



HAL
open science

Comment optimiser la séquence alimentaire des porcs en croissance et engraissement sur des critères économiques et environnementaux ?

Thomas Plantevin

► To cite this version:

Thomas Plantevin. Comment optimiser la séquence alimentaire des porcs en croissance et engraissement sur des critères économiques et environnementaux ?. Sciences agricoles. 2014. dumas-01092311

HAL Id: dumas-01092311

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01092311>

Submitted on 8 Dec 2014

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.

AGROCAMPUS
OUEST

CFR Angers

CFR Rennes



Année universitaire : 2013-2014

Spécialité : Production Animale

Spécialisation (et option éventuelle) :

Ingénierie Zootechnique

Mémoire de Fin d'Études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Comment optimiser la séquence alimentaire des porcs en croissance et engraissement sur des critères économiques et environnementaux ?

Par : Thomas Plantevin

Soutenu à Rennes le 17/09/2014

Devant le jury composé de :

Président : Yannick le Cozler

Maître de stage : Florence Garcia-Launay

Enseignant référent : Catherine Disenhaus

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Anne-Lise Jacquot (rapporteur)

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Liste des abréviations

Les abréviations des unités usuelles seront considérées comme connues

1,4-DB-eq (unité) : 1,4-dichlorobenzène-eq (unité de l'écotoxicité terrestre)
ACV : Analyse de Cycle de Vie
BM : Biais Moyen
CH₄ : Méthane
CMEP : Carré moyen de l'erreur de prédiction
CO₂ : Dioxyde de carbone
GAMS (programme) : Système général de Modélisation algébrique
GES : Gaz à Effet de Serre
GMQ : Gain Moyen Quotidien
IC : Indice de consommation
IED (directives) : Directive relative aux Emissions Industrielles
INRA : Institut National de Recherche Agronomique
IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
IPPC (directives) : directive relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution
IPOPT (solveur) : Interior Point OPTimizer
MAT : matière azotée totale
N₂O : protoxyde d'azote
NEC (directives): National Emission Ceilings
NH₃ : Ammoniac
NO₃ : Nitrate
pH : potentiel hydrogène
PO₄ : Phosphate
TMP : Taux de muscle des pièces
TVM : Taux de viande maigre

Glossaire :

Facteur de caractérisation : facteur utilisé pour convertir les résultats de l'inventaire du cycle de vie en une unité commune

Méta-modèle : fonction représentative du modèle de calcul complet (ici INRAporc®) et qui produit une approximation de ce modèle complet.

Facteur d'émission : facteur permettant de convertir une donnée d'activité en quantité de gaz émise.

Remerciements

Je remercie l'ensemble de l'équipe Sysporc pour son accueil, en particulier :

- Ma maitre de stage Florence Garcia-Launay pour sa gentillesse et sa disponibilité (même pendant ses vacances),
- Ludovic Brossard pour toute l'aide apportée, pour les rires à table et pour mon incorporation dans l'équipe de volley,
- Jean-Yves Dourmad, pour tous les conseils et remarques tout le long du stage

Je remercie également l'ensemble des stagiaires et technicienne (Clémence, Marie, Maude, Laurianne, Samuel) qui ont partagé mon bureau pour leurs bonnes humeurs, leurs aides dans mon projet.

Je remercie également Claire, ma meilleure amie pour toutes les corrections d'orthographe qu'elle a réalisées pour moi.

Un grand merci également à tous mes amis (surtout Manon, Florianne, Solveig, Leslie, Anne, Diane, Pierre-Alexis, Yoze, Potchou...) qui furent là dans les moments difficiles qui sont survenu pendant ce stage et qui ont su me motiver.

Table des matières

Introduction	1
I. Bibliographie	2
A. Rejets et caractérisation de leurs impacts	2
1. Les sources de rejets	2
2. Caractérisation des rejets	2
B. Les leviers d'optimisation de l'alimentation	3
1. Ajuster les apports suivant les stades physiologiques et le potentiel de croissance	3
2. Augmenter l'efficacité d'utilisation des nutriments ingérés	4
C. Optimisation et rejets	5
II. Description du modèle	6
A. Schéma général du modèle	6
B. Les différents modules.....	7
1. L'alimentation.....	7
2. L'animal.....	7
3. L'économie	8
4. L'environnement.....	8
C. Mise en application du modèle	9
1. Logiciel utilisé	9
2. Fonction-objectif.....	9
3. Hypothèses restrictives.	10
4. Validation interne du comportement du modèle.....	10
5. Scénarios explorés	10
III. Résultats	11
A. Séquences alimentaires et performances simulées par le modèle pour les situations de référence	11
B. Description de la dynamique des séquences alimentaires.	13
C. Etude de la prise en compte de l'environnement dans la conception des séquences alimentaires : performances, rentabilité et impacts.	14
1. Etude des facteurs optimisés.	14
2. Variation de l'impact changement climatique associée au changement de formule.	15
3. Une marge brute décroissante due au prix des formules	16

4.	Variation des autres impacts lors de l'augmentation de la pondération de l'environnement.	16
IV.	Discussion	17
A.	Cohérence du modèle	17
B.	Effet du nombre de phases sur la marge brute et les impacts	17
C.	Pondération croissante environnementale, un intérêt ?	18
D.	Intérêts et limites du modèle.....	18
V.	Conclusion.....	19
VI.	Références bibliographiques	20
VII.	Sitographie	22

Table des figures et tableaux

Figure 1 : Procédure générale d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV) (d'après Garcia-Launay et al. 2014)

Figure 2 : Devenir de l'azote ingéré en engraissement avec un aliment à base de maïs et tourteau de soja : Une forte absorption pour une faible retenue (d'après Dourmad et Jondreville. 2007)

Figure 3 : Devenir du phosphore ingéré : une absorption faible mais une forte retenue (d'après Dourmad et Jondreville. 2007)

Figure 4 : Schéma décrivant les principales interactions intra-modules du modèle développé

Figure 5 : Besoins en lysine simulés par INRAporc® et décroissant au cours de l'engraissement

Figure 6: Courbes de variation de la quantité supplémentaire d'aliment ingéré en fonction de la couverture des besoins et du nombre de phases, intégrées dans le modèle

Figure 7 : Méthode de répartition de l'ingéré supplémentaire dans le cas d'une séquence alimentaire de trois phases de durées et de couvertures des besoins en lysine (80%) identiques

Figure 8: Méthode de répartition de l'ingéré supplémentaire dans le cas d'une séquence alimentaire de trois phases de durées identiques mais de couvertures des besoins en lysine différentes (respectivement 70, 80 et 90 %)

Figure 9 : Méthode de répartition de l'ingéré supplémentaire dans le cas d'une séquence alimentaire de trois phases de couvertures des besoins en lysine (80%) identiques mais de durées différentes

Figure 10: Paramétrage nécessaire de l'optimisation afin de trouver la solution idéale

Figure 11 : Evolution de l'indice de consommation en fonction du nombre d'aliments et du taux de couverture des besoins en lysine, estimé par le modèle (à gauche) et simulé avec INRAporc® d'après Brossard et al. (2009) (à droite)

Figure 12 : Valeurs de GMQ (à gauche) et d'indice de consommation (à droite) issues des simulations de Brossard et al. (2009) en fonction des valeurs estimées par notre modèle.

Figure 13 : Evolution de la marge brute (à gauche) et de l'impact sur le changement climatique (à droite) en fonction du nombre d'aliments et du taux de couverture des besoins.

Figure 14 : Evolution de la teneur en lysine des aliments au cours de séquences alimentaires de 1, 2, 7 et 10 phases, comparativement à l'évolution des besoins en lysine d'un porc en croissance.

Figure 15 : Evolution des IC moyens en fonction du poids vif lors d'une augmentation du nombre de phases (1, 2, 7, 10)

Figure 16 : Evolution de la marge brute (à gauche) et de l'impact sur le changement climatique (à droite) selon différentes pondérations entre ces deux critères : optimisation économique seule sans AA, optimisation économique seule avec AA, optimisation sur la marge brute et le changement climatique: pondération égale (Ratio Env/Econo=1), deux fois, trois ou quatre fois supérieure pour le changement climatique par rapport à la marge brute (Ratio Env/Econo= 2, 3 ou 4). Les valeurs en pointillé sont des valeurs où l'espace des solutions (couverture des besoins en lysine) a été réduit afin d'aider le programme trouver une solution optimale.

Figure 17 : Evolution de l'impact sur le changement climatique de l'aliment (à gauche) et du taux d'incorporation moyen du tourteau de soja dans les formules (à droite) selon les différentes modalités d'optimisation et le nombre de phases.

Figure 18 : Evolution de la MAT moyenne des aliments selon les différentes modalités d'optimisation (optimisation économique seule avec ou sans AA, et différentes pondérations entre marge brute et impact changement climatique.

Figure 19 : Evolution du taux d'incorporation des AA de synthèse (à gauche) et des quantités d'azote excrété par porc (à droite) en fonction du nombre d'aliments et selon différentes modalités d'optimisation.

Figure 20 : Variation du coût alimentaire d'un kilogramme de croît en fonction du nombre de phases et des différentes modalités d'optimisation étudiées.

Figure 21 : Evolution de l'indice de consommation moyen (à gauche) et du taux moyen de couverture des besoins en lysine (à droite) en fonction du nombre d'aliments et de différentes modalités d'optimisation.

Figure 22 : Evolution de a) la demande en énergie (MJ/kg porc) et de b) l'impact sur l'acidification (g SO₂e/kg porc) en fonction du nombre d'aliments et de différentes modalités d'optimisation.

Figure 23 : Evolution de a) l'impact sur l'eutrophisation (g PO₄-eq/kg porc), de b) l'impact sur l'écotoxicité terrestre (g 1,4DB-eq/kg porc) et de l'impact sur les surface nécessaire (m²an/kg porc) en fonction du nombre d'aliments et de différentes modalités d'optimisation.

Tableau 1 : Eléments rejetés et impacts associés

Tableau 2 : Technique permettant de diminuer les rejets de l'atelier d'engraissement

Tableau 3 : Dégradation de l'IC d'une population de porc engraisés, par une baisse de couverture des besoins ou une augmentation du nombre de phases (d'après Brossard et al. 2009)

Introduction

La notion de développement durable est définie en 1987 dans le rapport Brundtland comme étant « un développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (Ministère de l'écologie, 2013). Bien que l'économie et la compétitivité soient des facteurs importants pour le maintien d'une exploitation, l'environnement est un pilier essentiel de sa durabilité (écotoxicité des sols, surface utilisée...) même lorsqu'il présente des externalités ne touchant pas que l'exploitation (gaz à effet de serre, eutrophisation) (Herpin et Perez, 2008).

Le regard que porte la société sur les exploitations, en particulier porcines, est très négatif (Basset-Mens et van der Werf, 2005), ce qui a entraîné de nombreuses directives européennes afin de limiter leurs conséquences sur l'environnement. On peut notamment citer les directives nitrates, la directive IPPC (1996, codifiée en 2008) remplacée par la directive IED en 2010 et la directive NEC (2011) qui fixe des seuils d'émissions maximum pour le NO₂ et le NH₃. La directive IED, qui traite des émissions industrielles cherche à faire appliquer les meilleurs techniques disponibles dans les grands élevages, possédant plus de 650 truies ou 2000 emplacements de porcs (Ineris, 2013).

Afin de permettre aux éleveurs de respecter ces seuils, la recherche a identifié de nombreux leviers d'amélioration, notamment dans le domaine de l'alimentation, tels que l'augmentation du nombre d'aliments (Dourmad et Jondreville, 2007) ou l'utilisation d'acides aminés de synthèse (Garcia-Launay et al., 2014). Ces pratiques diminuent les impacts environnementaux des exploitations porcines, calculés par des Analyses de Cycle de Vie (ACV). Mais ces pratiques ont parfois des coûts économiques et il est quelquefois nécessaire de réaliser des compromis entre performance économique des exploitations et réduction des impacts environnementaux associés à la production.

Des modèles ont été créés afin de simuler les performances des animaux et d'estimer les besoins associés (INRAporc®). Des programmes optimisant la séquence alimentaire ont également été conçus (Morel et Wood, 2005) mais ceux-ci ne prennent en compte que les rejets azotés et ne tiennent donc pas compte des transferts de pollution. Pour répondre à ces enjeux, nous avons développé un modèle d'optimisation de la séquence alimentaire et de la formulation des aliments sur des critères économiques (marge brute) et environnementaux (émissions de gaz à effet de serre). Après un rapide rappel des différentes approches possibles pour diminuer les rejets de l'atelier de porcs en engraissement, nous présenterons le modèle développé puis nous décrirons et discuterons les résultats obtenus.

Tableau 1 : Eléments rejetés et impacts associés

Elément	Forme de l'élément	Impact associé	Unité de l'impact
C	CO ₂ *, CH ₄	Changement climatique	g CO ₂ -e
N	NH ₃ , N ₂ O, NO ₃	Changement climatique	g CO ₂ -e
N	NH ₃	Acidification	g SO ₂ -e
N	NH ₃ , NO ₃	Eutrophisation	g PO ₄ -e
P	PO ₄	Eutrophisation	g PO ₄ -e
Cu	Cu	Ecotoxicité terrestre	g 1,4-dichlorobenzene-eq
Zn	Zn	Ecotoxicité terrestre	g 1,4-DB-e

* Le CO₂ rejeté par les êtres vivants ne sont pas considéré dans les études d'impacts.

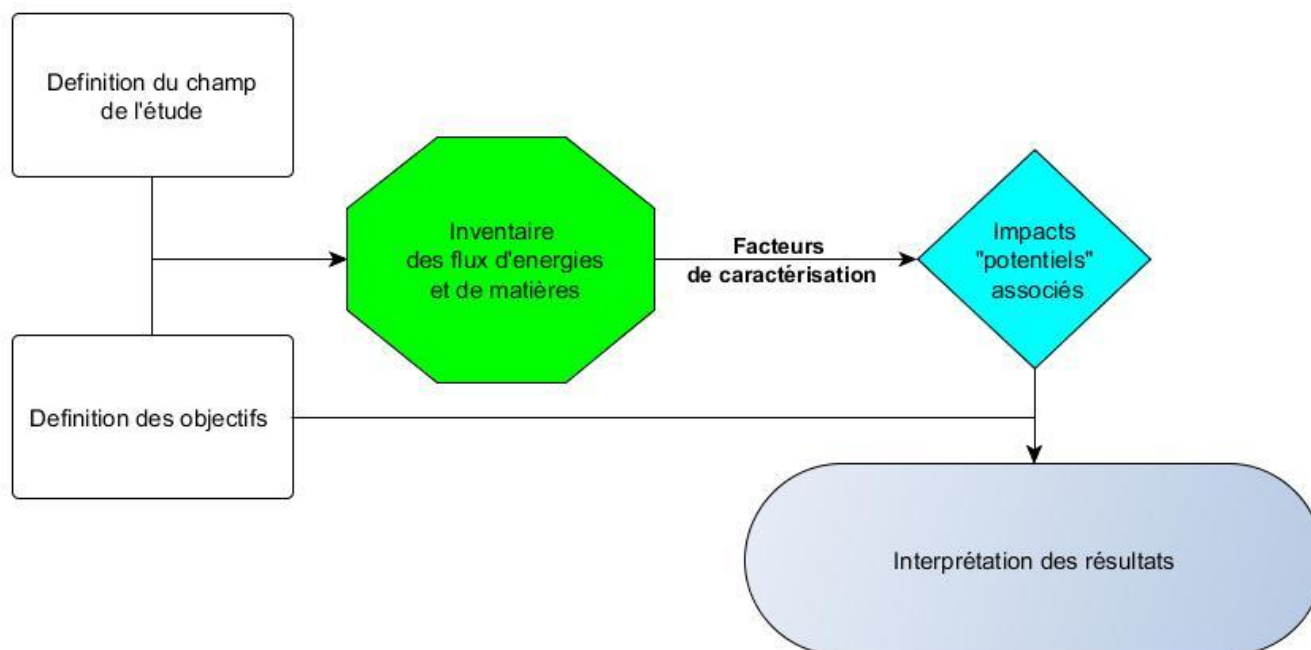


Figure 1 : Procédure générale d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV) (d'après Garcia-Launay et al. 2014)

I. Bibliographie

Dans le cadre de cette bibliographie, nous nous concentrerons sur l'élevage de porc en engraissement, afin de bien développer les différentes parties en lien avec le programme d'optimisation que nous avons développé. Ce choix a été motivé par le fait que 70% des rejets de la filière porcine est du à l'atelier de porc en engraissement. Nous rappellerons les différentes sources de rejets et leurs impacts sur l'environnement ainsi que les approches disponibles pour restreindre au minimum l'impact de l'élevage porcin sur l'environnement. Enfin, nous montrerons comment le développement de la modélisation a contribué à la diminution de l'impact environnemental de l'élevage porcin.

A. Rejets et caractérisation de leurs impacts

1. Les sources de rejets

Les flux de nutriments chez le porc en engraissement engendrent des pertes vers l'environnement dont l'importance peut varier selon les pratiques d'élevage (Dourmad, 2012). Les deux principaux éléments pouvant entraîner des impacts environnementaux sont l'azote et le phosphore, mais des éléments en plus faibles quantités dans l'alimentation peuvent aussi altérer l'environnement par leur accumulation, tels que le cuivre et le zinc (Tableau 1.).

Les porcs produisent des gaz à effet de serre, principalement du méthane et du gaz carbonique, associés aux activités de digestion et à la respiration. Les déjections qu'ils excrètent génèrent des émissions gazeuses, dans le bâtiment ou au cours du stockage, dont l'importance et la nature (méthane, ammoniac, protoxyde d'azote et diazote) sont influencées par la composition des excréta et leur mode de gestion. L'épandage des déjections entraîne ensuite des pertes par volatilisation (ammoniac) et par ruissellement (phosphates) ou par lessivage (nitrates) (Dourmad, 2012). L'ensemble des émissions ayant lieu sur l'exploitation et lors de l'épandage est appelé rejets directs, mais certaines émissions sont dites indirectes comme la transformation secondaire d'une faible partie de l'ammoniac en protoxyde d'azote (Garcia-Launay et al., 2014).

2. Caractérisation des rejets

L'étude des impacts plutôt que des rejets seuls est de nos jours très utilisée dans les comparaisons de pratiques en matière d'environnement (Basset-Mens et van der Werf, 2005; Eriksson et al., 2004; Ogino et al., 2013) car elle a l'avantage de prendre en compte l'ensemble des émissions polluantes générées tout au long du cycle de vie du produit et non simplement les seules émissions directes. Ces études d'impacts sont réalisées à partir d'Analyse de cycles de vie (ACV) soumise aux normes ISO 14040 (Boeglin et Veuillet, 2005). Il s'agit d'un inventaire des flux de matière et d'énergie entrants et sortants à chaque étape du cycle de vie puis d'une évaluation des impacts environnementaux associés aux flux inventoriés comme le montre la figure 1. Les coefficients de calcul des impacts à partir de

l'inventaire, appelés facteurs de caractérisation, sont déterminés par des comités de scientifiques de chaque domaine et sont donc dépendants des connaissances actuelles sur chaque impact (Boeglin et Veuillet, 2005). Par exemple, les facteurs de caractérisation des gaz à effet de serre proviennent de l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) et font l'objet d'un large consensus. Ces facteurs sont relatifs à une référence, différente pour chaque impact, permettant de comparer les différents rejets entre eux. Les gaz à effet de serre sont ainsi exprimés en équivalent CO₂ (CO₂-e) (Tableau 1).

Les rejets produits par l'atelier de porcs en engraissement étant connus, différentes pratiques ont été explorées pour réduire la pollution engendrée par l'élevage porcin.

B. Les leviers d'optimisation de l'alimentation

Il existe de nombreux leviers pour diminuer efficacement les conséquences de la production porcine tels que le traitement des effluents d'élevages (évacuations rapides du lisier, méthanisation), l'adaptation de l'alimentation (en phosphore, azote...) aux besoins de l'animal afin d'en réduire l'excrétion, l'adaptation du logement (volatilisation plus importante sous forme de N₂ de l'azote pour une litière de sciure en couche profonde par rapport à un caillebotis), la génétique (augmentation de l'efficacité alimentaire) (Shirali et al., 2013)...

L'alimentation est un facteur clé pour réduire l'empreinte environnementale des exploitations porcines (Aarnink et Verstegen, 2007). En effet, d'après l'étude de Basset-Mens et Van der Werf (2005), 73% de l'impact d'un élevage de porcs « conventionnel » sur le changement climatique sont dus à la production des aliments. Mais L'alimentation joue aussi un rôle important dans la gestion économique car le coût alimentaire représente la moitié du coût de production des porcs (50,6% en 2013) (Badouard et Calvar, 2014).

Les pratiques d'alimentation visant à ajuster les apports aux besoins de l'animal, peuvent diminuer considérablement les rejets. En effet, les apports sont habituellement supérieurs aux besoins et les 2/3 de l'azote et du phosphore ingérés sont excrétés (respectivement 63% et 67% pour les porcs charcutiers) (van der Peet-Schwering et al., 1999). Afin de limiter les rejets, deux approches complémentaires peuvent être utilisées pour atteindre une diminution de plus de 30% des rejets azotés (Bourdon et al., 1995).

1. Ajuster les apports suivant les stades physiologiques et le potentiel de croissance

Les besoins en azote d'un porc varient tout au long de sa croissance et il est donc conseillé de changer d'aliment au cours de l'engraissement.

Cette technique est déjà utilisée en pratiquant une conduite à deux aliments (croissance et finition) qui permet de réduire les rejets de 8% par rapport à une conduite avec un aliment unique (Dourmad et Jondreville, 2007). Cependant une alimentation dite « multiphase » permettant d'adapter les besoins tout au long de la période d'engraissement peut encore

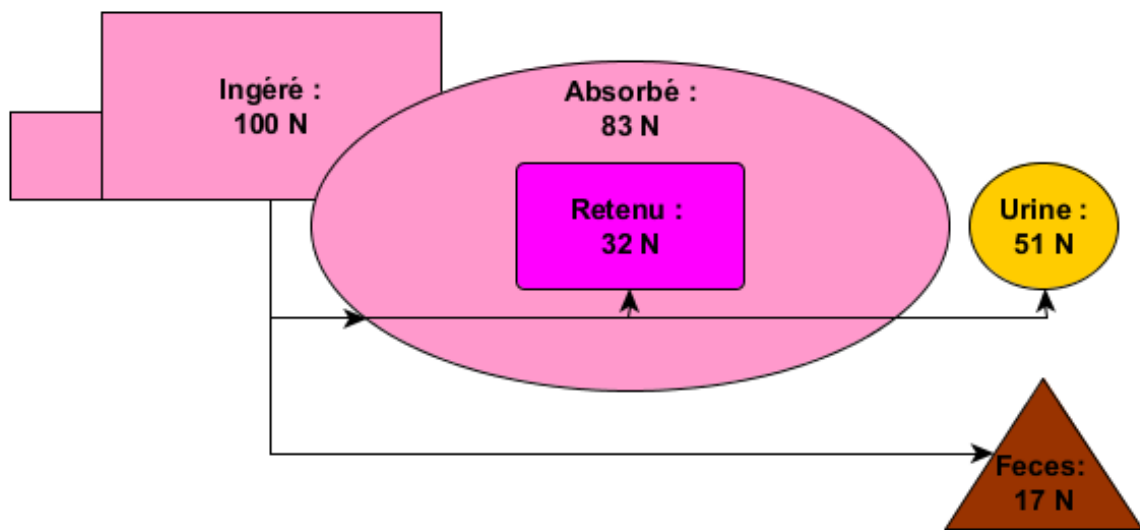


Figure 2 : Devenir de l'azote ingéré en engraissement avec un aliment à base de maïs et tourteau de soja : Une forte absorption pour une faible retenue (d'après Dourmad et Jondreville. 2007)

Lors de l'ingestion de 100 unités d'azote, 82 unités sont absorbées mais presque les 2/3 (51 unités) sont exportés sous forme d'urine.

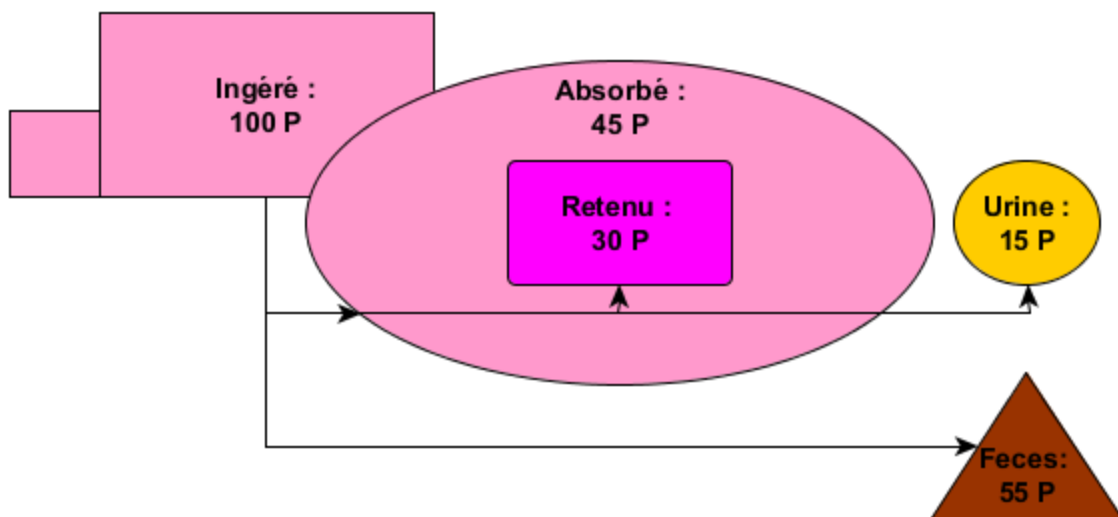


Figure 3 : Devenir du phosphore ingéré : une absorption faible mais une forte retenue (d'après Dourmad et Jondreville. 2007)

Lors de l'ingestion de 100 unités de phosphore, moins de la moitié (45 unités) est absorbé mais les 2/3 (30 unités) sont retenus. Il faut donc augmenter la proportion de phosphore absorbé afin de limiter les rejets phosphatés

réduire de 5 à 10% les rejets en azote. De même, plus la masse corporelle d'un porc en engraissement augmente, plus ses besoins en phosphore diminuent (Jongbloed et Lenis, 1998). Une alimentation « multiphase » réduit donc également l'excrétion de phosphore (Aarnink et Verstegen, 2007).

Ajuster les apports signifie également diminuer les marges de sécurité souvent trop importantes quand on formule des aliments pour couvrir les besoins en chaque élément. Ainsi le cuivre et le zinc sont incorporés en quantité bien supérieure aux besoins des porcs pour assurer de bonnes performances et une bonne santé de l'animal (Dourmad et Jondreville, 2007). Les besoins des porcs ont été évalués à 10 et 30 ppm respectivement pour le cuivre et le zinc chez le porc en engraissement. Mais l'actuel législation (RÈGLEMENT (CE) N° 1334/2003 de la commission du 25 juillet 2003) permet encore d'incorporer dans les aliments jusqu'à 30 et 150 ppm. Il s'agit cependant d'une avancée environnementale car avant cette réglementation les seuils étaient de 120 pour le cuivre et de 250 pour le zinc.

2. Augmenter l'efficacité d'utilisation des nutriments ingérés

L'azote et le phosphore ont deux comportements différents vis-à-vis de leur devenir après ingestion (Figures 2 et 3). L'azote est facilement absorbé (81%) mais très mal métabolisé (51% de l'azote ingéré est retrouvé dans l'urine) alors que le phosphore est avant tout peu absorbé (45%), le reste se retrouvant dans les fèces. Les méthodes pour réduire l'excrétion de chacun d'entre eux diffèrent donc.

a) Apporter des quantités équilibrées en éléments et énergie

Afin de limiter les pertes d'azote, il faut essayer d'apporter les AA dans des proportions proches du profil de la protéine idéale (Dourmad et al., 1999). Le porc ne pouvant synthétiser les AA essentiels nécessaires à la synthèse de ses protéines corporelles, ceux-ci doivent être apportés par l'alimentation. Un excès d'un AA n'entraîne qu'une oxydation de celui-ci et son élimination dans les urines (Aarnink et Verstegen, 2007). D'après Rademacher (2000), un quart des protéines du soja et du maïs est perdu à cause d'un déséquilibre entre les différents acides aminés. Utiliser des AA de synthèse est un bon moyen pour équilibrer une ration et permet ainsi de diminuer la quantité de protéines brutes et par conséquent l'azote excrété (Garcia-Launay et al., 2014). Une diminution de 20% à 12% de la teneur en protéines brutes entraîne une baisse de 65% de la quantité d'azote dans les urines sans modification des performances de l'animal (Portejoie et al., 2004) car la totalité des AA peut être utilisée pour créer des protéines corporelles, il n'y a plus d'excès de certains AA et donc moins d'azote excrété dans l'urine. Or c'est l'azote présent dans l'urine qui est le plus susceptible de se dégrader et de former des gaz à effet de serre (N_2O), contrairement à l'azote contenu dans les fèces qui est sous forme de protéines, moins réactif (van der Peet-Schwering et al., 1999).

Il est également important de prendre en compte l'énergie dans l'optique de diminuer les rejets azotés. Même avec un profil idéal d'acides aminés, si l'énergie apportée n'est pas suffisante, une perte d'azote dans l'urine aura lieu (Aarnink et Verstegen, 2007).

Tableau 2 : Technique permettant de diminuer les rejets de l'atelier d'engraissement

Stratégie	Elément	Publication
Ajuster les apports suivant les stades physiologiques	N, P, Zn, Cu...	Aarnink et Verstegen, 2007 Dourmad et Jondeville, 2007
Diminuer les marges de sécurité	Zn, Cu, P	Dourmad et Jondreville, 2007
Apporter les AA en juste proportion	N	Rademacher, 2000 Dourmad et al., 1999
Utiliser des AA de synthèse	N	Garcia-Launay et al., 2014
Favoriser des formes d'un élément facilement assimilables	P	Dourmad et Jondreville, 2007
augmenter la digestibilité d'un élément par des enzymes (phytases)	P, Zn	Jondreville et Dourmad, 2005
Diminuer les facteurs antinutritionnels	P	Augspurger et al., 2004

b) *Modifier la digestibilité des aliments*

Pour diminuer les rejets en phosphore, il est important de maximiser la quantité absorbée par l'organisme. Chez le porc en engraissement, 50% du phosphore ingéré est excrété dans les fèces, comme le montre la figure 3. En augmentant la digestibilité d'un élément, les quantités globales nécessaires de cet élément sont fortement diminuées. Différentes méthodes peuvent être mises en œuvre pour y parvenir :

- Favoriser des formes facilement assimilables, telles que le phosphate monocalcique dont la digestibilité apparente est de 83% plutôt que bicalcique qui a une digestibilité apparente de 75% (Dourmad et Jondreville, 2007).
- Utiliser des enzymes et des produits chimiques représente une deuxième possibilité car ils permettent de couper les liaisons qui retiennent les éléments et facilitent donc leur absorption. 500 unités de phytases microbiennes sont équivalentes à 0,65-0,75g de phosphore digestible apparent pour un régime composé de maïs et de tourteau de soja (Jondreville et Dourmad, 2005). Les phytases peuvent également augmenter la disponibilité du zinc (Dourmad et Jondreville, 2007). Pour que l'effet des phytases soit optimal, il faut veiller à minimiser les apports en facteurs antinutritionnels tels que le zinc, qui à dose pharmacologique (1500 à 3000mg/kg) diminue l'activité des phytases (Augspurger et al, (2004)), et donc la digestibilité du phosphore, notamment chez le porcelet.

Cependant, l'ajout de fibres dans l'aliment (rendant celui-ci moins digestible) est également bénéfique dans la lutte contre les émissions azotées. D'après Canh et al.(1998), l'ajout de fibres polysaccharides fermentescibles (hors amidon) permet d'augmenter la quantité de protéines bactériennes dans les fèces tout en diminuant les rejets d'azote dans l'urine (ce qui diminue les facultés de transformation de l'azote en gaz lors du stockage). De plus, l'utilisation de ce type de fibres augmente la production d'acides gras volatils, ce qui abaisse le pH (Canh et al., 1998), diminuant ainsi l'activité des uréases.

Les facteurs permettant de diminuer les rejets par la nutrition, en élevage porcin, sont bien documentés (Tableau 2) et ont permis de construire de nombreux modèles et programmes, permettant de simuler la croissance des porcs et les émissions associées.

C. Optimisation et rejets

Afin d'améliorer la durabilité de l'élevage porcin, les émissions doivent être réduites mais le résultat économique optimisé. Les variables à optimiser étant très nombreuses (nombre d'aliments utilisés, temps d'utilisation, niveau de couverture des AA et de l'énergie dans chaque ration, matières première utilisées), des méthodes d'optimisation de fonctions non linéaires avec un nombre important de dimensions ainsi que des modèles de simulations de la croissance sont indispensables pour produire des modèles d'optimisation conjuguant les deux aspects (Alexander et al., 2006). Les algorithmes permettant des calculs de fonctions non linéaires (Conopt,Ipopt (GAMS solver,2012)) ont également été développés, ce qui permet aujourd'hui de créer un programme recherchant les compromis optimaux entre la rentabilité

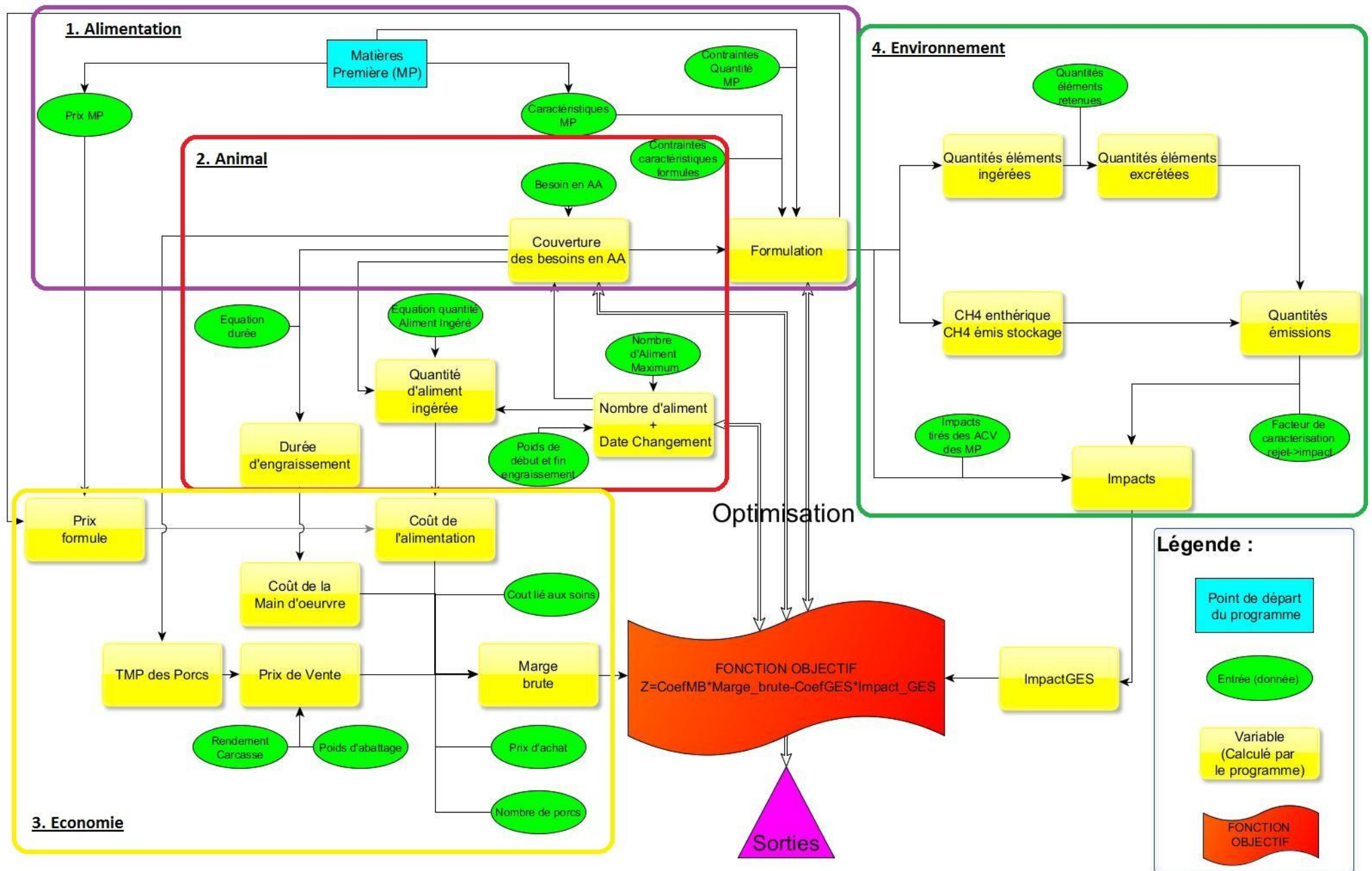


Figure 4 : Schéma décrivant les principales interactions intra-modules du modèle développé

économique de l'élevage et les impacts environnementaux des rejets directs et indirects engendrés par l'atelier d'engraissement mais aussi par l'amont de la filière, en utilisant les études d'ACV. Les premiers modèles de simulation de croissance apparurent dans les années 1980 et permettaient de calculer les besoins en nutriments afin de maximiser la croissance musculaire qui était associée à la maximisation du profit (Morel et al., 2012). Les modèles, tels que INRAporc (van Milgen et al., 2008), deviennent de plus en plus performants en prenant en compte non plus les besoins d'un seul porc mais de l'ensemble d'une population par une approche stochastique, c'est-à-dire intégrant une certaine variation autour des valeurs des paramètres décrivant l'animal moyen (à l'aide de matrices de covariance entre les variables) (Vautier, 2013). De nos jours, certains programmes, tel que le programme BACON MAX de l'équipe de Morel et al.(2005), associent un modèle stochastique de croissance d'une population et une optimisation économique et environnementale. Ce programme optimise la marge brute et l'excrétion d'azote en jouant sur la séquence alimentaire (temps de chaque phase, densité énergétique des rations et besoin en lysine) mais ne l'associe pas à une méthodologie d'ACV ni ne tient compte des autres rejets produits par les animaux.

II. Description du modèle

Le modèle est conçu pour formuler les aliments et construire la séquence alimentaire des porcs en engraissement (30 à 115kg) en prenant en compte un critère économique (la marge brute) mais également des critères environnementaux. Nous avons choisi pour ce modèle de limiter l'optimisation à l'impact sur le changement climatique (émission de gaz à effet de serre) mais de calculer d'autres impacts notamment l'eutrophisation afin de pouvoir évaluer les éventuels transferts de pollutions car le cheptel porcin est souvent désigné comme principal responsable de ces problèmes (Rigolot et al., 2010a). En plus de la formulation d'aliments, la séquence alimentaire est conçue afin d'optimiser le nombre de phases réalisées et la date de changement de ces phases, la couverture des besoins en lysine tout en prenant en compte la variabilité interindividuelle du potentiel de croissance des porcs (Cf. II.A.2).

A. Schéma général du modèle

Le modèle permet de représenter l'élevage de porcs en engraissement depuis l'achat des matières premières de l'alimentation des porcs jusqu'à l'élimination des effluents par épandage. Ce modèle peut être perçu comme l'association de 4 compartiments :

- un module « aliment » tenant compte des besoins des animaux,
- un module « animal » définissant la croissance des porcs en fonction de l'alimentation donnée,
- un module « économie » permettant de chiffrer l'intérêt financier des différentes formules et séquences alimentaires,

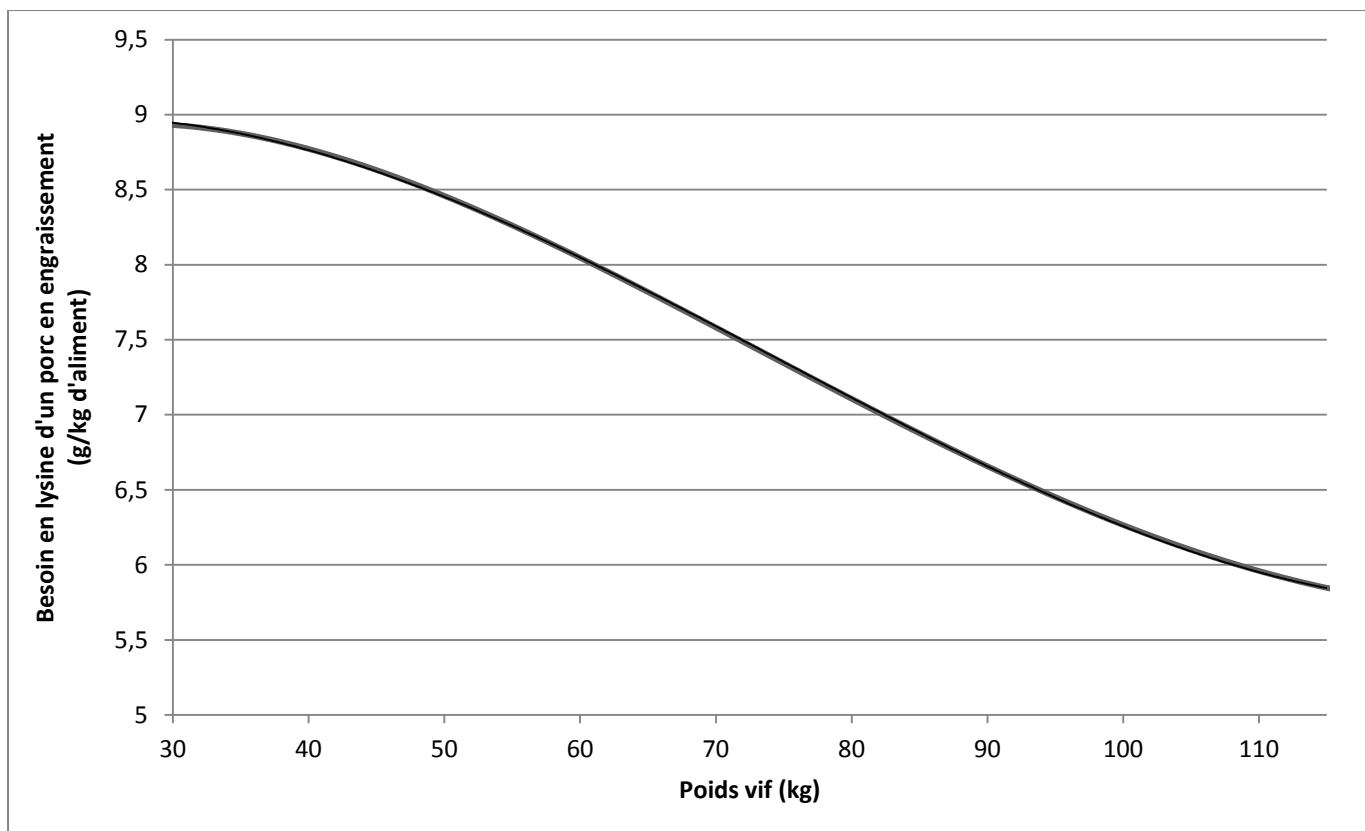


Figure 5 : Besoins en lysine simulés par INRAporc® et décroissant au cours de l'engraissement

Tableau 3 : Dégradation de l'IC d'une population de porc engraisés, par une baisse de couverture des besoins ou une augmentation du nombre de phases (d'après Brossard et al. 2009)

Nombre d'aliment	Pourcentage de couverture des besoins en lysine						
	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%
1	2,57	2,38	2,29	2,25	2,24	2,24	2,24
2	2,73	2,47	2,32	2,26	2,24	2,24	2,24
3	2,81	2,53	2,34	2,26	2,24	2,24	2,24
5	2,94	2,61	2,39	2,28	2,24	2,24	2,24
7	2,99	2,66	2,42	2,29	2,25	2,24	2,24
10	3,00	2,67	2,42	2,29	2,25	2,24	2,24

- un module « environnement » qui calcule les impacts environnementaux du choix des matières premières et de leurs caractéristiques, du type de logement et du mode de gestion des effluents (lisier/fumier). (Figure 4)

Ces quatre compartiments sont très liés les uns aux autres, soit par des interdépendances fonctionnelles (l'alimentation doit répondre aux besoins de l'animal et la croissance de l'animal dépend des caractéristiques de l'alimentation) mais aussi par des interdépendances d'optimisation (les matières premières définissent la valeur de la marge brute mais celle-ci modifie la formule lors de son optimisation).

Le milieu extérieur n'est cependant pas pris en considération dans ce modèle et ne laisse que peu de choix à l'éleveur, ce qui représente une limite du programme. On considère que l'exploitation possède suffisamment de terres pour épandre l'ensemble de ses effluents et que la paille nécessaire à la formation de fumier est fournie par les cultures.

L'ensemble des équations ayant servi à la réalisation du programme se trouve en annexe 1.

B. Les différents modules

Nous allons décrire plus précisément les différentes variables prises en compte dans chaque unité du modèle.

1. L'alimentation

L'alimentation des porcs est le cœur du programme car il s'agit du facteur optimisé par le modèle. Celui-ci recherche le meilleur choix de matières premières parmi celles de la base de données (base tirée de l'étude de Garcia-Launay et al, 2014) en fonction de leur prix et des impacts environnementaux de leur fabrication. Les contraintes de formulation du ou des aliments sont définies à partir de données rentrées par l'utilisateur (possibilité de respect des normes européennes ou de choisir des normes plus contraignantes notamment pour le cuivre ou le zinc) ainsi que des courbes de besoins en lysine des porcs (formulation d'aliments couvrant entre 70 et 130% des besoins en lysine des animaux).

L'optimisation de la séquence alimentaire est également réalisée par ce programme afin de calculer le meilleur moment pour le changement de formule ainsi que le nombre optimal de formules qui composent la séquence.

2. L'animal

Afin de simuler la croissance des porcs et leurs réponses aux différentes séquences, il faut incorporer dans le programme un modèle de croissance. Pour cela, nous avons construit un modèle simplifié du logiciel INRAporc® qui permet de calculer les quantités ingérées d'aliment au cours de l'engraissement, la durée de l'engraissement, les quantités de lipides et de protéine déposées. Leurs variations en fonction du taux de couverture des besoins en lysine et du nombre d'aliments distribués doivent également être calculées par ce modèle.

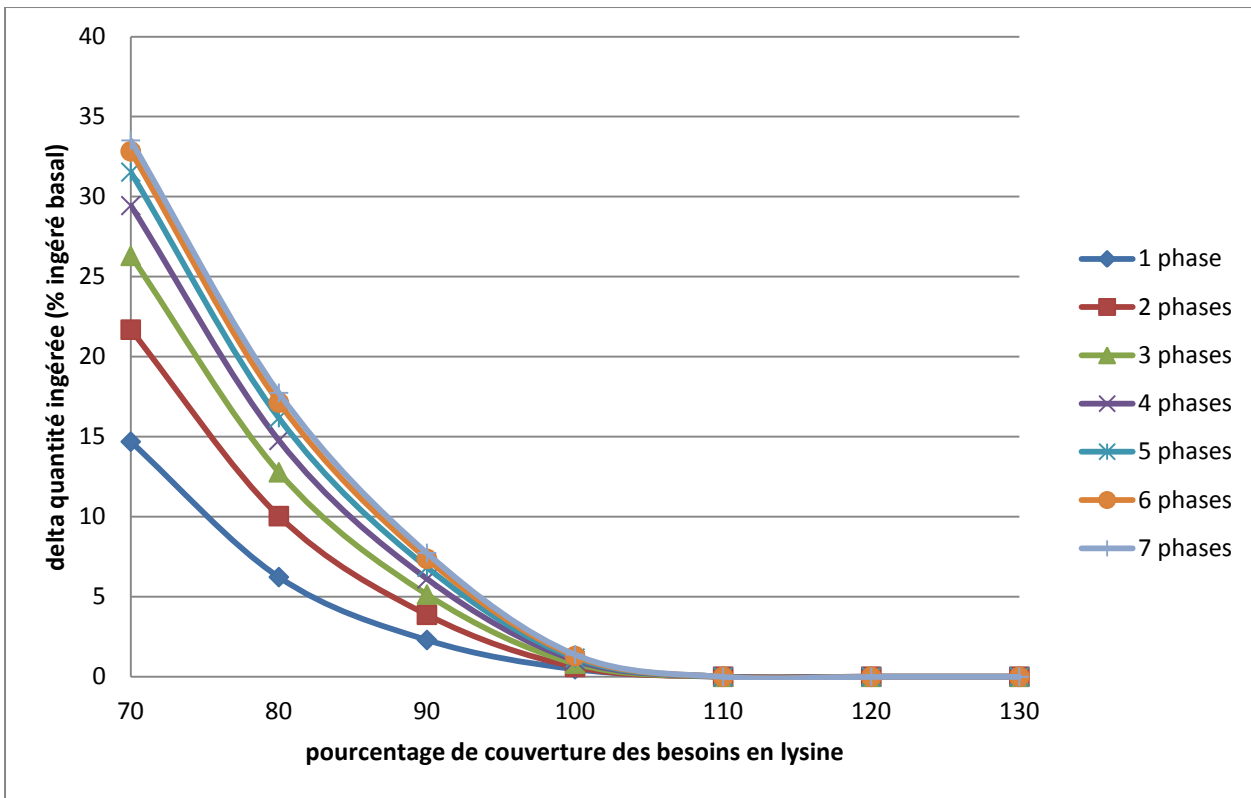


Figure 6: Courbes de variation de la quantité supplémentaire d'aliment ingéré en fonction de la couverture des besoins et du nombre de phases, intégrées dans le modèle

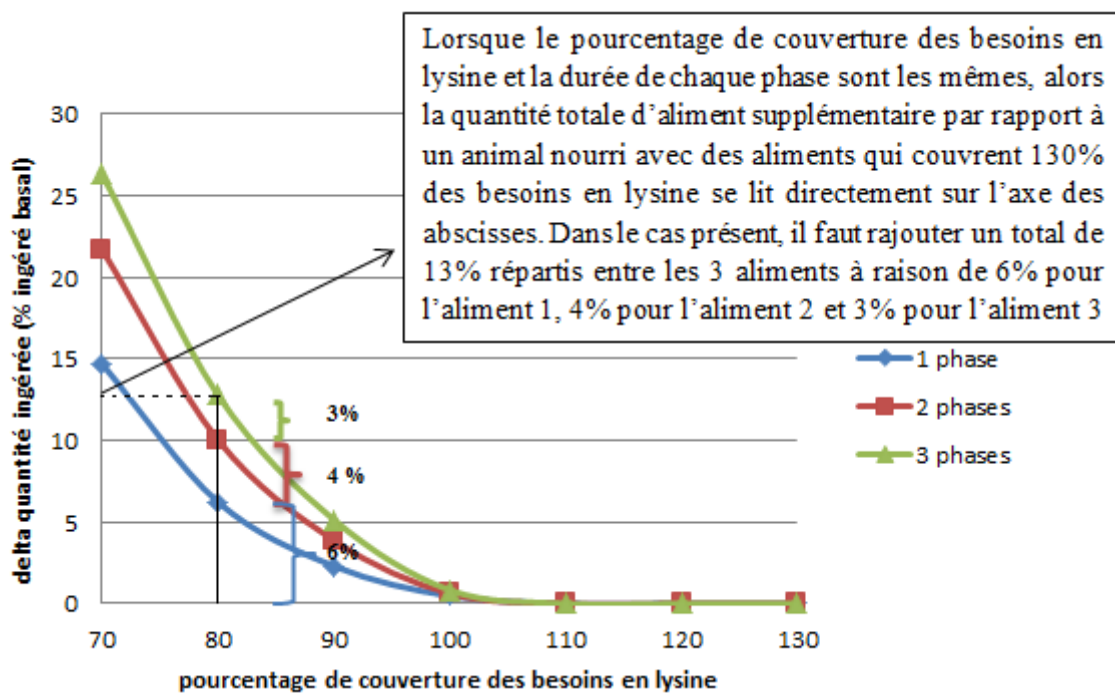


Figure 7 : Méthode de répartition de l'ingéré supplémentaire dans le cas d'une séquence alimentaire de trois phases de durées et de couvertures des besoins en lysine (80%) identiques

Les sorties du logiciel INRAporc® donnent accès aux courbes des besoins en lysine en fonction du poids vif (permettant de définir les besoins en AA des formules d'aliments) ainsi qu'à la courbe de quantité cumulée d'aliment ingéré en fonction du poids vif afin de connaître la quantité de chaque aliment ingéré par l'animal (Figure 5).

A partir des simulations d'une population de porcs engraisés faites avec INRAporc®, sur la base de performances réelles obtenues en expérimentation, nous avons estimé l'alimentation supplémentaire que le porc devra ingérer pour compenser une restriction en lysine (à partir de l'IC), ainsi que le temps supplémentaire (à partir du GMQ) nécessaire pour atteindre le même poids qu'un porc non restreint (Tableau 3) selon la démarche de Brossard et al. (2009). Pour son article, Brossard et al. (2009) ont ajusté les paramètres de chaque animal dans INRAporc® pour correspondre aux données recueillies en expérimentation :

- 3 paramètres relatifs au poids : le poids vif à 65 jours, le gain moyen quotidien entre 65 jours et 110 kg ainsi qu'un coefficient définissant la courbe : la précocité
- 2 paramètres relatifs à l'ingestion : la prise alimentaire à 50 kg et un coefficient b définissant la forme de la courbe (Brossard et al., 2009).

A partir de ces valeurs de paramètres individuelles, les performances de la population ont été simulées pour un nombre variable d'aliments (1, 2, 3, 5, 7, 10) et un taux variable de couverture des besoins en lysine (70, 80, 90, 100, 110, 120, 130%). Afin d'établir une loi générale pour l'ensemble des couvertures des besoins et l'ensemble des séquences, on a ajusté une équation de prédiction de ces valeurs par la méthode des moindres carrés (Figure 6). A partir de ces courbes, nous avons construit une démarche de répartition (Figures 7, 8 et 9) entre chaque aliment des quantités ingérées supplémentaires par rapport à la référence (130%). De même, les quantités de protéines et lipides corporels (annexe 2) du porc en fin d'engraissement sont calculées et permettent de calculer le taux de muscle des pièces (TMP) (à partir du Taux de viande maigre (TVM) décrit par Van Milgen et al. (2008)). Le TVM était une mesure réalisée en abattoir qui a été remplacé par le TMP. Cette mesure influe sur le prix de vente du porc.

3. L'économie

La marge brute est un critère fréquemment utilisé dans les outils d'optimisation (Morel et al, 2012 ; Vautier, 2013). Dans les travaux de Morel et al.(2012), celui-ci définit la marge brute comme étant égale à la recette à laquelle on soustrait le coût de l'alimentation et de l'achat du porcelet en fin de post sevrage. Dans notre programme, le prix de vente du porc est fonction d'un prix de base, modifié par les plus-values associées au taux de muscles des pièces (TMP) et au poids vif vide à chaud. Nous avons décidé de rajouter dans notre programme les coûts des soins ainsi que le coût d'occupation du bâtiment. Celui-ci est défini comme un coût fixe par porc plus un coût horaire par jour et par porc.

4. L'environnement

Le principe du modèle est d'optimiser l'alimentation donnée aux porcs afin de réduire l'impact de la production porcine sur l'environnement. L'impact optimisé est le changement climatique. De plus, les impacts sur l'eutrophisation, l'écotoxicité terrestre, l'acidification et

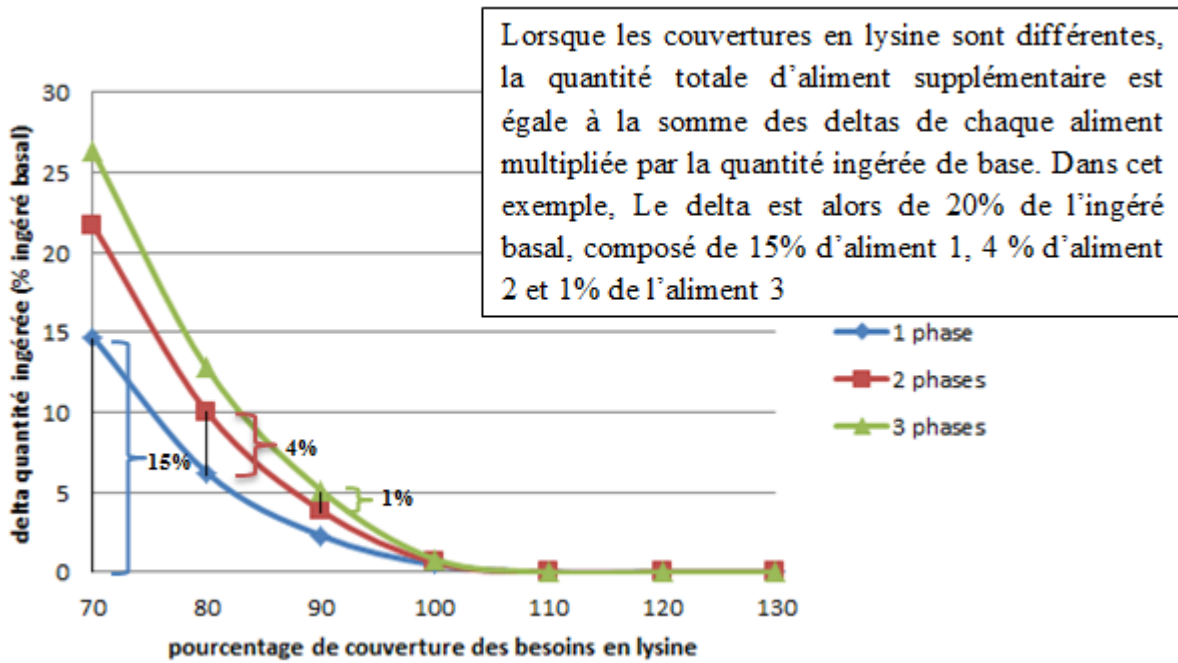


Figure 8 : Méthode de répartition de l'ingéré supplémentaire dans le cas d'une séquence alimentaire de trois phases de durées identiques mais de couvertures des besoins en lysine différentes (respectivement 70, 80 et 90 %)

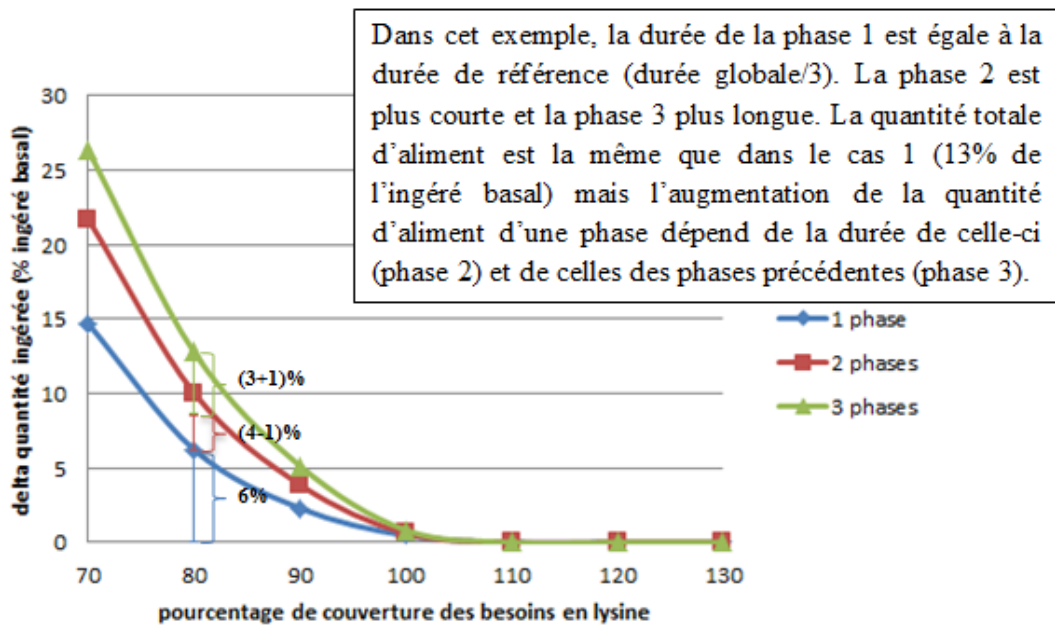


Figure 9 : Méthode de répartition de l'ingéré supplémentaire dans le cas d'une séquence alimentaire de trois phases de couvertures des besoins en lysine (80%) identiques mais de durées différentes

l'utilisation d'énergie et de surface sont également calculés. Si l'écotoxicité n'est pas un des facteurs pris en compte par l'optimisation du programme, l'utilisateur a la possibilité de la prendre en compte en modifiant les taux d'incorporation maximaux de cuivre et de zinc (principaux éléments écotoxiques) lors de la sélection des contraintes de formulation.

Les impacts sont déterminés en deux temps. Le programme calcule d'un côté les impacts associés à la fabrication de l'aliment et à son transport à partir de résultats d'analyses de cycle de vie (base de données ayant servi de support à l'étude de Garcia-Launay et al, 2014). D'un autre côté, le programme calcule les rejets sur l'exploitation des différents éléments N, P, Cu, Zn en soustrayant à l'ingéré les quantités stockées par l'animal (quantités calculées à l'aide des équations présentes dans l'étude de Rigolot et al, (2010a). Puis ces éléments sont ensuite convertis en émissions polluantes ($N \rightarrow NH_3$, $P \rightarrow PO_4$) en utilisant les facteurs d'émission de l'étude de Rigolot et al. (2010b). La quantité de méthane entérique et celle émise au stockage des effluents sont calculées à partir des études précédentes. Les impacts potentiels associés sont ensuite calculés à partir des facteurs de caractérisation de chaque type d'émission.

Le programme est prévu pour accepter des logements sur caillebotis, caillebotis partiel, sur litière ou en extérieur, voire des combinaisons de ces différents types de logement, ce qui a pour conséquence de faire varier les taux de transformation de l'azote du lisier en émissions polluantes (NH_3 , N_2O , NO_3) mais dans ce rapport seuls les logements sur caillebotis intégral seront étudiés.

C. Mise en application du modèle

1. Logiciel utilisé

Afin de pouvoir coder et optimiser le modèle, nous avons utilisé le logiciel de programmation GAMS (Système général de modélisation algébrique) (Brooke et al., 2008). La résolution du système d'équations a été effectuée à l'aide du solveur COIN-IPOPT (**I**nterior **P**oint **O**ptimizer) (GAMS solver, 2012), spécialisé dans la programmation non linéaire. Optimiser un problème non linéaire, ce qui est notre cas car certaines dérivées des équations du modèle ne sont pas linéaires, ne permet pas de trouver l'optimum global mais seulement un optimum local. Les contraintes mises en place dans le logiciel doivent être suffisantes pour s'approcher de l'optimum global mais une vérification des résultats par une comparaison avec la bibliographie s'avère tout de même nécessaire (Cf figure 10).

2. Fonction-objectif

L'équation sur laquelle le solveur se base pour trouver la solution optimale (maximisation, minimisation...) est appelée fonction-objectif. Dans notre cas il s'agit de l'équation

$Z = a * \text{Marge brute} + b * \text{Impact GES}$ avec (a,b) des coefficients déterminés par l'utilisateur afin de pouvoir moduler le poids de chaque composante de la fonction .

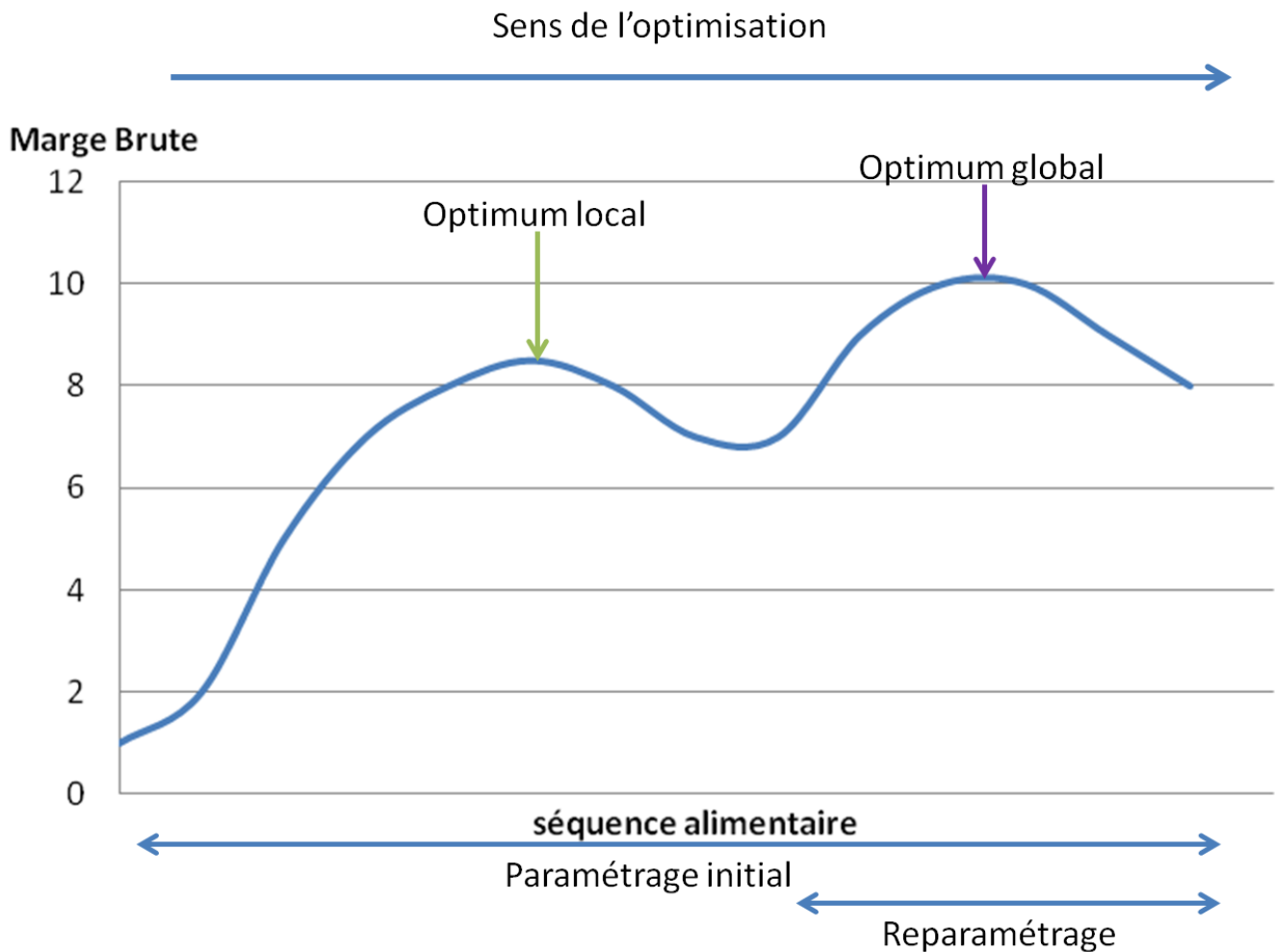


Figure 10: Paramétrage nécessaire de l'optimisation afin de trouver la solution idéale

Lors de l'optimisation, de nombreuses séquences alimentaires sont créées afin d'essayer d'optimiser la fonction objectif. L'optimisation s'arrête lorsqu'il atteint un optimum. Cependant, il faut s'assurer que l'optimum trouvé est bien celui qui maximise le plus la fonction objectif (ici, la marge brute). Pour cela, l'expertise de l'utilisateur est utilisée afin de reparamétriser le point de départ de l'optimisation qui permet d'obtenir le meilleur optimum appelé optimum global.

3. Hypothèses restrictives.

Lors de la conception du programme, nous avons choisi de porter notre attention sur le module animal et les conséquences d'une non-couverture des besoins en lysine. Dans le module « alimentation », nous n'avons pas permis l'utilisation de matières premières produites sur l'exploitation par manque de données sur les impacts de production. Dans le module « animal », nous avons simplifié le départ à l'abattoir en ne réalisant pas d'abattage par lot, l'abattage se faisant à 115kg pour tous les animaux. On n'a également pas pris en compte les maladies et les pertes pouvant toucher le cheptel.

Dans le module « environnement », aucun traitement du lisier ou du fumier ne peut être réalisé. Il n'y a également aucun coût économique de l'épandage du lisier et l'exploitation possède suffisamment de terres pour épandre la totalité de son lisier.

Le programme a nécessité également des contraintes lors de la programmation (dénominateur différent de zéro, valeur maximum...) présentées en annexe 3.

4. Validation interne du comportement du modèle

Afin de vérifier la cohérence des performances simulées par le modèle, nous avons comparé nos résultats avec les simulations de l'article de Brossard et al. (2009). Nous n'avons pas utilisé de régression linéaire lors de cette étude car il n'y a pas indépendance entre les valeurs prédites par notre modèle d'optimisation et les valeurs issues des travaux de Brossard et al (2009). Parmi les critères d'évaluation de l'adéquation des modèles (Tedeschi, 2006), nous avons calculé le carré moyen de l'erreur de prédiction (CMEP) pour l'indice de consommation et le gain moyen quotidien. Ce critère permet de connaître l'erreur moyenne réalisée

$$CMEP = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (Y_i - f(X_1, \dots, X_p))_i\right)^2}{n}$$

Nous avons calculé le biais moyen (BM) pour connaître le sens général de cette erreur (surestimation ou sous-estimation des valeurs) :

$$BM = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - f(X_1, \dots, X_p))_i}{n}$$

Nous avons également examiné les sorties économiques et environnementales afin de s'assurer des estimations correctes du modèle.

5. Scénarios explorés

A partir du programme réalisé, nous avons simulé divers scénarios afin d'étudier leur effet sur les formules et les séquences alimentaires optimisées ainsi que leurs conséquences sur les impacts environnementaux et la marge brute de l'éleveur. Les scénarios explorés sont les suivants :

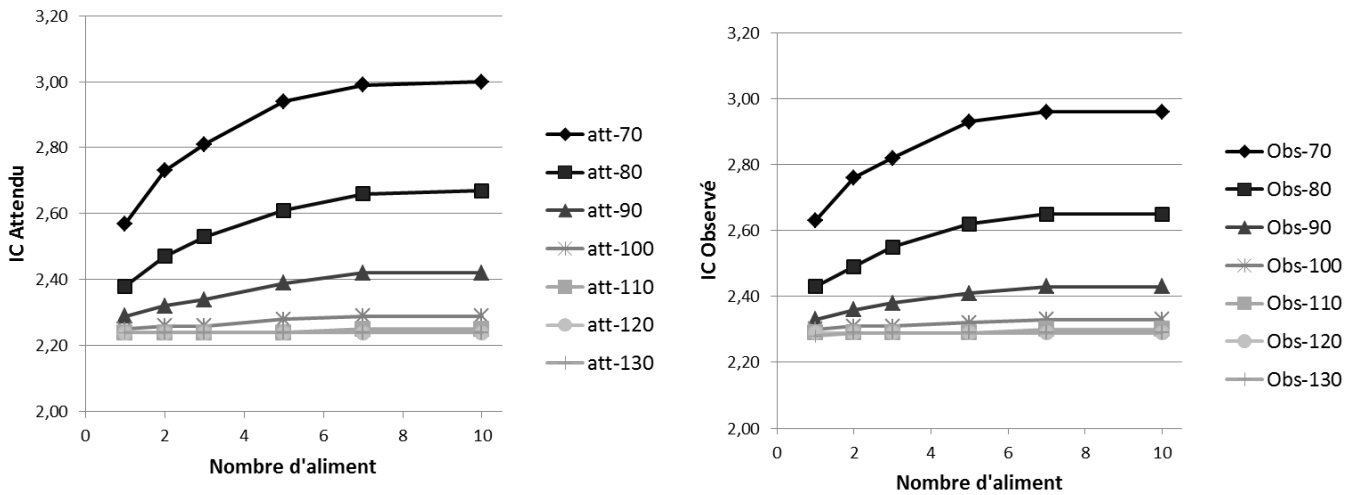


Figure 11 : Evolution de l'indice de consommation en fonction du nombre d'aliments et du taux de couverture des besoins en lysine, estimé par le modèle (à gauche) et simulé avec INRAPorc® d'après Brossard et al. (2009) (à droite)

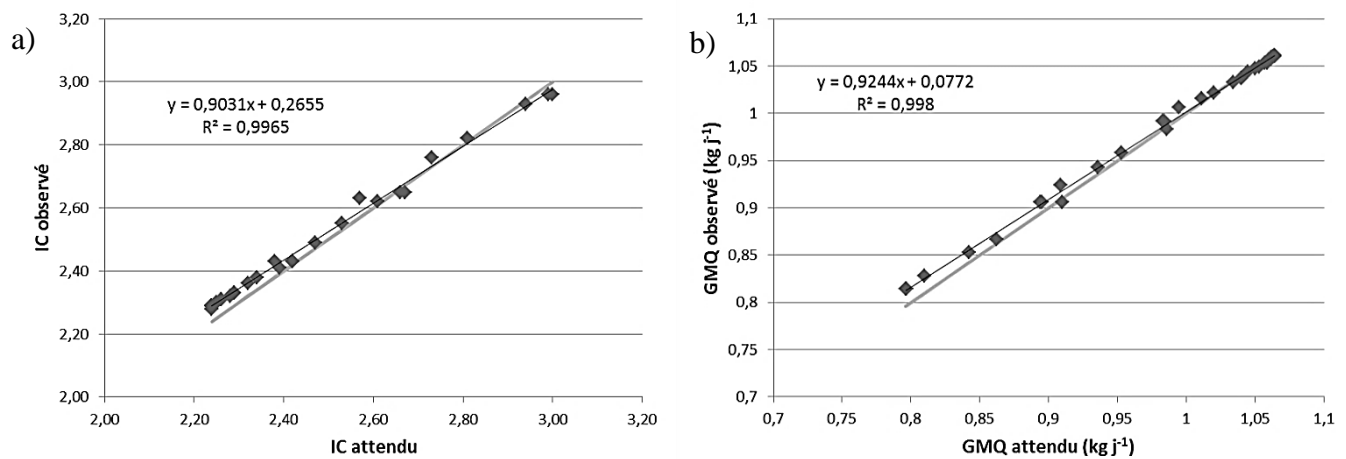


Figure 12 : Valeurs de GMQ (à gauche) et d'indice de consommation (à droite) issues des simulations de Brossard et al. (2009) en fonction des valeurs estimées par notre modèle.

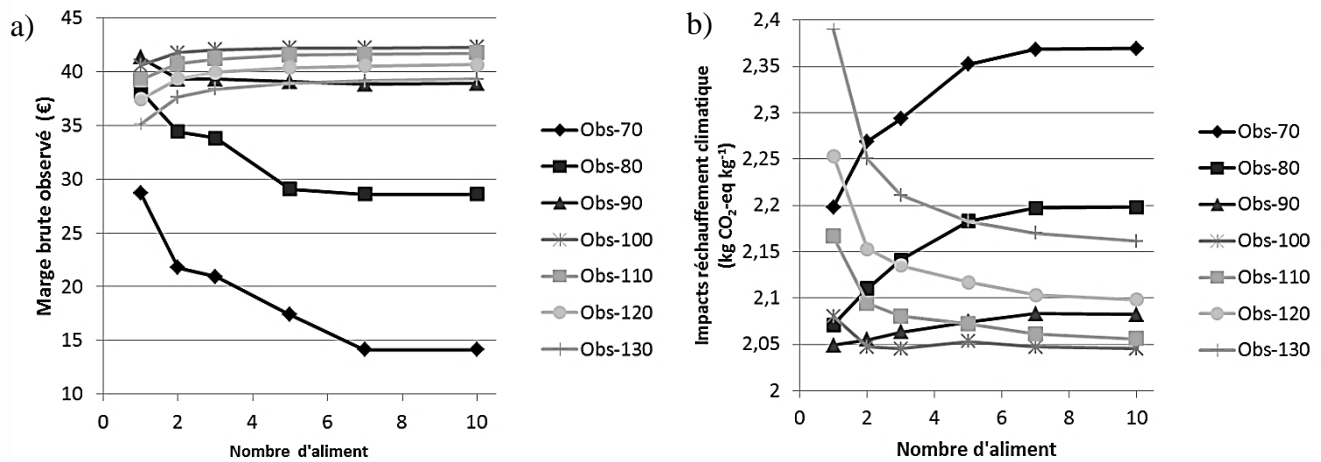


Figure 13 : Evolution de la marge brute (à gauche) et de l'impact sur le changement climatique (à droite) en fonction du nombre d'aliments et du taux de couverture des besoins.

- Optimisation économique seule (coefficient $b=0$) sans utilisation d'AA de synthèse dans les formules
- Optimisation économique seule (coefficient $b=0$) avec utilisation d'AA de synthèse dans les formules
- Optimisation économique et environnementale avec un ratio de pondération de 1 à 4 ($a=1$ et $b=1$ à 4), avec utilisation d'AA de synthèse

Les variations explorées des coefficients de la fonction-objectif (a, b) permettent de modifier le poids de l'un des deux critères (marge brute, impact changement climatique) comme réalisé dans l'étude de Morel et Wood (2005). Ces variations permettent donc de s'intéresser à des situations pratiques comme le cas où l'exploitant veut diminuer l'impact de son activité sur l'environnement (coefficient b élevé), ainsi que celui où seul le profit est maximisé comme base de comparaison (coefficient b nul). Pour les optimisations économiques seules, l'espace des solutions a été réduit afin d'aider le programme à parvenir à une solution pour les séquences comprises entre 7 et 10 aliments. Pour les séquences avec 7 à 9 aliments, la gamme de couverture des besoins est réduite à l'intervalle 90-130%. Pour la séquence à 10 aliments, l'espace est de 80 à 130% (au lieu de 70 – 130%).

III. Résultats

A. Séquences alimentaires et performances simulées par le modèle pour les situations de référence

Une validation du modèle est nécessaire afin de s'assurer de la cohérence de son comportement et de la justesse des sorties du programme. Pour cela, nous avons cherché à reproduire les situations étudiées dans l'article de Brossard et al. (2009). Nous avons bloqué le taux de couverture des besoins en lysine (70, 80, 90, 100, 110, 120, 130) et nous avons optimisé les séquences alimentaires pour un nombre fixe d'aliments (de 1 à 10). Dans l'étude de Brossard et al. (2009), la durée des phases est constante tandis que dans notre programme, la durée des phases est optimisée. Nous avons comparé les valeurs d'indice de consommation (IC) et de gain moyen quotidien obtenues avec celles tirées de l'article.

Les sorties du modèles en termes d'IC ont un comportement similaire à celui de Brossard et al. (2009) comme le montre la figure 11. On constate, dans les deux cas, une augmentation curvilinéaire plateau de l'IC lors d'une augmentation du nombre d'aliments (augmentation de 2,63 à 2,96 et de 2,57 à 3,00 respectivement pour les valeurs observées et attendues pour une couverture de 70% des besoins en lysine). L'IC se dégrade également lors d'une baisse de la couverture des besoins dans chaque cas. Cependant le modèle diminue légèrement les effets de l'augmentation du nombre d'aliments (à 70 % de couverture, l'augmentation de 1 à 10 aliments engendre une augmentation de 12,5% pour les valeurs observées et de 16,73% pour les valeurs attendues). Le modèle a également tendance à augmenter légèrement l'indice de consommation dans le cas d'une séquence avec un aliment unique (2,63 ; 2,30 ; 2,28 pour les

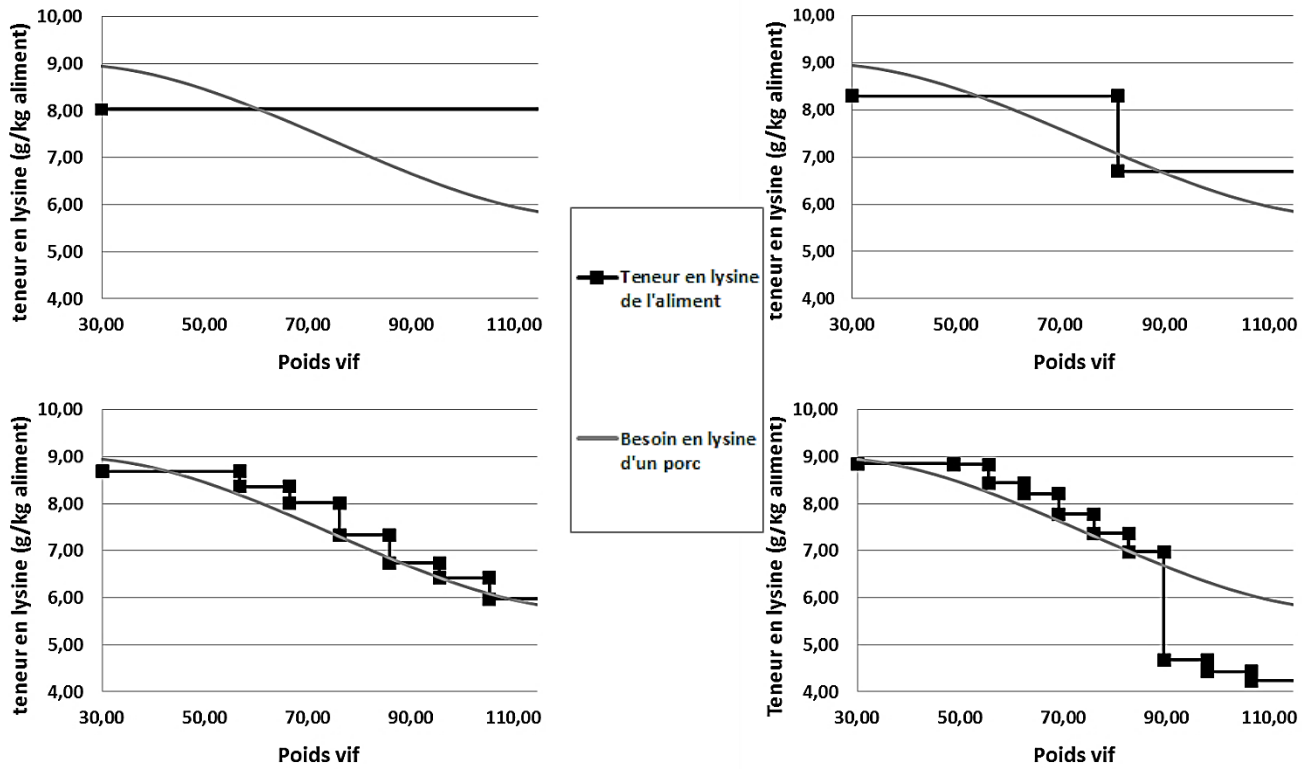


Figure 14 : Evolution de la teneur en lysine des aliments au cours de séquences alimentaires de 1, 2, 7 et 10 phases, comparativement à l'évolution des besoins en lysine d'un porc en croissance.

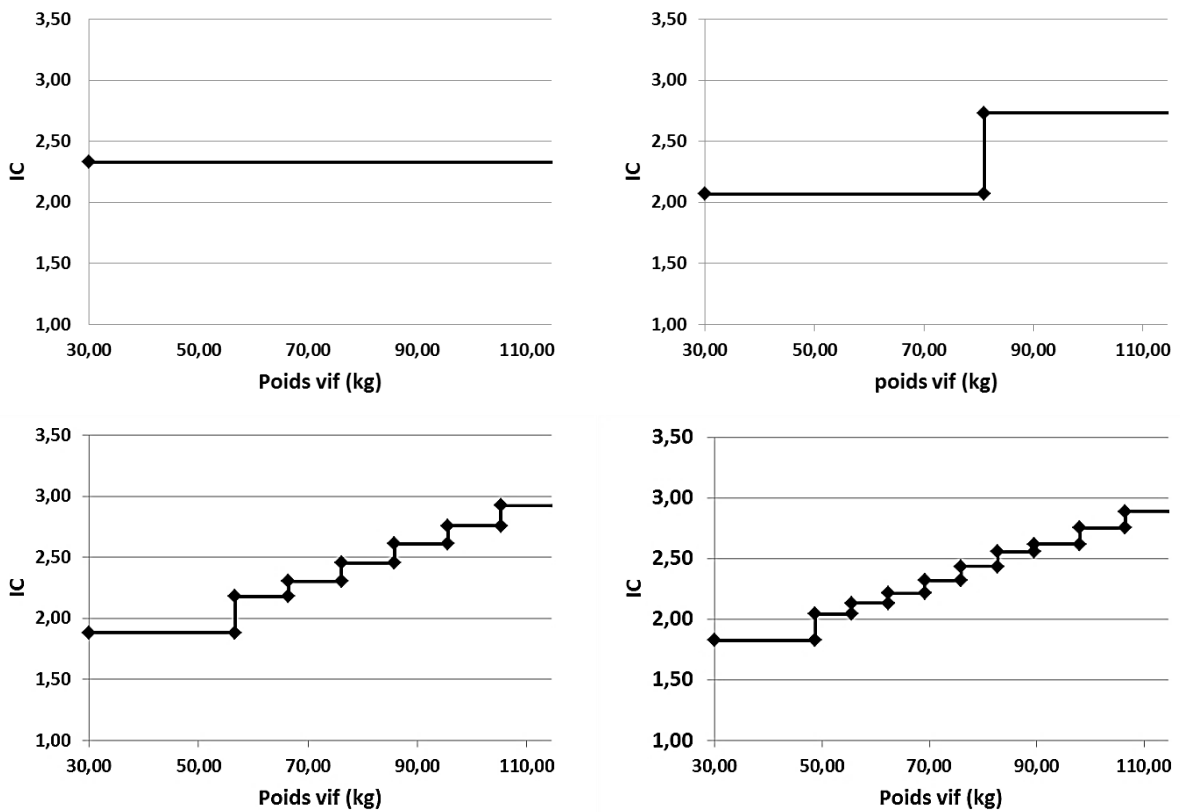


Figure 15 : Evolution des IC moyens en fonction du poids vif lors d'une augmentation du nombre de phases (1, 2, 7, 10)

valeurs observées contre 2,57 ; 2,25 ; 2,28 pour celles attendues respectivement pour des taux de couverture de 70, 100 et 130%).

Malgré ces différences, les deux modèles sont très proches comme le montre le graphique de l'IC observé en fonction des valeurs attendues (Figure 12a). La droite des sorties observées est proche de la bissectrice ($y = 0,9031 + 0,2655x$). L'erreur moyenne de prédiction de l'IC est de 0,04 ce qui correspond à une quantité de 3,54 kg d'aliment sur toute la durée de l'engraissement. Un porc, nourri avec 100% de ses besoins en lysine couverts, a un IC de 2,31 soit 196,4 kg d'aliment ingéré pendant la période d'engraissement. Donc le modèle fait une erreur moyenne de prédiction de 1,8% de l'aliment ingéré. Le biais moyen est égal à -0,033 donc très proche en valeur absolue de l'erreur moyenne de prédiction. Le modèle a donc tendance à augmenter légèrement l'IC comme on peut le voir sur la figure 10a.

Le GMQ évolue également de façon très similaire à celui de l'article de Brossard et al. (2009) (annexe 2). Les valeurs pour les séquences avec un aliment unique sont très proches (0,906 ; 1,057 ; 1,064 pour les valeurs observées contre 0,910 ; 1,053 ; 1,061 pour les valeurs attendues respectivement pour des couvertures des besoins en lysine de 70, 100 et 130%). Mais le programme diminue légèrement l'effet de l'augmentation du nombre d'aliments sur le GMQ. Pour une couverture de 70%, le GMQ diminue de 10 et 12 % respectivement pour les valeurs du modèle et de l'article. Cependant les résultats du modèle sont très proches des résultats attendus, comme le montre la figure 12b. La droite des valeurs observées en fonction des valeurs attendues ($y=0,9244+0,0772x$) est adjacente à la bissectrice. Le CMEP est égal à $5,42 \times 10^{-5} \text{kg}^2 \cdot \text{j}^{-2}$ soit une erreur moyenne de prédiction de 0,007 kg par jour sur le GMQ et une erreur moyenne de $8,65 \times 10^{-5}$ jours sur la durée d'engraissement. Le biais moyen est de -0,0015 kg/j, très proche de 0, donc le programme donne une valeur en moyenne quasi-centrée sur la valeur de l'article de Brossard et al. (2009)

Cet article ne calcule pas les valeurs de marge brute ni l'impact environnemental sur le changement climatique, ce qui ne permet pas de comparaison directe avec nos résultats. Nous avons cependant vérifié par expertise la cohérence de nos sorties lorsque l'on fixe les teneurs en lysine. La marge brute (Figure 13a) est proche des 40€ par porc pour l'ensemble des couvertures des besoins en lysine supérieures à 90% et diminue très fortement pour des couvertures inférieures. On atteint un minimum de 14,12€ par porc pour une séquence de 10 aliments avec 70% des besoins en lysine couverts. En effet en dessous de 90%, l'augmentation du nombre d'aliments entraîne une baisse de la marge brute (-35% entre 2 et 10 aliments à 70% de couverture). Au-dessus de 100%, l'augmentation du nombre d'aliments améliore faiblement la marge (<4% entre 2 et 10 aliments) grâce à une certaine stabilité de l'IC (Tableau 3) mais plus la couverture des besoins en lysine est élevée moins la marge brute est importante. Il y a donc un optimum de la marge brute entre 90 et 100% de couverture des besoins en lysine (selon le nombre de phases).

On observe un comportement similaire au niveau de l'impact sur le changement climatique (Figure 13b). Les variations des émissions de gaz à effet de serre (GES) sont relativement importantes. En effet, les valeurs sont comprises entre 2,05 et 2,37 kg CO₂-eq/kg porc. Ce qui correspond à la diminution que l'on observe lors de l'inclusion dans la formule des AA de

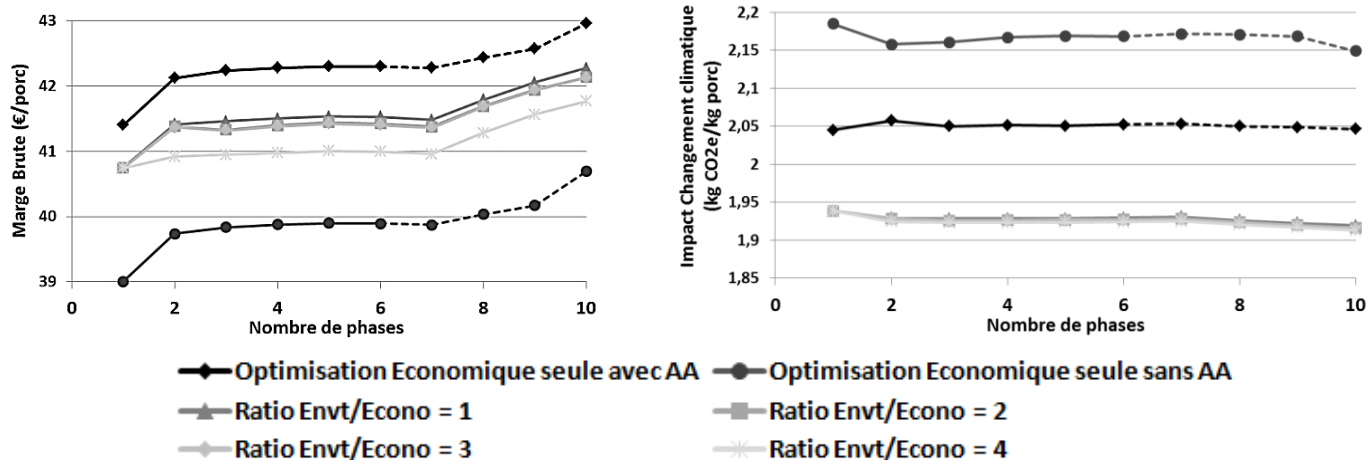


Figure 16 : Evolution de la marge brute (à gauche) et de l'impact sur le changement climatique (à droite) selon différentes pondérations entre ces deux critères : optimisation économique seule sans AA, optimisation économique seule avec AA, optimisation sur la marge brute et le changement climatique: pondération égale (Ratio Env/Econo=1), deux fois, trois ou quatre fois supérieure pour le changement climatique par rapport à la marge brute (Ratio Env/Econo= 2, 3 ou 4). Les valeurs en pointillé sont des valeurs où l'espace des solutions (couverture des besoins en lysine) a été réduit afin d'aider le programme trouver une solution optimale.

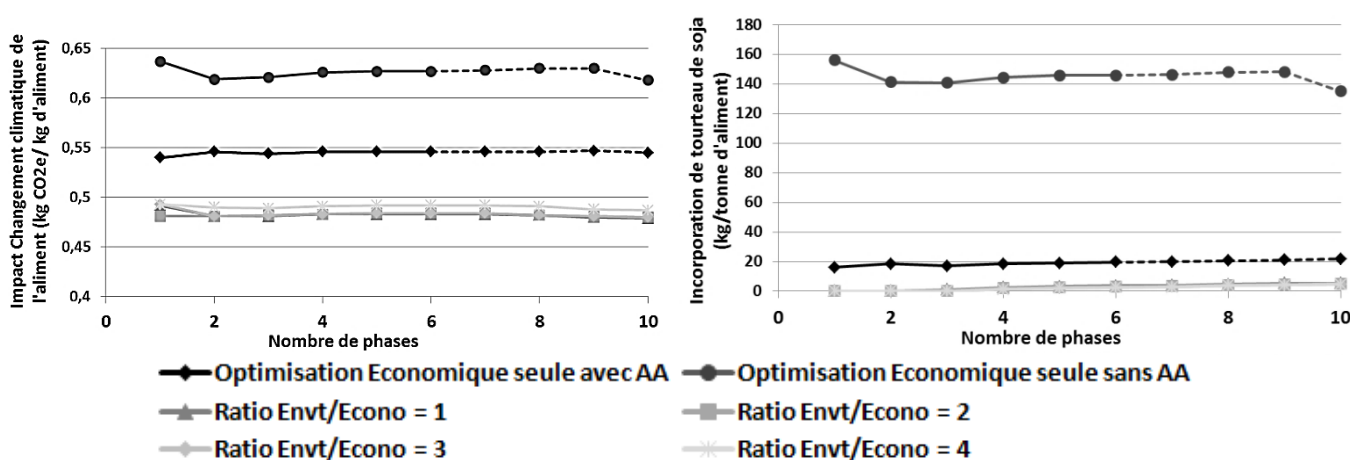


Figure 17 : Evolution de l'impact sur le changement climatique de l'aliment (à gauche) et du taux d'incorporation moyen du tourteau de soja dans les formules (à droite) selon les différentes modalités d'optimisation et le nombre de phases.

synthèse. L'impact sur le changement climatique, comme la marge brute, se comporte différemment en dessous de 90% et au-dessus de 100% de couverture des besoins en lysine :

- En dessous de 90%, l'augmentation du taux de couverture en lysine diminue la quantité de GES émises. En effet, pour des séquences avec un aliment unique, l'impact changement climatique est égal à 2,20 ; 2,07 ; 2,05 kg CO₂-eq / kg porc respectivement pour des couvertures de 70%, 80% et 90%. L'augmentation du nombre d'aliments engendre une augmentation de l'impact des séquences alimentaires passant de 2,20 à 2,37 kg CO₂-eq / kg porc entre 1 et 10 aliments à 70% de couverture en lysine.
- Au-dessus de 100% de couverture des besoins, la tendance s'inverse. Une augmentation du nombre d'aliments permet de réduire l'impact de la production sur le changement climatique. Par ailleurs l'augmentation de la couverture des besoins en lysine, entraînant une augmentation des rejets azotés, engendre une hausse des émissions de GES et donc de l'impact changement climatique qui passe de 2,08 à 100% à 2,39 kg CO₂-eq / kg porc à 130%.

L'optimum pour réduire l'impact des séquences alimentaires sur le changement climatique est situé entre 90 et 100% de couvertures des besoins en lysine.

B. Description de la dynamique des séquences alimentaires.

La cohérence des séquences alimentaires produites par le modèle peut également s'apprécier en examinant l'évolution de la teneur en lysine des aliments comparativement à l'évolution des besoins en lysine et en examinant également l'évolution de l'indice de consommation. Pour cela nous avons étudié des séquences alimentaires conçues en optimisant à pondération égale la marge brute et l'impact sur le changement climatique.

La figure 14 montre l'évolution des besoins en lysine d'un porc au cours de son engraissement ainsi que la teneur en lysine des aliments des séquences alimentaires. A 30kg, un porcelet a besoin en moyenne d'un aliment ayant 9 g de lysine /kg d'aliment pour croître normalement et ses besoins décroissent pour atteindre 5,85g/kg d'aliment à 115kg de poids vif. Entre 50 et 90 kg, la pente des besoins est maximale. La teneur en lysine des aliments tend à se rapprocher au maximum des besoins. Avec un seul aliment, la teneur en lysine de celui-ci est inférieure au besoin (8g/kg) afin de réduire le prix de l'aliment ainsi que son impact sur le changement climatique mais reste suffisamment élevée pour éviter de dégrader fortement l'IC (Tableau 3) et le GMQ (annexe 2.5). Lors de l'augmentation du nombre d'aliments, l'IC se dégrade et le modèle augmente la couverture des besoins en lysine pour compenser (la couverture des besoins de la première phase est de 89,8, 92,8, 97,1 et 98,9% respectivement pour des séquences de 1, 2, 7 et 10 aliment(s)). Les changements de phase permettent de diminuer la teneur en lysine à chaque nouvel aliment. Avec une séquence de 7 aliments, les aliments ont une couverture proche voire supérieure à 100%. Le programme génère une longue première phase qui permet ensuite de changer fréquemment d'aliment entre 50 et 90 kg de poids vif. Au-dessus de 7 aliments, l'IC ne se dégrade plus lorsque l'on

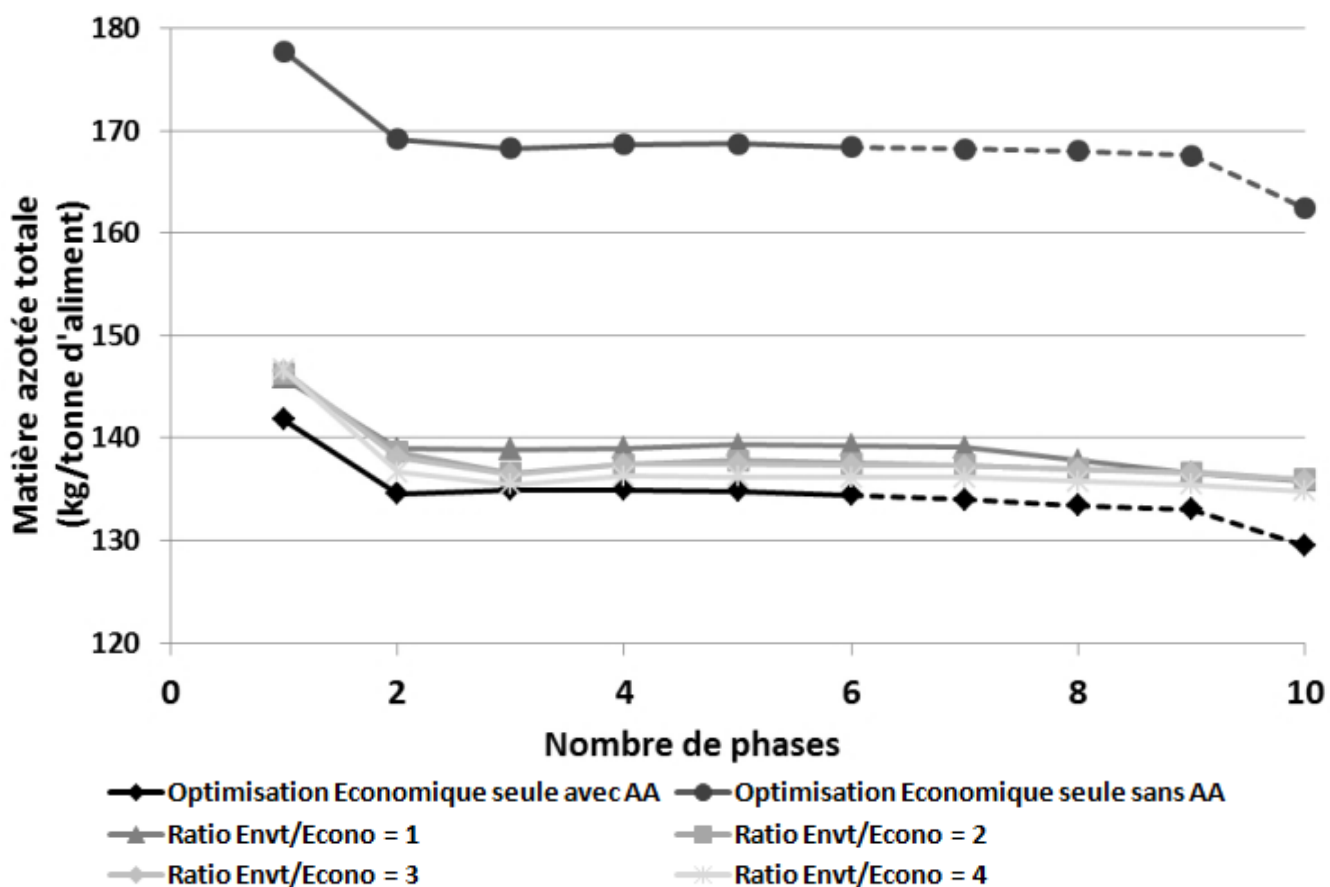


Figure 18 : Evolution de la MAT moyenne des aliments selon les différentes modalités d'optimisation (optimisation économique seule avec ou sans AA, et différentes pondérations entre marge brute et impact changement climatique).

augmente le nombre d'aliments quel que soit le taux de couverture des besoins, ce qui permet de diminuer fortement la couverture des besoins et donc de limiter les coûts économiques et les rejets environnementaux sans contrepartie.

La figure 15 présente les évolutions de l'IC moyen de chaque phase selon le nombre d'aliments de la séquence alimentaire. Celui-ci augmente à chaque changement de phase, passant, par exemple, de 2,07 à 2,97 pour la séquence à 2 aliments. Au-delà du 7ème aliment la baisse de la couverture des besoins n'engendre aucune augmentation de l'IC. On remarque qu'une augmentation du nombre de phases permet de diminuer l'IC de la première phase grâce à la hausse du taux de couverture des besoins.

Après cette description en dynamique de l'évolution des séquences alimentaires, nous allons étudier les séquences alimentaires optimisées selon différentes pondérations entre marge brute et impact changement climatique dans la fonction objectif.

C. Etude de la prise en compte de l'environnement dans la conception des séquences alimentaires : performances, rentabilité et impacts.

Pour cette analyse des effets de l'optimisation économique et environnementale, nous avons laissé le programme optimiser à la fois les formules, le taux de couverture des besoins en lysine (70 à 130%) et la durée de chaque phase. Nous avons étudié les séquences alimentaires optimisées en faisant varier la pondération entre le critère économique et environnemental d'un ratio 1 à 4 (poids 4 fois plus important pour le critère environnemental dans la fonction-objectif).

1. Etude des facteurs optimisés.

La marge brute et le changement climatique sont les deux critères optimisés (Figure 16). La marge brute, quel que soit le type d'optimisation choisi, est comprise entre 39 et 43€ / porc et a un comportement que l'on peut décrire de la façon suivante :

- Une augmentation forte entre la séquence à un aliment et celle à deux aliments. Dans le cas d'une optimisation avec un ratio environnement sur économie égal à 1, le passage à deux aliments permet d'augmenter la marge brute de 0,66€ / porc.
- Une stagnation de la marge brute entre 2 et 7 aliments voire une diminution entre les séquences à 6 et 7 aliments.
- Une augmentation forte pour les séquences avec plus de 7 aliments.

La prise en compte de l'environnement réduit la marge brute quelle que soit la séquence alimentaire choisie (en moyenne 0,71€/ porc entre l'optimisation sans critère environnemental et celle avec un ratio de 1), d'autant plus si on exagère la pression environnementale sur l'optimisation.

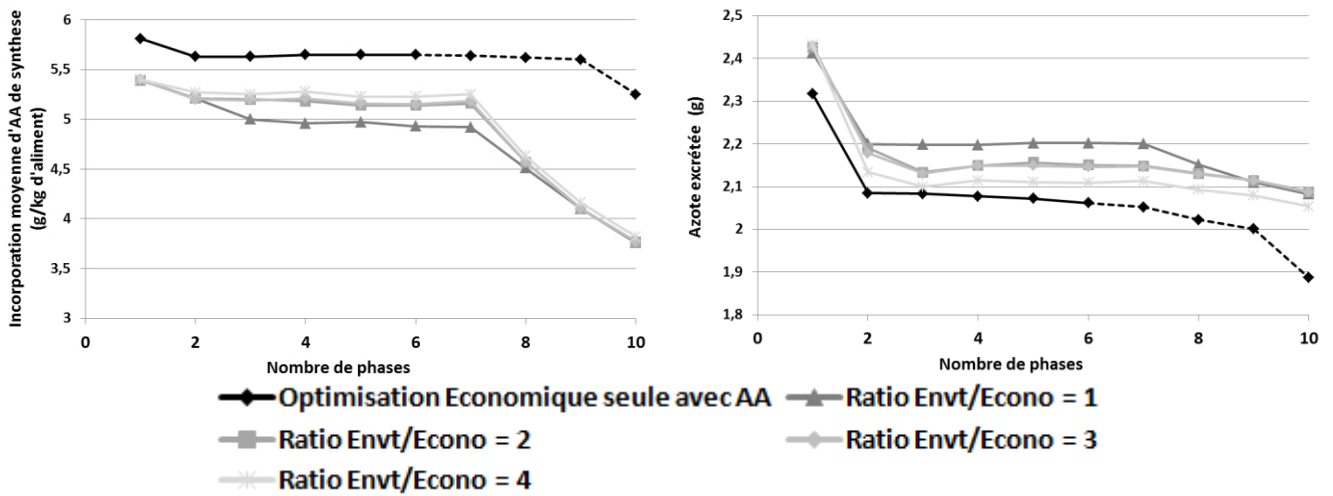


Figure 19 : Evolution du taux d'incorporation des AA de synthèse (à gauche) et des quantités d'azote excrété par porc (à droite) en fonction du nombre d'aliments et selon différentes modalités d'optimisation.

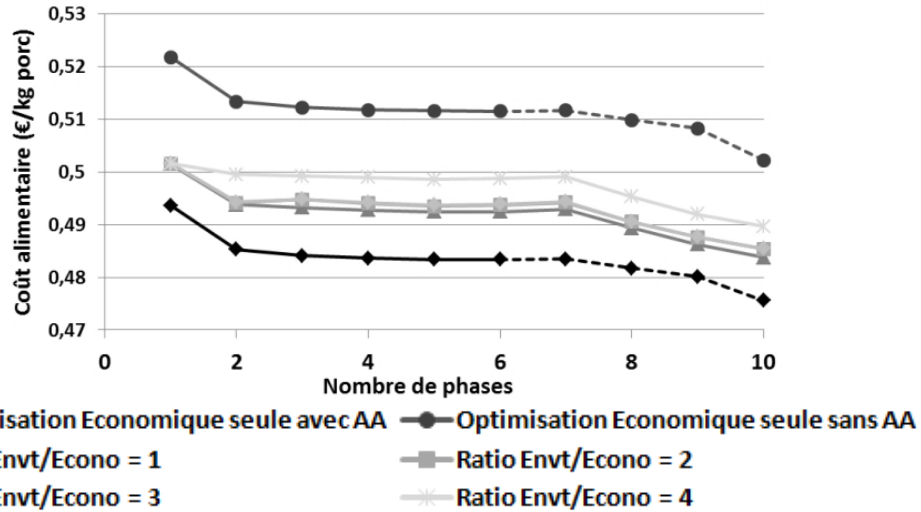


Figure 20 : Variation du coût alimentaire d'un kilogramme de croît en fonction du nombre de phases et des différentes modalités d'optimisation étudiées.

Cette prise en compte permet de diminuer l'impact sur le changement climatique de plus de 0,12 kg de CO₂-eq / kg porc, permettant d'atteindre le seuil des 1,95kg de CO₂-eq / kg porc. Celui-ci n'est pas influencé par l'augmentation du poids de l'environnement dans l'optimisation. Ce faible écart entre la situation économique et celle tenant compte de l'environnement peut s'expliquer par le fait que la solution économique a déjà un impact sur le changement climatique restreint grâce à l'utilisation d'AA de synthèse. En effet l'utilisation des AA de synthèse, en plus d'amoindrir l'impact de la séquence (diminution de 0,16 kg de CO₂-eq / kg porc en moyenne), permet d'améliorer la marge brute de 2,38€ / porc, comme le montre la figure 16a.

2. Variation de l'impact changement climatique associée au changement de formule.

La diminution de l'impact changement climatique s'explique facilement par la baisse de l'impact de la formule (due aux matières premières qui la composent). L'impact sur le changement climatique de la formule (Figure 17a) diminue fortement lors de l'incorporation d'AA de synthèse (diminution de 0,63 à 0,54 kg de CO₂-eq par kilogramme d'aliment), mais aussi lors de l'optimisation prenant en compte l'environnement (diminution de 0,55 à 0,48 kg CO₂e/kg aliment), ce qui correspond à une diminution de l'impact de 0,12 kg de CO₂-eq / kg porc soit la totalité de la diminution de l'impact global sur le changement climatique.

Deux processus expliquent ces diminutions d'impact des formules :

- L'ajout d'AA de synthèse permet de diminuer l'incorporation de tourteau de soja (Figure 17b) venant majoritairement du Brésil (et ayant des impacts environnementaux importants (annexe 4), passant de plus de 140kg à seulement 20kg par tonne d'aliment. Cette diminution entraîne une baisse de la MAT (Figure 18a) car l'utilisation d'AA de synthèse permet de mieux respecter le profil de la protéine idéale, passant ainsi d'une MAT de 170g/kg d'aliment à 135g/kg.
- La prise en compte de l'environnement contraint le programme à supprimer le tourteau de soja de la formule (Figure 17b) et à le remplacer par du pois, moins intéressant économiquement que le tourteau mais possédant un impact beaucoup plus faible. Mais l'incorporation de soja étant déjà faible, il existe une autre source de diminution de l'impact de la formule. Le pois remplace également une partie des AA de synthèse dont le coût environnemental de fabrication est le plus élevé de toutes les matières premières dont dispose le programme (annexe 4). En effet, la formule, prenant en compte les émissions de GES, a en moyenne 0,8 g d'AA de synthèse par kg d'aliment en moins par rapport à l'optimisation économique seule. Mais cela a pour effet d'augmenter légèrement la MAT (<5g/kg d'aliment) et donc les rejets azotés (+0,1kg).

Lors de l'augmentation du poids du critère environnemental dans l'optimisation, le programme cherche à réduire les rejets mais augmente l'impact changement climatique des aliments, ce qui entraîne un résultat quasi-nul au niveau de l'impact global mais diminue

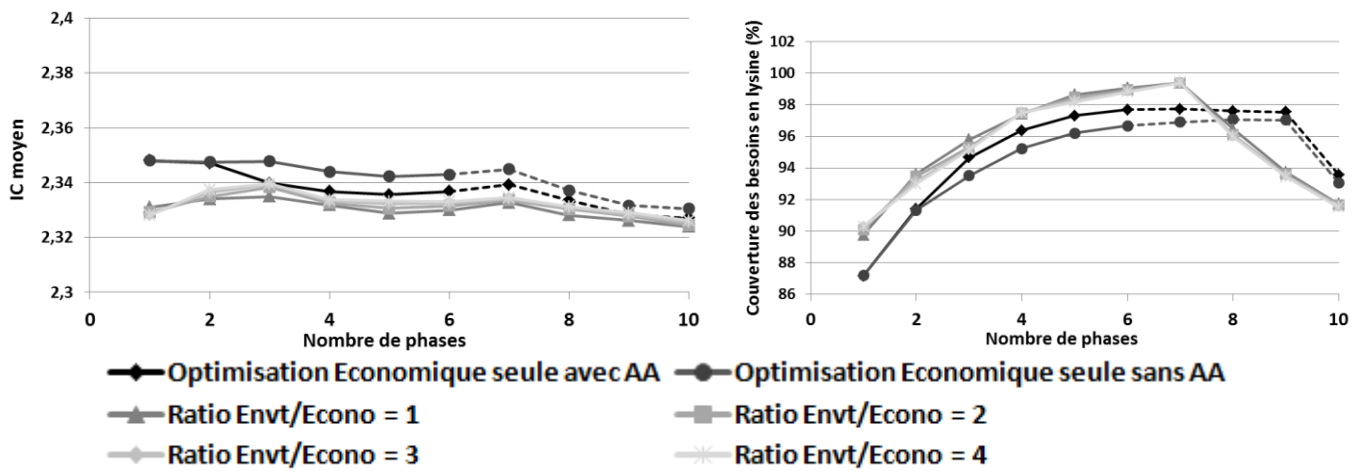


Figure 21 : Evolution de l'indice de consommation moyen (à gauche) et du taux moyen de couverture des besoins en lysine (à droite) en fonction du nombre d'aliments et de différentes modalités d'optimisation.

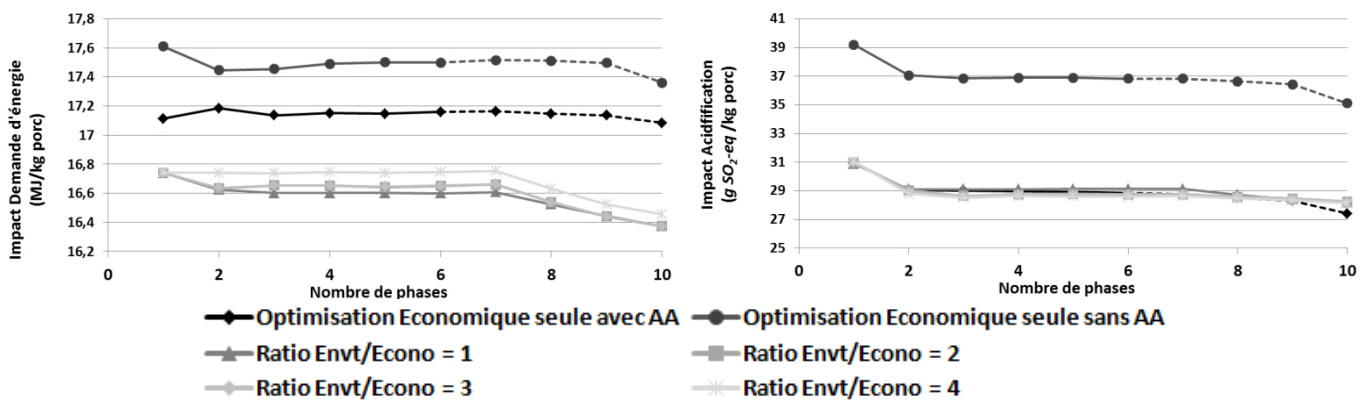


Figure 22 : Evolution de a) la demande en énergie (MJ/kg porc) et de b) l'impact sur l'acidification (g SO₂e/kg porc) en fonction du nombre d'aliments et de différentes modalités d'optimisation.

fortement la marge brute (-0,46€ par porc en moyenne entre l'optimisation avec un ratio de 1 et celui avec un ratio de 4).

3. Une marge brute décroissante due au prix des formules

Le coût alimentaire nous renseigne sur l'origine des variations de marge brute que nous observons. En effet, on constate que le coût alimentaire a des variations contraires à la marge brute (Figure 20). Le coût alimentaire augmente de 0,008€ par kilo de croît entre l'optimisation économique seule et celle avec un ratio de 1, soit 0,68€ par porc, ce qui correspond environ à la baisse de la marge brute observée. Or la figure 21a nous montre la stabilité de l'IC global quelle que soit l'optimisation choisie. Celui-ci est en effet compris entre 2,32 et 2,35, seules les séquences à une phase étant différentes. Ce maintien de l'IC est permis par une augmentation de la couverture des besoins sur les 7 premières phases. Pour les séquences à 8, 9 ou 10 aliments, le taux de couverture des besoins n'influence plus les quantités ingérées des derniers aliments (8, 9 et 10). Le modèle trouve alors des solutions avec des taux de couverture des besoins très faibles pour ces aliments 8, 9 et 10 qui font décroître le pourcentage moyen de couverture. La consommation d'aliment étant relativement constante, c'est donc le prix des formules qui influence la marge brute. Le pourcentage moyen de couverture des besoins en lysine varie entre 90 à 100%, ce qui est cohérent avec le taux optimal de couverture des besoins trouvé dans la partie III.A.

4. Variation des autres impacts lors de l'augmentation de la pondération de l'environnement.

L'approche ACV permet d'étudier conjointement plusieurs impacts, et de considérer l'ensemble du cycle de vie du produit. Cela permet de contrôler d'éventuels transferts de pollution en amont ou en aval du cycle de vie, et entre différents types d'impacts. La diminution des émissions de GES s'accompagne d'une baisse de la demande énergétique (Figure 22a), passant d'une valeur moyenne de 17,1MJ /kg porc à 16,6 MJ / kg porc. Par contre, cette optimisation n'a aucun effet sur l'acidification des sols (constante à 29g SO₂-eq / kg porc). Seule la non-utilisation des AA de synthèse provoque l'augmentation de cet impact (37g SO₂-eq par kilogramme de porc). Mais l'optimisation prenant en compte les émissions de GES engendre des transferts de pollution vers l'eau et le sol (Figures 23a et 23b). L'impact sur l'eutrophisation, réduit par l'utilisation des AA de synthèse (diminution de 3,46 g PO₄-eq / kg porc en moyenne), est détérioré lorsque l'on tient compte des GES. L'eutrophisation est alors augmentée de 23,7 à 24,9 g PO₄-eq / kg porc. Le sol est également touché par ce transfert de pollution. L'optimisation prenant en compte l'impact sur le changement climatique augmente l'impact sur l'écotoxicité terrestre d'environ 1 g 1,4-DB-eq/ kg porc. Cette augmentation s'explique par l'utilisation du maïs comme source d'énergie dans la formule. La production de maïs a en effet un impact l'écotoxicité terrestre 7 fois plus fort que l'orge. Dans le cas où seul le critère économique est optimisé, le maïs en forte proportion au début de l'engraissement diminue au cours du temps, remplacé par de l'orge. Quand on optimise sur la marge brute et l'impact changement climatique, le maïs est conservé tout au long de l'engraissement, la production d'orge ayant un impact sur le changement climatique plus élevé que la production de maïs. Les surfaces utilisées, pour les cultures essentiellement,

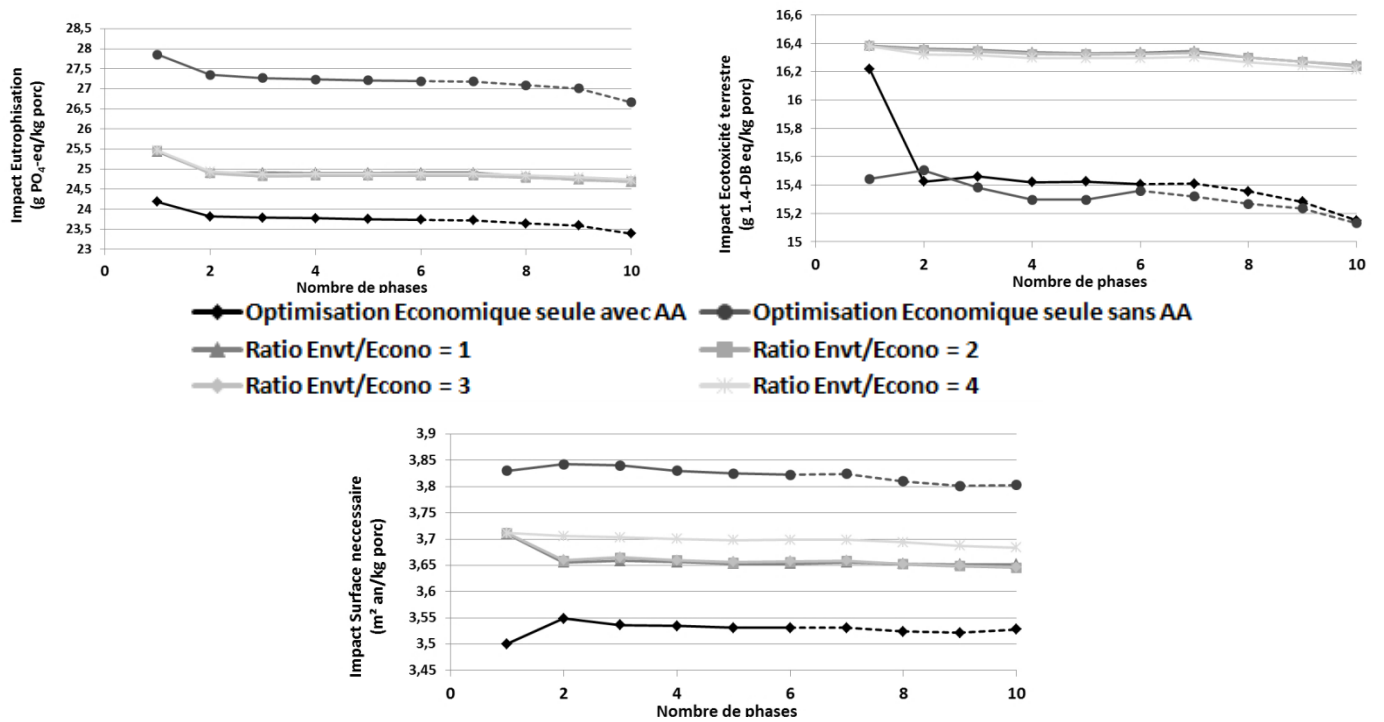


Figure 23 : Evolution de a) l'impact sur l'eutrophisation (g PO₄-eq/kg porc), de b) l'impact sur l'écotoxicité terrestre (g 1,4DB-eq/kg porc) et de l'impact sur les surface nécessaire (m²an/kg porc) en fonction du nombre d'aliments et de différentes modalités d'optimisation.

augmentent également passant de 3,53 à 3,66 m².an/kg porc (Figure 23c). L'augmentation du ratio dans l'optimisation accroît encore cet impact.

IV. Discussion

A. Cohérence du modèle

Le modèle construit apparaît comme cohérent et assez précis. En effet les sorties du programme sont très semblables aux sorties obtenues par Brossard et al. (2009) à l'aide du logiciel INRAporc®. Les résultats d'impacts obtenus dans les situations de référence sont plus faibles que ceux observés dans la bibliographie (2,36 kg CO₂-eq dans l'article de Garcia-Launay et al (2014) contre 2,06 kg CO₂-eq dans notre modèle). Mais ce même article met en évidence une forte sensibilité des impacts environnementaux à l'indice de consommation (le coefficient moyen de sensibilité de l'impact sur le changement climatique est de 0,67 avec l'IC). Or notre population, tirée de l'article de Brossard et al. (2009) est très particulière puisque son IC moyen est de 2,24 contre un IC moyen de 2,76 pour la région Bretagne (Badouard et Calvar, 2014), ce qui entraîne des impacts plus faibles que les moyennes habituellement calculées et des marges brutes très élevées.

La séquence alimentaire répond à une logique à la fois biologique et d'optimisation. En effet, réaliser une longue première phase pourrait sembler contradictoire puisque qu'à ce moment-là le prix de l'aliment est le plus élevé mais une première phase longue permet à l'ensemble des porcs de poursuivre leur croissance en ayant leurs besoins couverts sans qu'un changement précoce n'affecte les animaux ayant les plus forts besoins (le programme prend en compte le fait que lorsqu'on augmente le nombre d'aliments (à couverture <110%), on dégrade l'IC de la population car les animaux ayant les plus forts besoins sont pénalisés à chaque changement d'aliment). De plus, la longue première phase permet de changer fréquemment d'aliment entre 50 et 90 kg de poids vif, là où les besoins en lysine chutent le plus rapidement. La forte baisse de la couverture des besoins pour les aliments 8, 9 et 10 n'a pas de conséquence sur la performance des animaux et sur le TMP en particulier car le porc dépose essentiellement des lipides en fin de croissance.

B. Effet du nombre de phases sur la marge brute et les impacts

L'augmentation du nombre d'aliments est souvent présentée comme une mesure importante pour réduire les rejets (Dourmad et Jondeville, 2007 ; Garcia-Launay et al. 2014). Le programme montre que cette technique ne diminue que faiblement les émissions de GES (0,019kg CO₂eq / kg porc entre 1 et 10 aliments) notamment parce que les scénarios simulés (sauf le scénario sans AA de synthèse) sont des situations de bonnes pratiques (pas de minimum de MAT pour la formulation des aliments et utilisation des AA de synthèse). Le modèle développé montre qu'il n'y a pas de variation d'émission de GES ni de marge brute entre les séquences de 2 à 7 aliments. (Le modèle ne tenant pas compte des frais de livraisons ou d'entretien des silos, la marge brute pourrait même diminuer fortement). Les émissions de GES ne diminuent pas avec l'augmentation du nombre de phases car on tient compte ici de la

performance de la population et non pas de l'animal moyen. Afin de ne pas léser les porcs aux plus forts besoins, il y a nécessité d'augmenter le pourcentage de couverture des besoins quand on augmente le nombre d'aliments (à couverture fixe, on constate une hausse de l'IC avec l'augmentation du nombre de phases). L'intérêt de la multiplication des phases retrouvé dans la littérature pourrait venir du fait que peu d'articles explorent un nombre de phases compris entre 3 et 10.

C. Pondération croissante environnementale, un intérêt ?

Lors la prise en compte des émissions de GES dans la fonction objectif, on observe une réduction logique de la marge brute et de l'impact sur le changement climatique des séquences alimentaires. La réduction de l'impact se fait par une évolution de la formule, ce qui est cohérent avec les travaux de Basset-Mens et Van der Werf (2005). En effet, selon cette étude 73% de l'impact d'un élevage de porcs « conventionnel » sur le changement climatique sont dus à la production des aliments. Le programme supprime la quasi-totalité du tourteau de soja venant majoritairement du Brésil et diminue la part des AA de synthèse dans la formule (qui ont un fort impact sur l'émission de GES) les remplaçant par du pois dont l'impact sur le changement climatique est plus faible.

Cependant cette réduction des émissions de GES induit un transfert de pollution vers l'eutrophisation dû à une augmentation des rejets azotés ainsi qu'à l'utilisation de pois dont l'impact sur l'eutrophisation est important. Les sols sont également détériorés par la prise en compte de l'impact du changement climatique dans l'optimisation. La non-substitution du maïs par l'orge entraîne une augmentation de l'écotoxicité terrestre. Ces impacts sont toutefois assez faibles et ne remettent pas en cause l'idée d'une formulation réduisant les GES.

L'augmentation du ratio de pondération environnement sur économique (dans la fonction objectif) n'a par contre aucun intérêt, cette dernière diminuant fortement la marge brute pour un gain sur l'émission de GES extrêmement faible. Il n'y a pas d'intérêt particulier à mettre une pondération plus importante sur le critère environnemental si la formulation des aliments est réalisée sans seuil minimum de matière azotée totale et en utilisant des AA de synthèse.

Les travaux de Morel et al.(2005), bien que travaillant sur une optimisation économique et environnementale avec une augmentation de la pondération, sont difficilement comparables avec les travaux présentés ici. En effet, le modèle de Morel et al. ne tient pas compte des impacts mais seulement des rejets azotés (et ne prend donc pas compte l'amont de la production). De plus, il semblerait qu'ils n'utilisent pas d'AA de synthèse dans leurs formules compte tenu des quantités de rejets simulées.

D. Intérêts et limites du modèle

Ce travail se base sur une véritable population, le modèle présente donc le comportement d'une population plutôt que d'un individu moyen. On prend ainsi en compte le fait que

l'augmentation du nombre d'aliments (à couverture <110%) dégrade l'IC de la population. Le modèle présente aussi l'avantage d'inclure un calcul d'ACV dans un travail d'optimisation de la séquence alimentaire ce qui permet d'étudier les transferts de pollution, et de ne pas se limiter aux GES et aux émissions sur l'exploitation. Mais il ne s'agit que d'un méta-modèle d'INRAporc®. Il faudra donc le reparamétrer à chaque fois qu'on veut étudier une nouvelle population. De plus, certaines simplifications ont été réalisées afin de créer les courbes de croissance et d'ingestion, il serait intéressant d'introduire directement un modèle de croissance stochastique afin de résoudre ces problèmes comme réalisé par l'équipe de Morel et al (2012).

Ce travail a également rencontré des difficultés car l'algorithme d'optimisation a eu des difficultés à parvenir à une solution du fait de la complexité du modèle. En effet, du fait de ses équations, le modèle est non linéaire, ce qui implique de définir un espace des solutions restreint et de gérer les critères d'optimisation (critères de convergence) car le programme ne trouvera qu'un optimum local. Nous avons été contraints d'utiliser des fonctions dont les dérivées sont discontinues (min, max) pour prendre en compte les effets des durées des phases sur les variations de quantités ingérées, ce qui a rendu difficile la recherche de la solution optimale par l'algorithme. Ces limites expliquent pourquoi une partie des résultats est donnée avec un espace des solutions plus restreint (taux de couverture des besoins en lysine compris entre 80 ou 90 et 130% au lieu de 70 et 130% initialement prévu).

V. Conclusion

La recherche d'une meilleure durabilité des élevages nécessite de réaliser des compromis entre économie et environnement. Afin d'explorer l'ensemble des solutions, nous avons développé un modèle permettant d'optimiser l'atelier de porc en engraissement sur des critères économiques mais également environnementaux par l'utilisation d'une méthodologie d'ACV. Le modèle actuel basé sur un méta-modèle d'INRAporc® à partir d'une population réelle permet de reproduire fidèlement les performances des animaux utilisés dans l'étude de Brossard et al. (2009). Il intègre l'effet de la variabilité des performances dans la population étudiée sur les résultats de marge brute et d'impacts environnementaux.

L'optimisation économique et environnementale conduit à une réduction de l'impact changement climatique de la production de porcs et à une diminution de la marge brute par porc. Ce résultat traduit un compromis entre ces deux objectifs, à même nombre d'aliments dans la séquence. En revanche, passer d'une alimentation biphasé avec optimisation économique seule à une alimentation multiphasé (9 ou 10 aliments) avec optimisation économique et environnementale (même pondération pour les 2 critères) réduit l'impact changement climatique et ne dégrade pas la marge brute. Les résultats produits par le modèle, au-delà de l'optimisation en tant que telle, donnent donc à réfléchir les pratiques d'alimentation des porcs en engraissement pour parvenir au meilleur compromis. Dans cette étude, la réduction de l'impact changement climatique s'obtient par incorporation préférentielle des matières premières à plus faible impact dans les formules. En revanche, ces formules conduisent à des rejets azotés un peu plus importants. Une façon de contourner ce

problème de transfert de pollution pourrait être d'incorporer plusieurs impacts environnementaux dans la fonction objectif et/ou de minimiser les impacts des aliments aussi bien que les émissions sur l'exploitation.

Les perspectives immédiates de ce travail sont d'explorer les variations de ces résultats entre différents contextes de prix des matières premières, et d'intégrer l'impact eutrophisation dans la fonction objectif pour éviter des transferts de pollution. A plus long terme, la prise en compte de ces critères associés (marge brute, impact changement climatique, impact eutrophisation...) dans un logiciel associant un modèle de croissance stochastique et un calcul des impacts par ACV permettrait d'explorer des stratégies efficaces de réduction des impacts environnementaux en étudiant l'effet de la variabilité interindividuelle des performances sur les séquences optimisées. A terme, il serait également intéressant que ce type de modèle prenne en compte le troisième pilier de la durabilité : le volet social et sociétal.

VI. Références bibliographiques

Aarnink A.J.A., Verstegen M.W.A. (2007) Nutrition, key factor to reduce environmental load from pig production. *Livestock Science* 109:194-203.

Alexander D.J., Morel P.H., Wood G. (2006) Feeding Strategies for Maximising Gross Margin in Pig Production, in: J. Pintér (Ed.), *Global Optimization*, Springer US. pp. 33-43.

Augspurger N.R., Spencer J.D., Webel D.M., Baker D.H. (2004) Pharmacological zinc levels reduce the phosphorus-releasing efficacy of phytase in young pigs and chickens. *Journal of Animal Science* 82:1732-1739.

Badouard B., Calvar C. (2014) Résultats Porc Bretagne 2013, chambre d'agriculture de Bretagne. pp. 5.

Basset-Mens C., van der Werf H.M.G. (2005) Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 105:127-144.

Boeglin N., Veuillet D. (2005) Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie. ADEME:13.

Bourdon D., Dourmad J.Y., Henry Y. (1995) Réduction des rejets azotés chez le porc en croissance par la mise en oeuvre de l'alimentation multiphase, associé à l'abaissement du taux azoté. *Journées Recherche Porcine* 27:269-278.

Brooke A., Kendrick D., A. M. (2008) *GAMS-A User Guide* GAMS Development Corporation, Washington, DC.

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 : an international journal of animal bioscience* 3:1114-23.

Canh T.T., Aarnink A.J.A., Mroz Z., Jongbloed A.W., Schrama J.W., Verstegen M.W.A. (1998) Influence of electrolyte balance and acidifying calcium salts in the diet of growing-

finishing pigs on urinary pH, slurry pH and ammonia volatilisation from slurry. *Livestock Production Science* 56:1-13.

Dourmad J.-Y. (2012) Influence des pratiques d'élevage sur l'impact environnemental des systèmes de production porcine. *Journées Recherche Porcine* 44:115-126.

Dourmad J.-Y., Jondreville C. (2007) Impact of nutrition on nitrogen, phosphorus, Cu and Zn in pig manure, and on emissions of ammonia and odours. *Livestock Science* 112:192-198.

Dourmad J.Y., Sève B., Latimier P., Boisen S., Fernandez J., van der Peet-Schwering C., Jongbloed A.W. (1999) Nitrogen consumption, utilisation and losses in pig production in France, The Netherlands and Denmark. *Livestock Production Science* 58:261–264.

Eriksson I.S., Elmquist H., Stern S., Nybrant T. (2004) Environmental Systems Analysis of Pig Production - The Impact of Feed Choice *The International Journal of Life Cycle Assessment* 10:143-154.

Garcia-Launay F., Dourmad J.Y., Faverdin P., Espagnol S. (2014) Réduire les émissions de gaz à effets de serre des élevages porcins en diminuant les apports protéiques: stratégies et perspectives. *Innovations Agronomiques* 37:39-52.

Garcia-Launay F., van der Werf H.M.G., Nguyen T.T.H., Le Tutour L., Dourmad J.Y. (2014) Evaluation of the environmental implications of the incorporation of feed-use amino acids in pig production using Life Cycle Assessment. *Livestock Science* 161:158-175.

Herpin P., Perez J.-M. (2008) Avant-propos. *INRA Productions Animales* 4:1-2.

Jondreville C., Dourmad J.-Y. (2005) Le phosphore dans la nutrition des porcs. *INRA Productions Animales* 18:183-192.

Jongbloed A.W., Lenis N.P. (1998) Environmental concerns about animal manure. *journal of animal science* 76:2641–2648.

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.

Morel P.C.H., Wood G.R. (2005) Optimisation of nutrient use to maximize profitability and minimise nitrogen excretion in Pig Meat Production Systems. *Acta Hort. (ISHS)* 674:269-275.

Ogino A., Osada T., Takada R., Takagi T., Tsujimoto S., Tonoue T., Matsui D., Katsumata M., Yamashita T., Tanaka Y. (2013) Life cycle assessment of Japanese pig farming using low-protein diet supplemented with amino acids. *Soil Science and Plant Nutrition* 59:107-118. DOI: 10.1080/00380768.2012.730476.

Portejoie S., Dourmad J.Y., Martinez J., Lebreton Y. (2004) Effect of lowering dietary crude protein on nitrogen excretion, manure composition and ammonia emission from fattening pigs. *Livestock Production Science* 91:45-55.

Rademacher M. (2000) How can diets be modified to minimize the impact of pig production on the environment. *Amino News Special Issue* 1.

Rigolot C., Espagnol S., Pomar C., Dourmad J.Y. (2010a) Modelling of manure production by pigs and NH₃, N₂O and CH₄ emissions. Part I: animal excretion and enteric CH₄, effect of feeding and performance. *Animal : an international journal of animal bioscience* 4:1401-12.

Rigolot C., Espagnol S., Robin P., Hassouna M., Beline F., Paillat J.M., Dourmad J.Y. (2010b) Modelling of manure production by pigs and NH₃, N₂O and CH₄ emissions. Part II: effect of animal housing, manure storage and treatment practices. *Animal : an international journal of animal bioscience* 4:1413-24.

Shirali M., Duthie C.-A., Doeschl-Wilson A., Knap P., Kanis E., Van Arendonk J., R. R. (2013) Novel insight into the genomic architecture of feed and nitrogen efficiency measured by residual energy intake and nitrogen excretion in growing pigs. *BMC Genetics* 14:121-133.

Tedeschi L.O. (2006) Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems* 89:225-247. DOI: 10.1016/j.agsy.2005.11.004.

Van der Peet-Schwering C.M.C., Jongbloed A.W., A.J.A. A. (1999) Nitrogen and phosphorus consumption, utilization and losses in pig production: The Netherlands. *Livestock Production Science* 58:213–224.

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.

Vautier B. (2013) 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, Agrocampus-ouest, Rennes. pp. 290.

VII. Sitographie

INERIS (2010). Directive IED. <http://www.ineris.fr/ippc/node/1> (consulté le 30/04/2014)

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2013). Une définition du développement durable. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Definition-du-developpement,15067.html> (consulté le 30/04/2014)

GAMS (2012) Solver <http://www.gams.com/solvers/solvers.htm> (consulté le 12/08/2014)

	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Agronomie Spécialisation / option : Ingénierie zootechnique Enseignant référent : Catherine Disenhaus	
Auteur(s) : Thomas Plantevin Date de naissance* : 07/02/1990	Organisme d'accueil : INRA Rennes Adresse : Domaine de la prise 35590 St-Gilles	
Nb pages : 27 Annexe(s) : 55	Maître de stage : Florence Garcia-Launey	
Année de soutenance : 2014		
Titre français : Comment optimiser la séquence alimentaire des porcs en croissance et engraissement sur des critères économiques et environnementaux ?		
Titre anglais : How to optimize the feeding sequence of growing pigs on economic and environmental criteria?		
Résumé (1600 caractères maximum) : La production porcine doit répondre à un double enjeu économique et environnemental. La compétitivité des élevages repose en grande partie sur les coûts des matières premières des aliments et sur les performances techniques. En parallèle, la réduction des impacts environnementaux s'est imposée comme un enjeu majeur au cours des dernières décennies. Ces impacts peuvent être réduits, notamment via des stratégies d'alimentation adéquates. Pour répondre à ces enjeux, un modèle d'optimisation de la séquence alimentaire sur des critères économiques et environnementaux en croissance-engraissement a été conçu. Il optimise le nombre d'aliments, le taux de couverture des besoins en acides aminés et les formules associées à partir des matières premières disponibles. La fonction-objectif intègre la marge brute de l'atelier ainsi que les impacts de la production sur le changement climatique, calculés par Analyse du Cycle de Vie (ACV). Le programme intègre l'évolution des besoins en acides aminés et l'effet de leur taux de couverture sur l'indice de consommation et la durée d'engraissement, via des simulations réalisées avec INRAporc. Le modèle met en évidence l'intérêt des bonnes pratiques en matière de formulation telles que l'incorporation d'AA de synthèse ou l'utilisation d'un nombre important d'aliment mais seulement si le nombre d'aliments est suffisamment élevé (>7 aliments). Le modèle montre également l'intérêt de prendre en compte l'émission de GES dans le choix des matières premières diminuant de 5% l'impact sur le changement climatique par kg de porc. Ce modèle pourra à terme contribuer à un outil d'aide à la décision.		
Abstract (1600 caractères maximum) : Pig production has to meet both economic and environmental challenge. The competitiveness of farming depends largely on the cost of raw material and technical performance. In parallel, the reduction of environmental impacts has become a major issue in recent decades. These impacts can be reduced, including through adequate feeding strategies. To address these issues, an optimization of the feed sequence on economic and environmental criteria in growing-fattening model was developed. It optimizes the number of feeds, the coverage rate of amino acid requirements and associated formulas from available raw materials. The objective function includes the gross margin of the workshop and the impact of production on climate change, based on Life Cycle Analysis (LCA). The program integrates the evolution of amino acid requirements and the effect of their coverage rate on feed efficiency and the fattening period, through simulations with InraPorc. The model highlights the interest of good practice in formulation such as the incorporation of crystalline AA or the use of a large number of feeds but only if the number of feeds is high enough (> 7 foods). The model also shows the advantage of taking into account the emission of greenhouse gases in the choice of raw materials reducing the impact of 5% per kg of pork. This model will ultimately contribute to a tool for decision support.		
Mots-clés : impacts environnementaux - optimisation - marge brute – engraissement- ACV		
Key Words: environmental impacts - optimization - Gross margin – growing-fattening- LCA		

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires