observée lorsque la génération multi variée des variables est réalisée à partir des lois normales de distribution de chaque variable et de leur matrice de variance-covariance (PROC IML, fonction VNORM ; SAS, 2008). Cette méthode conduit à des valeurs négatives de  $B_{\text{Gompertz}}$  ou  $b$  de l'ingéré. Les profils concernés ne peuvent alors être conservés et leur retrait provoque la perte d'une partie de la variabilité pour toutes les variables. Par exemple pour  $B_{\text{Gompertz}}$ , la génération puis le retrait de nombreuses valeurs négatives conduit à une valeur générée moyenne supérieure de 7% à la moyenne de consigne et à une variance de 19% inférieure à la variance de consigne. Même après correction par itération de la moyenne et de l'écart-type générés (voir § 2.2.4.2), la distribution de chacune des variables générées se révèle différente de la distribution initiale correspondante mesurée sur les bandes 1 à 8, ainsi que mis en évidence par le test de Kolmogorov-Smirnov. Un autre générateur de bande doit alors être développé qui tienne compte des lois de distribution propre à chaque variable (Annexe 14) et permette de conserver les moyennes et variances attendues lors du retrait de profils au  $B_{\text{Gompertz}}$  ou  $b$  de l'équation d'ingéré négatifs.



**Figure 40 - Ecarts relatifs (%) obtenus entre les moyennes (à gauche) et les variances (à droite) des populations de mâles castrés LWxPP générées et les valeurs de consigne pour PV<sub>70</sub> (en haut) et B<sub>Gompertz</sub> (en bas) selon les effectifs générés. Chaque point représente une population virtuelle**

### 2.3.9.3 Fonctionnement du générateur de bande

Dans un premier temps, d'éventuelles différences entre les valeurs demandées comme consignes de la génération et les valeurs obtenues à l'issue de la génération sont recherchées. Comme la valeur de ces consignes importe peu dans l'absolu, seules les populations de mâles castrés et de femelles LWxPP sont générées. Le procédé aléatoire se base sur le générateur de nombres pseudo-aléatoires « Knuth-TAOCP-2002 » inclus dans R et sur une racine égale à 712. Ils permettent le plus faible écart entre l'écart-type produit avant correction et l'écart-type attendu à partir des résultats des bandes 1 à 8, ceci pour modifier le moins possible les profils produits.

Avant correction par itération, les écarts-types des variables générées sont de l'ordre de 60% des écarts-types attendus. Après correction par itération, le rapport entre écarts-types produits et attendus est égal à 1 et la différence entre moyennes produites et moyennes attendues par variable est nulle (Tableau 37). Par ailleurs, d'après les tests de Kolmogorov-Smirnov, la différence de distribution entre variables générées centrées réduites et variables mesurées centrées réduites par groupe n'est pas significative pour toutes les variables sauf pour  $B_{\text{Gompertz}}$ . Pour ce dernier, les quelques valeurs négatives inévitables générées puis retirées expliquent ce résultat, mais cette fois sans conséquence sur les autres variables.

La matrice de variance-covariance des variables ainsi générées a été comparée à la matrice servant de consigne à la génération des profils virtuels par le programme CPC testant le modèle hiérarchique de Flury. Du fait des grands effectifs (1000 profils virtuels), le test CPC se révèle très sensible. La comparaison de la matrice de variance-covariance obtenue sur les individus virtuels générés et le patron de variance-covariance utilisé comme consigne (vecteur moyen des mâles castrés ou femelles LWxPP et matrice de variance-covariance établie à partir des 1027 profils réels) valide l'étape CPC2 du test CPC (P de rejet de CPC3 = 0,03 et 0,02 respectivement pour les mâles castrés et les femelles). Néanmoins, les deux matrices de variance-covariance sont très proches et lorsqu'on les compare en leur attribuant un effectif de bande similaire à celui permis par les dimensions de salle d'engraissement de la station expérimentale ( $n = 144$ ), le test CPC valide l'égalité des matrices (P de rejet d'égalité = 0,97 et 0,99 respectivement pour les mâles castrés et les femelles).

Par la suppression des dérives en termes de moyennes et d'écarts-types dans la génération des profils virtuels et la grande proximité en termes de distribution des variables et de leur matrice de variance-covariance avec le patron de population attendu, ce générateur permet d'obtenir le moins de biais possible dans la génération d'individus et fournit les populations virtuelles utilisées dans les simulations de l'étape 2 de la thèse.

**Tableau 37 - Evaluation des écarts de moyenne (Moy), variance (Var) et distribution (Dis) entre les valeurs des variables obtenues à partir de la population générée virtuellement et celles de la population de référence**

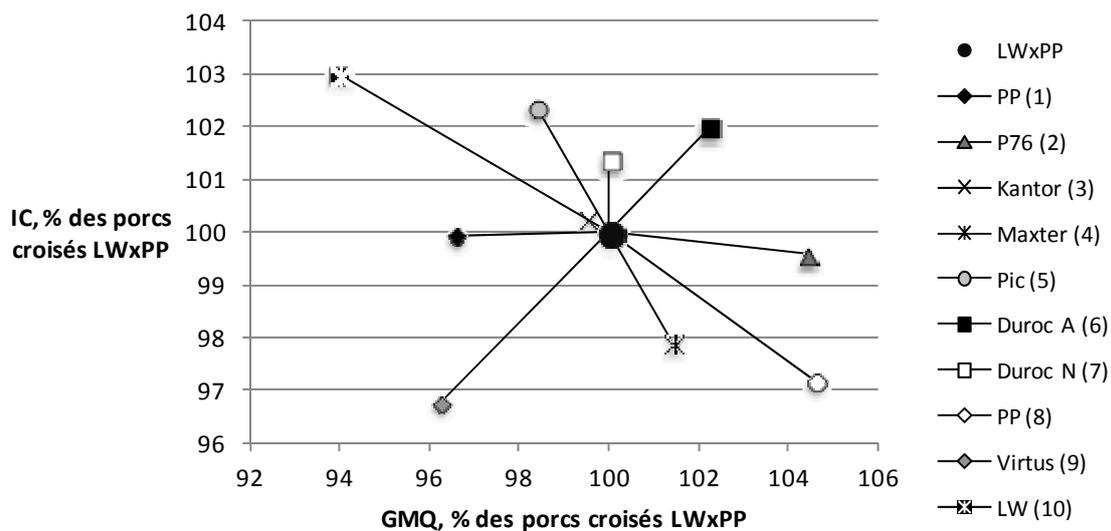
Variable		PV <sub>70</sub> , kg		PDM', g/j		B <sub>Gompertz</sub> , x 10 <sup>-4</sup> /j		a, kg <sup>-1</sup>		b, kg <sup>-1</sup>	
Référence	Ecart <sup>1</sup>	μ	P	μ	P	μ	P	μ	P	μ	P
LWxPP MC bandes 1 à 8	Moy <sup>2</sup>	0	1,00	0	1,00	0	1,00	0	1,00	0	1,00
	Var <sup>3</sup>	1	1,00	1	1,00	1	1,00	1	1,00	1	1,00
	Dis <sup>4</sup>	0,027	0,96	0,034	0,83	0,108	<0,01	0,060	0,18	0,051	0,36
LWxPP F bandes 1 à 8	Moy <sup>2</sup>	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	Var <sup>3</sup>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Dis <sup>4</sup>	0,027	0,85	0,023	0,96	0,117	<0,01	0,053	0,11	0,043	0,30
LWxPP F bande 9	Moy <sup>2</sup>	-0,08	0,89	-16,07	<0,01	-0,0013	0,18	-0,47	<0,01	0,0002	0,83
	Var <sup>3</sup>	1,18	0,56	1,33	0,29	3,13	<0,01	1,72	0,05	1,40	0,22
	Dis <sup>4</sup>	0,106	0,83	0,505	<0,01	0,244	0,03	0,336	<0,01	0,119	0,71
LWxPP MC bande 9	Moy <sup>2</sup>	-0,13	0,81	-16,81	<0,01	-0,0070	<0,01	-0,50	<0,01	0,0011	0,14
	Var <sup>3</sup>	1,20	0,52	0,57	<0,01	0,49	<0,01	1,83	0,03	1,26	0,40
	Dis <sup>4</sup>	0,125	0,67	0,543	<0,01	0,325	<0,01	0,374	<0,01	0,210	0,10
LWxPP F bande 10	Moy <sup>2</sup>	-0,14	0,85	1,73	0,46	0,0028	<0,01	-0,22	0,22	-0,0023	0,02
	Var <sup>3</sup>	0,81	0,39	1,78	0,06	6,86	<0,01	0,96	0,81	0,99	0,92
	Dis <sup>4</sup>	0,103	0,93	0,143	0,61	0,257	0,05	0,201	0,20	0,303	0,01
LWxPP MC bande 10	Moy <sup>2</sup>	0,11	0,87	2,38	0,46	-0,0007	0,75	0,05	0,70	-0,0017	0,01
	Var <sup>3</sup>	0,79	0,30	0,82	0,39	0,62	0,04	1,44	0,21	1,97	0,02
	Dis <sup>4</sup>	0,118	0,78	0,175	0,30	0,222	0,09	0,127	0,70	0,227	0,08

1. P est la probabilité que l'écart moyen ( $\mu$ ) soit significatif.

2. Un test de Student est utilisé afin de vérifier si l'écart de moyenne, calculé par différence entre les valeurs moyennes obtenues à partir de la population virtuelle générée et celles obtenues à partir de la population étudiée, est significatif.

3. Un test de Fisher est utilisé afin de vérifier si cet écart de variance, calculé comme le ratio entre la variance obtenue à partir de la population virtuelle générée et celle obtenue à partir de la population étudiée, est significatif.

4. La statistique D du test de Kolmogorov-Smirnov est utilisée pour déterminer si l'écart entre les distributions des variables obtenues à partir de la population virtuelle générée ou de la population étudiée est significatif.



**Figure 41 - Illustration des niveaux relatifs d'indice de consommation (IC) et de vitesse de croissance (GMQ) selon le type de verrat utilisé intra-bande (10 bandes, moyenne des mâles castrés et des femelles) avec en base 100 les performances des porcs croisés LWxPP (entre parenthèses : le numéro de la bande)**

#### 2.3.9.4 Evaluation (à partir de la base de données d'évaluation)

Le patron de variance-covariance établi à partir des 1027 profils des bandes 1 à 8 est utilisé pour générer une population virtuelle de porcs LWxPP (1000 mâles castrés ou 1000 femelles). Cette population virtuelle est comparée à de nouveaux groupes de porcs LWxPP issus des bandes 9 et 10. Les matrices de variance-covariance des femelles LWxPP des bandes 9 et 10 comportent deux composantes principales communes avec la matrice de variance-covariance moyenne (P de rejet de CPC3 = respectivement 0,04 et 0,02). La matrice de variance-covariance des mâles castrés LWxPP de la bande 9 comporte trois composantes principales communes avec la matrice de variance-covariance moyenne (P de rejet de CPC = 0,03), en revanche celle de la bande 10 ne présente aucun lien (P de rejet de CPC1 < 0,01). Malgré les écarts de moyenne, écart-type et distribution observées pour certaines variables entre populations virtuelles et réelles, les résultats indiquent (dans trois cas sur quatre) que la structure de variance-covariance de la population virtuelle est proche de celles des populations réelles, les deux premières composantes principales rassemblant plus de 60% de la variabilité (Figure 38).

## DISCUSSION

### *Commentaire sur les caractéristiques des porcs étudiés*

Les porcs sont élevés par case de 12. En élevage de production, ce nombre de porcs par case est parfois observé mais en général il est plus élevé. Toutefois, au-delà de cet effectif, la taille du groupe n'interfère pas avec les performances moyennes (Gonyou et Stricklin, 1998) ni avec leur variabilité (Brumm *et al.*, 2002 ; Brossard *et al.*, 2011) . Les données sont issues d'un seul élevage, mais des niveaux de performances de croissance très différents sont obtenus à partir des porcs issus des différentes bandes, croisements et types sexuels. Bien que le dispositif expérimental ne permette pas de comparer entre eux tous les croisements étudiés, et bien que l'écart de performances entre chaque croisement et les porcs LWxPP soit limité, la Figure 41 illustre le fait que les différents croisements étudiés intra-bande présentent en moyenne des GMQ et IC qui balayent des situations variées autour des porcs LWxPP lorsque les performances de ces derniers sont utilisées en référence dans chaque bande. Cette diversité de niveaux et de composition du gain de PV ainsi que les conditions d'élevage (12 porcs par case, respect des normes de logement et de conduite de l'ambiance) permettent de considérer que les données collectées dans cette étude sont représentatives de celles pouvant être collectées en élevage quand les porcs, issus de ces différents croisements, sont alimentés à volonté, à la nuance près du statut sanitaire.



Les écarts de  $PV_{70}$  résultent de différences de GMQ pendant les stades antérieurs (en maternité, en post-sevrage). Ainsi, un  $PV_{70}$  inférieur est obtenu en moyenne à partir des bandes nées, allaitées ou sevrées en été ou au début de l'automne. Pendant l'allaitement, le gain de PV des porcelets dépend directement de la production laitière de la truie, qui dépend elle-même de la température ambiante (Black *et al.*, 1993). Dans les salles d'engraissement, la température ambiante était régulée par un système de climatisation mais pas dans les salles de maternité ni de post-sevrage. Or, quand la température est plus élevée que la limite supérieure de thermoneutralité, cela provoque une diminution de la quantité de lait produite par la truie et une diminution du poids des porcelets au sevrage (Quiniou et Noblet, 1999), et une diminution du GMQ en post-sevrage (Collin *et al.*, 2001).

Les modalités de mise en lot lors de l'entrée en engraissement, basées sur le PV minimum déterminé par le système d'alimentation utilisé, et la conservation ou non de la distribution des poids de la population initiale, peuvent également intervenir sur les valeurs du  $PV_{70}$ . Le type sexuel influence significativement toutes les variables, sauf  $PV_{70}$ . En accord avec Quiniou *et al.* (2010), l'effet du sexe sur la croissance est modéré voire inexistant avant la fin du post-sevrage, tandis que les écarts sont très nets en engraissement.

#### *Description de l'évolution du PV avec l'âge*

L'intérêt du choix de l'équation de Gompertz pour décrire l'évolution du dépôt protéique dans InraPorc a déjà été discuté par van Milgen *et al.* (2008). Seules trois variables sont nécessaires pour renseigner cette équation, ce qui est intéressant au regard du principe de parcimonie (Thornburn, 1915).

#### *Description de l'évolution de la CMJ avec le PV*

La proportion de données de CMJ conservées dans la base de données (94% pour les dix bandes) est bien plus élevée que celle obtenue par Chen *et al.* (2010, 51%). Ces auteurs ont appliqué la méthode automatique de discrimination des données proposée par Casey *et al.* (2005), et non une procédure de correction au cas par cas comme celle appliquée dans notre étude. Bien que chronophage, cette dernière permet de compléter un nombre de profils de porcs conséquent.

Pour décrire la relation entre CMJ et PV, la qualité d'ajustement des quatre équations considérées a été mesurée sur la base du RMSEP mais d'autres méthodes sont possibles, notamment lorsque les fonctions à comparer ont le même nombre de variables. Il s'agit par exemple de choisir l'équation ayant le coefficient de détermination ( $R^2$ ) le plus élevé. Le

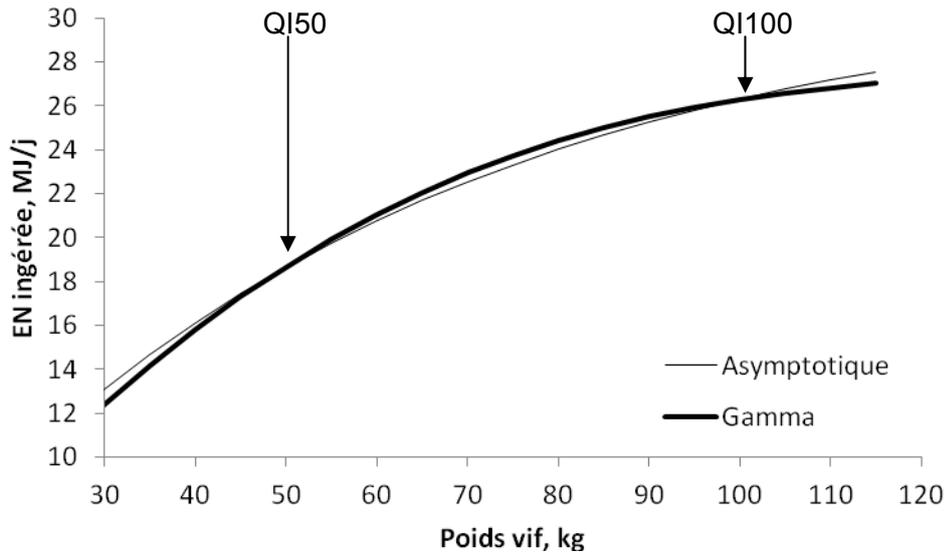


Figure 42 - Comparaison de l'évolution de l'énergie nette (EN) ingérée quotidiennement avec le poids vif lorsqu'elle est calculée avec une équation asymptotique ou une équation gamma de l'entretien pour une même quantité ingérée (QI) à 50 et 100 kg de poids vif

test de run peut également être utilisé, il se base sur le comptage du nombre de résidus successifs de même signe quand les données utilisées pour l'ajustement sont parcourues dans l'ordre croissant. Dans ce test, les valeurs les plus faibles indiquent les meilleurs ajustements. Comparativement à ces méthodes, la mesure par RMSEP apporte, outre un classement des équations, l'ordre de grandeur de l'erreur d'ajustement.

Sur la base du classement réalisé par RMSEP, la fonction gamma est donc préférée pour décrire l'évolution de la CMJ avec le PV par rapport aux autres fonctions mises à disposition par le logiciel InraPorc (linéaire, puissance, exponentielle). La fonction gamma a tout d'abord été utilisée en modélisation pour ajuster des courbes de lactation (Wood, 1967). Outre la qualité de l'ajustement aux données, la fonction gamma présente une originalité par rapport aux autres dans la mesure où elle permet de décrire une diminution éventuelle de la CMJ lorsque le PV augmente. Or, cette diminution est cohérente avec le concept suivant lequel à maturité les besoins nutritionnels correspondent seulement à la fraction d'entretien.

La CMJ à 50 et 100 kg de PV de différents types de porcs a été calculée avec une fonction asymptotique par van Milgen et Noblet (1999). Lorsqu'ils expriment leurs résultats sur la base de l'ingestion d'EN, la CMJ à 50 kg (QI50) varie entre 16,6 et 22,9 MJ EN/j, respectivement pour les mâles entiers PP et les mâles castrés croisés Meishan x LW. Les différences de CMJ à 100 kg de PV (QI100) sont encore plus importantes, soit respectivement 21,6 et 31,6 MJ EN/j. van Milgen et Noblet (1999) ont également étudié des porcs d'une lignée synthétique proche des porcs P76 de notre étude. Ils observent que QI50 et QI100 sont inférieures de 2,03 et 4,69 MJ EN/j chez les mâles entiers PP comparés à ceux de la lignée synthétique. Dans notre étude, les écarts correspondants entre les porcs issus de verrats PP et P76 sont moins importants, respectivement de 0,23 MJ EN/j à 50 kg de PV et de 1,27 MJ EN/j à 100 kg de PV chez les femelles, et de 0,52 et 0,57 MJ EN/j chez les mâles castrés. La diminution des écarts de CMJ entre les porcs étudiés par van Milgen et Noblet (1999) et entre ceux de notre étude contribue à la difficulté de mettre en évidence des effets du type de porcs sur les critères descriptifs des animaux. Ces différences entre études peuvent être expliquées en partie par le choix de la fonction pour décrire l'évolution de la CMJ avec PV (exponentielle vs gamma dans notre étude). Cependant pour des QI50 et QI100 identiques, malgré une répartition légèrement différente au cours de la période, l'écart entre les CMJ moyennes entre 30 et 115 kg selon l'équation est bien plus faible (Figure 42) que l'écart entre études mentionné ci-dessus. Par ailleurs, van Milgen et Noblet (1999) ont comparé des porcs de race pure ou de lignée synthétique alors que dans notre étude ils sont issus d'un croisement à 50% issus de truies communes à tous les porcs (LWxLD), ce qui peut atténuer les différences de cinétique d'ingestion entre types de porcs.



### *Jeu de variables descriptives d'un profil animal*

Les variables utilisées pour décrire un profil animal dans notre étude sont faciles à mettre en relation avec des indicateurs de performances (CMJ et GMQ). La CMJ à 50 et 100 kg de PV sont des indicateurs partiels de la CMJ sur l'ensemble de la période (plus faciles à interpréter que les coefficients  $a$  et  $b$  de la fonction gamma). Le  $PV_{70}$  est utilisé comme point de départ des simulations et dépend des performances réalisées lors des stades de croissance précédents comme évoqué plus haut. Le  $B_{\text{Gompertz}}$  décrit la courbe de l'évolution sigmoïdale du dépôt protéique avec le PV. Le PDm (ou PDm') est un indicateur du potentiel de croissance pendant la période de croissance considérée, il constitue une alternative à la masse protéique à maturité utilisée dans l'équation de Gompertz par Emmans et Fisher (1986). Cette variable est très corrélée avec le GMQ dans notre étude ( $r = 0,94$ ), confirmant ainsi l'importance du rôle moteur joué par le dépôt protéique dans la croissance du porc (Whittemore *et al.*, 1995 ; van Milgen *et al.*, 2008).

Knap (2000) a publié des valeurs de variables pour l'équation de Gompertz utilisée pour décrire l'évolution du dépôt de protéines avec le PV chez différentes races (Lacombe et LW) ou croisements (LWxLD et lignée synthétique). Il observe une valeur de  $B_{\text{Gompertz}}$  comprise entre 0,009 et 0,017 /j, ce qui est plus faible que les valeurs obtenues à partir des bandes de porcs prises en compte dans notre base de données de calibrage (de 0,0129 à 0,0228 /j). Plus la valeur du  $B_{\text{Gompertz}}$  est élevée, plus le porc est précoce ce qui indiquerait une plus grande précocité des porcs de notre étude que dans celle de Knap (2000). Cet auteur présente également des valeurs de PDmax comprises entre 99 et 212 g/j. Dans notre étude, c'est le dépôt protéique moyen (PDm') qui est pris en compte et non sa valeur maximale, mais c'est néanmoins un indicateur similaire du potentiel de croissance. Il varie dans notre étude entre 135 et 162 g/j (Tableau 34), ce qui indique que certains types de porcs étudiés par Knap (2000) ont un potentiel de croissance bien plus faible que ceux qui, dans notre étude, présentent le PDm' le plus bas.

La valeur moyenne des variables doit être déterminée avant d'envisager la génération de profils de croissance individuels virtuels. Nos résultats ne montrent pas d'effet significatif du type de croisement sur les variables du modèle, mais des effets très significatifs de la bande et du sexe. En particulier, la valeur de  $B_{\text{Gompertz}}$  n'est pas significativement influencée par ce facteur. Pourtant, des différences de précocité entre types génétiques ont été rapportées antérieurement par Noblet et Quiniou (1999). A partir de notre jeu de données, il semble que de tels écarts soient difficiles à mettre en évidence chez des porcs croisés. Outre le nombre somme toute restreint d'observations et la variabilité entre les porcs, le dispositif expérimental choisi peut également expliquer ce résultat. En effet, dans les



installations expérimentales disponibles, l'effet du type de verrat ne peut être testé qu'intra-bande par référence au verrat LWxPP. Toutefois nos résultats rejoignent ceux de Ferguson et Kyriazis (2003) et Green *et al.* (2003), qui ont également comparé des croisements à partir de truies LW, LD, ou LWxLD. Ces auteurs suggèrent que le nombre limité d'observations pour chaque population résulte dans une variabilité importante des variables, qui ne permet donc pas de mettre en évidence d'effet du type de croisement. Cependant, Ferguson et Kyriazis (2003) ont étudié seulement quatre porcs jusqu'à 100 kg et Green *et al.* (2003) ont étudié seulement cinq porcs jusqu'à 115 kg, alors que dans notre étude l'effectif par groupe est au minimum de 23 individus. Même dans ces conditions, les écarts entre croisements restent non significatifs entre les types de porcs considérés comme les plus différents les uns des autres (par exemple Duroc vs PP).

### *Covariance entre variables*

Afin de prendre en compte la variabilité des performances en modélisation, la matrice de variance-covariance entre variables du modèle doit être caractérisée (Pomar *et al.*, 2003). L'ACP des variables de profils apporte deux informations importantes à notre démarche : la première est que des variables sont liées et la deuxième est l'importance d'un effet groupe sur les relations entre variables. Ainsi, la Figure 37 montre une forte corrélation entre l'âge initial et le PV initial, d'une part, et entre le PV final, le dépôt moyen de protéines et la durée, d'autre part. Il s'agit en fait d'une description de l'état de l'animal à son entrée en engraissement et de son état final compte-tenu de sa vitesse de croissance et de la durée d'engraissement. Comme l'entrée en engraissement et le départ à l'abattoir varient entre animaux selon leur date de naissance et selon les décisions propres à l'élevage, il faut standardiser nos profils. C'est pourquoi la variable  $PV_{70}$  a été calculée pour définir l'état initial, et  $PDm'$  et  $DUREE'$  ont été calculés pour rendre compte de l'état final du profil à un moment fixe et selon la vitesse de croissance sur une période fixée de la même façon.

Le deuxième point, illustré par la Figure 36, est l'influence de la structure de nos données sur les corrélations observées. La distance entre ellipses de confiance montre déjà une différence de niveau moyen de variables entre sexes et entre bandes. Afin de ne pas mesurer une covariance qui soit le reflet de différences de niveaux entre groupes, il faut alors définir ce qu'est un groupe (voir § 2.3.5) avant d'étudier les relations entre variables au sein des groupes, d'où l'importance du centrage et de la réduction mentionnés dans le paragraphe 2.2.2.1. Une ACP par groupe n'aurait pas résolu ce problème car chaque corrélation entre variables aurait été étudiée dans l'espace propre du groupe considéré et non pas dans un espace commun, capable de résumer la covariance intragroupe commune à tous les groupes. Cette possibilité est alors apportée par l'AFMD et son fonctionnement a inspiré notre méthode de calcul pour obtenir une matrice de variance-covariance moyenne.



D'après le modèle de Flury (test CPC), chacune des 32 groupes initiaux (8 bandes x 2 croisements x 2 sexes) de la base de données de calibrage présente une structure de variance-covariance spécifique. D'un point de vue statistique, cela implique qu'il faut évaluer la structure de variance-covariance pour chaque groupe, l'échelle du groupe incluant la notion de bande, croisement, sexe mais également l'élevage probablement. Cependant, tout comme pour le vecteur moyen des variables, la connaissance *a priori* des matrices de variance-covariance est impossible. En élevage de production, ce n'est pas non plus envisageable dans la mesure où cela implique l'obtention de données individuelles. Une matrice de variance-covariance moyenne a donc été proposée pour dépasser ces difficultés.

Dans un premier temps, des corrélations simples entre variables ont été utilisées. Ferguson *et al.* (1997) observent ainsi la corrélation entre  $B_{\text{Gompertz}}$  et la masse protéique à maturité. Morel *et al.* (2008) proposent également une matrice de variance-covariance avec trois variables : le niveau de dépôt protéique maximal, la quantité d'énergie ingérée et le rapport minimal entre dépôts lipidique et protéique moyens. Cependant, les corrélations qu'ils présentent sont spécifiques de leurs conditions expérimentales. Dans notre étude, la matrice de variance-covariance moyenne est élaborée afin de constituer une matrice générique qui intègre les différences observées entre groupes quant à la variabilité des corrélations entre CMJ et GMQ au sein d'un groupe de porcs. A cette échelle la covariance entre variables est cohérente avec celle observée au sein de chaque groupe, à savoir la corrélation positive entre PDM' et les variables de la courbe d'ingestion et entre PDM' et PV<sub>70</sub>, et la corrélation négative entre PV<sub>70</sub> et QI50 et entre  $B_{\text{Gompertz}}$  et QI50 et QI100. Les valeurs de la variance dans la matrice et le CV correspondant pour le PDM' (11%) sont dans la gamme de valeurs du CV obtenues par Knap (2000) pour le dépôt protéique maximal (entre 4 et 33%). En revanche, le CV du  $B_{\text{Gompertz}}$  dans notre étude (46%) dépasse la valeur la plus élevée rapportée par Knap (2000, 41%). Les CV de la CMJ à 50 kg (10%) et à 100 kg (11%) sont également plus élevées que celles rapportées par van Milgen et Noblet (1999, respectivement environ 2 et 4%). Ainsi qu'évoqué plus haut, ces différences peuvent être attribuées au choix de la fonction utilisée pour modéliser la CMJ ainsi qu'au nombre et au type de porcs étudiés. van Milgen et Noblet (1999) ont étudié 8 à 20 porcs par type génétique de PV initiaux les plus proches possible alors que dans notre étude la variabilité individuelle du PV initial était beaucoup plus importante, voire contrainte à être le plus proche possible de la variabilité observée en fin de post-sevrage pour les porcs de deux des bandes considérées.

La faible stabilité du coefficient de corrélation entre  $B_{\text{Gompertz}}$  et les autres variables (hormis avec PV<sub>70</sub>) parmi les groupes étudiés semble indiquer une indépendance générale de cette variable vis-à-vis des autres, mais aussi une grande part de variabilité intergroupe par



rapport à la variabilité intragroupe de cette variable. C'est pourquoi la mesure de matrices de variance-covariance par croisement apporterait plus d'informations en prenant en compte le lien spécifique entre la précocité  $B_{\text{Gompertz}}$  et les autres variables du profil selon le croisement.

Chaque variable a sa propre loi de distribution dont une partie de l'étendue résulte du lien de covariance avec les autres variables. Dans le calcul de la loi de répartition des variables, cette part de la variabilité a été retirée dans l'objectif de disposer de distributions indépendantes pour le processus de génération. La loi empirique ainsi obtenue est susceptible d'intégrer une part moindre de la variabilité que les lois normales utilisées antérieurement pour la génération multi variée (Ripley, 1987), celles-ci posant d'autres problèmes par ailleurs (mauvaise distribution de l'ensemble des variables). Ceci est illustré par le fait qu'avant correction par itération dans le processus de génération de bande, les écarts-types obtenus sont de l'ordre de 60% des valeurs attendues. La matrice de variance-covariance moyenne proposée dans cette étude pour servir de patron à la génération de populations virtuelles permet de représenter de façon plus précise la variabilité de groupes spécifiques que ne le fait la matrice de variance-covariance brute, notamment par la pondération réalisée pour intégrer les différences d'effectifs entre groupes.

La qualité de prédiction entre la matrice de variance-covariance brute et la matrice de variance-covariance moyenne est significativement différente lorsque ces deux matrices sont comparées à la structure de variance-covariance observée à partir de la base de données de calibrage. A partir de la base de données d'évaluation, la différence n'est pas significative, notamment en raison du petit nombre de groupes ( $n = 8$ ) disponibles dans cette base dont deux d'entre eux présentent une structure de variance-covariance complètement différente. Cette difficulté d'échantillonnage mise à part pour l'évaluation du patron de variance-covariance, la matrice de variance-covariance moyenne reste le meilleur estimateur possible et est utilisée dans le procédé de génération des populations virtuelles de la partie 2.3.9.



## CONCLUSION

Cette étape de la thèse illustre les difficultés rencontrées pour prendre en compte la variabilité en modélisation des performances du porc. La première d'entre elles consiste déjà à la caractériser. Or, cette étude a permis de mettre en évidence que la structure de variance-covariance varie d'un groupe de porcs à l'autre, l'échelle de regroupement étant définie par la bande et le type de porc (sexe x croisement). Il ne semble donc pas possible de distinguer une structure de variance-covariance qui serait générique (universelle) d'une autre partie qui serait spécifique du type sexuel, du type de croisement... Ceci nous a amené à tenter d'identifier un patron moyen de variance-covariance à partir de tous les groupes étudiés. Ainsi, chaque population peut être représentée par cette structure de variance-covariance avec une erreur réduite de l'estimation de la variabilité observée, et par un vecteur moyen des variables qui lui est spécifique. Cette approche permet de générer des populations virtuelles dont la structure de variance-covariance peut être considérée comme étant réaliste, même si ce n'est pas celle qui est observée. Cette approche permet d'envisager le développement de simulations stochastiques à partir d'un modèle déterministe. A ce stade, elle est développée en s'appuyant sur les variables utilisés par le modèle InraPorc mais pourrait être étendue à d'autres modèles mécanistes. Auparavant, il nous semble nécessaire de simuler la réponse d'une population virtuelle générée ainsi à différentes stratégies alimentaires (étape 2 à suivre) puis de comparer les résultats de modélisation à la réponse de porcs (*in vivo*) placés dans les mêmes conditions d'alimentation (étape 3).

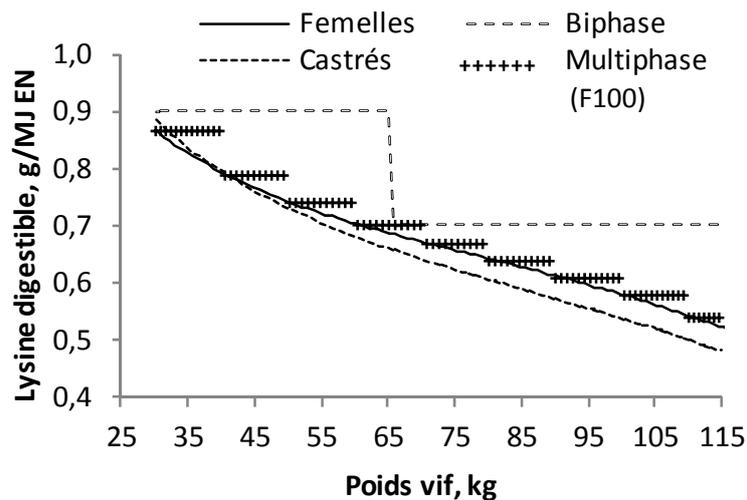


### **3 ETAPE 2 - SIMULATION DE L'EFFET DE STRATÉGIES ALIMENTAIRES APPLIQUÉES À UNE POPULATION VIRTUELLE**

**Tableau 38 - Valeurs du profil moyen des femelles et des mâles castrés de la population virtuelle de référence et performances moyennes associées**

Type sexuel	Femelles	Mâles castrés
<b>Courbe de croissance (Gompertz)</b>		
PV à 70 jours d'âge, kg	30,1	30,1
Age à 111 kg PV, jours	163	155
Dépôt protéique moyen, g/j	138	146
$B_{\text{Gompertz}}, \text{j}^{-1}$	0,01439	0,01555
<b>Courbe d'ingéré en fonction du poids<sup>1</sup>, <math>\text{kg}^{-1}</math></b>		
a	4,22	4,77
b	0,0213	0,0189
<b>Performances simulées (30-115 kg PV)</b>		
Vitesse de croissance, g/j	853	943
Energie nette (EN) ingérée, MJ/j	22,0	24,4
EN ingérée, MJ/kg de gain de poids	25,5	25,9
Taux de muscle des pièces	57,9	56,2

<sup>1</sup>Fonction gamma : EN ingérée (MJ) =  $a \times (b \times PV \times e^{-b \times PV} + 1) \times 0,75 \times PV^{0,60}$



**Figure 43 - Evolution avec le poids du besoin en lysine par MJ d'énergie nette (EN) estimé avec InraPorc à partir du profil moyen des femelles et des mâles castrés décrit dans le Tableau 38, et niveaux utilisés en stratégie multiphase de référence (F100) ou biphase**

## Préambule

Ce chapitre correspond à l'article publié et présenté lors des Journées de la Recherche Porcine 2013 sous la référence :

Modélisation de l'effet de la stratégie alimentaire et du contexte de prix des matières premières sur les performances moyennes, leur variabilité et les rejets azotés à l'échelle d'une population de porcs. Journées Rech. Porcine, 45,155 - 160  
par N. Quiniou, B. Vautier, Y. Salaün, J. van Milgen et L. Brossard.

## INTRODUCTION

Une population virtuelle de 2000 porcs issus d'un croisement avec un verrat terminal LWxPP a été générée suivant le principe décrit ci-dessus à partir d'un générateur de porcs virtuels issus de LWxPP, en s'appuyant sur leur vecteur moyen des variables (Tableau 38) et la matrice de variance-covariance du générateur virtuel présenté dans le chapitre précédent (Tableau 35).

### 3.1 MATÉRIEL ET MÉTHODES

#### 3.1.1 Séquences alimentaires

##### 3.1.1.1 Niveaux nutritionnels

Différentes séquences alimentaires sont établies à partir de l'évolution du besoin en LYSd par unité d'EN selon le PV, estimé pour le profil moyen des individus (Figure 43). Pour la stratégie biphasé, la valeur moyenne du besoin en LYSd de la population est de 0,93 g/MJ EN en début de période de croissance (à 70 jours d'âge), et de 0,69 g/MJ au début de la période de finition (à partir de 65 kg de PV). Pour des raisons pratiques, les niveaux retenus sont arrondis à 0,9 et 0,7 g/MJ. Pour la stratégie multiphasé, neuf paliers de référence sont retenus, par pas de 10 kg de PV. Le niveau de référence (F100, Figure 43) est établi à partir du profil moyen des femelles. Cette stratégie multiphasé est ensuite déclinée en dix niveaux d'apports en AA, de -10 à +35% autour de F100 (F90 à F135).

##### 3.1.1.2 Formulation des aliments

Quatre aliments de base ont été formulés dont les rapports LYSd/EN sont de 0,4, 0,7, 1,0, et 1,2 g/MJ. Pour atteindre les rapports LYSd/EN escomptés lors des différentes phases des séquences alimentaires, les aliments sont obtenus par mélange des aliments de base.

**Tableau 39 - Prix moyens sur 12 mois des matières premières utilisées dans la formulation des aliments (€/tonne, correspondant à cinq campagnes, IFIP, 2005-2010)<sup>1</sup>**

Contexte	1	2	3	4	5
De juillet à juin	2005 2006	2006 2007	2007 2008	2008 2009	2009 2010
Blé	113	149	222	147	122
Maïs	123	156	218	149	132
Orge	112	144	219	130	105
Son de blé	83	111	179	86	69
Remoulage	95	123	198	116	96
Tourteau de colza	141	161	242	188	178
Tourteau de soja 48	207	216	325	320	328
Mélasses (betterave)	135	144	143	166	171
Huile de colza	486	560	824	741	715
L-Lysine HCl	1352	1398	1563	1417	1750
L-Thréonine	3458	1988	1917	1713	2054
L-Tryptophane	22458	26842	26667	18917	19792
DL-Méthionine	2308	2400	2542	4192	3496
Phosphate bicalcique	315	327	520	758	484
Phytases	12500	11500	10250	9500	9500

1. Le prix est fixe pour le sel (90 €), le CaCO<sub>3</sub> (50 €), le complément oligo vitaminique (500 €) et la L-Valine (8 000 €). Les caractéristiques chimiques et nutritionnelles des Tables INRA-AFZ (2004) sont utilisées.

**Tableau 40 - Teneur en protéines (Nx6,25, %) des aliments de base non Corpen, correspondant à quatre niveaux de lysine digestible par MJ d'énergie nette dans cinq contextes de prix<sup>1</sup>**

Contexte	Lysine digestible, g/MJ d'énergie nette <sup>2</sup>			
	0,4	0,7	1,0	1,2
2005/06	11,3	13,0	17,5	20,5
2006/07	11,3	12,9	17,4	20,4
2007/08	9,7	13,4	17,4	22,2
2008/09	9,8	13,0	17,4	20,4
2009/10	10,2	12,9	17,3	20,2

1. Voir Tableau 39.

2. La teneur en EN est fixée à 9,75 MJ/kg.

Les rapports minimaux entre AA essentiels sont ajustés sur la base du profil en AA de la protéine idéale (Tableau 5). Les aliments sont formulés sans contraintes sur la teneur maximale en MAT (aliments dits 'non Corpen') ou en respectant les teneurs maximales en MAT du Corpen (2003, 16,5% quand PV < 65 kg, 15,0% ensuite ; aliments dits 'Corpen'). Les autres contraintes de formulation concernent la teneur en cellulose brute (min : 2% - max : 8%), et en phosphore (P total : max 0,48% quand PV < 65 kg, 0,43% ensuite ; P digestible : min 2,3 g/MJ EN). La teneur en EN des aliments est de 9,75 MJ/kg.

Une liste de matières premières est utilisée avec cinq niveaux de prix moyens sur 12 mois correspondant à cinq campagnes de récolte entre 2005 et 2010 (Tableau 39), pour formuler les aliments à moindre coût. La teneur en MAT des aliments dépend de la contrainte sur ce critère et du prix des matières premières (Tableau 40).

### **3.1.2 Plans d'alimentation**

Sur la base des pratiques observées en élevage, cinq plans d'alimentation sont envisagés (Figure 44 - Consommation *ad libitum* moyenne selon le sexe et plans de rationnement étudiés (non représenté : 90% ad lib)) :

- une alimentation à volonté (100% ad lib),
- un rationnement de 10% par rapport à l'à volonté (90% ad lib),
- une alimentation à volonté jusqu'à un plafond commun de 2,4 kg/j pour les femelles et les mâles castrés ou 2,7 kg/j pour les mâles castrés (ad lib → plateau),
- un plan de rationnement progressif avec une ration initiale de 1,2 kg augmentant ensuite de 27 g/j jusqu'aux plafonds mentionnés précédemment (+27 g → plateau).

Pour les porcs dont l'ingestion quotidienne n'atteint pas les quantités théoriques allouées, les simulations sont réalisées en condition à volonté pour éviter de simuler les conséquences d'un gavage (voir § 1.2.4.2).

### **3.1.3 Simulations**

Les performances moyennes de la population sont obtenues à partir des simulations réalisées à l'aide d'InraPorc et appliquées aux 2000 profils individuels et à chaque stratégie alimentaire. La contrainte de formulation (Corpen / non Corpen) influence le prix des aliments (donc l'écart de marge) et la quantité de N ingéré, mais pas les performances.

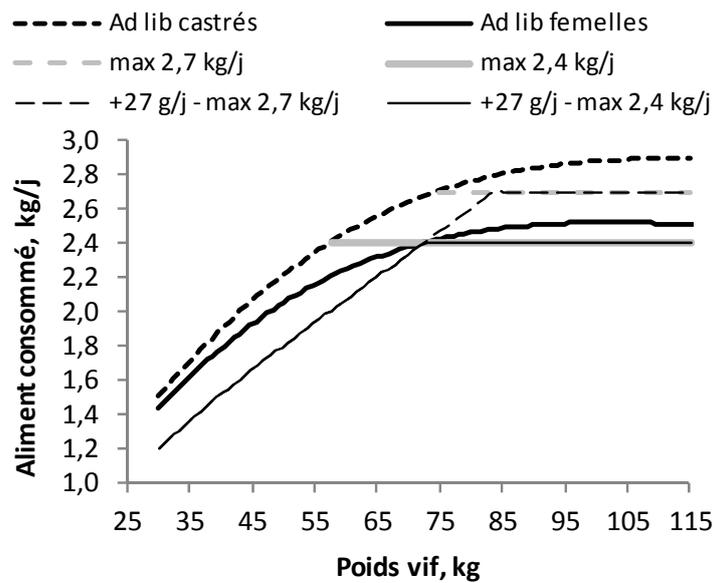


Figure 44 - Consommation *ad libitum* moyenne selon le sexe et plans de rationnement étudiés (non représenté : 90% ad lib)

### 3.1.3.1 Performances de croissance moyennes

Les porcs sont supposés être abattus en trois lots tous les sept jours avec un poids minimal de 112 kg aux deux premiers départs ; l'âge au premier départ est ajusté pour obtenir un poids moyen final de 115 kg. Les critères de GMQ, CMJ, IC et TMP sont calculés pour chaque porc entre le début de chaque simulation et l'âge théorique auquel il est abattu. Les GMQ, CMJ et IC moyens de la population sont ensuite calculés à partir des 2000 résultats individuels. Le  $CV_{PV}$  est calculé pour les 2000 porcs, lors du premier départ et lors de l'abattage.

### 3.1.3.2 Performances économiques

La marge est calculée suivant la méthode décrite par Quiniou *et al.* (2007). Pour chaque simulation et chaque porc, elle est obtenue par différence entre le prix payé pour les carcasses et les dépenses de main-d'œuvre et d'aliment. Dans le Tableau 42, ce sont les écarts de marge entre les différentes stratégies d'alimentation qui sont présentés.

La valeur de la carcasse est calculée individuellement selon la grille de paiement des carcasses d'Uniporc Ouest (Tableau 11) à partir du poids de carcasse et du TMP estimé par InraPorc. Le rendement de carcasse est estimé à partir du rendement moyen réel du groupe de porcs (79%). Le prix de base du porc pour 56% de TMP retenu est celui de la cotation du Marché du Porc Breton le 15/11/11 : 1,475 €/kg. Les différences de plus-values de la grille TMP sont appliquées à chaque porc.

Le coût de la main-d'œuvre par porc produit est calculé en additionnant le coût des tâches fixes par porc (0,088 heure par porc) et celui des tâches quotidiennes liées au temps d'occupation de la salle (0,001381 heure par jour par porc). Le coût horaire est fixé à 16,54 €. Les coûts liés à des interventions ponctuelles et inévitables ne sont pas pris en compte (vaccination, nettoyage-désinfection...) car ces derniers sont constants pour un effectif de porcs produits. Tous les porcs sont supposés être présents jusqu'à l'abattage.

## 3.2 RESULTATS ET DISCUSSION

### 3.2.1 Conduite alimentaire et variabilité du poids

Le tri des porcs réalisé avant l'abattage permet d'abaisser le  $CV_{PV}$  de 3 points en moyenne par rapport à la valeur observée au premier départ (Figure 45). En conduite 100% ad lib avec les stratégies multiphasées, le  $CV_{PV}$  augmente lorsque les apports d'AA diminuent. Le besoin en AA d'une proportion croissante de porcs n'est alors pas couvert et le GMQ est

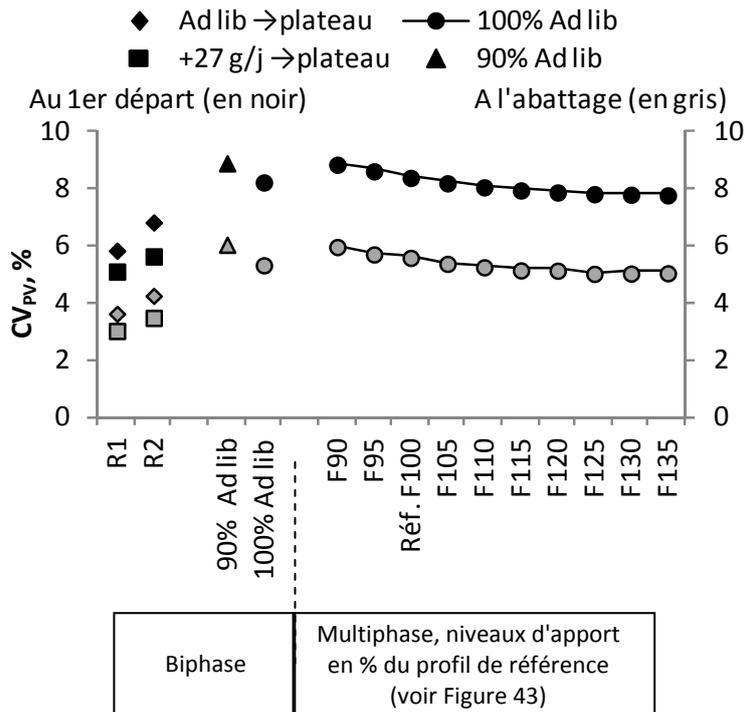


Figure 45 - Coefficient de variation du poids vif ( $CV_{PV}$ ) selon la séquence alimentaire et le plan d'alimentation (R1 = max 2,4 kg/j pour les femelles et mâles castrés R2 = max 2,4 kg/j pour les femelles et 2,7 kg/j pour les mâles castrés)

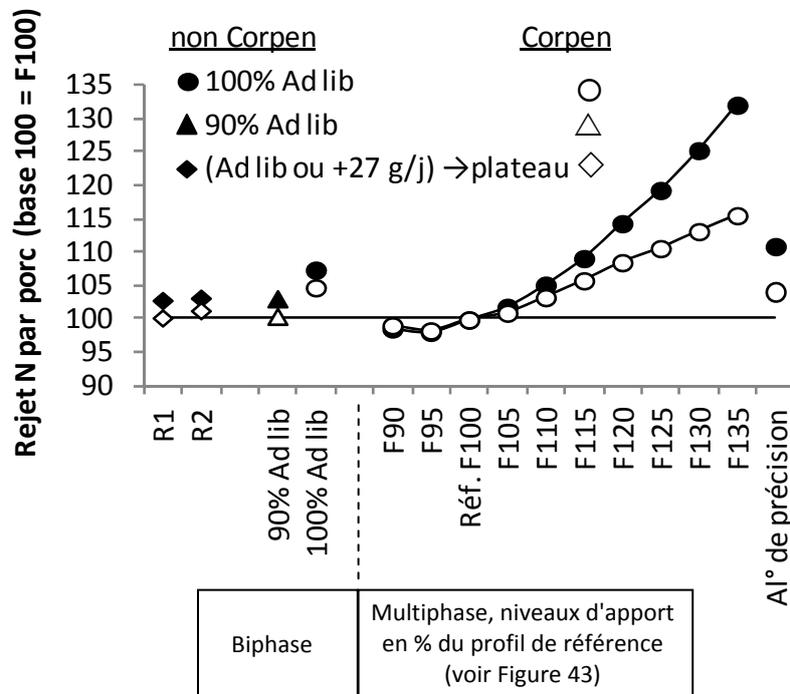


Figure 46 - Rejet N moyen par porc dans cinq contextes de prix selon la séquence alimentaire, le plan d'alimentation (Figure 3) et l'application d'une contrainte de formulation Corpen ou non (résultats confondus pour les plans d'alimentation avec plateau)

pénalisé par l'inadéquation des apports aux besoins, inadéquation accentuée par le nombre de phases (Brossard *et al.*, 2007). La dégradation du  $CV_{PV}$  serait sans doute moindre si la politique de tri était modifiée, notamment par un report de quelques jours du dernier départ.

Avec la stratégie biphasé en 100% ad lib, le  $CV_{PV}$  est comparable à celui obtenu avec la stratégie F105. Une restriction de 10% par rapport à l'à volonté se traduit par une augmentation du  $CV_{PV}$  (Figure 45). Avec cette conduite, la variabilité de la CMJ reste importante. Par ailleurs, le rationnement entraîne une diminution du GMQ (Tableau 41), qui résulte en un gain de PV moindre entre les deux derniers départs pour les derniers porcs abattus et accentue le  $CV_{PV}$  par rapport à 100% ad lib.

Quand le rationnement est appliqué selon un plan progressif, le  $CV_{PV}$  est réduit (Figure 45). Les porcs qui présentent une CMJ spontanée élevée sont alors contraints et plus la restriction est intense plus le  $CV_{PV}$  diminue. Ainsi, le plus faible  $CV_{PV}$  est obtenu quand une quantité maximale de 2,4 kg/j est allouée aux deux types sexuels (séquence R1). A contrario, quand les mâles castrés reçoivent jusqu'à 2,7 kg/j (séquence R2) et/ou que les porcs ne sont pas rationnés avant le plafond, le  $CV_{PV}$  est plus élevé. Toutefois il faut rappeler que ces niveaux de  $CV_{PV}$  sont issus de simulations individuelles qui ne prennent pas en compte la compétition alimentaire entre porcs logés en groupes.

### **3.2.2 Performances moyennes**

En alimentation à volonté, l'effet du niveau d'apport en AA sur le GMQ est conforme à celui relaté dans la littérature (Mohn *et al.*, 2000). Avec une stratégie multiphasé, la diminution des apports d'AA de 10% en deçà de F100 s'accompagne d'une diminution du GMQ chez la majorité des porcs, alors qu'une augmentation de 10% améliore le GMQ seulement pour les porcs dont le potentiel de dépôt protéique est élevé ; c'est pourquoi il est logique de constater que, relativement à la situation de référence, une diminution de 10% des apports a un impact plus fort qu'une augmentation de 10% (Tableau 41).

L'effet marginal sur le GMQ de chaque augmentation de cinq points du ratio LYSd/EN par rapport à F100 s'amenuise aux niveaux d'apport les plus élevés. Ainsi, il apparaît que le besoin en AA de la population, c'est-à-dire le niveau d'apport permettant de maximiser le résultat, est supérieur au profil moyen F100 d'environ 25% sur la base du GMQ, mais de 30% sur la base de l'IC ou de la teneur en muscle de la carcasse. Avec la stratégie biphasé, le GMQ, l'IC et la teneur en muscle de la carcasse obtenus en à volonté sont proches des valeurs obtenues avec la stratégie multiphasé F115 (Tableau 41).

**Tableau 41 - Performances de croissance et caractéristiques de carcasse moyennes d'une population de 2000 porcs, obtenues par simulations avec différentes stratégies alimentaires pour un poids moyen d'abattage de 115 kg**

Séquence alimentaire	Biphase						Multiphase <sup>1</sup>									
	0,9 g LYSd/ MJ EN quand PV < 65 kg						Niveau relatif d'apport en AA par rapport à F100, %									
	0,7 g LYSd/ MJ EN quand PV ≥ 65 kg						90	95	100	105	110	115	120	125	130	135
Plan d'alimentation <sup>2</sup>	+27g	+27g	AL	AL	90AL	AL	AL									
Plafond	R1	R2	R1	R2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Age au 1 <sup>er</sup> départ, j	171	169	167	163	169	159	167	164	163	161	160	159	159	158	158	158
Age d'abattage, j	176	174	172	171	175	165	173	170	169	167	166	165	165	164	164	164
GMQ, g/j	807	826	842	867	817	895	832	853	869	882	892	899	903	907	909	911
N retenu, g/porc	2167	2156	2162	2139	2171	2109	2053	2069	2093	2099	2109	2113	2123	2121	2126	2131
CMJ, kg/j	2,12	2,18	2,20	2,28	2,15	2,39	2,38	2,38	2,39	2,39	2,39	2,39	2,40	2,40	2,40	2,40
IC, kg/kg	2,64	2,65	2,63	2,64	2,63	2,67	2,86	2,79	2,75	2,71	2,69	2,67	2,66	2,65	2,64	2,64
Taux de muscle, %	58,2	57,7	57,9	57,3	58,2	56,5	54,8	55,3	55,7	56,1	56,3	56,5	56,7	56,8	56,9	56,9

1. Voir Figure 43 pour les niveaux d'apport en lysine digestible par unité d'énergie nette (EN) retenus pour la stratégie de référence F100.

2. AL = 100% ad lib, 90AL = 90% ad lib, +27 g = augmentation de la quantité d'aliment alloué à hauteur de 27 g/j ; plafond R1 = max 2,4 kg/j pour les femelles et mâles castrés, plafond R2 = max 2,4 kg/j pour les femelles et 2,7 kg/j pour les mâles castrés ; pour une teneur en EN de 9,75 MJ/kg

La restriction alimentaire permet d'améliorer l'IC et la teneur en muscle de la carcasse. Toutefois cette amélioration est plus marquée avec un rationnement à 90% ad lib ou avec le plan progressif le plus sévère. En effet, dans le premier cas, tous les porcs sont rationnés pendant toute la période. Au contraire, quand la restriction se réfère à une quantité fixe d'aliment alloué, les porcs dont l'ingestion spontanée est la plus faible ne sont en fait pas rationnés.

### **3.2.3 Différences de marge**

Les différences de marge s'expliquent principalement par l'effet de la stratégie alimentaire sur la valeur de la carcasse et le coût alimentaire (Tableau 42). L'effet sur le coût de la main d'œuvre est en lien avec la durée d'engraissement, mais reste limité. Avec la stratégie multiphase F90, la baisse du prix de l'aliment ne compense pas le manque à gagner lié à la baisse du taux de muscle de la carcasse et à l'augmentation de l'IC ; la marge moyenne diminue alors de 5 à 6 €/porc par rapport à F100. Plus la teneur en AA est élevée, plus la marge s'accroît (malgré des aliments plus chers), en raison des améliorations du taux de muscle et de l'IC à l'échelle de la population. Cette amélioration n'est cependant pas linéaire et l'équilibre entre coût alimentaire et produit supplémentaires dépend du contexte de prix des matières premières et de l'existence ou non d'une contrainte de formulation sur la MAT. Ainsi, sans contrainte, l'optimum est obtenu avec un apport d'AA supérieur à F100 de 30% dans le contexte 2, 25% dans les contextes 1 et 3, et 15% dans les contextes 4 et 5. Avec la contrainte, le niveau d'apport correspondant à l'optimum est moins sensible aux variations des prix des matières premières : il est atteint pour +15% d'AA pour les contextes 1 à 4 et +10% pour le contexte 5, par rapport à F100. Avec la stratégie biphasé 100% ad lib non Corpen, l'écart de marge obtenu avec F100 est intermédiaire entre ceux observés avec les stratégies F110 et F115 quel que soit le contexte, tandis qu'en formulation Corpen l'écart de marge dépend fortement du contexte de prix. Chez les porcs rationnés, le prix de carcasse augmente et le coût alimentaire diminue, ce qui permet une amélioration importante de la marge quel que soit le contexte de prix des matières premières, avec ou sans contrainte sur la MAT.

### **3.2.4 Bilan azoté**

Entre les stratégies F100 et F135, l'augmentation du rejet N (Figure 46) reflète l'ingestion accrue de N par les porcs dont une proportion croissante atteint son potentiel de dépôt protéique et est donc incapable de valoriser un apport supplémentaire d'AA. Quand une contrainte de formulation sur la MAT est appliquée, cette augmentation est moindre. Entre F100 et F135, le coefficient de rétention azotée (CRN) diminue de 42 à 36% sans contrainte

**Tableau 42 - Ecart de marge<sup>1</sup> par porc selon la stratégie alimentaire appliquée à l'ensemble des porcs, le contexte de prix des matières premières<sup>2</sup> et l'application d'une contrainte de formulation Corpen sur la teneur en matières azotées totales (MAT)**

Séquence alimentaire		Biphase						Multiphase <sup>3</sup>									
Acides aminés		0,9 g LYSd/ MJ EN quand PV < 65 kg						Niveaux relatifs par rapport à F100, %									
		0,7 g LYSd/ MJ EN quand PV ≥ 65 kg						90	95	100	105	110	115	120	125	130	135
Plan d'alimentation <sup>3</sup>		+27 g	+27 g	AL	AL	90AL	AL	AL									
Plafond <sup>3</sup>		R1	R2	R1	R2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Carcasse, Δ€/porc		10,05	8,35	9,12	6,69	7,96	2,23	-4,37	-2,08	0	1,14	2,05	2,62	3,18	3,41	3,78	4,08
Travail, Δ€/porc		0,16	0,11	0,06	-0,01	0,14	-0,08	0,10	0,03	0	-0,04	-0,06	-0,08	-0,09	-0,10	-0,11	-0,11
Marge, Δ€ <sup>4</sup> (pas de maxi sur la MAT)	Contexte 1	10,49	8,55	9,68	7,42	8,32	2,42	-5,10	-2,16	0	1,39	2,25	2,72	2,91	<b>2,96</b>	2,90	2,71
	Contexte 2	11,04	9,03	10,23	7,99	8,84	2,86	-5,53	-2,31	0	1,59	2,58	3,20	3,47	3,66	<b>3,70</b>	3,61
	Contexte 3	11,38	9,22	10,59	8,39	9,13	2,95	-5,85	-2,34	0	1,72	2,70	3,30	3,45	<b>3,61</b>	3,51	3,27
	Contexte 4	10,19	8,18	9,39	7,14	8,00	2,01	-4,96	-2,03	0	1,27	1,93	<b>2,17</b>	2,06	1,83	1,43	0,86
	Contexte 5	9,82	7,85	9,01	6,75	7,65	1,70	-4,68	-1,92	0	1,13	1,68	<b>1,81</b>	1,61	1,24	0,76	0,07
Marge, Δ€ <sup>5</sup> (maxi sur la MAT)	Contexte 1	10,34	8,39	9,53	7,11	8,17	2,26	-4,99	-2,09	0	1,31	1,96	<b>2,14</b>	1,86	1,37	0,78	0,08
	Contexte 2	10,82	8,81	10,02	7,60	7,07	1,08	-7,05	-2,24	0	1,48	2,27	<b>2,59</b>	2,41	2,08	1,60	1,01
	Contexte 3	11,24	9,09	10,45	8,00	9,00	2,81	-5,76	2,29	0	1,66	2,51	<b>2,92</b>	2,79	2,62	2,21	1,70
	Contexte 4	10,19	8,18	9,38	6,96	8,00	2,00	-4,92	-1,99	0	1,26	1,80	<b>1,86</b>	1,46	0,88	0,18	-0,63
	Contexte 5	9,83	7,86	9,03	6,61	7,66	1,72	-4,64	-1,89	0	1,12	<b>1,53</b>	1,43	0,87	0,07	-0,82	-1,82

1. Différence par rapport à la valeur de référence obtenue avec la stratégie F100. **En gras** = écart de marge le plus élevé en stratégie multiphase.

2. Voir Tableau 39.

3. Voir Tableau 41.

4. Simulations sans contrainte de formulation sur la teneur maximale en MAT des aliments.

5. Simulations avec une teneur en MAT des aliments maximale de 16,5% en croissance (avant 65 kg de poids) et 15,0% en finition (Corpen, 2003).

sur la MAT et de 42 à 40% avec cette contrainte. Pour une rétention identique ( $\approx 2111$  g N/porc en moyenne pour les cinq contextes de prix), la stratégie biphasé 100% ad lib génère des rejets N intermédiaires entre ceux calculés avec les stratégies F110 et F115 ; ces rejets sont réduits de 120 g/porc en formulation Corpen. Le CRN est proche dans les trois séquences (42% en Corpen, 41% sinon).

Des calculs supplémentaires ont été réalisés avec une approche individualisée des apports alimentaires (relevant d'une démarche d'élevage de précision). La stratégie multiphasé permettant à chaque porc d'atteindre son GMQ maximal à 1 g près a été identifiée. La proportion de porcs pour lesquels les stratégies multiphasés F90 à F135 ont été ainsi déterminées est respectivement de 5,4, 5,1, 7,4, 9,4, 11,4, 9,3, 8,7, 8,2, 7,2 et 28,2%. Cette approche individualisée permet d'obtenir des performances de croissance identiques à celles de la stratégie F135, mais avec un rejet N inférieur (Figure 46) et une marge plus élevée. Ainsi, avec des aliments non Corpen, la marge est supérieure en moyenne de 4,18 €/porc à celle obtenue avec F100 pour un rejet N ( $\approx 3136$  g/porc en moyenne pour les cinq contextes de prix) intermédiaire entre ceux obtenus avec F115 et F120 (respectivement 3085 et 3233 g/porc). Avec des aliments Corpen, la marge est supérieure en moyenne de 3,26 €/porc par rapport à F100, pour un rejet N (2892 g/porc) proche de celui obtenu avec F110 (2874 g/porc). Le rejet correspondant pour une stratégie biphasé qui permettrait l'expression du potentiel de croissance à l'échelle de la population serait de 3384 g/porc (pour un apport de 1,05 et 0,95 g de LYSd/MJ EN, respectivement pendant les périodes de croissance et finition)

La restriction alimentaire, par son effet sur l'IC, permet de diminuer la quantité de N ingéré et d'améliorer la quantité de N retenu par porc, d'où une réduction de 4% des rejets azotés obtenus avec un rationnement à 90% ad lib ou avec les plans de rationnement (progressifs ou non) avec plateau.

L'influence du contexte de prix des matières premières sur le rejet azoté dépend des équilibres relatifs de prix entre sources de protéines, acides aminés de synthèse, et sources d'énergie. Ils déterminent la teneur en MAT de l'aliment associée à une teneur en AA essentiels donnée. Ainsi, même quand le soja est onéreux, son taux d'incorporation peut rester élevé si les céréales ou un des AA sont également chers (contexte 3) ; cela est associé à un taux de MAT élevé (Tableau 40). En revanche, si les céréales et les AA de synthèse sont relativement bon marché, la teneur en MAT diminue. Ainsi, dans les contextes 4 et 5, les rejets azotés sont réduits de 5% par rapport à ceux estimés dans le contexte 3 (données non présentées).



## CONCLUSION

Cette étude montre que l'expression du potentiel de croissance à l'échelle d'une population nécessite des apports en AA très élevés. En accord avec Morel *et al.* (2012), l'optimum économique de formulation se situe cependant à un niveau d'apport en AA moins élevé quand une même stratégie alimentaire est appliquée à l'ensemble de la population ; soit, selon le contexte de prix des matières premières, un apport supérieur de 15 à 25% au besoin moyen. Toutefois, les choix de formulation doivent également intégrer des considérations environnementales. Or, chaque augmentation des apports en AA appliquée à l'ensemble de la population est associée à des rejets azotés accrus. L'utilisation d'une contrainte de formulation sur la teneur en MAT permet de limiter cette augmentation, mais pénalise alors l'expression du potentiel de croissance et le gain de marge.

L'alternative consistant à individualiser les apports a été envisagée dans une perspective d'alimentation de précision (Hauschild *et al.*, 2010). Elle permet de maximiser les performances de la population tout en limitant les rejets azotés. Actuellement, l'application de cette approche en élevage requiert l'élaboration d'interfaces opérationnelles, dont les coûts spécifiques de mise en œuvre et de fonctionnement devront être évalués. Une conduite alimentaire plus simple, de type biphasé, avec des niveaux d'apport en AA raisonnés sur les besoins du profil moyen au début de chaque phase, permet d'obtenir des résultats comparables à ceux obtenus en stratégie multiphasé (non individualisée) avec une marge de sécurité de 10%. Ils restent néanmoins en-deçà de l'optimum mentionné ci-dessus sauf quand la conduite biphasé est associée à une alimentation rationnée. L'étude met alors en évidence l'influence majeure du plan d'alimentation tant sur la marge par porc (ainsi que modélisé par Morel *et al.*, 2012), que sur la maîtrise de la variabilité du poids et sur les rejets azotés.

Dans une logique de développement durable de la production porcine, l'épargne des sources de protéines et la diminution des rejets azotés sont deux enjeux majeurs. Des hypothèses devront être établies pour convertir la réduction des rejets d'azote en coûts ou profits additionnels pour l'éleveur selon les conditions d'exploitation et l'environnement territorial : surface d'épandage, capacité de traitement des déjections, capacité de production... tout en respectant les nombreuses contraintes liées à la réglementation, à la structure des installations de production, aux équilibres entre rejets azotés et phosphorés.



#### **4 ETAPE 3 - EVALUATION *IN VIVO* DES RÉSULTATS *IN SILICO***



## INTRODUCTION

Cette partie de la thèse consiste à comparer certains des résultats obtenus par simulation dans la partie précédente à ceux obtenus *in vivo* dans les mêmes conditions d'alimentation. Du fait de la dimension des installations expérimentales disponibles, seulement deux stratégies alimentaires ont pu être étudiées simultanément. Compte tenu des résultats présentés dans le chapitre précédent, les conduites AL et +27g avec un plafond distinct pour les femelles et les mâles castrés (Tableau 41) ont été retenues.

## 4.1 MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 4.1.1 Dispositif expérimental

L'effet de la conduite alimentaire sur les performances moyennes et l'hétérogénéité du poids est étudié sur une bande de porcs de l'entrée en engraissement à l'abattage (entre 28 et 113 kg de PV). Les animaux sont issus d'un croisement (LWxLD)x(LWxPP). L'essai est mené à la station expérimentale de l'IFIP à Romillé. Au début de l'essai, les animaux sont répartis entre deux modalités de logement : en cases collectives de six porcs de même sexe (essai 1, n=168) ou en loges individuelles (essai 2, n=48).

L'essai 1 a pour objectif de caractériser *in vivo* les performances de croissance moyennes et leur hétérogénéité et de les comparer aux résultats obtenus par simulation. L'essai 2 permettra d'évaluer l'hétérogénéité quand aucune compétition entre animaux ne s'exerce mais il est mis en place initialement afin de pouvoir suivre l'évolution de la composition corporelle des animaux au cours de la période de croissance par un tomographe, mesure nécessitant d'anesthésier les animaux. L'essai 2 démarre après une semaine d'adaptation aux conditions d'élevage, durant laquelle les porcs sont alimentés à volonté.

Des blocs de quatre cases (essai 1) ou quatre porcs (essai 2) sont constitués suivant un dispositif factoriel 2x2, entre les deux conduites alimentaires et les deux sexes. La répartition se fait sur la base du PV mesuré à 67 jours d'âge et de l'origine de portée, l'objectif étant d'étudier des frères et sœurs, ou demi-frères et demi-sœurs dans les deux lots.

**Tableau 43 - Composition et valeur nutritionnelle (sur la base de l'aliment frais) des aliments croissance et finition utilisés dans les deux essais**

Aliment	Croissance	Finition
Taux d'incorporation, g/kg		
Blé	603,0	544,8
Orge	150,0	264,0
Son de blé tendre	40,0	80,0
Tourteau de soja 48	145,6	55,0
Lysine liquide 50%	6,0	6,0
Thréonine	1,3	1,2
Méthio hydroxy analogue	0,7	0,5
Mélasse de canne	20,0	20,0
Huile de colza	10,7	10,0
Carbonate de calcium	9,7	9,5
Complément oligo-vitamines	4,0	4,0
Phosphate bicalcique	4,9	0,9
Phytase microbienne	0,1	0,1
Sel	4,0	4,0
Caractéristiques nutritionnelles <sup>1</sup>		
Matière sèche, g/kg	864	864
Matières azotées totales, g/kg	159	127
Lysine totale, g/kg	9,8	7,7
Lysine digestible (LYSd), g/kg	8,8	6,8
Méthionine digestible, g/kg	2,7	2,1
M+C digestibles, g/kg	5,4	4,5
Thréonine digestible, g/kg	5,7	4,5
Tryptophane digestible, g/kg	1,7	1,3
Isoleucine digestible, g/kg	5,4	4,0
Valine digestible, g/kg	6,2	4,8
Leucine digestible, g/kg	9,5	7,3
Histidine digestible, g/kg	3,4	2,6
Cellulose brute Weende, g/kg	32	33
Amidon, g/kg	451	483
Matières minérales totales, g/kg	48	42
Calcium, g/kg	7,2	5,9
Phosphore total, g/kg	4,6	4,0
Phosphore digestible (granulé), g/kg	2,5	2,0
Matières grasses totales, g/kg	27	27
Energie digestible, kcal/kg	3223	3155
Energie nette (EN), MJ/kg	9,75	9,75
LYSd / EN, g/MJ EN	0,9	0,7

1. Valeurs calculées lors de la formulation à partir des valeurs nutritionnelles des matières premières estimées à partir de leurs caractéristiques chimiques avec le logiciel Evapig (2008).

## **4.1.2 Conduite des animaux**

### *4.1.2.1 Conduite alimentaire*

Les plans d'alimentation pratiqués ont été élaborés à partir des simulations réalisées dans la partie 2 (voir § 3) à partir d'une population virtuelle de 2000 porcs issus du même croisement. Deux conduites alimentaires différentes sont comparées :

- AL : les animaux sont alimentés à volonté,
- RA : les animaux sont rationnés. Ils reçoivent à l'entrée en engraissement 1,12 kg/porc/jour (soit 4% du poids moyen), puis la ration est augmentée de 27 g/jour/porc jusqu'à un maximum alloué de 2,40 kg/jour/porc pour les femelles et 2,70 kg/jour/porc pour les mâles castrés.

Les porcs sont nourris avec un aliment croissance jusqu'à ce que le poids moyen de la case (essai 1) ou le poids moyen du porc (essai 2) atteigne 65 kg, puis un aliment finition est utilisé jusqu'à l'abattage. Les deux aliments, présentés sous forme de granulés, ont une valeur énergétique de 9,75 MJ EN/kg et apportent respectivement 0,9 et 0,7 g de lysine digestible par MJ EN (Tableau 43). Les mêmes aliments sont utilisés pour les deux essais. Pour les animaux rationnés, l'aliment est distribué en un repas le matin. L'eau est disponible à volonté.

### *4.1.2.2 Logement*

Dans l'essai 1, les porcs sont répartis entre deux salles de seize cases. Chaque case (2,50 × 2,00 m) est équipée d'un abreuvoir automatique et d'un nourrisseur biplace. Dans l'essai 2, les porcs sont répartis entre deux salles de 24 cases (1,60 × 0,90 m). Chaque case est équipée d'un abreuvoir automatique et d'un nourrisseur. Les animaux sont élevés sur caillebotis béton. La température ambiante est comprise entre 22 et 24°C.

### *4.1.2.3 Modalités de départ pour l'abattoir*

Les animaux partent à l'abattoir en deux groupes par essai et par lot. Ils sont abattus après avoir subi un jeûne de 16 h. La date de départ est choisie de façon à obtenir un poids d'abattage comparable entre les deux plans d'alimentation, proche de 112 kg de PV, les animaux de l'essai 1 partant par case entière. Cette date théorique est estimée à partir des pesées réalisées durant l'engraissement. Les deux départs ont lieu à deux semaines d'intervalle.



### 4.1.3 Mesures

#### 4.1.3.1 Mesures réalisées sur tous les animaux

Tous les animaux sont pesés la veille de l'entrée en engraissement, puis toutes les deux semaines jusqu'à atteindre un poids moyen de 100 kg dans la case, puis toutes les semaines jusqu'à l'abattage, et une dernière fois le matin du départ pour l'abattoir. Ils sont mis à jeun la veille au soir, sont pesés le matin à 8h00 et reçoivent ensuite leur ration ou une demi-ration (lors du départ pour l'abattoir). Afin de suivre la consommation de chaque case durant l'engraissement, la quantité d'aliment distribuée est mesurée chaque semaine. Pour cela, les trémies d'aliment sont vidées la veille au soir de la pesée, ou le matin s'il n'y a pas de pesée. La différence entre apports et refus permet d'estimer la consommation de la case sur la période. Après l'abattage, le poids de carcasse chaud et les épaisseurs de gras G2 et de muscle M2 sont relevés.

#### 4.1.3.2 Mesures réalisées uniquement sur les porcs en loges individuelles (essai 2)

A trois reprises durant l'essai, les porcs subissent une tomographie aux rayons X, à l'aide du scanner dont dispose l'IFIP. Cette technologie permet d'observer *in vivo* la composition corporelle et la mise en place des tissus musculaires et adipeux durant la croissance. Les porcs sont mis à jeun bloc par bloc, 24 h avant l'examen. L'accès à l'eau est coupé rangée par rangée de la salle, six heures avant l'examen du premier porc de la rangée, et est rétabli une fois que tous les porcs de la rangée ont été examinés. Une anesthésie générale est pratiquée selon le protocole mis au point par Monziols et Hemonic (2011). Une injection intramusculaire simultanée d'un anesthésiant et d'un myorelaxant est réalisée quelques minutes avant l'examen, qui dure environ dix minutes, après quoi les animaux sont replacés dans leur case. Après le premier examen, 500 g d'aliment sont distribués dès que les porcs sont suffisamment réveillés pour manger ; à l'issue des examens suivants, les animaux reçoivent leur ration complète. Ces mesures sont réalisées au démarrage de l'essai, puis quatre et huit semaines (salle 1) ou trois et sept semaines (salle 2) après le début de l'essai. Le poids moyen au démarrage de l'essai étant différent entre les deux salles (respectivement 27,6 et 34,9 kg pour les salles 1 et 2), ce décalage d'une semaine permet de réaliser l'examen sur des animaux de poids comparable. Après l'abattage, les deux demi-carcasses de chaque porc avec la tête sont scannées de la même manière.



#### **4.1.4 Calculs et traitement statistique des données**

Les performances de croissance sont calculées et analysées de façon identique à celle décrite dans le paragraphe 2.1.8.3. Pour les données moyennes par case (CMJ et IC), dans le cas où un animal est mort au cours de la période, il est pris en compte proportionnellement au temps passé en essai par rapport à la durée théorique. Son gain de poids est pris en compte pour calculer l'IC moyen par case. Les performances sont calculées sur différentes périodes : de l'entrée en engraissement jusqu'à la date de changement d'aliment (vers 65 kg en moyenne dans la case), de cette date jusqu'au premier départ pour l'abattoir ou jusqu'à l'abattage, de l'entrée en engraissement jusqu'au premier départ pour l'abattoir ou jusqu'à l'abattage. La date de premier départ pour l'abattoir est distincte pour les deux lots, dans les deux essais. Le  $CV_{PV}$  est calculé à partir des poids individuels dans chaque essai à chaque pesée. Le CV de la CMJ est calculé à partir des CMJ moyennes par case sur les cinq périodes mentionnées ci-dessus.

Les résultats obtenus dans l'essai 1 et 2 sont analysés séparément, compte tenu des conditions d'élevage différentes et des protocoles de mesure appliqués. L'unité expérimentale est la case pour l'essai 1 et l'analyse des performances zootechniques et économiques est réalisée après calcul des critères moyens par case. Dans l'essai 2, l'unité expérimentale est le porc. Dans un premier temps, une analyse de variance est réalisée à partir des données zootechniques (PROC MIXED ; SAS, 2008). L'homogénéité des variances est comparée (PROC GLM / Hovtest ; SAS, 2008). Les effets du plan d'alimentation (PA, RA vs AL), du sexe (S, femelle vs mâle castré), de l'interaction PA×S et du bloc sont étudiés par analyse de variance (PROC MIXED ; SAS, 2008).

## **4.2 RÉSULTATS**

Dans l'essai 1, les pertes s'élèvent à quatre porcs, dont deux femelles du lot AL élevées dans la même case lors de la première semaine d'essai, un mâle castré du lot AL et un mâle castré du lot RA en fin d'essai. Dans l'essai 2, les données d'abattoir ne sont pas disponibles pour une femelle du lot AL.

L'interaction entre le plan d'alimentation et le sexe n'est pas significative sur la plupart des critères, à l'exception du CV de la CMJ dans les deux essais, et de l'IC en fin d'engraissement dans l'essai 2.

**Tableau 44 - Evolution du coefficient de variation (CV) de l'ingéré moyen selon le plan d'alimentation**

	Plan d'alimentation		P-values <sup>1</sup>		
	AL	RA	PA	S	PA×S
<b>ESSAI 1</b>					
Nombre de cases	14	14			
CV, %					
Avant 65 kg	4,9	2,8	0,04	0,16	0,20
A partir de 65 kg					
<i>Jusqu'au 1<sup>er</sup> départ<sup>2</sup></i>	7,3	6,1	0,18	0,36	0,06
<i>Jusqu'à l'abattage</i>	6,4	6,4	0,64	0,33	0,11
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ <sup>2</sup>	7,0	4,1	<0,01	0,52	0,02
Jusqu'à l'abattage	5,9	3,9	<0,01	0,52	0,03
<b>ESSAI 2</b>					
Nombre de porcs	24	24			
CV <sub>PV</sub> , %					
Avant 65 kg	9,2	4,0	<0,01	0,23	<0,01
A partir de 65 kg					
<i>Jusqu'au 1<sup>er</sup> départ<sup>2</sup></i>	10,6	4,7	<0,01	0,48	0,03
<i>Jusqu'à l'abattage</i>	11,4	4,5	<0,01	0,29	0,03
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ <sup>2</sup>	10,3	3,3	<0,01	0,51	0,03
Jusqu'à l'abattage	9,6	3,1	<0,01	0,29	<0,01

1. Test de l'homogénéité de la variance (Proc GLM / hovtest, SAS) selon le critère considéré. PA : plan d'alimentation, S : type sexuel, ou interaction PA×S.

2. La date de 1<sup>er</sup> départ est différente pour les deux conduites alimentaires.

**Tableau 45 - Evolution du coefficient de variation (CV) du poids vif au sein des lots selon le plan d'alimentation**

	Plan d'alimentation		P-values <sup>1</sup>		
	AL	RA	PA	S	PA×S
<b>ESSAI 1</b>					
Nombre de porcs	81	83			
CV, %					
Entrée en engraissement	13,5	11,8	0,23	0,70	0,61
Au changement d'aliment	7,3	6,7	0,58	0,14	0,43
Au 1 <sup>er</sup> départ <sup>2</sup>	8,8	6,8	0,02	0,40	0,09
A l'abattage	7,4	6,9	0,49	0,21	0,55
<b>Essai 2</b>					
Nombre de porcs	24	24			
CV, %					
Entrée en engraissement	15,3	14,4	0,78	0,71	0,97
Au changement d'aliment	3,5	2,5	0,05	0,75	0,25
Au 1 <sup>er</sup> départ <sup>2</sup>	6,5	4,8	0,12	0,15	0,03
A l'abattage	4,8	4,0	0,28	0,18	0,29

1. Test de l'homogénéité de la variance (Proc GLM / hovtest, SAS) selon le critère considéré : PA : plan d'alimentation, S : type sexuel, ou interaction PA×S.

2. La date de 1<sup>er</sup> départ est différente pour les deux conduites alimentaires.

## **4.2.1 Hétérogénéité de la consommation d'aliment et du poids**

### ***Essai 1***

Avant 65 kg ainsi qu'en moyenne jusqu'au premier départ et jusqu'à l'abattage, la CMJ par case est plus homogène pour le lot RA que pour le lot AL (respectivement, CV de 4 contre 6% sur l'ensemble de l'essai,  $P < 0,01$ , Tableau 44). L'interaction PA×S est significative sur le CV de la CMJ, en relation notamment avec les écarts de plafond de rationnement appliqués.

A l'entrée en engraissement et au changement d'aliment, le CV du PV est en moyenne de 12 et 7% respectivement pour les deux lots ( $P > 0,10$  ; Tableau 45). Il diminue de 5 points entre l'entrée en engraissement et le premier départ respectivement de 14 à 9% chez les porcs AL et de 12 à 7% chez les porcs RA. Au premier départ, il est significativement plus faible pour le lot RA ( $P = 0,02$ ), alors que la différence avec le lot AL n'était pas significative à l'entrée en engraissement.

### ***Essai 2***

Sur toutes les périodes étudiées, le CV de la CMJ individuelle est plus élevé chez les porcs AL que chez les porcs RA (respectivement 10 contre 3% sur l'ensemble de l'essai,  $P < 0,01$  ; Tableau 44). Le CV du PV indique que les porcs du lot RA sont plus homogènes que ceux du lot AL au changement d'aliment ( $P = 0,05$ ), mais il n'y a pas de différence significative pour les autres périodes (Tableau 45). Le CV du PV diminue entre le début de l'essai et le premier départ, respectivement de 15 à 7% chez les porcs AL et de 14 à 5% chez les porcs RA.

## **4.2.2 Performances zootechniques moyennes**

### ***Essai 1***

Jusqu'au premier départ, la CMJ hebdomadaire de 14% des porcs AL et 8% des porcs RA reste inférieure au plafond de rationnement retenu pour le lot RA. Cependant, pendant les différentes périodes considérées dans l'essai, la CMJ par case est significativement plus élevée chez les porcs AL que chez les porcs RA (2,35 vs 2,17 kg/j en moyenne jusqu'à l'abattage (Tableau 46). A partir d'âges et PV initiaux similaires pour les deux lots (en moyenne 28,5 kg à 68 jours), les porcs AL mettent moins de temps à atteindre le PV

**Tableau 46 - Performances de croissance et d'abattage moyennes des porcs de l'essai 1 selon la conduite alimentaire**

	Plan d'alimentation		ETM	P-values <sup>1</sup>		
	AL	RA		PA	S	PA×S
Nombre de cases	14	14				
<b>Age, j</b>						
Entrée en engraissement	68,0	68,0	0,2	0,59	0,83	0,98
Au 1 <sup>er</sup> départ	161,0	168,0	0,2	<0,01	0,83	0,98
Abattage	164,4	172,3	2,1	<0,01	0,02	0,62
<b>Poids, kg</b>						
Entrée en engraissement	28,3	28,6	1,3	0,36	0,02	0,76
Au 1 <sup>er</sup> départ	110,2	109,5	1,8	0,63	0,04	0,82
Abattage	112,9	112,8	1,1	0,90	0,90	0,82
<b>CMJ, kg/j</b>						
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ	2,33	2,16	0,04	<0,01	<0,01	0,92
Jusqu'à l'abattage	2,35	2,17	0,03	<0,01	<0,01	0,79
<b>GMQ, g/j</b>						
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ	880	809	13	<0,01	0,05	0,90
Jusqu'à l'abattage	879	808	13	<0,01	0,03	0,88
<b>IC, kg/kg</b>						
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ	2,62	2,64	0,04	0,39	<0,01	0,88
Jusqu'à l'abattage	2,65	2,67	0,03	0,60	0,02	0,73
<b>Caractéristiques de carcasse</b>						
Poids chaud, kg	90,8	89,7	0,9	0,24	0,83	0,46
Rendement, % <sup>2</sup>	80,4	79,6	0,4	0,04	0,86	0,28
G2, mm <sup>2</sup>	14,3	13,6	0,7	0,10	<0,01	0,70
M2, mm <sup>2</sup>	60,5	58,4	0,9	0,05	0,23	0,82
TMP <sup>2</sup>	60,4	60,7	0,5	0,40	0,01	0,77

1. Analyse de la variance (Proc MIXED, SAS) avec en effets principaux le plan d'alimentation (PA), le sexe (S), l'interaction PA×S et le bloc, et la case en unité expérimentale. ETM : erreur type moyenne.

2. Analyse de variance avec le poids de carcasse chaude en covariable.

d'abattage vers 112,9 kg (-7,9 jours,  $P < 0,01$ ). Ainsi, le premier départ pour l'abattoir a lieu à l'âge moyen de 164 jours pour les porcs du lot AL contre 172 jours pour ceux du lot RA. Dès la période de croissance (avant 65 kg), le GMQ des porcs AL est significativement plus élevé que celui des porcs RA (Annexe 15).

Cette différence reste significative pendant tout l'essai (respectivement 879 contre 808 g/j jusqu'à l'abattage,  $P < 0,01$ ). L'IC est plus faible pour le lot RA que pour le lot AL après 65 kg (Annexe 15,  $P < 0,04$ ), mais il n'est pas significativement influencé par le lot en croissance ou sur l'ensemble de l'engraissement (en moyenne 2,66 pour les deux lots).

## **Essai 2**

En moyenne, seuls 3% des porcs RA et 8% des porcs AL ont une CMJ inférieure au plafond de rationnement prévu dans la conduite RA. La CMJ reste significativement plus élevée chez les porcs AL que chez les porcs RA, quelle que soit la période considérée (respectivement 2,64 contre 2,17 kg/j sur l'ensemble de l'essai. A partir des mêmes âges et PV initiaux (31,3 kg en moyenne à 75 jours), les porcs AL mettent moins longtemps pour atteindre le poids d'abattage de 113,1 kg (-16,6 jours,  $P < 0,01$ , Tableau 47). Dès le début de l'essai, le GMQ est significativement plus élevé chez les porcs AL que chez les porcs RA, et il le reste pendant tout l'essai (992 contre 814 g/j,  $P < 0,01$ ). Quelle que soit la période considérée, l'IC n'est pas significativement influencé par le plan d'alimentation, et atteint 2,67 en moyenne sur toute la durée de l'essai.

La proportion de porcs dont la CMJ est inférieure à 5% près au plafond de rationnement est semblable pour les deux sexes. Les femelles sont plus légères de 1,5 kg par rapport aux mâles castrés au démarrage de l'essai ( $P < 0,01$ ), et mettent plus longtemps à atteindre le poids d'abattage (+6,4 jours en moyenne,  $P = 0,05$ ). A partir de 65 kg, les mâles castrés consomment significativement plus d'aliment que les femelles, mais cette différence est plus marquée chez les porcs AL (+360 vs +220 g/j entre 65 kg et l'abattage chez les porcs RA, Annexe 16). Dès le début de l'essai, le GMQ des mâles castrés est significativement plus élevé que celui des femelles (+34 g/j chez les porcs AL, +68 g/j chez les porcs RA sur l'ensemble de l'essai). L'IC n'est pas influencé par le sexe quelle que soit la période considérée. En revanche, l'interaction PA×S est significative en période de finition et jusqu'à l'abattage (une tendance est observée jusqu'au premier départ,  $P = 0,11$ ). L'IC est alors moins élevé chez les femelles que chez les mâles castrés AL (2,60 contre 2,74 respectivement sur l'ensemble de l'essai), tandis que, chez les porcs RA, l'IC des femelles est plus élevé que celui des mâles castrés (2,71 contre 2,63 sur l'ensemble de l'essai).

**Tableau 47 - Performances de croissance et d'abattage moyennes des porcs de l'essai 2 selon la conduite alimentaire**

	Plan d'alimentation		ETM	P-values <sup>1</sup>		
	AL	RA		PA	S	PA×S
Nombre de porcs	24	24				
<b>Age, j</b>						
Début d'engraissement	75,5	75,4	0,3	0,50	0,82	0,82
Au 1 <sup>er</sup> départ	152,0	166,9	1,1	<0,01	0,82	0,82
Abattage	158,9	175,5	1,0	<0,01	<0,01	0,96
<b>Poids, kg</b>						
Entrée en engraissement	31,0	31,5	1,3	0,15	<0,01	0,94
Au 1 <sup>er</sup> départ	107,5	107,0	1,6	0,73	<0,01	0,38
Abattage	113,4	112,8	1,4	0,68	0,68	0,09
<b>CMJ, kg/j</b>						
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ	2,52	2,12	0,05	<0,01	<0,01	0,41
Jusqu'à l'abattage	2,64	2,17	0,05	<0,01	<0,01	0,19
<b>GMQ, g/j</b>						
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ	999	826	17	<0,01	<0,01	0,54
Jusqu'à l'abattage	992	814	18	<0,01	<0,01	0,31
<b>IC, kg/kg</b>						
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ	2,63	2,57	0,05	0,10	0,20	0,11
Jusqu'à l'abattage	2,67	2,67	0,05	0,99	0,49	0,01
<b>Caractéristiques de carcasse</b>						
Poids chaud, kg	90,8	90,8	1,1	0,99	0,94	0,19
Rendement, % <sup>2</sup>	80,0	80,5	0,3	0,09	0,21	0,06
G2, mm <sup>2</sup>	16,4	14,2	1,1	0,05	0,04	0,31
M2, mm <sup>2</sup>	59,1	57,7	1,6	0,35	0,37	0,95
TMP <sup>2</sup>	58,9	60,2	0,9	0,13	0,03	0,40

1. Analyse de la variance (Proc MIXED, SAS) avec en effets principaux le plan d'alimentation (PA), le sexe (S), l'interaction PA×S et le bloc, et la case en unité expérimentale. ETM : erreur type moyenne.

2. Analyse de variance avec le poids de carcasse chaude en covariable.

### **4.2.3 Caractéristiques de carcasse**

#### ***Essai 1***

Le rendement de carcasse est plus élevé pour les porcs du lot AL que ceux du lot RA (+0,8 point,  $P = 0,04$  ; Tableau 46). L'épaisseur de muscle M2 a tendance à être plus élevée pour le lot AL (+2,1 mm,  $P = 0,05$ ). Néanmoins, compte-tenu de la valeur de G2 associée (+0,7,  $P = 0,10$ ), le TMP n'est pas significativement influencé par le lot et atteint 60,6% en moyenne. Le sexe influence l'épaisseur de gras G2, qui est plus faible chez les femelles que chez les mâles castrés (-1 mm,  $P = 0,01$ , Annexe 17). Le TMP des femelles est plus élevé que celui des mâles castrés (+1 point,  $P < 0,01$ ), quel que soit le lot.

#### ***Essai 2***

Le rendement de carcasse a tendance à être plus élevé pour le lot RA (+0,5 point,  $P = 0,09$ , Tableau 47). L'épaisseur de gras G2 est influencée par le plan d'alimentation et a tendance à être plus élevée pour le lot AL que pour le lot RA (+2,2 mm,  $P = 0,05$ ), ce n'est pas le cas pour l'épaisseur de muscle M2 (+ 0,35). Le TMP ne diffère pas significativement entre les deux lots et atteint 60,1% en moyenne.

L'épaisseur de gras G2 des mâles castrés est plus élevée que celle des femelles, en particulier chez les porcs AL (+3,5 et +1,3 mm respectivement chez les porcs AL et RA,  $P = 0,04$ ). Il n'y a pas de différence selon le sexe concernant l'épaisseur de muscle M2. Malgré tout, le TMP des femelles est plus élevé que celui des mâles castrés (+2,6 et +1,1% respectivement chez les porcs AL et RA,  $P = 0,03$ ).

## **DISCUSSION**

### *Performances de croissance moyennes*

Les conduites alimentaires étudiées dans les deux essais ont été établies à partir de simulations réalisées dans l'étape 2 à partir de porcs du même type de croisement, élevés en groupes et alimentés à volonté. Pour une même CMJ, les performances zootechniques (GMQ et IC moyens) obtenues en condition d'alimentation rationnée (lot RA) dans les deux essais sont similaires à celles obtenues par simulation (Tableau 48). Les performances obtenues chez les porcs alimentés à volonté de l'essai 1 présentent un écart inférieur à 5% avec les valeurs simulées. La taille de groupe deux fois plus petite (6 vs 12 dans l'étape 1)

**Tableau 48 - Comparaison des résultats obtenus *in vivo* avec ceux d'une simulation réalisée sous InraPorc**

Lot Source	AL			RA		
	Essai 1	Essai 2	Simulation <sup>1</sup>	Essai 1	Essai 2	Simulation <sup>1</sup>
Age, jours						
Au 1 <sup>er</sup> départ	161	152	159	168	167	169
A l'abattage	164	159	165	172	176	174
Poids vif, kg						
Au 1 <sup>er</sup> départ	110,2	107,5	110,6	109,5	107,0	112,6
A l'abattage	112,9	113,4	115,0	112,8	112,8	115,3
CV du PV, %						
Au 1 <sup>er</sup> départ	8,8	6,5	8,3	6,8	4,8	5,7
A l'abattage	7,4	4,8	5,4	6,9	4,0	3,5
GMQ, g/j	878	992	895	808	814	826
CMJ, kg/jour	2,35	2,64	2,39	2,17	2,17	2,18
IC, kg/kg	2,65	2,67	2,67	2,67	2,67	2,65
TMP	60,4	58,8	56,5	60,7	60,2	57,7

<sup>1</sup>D'après les résultats de l'étape 2. Lors des simulations, les performances de 2000 porcs sont modélisées jusqu'à l'abattage, réalisé en trois départs à sept jours d'intervalle.

**Tableau 49 - Performances zootechniques moyennes de porcs élevés en case collective de six animaux ou en loge individuelle (Quiniou *et al.*, 2013)**

Type de logement	Case collective	Loge individuelle
Nombre de porcs	30	12
Poids moyen au 1 <sup>er</sup> départ, kg	120,5	136,1
CV du poids au 1 <sup>er</sup> départ, %	6,8	9,0
CMJ, kg/j	2,41	2,78
GMQ, g/j	1069	1223
IC, kg/kg	2,26	2,24

ne contribue probablement pas à cette différence. D'après la littérature, une CMJ plus élevée pouvait être attendue avec un groupe de 6 (vs 12, Figure 16) alors que cela n'a pas été le cas (2,35 vs 2,39 kg/j simulé). Les résultats *in vivo* permettent donc de valider les résultats moyens obtenus par simulations.

Les porcs des essais 1 et 2 étant soumis à des protocoles de mesure différents, l'incidence du mode de logement sur les performances n'a pas été testée statistiquement. Néanmoins, pour une même CMJ dans les deux essais, les porcs rationnés présentent des performances similaires en termes de GMQ et d'IC. Si les différentes conditions de logement sont éventuellement associées à des niveaux d'activité physique différents, ces écarts ne semblent donc pas suffisants pour modifier l'utilisation de l'énergie (part disponible pour la croissance) par les animaux

Même sans analyse statistique, les résultats indiquent un écart de CMJ très important entre les porcs alimentés à volonté dans les essais 1 et 2. Ainsi, la CMJ des porcs alimentés à volonté est plus élevée de 300 g/j en moyenne dans l'essai 2 (+240 chez les femelles et +340 g/j chez les mâles castrés) par rapport à celle obtenue dans l'essai 1 ou par simulation. Une CMJ plus élevée chez des porcs élevés en loges individuelles, avec contacts visuels et auditifs avec leurs congénères dans le cas présent, a également été observée chez des mâles entiers (Quiniou *et al.*, 2013 ; Tableau 49). Cet écart s'explique probablement par l'absence de compétition alimentaire. Celle-ci se met en place dans les cases collectives de porcs, qu'ils soient rationnés ou non, et entraîne une diminution de la consommation des animaux (Wellock *et al.*, 2004a). Ainsi, alors que la population virtuelle est représentative de porcs logés en groupe, il est logique que la CMJ simulée soit inférieure à celle observée *in vivo* en loge individuelle. La CMJ étant le moteur de la croissance chez le porc, le GMQ est lui aussi plus élevé dans l'essai 2.

Comparativement aux porcs du lot AL de l'essai 1, la CMJ plus élevée des porcs AL de l'essai 2 n'entraîne pas de dégradation de l'IC, mais est associée à un GMQ plus élevé. De même, la CMJ plus élevée des porcs du lot AL par rapport aux porcs du lot RA, observée dans chaque essai, modifie surtout le GMQ et non l'IC. En d'autres termes, seule la quantité de gain de poids est modifiée, pas sa composition. Ceci est observé lorsque l'apport énergétique reste inférieur ou égal à celui permettant d'atteindre le potentiel de dépôt maximum de protéines (PDmax). Dans ce cas, une variation du niveau alimentaire entraîne une variation du dépôt de lipides mais aussi du dépôt de protéines ; l'IC et le TMP restent stables, tandis que le GMQ varie (Quiniou *et al.*, 1999). La réponse observée dans les deux



essais est cependant spécifique du type de porcs étudiés (Quiniou *et al.*, 1999). En effet, avec ces deux niveaux d'apports énergétiques, une amélioration de l'IC et du TMP serait attendue après rationnement d'un type de porcs plus gras que celui étudié.

Il est intéressant ici de mettre en parallèle la similitude observée entre les performances prédites et réelles des porcs RA. En d'autres termes, pour un même niveau d'apport nutritionnel, les porcs virtuels et *in vivo* ont réalisé le même niveau de performances. Pourtant, lors des simulations, les 2000 profils de porcs virtuels ont été paramétrés avec la même valeur de  $PV_{PDmax}$ , poids à partir duquel la CMJ ne limite plus le potentiel de dépôt protéique.

En l'absence d'information sur ce critère, qui aurait nécessité des mesures sur des porcs rationnés pendant l'étape 1 de la thèse,  $PV_{PDmax}$  a été fixé à 70 kg, valeur par défaut utilisée par InraPorc sur la base des données disponibles dans la littérature (van Milgen *et al.*, 2008). Lors des simulations, il apparaît que cette valeur est suffisamment tardive pour ne pas entraîner une amélioration de l'IC et de la composition du gain de poids lorsque les porcs sont rationnés. Les données *in vivo* ne permettent pas de confirmer cette valeur de  $PV_{PDmax}$ . Elles ne permettent pas non plus de la caractériser, tant en ce qui concerne la valeur moyenne pour la population que sa variabilité. Les valeurs d'IC et de TMP obtenues chez les porcs AL et RA vont cependant dans le sens d'une valeur de  $PV_{PDmax}$  élevée, qui conserve au porc une relation moyenne linéaire entre le dépôt de protéines moyen et l'énergie ingérée, sans influence notable d'un éventuel plateau sur les performances moyennes.

Les valeurs de TMP obtenues *in vivo* sont différentes de celles issues du modèle. La valeur prédite de taux de muscle de la carcasse s'appuie sur une répartition théorique, mais peu précise, des masses de protéines et de lipides entre les compartiments tissulaires. Les mesures réalisées au tomographe pendant l'essai 2, mais non disponibles à ce jour, permettront d'affiner cette prédiction dans un avenir proche.

#### *Variabilité de la CMJ*

Dans les deux essais, en toute logique, le CV de la CMJ est plus faible à partir du moment où les animaux rationnés atteignent le plafond de rationnement. Dans l'essai 1, les valeurs du CV de l'ingéré sont des moyennes par case, ce qui revient à ignorer et donc minimiser la variabilité entre individus d'un même groupe. Dans les cases collectives, la quantité d'aliment distribuée n'est probablement pas également répartie entre tous les animaux, le comportement alimentaire étant directement influencé par le rang hiérarchique de l'animal



(Levasseur *et al.*, 1996). Il serait donc intéressant de pouvoir mesurer la consommation des porcs au niveau individuel, et de mesurer le CV de la consommation d'aliment au sein d'une même case. De telles observations ont déjà été réalisées dans des conditions d'alimentation à volonté (Labroue *et al.*, 1993 ; 1994), mais sont difficilement réalisables dans le cas où les animaux sont rationnés (Levasseur *et al.*, 1996).

### *Variabilité du PV*

Au démarrage des essais, les cases ont été constituées de façon à regrouper des animaux de poids similaire. O'Connell *et al.* (2005) ont montré que le fait de trier les animaux par poids lors de la constitution des cases d'engraissement, à l'âge de 10 semaines, permet de diminuer le CV du PV intra-case à partir de l'âge de 15 semaines et jusqu'à l'abattage, par rapport à des cases où les porcs sont de poids variés. Ces mêmes auteurs, ainsi que Magowan *et al.* (2009), montrent en revanche qu'un tri réalisé au sevrage, à l'âge de 28 j, ne modifie pas le CV du PV intra-case à l'abattage. Wellock *et al.* (2004b) ont montré par la modélisation que le PV à l'entrée en engraissement (à 60 kg de PV) est le principal vecteur de l'hétérogénéité du PV. En effet, le CV du PV intra-case n'influence pas les performances de croissance des animaux (O'Quinn *et al.*, 2001 ; Brumm *et al.*, 2002). Néanmoins, DeDecker *et al.* (2002) ont montré que le fait de retirer les porcs les plus lourds de la case, une fois qu'ils ont atteint leur poids d'abattage, permet d'améliorer les performances de croissance des porcs restants, sans dégrader leur IC. Ce phénomène n'a pu être étudié dans l'essai 1, puisque les porcs ont été abattus par case entière, même si les cases contenant les porcs les plus lourds ont été abattues en premier.

Dans les deux essais et les deux plans d'alimentation, les animaux sont triés selon leur poids lors du départ pour l'abattoir : selon le PV moyen de case dans l'essai 1 ou le PV individuel dans l'essai 2. Le CV du PV à l'abattage des porcs dont le départ est raisonné individuellement est donc logiquement plus faible qu'au premier départ ou que lorsque le départ se décide par case entière. Ainsi qu'escompté lors des simulations de l'étape 2, le PV au premier départ est plus homogène lorsque les porcs sont rationnés. La maîtrise de la CMJ et de son hétérogénéité est donc une des voies permettant de limiter l'hétérogénéité du PV des animaux. Les valeurs de CV du PV obtenues *in vivo* ou par simulation ne sont pas numériquement identiques (Tableau 48). Toutefois, elles évoluent d'une conduite alimentaire à l'autre dans le même sens. Les simulations indiquent que le CV du PV au premier départ peut être réduit de 2,6 points par le rationnement, tandis que les résultats des essais indiquent une diminution de 2,0 points chez les porcs en groupe et de 1,7 point chez les porcs en loge individuelle. Au premier départ, les simulations estiment correctement le CV du



PV des porcs du lot AL de l'essai 1, mais surestiment celui des porcs du lot AL de l'essai 2. Pourtant, la CMJ de ces derniers est plus variable que dans l'essai 1. Le contraire est observé par Quiniou *et al.* (2013), où le  $CV_{PV}$  de mâles entiers élevés en loge individuelle est plus élevé que celui des porcs élevés en groupe (Tableau 49) En condition d'alimentation rationnée, le  $CV_{PV}$  obtenu par simulation est très proche (intermédiaire) des valeurs obtenues chez les porcs élevés en groupe ou en loge individuelle.

## CONCLUSION

Cette étape permet de confirmer la pertinence des résultats obtenus par simulations lors de l'étape 2 de la thèse. Cette validation concerne les porcs en conditions d'alimentation rationnée et, pour les porcs alimentés à volonté, seulement ceux élevés dans des conditions d'élevage en groupe, similaires à celles dans lesquelles ont été obtenues les données permettant d'élaborer la population virtuelle. De façon indirecte, ces résultats renforcent l'intérêt (la confiance) à accorder aux conclusions obtenues à partir des simulations de l'étape 2 réalisées avec d'autres conduites alimentaires.

La vraisemblance de la population virtuelle utilisée s'appuie sur une caractérisation précise des porcs d'origine, étudiés sur de nombreuses bandes. Elle mériterait cependant d'être évaluée pour des populations virtuelles établies à partir des autres types de croisements étudiés dans l'étape 1 de la thèse, aussi divers que ceux rencontrés en élevage, mais caractérisés avec une précision moindre (une demi-bande par type de croisement).

Enfin, la précision des simulations pour le taux de muscle de la carcasse reste à améliorer. Les données issues de la tomographie obtenues dans l'essai 2 y contribueront.



## **DISCUSSION GÉNÉRALE**



## Introduction

Knap (2000) et Pomar *et al.* (2003) insistent sur le manque de connaissances disponibles sur la covariance des variables d'un modèle afin de pouvoir le rendre stochastique. Le programme de cette thèse est mis en place en réponse à ce constat. Les analyses réalisées aboutissent à une démarche applicable à d'autres conditions d'élevage.

## Méthodes utilisées

Cette étude a été l'occasion de mettre au point une méthode permettant d'appréhender la variabilité. Ainsi que mentionné par Knap (1995), le recueil des données, en qualité et en quantité, est un préalable à ce travail. Or, de tels jeux de données sont rares. La plus grande attention a donc été accordée à l'obtention des bases de données expérimentales de référence utilisées dans la thèse. Ceci a notamment conduit à un travail long et minutieux de vérification des données de PV initial et de CMJ.

Une première difficulté s'est posée cependant dans la mesure où seule une partie des animaux de chaque bande pouvait être étudiée en engraissement. Il était donc nécessaire de quantifier dans quelle mesure la variabilité des porcs choisis pour être étudiés en engraissement était représentative de la variabilité initiale. Outre les contraintes expérimentales (six femelles et six mâles castrés d'un même croisement par case), la mise en lot a été réalisée en intégrant des contraintes qui dépendaient des conditions d'élevage (DAC accessibles seulement pour des porcs de plus de 18 kg de PV) et des normes de conduite sanitaire limitant le nombre de portées d'origine différente dans chaque case. Ces dernières sont également intégrées dans les pratiques d'élevage. Dans ces conditions, le choix des porcs a permis de conserver la distribution des PV pour presque tous les groupes de porcs. La contrainte d'un PV minimal de 18 kg, liée au système d'alimentation, explique la diminution éventuelle du  $CV_{PV}$ .

La mise en lot respectueuse de l'hétérogénéité du PV observée en sortie de post-sevrage ainsi que la vérification et la correction minutieuses des données de CMJ répondent à l'objectif de capter au mieux la variabilité en élevage. En ce sens, l'étude des distributions du PV initial à 65 jours d'âge, seule donnée commune à tous les porcs disponible au début de l'essai, est appropriée. Elle permet de tenir compte des différences de croissance pendant les stades antérieurs (lactation, post-sevrage) qui contribuent aux écarts de PV en sortie de post-sevrage. Pour une mise en lot d'un échantillon de porcs choisis parmi la population en sortie de post-sevrage, un tri manuel des PV peut être réalisé. Une alternative



peut être proposée qui consiste à réaliser des tirages aléatoires de PV. Le nombre de combinaisons possibles rendant impossible leur évaluation exhaustive, un grand nombre de tirages aléatoires a été réalisé pour deux des bandes étudiées. Cette méthode comporte le risque de ne pas évaluer la meilleure combinaison des PV possible. Cependant, le grand nombre de tirages permet d'obtenir des listes de PV qui sont proches de l'objectif, même si la combinaison n'est pas rigoureusement parfaite. Il reste ensuite à choisir parmi les animaux, ceux dont le PV correspond aux valeurs retenues.

La deuxième difficulté rencontrée est inhérente au système d'enregistrement automatique des consommations d'aliment individuelles et quotidiennes tout au long de la période d'engraissement. Ces systèmes peuvent tomber en panne pendant des périodes parfois très courtes qui ne doivent pas conduire à exclure des porcs de la base de données. Une consultation approfondie des annotations portées dans le cahier d'élevage, mentionnant toutes les interventions techniques réalisées sur un DAC donné ou les animaux de la case correspondante (changement de puces électroniques, de jauges de contraintes...), ainsi que les mesures hebdomadaires manuelles d'aliment consommé par case nous ont permis d'éviter la perte d'individus uniquement en raison de dysfonctionnement temporaire du matériel de mesure.

L'utilisation des données quotidiennes d'ingéré elle-même peut se révéler compliquée, du fait de la variation importante de la CMJ d'un jour à l'autre chez un porc donné. Chen *et al.* (2010) insistent d'ailleurs sur ce point et ont choisi de contourner le problème en retenant la CMJ moyenne calculée par semaine. Une autre approche pour traiter une grande quantité de données journalières consiste à se baser sur un critère fixe tel qu'un nombre maximal d'écart-types par rapport à la moyenne pour rejeter certaines données considérées alors comme douteuses. Cette façon de procéder peut paraître suffisante car de telles données extrêmes auraient en réalité peu de chances d'être relevées et sont alors considérées comme des erreurs. Cependant, cette démarche s'applique surtout quand l'étude porte sur des données moyennes. Ainsi, pour des critères moyens établis sur l'ensemble de la période de croissance ( $B_{\text{Gompertz}}$ , PDM), des curseurs ont été placés de façon empirique avant de décider de conserver ou rejeter un profil de la base de données. En revanche, pour les données quotidiennes de CMJ, outre la moyenne, la dispersion autour de celle-ci nous intéresse également. Ainsi, rejeter des données de CMJ pour la simple raison qu'elles ne suivent pas le modèle attendu serait une erreur dans la recherche de variabilité de réponses. Les données de CMJ individuelle, et leur variation d'une journée à l'autre, ont donc été étudiées avec minutie (voir § 2.1.8.1), ce qui a permis de conserver un maximum de profils dans la base de données.



Au total, la base de données complète de profil animaux créée dans le cadre de cette étude est à notre connaissance la plus grande disponible à ce jour avec 1027 porcs dans la base de données de calibrage (et 261 disponibles par ailleurs dans la base de données d'évaluation). En effet, les autres travaux menés sur le sujet s'appuient sur des effectifs de 40 (Pomar *et al.*, 2007), 96 (Schinckel *et al.*, 2003), 141 (Knap *et al.*, 2003), 183 porcs (Strathe, 2009) ou 688 porcs (Chen *et al.*, 2010). Par ailleurs, notre base de données présente l'originalité d'intégrer des porcs de dix croisements différents et de deux sexes, contrairement à celles des études citées précédemment qui intègrent des porcs issus d'une seule race ou croisement et/ou d'un seul type sexuel. Avec un jeu de trois variables ( $B_{\text{Gompertz}}$ , poids de protéines à maturité et le rapport lipides/protéines à maturité), Ferguson *et al.* (1997) estiment que le dispositif nécessaire pour détecter des différences de corrélation (d'origine génétique) entre variables entre populations est lourd et coûteux. D'après ces auteurs, il faudrait en effet plus de 450 animaux par population. Avec 36 porcs par groupe au maximum, 32 groupes et un jeu de cinq variables, nos travaux permettent de détecter des différences significatives de structures de variance-covariance (phénotypiques) entre groupes.

Les types de croisements intégrés dans notre base de données sont identiques à une grande proportion de ceux rencontrés dans les élevages français. Il est donc raisonnable d'envisager un caractère générique à nos résultats. Un bémol pourrait venir du fait que notre dispositif expérimental était organisé avec le verrat LWxPP comme référence intra-bande, alors que le verrat PP est actuellement le plus utilisé en France. Les essais réalisés antérieurement à la station expérimentale de Romillé permettent cependant de minimiser cette critique, les performances entre porcs croisés LWxPP ou PP étant similaires dans la plupart des conditions d'élevage de notre étude (Quiniou *et al.*, 2007).

Les données de PV et de CMJ individuelles de la base de données de calibrage ont permis de caractériser autant de jeux de valeurs permettant de décrire l'évolution du PV et de la CMJ au cours de la période de croissance. L'observation de la covariance entre individus a d'abord été focalisée sur la détermination d'un vecteur de la valeur moyenne des variables et d'une matrice de variance-covariance de ces variables, guidée par des travaux antérieurs (Brossard *et al.*, 2007). Il est apparu que chaque groupe, défini par sa bande d'origine, son sexe et son croisement, présente un vecteur spécifique de valeurs moyennes. En élevage commercial, même si l'obtention des données implique la mise en œuvre de mesures spécifiques (pesée des animaux en milieu de phase de croissance et bilan d'aliment distribué), l'estimation des valeurs des variables selon la bande et le type sexuel peut être

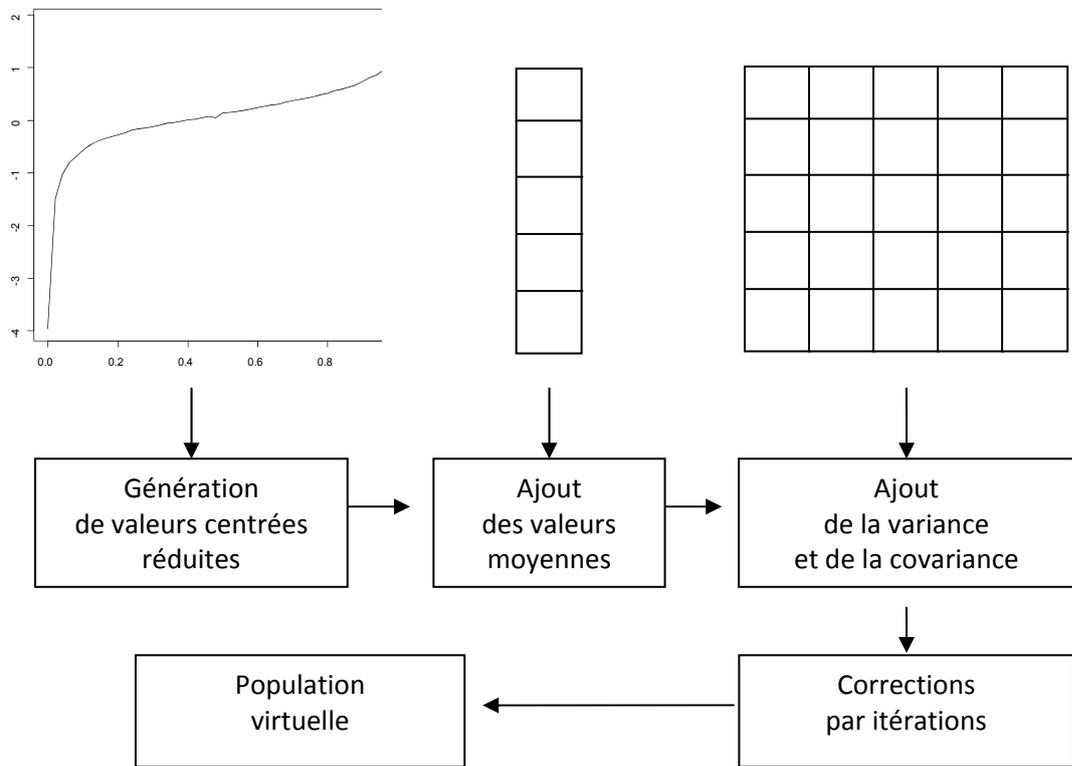
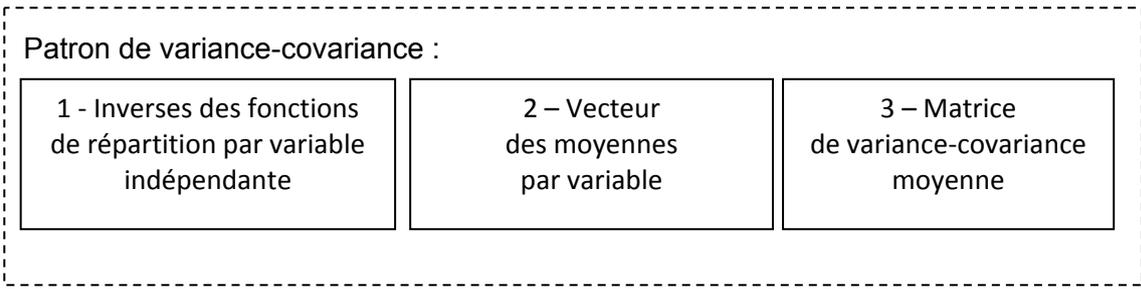


Figure 47 – Composantes du patron de variance-covariance final et démarche suivie pour générer une population virtuelle

envisagée en caractérisant la stratégie alimentaire, les performances de croissance et d'abattage, ce qui permet déjà de fournir des renseignements sur le niveau approximatif des animaux dans leur milieu d'élevage. Cependant, l'effet significatif de la bande et du type sexuel sur les valeurs moyennes des variables implique que celles-ci devraient être estimées pour chaque groupe de porcs. Or, pour simuler l'effet des stratégies alimentaires, il faut partir d'un vecteur moyen des variables déjà caractérisé, la connaissance *a priori* de ces valeurs n'étant pas possible que ce soit en élevage expérimental ou commercial. La qualité des informations utilisées pour déterminer le profil moyen des variables est donc cruciale. A partir de notre jeu de données, il est ainsi probable que le vecteur établi pour les porcs croisés LWxPP à partir d'un grand nombre d'observations obtenues à partir de nombreuses bandes soit plus robuste que ceux établis pour les autres croisements, susceptibles d'être plus marqués par les caractéristiques de la bande pendant laquelle ils ont été étudiés.

Une méthode de calcul de la covariance qui permette de retenir la partie générique de la covariance des variables, et non plus un motif de covariance spécifique d'un groupe étudié, a été élaborée. Elle permet de définir un premier patron de variance-covariance qui se base sur la moyenne prédite des variables pour un groupe donné de porcs et sur la matrice de variance-covariance moyenne telle que calculée à partir des profils de la base de calibrage (voir § 2). La génération de populations virtuelles issues de ce patron a ensuite nécessité l'amélioration de ce patron en y ajoutant les inverses des fonctions de répartition des variables indépendantes étudiées, démarche inédite à notre connaissance. Le fait de chercher à rendre des variables indépendantes n'est pas nouveau. Emmans et Fisher (1986) l'ont notamment fait pour supprimer la dépendance linéaire entre le poids de protéines à maturité et la valeur de  $B_{\text{Gompertz}}$ . En revanche, supprimer toutes les dépendances entre variables en une étape est une démarche innovante. Le calcul matriciel permettant cette étape est l'opération inverse du produit permettant d'inclure la covariance entre variables lors de générations multi variées classiques. Il nous a permis d'obtenir les distributions spécifiques des variables une fois débarrassées de leur covariance. Ce point est une avancée non négligeable qui a permis (1) de réaliser le tirage de valeurs de variables à partir de leur distribution spécifique et (2) d'y ajouter ensuite les liens de covariance afin d'obtenir des populations virtuelles. Ces distributions spécifiques et surtout l'inverse des fonctions de répartition de chaque variable indépendante sont à ajouter au patron de variance-covariance étudié et permettent de définir le patron de variance-covariance final utile à la génération de populations virtuelles (Figure 47).



Un centrage par groupe ainsi qu'une pondération de chaque matrice de variance-covariance ont permis d'obtenir une matrice de variance-covariance moyenne. Cette matrice de variance-covariance moyenne dépend de la pondération utilisée entre toutes les matrices de variance-covariance spécifiques des 32 groupes étudiés dans le jeu de données de calibrage. Selon le but recherché, il aurait été possible de pondérer les différentes matrices d'une autre façon. Par exemple, il est possible d'utiliser différents coefficients pour neutralisent la prépondérance des porcs LWxPP dans notre schéma expérimental. Il s'agit alors d'affecter un coefficient supplémentaire de 1/16 aux matrices de variance-covariance issues de porcs LWxPP, 1/4 pour les matrices issues de porcs PP et 1/2 pour toutes les autres matrices de variance-covariance dont le type de croisement n'apparaît qu'une fois (= une bande). Une alternative consiste à utiliser des coefficients qui correspondent à la répartition des types de croisement dans les élevages susceptibles d'être concernés par ces travaux. La première proposition reviendrait à calculer une matrice de variance-covariance moyenne parmi tous les types de croisement étudiés et représenterait un type fictif résultant de la combinaison à parts égales de tous ces croisements. La deuxième proposition reviendrait à obtenir une matrice de variance-covariance qui soit la moins éloignée en moyenne, compte tenu du paysage génétique des élevages. Dans notre cas, les groupes étudiés étant tous différents, le croisement importait peu, il s'agissait juste d'un facteur supplémentaire pour créer différents schémas de variabilité avec la bande et le sexe : il s'agit simplement de 32 groupes différents. De plus, le type LWxPP qui sert de témoin d'une bande à l'autre est aussi central du point de vue des performances vis-à-vis des autres types de croisement lorsqu'ils sont comparés intra-bande. Au final, nous obtenons un patron de la variance-covariance des porcs élevés à la station de Romillé, ce qui correspond à notre référence pour évaluer les stratégies alimentaires (§ 4).

Concernant la génération de populations virtuelles, Pomar *et al.* (2003) ont généré des valeurs de variables rendues indépendantes ou considérées comme telles. D'autres auteurs se servent de la génération multi variée et de matrices de variance-covariance (Morel *et al.*, 2012), mais cette génération multi variée se base toujours sur des lois normales indépendantes dont la dépendance est introduite par calcul matriciel à partir d'une matrice de variance-covariance fournie (Ripley, 1987). Cette génération multi variée apporte une solution palliative aux lacunes dans la connaissance de la covariance. Elle conserve des défauts que nous avons évoqués dans le § 2. La prise en compte de la covariance entre variables par la matrice de variance-covariance calculée, d'une part, et des distributions spécifiques de ces variables, d'autre part, sont donc apparues incontournables. Le respect des distributions des variables a été introduit par les inverses des fonctions de répartition



indépendantes. La conjonction de ces deux apports a permis d'aller plus loin dans la génération exacte d'individus selon le patron observé.

La conséquence de cette génération précise de populations virtuelles est une série de simulations fidèles au comportement d'un groupe de porcs en engraissement dans différentes conditions d'alimentation (§ 4 vs 3). Ce résultat s'observe dans le Tableau 48 par un  $CV_{PV}$  au premier départ pour l'abattoir comparable entre résultats des simulations et résultats d'essai pour les porcs alimentés à volonté. Pour les porcs rationnés, la diminution du  $CV_{PV}$  par rapport aux animaux à volonté est du même ordre de grandeur d'après les simulations et d'après les résultats de l'essai. La proximité des résultats obtenus par simulation et par expérimentation sur animaux est également notée sur les performances moyennes d'engraissement et l'évolution de la variabilité selon la stratégie alimentaire. Il apparaît donc que le patron de variance-covariance, étalonné en conditions d'alimentation à volonté, donne des résultats satisfaisants hors de son domaine de calibrage, ici en conditions de rationnement. Quelques limites à cette validation par l'essai seront développées plus loin mais ce premier résultat est particulièrement encourageant.

L'exploration de la variabilité des performances d'une population selon les stratégies de simulations étudiées dans le § 3 (étape 2) est innovante. Classiquement, l'exploration de modèles se contente d'estimer l'espérance conditionnelle d'un modèle en fonction des entrées de celui-ci. Notre étude constitue une première analyse de la dispersion conditionnelle d'un modèle à travers la modulation de la variabilité en engraissement par des stratégies alimentaires différentes.

## **Applications**

L'originalité de cette thèse est de permettre de différencier la portion générique de la variabilité de sa portion spécifique à un groupe de porcs en particulier. Comme il a été démontré par les tests CPC, la matrice de variance-covariance dépend de la bande, du sexe et du croisement, ce qui permet de définir l'échelle de regroupement des individus. Le patron de variance-covariance proposé représente la covariance générique issue des 32 groupes étudiés. Il se prête bien à la simulation des performances d'animaux élevés dans des conditions identiques à celles dans lesquelles les données ont été acquises.

La démarche de quantification de la covariance entre variables est applicable dans l'état pour caractériser le patron de variance-covariance des porcs issu de n'importe quel croisement et type sexuel. Cela implique le recueil de données sur plusieurs bandes successives comprenant les mêmes types d'animaux, comme c'est le cas par exemple dans



notre étude avec les porcs LWxPP. En effet, malgré l'effet bande mentionné ci-dessus, la simulation de populations virtuelles de porcs LWxPP sur la base des données collectées sur huit bandes différentes donne des résultats proches des résultats *in vivo* (Tableau 48). Les informations disponibles sur les autres croisements, étudiés sur une seule bande, sont probablement très fortement marquées par l'effet bande et sans doute plus difficilement généralisables.

Les informations récoltées dans cette thèse et le patron de variance-covariance utilisé permettent d'envisager d'étudier facilement un grand nombre de stratégies alimentaires. Ceci représente une alternative solide à l'expérimentation animale. En effet, la directive européenne n°2010/63/UE relative à l'expérimentation animale demande de démontrer, auprès d'un comité d'éthique, l'impossibilité de substituer une autre méthode scientifiquement acceptable à l'expérimentation animale. Quand ce n'est pas le cas, le comité d'éthique incite les expérimentateurs à se questionner sur la pertinence de leur protocole en termes de nombre d'animaux. Nos simulations à partir de populations virtuelles vont dans le sens de cette substitution acceptable. Ils permettent de réaliser de nombreux essais virtuels sans les contraintes liées à l'expérimentation animale, de façon très rapide, réaliste et à moindre coût.

Au delà de 1000 porcs par groupe, le générateur n'est plus sensible au choix de la racine. Cet effectif permet alors de s'affranchir de l'aléa d'échantillonnage et de prendre en compte de façon la plus précise possible les caractéristiques de toute population de porcs présentant les valeurs (moyennes et variances) de consigne. Mais le générateur de bandes, couplé au modèle InraPorc, peut aussi être directement utilisé pour fournir un intervalle de confiance autour de la valeur moyenne des performances prédite. Dans ce cas, plusieurs populations peuvent être générées selon les mêmes valeurs de consignes, mais avec un effectif comparable à celui d'une bande en élevage (de 100 à ... individus). Puis des simulations peuvent être réalisées de façon répétées sur cet ensemble de populations virtuelles, permettant d'obtenir une série de performances de croissance par population. Les performances de croissance moyennes et un intervalle de confiance de la réponse peuvent alors être calculés.

## **Limites**

Le modèle InraPorc et l'utilisation qui en a été faite comportent fondamentalement un certain nombre de limites. Les interactions entre porcs d'une même case ne sont pas prises en compte dans les simulations, dont la compétition à l'auge qui entraîne du vol d'aliment en



conditions rationnées. Cela peut expliquer un  $CV_{PV}$  au premier départ pour l'abattoir plus élevé chez les porcs élevés en groupe que lors des simulations (Tableau 48). Cet écart reste néanmoins faible. En fin de croissance, en pratique tous les porcs d'une case ne sont pas abattus le même jour. L'effet du retrait des porcs les plus lourds sur les performances de ceux qui restent dans la case n'est pas non plus pris en compte en simulation.

La variable  $PV_{70}$  est utilisée comme référence commune pour tous les profils et permet de s'affranchir de la différence d'âge lors de l'entrée en engraissement. Toutes les simulations sont réalisées à partir d'un âge initial de 70 jours. Tous les porcs sont donc supposés avoir cet âge à ce stade. Or, en pratique, ce n'est pas le cas en raison de l'étalement des mises bas dans la semaine. Ce décalage cause d'un éventuel écart supplémentaire de PV initial, qui n'a pas été pris en compte dans le § 3. La valeur du PV à partir duquel l'ingéré énergétique ne limite pas le dépôt de protéines ( $PV_{PDmax}$ ) est de 70 kg par défaut dans InraPorc. Elle a été établie sur la base des données disponibles dans la littérature (van Milgen *et al.*, 2008). En l'absence d'information sur ce critère, qui aurait nécessité des mesures sur des porcs rationnés pendant l'étape 1 de la thèse, cette valeur a été conservée lors du calibrage des données avec InraPorc (voir § 4).

Dans l'étude de la covariance, nous avons considéré la bande, le sexe et le croisement comme possibles facteurs de regroupement des porcs. L'analyse montre que le groupe est défini par l'intersection de ces facteurs. Nous ne sommes délibérément pas descendus à l'échelle de la case pour mesurer la covariance, principalement en raison de la présence d'animaux des deux sexes dans chaque case. Utiliser un tel échantillon pour étudier la covariance de six variables reviendrait à sur-paramétrer notre patron de variance-covariance en utilisant une somme de cas particuliers dus aux aléas d'échantillonnage dans la case. Par ailleurs, les animaux interagissent entre eux au niveau de la case. La covariance intra-case reflète plus les interactions spécifiques à la case, qu'une part générique de covariance extrapolable à d'autres cases.

Pour calculer les performances économiques, il est nécessaire d'estimer la composition de la carcasse d'une façon qui soit proche du système utilisé en abattoir, système qui évolue régulièrement. La composition de carcasse prédite par InraPorc s'appuie sur des connaissances peu précises de la répartition des masses de protéines et de lipides entre compartiments corporels. Pour évaluer la valeur des carcasses, le TMP estimé par InraPorc est néanmoins utilisé dans le § 3. Sa valeur absolue diffère du TMP réel, tandis que sa variation selon la conduite alimentaire reste cohérente (Quiniou *et al.*, 2007). De ce fait, les



marges économiques par porc ne sont pas présentées en valeur absolue dans les travaux de simulation qui utilisent le modèle InraPorc, mais par différence avec la valeur obtenue dans une situation de référence.

Le générateur évolué de population nécessite toujours un recadrage des valeurs générées par itération. En effet, la variance obtenue à l'issue de l'ajout de la covariance lors de la première itération est de l'ordre de 60% de la variance attendue. Une raison de ce manque de dispersion peut être l'utilisation de fonctions de répartition empiriques de variables auxquelles la part de variation due à la covariance a été retirée. Ce retrait d'une part de variation peut alors réduire la dispersion générée comparativement à l'utilisation de lois normales. Toutefois, cet écart est résolu par la correction par itération, et les valeurs obtenues sont plus proches des distributions attendues que lors de l'utilisation de lois normales indépendantes.

Notre étude est limitée aux porcs placés dans les conditions d'élevage les plus favorables pour permettre l'expression du potentiel de croissance. Pourtant, les événements sanitaires sont une source importante de variabilité en élevage. Le patron de variance-covariance obtenu et les simulations ne peuvent décrire cette situation. La démarche devra alors être complétée par la prise en compte de tels événements, et leur définition préalable. Pour l'instant, il n'existe que des connaissances partielles de l'impact d'un événement sanitaire, mais les notions d'intensité et de durée de perturbation de la croissance développées dans par Pastorelli (2012) constituent une piste à ne pas négliger, conjointement aux modèles de propagation épidémiologiques, dans l'intégration de tels impacts sur la simulation d'une bande en croissance.

Si les résultats comparant les simulations aux essais *in vivo* sont encourageants, notamment lorsque le modèle est utilisé en dehors de ses conditions de calibrage, ils doivent tout de même être observés avec un minimum de précaution. En effet, les effectifs mis en essai restent faibles par rapport aux effectifs ayant servis au calibrage du patron de variance-covariance. Daumas et Causeur (2008) ont vérifié par validation croisée leurs équations de prédiction de qualité de carcasse à partir des variables fournies par différents appareils de mesure sur un jeu de données plus grand que le jeu ayant permis leur calibrage. Ils ont ensuite pu homologuer les différents appareils de mesure sur un nombre de carcasses de l'ordre de 50% du nombre d'animaux disséqués pour établir les équations de prédiction. Dans notre étude, les différences entre l'échantillon de calibrage et l'échantillon *in vivo* ne nous offre pas la même certitude quant à la fidélité de prédiction de nos simulations. La différence d'effectif, ajoutée aux conditions très contrôlées de l'élevage, peut produire de



bons résultats mais s'expliquer par un aléa d'échantillonnage. Toutefois, les performances *in vivo* sont proches des performances simulées, tant chez les porcs en groupe qu'en individuel. La conjonction de deux aléas est cependant moins probable que l'explication plus simple qui serait la pertinence du patron de variance-covariance.

Les simulations de population de porcs réalisées restent difficilement extrapolables dans un élevage commercial donné. Si une matrice de variance-covariance moyenne a pu être substituée aux matrices spécifiques de chaque groupe, la connaissance du vecteur des valeurs moyennes des variables reste nécessaire par groupe dans l'élevage considéré, de par son importance sur les performances d'engraissement simulées. Ce vecteur n'est pas disponible *a priori* et doit donc être estimé. Dans notre étude, il a été remplacé par les moyennes ajustées des variables compte-tenu du croisement et du sexe. Dans un élevage commercial, le lien entre les données disponibles (GTE, plan d'alimentation) et les valeurs moyennes des variables définissant le profil animal reste encore à déterminer.



## **CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE LA THÈSE**



L'intégration de la variabilité individuelle dans les modèles de croissance du porc est nécessaire pour mieux appréhender les effets des stratégies alimentaires sur les performances et leur variabilité. Une méthode d'intégration de la variabilité consiste à simuler les performances d'individus virtuels dont les valeurs de variables descriptives sont générées aléatoirement. Jusqu'ici, cette génération aléatoire ne se basait pas sur une connaissance précise et généralisable des relations de covariance entre variables.

Notre travail visait à étudier ces relations de covariance pour déterminer leurs parts génériques et spécifiques et ainsi les inclure dans un générateur de population virtuelle à même de produire des populations de variabilité réaliste. Cette étude a nécessité une étape de consolidation des données, étape longue mais indispensable à l'obtention d'une base représentant le plus fidèlement possible la variabilité présente en élevage. L'exploration des structures de variance-covariance au sein de cette base a révélé qu'il n'était pas possible de déterminer une structure unique de variance-covariance commune à toutes les groupes étudiés. Face à ce constat, nous proposons un patron générique de variance-covariance qui permette de représenter chaque groupe avec le moins d'écart possible entre ce patron et la structure spécifique de variance-covariance de ce groupe. Ce patron a été élaboré par étapes dans un processus exploratoire, avec ses échecs et ses succès. Au final, il est constitué d'une fonction de répartition empirique inversée et indépendante pour chacune des cinq variables utilisées pour décrire un profil animal, du vecteur des moyennes des variables spécifique du groupe de porcs considéré, et de la matrice de variance-covariance moyenne.

Pour utiliser ce patron de variance-covariance, nous avons développé un générateur de bandes original. Les connaissances acquises sur la covariance entre variables, d'une part, et la méthode d'intégration de ce patron de variance-covariance dans un générateur adapté, d'autre part, constituent un travail novateur. En effet, les questions de covariance en modélisation de la croissance du porc sont en général traitées sommairement. Elles sont simplement éludées en se basant sur une génération de valeurs de variables indépendantes, voire au mieux considérées au travers de valeurs de variance arbitraires.

Avec ce générateur, des populations virtuelles ont été produites, de variance réaliste. Les simulations réalisées à partir de ces populations apportent une information non seulement sur la moyenne des performances (croissance, rejets, économie) mais également sur leur variation. Il apparaît possible alors de mettre en évidence que ces deux critères dépendent de la stratégie alimentaire. La pertinence de ces résultats de simulation a été vérifiée par leur proximité avec ceux obtenus lors d'un essai *in vivo*.



Notre approche soulève cependant quelques questions qui nous amènent à envisager différentes perspectives.

Dans notre étude, nous avons développé un patron de variance-covariance à partir de données issues d'un seul élevage et d'un ensemble de croisements non exhaustif : d'une part, d'autres types de verrats existent, d'autre part, les porcs étaient tous issus d'un seul type de truie. La démarche et les outils développés ici seront cependant applicables en l'état à de nouveaux jeux de données provenant d'autres élevages, d'autres croisements et types sexuels (mâles entiers). A terme, l'accumulation des données devrait permettre d'orienter la stratégie de développement du patron de variance-covariance vers une généralisation à toutes les populations ou au contraire le rendre spécifique de certaines populations. De plus, le choix du modèle InraPorc a conditionné les variables utilisées pour décrire les animaux. Notre démarche et les outils qui en ont découlé ne sont cependant pas spécifiques de ce modèle. Au contraire, tant la démarche que les outils peuvent être appliqués à d'autres modèles de croissance du porc.

Lors de nos travaux de simulation, nous nous sommes appuyés sur une population de grand effectif afin d'analyser la réponse globale de cette population virtuelle. Ceci nous a permis d'obtenir pour chaque stratégie évaluée une réponse moyenne et la variabilité associée (en termes d'écart-type). Une seconde utilisation possible de la génération de populations sera de simuler non plus une très grande population mais différentes groupes d'effectifs plus réduits mais réalistes, afin de fournir un intervalle de confiance aux résultats de simulation.

L'effet de différents éléments de la conduite alimentaire a été estimé par simulation dans le cadre de notre étude à partir de grandes populations virtuelles. Les résultats moyens et leur variabilité ont été obtenus avec quelques plans d'alimentation ou différentes caractéristiques nutritionnelles des aliments. A partir de ces simulations, nous confirmons que les impacts économiques et environnementaux des stratégies alimentaires dépendent étroitement du contexte de prix des matières premières et des contraintes de formulation des aliments. Ceci incite à actualiser périodiquement ces calculs. De nombreuses autres simulations restent encore à réaliser. D'autres modalités peuvent être envisagées pour les facteurs de conduite alimentaire déjà étudiés. De nouveaux facteurs liés à la conduite d'élevage n'ont pas été abordés tels que des âges différents entre animaux d'une bande en début d'engraissement ou des stratégies d'abattage plus complexes (contraintes sur le poids au premier départ, sur le nombre d'animaux par départ, les espacements entre départs). Ceci permettrait d'affiner les résultats obtenus et d'en améliorer la portée pratique vis-à-vis de la gestion de la variabilité en élevage.



L'amélioration de la portée pratique des résultats de cette thèse passe également par leur valorisation en élevage. Quand le croisement des porcs est identique à l'un de ceux que nous avons étudiés et que les porcs sont alimentés à volonté, nous considérons qu'il est possible d'appliquer le patron de variance-covariance à condition de connaître le vecteur des moyennes des variables. Ceci constitue néanmoins un défi qui, pour être relevé, suppose encore le développement d'une méthode d'estimation *a priori* des valeurs des variables à partir de données disponibles en élevage (conditions d'entrée en engraissement, GMQ moyen, quantités ingérées par période de croissance,...), voire la réalisation de mesures spécifiques (poids au changement d'aliment et bilans des quantités d'aliment ingérées).

Enfin, nos travaux et les perspectives associées permettront d'envisager à plus long terme la fourniture d'un nouvel outil d'aide à la décision basé sur le modèle InraPorc, dans sa version actuelle, et associé au générateur de population. Différentes évolutions pourront être envisagées quant aux conditions des simulations et leur analyse. Ce nouvel outil utilisable en élevage permettra d'améliorer, d'une part, la gestion de la variabilité en élevage et, d'autre part, la prise en compte les caractéristiques, actuelles ou futures, du contexte socio-économique de l'élevage porcin.



## **ANNEXES**



**Annexe 1 - Nombre de consommations moyennes journalières (CMJ) individuelles de la base de données corrigées et types de correction apportée (partie 1/2)**

Bande	Type de verrat	Sexe	Nb de CMJ corrigées	Opérations de corrections réalisées (une ou plusieurs/jour) <sup>1</sup>				% des CMJ dans la base
				panne de DAC (A)	répartition porc à porc (B)	réattribution entre porcs (C)	correction de l'écart de bilan (D)	
1	LWxPP	F	383		189	5	241	12,8
		MC	364		166	11	200	12,2
	PP	F	528		449	26	71	15,1
		MC	439		380	16	61	13,7
2	LWxPP	F	708	317	257	91	132	21,5
		MC	630	274	230	93	111	21,6
	P76	F	640	250	443	114	8	21,3
		MC	652	256	402	1	9	20,9
3	LWxPP	F	479		451	28		15,2
		MC	407		396	54		15,3
	Kantor	F	666		621	45		21,1
		MC	604		594	10		20,2
4	LWxPP	F	529		462		203	16,3
		MC	515		474		198	16,0
	Maxter	F	359		211		160	11,1
		MC	357		193		176	12,1
5	LWxPP	F	439	191	224	4	43	14,3
		MC	442	194	225	12	35	15,3
	PIC	F	568	178	463	3		19,5
		MC	522	197	350			18,4
6	LWxPP	F	359		332	27		11,2
		MC	399		333	66		12,8
	Duroc A	F	559		562	36		20,3
		MC	572		582	10		18,2
7	LWxPP	F	1089	455	510	24	153	33,9
		MC	1013	413	481	38	139	34,4
	Duroc N	F	1033	416	448		169	35,1
		MC	951	403	418		171	33,4

1. Correction A : CMJ = moyenne de  $CMJ_{j-1}$  et  $CMJ_{j-1}$  ; B : visites non attribuées affectées à un porc n'en ayant pas réalisé sur la même période en raison d'un problème d'identification ; C : répartition des visites alimentaires entre porcs de la case, au prorata de leur CMJ de la veille et du lendemain ; D : facteur multiplicatif appliquée aux CMJ enregistrées, correspondant au rapport de bilan DAC/ bilan manuel.

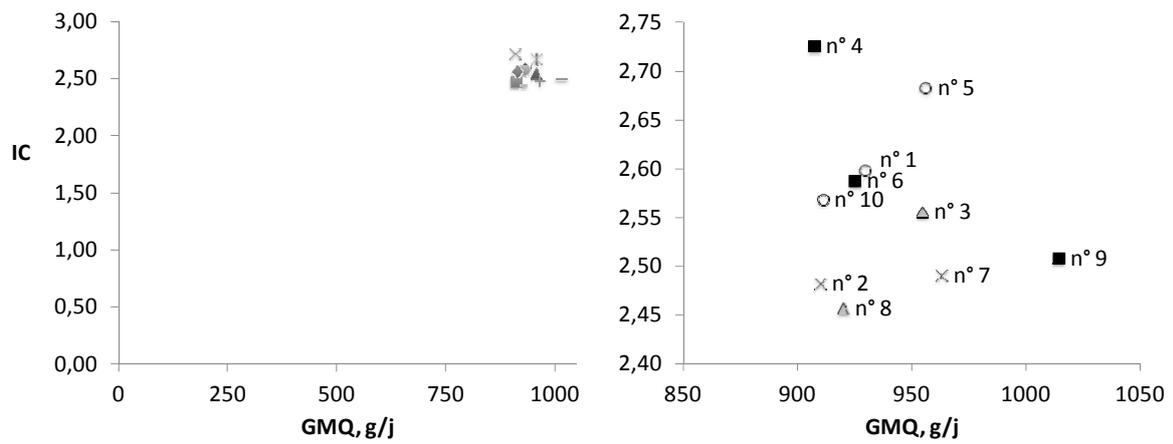
**Annexe 2 - Nombre de consommations moyennes journalières (CMJ) individuelles de la base de données corrigées et types de correction apportée (partie 2/2)**

Bande	Type de verrat	Sexe	Nb de CMJ corrigées	Opérations de corrections réalisées (une ou plusieurs/jour) <sup>1</sup>				% des CMJ dans la base
				panne de DAC (A)	répartition porc à porc (B)	réattribution entre porcs (C)	correction de l'écart de bilan (D)	
8	LWxPP	F	556		832	24		25,8
		MC	503		947	19		25,5
	PP	F	637		595	27	84	20,0
		MC	638		567	26	84	20,0
9	LWxPP	F	768		791	2		25,3
		MC	742		774	2		25,1
	Virtus	F	1272		1033	2	504	44,3
		MC	1168		1036		502	43,2
10	LWxPP	F	677		763		40	23,7
		MC	800		743	18	48	25,3
	LW	F	1268		1187		157	37,8
		MC	1042		1247	2	180	36,4
Total général			26277	3544	21361	836	3879	22,1

1. Correction A : CMJ = moyenne de  $CMJ_{j-1}$  et  $CMJ_{j+1}$  ; B : visites non attribuées affectées à un porc n'en ayant pas réalisé sur la même période en raison d'un problème d'identification ; C : répartition des visites alimentaires entre porcs de la case, au prorata de leur CMJ de la veille et du lendemain ; D : facteur multiplicatif appliquée aux CMJ enregistrées, correspondant au rapport de bilan DAC/ bilan manuel.

**Annexe 3 - Comparaison du coefficient de variation (CV) du poids vif (PV) en fin de post-sevrage des porcs de l'ensemble de la population en fin de post-sevrage et celle entrée en engraissement selon la bande et le croisement**

Bande	Verrat	Effectif complet en fin de post-sevrage			Porcs entrés en engraissement		
		Nb porcs	PV moyen, kg	CV, %	Nb porcs	PV moyen, kg	CV, %
1	LWxPP	132	26,0	15,6	72	27,5	9,4
	PP	146	25,6	13,5	72	26,5	6,9
2	LWxPP	107	23,3	14,1	72	24,3	8,8
	P76	151	23,3	14,3	72	24,9	10,3
3	LWxPP	131	27,5	14,7	72	27,5	11,9
	Kantor	139	27,9	15,4	72	27,8	12,6
4	LWxPP	129	28,0	13,4	72	29,6	8,7
	Maxter	131	28,7	16,4	72	29,7	9,1
5	LWxPP	119	23,9	16,0	72	24,1	11,2
	Pic	132	24,0	15,1	72	25,0	8,9
6	LWxPP	129	23,1	15,9	72	24,9	10,1
	Duroc A	133	25,6	14,8	72	25,2	10,8
7	LWxPP	123	24,9	15,0	72	25,2	14,9
	Duroc N	142	23,4	16,6	72	23,6	14,5
8	LWxPP	138	21,7	19,9	72	22,8	14,8
	PP	129	21,9	17,6	72	22,9	14,1
9	LWxPP	141	23,2	15,2	72	24,8	8,9
	Virtus	157	23,2	16,7	72	24,4	8,8
10	LWxPP	121	23,4	16,5	69	24,4	10,6
	LW	129	22,4	12,3	75	23,2	9,0
Toutes les bandes		2659	24,5	17,6	1440	25,4	13,3



**Annexe 4 - Illustration des niveaux relatifs d'indice de consommation (IC) et de vitesse de croissance (GMQ) d'une bande à l'autre (10 bandes) chez les porcs issus de verrat LWxPP (moyenne des MC et des F) avec deux échelles différentes pour les axes X et Y. Dans le graphique de droite, les symboles utilisés correspondent aux saisons d'élevage : × printemps, ○ été, △ automne, ■ Hiver**

**Annexe 5 - Performances de croissance moyenne des porcs<sup>1</sup> issus de verrat LWxPP selon la bande et le type sexuel**

Bande		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ETM <sup>2</sup>	P-values <sup>3</sup>		
		N° de travail	226	246	256 <sup>4</sup>	266	276	286	296	306	316 <sup>4</sup>		326	B	S
Nombre de porcs	F	31	32	35	34	33	33	35	23	35	29				
	MC	32	28	31	35	34	34	32	21	35	32				
<b>Age, j</b> Initial	F	69,6	68,8	75,2	76,2	74,9	75,3	69,3	67,1	68,4	68,8	0,3	<0,01	0,90	0,24
	MC	69,4	68,5	74,9	76,5	75,2	75,6	69,4	66,9	68,5	68,7				
Au 1 <sup>er</sup> départ	F	152,6	152,8	152,2	160,2	151,9	159,3	159,8	159,6	151,9	166,3	0,3	<0,01	0,92	0,24
	MC	152,4	152,5	151,9	160,5	152,2	159,6	159,9	159,2	152,0	166,2				
A l'abattage	F	162,9	168,2	163,4	168,9	167,2	171,4	159,8	159,6	151,9	166,3	1,6	<0,01	<0,01	<0,01
	MC	159,3	165,0	157,8	164,9	157,7	165,5	159,9	159,2	152,0	166,2				
<b>Poids vif moyen, kg</b>															
Initial	F	33,8	28,2	33,7	36,1	35,0	31,9	28,1	27,6	29,4	29,2	1,07	<0,01	0,62	0,73
	MC	33,4	27,9	34,0	36,6	36,3	31,3	28,3	28,3	29,5	28,7				
Au 1 <sup>er</sup> départ	F	109,0	103,0	104,3	110,4	104,1	106,9	110,9	112,3	111,3	115,1	2,15	<0,01	<0,01	0,10
	MC	113,0	104,7	109,7	116,4	113,6	112,5	119,8	113,5	116,9	120,3				
A l'abattage	F	117,5	116,7	115,0	116,7	117,8	115,5	110,9	112,3	111,3	115,1	1,64	0,10	<0,01	<0,01
	MC	118,6	115,5	115,2	119,3	119,0	118,3	119,8	113,5	116,9	120,3				
<b>Performances moyennes</b>															
Vitesse de croissance, g/j	F	904	900	925	872	902	877	915	916	981	882	21,1	<0,01	<0,01	0,01
	MC	955	917	983	941	1009	973	1011	923	1047	940				
Consommation d'aliment, kg/j	F	2,31	2,12	2,33	2,32	2,41	2,23	2,25	2,21	2,38	2,22	0,057	<0,01	<0,01	0,06
	MC	2,54	2,29	2,58	2,70	2,69	2,53	2,57	2,33	2,70	2,45				
Indice de consommation, kg/kg	F	2,59	2,45	2,55	2,69	2,71	2,58	2,49	2,43	2,46	2,55	0,048	<0,01	<0,01	0,03
	MC	2,70	2,62	2,66	2,91	2,72	2,64	2,57	2,55	2,61	2,65				

1. Effectifs retenus dans les bases de données. 2. Maximum de l'erreur type par bande. 3. Analyse de variance (proc MIXED) avec en effets fixes, la bande (B), le sexe (S), l'interaction BxS, et en effet aléatoire la case.

**Annexe 6 - Performances de croissance en périodes de croissance-finition des porcs<sup>1</sup> issus de verrat LWxPP selon la bande**

Bande	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P-values <sup>3</sup>			
											ETM <sup>2</sup>	B	S	BxS
N° de travail	226	246	256	266	276	286	296	306	316	326	ETM <sup>2</sup>	B	S	BxS
<b>Age au changement d'aliment, j</b>	108,7	118,6	108,4	113,2	106,4	118,4	110,7	111,0	109,4	110,9	1,52	<0,01	0,98	0,25
<b>Poids vif moyen au changement d'aliment, kg</b>	71,4	76,5	66,0	70,3	65,8	74,8	66,8	68,4	72,3	68,1	1,24	<0,01	<0,01	0,27
<b>Vitesse de croissance, g/j</b>														
Croissance	967	971	981	923	964	981	934	924	1048	933	23,6	<0,01	<0,01	0,02
Finition	905	842	940	898	952	877	983	919	980	899	28,5	<0,01	<0,01	0,11
<b>Consommation d'aliment, kg/j</b>														
Croissance	2,11	1,82	2,12	2,12	2,31	2,03	2,02	1,93	2,13	2,05	0,063	<0,01	<0,01	0,87
Finition	2,68	2,58	2,72	2,77	2,74	2,67	2,75	2,60	2,91	2,59	0,064	<0,01	<0,01	0,03
<b>Indice de consommation, kg/kg</b>														
Croissance	2,21	2,09	2,23	2,28	2,47	2,13	2,16	2,12	2,09	2,21	0,066	<0,01	0,26	0,62
Finition	2,92	2,90	2,85	3,10	2,85	2,95	2,82	2,80	2,88	2,89	0,065	0,04	<0,01	0,01

1. Avant ou après le changement d'aliment intervenu après 65 kg de poids moyen de case.

2. Maximum de l'erreur type par bande.

3. Analyse de variance (proc MIXED, SAS) avec en effets fixes, la bande (B), le sexe (S), l'interaction BxS, et en effet aléatoire la case.

**Annexe 7 - Performances de croissance en périodes de croissance-finition des porcs<sup>1</sup> issus de verrat LWxPP selon la bande et le type sexuel**

Bande		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P-values <sup>3</sup>			
N° de travail		226	246	256 <sup>4</sup>	266	276	286	296	306	316 <sup>4</sup>	326	ETM <sup>2</sup>	B	S	BxS
<b>Age au changement d'aliment, jours</b>	F	109,7	118,8	108,8	113,1	106,1	118,3	110,7	111,3	109,4	110,9	1,5	<0,01	0,98	0,25
	MC	108,7	118,4	108,0	113,4	106,6	118,6	110,8	110,6	109,4	111,0				
<b>Poids vif moyen au changement d'aliment, kg</b>	F	70,2	75,6	64,5	68,1	63,1	72,1	65,0	68,7	70,4	66,6	1,2	<0,01	<0,01	0,27
	MC	72,5	77,5	67,7	72,5	68,4	75,4	68,8	68,1	74,1	69,4				
<b>Vitesse de croissance, g/j</b>															
Croissance	F	935	951	923	869	903	935	891	932	1004	898	24	<0,01	<0,01	0,02
	MC	997	995	1025	975	1023	1026	980	914	1091	966				
Finition	F	884	845	926	874	902	830	934	903	959	874	29	<0,01	<0,01	0,11
	MC	925	839	956	921	1001	923	1037	936	1001	921				
<b>Consommation d'aliment, kg/j</b>															
Croissance	F	2,03	1,76	2,05	2,02	2,22	1,95	1,94	1,90	2,06	2,00	0,06	<0,01	<0,01	0,87
	MC	2,18	1,88	2,20	2,21	2,40	2,11	2,12	1,96	2,19	2,09				
Finition	F	2,54	2,48	2,58	2,53	2,56	2,46	2,56	2,53	2,70	2,43	0,06	<0,01	<0,01	0,03
	MC	2,83	2,69	2,87	3,01	2,92	2,87	2,97	2,69	3,12	2,74				
<b>Indice de consommation, kg/kg</b>															
Croissance	F	2,21	2,08	2,27	2,27	2,50	2,13	2,16	2,11	2,11	2,26	0,07	<0,01	0,26	0,62
	MC	2,21	2,10	2,19	2,28	2,44	2,14	2,16	2,14	2,07	2,17				
Finition	F	2,83	2,75	2,74	2,93	2,83	2,91	2,78	2,71	2,74	2,79	0,07	0,04	<0,01	0,01
	MC	3,01	3,07	2,97	3,26	2,87	2,98	2,87	2,89	3,02	2,98				

1. Avant ou après le changement d'aliment intervenu après 65 kg de poids moyen de case.

2. Maximum de l'erreur type par bande.

3. Analyse de variance (proc MIXED, SAS) avec en effets fixes la bande (B), le sexe (S), l'interaction BxS, et en effet aléatoire la case.

**Annexe 8 - Caractéristiques de carcasse moyennes des porcs<sup>1</sup> issus de verrat LWxPP selon la bande et le type sexuel**

Bande		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N° de travail		226	246	256 <sup>4</sup>	266	276	286	296	306	316 <sup>4</sup>	326 <sup>4</sup>
Poids chaud, kg	F	92,8	92,1	91,4	92,7	93,7	91,6	86,3	88,2	86,8	90,6
	M	94,1	91,6	91,8	94,8	93,6	93,3	93,7	88,6	91,8	95,8
Rendement, %	F	79,0	79,0	79,5	79,5	79,5	79,4	78,1	78,6	78,3	78,7
	M	79,3	79,3	79,5	79,5	78,6	79,0	78,3	78,1	78,5	,78,9
G2, mm	F	14,4	13,7	13,7	12,4	14,8	12,6	12,7	11,7	12,8	12,6
	M	18,0	15,9	15,6	16,2	17,9	17,9	16,6	14,9	18,1	15,7
M2, mm	F	60,6	60,8	60,8	60,4	59,2	61,6	57,0	61,4	58,2	61,1
	M	59,2	59,3	60,9	57,5	59,3	61,8	59,2	59,7	58,8	59,6
TMP	F	60,0	60,5	60,9	61,8	59,9	61,8	61,1	62,5	61,3	61,7
	M	57,3	59,0	59,6	58,7	57,7	58,0	58,6	60,0	57,5	58,6

1. Voir le Tableau 29 pour les abréviations et l'analyse statistique.

**Annexe 9 - Performances moyennes sur l'ensemble de la période de croissance selon la bande, le croisement et le type sexuel**

Bande	Verrat	sexe	Age, j			PV, kg			Performances		
			Initial	1 <sup>er</sup> départ	Départ	Initial	1 <sup>er</sup> départ	Départ	CMJ	GMQ	IC
1	LWxPP	F	69,6	152,6	162,9	33,8	109,0	117,5	2,30	904	2,56
		MC	69,4	152,4	159,3	33,4	113,0	118,6	2,51	955	2,64
	PP	F	70,3	153,3	168,7	31,7	103,9	116,4	2,22	865	2,57
		MC	70,4	153,4	161,0	32,7	110,3	116,3	2,43	930	2,62
2	LWxPP	F	68,8	152,8	168,2	28,2	103,0	116,7	2,15	900	2,40
		MC	68,5	152,5	165,0	27,9	104,7	115,5	2,32	917	2,56
	P76	F	68,3	152,3	164,3	28,4	103,9	116,3	2,22	924	2,41
		MC	68,7	152,7	160,9	29,1	109,1	118,3	2,46	976	2,53
3	LWxPP	F	75,2	152,2	163,4	33,7	104,3	115,0	2,33	925	2,52
		MC	74,9	151,9	157,8	34,0	109,7	115,2	2,54	983	2,59
	Kantor	F	75,3	152,3	163,5	34,3	104,2	114,6	2,30	912	2,53
		MC	75,6	152,6	158,2	35,0	110,6	116,1	2,56	987	2,60
4	LWxPP	F	76,2	160,2	168,9	36,1	110,4	116,7	2,29	873	2,63
		MC	76,5	160,5	164,9	36,6	116,4	119,3	2,65	941	2,82
	Maxter	F	75,4	159,4	168,0	35,1	109,4	116,2	2,28	880	2,61
		MC	75,4	159,4	161,5	35,9	117,0	118,3	2,61	960	2,73
5	LWxPP	F	74,9	151,9	167,2	35,0	104,1	117,8	2,43	902	2,70
		MC	75,2	152,2	157,7	36,3	113,6	119,0	2,67	1009	2,66
	Pic	F	75,1	152,1	169,0	35,4	103,0	116,8	2,37	871	2,73
		MC	75,3	152,3	156,0	36,7	114,7	117,7	2,78	1010	2,76
6	LWxPP	F	75,3	159,3	171,4	31,9	106,9	115,5	2,23	877	2,56
		MC	75,6	159,6	165,5	31,3	112,5	118,3	2,53	973	2,61
	Duroc A	F	75,3	159,3	165,3	32,0	111,4	115,5	2,35	935	2,53
		MC	75,3	159,3	165,8	32,1	113,3	117,9	2,63	956	2,75
7	LWxPP	F	69,3	159,8	159,8	28,1	110,9	110,9	2,24	915	2,45
		MC	69,4	159,9	159,9	28,3	119,8	119,8	2,56	1011	2,53
	Duroc N	F	67,9	158,4	158,4	26,5	109,5	109,5	2,26	918	2,46
		MC	67,7	158,2	158,2	26,7	118,0	118,0	2,60	1008	2,59
8	LWxPP	F	67,1	159,6	159,6	27,6	112,3	112,3	2,20	916	2,40
		MC	66,9	159,2	159,2	28,3	113,5	113,5	2,32	923	2,51
	PP	F	67,7	160,2	160,2	26,8	111,5	111,5	2,11	916	2,30
		MC	67,3	159,9	159,9	27,7	120,9	120,9	2,49	1008	2,47
9	LWxPP	F	68,4	151,9	151,9	29,4	111,3	111,3	2,39	981	2,44
		MC	68,5	152,0	152,0	29,5	116,9	116,9	2,70	1047	2,58
	Virtus	F	68,4	151,9	151,9	29,1	108,7	108,7	2,26	953	2,37
		MC	68,3	151,8	151,8	29,6	112,9	112,9	2,48	998	2,49
10	LWxPP	F	68,8	166,3	166,3	29,2	115,1	115,1	2,22	882	2,52
		MC	68,7	166,2	166,2	28,7	120,3	120,3	2,46	940	2,62
	LW	F	69,2	166,8	166,8	28,2	110,3	110,3	2,17	841	2,58
		MC	69,2	166,7	166,7	27,6	112,5	112,5	2,36	870	2,72

1. Voir Tableau 28 pour les abréviations et l'analyse statistique.

**Annexe 10 - Performances de croissance en périodes de croissance (Crois.) et finition (Fini°) selon la bande et le croisement**

Bande	Verrat	Changement d'aliment		CMJ, kg/j		GMQ, g/j		IC, kg/kg	
		Age, j	PV, kg	Crois.	Fini°	Crois.	Fini°	Crois.	Fini°
1	LWxPP	108,7	71,4	2,11	2,68	967	905	2,21	2,92
	PP	111,0	70,4	2,00	2,57	941	864	2,17	2,94
2	LWxPP	118,6	76,5	1,82	2,58	974	842	2,09	2,90
	P76	119,1	75,9	1,87	2,80	942	961	2,17	2,88
3	LWxPP	108,4	66,0	2,12	2,72	971	940	2,23	2,85
	Kantor	109,1	66,3	2,12	2,75	945	956	2,27	2,85
4	LWxPP	113,2	70,3	2,12	2,77	923	898	2,28	3,10
	Maxter	111,3	69,3	2,11	2,75	945	903	2,19	3,06
5	LWxPP	106,4	65,8	2,31	2,74	964	952	2,47	2,85
	Pic	106,1	65,6	2,31	2,81	958	940	2,46	2,97
6	LWxPP	118,4	73,8	2,03	2,67	981	877	2,13	2,95
	Duroc A	118,3	76,6	2,19	2,79	1035	863	2,18	3,05
7	LWxPP	110,7	66,8	2,02	2,75	934	983	2,16	2,82
	Duroc N	108,0	65,8	2,06	2,82	974	951	2,13	2,95
8	LWxPP	111,0	68,4	1,93	2,60	924	919	2,12	2,80
	PP	109,7	66,0	1,86	2,76	918	1000	2,07	2,70
9	LWxPP	109,4	72,3	2,13	2,91	1048	980	2,09	2,88
	Virtus	106,4	67,7	2,06	2,66	1011	943	2,08	2,77
10	LWxPP	110,9	68,1	2,05	2,59	933	899	2,21	2,89
	LW	116,0	67,7	1,95	2,55	852	856	2,28	3,01
Statistiques <sup>1</sup>									
ETM		1,4	1,6	0,08	0,08	31	33	0,08	0,08
P values :									
Bande		<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Sexe		0,64	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,62	<0,01
Croisement		<0,01	0,27	0,83	0,01	0,19	0,03	0,87	0,25
Bande x Sexe		0,74	0,28	0,10	0,03	<0,01	0,01	0,97	0,27
Croisement x Sexe		0,12	0,35	0,36	0,07	0,18	0,17	0,51	0,12

1. Analyse de la variance avec la bande, le sexe, le croisement intra-bande et les interactions en effets fixes et la case intra-bande en effet aléatoire (proc MIXED, SAS). ETM : maximum de l'erreur type par bande x croisement x sexe.

**Annexe 11 - Performances de croissance en périodes de croissance (Crois.) et finition (Fini°) selon la bande, le croisement et le type sexuel**

Bande	Verrat	sexe	Changement d'aliment		CMJ, kg/j		GMQ, g/j		IC, kg/kg	
			Age, j	PV, kg	Crois.	Fini°	Crois.	Fini°	Crois.	Fini°
1	LWxPP	F	108,7	70,2	2,03	2,54	935	884	2,21	2,84
		MC	108,7	72,5	2,18	2,83	997	925	2,21	3,01
	PP	F	110,9	68,7	1,94	2,41	911	833	2,17	2,87
		MC	111,0	72,1	2,05	2,73	971	896	2,16	3,00
2	LWxPP	F	118,8	75,6	1,76	2,48	951	845	2,08	2,75
		MC	118,4	77,5	1,88	2,69	995	838	2,10	3,07
	P76	F	118,6	73,7	1,79	2,63	910	937	2,17	2,76
		MC	119,5	77,9	1,94	2,95	972	983	2,17	2,99
3	LWxPP	F	108,8	64,5	2,05	2,58	923	926	2,27	2,75
		MC	108,0	67,7	2,20	2,87	1025	956	2,19	2,97
	Kantor	F	109,0	64,3	2,01	2,58	894	927	2,25	2,78
		MC	109,3	68,3	2,22	2,92	996	984	2,28	2,93
4	LWxPP	F	113,1	68,1	2,02	2,53	869	874	2,27	2,93
		MC	113,4	72,5	2,21	3,01	975	921	2,28	3,26
	Maxter	F	111,3	67,0	1,99	2,55	894	874	2,20	2,95
		MC	111,3	71,7	2,23	2,95	998	934	2,19	3,19
5	LWxPP	F	106,1	63,1	2,22	2,56	903	902	2,50	2,83
		MC	106,6	68,4	2,40	2,92	1023	1001	2,44	2,87
	Pic	F	106,0	62,5	2,09	2,52	879	872	2,42	2,89
		MC	106,2	68,4	2,51	3,07	1030	1001	2,49	3,05
6	LWxPP	F	118,3	72,1	1,95	2,46	935	830	2,13	2,91
		MC	118,6	75,4	2,11	2,87	1026	923	2,14	2,98
	Duroc A	F	118,3	75,3	2,11	2,60	1006	872	2,15	2,87
		MC	118,3	77,7	2,25	2,95	1061	855	2,20	3,20
7	LWxPP	F	110,7	65,0	1,94	2,56	891	934	2,16	2,78
		MC	110,8	68,8	2,12	2,97	980	1037	2,16	2,87
	Duroc A	F	108,2	63,8	1,99	2,60	923	912	2,15	2,83
		MC	107,8	67,9	2,14	3,04	1026	991	2,11	3,08
8	LWxPP	F	111,3	68,7	1,90	2,53	932	903	2,11	2,71
		MC	110,6	68,1	1,96	2,69	914	936	2,14	2,89
	PP	F	109,9	63,5	1,75	2,53	869	956	2,07	2,58
		MC	109,6	68,5	1,96	2,99	966	1043	2,07	2,83
9	LWxPP	F	109,4	70,4	2,06	2,70	1004	959	2,11	2,74
		MC	109,4	74,1	2,19	3,12	1091	1001	2,07	3,02
	Virtus	F	106,3	66,3	1,99	2,54	980	928	2,06	2,69
		MC	106,4	69,3	2,14	2,80	1044	959	2,11	2,85
10	LWxPP	F	110,8	66,6	2,00	2,43	898	874	2,26	2,79
		MC	111,0	69,4	2,09	2,74	966	921	2,17	2,98
	LW	F	116,2	67,2	1,90	2,42	832	849	2,27	2,90
		MC	115,9	68,4	2,00	2,70	876	864	2,30	3,14

**Annexe 12 - Caractéristiques de carcasse selon la bande, le type de verrat et le type sexuel**

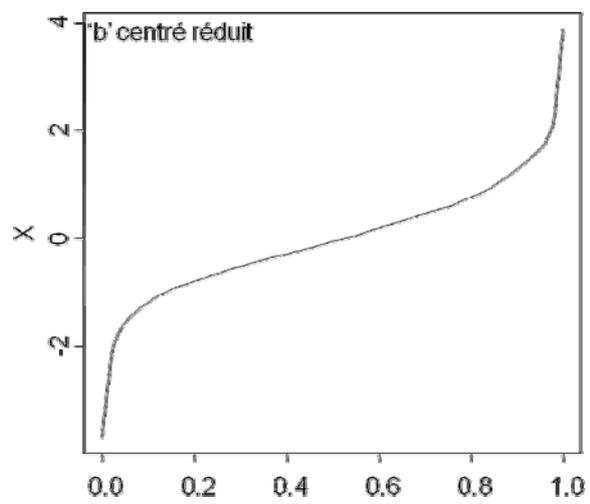
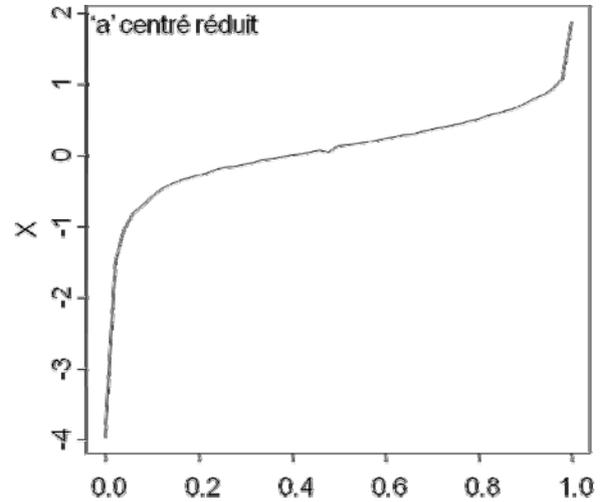
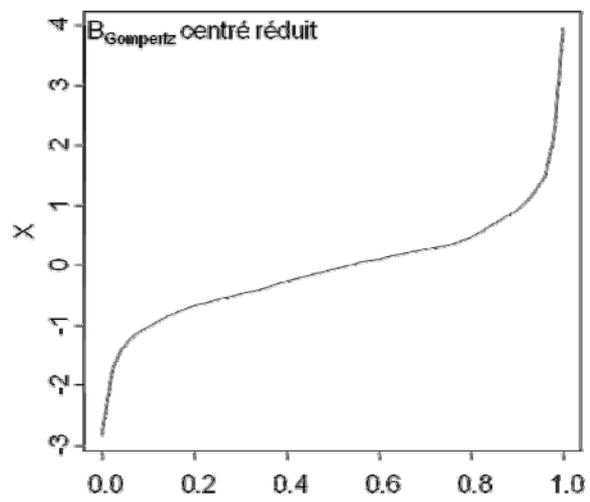
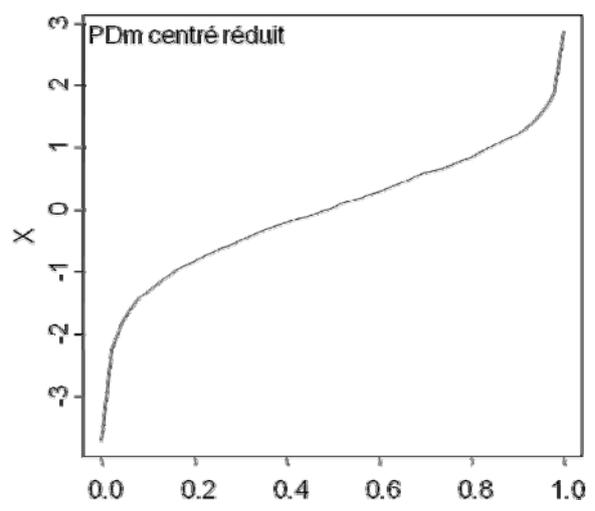
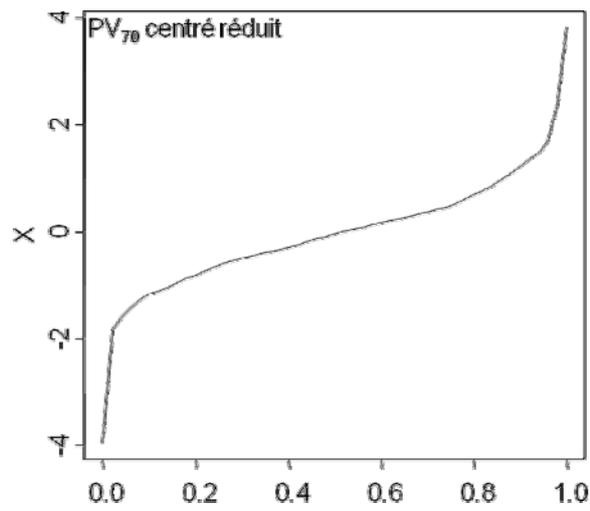
Bande	Verrat	sexe	Poids chaud, kg	Rendement, %	G2, mm	M2, mm	TMP
1	LWxPP	F	92,8	79,0	14,4	60,6	60,0
		MC	94,1	79,3	18,0	59,2	57,3
	PP	F	93,1	80,0	13,5	65,6	61,6
		MC	92,0	79,1	16,0	61,6	59,5
2	LWxPP	F	92,1	79,0	13,7	60,8	60,5
		MC	91,6	79,3	15,9	59,3	59,0
	P76	F	92,0	79,2	15,1	59,0	59,5
		MC	93,2	78,8	18,3	58,7	57,3
3	LWxPP	F	91,4	79,5	13,7	60,8	60,9
		MC	91,8	79,5	15,6	60,9	59,6
	Kantor	F	91,3	79,6	14,5	60,7	60,3
		MC	92,7	79,8	18,7	62,0	57,5
4	LWxPP	F	92,7	79,5	12,4	60,4	61,8
		MC	94,8	79,5	16,2	57,5	58,7
	Maxter	F	92,8	79,9	12,1	62,4	62,3
		MC	94,4	79,8	15,6	60,6	59,5
5	LWxPP	F	93,7	79,5	14,8	59,2	59,9
		MC	93,6	78,6	17,9	59,3	57,7
	Pic	F	94,0	80,4	13,5	64,1	61,6
		MC	93,5	79,5	17,6	61,3	58,2
6	LWxPP	F	91,6	79,4	12,6	61,6	61,8
		MC	93,3	79,0	17,9	61,8	58,0
	Duroc A	F	90,8	78,7	13,0	59,4	61,3
		MC	92,8	78,8	16,9	58,6	58,3
7	LWxPP	F	86,3	77,8	12,7	57,0	61,1
		MC	93,7	78,3	16,6	59,2	58,6
	Duroc N	F	85,8	78,3	13,2	56,1	60,7
		MC	92,1	78,1	16,9	57,8	58,2
8	LWxPP	F	88,2	78,6	11,7	61,4	62,5
		MC	88,6	78,1	14,9	59,7	60,0
	PP	F	88,0	78,9	11,7	62,7	62,7
		MC	95,4	78,9	15,6	63,9	60,1
9	LWxPP	F	86,8	78,3	12,8	58,2	61,3
		MC	91,8	78,5	18,1	58,8	57,5
	Virtus	F	85,3	78,5	12,8	58,3	61,3
		MC	88,1	78,1	15,5	59,5	59,5
10	LWxPP	F	90,6	78,7	12,6	61,1	61,8
		MC	94,8	78,9	16,7	59,6	58,6
	LW	F	85,4	77,5	13,4	53,4	60,1
		MC	86,7	77,2	14,9	52,6	58,8

**Annexe 13 - Moyennes ( $\mu$ ) et écart-type ( $\sigma$ ) des quantités d'énergie nette ingérées à 50 et 100 kg, calculées à partir de l'équation gamma et effets<sup>2</sup> des caractéristiques du groupe.**

Bande	Verrat	Sexe	n	QI50, MJ EN/j		QI100, MJ EN/j	
				$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
1	LWxPP	F	31	20,2	1,5	24,9	2,7
		MC	32	21,6	2,1	27,9	3,4
	PP	F	35	19,7	1,9	23,7	3,1
		MC	33	20,8	1,7	27,3	3,3
2	LWxPP	F	31	19,2	1,7	24,3	3,1
		MC	28	20,7	1,5	26,5	3,0
	P76	F	28	19,4	1,5	25,8	2,8
		MC	31	21,4	2,4	29,2	3,3
3	LWxPP	F	35	20,3	1,8	25,2	2,8
		MC	31	22,1	1,6	28,6	2,7
	Kantor	F	35	20,0	2,0	25,2	2,2
		MC	35	22,0	1,9	29,0	2,8
4	LWxPP	F	34	19,7	1,9	25,2	2,4
		MC	35	21,9	2,1	30,2	3,8
	Maxter	F	34	19,8	1,7	25,3	2,9
		MC	33	21,9	2,0	29,7	2,4
5	LWxPP	F	33	21,5	3,6	24,7	3,4
		MC	34	22,9	3,8	28,8	3,6
	PIC	F	31	20,1	3,7	24,5	2,0
		MC	34	24,0	5,3	30,0	3,5
6	LWxPP	F	33	19,9	2,0	24,1	2,9
		MC	34	21,8	2,1	28,1	2,8
	Duroc A	F	30	21,4	2,8	25,4	3,9
		MC	34	22,9	3,5	29,1	5,0
7	LWxPP	F	35	20,3	1,7	25,3	3,5
		MC	32	22,2	2,1	29,5	3,4
	Duroc N	F	32	21,1	1,8	25,3	3,0
		MC	31	22,9	2,0	30,4	3,5
8	LWxPP	F	23	20,0	1,4	25,5	2,8
		MC	21	20,7	1,8	27,3	2,0
	PP	F	34	18,6	1,2	25,4	3,3
		MC	34	20,9	1,5	29,8	2,7
Statistiques							
ETM				0,7		0,8	
P-values	Bande			<0,01		0,17	
	Sexe			<0,01		<0,01	
	Croisement			0,84		0,23	
	Bande x Sexe			0,54		0,02	
	Croisement x Sexe			0,07		0,31	

1. QI50 : MJ d'EN ingérés à 50 kg PV ; QI100 : MJ d'EN ingérés à 100 kg PV.

2. Analyse de la variance avec la bande, le sexe, le croisement intra-bande et les interactions en effets fixes et la case intra-bande en effet aléatoire (proc MIXED, SAS). ETM : maximum de l'erreur type par bande x croisement x sexe.



Annexe 14 - Fonctions indépendantes de répartition cumulée empirique ( $P(x < X)$ ) des variables centrées réduites, établies à partir des porcs des bandes 1 à 8 et utilisées dans par le générateur de bande évolué

**Annexe 15 - Effet du plan d'alimentation (*ad libitum* : AL vs rationné : RA) et du sexe (femelle : F vs mâle castré : MC) sur les performances de croissance moyennes par case des porcs de l'essai 1 de l'étape 3**

Plan d'alimentation Sexe	AL		RA		P-values <sup>1</sup>			
	F	MC	F	MC	ETM	PA	S	PA×S
<b>Nombre de cases</b>	7	7	7	7				
<b>Age, j</b>								
Entrée en engraissement	68,0	68,0	68,0	68,1	0,2	0,59	0,83	0,98
Au changement d'aliment (65 kg)	111,5	110,0	115,9	114,8	2,0	<0,01	0,25	0,85
Au 1 <sup>er</sup> départ	161,0	161,0	168,0	168,1	0,2	<0,01	0,83	0,98
A l'abattage	166,1	162,7	174,9	169,8	2,1	<0,01	0,02	0,62
<b>Poids, kg</b>								
Entrée en engraissement	28,1	28,6	28,1	28,9	1,3	0,36	0,02	0,76
Au changement d'aliment	65,3	65,1	66,2	66,6	0,6	0,09	0,88	0,66
Au 1 <sup>er</sup> départ	108,7	111,6	107,7	111,3	1,8	0,63	0,04	0,82
A l'abattage	112,7	113,1	112,8	112,7	1,1	0,90	0,90	0,82
<b>CMJ, kg/j</b>								
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ	2,25	2,41	2,08	2,24	0,04	<0,01	<0,01	0,92
Jusqu'à l'abattage	2,29	2,42	2,10	2,25	0,03	<0,01	<0,01	0,79
Avant 65 kg	1,89	1,98	1,75	1,76	0,03	<0,01	0,07	0,10
A partir de 65 kg								
<i>Jusqu'au 1<sup>er</sup> départ</i>	2,57	2,75	2,37	2,66	0,05	<0,01	<0,01	0,26
<i>Jusqu'à l'abattage</i>	2,60	2,75	2,37	2,65	0,04	<0,01	<0,01	0,13
<b>GMQ, g/j</b>								
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ	867	892	795	824	13	<0,01	0,05	0,90
Jusqu'à l'abattage	864	892	791	824	13	<0,01	0,03	0,88
Avant 65 kg	860	871	793	806	12	<0,01	0,31	0,95
A partir de 65 kg								
<i>Jusqu'au 1<sup>er</sup> départ</i>	878	911	800	839	21	<0,01	0,11	0,89
<i>Jusqu'à l'abattage</i>	871	910	792	838	19	<0,01	0,04	0,83
<b>IC, kg/kg</b>								
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ	2,58	2,67	2,60	2,69	0,04	0,39	<0,01	0,88
Jusqu'à l'abattage	2,63	2,68	2,63	2,70	0,04	0,60	0,02	0,73
Avant 65 kg	2,16	2,22	2,17	2,14	0,03	0,15	0,61	0,11
A partir de 65 kg								
<i>Jusqu'au 1<sup>er</sup> départ</i>	2,93	3,02	2,97	3,16	0,06	0,05	<0,01	0,27
<i>Jusqu'à l'abattage</i>	2,99	3,03	3,00	3,17	0,05	0,10	0,04	0,17

1. Analyse de la variance (proc MIXED, SAS) avec en effets principaux le plan d'alimentation (PA), le sexe (S), et l'interaction PA×S, en effet aléatoire le bloc, et la case en unité expérimentale. ETM : maximum de l'erreur type par PA×S.

**Annexe 16 - Effet du plan d'alimentation (*ad libitum* : AL vs rationné : RA) et du sexe (femelle : F vs mâle castré : MC) sur les performances de croissance moyennes des porcs de l'essai 2 de l'étape 3**

Plan d'alimentation Sexe	AL		RA		P-values <sup>1</sup>			
	F	MC	F	MC	ETM	PA	S	PA×S
<b>Nombre de porcs</b>	12	12	12	12				
<b>Age, j</b>								
Début d'engraissement	75,5	75,5	75,3	75,4	0,3	0,50	0,82	0,82
Au changement d'aliment (65 kg)	113,3	111,0	120,4	117,4	1,1	<0,01	<0,01	0,60
Au 1 <sup>er</sup> départ	152,0	152,0	166,8	166,9	0,2	<0,01	0,82	0,82
A l'abattage	162,0	155,8	178,8	172,3	1,8	<0,01	<0,01	0,96
<b>Poids, kg</b>								
Début d'engraissement	30,3	31,9	30,7	32,2	1,3	0,15	<0,01	0,94
Au changement d'aliment	66,6	67,0	65,3	65,5	0,6	0,03	0,60	0,88
Au 1 <sup>er</sup> départ	105,2	109,8	103,6	110,5	1,6	0,73	<0,01	0,38
A l'abattage	114,3	112,5	111,3	114,3	1,4	0,68	0,68	0,09
<b>CMJ, kg/j</b>								
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ	2,52	2,73	2,05	2,18	0,05	<0,01	<0,01	0,41
Jusqu'à l'abattage	2,53	2,76	2,11	2,22	0,05	<0,01	<0,01	0,19
Avant 65 kg	2,13	2,21	1,68	1,65	0,04	<0,01	0,48	0,16
A partir de 65 kg								
<i>Jusqu'au 1<sup>er</sup> départ</i>	2,90	3,19	2,40	2,63	0,06	<0,01	<0,01	0,59
<i>Jusqu'à l'abattage</i>	2,84	3,20	2,44	2,66	0,06	<0,01	<0,01	0,24
<b>GMQ, g/j</b>								
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ	979	1018	797	855	17	<0,01	<0,01	0,54
Jusqu'à l'abattage	975	1009	780	848	18	<0,01	<0,01	0,31
Avant 65 kg	961	989	767	788	16	<0,01	0,04	0,80
A partir de 65 kg								
<i>Jusqu'au 1<sup>er</sup> départ</i>	988	1049	825	911	28	<0,01	<0,01	0,63
<i>Jusqu'à l'abattage</i>	982	1032	790	896	28	<0,01	<0,01	0,31
<b>IC, kg/kg</b>								
Jusqu'au 1 <sup>er</sup> départ	2,57	2,58	2,57	2,56	0,05	0,10	0,20	0,11
Jusqu'à l'abattage	2,60	2,74	2,71	2,63	0,05	0,99	0,49	0,01
Avant 65 kg	2,22	2,25	2,20	2,11	0,05	0,07	0,46	0,19
A partir de 65 kg								
<i>Jusqu'au 1<sup>er</sup> départ</i>	2,96	3,07	2,92	2,90	0,05	0,07	0,46	0,19
<i>Jusqu'à l'abattage</i>	2,92	3,13	3,10	2,98	0,07	0,83	0,57	0,03

1. Analyse de la variance (proc MIXED, SAS) avec en effets principaux le plan d'alimentation (PA), le sexe (S), et l'interaction PA×S, et le bloc en effet aléatoire. ETM : maximum de l'erreur type par PA×S.

**Annexe 17 - Caractéristiques de carcasse moyenne selon le plan d'alimentation (*ad libitum* : AL vs rationné : RA) et le sexe (femelle : F vs mâle castré : MC) dans les essais 1 et 2 de l'étape 3**

Plan d'alimentation Sexe	AL		RA		P-values <sup>1</sup>			
	F	MC	F	MC	ETM	PA	S	PA×S
<b>Essai 1</b>								
Poids chaud, kg	90,3	91,2	89,9	89,4	0,9	0,24	0,83	0,46
Rendement, % <sup>2</sup>	80,2	80,6	79,8	79,5	0,4	0,04	0,86	0,28
G2, mm <sup>2</sup>	13,8	14,8	13,0	14,3	0,7	0,10	<0,01	0,70
M2, mm <sup>2</sup>	60,6	59,5	58,8	58,1	0,9	0,05	0,23	0,82
TMP <sup>2</sup>	60,9	60,0	61,2	60,2	0,5	0,40	<0,01	0,77
<b>Essai 2</b>								
Poids chaud, kg	91,6	90,1	90,1	91,5	1,1	0,99	0,94	0,19
Rendement, % <sup>2</sup>	79,9	80,1	81,0	80,0	0,3	0,09	0,21	0,06
G2, mm <sup>2</sup>	14,6	18,1	13,5	14,8	1,1	0,05	0,04	0,31
M2, mm <sup>2</sup>	59,8	58,5	58,4	57,0	1,6	0,35	0,37	0,95
TMP <sup>2</sup>	60,2	57,6	60,7	59,6	0,9	0,13	0,03	0,40

1. Analyse de la variance (proc MIXED, SAS) avec en effets principaux le plan d'alimentation (PA), le sexe (S), et l'interaction PA×S, en effet aléatoire le bloc, et la case en unité expérimentale.

2. Le poids chaud est pris en compte en covariable dans le modèle d'analyse.



## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**



- Agence de la Sélection Porcine. 2012. Site : <http://www.asp.asso.fr/>, consulté le 01/12/12.
- Andersen, S. & Pedersen, B. 1996. Growth and food intake curves for group-housed gilts and castrated male pigs. *Animal Science*, 63, 457-464.
- ARC (Agricultural Research Council), 1981. The nutrient requirements of pigs. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, UK. 307 pp.
- Aubry, A. 2011. Les résultats des élevages de porcs français en 2010. *TechniPorc*, 34 (3), 3-8.
- Badouard, B. & Berthelot, N. 2012. Le rendement des porcs charcutiers en France aujourd'hui : quelles conséquences sur les résultats de gestion ? *Journées de la Recherche Porcine*, 44, 243-244.
- Baker, D. H., Becker, D. E., Norton, H. W., Jensen, A. H. & Harmon, B. G. 1966. Some qualitative amino acid needs of adult swine for maintenance. *Journal of Nutrition*, 88, 382-90.
- Barea, R., Dubois, S., Gilbert, H., Sellier, P., van Milgen, J. & Noblet, J. 2010. Energy utilization in pigs selected for high and low residual feed intake. *Journal of Animal Science*, 88, 2062-2072.
- Bastianelli, D. & Sauvant, D. 1997. Modelling the mechanisms of pig growth. *Livestock Production Science*, 51, 97-107.
- Bertolo, R. F., Moehn, S., Pencharz, P. B. & Ball, R. O. 2005. Estimate of the variability of the lysine requirement of growing pigs using the indicator amino acid oxidation technique. *Journal of Animal Science*, 83, 2535-2542.
- Bikker, P., Verstegen, M. W. A., Campbell, R. G. & Kemp, B. 1994. Digestible lysine requirement of gilts with high genetic potential for lean gain, in relation to the level of energy intake. *Journal of Animal Science*, 72, 1744-1753.
- Black, J. L., Campbell, R. G., Williams, I. H., James, K. J. & Davies, G. T. 1986. Simulation of energy and amino acid utilisation in the pig. *Research and Development in Agriculture*, 3, 121-145.
- Black, J. 2009. Models to predict feed intake. In: *Voluntary feed intake in pigs*, Ed. Torrallardona, D. & Roura, E., Wageningen Academic Publishers, Wageningen Netherlands. pp. 323-351.
- Boddicker, N., Gabler, N. K., Spurlock, M. E., Nettleton, D. & Dekkers, J. C. M. 2011. Effects of ad libitum and restricted feed intake on growth performance and body composition of Yorkshire pigs selected for reduced residual feed intake. *Journal of Animal Science*, 89, 40-51.
- Bridges, T. C., Turner, L. W., Smith, E. M., Stahly, T. S. & Loewer, O. J. 1986. A mathematical procedure for estimating animal growth and body composition. *Transactions of the American Association of Agricultural Engineers*, 29, 1342 -1347.
- Brossard, L., van Milgen, J., Lannuzel, P.-Y., Bertinotti, R. & Rivest, J. 2006. Analyse des relations entre croissance et ingestion à partir de cinétiques individuelles : implications dans la définition de profils animaux pour la modélisation. *Journées de la Recherche Porcine*, 38, 217-224.
- Brossard, L., Dourmad, J.-Y., van Milgen, J. & Quiniou, N. 2007. Analyse par modélisation de la variation des performances d'un groupe de porcs en croissance en fonction de l'apport de lysine et du nombre de phases dans le programme d'alimentation. *Journées de la Recherche Porcine*, 39, 95-105.
- Brossard, L., Dourmad, J.-Y., Rivest, J. & van Milgen, J. 2009. Modelling the variation in performance of a population of growing pig as affected by lysine supply and feeding strategy. *Animal*, 3, 1114-1123.
- Brossard, L., Quiniou, N., Dourmad, J.-Y., van Milgen, J. 2010. A herd modelling approach to determine the economically and environmentally most interesting dietary amino acid level during the fattening period. In: *Modelling Nutrient Digestion and Utilisation in Farm Animals*, Sauvant, D., van Milgen, J., Faverdin, P. & Friggens, N. (eds.), Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands. 335-346
- Brossard, L., Dourmad, J.-Y. & Meunier-Salaün, M.-C. 2011. Impact of initial weight heterogeneity and pen density on evolution of weight heterogeneity within groups of growing pigs. In: Proc. of the 62<sup>nd</sup> EAAP annual meeting, Stavanger, Norway, session 39, 255.

- Brossard, L., Quiniou, N., Dourmad, J.-Y. & van Milgen, J. 2012. Prise en compte de la variabilité individuelle dans la modélisation de la réponse des porcs en croissance aux apports alimentaires. *INRA Productions Animales*, 25, 17-27.
- Brouwer, E. 1965. Report of sub-committee on constants and factors. In: Proc. of the 3<sup>rd</sup> Symp, Troon, Scotland. Ed. Blaxter, K. L., EAAP, 11, 441-443.
- Brumm, M. C., Ellis, M., Johnston, L. J., Rozeboom, D. W., Zimmerman, D. R. & NRC-89 Committee on Swine Management. 2002. Effect of removal and remixing of lightweight pigs on performance to slaughter weights. *Journal of Animal Science*, 80, 1166-1172.
- Campbell, R. G. & Taverner, M. R. 1988. Genotype and sex effects on the relationship between energy-intake and protein deposition in growing-pigs. *Journal of Animal Science*, 66, 676-686.
- Canh, T. T., Aarnink, A. J. A., Schutte, J. B., Langhout, D. J. & Verstegen, M. W. A. 1998. Dietary protein affects nitrogen excretion and ammonia emission from slurry of growing-finishing pigs. *Livestock Production Science*, 56, 181-191.
- Canh, T. T., Verstegen, M. W. A., Aarnink, A. J. A. & Schrama, J. W. 1997. Influence of dietary factors on nitrogen partitioning and composition of urine and feces of fattening pigs. *Journal of Animal Science*, 75, 700-706.
- Casey, D. S., Stern, H. S. & Dekkers, J. C. M. 2005. Identification of errors and factors associated with errors in data from electronic swine feeders. *Journal of Animal Science*, 83, 969-982.
- Chen, C. Y., Misztal, I., Tsuruta, S., Zumbach, B., Herring, W. O., Holl, J. & Culbertson, M. 2010. Estimation of genetic parameters of feed intake and daily gain in Durocs using data from electronic swine feeders. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 127, 230-234.
- Cole, D. J. A., Duckworth, J. E. & Holmes, W. 1967. Factors affecting voluntary feed intake in pigs. 1. The effect of digestible energy content of the diet on the intake of castrated male pigs housed in holding pens and in metabolism crates. *Animal Production*, 9, 143-150.
- Collin, A., van Milgen, J., Dubois, S. & Noblet, J. 2001. Effect of high temperature on feeding behaviour and heat production in group-housed young pigs. *British Journal of Nutrition*, 86, 63-70.
- Corpen. 2003. Estimation des rejets d'azote - phosphore - potassium - cuivre et zinc des porcs. Influence de la conduite alimentaire et du mode de logement des animaux sur la nature et la gestion des déjections produites. Ed. Corpen, Paris, 41 pp.
- Courboulay, V., Meunier-Salaün, M.-C. & Rousseau P. 2002. Bien-être et logement des porcs charcutiers : quels travaux conduire au vu des connaissances actuelles ? *Journées de la Recherche Porcine*, 34, 249-255.
- Danfaer, A. 1991. Mathematical modelling of metabolic regulation and growth. *Livestock Production Science*, 27, 1-18.
- Daumas, G. & Causeur, D. 2008. Tests d'homologation des appareils automatiques de classement des carcasses de porc. *Journées Recherche Porcine*, 40, 91-92.
- Daumas, G., Causeur, D. & Predin, J. 2010. Validation de l'équation française de prédiction du taux de muscle des pièces (TMP) des carcasses de porc par la méthode CGM. *Journées de la Recherche Porcine*, 43, 229-230.
- de Greef, K. H., Verstegen, M. W. A. & Kemp, B. 1992. Validation of a porcine growth-model with emphasis on chemical body-composition. *Livestock Production Science*, 32, 163-180.
- de Greef, K. H. & Verstegen, M. W. A. 1995. Evaluation of a concept on energy partitioning in growing pigs. In: *Modelling growth in the pig*, Ed. Moughan, P. J., Verstegen, M. W. A. & Visser-Reyneveld, M. I., Wageningen Pers., Wageningen, The Netherlands, 137-149.
- de Lange, C. F. M. 1995. Framework for a simplified model to demonstrate principles of nutrient partitioning for growth in the pig. In: *Modelling growth in the pig*, Ed. Moughan, P. J., Verstegen, M. W. A. & Visser-Reyneveld, M. I. Wageningen Pers., Wageningen, The Netherlands, 71-85.

- DeDecker, J. M., Ellis, M., Wolter, B. F., Corrigan, B. P. & Curtis, S. E. 2002. Effect of removing pigs from a pen at slaughter weight on the growth performance of the remaining animals. *British Society of Animal Science Annual Meeting*. British Society of Animal Science, York, UK, 1 p.
- Descartes, R. 1637. *Le Discours de la méthode*. A public domain book, format kindle available on line.
- Doeschl-Wilson, A. B., Knap, P. W. & Kinghorn, B. P. 2006. Evaluating animal genotypes through model inversion. In: *Mechanistic modelling in pig and poultry production*, Ed. Gous, R. M., Morris, T. & Fisher, C., CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 163-187.
- Dourmad, J.-Y., Henry, Y., Bourdon, D., Quiniou, N. & Guillou, D. 1993. Effect of growth potential and dietary protein input on growth performance, carcass characteristics and nitrogen output in growing-finishing pigs. In: *Proc. of the 1<sup>st</sup> International Symposium on Nitrogen Flow in Pig Production and Environmental Consequences*, Ed. Verstegen, M. W. A., Den Hartog, L. A., van Kempen, G. J. M. & Metz, J. H. M., Pudoc Scientific Publishers, Wageningen, The Netherlands, EAAP, 69, 206-211.
- Duée, P.-H., Calmes, R. & Desmoulin, B. 1980. Composition en acides aminés des protéines musculaires du porc selon le type génétique. *Annales de Zootechnie*, 29, 31-37.
- Eissen, J. J., de Haan, A. G. & Kanis, E. 1999. Effect of missing data on the estimate of average daily feed intake of growing pigs. *Journal of Animal Science*, 77, 1372-1378.
- Emmans, G. C. 1997. A method to predict the food intake of domestic animals from birth to maturity as a function of time. *Journal of Theoretical Biology*, 186, 189-199.
- Emmans, G. C. & Fisher, C. 1986. Problems in nutritional theory. In: *Nutrient Requirements of Poultry and Nutritional Research*. Ed. Fisher, C. and Boorman, K. N., Butterworths, London, 9-39.
- Emmans, G.C. & Kyriazakis, I. 1997. Models of pig growth: problems and proposed solutions. *Livestock Production Science*, 51, 119-129.
- Emmans, G. C. & Kyriazakis, I. 1999. Growth and body composition. In: *A Quantitative Biology of the Pig*, Ed. Kyriazakis I., CAB International, Wallingford, UK., 181-197.
- Evapig. 2008. de prédiction des valeurs énergétiques, d'acides aminés et de phosphore des matières premières et des aliments pour le porc. Ed. INRA, AFZ et Ajinomoto Eurolysine SAS. Site : <http://www.evapig.com/x-home-fr>.
- Fabrega, E., Tibau, J., Soler, J., Fernandez, J., Font, J., Carrion, D., Diestre, A. & Manteca, X. 2003. Feeding patterns, growth performance and carcass traits in group-housed growing-finishing pigs: the effect of terminal sire line, halothane genotype and age. *Animal Science*, 77, 11-21.
- Ferguson, N. S. 2006. Basic concepts describing animal growth and feed intake. In: *Mechanistic Modelling in Pig and Poultry Production*, Ed. Gous, R., Morris, T. & Fisher, C., CAB International Publishing, Wallingford, UK, 22-53.
- Ferguson, N. S. & Gous, R. M. 1993. Evaluation of pig genotypes .1. Theoretical aspects of measuring genetic-parameters. *Animal Production*, 56, 233-243.
- Ferguson, N. S., Gous, R. M. & Emmans, G. C. 1994. Preferred components for the construction of a new simulation-model of growth, feed intake and nutrient-requirements of growing pigs. *South African Journal of Animal Science*, 24, 10-17.
- Ferguson, N. S., Gous, R. M. & Emmans, G. C. 1997. Predicting the effects of animal variation on growth and food intake in growing pigs using simulation modelling. *Animal Science*, 64, 513-522.
- Ferguson, N. S. & Kyriazis, S. T. 2003. Evaluation of the growth parameters of six commercial crossbred pig genotypes - 1. Under commercial housing conditions in individual pens. *South African Journal of Animal Science*, 33, 11-20.
- Flury, B. 1988. Common principal components and related multivariate models. 1<sup>st</sup> Ed. Wiley, New York. 258 pp.
- France J. & Thornley J. M. H., 1984. *Mathematical Models in Agriculture*. Butterworths, London, UK, 335 p.p

- Fuller, M. F., McWilliam, R., Wang, T. C. & Giles, L. R. 1989. The optimum dietary amino-acid pattern for growing pigs .2. Requirements for maintenance and for tissue protein accretion. *British Journal of Nutrition*, 62, 255-267.
- Fuller, M. F., Franklin, M. F., McWilliam, R. & Pennie, K. 1995. The responses of growing pigs, of different sex and genotype, to dietary energy and protein. *Animal Science*, 60, 291-298.
- Gompertz, B. 1825. On nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 115, 513-583.
- Gondret, F., Lefaucheur, L., Louveau, L., Lebret, B., Pichodo, X., & Le Cozler, Y. 2005. Influence of piglet birth weight on postnatal growth performance, tissue lipogenic capacity and muscle histological traits at market weight. *Livestock Production Science*, 93, 137-146.
- Gonyou, H. W. & Stricklin, W. R. 1998. Effects of floor area allowance and group size on the productivity of growing/finishing pigs. *Journal of Animal Science*, 76, 1326-1330.
- Gonyou, H. W., Brumm, M. C., Bush, E., Deen, J., Edwards, S. A., Fangman, T., McGlone, J. J., Meunier-Salaün, M.-C., Morrison, R. B., Spooler, H., Sundberg, P. L. & Johnson, A. K. 2006. Application of broken-line analysis to assess floor space requirements of nursery and grower-finisher pigs expressed on an allometric basis. *Journal of Animal Science*, 84, 229-235.
- Green, D. M., Brotherstone, S., Schofield, C. P. & Whittemore, C. T. 2003. Food intake and live growth performance of pigs measured automatically and continuously from 25 to 115 kg live weight. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83, 1150-1155.
- Gu, Y., Schinckel, A. P. & Martin, T. G. 1992. Growth, development, and carcass composition in 5 genotypes of swine. *Journal of Animal Science*, 70, 1719-1729.
- Halas, V., Dijkstra, J., Babinszky, L., Verstegen, M. W. A., & Gerrits, W. J. J. 2004. Modelling of nutrient partitioning in growing pigs to predict their anatomical body composition. 1. Model description. *British Journal of Nutrition*, 92, 725-734.
- Hauschild, L., Pomar, C. & Lovatto, P. A. 2010. Systematic comparison of the empirical and factorial methods used to estimate the nutrient requirements of growing pigs. *Animal*, 4, 714-723.
- Hebert, H., Lurette, A., Fourichon, C., Seegers, H. & Belloc, C. 2007. Modalités de conduite en bandes en élevage porcin : effet sur les contacts entre animaux. *Journées de la Recherche Porcine*, 39, 345-350.
- Heger, J., Krizova, L., Sustala, M., Nitrayova, S., Patras, P. & Hampel, A. 2007. Assessment of statistical models describing individual and group response of pigs to threonine intake. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 16, 420-432.
- Heger, J., Krizova, L., Sustala, M., Nitrayova, S., Patras, P. & Hampel, D. 2008. Individual response of growing pigs to sulphur amino acid intake. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 92, 18-28.
- Heger, J., Krizova, L., Sustala, M., Nitrayova, S., Patras, P. & Hampel, D. 2009. Individual response of growing pigs to lysine intake. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 93, 538-546.
- Henry, Y. 1993. Affinement du concept de la protéine idéale pour le porc en croissance. *INRA Productions Animales*, 6, 199-212.
- Husson, F., Josse, J., Lê, S. & Mazet, J. 2010a. FactoMineR: Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining with R. R package version 1.14. <http://CRAN.R-project.org/package=FactoMineR>
- Husson, F., Lê, S. & Pagès, J. 2010b. *Exploratory Multivariate Analysis by Example Using R*. Chapman and Hall. CRC Computer Science & Data Analysis, Floride, USA. 240 pp.
- Huxley, J. S. 1932. Problems of relative growth, Methuen and Co. ed., London, UK, 276 pp.
- Hyun, Y. & Ellis, M. 2000. Relationships between feed intake traits, monitored using a computerized feed intake recording system, and growth performance and body composition of group-housed pigs. *Asian-Australasian Journal of Animal Science*, 13, 1717-1725.

- Hyun, Y. & Ellis, M. 2001. Effect of group size and feeder type on growth performance and feeding patterns in growing pigs. *Journal of Animal Science*, 79, 803-810.
- IFIP, AGPM, Arvalis, Unip, Cetiom. 2002. Tables d'alimentation pour les porcs. Ed. IFIP, Paris, 40 pp.
- IFIP. 2005-2010. Note mensuelle de conjoncture des matières premières. Ed. IFIP, Paris, 4 pp.
- IFIP. 2012. Le Porc par les chiffres. Ed. IFIP, Paris, 45 pp.
- INRA-AFZ. 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. Ed. INRA, Paris, 301 pp.
- InraPorc®. 2006. A model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. Available on line : <http://w3.rennes.inra.fr/inraporc/>
- Kanis, E. & Koops, W. J. 1990. Daily gain, food-intake and food efficiency in pigs during the growing period. *Animal Production*, 50, 353-364.
- Karege, C. 1991. Influence de l'âge et du sexe sur l'utilisation de l'énergie et la composition corporelle chez le porc en croissance. Thèse de l'Université de Montpellier II, France, 254 pp.
- Kemm, E. H., Siebrits, F. K., Ras, M. N. & Badenhorst, H. A. 1991. Feed-intake, live mass-gain, body-composition and protein deposition in pigs fed 3 protein-levels. *South African Journal of Animal Science*, 21, 127-136.
- Kloareg, M., Noblet, J. & van Milgen, J. 2006. Estimation of whole body lipid mass in finishing pigs. *Animal Science*, 82, 241-251.
- Knabe, D. A. 1996. Optimizing the protein nutrition of growing-finishing pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 60, 331-341.
- Knap, P. W. 1995. Aspects of stochasticity: variation between animals. In: *Modelling growth in the pig*. Ed. Moughan, P. J., Verstegen, M. W. A. & Visser-Reyneveld, M. I., Wageningen Pers., Wageningen, The Netherlands, 165-172.
- Knap, P. W. 1999. Simulation of growth in pigs: evaluation of a model to relate thermoregulation to body protein and lipid content and deposition. *Animal Science*, 68, 655-679.
- Knap, P. W. 2000. Stochastic simulation of growth in pigs: relations between body composition and maintenance requirements as mediated through protein turn-over and thermoregulation. *Animal Science*, 71, 11-30.
- Knap, P. W. & Schrama, J. W. 1996. Simulation of growth in pigs: Approximation of protein turn-over parameters. *Animal Science*, 63, 533-547.
- Knap, P. W., Roehe, R., Kolstad, K., Pomar, C. & Luiting, P. 2003. Characterization of pig genotypes for growth modeling. *Journal of Animal Science*, 81, E187-E195.
- Kotarbinska, M. & Kielanowski, J. 1967. Energy balance studies with growing pigs by the comparative slaughter technique. In: *Proc. of the 4<sup>th</sup> Symp.* Ed. Blaxter, K. L., Kielanowski, J. & Thorbek, G., Warsaw, Poland, EAAP, 12, 299-310.
- Kyriazakis, I. 1999. Future directions for models in pig biology. In: *A Quantitative Biology of the Pig*. Ed. Kyriazakis, I., CAB International, Wallingford, UK, 381-388.
- Kyriazakis, I. & Emmans, G.C. 1993. Whole body amino acid composition of the growing pig. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 62, 29-33.
- Kyriazakis, I. & Emmans, G. C. 1999. Voluntary feed intake and diet selection. In: *A Quantitative Biology of the Pig*. Ed. Kyriazakis, I., CAB International, Wallingford, UK, 229-248.
- Kyriazakis, I. & Sandberg F. B. 2006. The problem of predicting the partitioning of scarce resources during sickness and health in pigs. In: *Mechanistic Modelling in Pig and Poultry Production*, Gous, R., Morris, T. & Fisher, C. (eds.), CAB International Publishing, Wallingford, UK. pp. 117-142.
- Labroue, F., Guéblez, R., Meunier-Salaün, M.-C. & Sellier, P. 1994. Effets des facteurs liés au groupe sur le comportement alimentaire des porcs en croissance. *Journées de la Recherche Porcine*, 29, 299-304.

- Le Bellego, L., van Milgen, J. & Noblet, J. 2002. Effect of high ambient temperature on protein and lipid deposition and energy utilization in growing pigs. *Animal Science*, 75, 85-96.
- Le Cozler, Y., Pichodo, X., Roy, H., Guyomarc'h, C., Pellois, H., Quiniou, N., Louveau, I., Leuret, B., Lefaucheur, L. & Gondret, F. 2004. Influence du poids individuel et de la taille de la portée à la naissance sur la survie du porcelet, ses performances de croissance et d'abattage et la qualité de la viande. *Journées de la Recherche Porcine*, 36, 443-450.
- Lê, S., Husson, F. & Pagès, J. 2007. DMFA: Dual Multiple Factor Analysis. 12<sup>th</sup> International Conference on Applied Stochastic Models and Data Analysis. Chania, Crete, Greece.
- Lefaucheur, L., Ledividich, J., Mourot, J., Monin, G., Ecolan, P. & Krauss, D. 1991. Influence of environmental-temperature on growth, muscle and adipose-tissue metabolism, and meat quality in swine. *Journal of Animal Science*, 69, 2844-2854.
- Levasseur, P., Courboulay, V., Meunier-Salaün, M.-C., Trespeuch, P. & Le Denmat, M. 1996. Alimentation automatisée des porcs en finition - Effet du rationnement, du sexe et du statut hiérarchique sur des paramètres descriptifs du comportement alimentaire et sur le niveau d'agressivité. *Journées de la Recherche Porcine*, 28, 439-444.
- Lizardo, R., van Milgen, J., Mourot, J., Noblet, J., & Bonneau, M. 2002. A nutritional model of fatty acid composition in the growing-finishing pig. *Livestock Production Science*, 75, 167-182.
- Lopez, J., Jesse, G. W., Becker, B. A. & Ellersieck, M. R. 1991. Effects of temperature on the performance of finishing swine. 1. Effects of a hot, diurnal temperature on average daily gain, feed-intake, and feed-efficiency. *Journal of Animal Science*, 69, 1843-1849.
- Lopez, S., France, J., Gerrits, W. J. J., Dhanoa, M. S., Humphries, D. J. & Dijkstra, J. 2000. A generalized Michaelis-Menten equation for the analysis of growth. *Journal of Animal Science*, 78, 1816-1828.
- Lorenzo Bermejo, J., Roehe, R., Rave, G. & Kalm, E. 2000. Optimization of feed intake curve in growing pigs using linear and non linear models. In: Proc. of the 51<sup>st</sup> EAAP meeting, The Hague, The Netherlands, Book of Abstracts 6, 44, G2.53.
- Lorenzo Bermejo, J., Roehe, R., Rave, G. & Kalm, E. 2003a. Comparison of linear and nonlinear functions and covariance structures to estimate feed intake pattern in growing pigs. *Livestock Production Science*, 82, 15-26.
- Lorenzo Bermejo, J., Roehe, R., Schulze, V., Looft, H. & Kalm, E. 2003b. Genetic change of feed intake curves in growing pigs using non-linear two-stage genetic analysis and linear random regression models. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 120, 217-227.
- Lovatto, P. A. & Sauvant, D. 2003. Modeling homeorhetic and homeostatic controls of pig growth. *Journal of Animal Science*, 81, 683-696.
- Luiting, P. & Knap, P. W. 2006. Comparison of pig growth models - the genetic point of view. In: *Mechanistic Modelling in Pig and Poultry Production* Ed. Gous, R., Morris, T. & Fisher, C., CAB International Publishing, Wallingford, UK. 260-281.
- Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M. & Hornik, K. 2012. cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions. R package version 1.14.2, URL <http://CRAN.R-project.org/package=cluster>.
- Magowan, E., McCann, M. E. E., Beattie, V. E., McCracken, K. J., Bradford, R., Scott, M. D., Robinson, M.-J. & Gordon, F. J. 2009. The effect of dietary regime and method of grouping on the variation in growth rate between pigs. *British Society of Animal Science Annual Meeting*. British Society of Animal Science, Southport, UK, 209.
- Marsaglia, G., Tsang, W. W. & Wang, J. 2003. Evaluating Kolmogorov's Distribution. *Journal of Statistical Software*, 8, 1-4.
- Massabie, P. & Granier, R. 1996. Incidence d'un faible débit de ventilation sur la qualité de l'air, l'état de santé et les performances zootechniques du porc à l'engrais élevé à 24°C. *Journées de la Recherche Porcine*, 28, 201-208.

- Massabie, P., Granier, R. & Le Dividich, J. 1996. Influence de la température ambiante sur les performances zootechniques du porc à l'engrais alimenté ad libitum. *Journées de la Recherche Porcine*, 28, 189-194.
- Maupertuis, F. & Dubois, A. 2005. Comment réduire l'hétérogénéité de poids induite par le rationnement alimentaire des porcs sur paille ? *Journées de la Recherche Porcine*, 37, 253-258
- Mémento de l'éleveur de porc. 2000. 6<sup>ème</sup> édition, Ed. IFIP, Paris, 374 pp.
- Meunier-Salaün, M.-C., Vantrimpont, M. N., Raab, A. & Dantzer, R. 1987. Effect of floor area restriction upon performance, behavior and physiology of growing-finishing pigs. *Journal of Animal Science*, 64, 1371-1377.
- Mohn, S., Gillis, A. M., Moughan, P. J. & de Lange, C. F. M. 2000. Influence of dietary lysine and energy intakes on body protein deposition and lysine utilization in the growing pig. *Journal of Animal Science*, 78, 1510-1519.
- Monziols, M. & Hemonic, A. 2010. Mise au point d'une mesure de la teneur en muscle par tomographie RX *in vivo*. *TechniPorc*, 34 (4), 27-32.
- Morel, P. C. H., Wood, G. R. & Sirisatien, D. 2008. Effect of genotype, population size and genotype variation on optimal diet determination for growing pigs. *Acta Horticulturae*, 802, 287-292.
- Morel, P. C. H., Sirisatien, D. & Wood, G. R. 2012. Effect of pig type, costs and prices, and dietary restraints on dietary nutrient specification for maximum profitability in grower-finisher pig herds: A theoretical approach. *Livestock Science*. 148, 255-267
- Moughan, P. J., Smith, W. C. & Pearson, G. 1987. Description and validation of a model simulating growth in the pig (20-90 kg liveweight). *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 30, 481-489.
- Noblet, J., Henry, Y. & Dubois, S. 1987. Effect of protein and lysine levels in the diet on body gain composition and energy-utilization in growing-pigs. *Journal of Animal Science*, 65, 717-726.
- Noblet, J., Karege, C. & Dubois, S. 1994a. Prise en compte de la variabilité de la composition corporelle pour la prévision du besoin énergétique et de l'efficacité alimentaire chez le porc en croissance. *Journées de la Recherche Porcine*, 26, 267-276.
- Noblet, J., Shi, X. S., Fortune, H., Dubois, S., Lechevestrier, Y., Corniaux, C., Sauvart, D. & Henry, Y. 1994b. Teneur en énergie nette des aliments chez le porc. Mesure, prédiction et validation aux différents stades de sa vie. *Journées de la Recherche Porcine*, 26, 235-250.
- Noblet, J. & Quiniou, N. 1999. Principaux facteurs de variation du besoin en acides aminés. *Techniporc*, 22 (4), 9-16.
- Noblet, J., Karege, C., Dubois, S. & van Milgen, J. 1999. Metabolic utilization of energy and maintenance requirements in growing pigs: Effects of sex and genotype. *Journal of Animal Science*, 77, 1208-1216.
- Noblet, J. & van Milgen, J. 2004. Energy value of pig feeds: effect of pig body weight and energy evaluation system. *Journal of Animal Science*, 82, E229-E238.
- NRC. 1998. Nutrient requirements of swine. National Academy Press, Washington, DC. 192 pp.
- NRC. 2012. Nutrient requirements of swine. National Academy Press, Washington, DC. 400 pp.
- O'Connell, N. E., Beattie, V. & Watt, D. 2005. Influence of regrouping strategy on performance, behaviour and carcass parameters in pigs. *Livestock Production Science*, 97, 107-115.
- O'Quinn, P. R., Dritz, S. S., Goodband, R. D., Tokach, M. D., Swanson, J. C., Nelssen, J. L. & Musser, R. E. 2001. Sorting growing-finishing pigs by weight fails to improve growth performance or weight variation. *Journal of Swine Health and Production*, 9, 11-16.
- Parks, J. R. 1982. A theory of feeding and growth in animals. Springer Verlag, Berlin, Allemagne, 322 pp.
- Pastorelli, H. 2012. Réponses d'ingestion et de croissance de porcs sevrés suite à une perturbation de leur santé. Thèse Agrocampus Ouest, 200 pp.

- Patience, J. F. 2009. New tools to manage variability throughout the pork production system. In: Proc. ABRAVES, Uberlandia, Brazil, 210-221.
- Patience, J. F. & Beaulieu, A. D. 2006. Variation in the finishing barn. In: Proc. of the Manitoba Swine Seminar. Manitoba Agric., Food and Rural Initiatives, Manitoba, Canada, 20, 129-138.
- Petersen, S. T. 2010. The potential ability of swine nutrition to influence environmental factors positively. *Journal of Animal Science*, 88, E95-E101.
- Phillips, P. C. & Arnold, S. J. 1999. Hierarchical comparison of genetic variance-covariance matrices. I. Using the Flury hierarchy. *Evolution*, 53, 1506-1515.
- Pomar, C., Harris, D. L. & Minvielle, F. 1991. Computer-simulation model of swine production systems .1. Modeling the growth of young-pigs. *Journal of Animal Science*, 69, 1468-1488.
- Pomar, C., Kyriazakis, I., Emmans, G. C. & Knap, P. W. 2003. Modeling stochasticity: Dealing with populations rather than individual pigs. *Journal of Animal Science*, 81, E178-E186.
- Pomar, C., Pomar, J., Babot, D. & Dubeau, F. 2007. Effet d'une alimentation multiphase quotidienne sur les performances zootechniques, la composition corporelle et les rejets d'azote et de phosphore du porc charcutier. *Journées de la Recherche Porcine*, 39, 23-30.
- Pomar, C., Dubeau, F. & van Milgen, J. 2009a. la détermination des besoins nutritionnels, la formulation multicritère et l'ajustement progressif des apports de nutriments au besoin des porcs : des outils pour maîtriser les rejets d'azote et de phosphore. *INRA Productions animales*, 22, 49-54.
- Pomar, C., Hauschild, L., Zhang, G. H., Pomar, J. & Lovatto, P. A. 2009b. Applying precision feeding techniques in growing-finishing pig operations. *Revista Brasileira De Zootecnia-Brazilian Journal of Animal Science*, 38, 226-237.
- Pomar, C., Hauschild, L., Zhang, G. H., Pomar, J. & Lovatto, P. A. 2010. Precision feeding can significantly reduce feeding cost and nutrient excretion in growing animals. In: *Proc. of the 7<sup>th</sup> International Workshop on Modelling Nutrient Digestion and Utilisation in Farm Animals*. Ed. Sauvant, D., van Milgen, J., Faverdin, P. & Friggens, N. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, 327-334.
- Quiniou, N. & Noblet, J. 1995. Prediction of tissular body-composition from protein and lipid deposition in growing pigs. *Journal of Animal Science*, 73, 1567-1575.
- Quiniou, N., Dourmad, J.-Y. & Noblet, J. 1996a. Effect of energy intake on the performance of different types of pig from 45 to 100 kg body weight. 1. Protein and lipid deposition. *Animal Science*, 63, 277-288.
- Quiniou, N., Noblet, J. & Dourmad, J.-Y. 1996b. Effect of energy intake on the performance of different types of pig from 45 to 100 kg body weight. 2. Tissue gain. *Animal Science*, 63, 289-296.
- Quiniou, N., Noblet, J., Le Dividich, J., Dubois, S. & Labroue, F. 1997. Influence de l'abaissement de la température ambiante et du poids vif sur le comportement alimentaire des porcs en croissance élevés en groupe. *Journées de la Recherche Porcine*, 29, 135-140.
- Quiniou, N. & Noblet, J. 1999. Influence of high ambient temperatures on performance of multiparous lactating sows. *Journal of Animal Science*, 77, 2124-2134.
- Quiniou, N., Noblet, J., Dourmad, J.-Y. & van Milgen, J. 1999. Influence of energy supply on growth characteristics in pigs and consequences for growth modelling. *Livestock Production Science*, 60, 317-328.
- Quiniou, N., Dubois, S. & Noblet, J. 2000. Voluntary feed intake and feeding behaviour of group-housed growing pigs are affected by ambient temperature and body weight. *Livestock Production Science*, 63, 245-253.
- Quiniou, N., Dagorn, J. & Gaudré, D. 2002. Variation of piglets birth weight and consequences on subsequent performance. *Livestock Production Science*, 78, 63-70.
- Quiniou, N., Gaudré, D., Pichodo, X. & Le Cozler, Y. 2004. Caractérisation de l'indice de consommation pendant l'engraissement selon le poids des porcelets à la naissance. *Journées de la Recherche Porcine*, 36, 404-408.

- Quiniou, N., Brossard, L., Gaudré, D., van Milgen, J. & Salaün, Y. 2007. Optimum économique du niveau en acides aminés dans les aliments pour porcs charcutiers. Impact du contexte de prix des matières premières et de la conduite d'élevage. *TechniPorc*, 30 (3), 26-36.
- Quiniou, N. & Massiot, A. 2008. Alimenter à volonté ou rationner le porc charcutier : quel impact sur les performances de croissance. Ed. IFIP, Paris, 28 pp.
- Quiniou, N., Courboulay, V., Salaün, Y. & Chevillon, P. 2010. Conséquences de la non castration des porcs mâles sur les performances de croissance et le comportement : comparaison avec les mâles castrés et les femelles. *Journées de la Recherche Porcine*, 42, 113-118.
- Quiniou, N., Primot, Y., Peyronnet, C. & Quinsac, A. 2011. Des aliments porcs moins riches en protéines et formulés à base de tourteau de colza et d'acides aminés de synthèse, dont la L-Valine, permettent de réduire le recours au tourteau de soja. *Journées de la Recherche Porcine*, 43, 135-136.
- Quiniou, N. & Noblet, J. 2012. Effect of the dietary net energy content on the spontaneous feed intake of growing-finishing pigs housed individually. *Journal of Animal Science*, 90, 4362-4372.
- Quiniou, N., Brossard, L., van Milgen, J., Salaün, Y., Quesnel, H., Gondret, F. & Dourmad, J.-Y. 2012. La variabilité des performances animales en élevage porcin : description et implications pratiques. *INRA Productions Animales*, 25, 5-16.
- Quiniou, N., Courboulay, V., Goues, T., Le Roux, A. & Chevillon, P. 2013. Incidence des conditions d'élevage sur les performances de croissance, les caractéristiques de carcasse et le risque d'odeur des porcs mâles entiers. *Journées de la Recherche Porcine*, 45, 57-62.
- R Development Core Team. 2010. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. //www.R-project.org/.
- Ramaekers, P. J. L. 1996. Control of individual daily growth in group-housed pigs using feeding stations. Thèse de la Wageningen Agricultural University, Pays Bas, 133 pp.
- Richards, F. J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, 10, 290-300.
- Ripley, B. D. 1987. *Stochastic simulation*. Wiley, New York, 237 pp.
- Robertson, T. B. 1908. On the normal rate of growth of an individual and its biochemical significance. *Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen*, 25, 581-614.
- S.A.S. 2008. Version 9.2. S.A.S. Inst. Inc., Cary, NC.
- Saintilan, R., 2012. Etude de nouvelles approches pour la sélection sur l'efficacité alimentaire chez le porc en croissance et des perspectives de leur mise en place. Thèse AgroParisTech, 192 pp.
- Saintilan, R., Merour, I., Schwob, S., Sellier, P., Bidanel, J. & Gilbert, H. 2011. Genetic parameters and halothane genotype effect for residual feed intake in Pietrain growing pigs. *Livestock Science*, 142, 203-209.
- Sauvant, D. 2005. La modélisation de la réponse des porcs aux pratiques alimentaires et d'élevage. *Journées de la Recherche Porcine*, 37, 283-290.
- Schiavon, S., Gallo, L., Carnier, P., Tagliapietra, F., Ceolin, C., Prandini, A. & Piva, A. 2007. Use of simple body measurements and allometry to predict the chemical growth and feed intake in pigs. *Italian Journal of Animal Science*, 6, 27-44.
- Schinckel, A. P. & de Lange, C. F. M. 1996. Characterization of growth parameters needed as inputs for pig growth models. *Journal of Animal Science*, 74, 2021-2036.
- Schinckel, A. P., Li, N., Preckel, P. V., Einstein, M. E. & Miller, D. 2003. Development of a stochastic pig compositional growth model. *Professional Animal Scientist*, 19, 255-260.
- Schinckel, A. P., Einstein, M. E., Jungst, S., Booher, C. & Newman, S. 2010. Evaluation of the impact of pig birth weight on grow-finish performance, backfat depth, and loin depth. *Professional Animal Scientist*, 26, 51-69.
- Schinckel, A. P., Einstein, M. E., Jungst, S., Matthews, J. O., Booher, C., Dreadin, T., Fralick, C., Wilson, E. & Boyd, R. D. 2012. Daily feed intake, energy intake, growth rate and measures of

- dietary energy efficiency of pigs from four sire lines fed diets with high or low metabolizable and net energy concentrations. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 25, 410-420.
- Schinckel, A. P., Pence, S., Einstein, P. V., Hinson, R., Preckel, P. V., Radcliffe, J. S. & Richert, B. T., 2006. Evaluation of different mixed model non linear function on pigs fed low-nutrient excretion diets. *Professional Animal Scientist*, 22, 401-408.
- Schulin-Zeuthen, M., Kebreab, E., Dijkstra, J., Lopez, S., Bannink, A., Kuhl, H. D., Thornley, J. H. M. & France, J. 2008. A comparison of the Schumacher with other functions for describing growth in pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 143, 314-327.
- Schulze, V., Roehe, R., Bermejo, J. L., Looft, H. & Kalm, E. 2002. Genetic associations between observed feed intake measurements during growth, feed intake curve parameters and growing-finishing performances of central tested boars. *Livestock Production Science*, 73, 199-211.
- Serrano, M. P., Valencia, D. G., Fuentetaja, A., Lazaro, R. & Mateos, G. G. 2009. Influence of feed restriction and sex on growth performance and carcass and meat quality of Iberian pigs reared indoors. *Journal of Animal Science*, 87, 1676-1685.
- Stein, H. H., Pedersen, C., Wirt, A. R. & Bohke, R. A. 2005. Additivity of values for apparent and standardized ileal digestibility of amino acids in mixed diets fed to growing pigs. *Journal of Animal Science*, 83, 2387-2395.
- Strathe, A. B. 2009. Stochastic modelling of feed intake, growth and body composition in pigs. PhD thesis University of Copenhagen, Denmark, 156 pp.
- Strathe, A. B., Sorensen, H. & Danfaer, A. 2009. A new mathematical model for combining growth and energy intake in animals: The case of the growing pig. *Journal of Theoretical Biology*, 261, 165-175.
- Strathe, A. B., Danfaer, A., Sorensen, H. & Kebreab, E. 2010. A multilevel nonlinear mixed-effects approach to model growth in pigs. *Journal of Animal Science*, 88, 638-649.
- Thorburn, W. M. 1915. Occam's razor. *Mind*, 24, 287-288.
- TMV 1991. Technisch Model Varkensvoeding, Werkgroep, Werkgroep - Technisch Model Proefstation voor de varkenshouderij. Varkensvoeding. Rosmalen, The Netherlands. (DOS ed.).
- TMV 1994. Informatiemodel Technisch Model. In: *Varkensvoeding, Proefstation voor de Varkenshouderij*. Ed. van der Peet-Schwering, C. M. C., H. J. Vos, van der Peet, G. F. V., Versteegen, M. W. A., Kanis, E., Smits, C. H. M., de Vries, A. G. & Lenis, N. P., Rosmalen, The Netherlands *Report P 1.117*, 123 pp.
- Tullis, J. B. 1982. Protein growth in pigs. Thèse de l'Université d'Edinburgh, Ecosse, 183 pp.
- Uniporc Ouest. 2012. Résultats annuels 2011. [http://www.uniporc-ouest.com/Plaqueette\\_2011.pdf](http://www.uniporc-ouest.com/Plaqueette_2011.pdf), page consultée le 23/02/2012.
- van Milgen, J. & Noblet, J. 1999. Energy partitioning in growing pigs: The use of a multivariate model as an alternative for the factorial analysis. *Journal of Animal Science*, 77, 2154-2162.
- van Milgen, J., Valancogne, A., Dubois, S., Dourmad, J.-Y., Sève, B. & Noblet, J. 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 143, 387-405.
- van Milgen, J., Noblet, J., Dourmad, J.-Y., Labussière, E., Garcia-Launay, F. & Brossard, L., 2012. Precision pork production: Predicting the impact of nutritional strategies on carcass quality. *Meat Science*, 92, 182-187.
- Venables, W. N. & Ripley, B. D. 2002. *Modern Applied Statistics with S*. 4<sup>th</sup> edition, Ed. Springer, New York, 495 pp.
- von Bertalanffy, L. 1957. Quantitative laws for metabolism and growth. *Quarterly Reviews of Biology*, 32, 217-232.
- Wang, T. C. & Fuller, M. F. 1989. The optimum dietary amino-acid pattern for growing-pigs .1. Experiments by amino-acid deletion. *British Journal of Nutrition*, 62, 77-89.

- Wellock, I. J., Emmans, G. C. & Kyriazakis, I. 2003a. Modelling the effects of thermal environment and dietary composition on pig performance: model logic and concepts. *Animal Science*, 77, 255-266.
- Wellock, I. J., Emmans, G. C. & Kyriazakis, I. 2003b. Predicting the consequences of social stressors on pig food intake and performance. *Journal of Animal Science*, 81, 2995-3007.
- Wellock, I. J., Emmans, G. C. & Kyriazakis, I. 2004a. Describing and predicting potential growth in the pig. *Animal Science*, 78, 379-388.
- Wellock, I. J., Emmans, G. C. & Kyriazakis, I. 2004b. Modeling the effects of stressors on the performance of populations of pigs. *Journal of Animal Science*, 82, 2442-2450.
- Whittemore, C. T., & Fawcett, R. H. 1974. Model responses of the growing pig to the dietary intake of energy and protein. *Animal Production*, 19, 221-231.
- Whittemore, C. T. & Fawcett, R. H. 1976. Theoretical aspects of a flexible model to simulate protein and lipid growth in pigs. *Animal Production*, 22, 87-96.
- Whittemore, C. T. 1983a. The science and practice of pig production. Longman Ltd, London, UK, 661 pp.
- Whittemore, C. T. 1983b. Development of recommended energy and protein allowances for growing-pigs. *Agricultural Systems*, 11, 159-186.
- Whittemore, C. T., Tullis, J. B. & Emmans, G. C. 1988. Protein-growth in pigs. *Animal Production*, 46, 437-445.
- Whittemore, C. T., Kerr, J. C. & Cameron, N. D. 1995. An approach to prediction of feed-intake in growing pigs using simple body measurements. *Agricultural Systems*, 47, 235-244.
- Whittemore, C. T., Green, D. M. & Knap, P. W. 2001. Technical review of the energy and protein requirements of growing pigs: food intake. *Animal Science*, 73, 3-17.
- Yoosuk, S., Ong, H. B., Roan, S. W., Morgan, C. A. & Whittemore, C. T. 2011. A simulation model for predicting the voluntary feed intake of a growing pig. *Acta Agriculturae Scandinavica Section a-Animal Science*, 61, 168-186.



## RESUME

L'intégration de la variabilité entre individus est d'un grand intérêt en modélisation de la croissance du porc. Ce travail de thèse vise à (i) produire des données permettant de décrire la variabilité entre individus issus de différents croisements terminaux élevés en France, (ii) analyser les données obtenues afin de décrire la structure de la variabilité de ces populations et l'exploiter en modélisation, et enfin (iii) proposer et tester des stratégies alimentaires conciliant objectifs de production et de protection de l'environnement. Une base de données contenant les consommations journalières et les poids vifs de 1288 porcs femelles et mâles castrés en croissance issus de dix croisements différents et de dix bandes, a été constituée. Chaque animal de la base a été caractérisé par cinq variables décrivant un individu dans le modèle InraPorc. Nos résultats montrent que la structure de variance-covariance entre ces variables diffère d'un groupe à l'autre, un groupe étant défini par la bande et le sexe x croisement. Un patron de variance-covariance représente un groupe par une matrice de variance-covariance des variables, leur distribution, et un vecteur spécifique des moyennes des variables. A partir du nouveau générateur de porcs virtuels et de ce patron de variance-covariance, une population virtuelle de 2000 porcs a été générée pour simuler l'effet de la stratégie alimentaire et du contexte de prix des matières premières sur les performances moyennes et leur variabilité, et sur les rejets azotés. Notre étude montre notamment qu'en alimentation biphasé, une restriction alimentaire maîtrisée permet d'améliorer l'hétérogénéité du poids, la marge par porc et les rejets. Un essai zootechnique a permis de confirmer la pertinence de certains résultats de simulation. L'ensemble de ce travail permet d'envisager à terme l'intégration d'une dimension populationnelle dans les modèles et outils d'aide à la décision qui en sont issus.

**Mots clés :** porc, croissance, variabilité, covariance, modélisation, stratégies alimentaires

## ABSTRACT

**Title: Integrating the variability of growing pigs in modelling of nutritional requirements and investigations on feeding strategies to control heterogeneity among pigs in farm**

The integration of variability among individuals is of a great interest in pig growth modelling. This PhD work aims (i) to produce data allowing the description of the variability among individuals from different terminal French crossbreeds, (ii) to analyze the obtained data to describe the structure of the variability of these populations and to use it in modelling approaches, and (iii) to propose and test strategies that conciliate production goals and environmental considerations. A database was built, based on live weight and daily feed intake from 1288 growing gilts and barrows, issued from ten different crossbreeds and ten batches. Each animal was characterized by five variables describing an individual profile in the model InraPorc. The results suggest that the variance-covariance structures among these variables vary from one group of pigs to another, a group being defined by the batch and the sex x crossbred combination. A variance-covariance pattern relies on a variance-covariance matrix of variables, their distribution, and a population-specific vector of variables means. A virtual population of 2000 pigs was generated using a new generator of virtual pigs and the proposed variance-covariance mean pattern. This population was used to simulate the effect of feeding strategy and feed price context on average performance, variation of live weight among pigs, and N output. Our study shows that a controlled dietary restriction combined with a two-phase feeding strategy allows an improvement of final weight heterogeneity, margin per pig and N excretion. An *in vivo* trial confirmed the relevance of simulation results. This work allows considering future integration of a population dimension in growth models and tools.

**Key-words:** pig, growth, variability, covariance, modelling, feeding strategies