

Conséquences des nouveaux «systèmes d'unités phosphore» sur la formulation des régimes

P. CHAPOUTOT¹, F. PRESSEDA²

¹ Institut National Agronomique Paris-Grignon, Département des Sciences Animales,
F-75231 Paris Cedex 05

² CEREOPA (Centre d'Etude et de Recherche sur l'Economie et l'Organisation des Productions Animales),
Institut National Agronomique Paris-Grignon, F-75231 Paris Cedex 05

Courriel : patrick.chapoutot@inapg.fr

Les nouvelles tables multi-espèces éditées conjointement par l'INRA et l'AFZ en 2004 apportent de nombreux éléments nouveaux dans le domaine de l'alimentation phosphorée des animaux d'élevage. La teneur en phosphore total des matières premières a été réactualisée en fonction des données récentes de composition, en y associant une information en terme de variabilité, et les valeurs d'activité phytasique ont été présentées pour les principaux aliments qui contiennent des phytases végétales (Tran et Sauviant 2004, Tran et Skiba 2005). De plus, pour chaque espèce, divers paramètres permettant de tenir compte de l'efficacité d'utilisation du phosphore par les animaux ont été proposés conduisant à de nouveaux «systèmes d'unités phosphore» : le phosphore absorbé chez les ruminants (Sauviant *et al* 2004), le phosphore digestible chez le porc (Noblet *et al* 2004) et le phosphore disponible chez les volailles (Lessire 2004).

Actuellement, dans la majorité des situations, la conception des régimes pour animaux par optimisation fait appel à la programmation linéaire, basée sur la méthode du simplexe (Dantzig 1966), afin de rechercher la formule unitaire à moindre coût. D'autres approches par programmation linéaire peuvent être mises en œuvre dans l'industrie de l'alimentation animale, par exemple, la formulation globale de plusieurs mélanges au niveau d'un ou de plusieurs sites de production (associant des contraintes de fabrication et/ou de distribution-commercialisation des produits) et basée, par exemple, sur la maximisation de la marge de l'usine ou de l'entreprise. Des méthodes mathématiques plus sophistiquées peuvent également être utilisées comme la programmation en nombres entiers, où les activités ne peuvent

prendre que des valeurs entières, la programmation quadratique, qui permet de prendre en compte des relations non linéaires entre les différentes activités, ou la programmation dynamique, qui intègre une dimension temporelle (Faure 1971, Boussard et Daudin 1988). Cependant, ces méthodes, peu utilisées sur le terrain en alimentation animale, restent plutôt du domaine des études et de la recherche ou sont plus couramment mises en œuvre dans les secteurs de l'économie, du management ou de la logistique.

L'objectif de ce texte est d'analyser l'incidence de l'introduction de ces nouvelles connaissances en matière d'alimentation phosphorée dans la formulation des régimes pour animaux. Cependant, plutôt que de balayer dans cette étude l'ensemble des espèces pour lesquelles de nouveaux systèmes «phosphore» ont été proposés (Meschy et Ramirez-Perez 2005, Jondreville et Dourmad 2005, Lescoat *et al* 2005), il nous a paru plus opportun de se focaliser sur un seul exemple, afin d'étudier de façon plus approfondie comment ces nouvelles données pouvaient être intégrées dans un processus de formulation par programmation linéaire et d'en mesurer les conséquences. Nous avons donc choisi d'étudier la formulation unitaire d'un aliment pour porc, espèce où les concepts nous ont paru les plus développés et les connaissances les plus complètes, aussi bien en termes de composition des matières premières ou d'efficacité de leur valorisation par les animaux que d'évaluation de leurs besoins. Un exemple de formule pour porc charcutier en phase de croissance a donc servi de support à cette étude, dont les principaux axes sont : (1) la comparaison de la nouvelle approche INRA-AFZ 2004 à l'ancien système INRA 1989, (2) l'incidence de la prise

en compte des phytases végétales des matières premières et de l'utilisation des phytases microbiennes, qui peuvent non seulement avoir une influence non linéaire sur la libération du phosphore digestible mais également interagir entre elles, et (3) les modalités de mise en œuvre et les conséquences d'une limitation des rejets de phosphore.

1 / Le contexte de la formulation

1.1 / Les principes généraux de la formulation

La formulation d'aliments ou de régimes à moindre coût s'appuie sur la programmation linéaire, outil d'optimisation par résolution d'inéquations linéaires.

Pour chaque caractéristique nutritionnelle ou alimentaire (i), les matières premières disponibles (j) sont affectées de valeurs individuelles (a_{ij}) qui représentent leur densité nutritionnelle et qui sont regroupées dans la matrice des coefficients techniques.

La conception du mélange, c'est-à-dire la recherche des taux d'incorporation des matières premières (X_j , en %), se fait en général sur la base d'une composition centésimale, imposant la prise en compte d'une contrainte de «poids» :

$$\sum X_j = 100 \text{ quand les } X_j \text{ sont exprimés en } \%$$

Les niveaux d'incorporation des matières premières peuvent éventuellement être limités au sein du régime par des valeurs minimales ($b_{\min X_j}$) ou maximales ($b_{\max X_j}$).

Par ailleurs, pour chaque critère nutritionnel ou alimentaire, l'aliment ou le régime à formuler est caractérisé par des contraintes de minimum ou de maximum (b_i) à respecter :

$$\sum (a_{ij} \times X_j) \leq \text{et/ou} \geq b_i$$

En outre, les matières premières sont assorties d'une composante économique, leur prix (c_j), qui représente les coefficients de la fonction économique (Z) à optimiser :

$$Z = \sum (c_j \times X_j)$$

La résolution d'un tel système d'inéquations, formalisé dans la figure 1, conduit à une infinité de solutions techniques, parmi lesquelles la fonction d'optimisation choisit celle, l'optimum, qui correspond au minimum de prix du mélange.

Au-delà de la simple interprétation des caractéristiques de l'optimum par l'analyse primale (taux d'incorporation des matières premières, caractéristiques nutritionnelles et prix du mélange), l'analyse duale de la solution génère un certain nombre d'informations intéressantes pour le formulateur, en particulier le coût marginal des contraintes (U_i), qui représente la variation de prix

Tableau 1. Principales caractéristiques nutritionnelles (autres que phosphore) utilisées et niveaux de contraintes retenus pour l'aliment «porc croissance».

Caractéristiques nutritionnelles (exprimées sur produit brut)	Minimum	Maximum
Energie Nette (kcal/kg)	2300	-
Cellulose brute (%)	-	7
Matières azotées totales (%)	15	16,5
Lysine digestible (%)	0,81	-
Méthionine digestible (%)	0,24	-
Méthionine + Cystine digestibles (%)	0,49	-
Thréonine digestible (%)	0,52	-
Tryptophane digestible (%)	0,14	-
Calcium (%)	0,85	0,95

Pour les contraintes «Phosphore total» et «Phosphore digestible» : voir dans le texte.

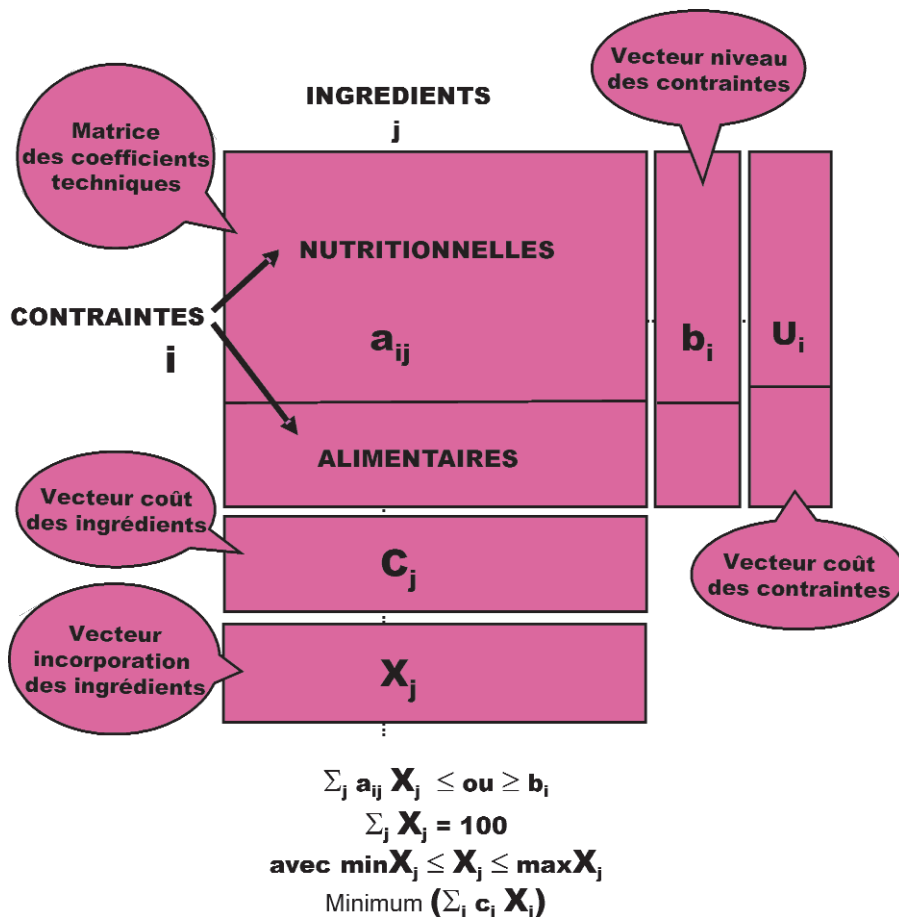
du mélange (Z) associée à la variation d'une unité de la contrainte (i), mais aussi les prix d'intérêt des matières premières, les plages d'invariance des niveaux d'incorporation des matières premières et des coûts marginaux des contraintes.

1.2 / Le contexte technique

Le type de formule mis en œuvre et servant de support à cette étude correspond à un aliment composé pour **porc charcutier** en phase de **croissance**.

De façon à simplifier le modèle, seules les principales contraintes de composition et de valeurs nutritionnelles ont été retenues (tableau 1). Leurs valeurs (b_i) sont celles proposées par le CEREOPA dans son modèle «Prospective Aliment» (CEREOPA 2004). Elles ont été maintenues constantes dans l'ensemble des situations étudiées. La liste des matières premières utilisées est donnée dans le tableau 2. Leurs valeurs a_{ij} sont issues des tables INRA-AFZ (2004). Les limites d'incorporation utilisées sont celles classiquement observées sur le terrain dans les formules «porc charcutier» (CEREOPA 2004).

Figure 1. Écriture matricielle et algébrique d'un modèle de formulation.



En ce qui concerne le **phosphore (P)**, dans le cas de l'étude de formulation selon les normes INRA (1989), les besoins des animaux, exprimés en phosphore total (Ptot), sont calculés selon la méthode factorielle en tenant compte, d'une part, des dépenses de croissance et des pertes endogènes fécales et urinaires, et, d'autre part, de l'hypothèse d'une digestibilité réelle moyenne du P des matières premières de 50 %. La valeur retenue du besoin minimum en Ptot est de 6 g/kg (Guégen et Perez 1981).

Pour l'étude selon les normes INRA-AFZ 2004, les besoins en P digestible apparent (Pdig) sont calculés à partir des dépenses de croissance en intégrant les pertes endogènes urinaires seulement (Jondreville et Dourmad 2005). La valeur retenue pour le besoin minimum Pdig est de 2,5 g/kg (Castaing *et al* 2003, Jongbloed *et al* 1999). Dans cette situation, selon les phases de l'étude, la teneur en P total soit a été laissée libre, soit a été contrainte à un maximum de 4,8 g/kg d'après les normes CORPEN (2003).

Les valeurs des matières premières sont exprimées en termes de teneurs en

phosphore total (Ptot) et en phosphore digestible apparent (Pdig). La teneur en P digestible des matières premières, sans tenir compte de leur activité phytasique, Pdig(-), est calculée à partir des teneurs en Ptot et de la digestibilité apparente du P (dP) :

$$Pdig(-)_j = Ptot_j \times dP$$

Les nouvelles tables INRA-AFZ 2004 permettent de prendre en compte la présence de **phytases végétales** dans les matières premières. L'activité phytasique des matières premières, lorsqu'elles n'ont pas subi de traitement thermique, a pour conséquence la libération d'une partie de leur P phytique. Cette fraction libérée devient alors digestible et augmente d'autant la teneur en P digestible des aliments. Ces phytases sont considérées comme totalement inactivées par la chaleur, notamment dans le cas de la granulation (Pointillart 1994).

L'effet de ces phytases végétales peut être intégré grâce à deux nouveaux critères disponibles dans les tables INRA-AFZ 2004 pour chaque matière première : l'activité phytasique (ActPhy_j) et la digestibilité du P (dPphy_j) qui tient compte des phytases de la matière première j. La teneur en P digestible des matières premières qui intègre cette activité phytasique, Pdig(+)_j, peut donc être calculée selon la formule suivante :

$$Pdig(+)_j = Ptot_j \times dPphy_j$$

L'augmentation ($\Delta Pdig_{\text{endo}}_j$) de la teneur en P digestible des matières premières varie d'un aliment à l'autre. Une valeur moyenne, $\Delta Pdig_{\text{endo}}$, peut cependant être retenue autour de 0,4 g Pdig / 500 UI d'activité phytasique (Jondeville et Dourmad, 2005). Ainsi, la teneur en Pdig des matières premières peut aussi être calculée sur la base de leur activité phytasique individuelle :

$$PdigActPhy_j = Pdig(-)_j + \Delta Pdig_{\text{endo}} \times ActPhy_j$$

Cela conduit, pour la majorité des aliments, à des valeurs sensiblement identiques à celles calculées à partir des valeurs de digestibilité (dPphy). Cependant pour quelques aliments les différences sont plus sensibles. En effet, par rapport aux valeurs PdigActPhy_j, les valeurs Pdig(+)_j sont légèrement sous-estimées dans le cas du pois (5 %) et de l'orge (9 %), mais sont au contraire surestimées pour le blé (+ 8 %) et surtout le son de blé (+ 21 %).

Par ailleurs, l'activité phytasique des matières premières peut être considérée

Tableau 2. Liste des matières premières utilisées et limites particulières d'incorporation dans l'aliment «porc croissance».

Familles	Matières Premières
Céréales	Blé, Orge, Triticale, Maïs
Coproduits du blé	Son, Remoulage
Racines & Tubercules	Manioc
Graines oléo-protéagineuses	Pois, Colza, Soja extrudée
Tourteaux	Soja 48, Colza, Tournesol non décortiqué
Divers	Huile de Soja, Mélasse de canne
Acides aminés de synthèse	L-Lysine HCL, DL-Méthionine, L-Thréonine
Minéraux, Vitamines	CaCO ₃ , Phosphate bicalcique, Prémix

Familles	Matières Premières	Mini %	Maxi %
Céréales	Blé	-	50
	Orge	-	35
	Triticale	-	50
	Maïs	-	20
	Total Céréales	20	100
Coproduits du blé	Son	-	10
	Total Coproduits de meunerie	-	15
Racines & Tubercules	Manioc	-	30
Graines oléo-protéagineuses	Pois	-	27
	Graine Colza	-	6
Tourteaux	Tourteau Colza	-	6
	Total Colza (Graine+Tourteau)	-	10
Divers	Mélasse de Canne	-	4
	Huile de soja	-	5
Minéraux, Vitamines	Prémix	1	1

Pour les matières premières non mentionnées, aucune limite mini ou maxi ne sont imposées.

comme additive (Zimmerman *et al* 2003). Il est donc intéressant de pouvoir valoriser cette caractéristique dans une approche de formulation. Ainsi, ce même principe d'accroissement des teneurs en P digestible par les phytases végétales peut être appliqué dans le cas des mélanges n'ayant pas subi de traitement thermique, par exemple présentés sous forme de farine, en cumulant l'activité phytasique de toutes les matières premières. La teneur en Pdig du mélange peut donc être calculée de la façon suivante :

$$PdigActPhy = \sum (PdigActPhy_j \times X_j)$$

soit : $PdigActPhy = \sum [Pdig(-)_j \times X_j] + \Delta Pdig_{\text{endo}} \times \sum [ActPhy_j \times X_j]$

Il nous a donc paru pertinent de tester cet effet cumulatif de l'activité phytasique des diverses matières premières et d'appliquer cette action au P phytique de l'ensemble du mélange, plutôt que de raisonner individuellement sur chaque matière première. De plus, cela permet de prendre en compte un éventuel effet non linéaire de ces phytases.

Une comparaison de ces deux approches, PdigActPhy *versus* Pdig(+), a été faite de façon systématique sur l'en-

semble des contextes économiques traités dans cette étude. Les résultats de ces deux simulations sont très voisins. Par conséquent, seuls ceux issus de l'approche «cumulative» seront présentés plus loin dans le texte.

Les **phytases exogènes**, d'origine microbienne, appartiennent à la famille des 3-phytases ou des 6-phytases. Elles sont incorporées dans les formules pour compléter l'action des phytases végétales lorsqu'elles sont encore actives (mélange en farine) ou se substituer à elles quand elles ont été dénaturées par les traitements thermiques (aliment granulé) ou que l'aliment est constitué de matières premières qui en sont dépourvues. Elles permettent alors de valoriser une fraction du P phytique des matières premières et d'augmenter ainsi la teneur en P digestible des mélanges.

Les phytases disponibles sur le marché présentent divers niveaux d'activité phytasique (par exemple 2 000, 5 000, 10 000 UI/g) et se présentent sous forme pulvérulente, liquide ou granulée. Comme celles présentes dans les matières premières, les phytases exogènes sont sensibles à la chaleur.

Les pertes d'activité phytasique peuvent atteindre 30-50 % lors des traitements thermiques (< 70-90°C) associés au processus de granulation. Ces pertes sont, en général, compensées par surdosage. Certaines phytases, granulées ou protégées par encapsulation, peuvent supporter la granulation. Les formes liquides peuvent être utilisées en pulvérisation (spray) après l'étape de granulation-refroidissement. Leurs préconisations d'emploi dans les aliments composés varient selon les produits et les types d'animaux entre 300 et 1 500 UI d'activité phytasique supplémentaire apportée par kg de mélange (BASF 2005, Cromwell 2005).

L'efficacité de la valorisation du P phytique par les phytases microbiennes (3-phytases) représente, selon les auteurs, de 1,5 à 2,5 fois celle des phytases des matières premières (Eeckhout et De Paepe 1992, Weremko *et al* 1997, Zimmermann *et al* 2002). Dans la suite de l'étude, l'activité des phytases exogènes a été basée sur une efficacité linéaire double par rapport à celle des phytases végétales (Jondreville et Dourmad 2005), soit $\Delta P_{dig_{exo}} = + 0,8 \text{ g P}_{dig} / 500 \text{ UI}$ d'activité phytasique exogène. Une approche non linéaire de cette action sera également proposée au paragraphe 7.

1.3 / Le contexte économique

Pour que les conclusions de cette étude puissent avoir une portée suffisamment générale, une large plage de contextes économiques a été analysée. En effet, plus d'une centaine de conjonctures mensuelles de prix des matières premières (moyennes des prix des matières premières rendues région Bretagne) ont été testées, depuis juillet 1995 jusqu'en décembre 2003 (CEREOPA 2004).

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur ce jeu de données pour en dégager les principales tendances. L'axe N° 1 (46 % de la dispersion totale), axe de taille, discrimine les contextes de prix élevés ou bas pour l'ensemble des matières premières. L'axe N° 2 (23 %) hiérarchise les conjonctures selon le rapport de prix entre les matières premières riches en protéines (tourteau de soja essentiellement, mais aussi de colza et tournesol, ainsi que le pois) et les céréales, maïs notamment. Les axes N° 3 (15 %) et N° 4 (5 %) sont dus principalement aux variations de prix respectivement des matières premières riches en huile (huile de soja et graine de colza) et du phosphate bicalcique. Cette analyse

permet ainsi d'isoler certaines situations extrêmes avec un faible rapport de prix tourteaux/céréales dans un contexte de prix élevés (1^{er} semestre 96, fin 2003), moyens (2^e semestre 95) ou bas (fin 98 à été 99), ou encore avec un rapport de prix tourteaux/céréales élevé dans une conjoncture de prix élevés (1^{er} semestre 97) ou faibles (2^e semestre 2002, 1^{er} semestre 2003). La figure 2 retrace ces variations de prix (en €/t) pour les principales matières premières utilisées dans ce modèle.

1.4 / La démarche d'analyse

Les divers contextes techniques ont fait l'objet de simulations exploratoires sur l'ensemble des conjonctures avec une application automatisée développée sous Microsoft® Excel par le CEREOPA (ARIANE : outil d'optimisation de formules alimentaires intégré dans le modèle «Prospective Aliment», CEREOPA 2004) qui utilise le Solveur de Microsoft® Excel pour la résolution de systèmes d'inéquations par programmation linéaire basée sur la méthode du simplex.

Le recueil de l'ensemble des résultats issus des analyses primales et duales des optimisations a permis, après traitements statistiques, de tirer quelques lois générales sur les principaux critères relatifs à l'optimisation de l'alimentation phosphorée du porc par formulation (prix du mélange ; importance de la complémentation phosphorée ; niveaux d'incorporation des matières premières ; coûts marginaux et contributions des contraintes de P...). De

plus, certains contextes de prix ont été analysés plus précisément de façon à mettre en évidence les explications de certaines réponses particulières. Les différentes simulations permettant de répondre aux objectifs de cette étude en mettant en œuvre divers critères technico-économiques sont résumées dans le tableau 3.

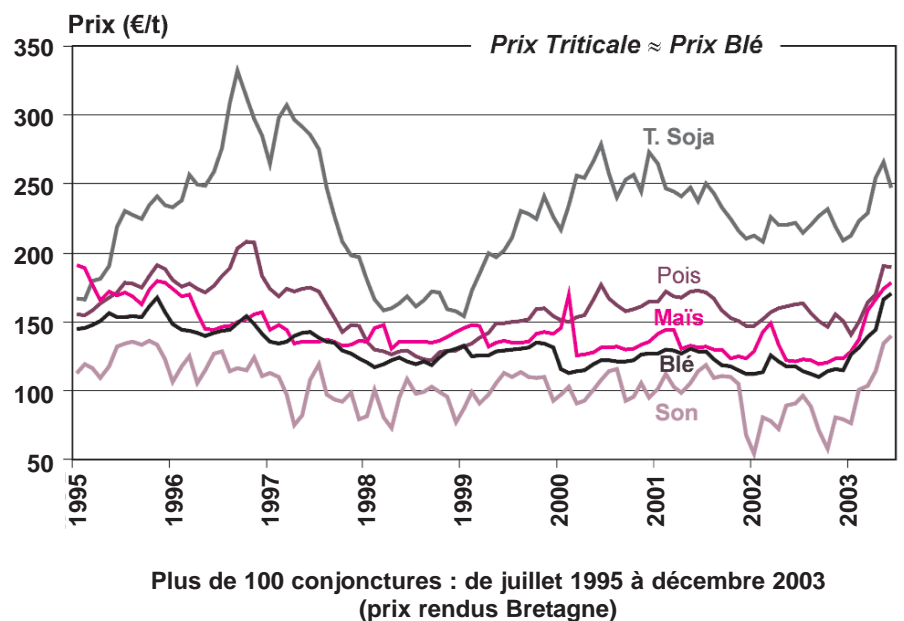
2 / Comparaison des systèmes INRA 1989 et INRA-AFZ 2004

Les conséquences du changement de systèmes (2004 *versus* 1989) ont été étudiées pour un aliment granulé. La même approche pour un aliment en farine sera envisagée dans le paragraphe suivant en prenant en compte l'activité des phytases végétales.

Dans le cas d'un aliment granulé, l'hypothèse est faite que les phytases végétales ont été inactivées par le traitement thermique de granulation. La contrainte phosphore prise en compte dans le système INRA 1989 est le P_{tot} à une valeur minimum de 6 g/kg, tandis que dans le système INRA 2004 c'est la teneur en P digestible, P_{dig(-)}, qui est choisie à une valeur minimum de 2,5 g/kg. Dans cette étape, aucune contrainte «CORPEN» n'a été imposée et les phytases exogènes n'ont pas été utilisées.

Sur l'ensemble des conjonctures, le prix des formules et la proportion de

Figure 2. Variations du contexte économique pris en compte dans l'étude.



phosphate bicalcique dans les mélanges ont varié respectivement de 130 à 187 €/t et de 0,57 à 1,00 %.

La mise en place du système «2004» comparativement au système «1989», ne conduit en moyenne qu'à une faible baisse de la complémentation en phosphate bicalcique (- 0,07 point %

dans la formule) et du prix du mélange (- 0,23 €/t). Ces chiffres moyens reflètent en réalité des situations particulièrement opposées : le passage au système 2004 a entraîné, pour la majorité des cas, des baisses de la place du phosphate bicalcique dans la formule (jusqu'à - 0,28 point %) ainsi que du prix du mélange (- 0,57 €/t). Ce-

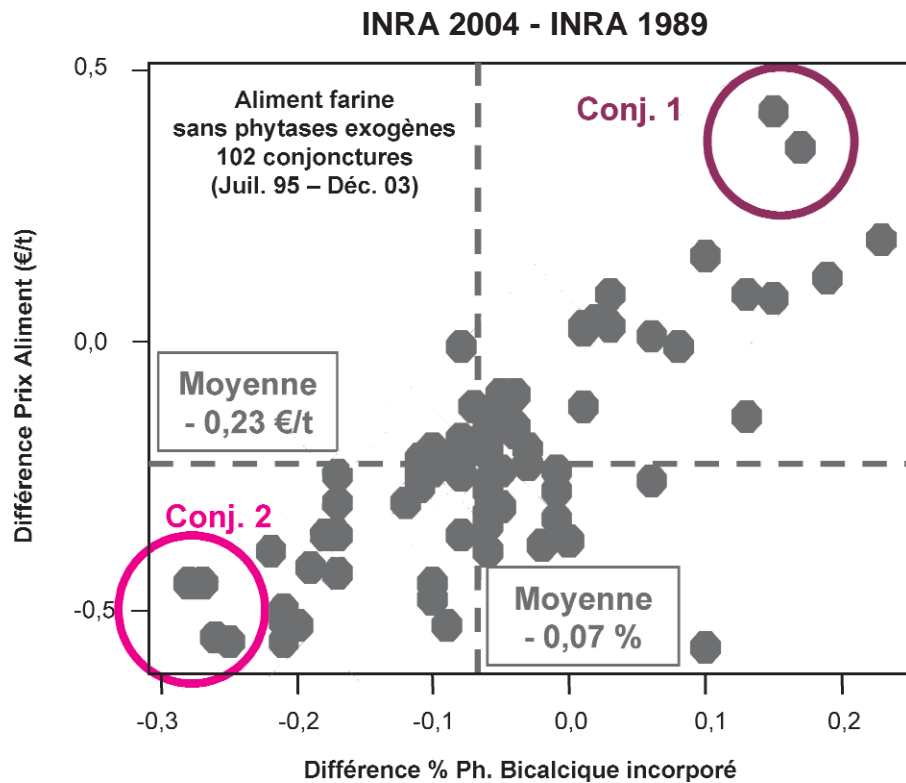
pendant, pour certains contextes (10 à 15 % des cas), cela a conduit, au contraire, à des hausses de ces deux critères (jusqu'à + 0,22 point % de phosphate bicalcique et + 0,43 €/t) (figure 3).

Une étude détaillée de deux situations particulières, induisant les diffé-

Tableau 3. Contextes technico-économiques des différentes étapes de l'étude.

Objectifs	Conjonctures	Systèmes		Phytases Végétales		Phytases Microbiennes		Rejets de Phosphore		N° paragraphe dans l'étude
		1989	2004	Absence (Granulé)	Présence (Farine)	Effet linéaire	Effet non linéaire	Normes CORPEN	Activité "Rejet de P"	
Comparaison des systèmes	Toutes	X	X	X						2
	Déc98/Juil04	X	X	X						
Phytases Végétales	Toutes	X	X		X					3
	Toutes		X	X	X					
Phytases Microbiennes	Toutes		X	X		500 UI (1.2 €/t /500 UI)				4
	Toutes		X	X		500 UI (1.2 €/t /500 UI)		X		
	Toutes		X	X		Libres (0.9 €/t /500 UI)		X		
	Toutes		X		X	Libres (0.9 €/t /500 UI)		X		
	Toutes		X		X		Libres (0.9 €/t /500 UI)	X		7
Rejets de P	Juil02		X	X				X (Ptot)		5
	Juil02		X		X			X (Ptot)		
	Déc98/Juil02		X		X			X (Prej)		
	Déc98/Juil02		X		X	500 UI (1.2 €/t /500 UI)		X (Prej)		
	Déc98/Juil02		X		X				X (Prej)	6
	Déc98/Juil02		X		X	500 UI (1.2 €/t /500 UI)			X (Prej)	

Figure 3. Variations de la part du phosphate bicalcique et du coût de l'aliment «porc croissance» granulé selon le contexte de formulation.



rences extrêmes mentionnées ci-dessus, a été réalisée afin d'analyser plus précisément les réponses opposées lors de la comparaison des deux approches. La conjoncture N° 1 (juillet 2002) correspond à un contexte où les rapports de prix tourteaux + pois / céréales + coproduits, d'une part, et phosphate bicalcique / graine de colza, d'autre part, étaient hauts, alors que ces rapports étaient plutôt bas dans la conjoncture N° 2 (décembre 1998).

Le tableau 4 précise les principaux résultats de ces simulations. Dans la conjoncture N° 1, les céréales et les coproduits du blé ainsi que la graine de colza sont favorisés par leur prix. Ces matières premières représentent 85 % de la formule. Dans ce cas, lorsque les phytases sont inactivées, la formulation sur la base du P_{tot} (INRA 1989) ne permet pas la couverture correcte du besoin en P_{dig} en raison de la faible valeur de digestibilité du P de ces ingrédients. Par contre, l'utilisation des normes INRA 2004, basées sur la satisfaction du besoin en P_{dig}, conduit en toute logique à une plus forte complémentation en phosphate bicalcique et donc à une élévation du prix de la formule.

La conjoncture N° 2, à l'inverse, favorise à son maximum l'utilisation du pois (27 %) au détriment des céréales (58 %) et surtout des coproduits du blé et de la graine de colza qui disparaissent

de la formule. Le pois, en effet, présente une forte digestibilité du P (47 %) en raison d'un faible part de P phytique (45 %). Dans cette situation, la couverture stricte du besoin en P_{tot} (normes 1989) induit un apport P_{dig}(-) supérieur au besoin des animaux. La formulation selon les normes INRA 2004 corrige cet excès en réduisant la part de phosphate bicalcique et en abaissant le coût du mélange.

Ainsi, l'utilisation des normes INRA 2004, comparativement aux normes

INRA 1989, permet, selon le contexte de prix et la nature des matières premières incorporées, de mieux couvrir les besoins en P digestible de l'animal ou de réduire l'apport en P total et, par conséquent, la fraction de P rejetée.

3 / Prise en compte de l'activité phytasique des matières premières

Une des «nouveauités» des tables INRA-AFZ 2004 est de renseigner les valeurs des activités phytasiques des différentes matières premières (Tran et Skiba 2005). Il est donc intéressant, dans ce cadre, de tester l'incidence de l'utilisation de ce critère sur la complémentation phosphorée des aliments Porcs.

Pour cela, l'activité phytasique des matières premières a été prise en compte de façon additive, au prorata de leur incorporation dans le mélange, et l'accroissement, $\Delta P_{dig_{endo}}$, de la teneur en P digestible du mélange, P_{digActPhy}, a été considéré comme proportionnel à l'activité phytasique totale (cf. § 1.2). Cet effet des phytases végétales a été testé sur l'ensemble des conjonctures, sans faire appel aux phytases microbiennes, d'une part, dans le cadre de la comparaison des normes INRA 1989 versus 2004 comme plus haut, mais cette fois-ci pour un aliment en farine, et d'autre part, avec les normes INRA 2004 à travers la comparaison des formules présentées sous forme granulée versus farine.

Comparativement aux normes INRA 1989, l'utilisation des normes INRA 2004 permet, dans le cas d'un aliment en farine, d'intégrer l'effet des phytases

Tableau 4. Comparaison des formules «porc croissance» dans les systèmes INRA 1989 et INRA 2004 selon le contexte de formulation.

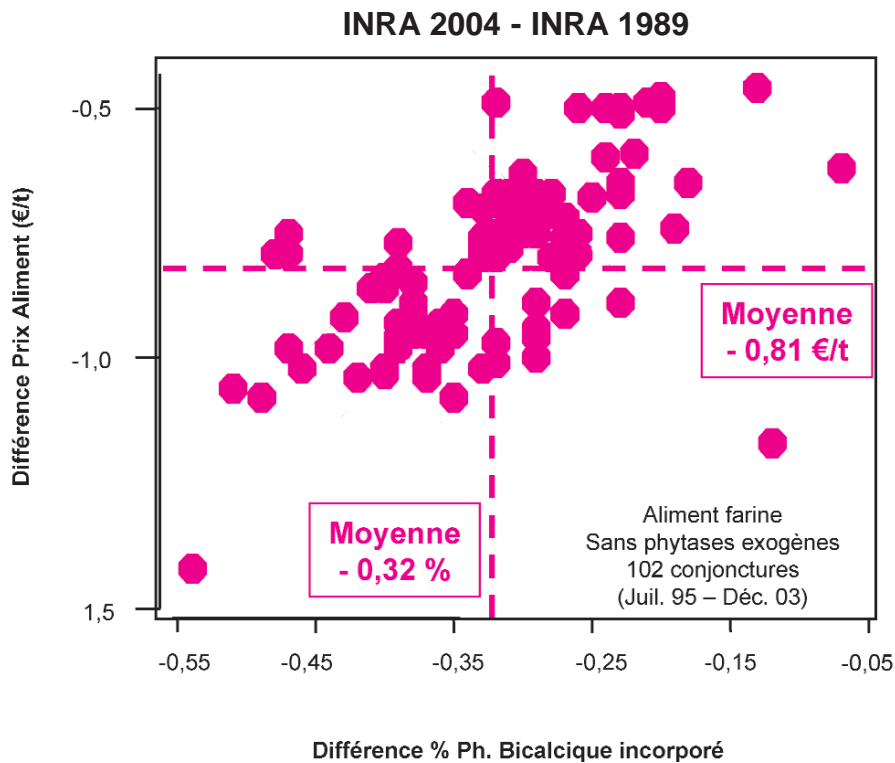
Ingrédients (en %)	Conjoncture N° 1		Conjoncture N° 2	
	1989	2002	1989	2002
Blé + Triticale	66	65,9	58,1	58,1
Son + Remoulage	15*	15*	-	-
Pois	-	-	27*	27*
T.Soja + T.Colza	11,8	3,8	11,6	-
Graine Colza	11,8	3,8	11,7	-
Ph. Bicalcique	0,58	0,73	1	0,74
Caractéristiques				
Prix (€/t)	130,3	130,8	134,4	133,9
P _{tot} (g/kg)	6*	6,3	6*	5,5
P _{dig} (g/kg)	2,2	2,5*	2,9	2,5*

* Contrainte saturée.

Conj. N° 1 : Prix Pois + T. Soja / Son + Blé élevé (Juil. 02).

Conj. N° 2 : Prix Pois + T. Soja / Son + Blé faible (Déc. 98).

Figure 4. Variations de la part du phosphate bicalcique et du coût de l'aliment «porc croissance» farine selon le contexte de formulation.

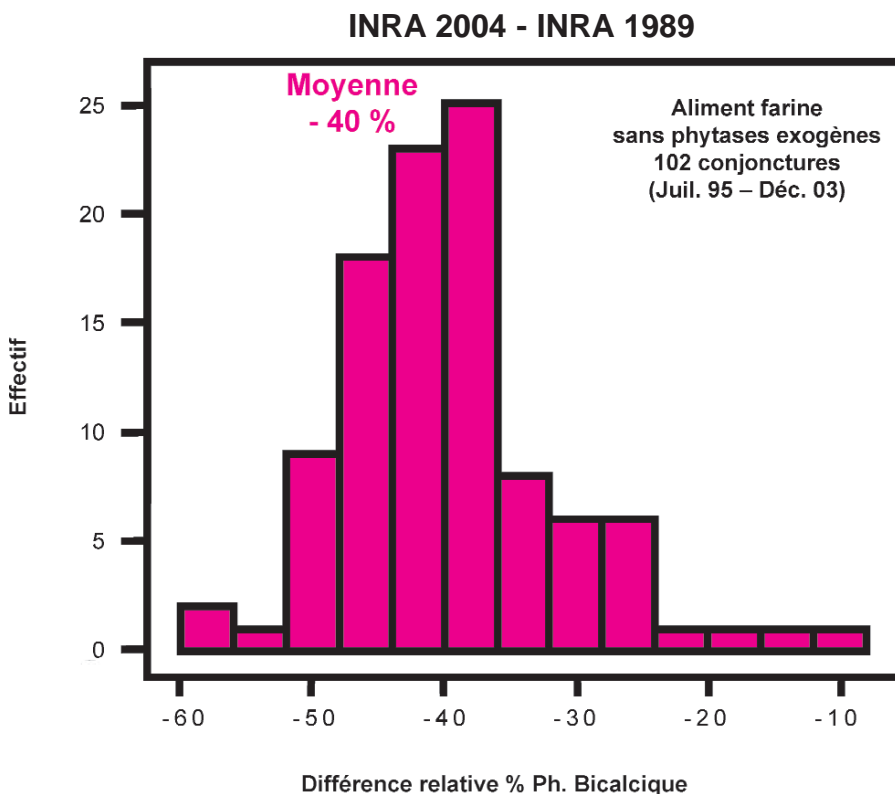


végétales des matières premières qui ne sont pas inactivées.

Cela conduit à une baisse du coût du mélange (de - 0,46 à - 1,42 €/t, moyen-

ne = 0,81 €/t) associée à une réduction des apports de phosphate bicalcique (de 0,07 à 0,54 %, moyenne = 0,32 %). Cette diminution a été plus importante que précédemment et constatée pour

Figure 5. Incidence du contexte de formulation sur la complémentation en phosphore d'un aliment «porc croissance» farine.



l'ensemble des conjonctures, à l'inverse de ce que l'on observait pour l'aliment granulé (figure 4). Elle représente de - 10 à - 60 % (en moyenne - 40 %) de la complémentation phosphorée observée avec les normes «1989» (figure 5).

Par ailleurs, la comparaison systématique des formules entre aliment granulé et aliment en farine a été réalisée sur l'ensemble des conjonctures avec les normes INRA 2004.

La figure 6 et la figure 7 illustrent la diminution de la part du phosphate bicalcique dans les formules et de la teneur en P total des mélanges lors de la prise en compte de l'activité phytasique des matières premières. Le pourcentage de phosphate bicalcique dans l'aliment granulé est systématiquement supérieur à 0,6 % (de 0,62 à 0,95 %, moyenne = 0,73 %), alors qu'il est au contraire inférieur à cette valeur dans la majorité (94 %) des cas pour l'aliment en farine (de 0,28 à 0,73 %, moyenne = 0,48 %). Ainsi, entre la présentation granulé et la présentation farine, la complémentation en phosphate bicalcique a diminué en moyenne de 0,25 point (entre - 0,15 et - 0,52 %). De même, la teneur en P total de l'aliment en farine est très souvent inférieure à 5,4 g/kg (85 % des situations) alors qu'elle est toujours supérieure à ce niveau dans l'aliment granulé. Ces valeurs sont néanmoins toujours plus élevées que la limite maximale de 4,8 g/kg proposée par le CORPEN.

Ainsi, la prise en compte de l'activité phytasique des matières premières de façon additive et sous la forme d'un effet linéaire, permet d'accroître l'apport de P digestible par le mélange et, par voie de conséquence, de réduire de près de moitié en moyenne la complémentation en phosphate des aliments porcs, diminuant ainsi les excès de P total.

4 / Utilisation des phytases microbiennes

L'objectif a été ici d'étudier, avec les normes INRA 2004, l'influence de l'utilisation de ces phytases microbiennes sur la complémentation phosphorée des aliments porcs pour l'ensemble des conjonctures. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser des phytases exogènes présentant une activité phytasique effective (avec ou sans granulation) de 5 000 UI/g. Leur efficacité en terme d'accroissement de la

Figure 6. Incidence de la prise en compte de l'activité phytasique des ingrédients sur la complémentation en phosphate bicalcique d'un aliment «porc croissance».

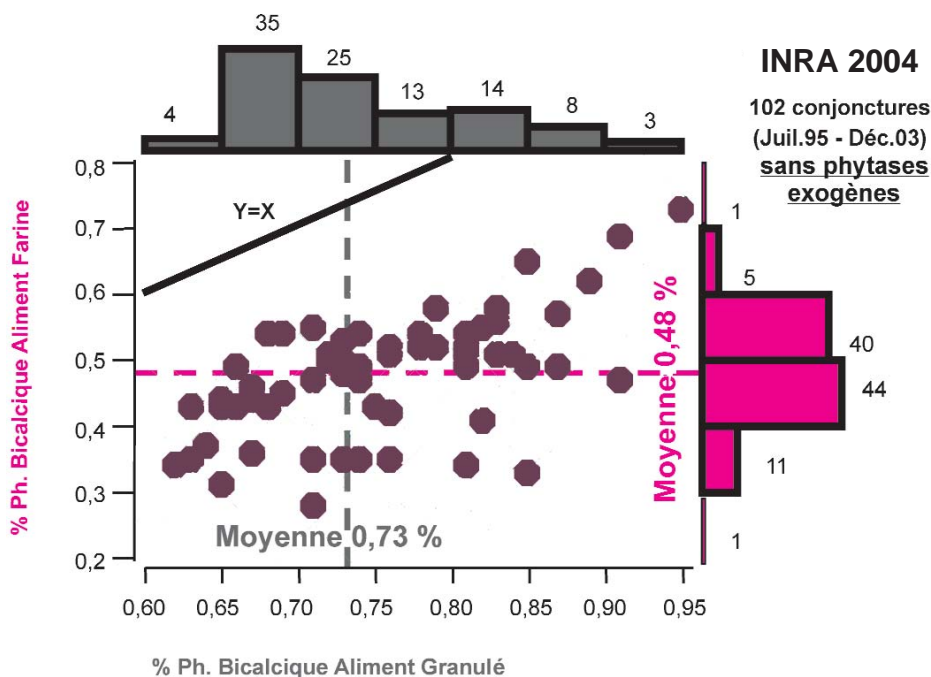
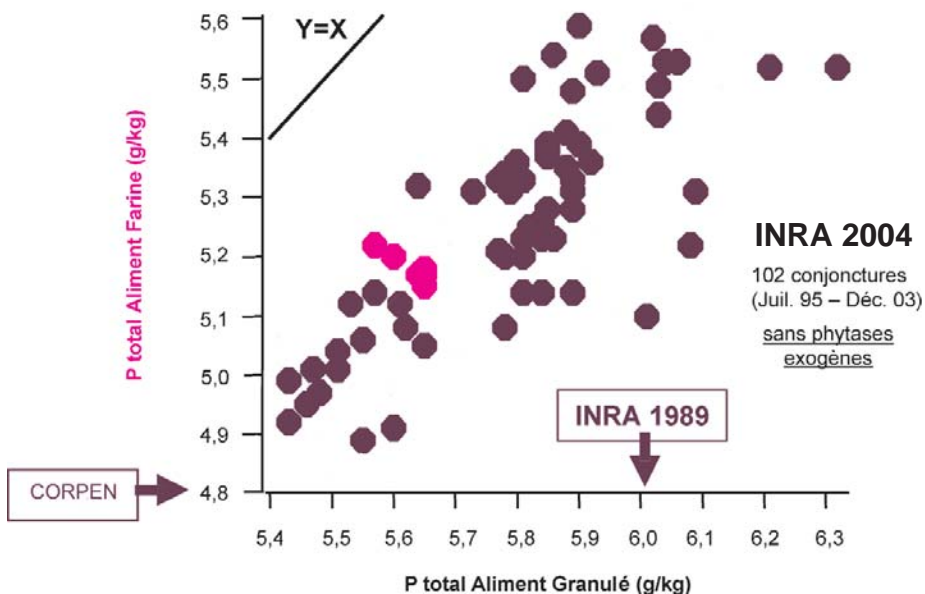


Figure 7. Incidence de la prise en compte de l'activité phytasique des ingrédients sur la teneur en phosphore total d'un aliment «porc croissance».



teneur en P digestible du mélange a été considérée comme linéaire avec une valeur strictement double de celle prise précédemment pour les phytases végétales, soit + 0,8 g Pdig / 500 UI d'activité phytasique exogène (cf. § 1.2). Une approche non linéaire sera étudiée plus loin (cf. § 7).

Ces phytases ont été introduites dans le mélange soit à un niveau fixe permettant un apport de 500 UI d'activité phytasique par kg de mélange, ce qui reflète les conditions classiques d'emploi, soit au contraire de façon libre. Le

coût de la supplémentation en phytases exogènes a été estimé à 1,2 ou 0,9 €t pour 500 UI d'activité phytasique ajoutées.

Dans un premier temps, les phytases exogènes (1,2 €t pour 500 UI) ont été testées de façon à mesurer l'influence de leur utilisation sur la complémentation phosphorée. Pour cela, elles ont été incorporées à un taux fixe (0,01 %) dans un aliment granulé de façon à ce qu'une activité phytasique exogène de 500 UI /kg de mélange puisse compléter les apports Pdig(-)

des matières premières pour couvrir le besoin en P digestible de l'animal, sans bénéficier de l'action des phytases végétales.

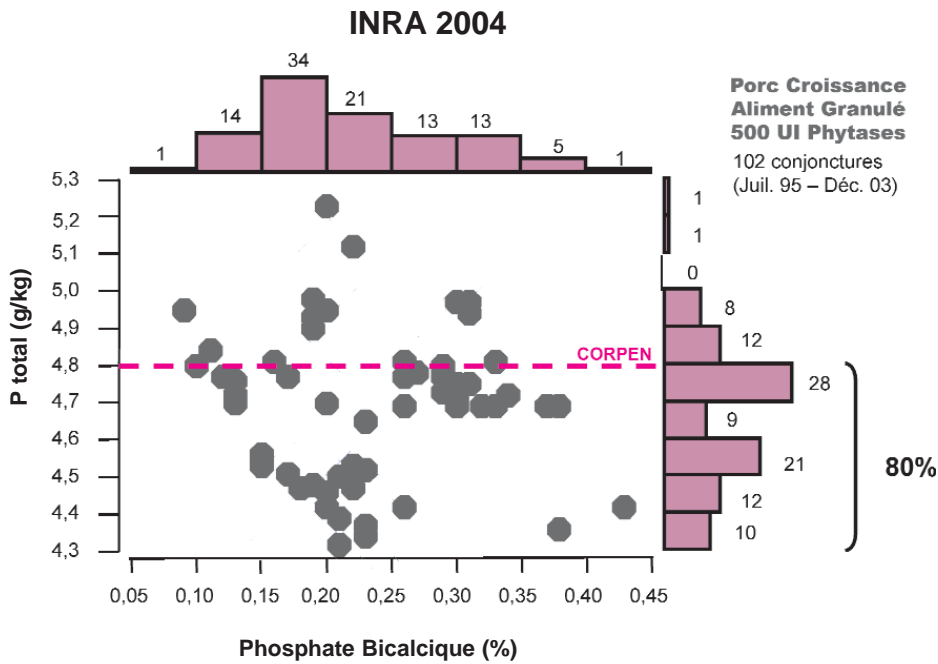
Cela a abouti à une très nette réduction de la complémentation phosphorée du mélange par rapport aux situations précédentes (figure 8). En effet, pour 70 % des situations, le pourcentage de phosphate bicalcique a été inférieur à 0,25 % (moyenne = 0,21 %, mini - maxi = 0,09 - 0,43 %). La teneur en P total dans ces mêmes conditions est descendue en dessous de la norme CORPEN de 4,8 g/kg dans près de 80 % des cas (moyenne = 4,7 g/kg, mini - maxi = 4,3 - 5,2 g/kg). Le coût «matières premières + enzymes» a varié pour ces mélanges de 130 à 187 €t selon les conjonctures.

Une autre approche a consisté à analyser la partition entre les différents flux de P digestible issus du régime. Pour cela, la simulation a été réalisée sur l'ensemble des contextes économiques dans le cas d'un aliment en farine, où les phytases végétales sont actives, en laissant libre l'incorporation des phytases exogènes de telle sorte que leur activité phytasique propre soit comprise entre 0 et 500 UI/kg et en appliquant la norme CORPEN de 4,8 g/kg.

La figure 9 retrace la contribution des diverses sources de P digestible. Il apparaît dans ces conditions que le P digestible «originel» des matières premières représente la moitié environ des apports totaux (de 40 à 60 %). Les phytases végétales des matières premières contribuent à ces apports pour 15 à 30 %, tandis que les phytases exogènes les complètent à hauteur de 5 à 35 %. De son côté, le phosphate bicalcique représente moins de 20 % du flux total de Pdig. Son incorporation dans la formule est inférieure à 0,1 % dans 70 % des situations, et dans près de 20 % des cas la complémentation minérale n'est pas nécessaire.

Enfin, de façon à maximiser l'emploi des phytases exogènes en formulation, leur prix a été réduit à une valeur représentant un coût de 0,9 €t pour 500 UI et leur niveau d'incorporation a été laissé totalement libre au-delà de 500 UI /kg de mélange en considérant l'action des phytases végétales et microbiennes comme linéaire. Cette simulation a été faite à titre de comparaison pour un aliment granulé et un aliment en farine en tenant compte comme précédemment des normes CORPEN.

Figure 8. Influence de l'utilisation des phytases exogènes sur la complémentation phosphorée d'un aliment «porc croissance».



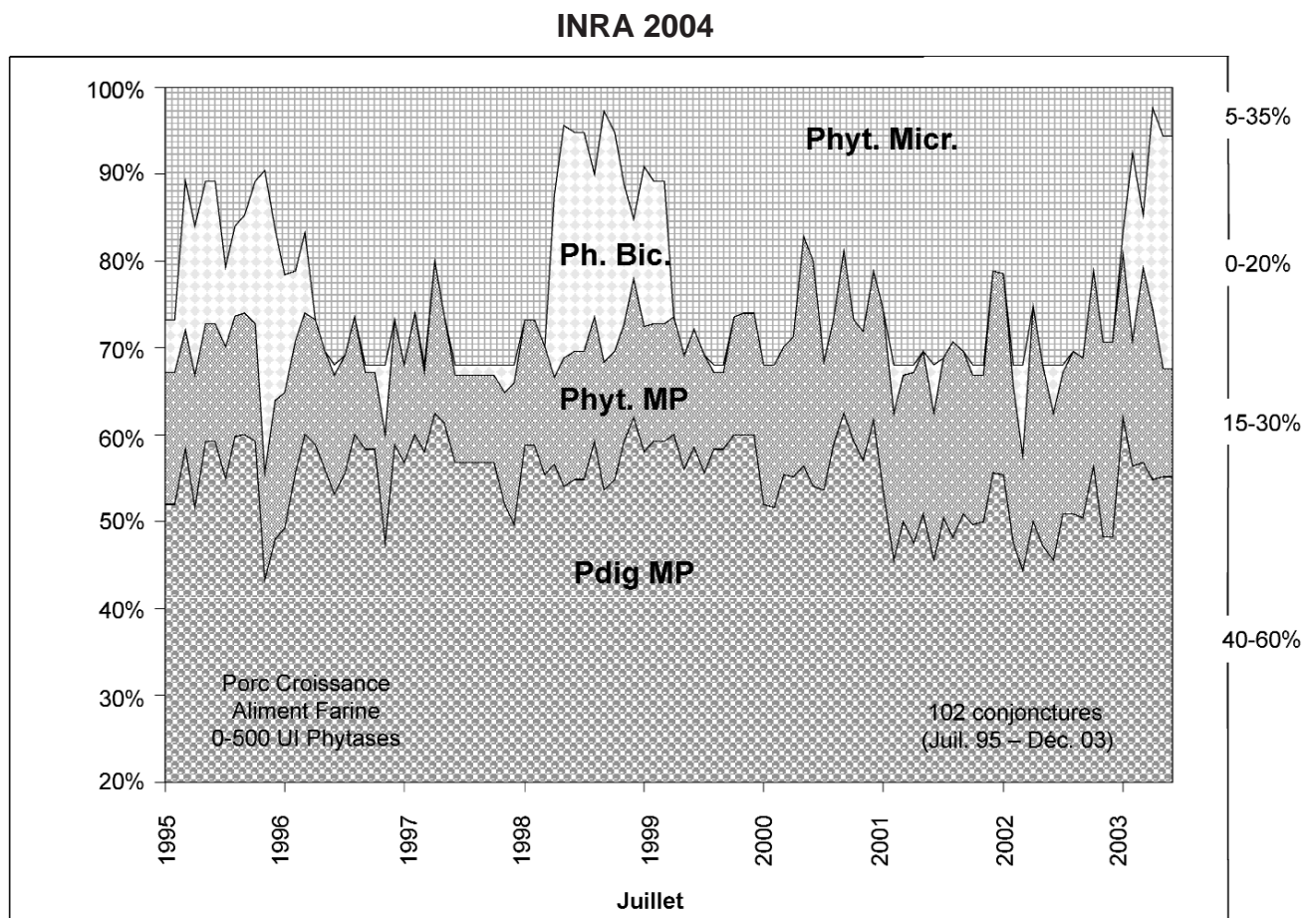
Dans le cas de la formulation d'un aliment granulé, les phytases exogènes interviennent pour une activité comprise entre 500 et 910 UI/kg de mélange (moyenne = 706 UI/kg) et ainsi

contribuent pour près de la moitié à la couverture du besoin en P digestible (de 30 à 60 %, moyenne = 45 %).

Dans le cas d'un aliment en farine, l'activité phytasique des matières premières limite sensiblement le recours aux phytases exogènes, les deux types de phytases contribuant pour des niveaux sensiblement équivalents à l'activité phytasique globale du mélange (respectivement 270-820 et 270-700 UI/kg). Cependant, la participation des phytases exogènes est beaucoup plus dépendante de la teneur en P digestible des matières premières ($R = 0,70$) que de l'importance de l'activité phytasique des matières premières ($R = 0,41$). Dans de telles conditions, le besoin en P digestible est totalement couvert par ces trois origines de P_{dig} et le phosphate bicalcique ne rentre plus dans la formule.

Cependant cette situation est particulièrement extrême compte tenu du fait que les phytases microbiennes semblent présenter un effet non linéaire sur la libération du P digestible et qu'il pourrait apparaître une interaction avec les phytases végétales lorsque celles-ci sont actives dans le mélange (Jondreville et Dourmad 2005). Ces différents éléments seront intégrés plus loin (cf. § 7) dans un modèle plus complet.

Figure 9. Partition du phosphore digestible selon son origine dans un aliment «porc croissance».



Ainsi l'utilisation des phytases microbiennes, prises en compte avec un effet linéaire, permet de réduire considérablement, voire supprimer, la complémentation phosphorée des formules porc charcutier. Leur utilisation à un niveau inférieur à 500 UI peut contribuer à couvrir jusqu'au tiers du besoin en P digestible de l'animal. Lorsqu'elles sont incorporées totalement librement dans un contexte économique plus favorable, elles pourraient se substituer complètement au phosphate bicalcique et, dans ce cas, leur niveau d'utilisation serait négativement relié à l'importance de la fraction P digestible apportée par les matières premières.

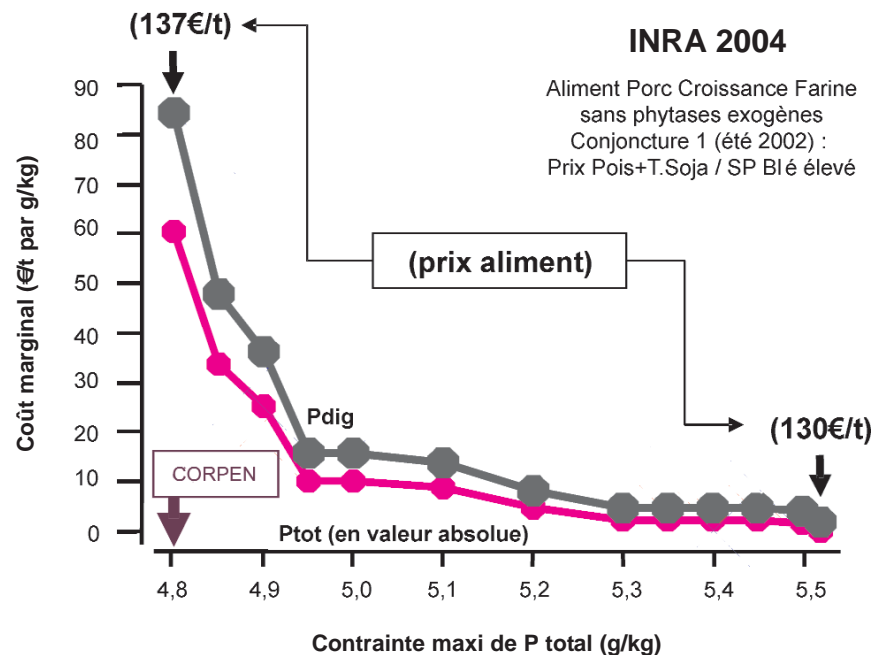
5 / Intégration des normes CORPEN en formulation

La prise en compte des contraintes environnementales, notamment celles relatives à la réduction des rejets de phosphore, est intégrée en formulation par la mise en œuvre des normes CORPEN. Celles-ci imposent une limite maximum de P total dans le mélange de façon à réduire les rejets de P excédentaire par rapport à la fraction P digestible valorisée par l'animal. Cette limite est de 4,8 g/kg de P total dans les formules Porc Charcutier (CORPEN 2003).

La prise en compte de cette norme a été analysée de façon détaillée avec les prix de l'été 2002 (conjoncture N° 1 : prix faible des céréales et coproduits du blé par rapport aux tourteaux et pois, cf. § 2), c'est-à-dire dans un contexte économique particulièrement favorable aux matières premières à faible digestibilité de P mais à forte activité phytasique, et sans utiliser de phytases exogènes.

Dans le cas de la formulation d'un aliment granulé, lorsque les phytases végétales sont inactivées, l'application d'une contrainte de maximum de P total, en même temps que la recherche de la satisfaction de la contrainte de minimum de P digestible par les apports Pdig (-), puis sa réduction progressive fait grimper le prix du mélange. Il passe ainsi de 131 €t lorsque la contrainte Ptot est libre à 152 €t pour une valeur limite de 5,0 g/kg. En deçà de cette valeur, l'optimisation ne permet plus d'obtenir de solution, c'est-à-dire de satisfaire le besoin en P digestible par les seuls apports Pdig(-) du mélange, sans faire appel à des phytases exogènes.

Figure 10. Incidence de la prise en compte des normes CORPEN en P total sur le coût des contraintes «phosphore» d'un aliment «porc croissance».



Pour un aliment en farine, quand la contrainte de minimum de P digestible est satisfaite par les apports PdigActPhy tenant compte des phytases végétales, la mise en œuvre de la contrainte de maximum de P total induit également un accroissement du prix du mélange, mais plus limité que pour l'aliment granulé. La limite maximum de 4,8 g/kg de la norme CORPEN peut être satisfaite pour un prix du mélange farine de 137 €t par rapport à un prix initial de 130 €t sans la contrainte Ptot.

L'incidence de la réduction progressive de la contrainte P total sur les coûts marginaux, exprimés en valeur absolue, des contraintes saturées Ptot (maximum) et Pdig (minimum) est présentée à la figure 10. Ils passent progressivement de valeurs inférieures à 5 ou 10 €unité si Ptot > 5,1 - 5,2 g/kg à des niveaux compris entre 15 et 35 €unité si Ptot ≈ 4,9 - 5,0 g/kg, pour ensuite atteindre respectivement 60 et 84 €unité lorsque la contrainte Ptot est saturée à la valeur de 4,8 g/kg. La figure 11 illustre les contributions

Figure 11. Incidence de la prise en compte des normes CORPEN en P total sur les contributions relatives des contraintes «phosphore» d'un aliment «porc croissance».

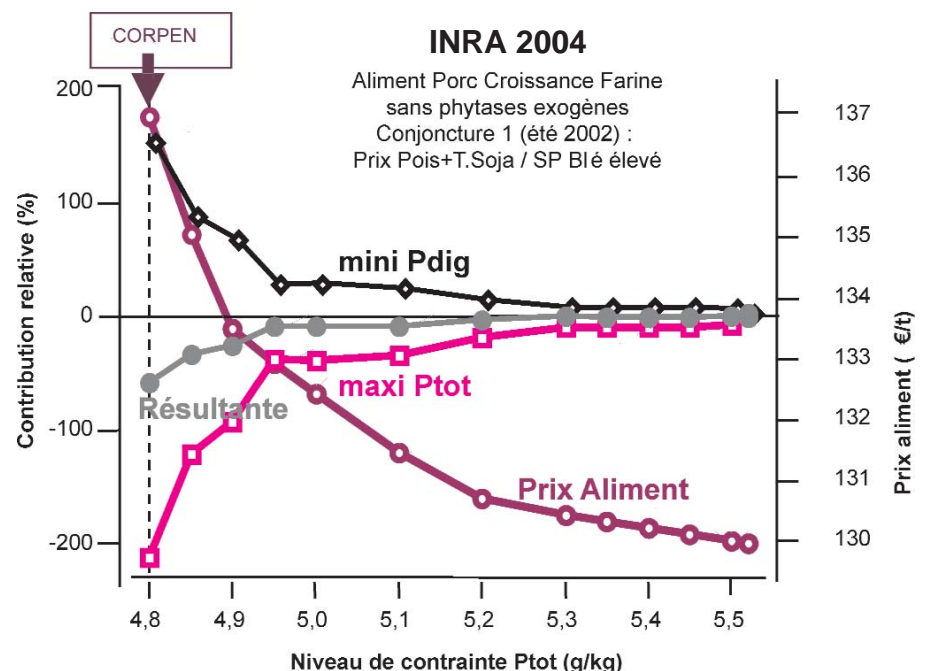


Tableau 5. Incidence de la prise en compte des normes CORPEN en P total sur les formules «porc croissance».

Ingrédients (en %)	Contrainte Ptot « LIBRE »	Contrainte Ptot « CORPEN »
Blé	50	5,9
Orge	-	4,3
Triticale	16	50
Son	2	-
Remoulage	13	-
Pois	6	27
Gr. Colza	3,8	-
T. Soja	5,8	7,5
Ph. Bicalcique	0,35	0,54
Caractéristiques		
Pdig (g/kg)	2,5*	2,5*
Ptot (g/kg)	5,5	4,8*
Activité phytasique (UI/kg)	727	472

* Contrainte saturée.

Conj. N° 1 : Prix Pois + T. Soja / Son + Blé élevé (Juil. 02).

relatives individuelles de ces deux contraintes $[= (U_i \times b_i) / Z]$ et leur résultante correspondant à leur somme algébrique. Lorsque la norme CORPEN est satisfaite, les contraintes saturées Ptot et Pdig contribuent globalement à elles deux pour près de 60 % au prix du mélange.

Entre les deux situations extrêmes (norme CORPEN *versus* Ptot libre), la formulation modifie la place des divers ingrédients (tableau 5 et figure 12 : substitution du blé par du triticales au sein d'un ensemble de céréales qui passe de 66 à 60 %, élimination des

coproduits du blé ainsi que la graine de colza, remplacement par du pois et du tourteau de soja, plus chers dans ce contexte, et accroissement de la part du phosphate bicalcique). Dans ces conditions, l'activité phytasique du mélange liée aux matières premières, initialement proche de 750 UI/kg, a tendance à diminuer pour atteindre une valeur finale d'environ 470 UI/kg lorsqu'on applique la norme CORPEN.

La partition des différentes fractions du phosphore est présentée à la figure 13. Lorsque la contrainte P total est plus forte, la part du P valorisée par

l'animal augmente aux dépens de la partie rejetée. Pour cela, la formulation fait appel à des matières premières plus riches en P digestible «originel», en raison notamment d'une plus grande proportion de P non phytique, mais aussi dont la fraction de P digestible «supplémentaire» issu de l'activité phytasique des matières premières est plus faible.

Une approche équivalente consiste à prendre en compte explicitement dans les formules la fraction P rejeté des matières premières, $Prejet_j = Ptot_j - Pdig_j$, et d'appliquer aux apports correspondants une contrainte de maximum selon l'équation suivante :

$$\Sigma (Prejet_j \times X_j) \leq Prejet_{max}$$

permettant alors de quantifier l'incidence économique de cette contrainte lorsqu'elle est saturée. Ainsi, le respect des normes CORPEN (Ptot = 4,8 g/kg maxi), en cohérence avec le besoin en P digestible (2,5 g/kg), revient à proposer une valeur maximum de 2,3 g/kg pour cette contrainte P rejeté.

Différentes simulations ont été réalisées avec cette logique, pour un aliment en farine, permettant l'utilisation des phytases végétales, dans des situations assez opposées : d'une part, en comparant les conjonctures de décembre 1998 et juillet 2002 décrites précédemment et, d'autre part, en utilisant ou non les phytases exogènes. Elles complètent donc les résultats de l'approche CORPEN classique présentés ci-dessus et obtenus dans des conditions plus restrictives.

Les coûts marginaux de la contrainte maximum de P rejeté peuvent varier dans de larges plages selon les différents contextes étudiés (tableau 6). Par rapport à la situation peu favorable de la conjoncture N°1 sans phytases exogènes décrite précédemment où ce coût marginal était très élevé (60 €/t par unité de P rejeté), il apparaît que le poids économique de cette contrainte est divisé par quatre lorsque le rapport de prix est plus favorable aux matières premières riches en P digestible (15 €/t par point de P rejeté) et devient très faible quand il est possible d'avoir recours aux phytases exogènes (respectivement 0,8 et 0,06 €/t par point dans les conjoncture N° 1 et N° 2). Sans phytases, la contribution de cette contrainte au coût du mélange, en valeur absolue, pèse autant que celle de toutes les autres contraintes confondues dans la conjoncture N° 1 et environ le quart dans la conjoncture N° 2 ; avec

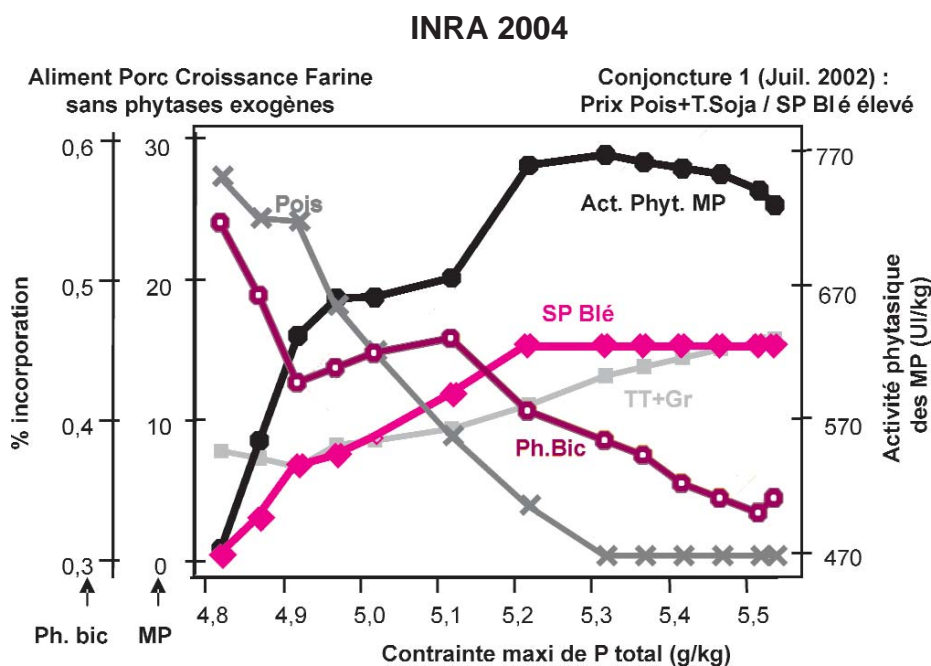
Figure 12. Incidence des normes CORPEN en P total sur les niveaux d'incorporation des ingrédients en formule «porc croissance».


Figure 13. Incidence des normes CORPEN en P total sur la partition du phosphore dans une formule «porc croissance».

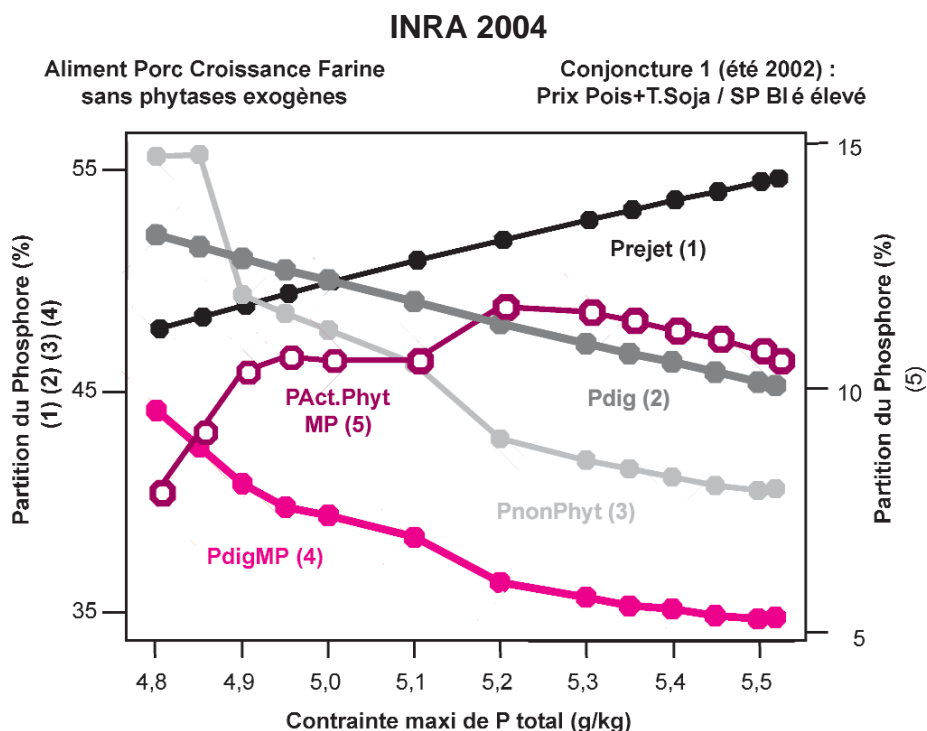


Tableau 6. Variation du coût marginal de la contrainte P rejeté selon le contexte de formulation.

€/t par g/kg de P rejeté	Conjoncture N° 1	Conjoncture N° 2
Sans Phytases microbiennes	60,4	14,6
Avec Phytases microbiennes 1,2 €/t pour 500 UI	0,8 (335 UI)*	6,2 (80 UI)*

Maxi P rejeté = 2,3 g/kg (Norme CORPEN).
 Conj. N° 1 : Prix Pois + T. Soja / Son + Blé élevé (Juil. 02).
 Conj. N° 2 : Prix Pois + T. Soja / Son + Blé faible (Déc. 98).
 (n UI)* : niveau d'activité phytasique microbienne dans le mélange.

phytases, cette contribution représente respectivement 1,4 et 0,1 % du prix de l'aliment.

Ainsi, il apparaît difficile de contraindre de plus en plus le système, à la fois «par le bas» en imposant un apport minimum de P digestible, mais aussi «par le haut» en imposant une contrainte de maximum de plus en plus forte soit sur la teneur en P total de façon à réduire indirectement les rejets phosphorés, soit plus directement sur la quantité de P non valorisé par l'animal. Ces conditions sont particulièrement difficiles à réaliser pour un aliment granulé, lorsque les phytases végétales sont inactivées, sans faire appel à des phytases exogènes. Par contre, elles peuvent être atteintes en tenant compte de l'activité phytasique des matières premières, qui contribue alors pour près de 10 % au flux de P digestible, et surtout en faisant appel à des matières pre-

mières à forte digestibilité du P. Ainsi, lorsque le prix de ces matières premières est élevé, le coût du mélange et le poids économique de ce type de contrainte s'en ressentent d'autant. Cependant, c'est surtout la mise en œuvre des phytases microbiennes qui permet de réduire à un niveau très faible l'importance économique d'une contrainte «rejets de phosphore».

6 / Mise en œuvre d'une activité «rejets de phosphore»

Une autre approche plus originale permettant de prendre en compte la dimension «rejets de phosphore» dans la formulation consiste à considérer ces rejets de P comme une activité à laquelle est associé un prix, qui pourrait représenter le coût de traitement de ces

effluents. Dans ces conditions, l'optimisation passe par la minimisation des charges globales d'achat des matières premières et de traitement des effluents. Une approche similaire a été proposée récemment par Pomar *et al* (2004), bien que basée sur des données technico-économiques légèrement différentes.

Les rejets de P sont intégrés dans le modèle comme une activité, et non plus comme une contrainte comme dans le paragraphe précédent. Il est donc nécessaire de calculer de nouvelles pseudo-activités, SomPtot et SomPdig, représentant respectivement les teneurs cumulées du mélange en P total et en Pdig (en g/kg) issu des matières premières et des phytases végétales ou microbiennes, par le jeu de nouvelles pseudo-contraintes :

$$\begin{aligned} \text{Équation } S_{\text{Ptot}} : \\ \Sigma (\text{Ptot}_j \times X_j) - \text{SomPtot} = 0 \\ \text{Équation } S_{\text{Pdig}} : \Sigma (\text{Pdig}(-)_j \times X_j) + a_{\text{AV}} \\ \times \text{AVtot} + a_{\text{AM}} \times \text{AMtot} - \text{SomPdig} = 0 \\ \text{avec } a_{\text{AV}} = 0,4 \text{ g/kg pour } 500 \text{ UI} \\ \text{et } a_{\text{AM}} = 0,8 \text{ g/kg pour } 500 \text{ UI} \end{aligned}$$

La pseudo-activité SomPrej, correspondant à la teneur du mélange en P rejeté (en g/kg), peut être créée à son tour par la pseudo-contrainte suivante :

$$\begin{aligned} \text{Equation } S_{\text{Prej}} : \text{SomPrej} - \text{SomPtot} \\ + \text{SomPdig} = 0 \end{aligned}$$

Un coût (c_p) est affecté à cette nouvelle activité «P rejeté», tandis que les deux autres activités, SomPtot et SomPdig, présentent un prix nul. La fonction économique, qui représente les charges totales (matières premières+rejets), devient donc :

$$Z = \Sigma (c_j \times X_j) + (c_p \times \text{SomPrej})$$

Les coefficients de ces trois pseudo-activités dans la contrainte de poids sont nuls.

La modification correspondante du modèle de formulation est illustrée de façon matricielle dans le tableau 7. Ce modèle a été utilisé pour plusieurs simulations, dans les deux conjonctures économiques particulières de juillet 2004 et décembre 1998 de façon à étudier l'incidence des variations du coût de traitement des effluents phosphorés sur le niveau de P rejeté dans un aliment en farine, en bénéficiant ou non de phytases microbiennes (0 - 500 UI).

En l'absence de phytases exogènes, lorsque le coût appliqué aux effluents de P est nul, les teneurs en P rejeté des

Tableau 7. Modèle matriciel de formulation intégrant l'effet linéaire des phytases végétales et microbiennes et la dimension «Rejets de Phosphore» sous forme d'une activité.

		Matières Premières	Phytases vég. et micr.		Pseudo-Activités			Second membre	
		MP(j)	AMtot	AVtot	SomPtot	SomPdig	SomPrej	mini	maxi
Contraintes nutritionnelles et alimentaires									
EN	(i)	a(ij)							b(i)
MPB									
AAdig									
...									
Pseudo-Contraintes									
S_Ptot		Ptot(j)			-1			0	0
S_Pdig		Pdig-(j)	0.8 / 500	0.4 / 500		-1		0	0
S_Prej					-1	1	1	0	0
Contraintes "Phosphore"									
PHOS_TOT					1			0	4,8
PHOS_DIG						1		2,5	999
Poids		1	1	0	0	0	0	100	100
Fonction économique		c(j)	cphy	0	0	0	cP		
Solutions		X(j)	PhyM		Y(j)		Prej		

formules sont de 3,0 et 2,5 g/kg respectivement dans les conjonctures N° 1 et N° 2. Comme décrit précédemment, dans ces situations, les mélanges incluent un maximum de coproduits de blé (conjoncture N° 1) ou un maximum de pois (conjoncture N° 2), pour un prix respectivement d'environ 130 et 131 €/t.

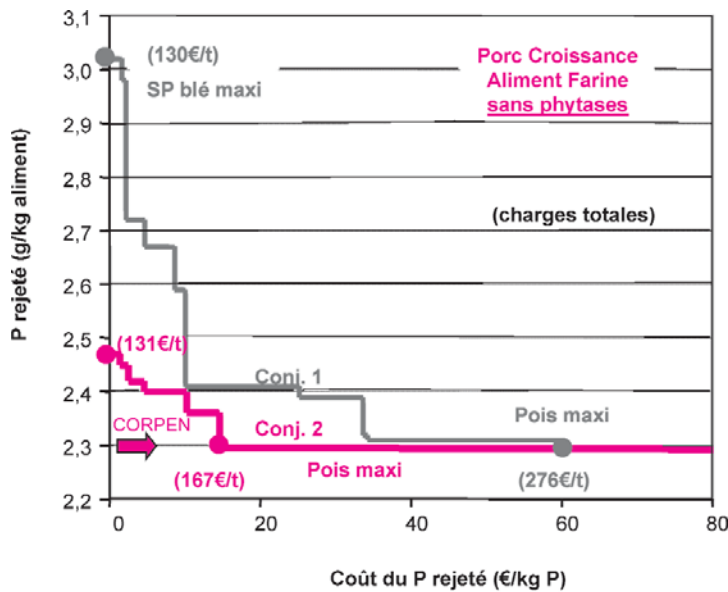
Si l'on applique un coût de traitement aux rejets de P, le niveau de cette activité dans la formule va diminuer. Il faudra atteindre un coût de traitement respectivement de 14,6 et 60,4 €/kg de P rejeté dans les conjonctures N° 2 et N° 1 pour que la teneur en P rejeté descende en dessous de la valeur maximum tolérée par le CORPEN (figure 14). Ces valeurs «coût de traitement pour 2,3 g de P rejeté par kg d'aliment» pourraient donc être assimilées dans chacune des situations au «prix d'intérêt à la norme CORPEN de l'activité Rejet de P». Elles sont, par ailleurs,

strictement égales aux coûts marginaux de la contrainte P rejeté calculés dans les mêmes conditions au paragraphe précédent. A ces points, les charges totales associées aux formules sont respectivement de 167 €/t pour la conjoncture N° 2 et de 276 €/t pour la conjoncture N° 1 où les coproduits de blé disparaissent au profit du pois plus cher. La ventilation dans ces charges des parts attribuées aux achats des matières premières et au traitement des rejets de P est présentée au tableau 8. Le traitement des effluents est aussi coûteux que l'achat des matières premières dans la conjoncture N° 1 (respectivement 139 et 137 €/t) et ne représentent plus que 20 % du coût global dans la conjoncture N° 2 (respectivement 34 €/t pour les rejets de P et 133 €/t pour les matières premières).

Lorsque les phytases exogènes (1,2 €/t pour 500 UI) sont utilisées

selon le besoin (≤ 500 UI) dans la formule présentée en farine, la limite CORPEN sur le P rejeté de 2,3 g/kg d'aliment est atteinte dès que le coût du P rejeté vaut 0,8 €/kg dans la conjoncture N° 1. Dans la conjoncture N° 2, un niveau de rejet équivalent est atteint pour un coût de 0,06 €/kg de P rejeté. Comme précédemment, une réduction plus forte des rejets est associée à une élévation des frais de traitement (figure 15). Dans ces situations, si l'on est capable de financer un coût de traitement de 5 €/kg de P rejeté, les niveaux de P rejeté des formules peuvent descendre aux environs de 1,5 g/kg d'aliment. Les charges globales associées aux formules dans les deux conjonctures seraient de 138 ou 139 €/t, au sein desquelles les frais de dépollution ne représenteraient que 4 à 6 % (tableau 9). Par contre, si l'on cherche à réduire encore plus les rejets de P, compte tenu de la largeur des plages d'invariance du niveau de cette

Figure 14. Relation entre le niveau et le coût du Phosphore rejeté dans un aliment «porc croissance» farine sans phytases microbiennes.



Conj. 1 : Prix Pois+T.Soja / Son+Blé élevé (Juil. 02)
 Conj. 2 : Prix Pois+T.Soja / Son+Blé faible (Déc. 98)

Tableau 8. Répartition entre les coûts d'achat des ingrédients et de traitement du P rejeté pour un aliment «porc croissance» farine sans phytases microbiennes.

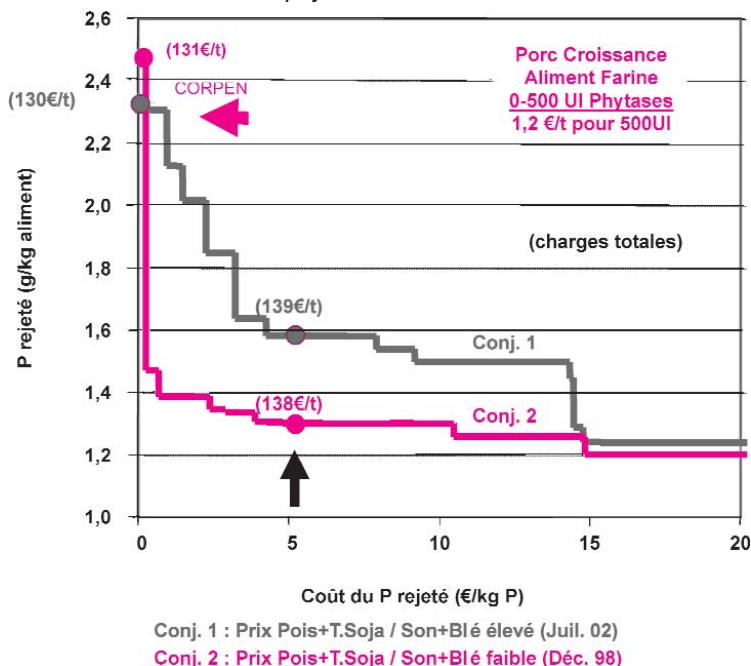
€/t	Conjoncture N° 1	Conjoncture N° 2
Prix initial aliment	130	131
Achat des ingrédients	137 (50 %)	133 (80 %)
Traitement des rejets de P	139 (50 %)	34 (20 %)
Charges totales finales	276 (100 %)	167 (100 %)

Maxi P rejeté = 2,3 g/kg (Norme CORPEN).

Conj. N° 1 : Prix Pois + T. Soja / Son + Blé élevé (Juil. 02).

Conj. N° 2 : Prix Pois + T. Soja / Son + Blé faible (Déc. 98).

Figure 15. Relation entre le niveau et le coût du Phosphore rejeté dans un aliment «porc croissance» farine avec phytases microbiennes.



Conj. 1 : Prix Pois+T.Soja / Son+Blé élevé (Juil. 02)
 Conj. 2 : Prix Pois+T.Soja / Son+Blé faible (Déc. 98)

activité, il faudrait appliquer un coût d'environ 15 €/kg de P rejeté pour atteindre le seuil d'environ 1,2 g de P rejeté par kg d'aliment. Ces chiffres représenteraient, à travers une simulation technico-économique simpliste (IC = 2,8, 210 kg d'aliment consommé et 0,35 m³ de lisier produit par porc, dont 40 % en phase de croissance), l'équivalent d'un coût de traitement de lisier d'environ 5 €/m³ dans le premier cas et de 10 €/m³ dans le second cas.

La prise en compte des rejets de P sous la forme d'une activité permet d'en étudier plus finement l'incidence économique par l'analyse de ses plages d'invariance et de connaître la ventilation des charges globales entre le prix de revient des matières premières et le coût de traitement des rejets de P. Il résulte de cette simulation que l'application des recommandations CORPEN en terme de limitation des rejets de P est extrêmement coûteuse en l'absence de phytases microbiennes. L'utilisation de ces phytases permet de réduire très nettement l'incidence économique d'un tel objectif. Ces résultats vont tout à fait dans le même sens que les conclusions de Pomar *et al* (2004) même si ces auteurs ont balayé une plage de prix nettement plus restreinte pour le rejet de P.

7 / Prise en compte d'un effet non linéaire des phytases microbiennes et des interactions avec les phytases végétales

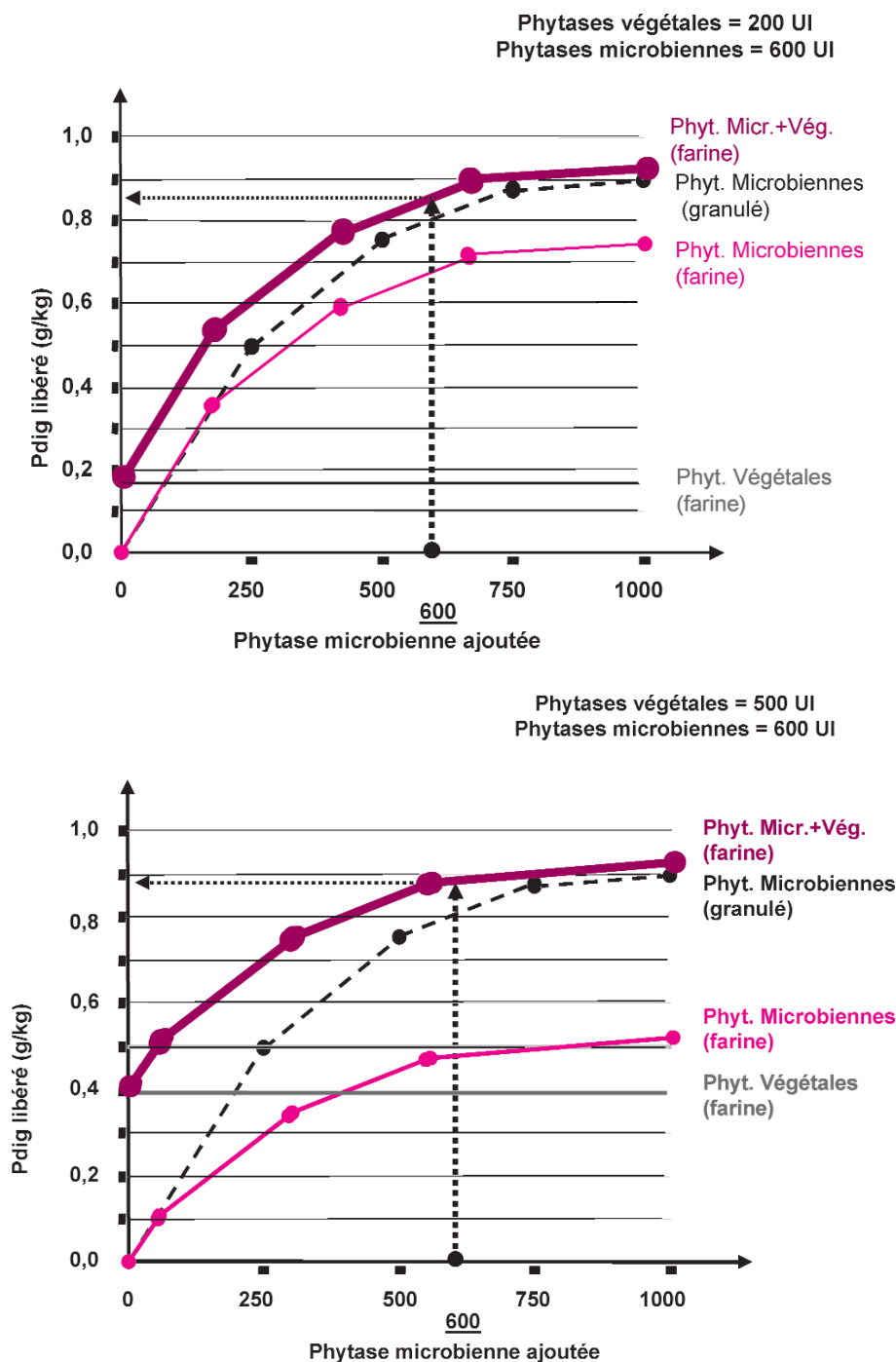
Dans les simulations précédentes, l'effet des phytases végétales et microbiennes sur la libération de phosphore a été considéré comme linéaire dans une plage restreinte d'activité phytasique (≤ 500 UI). Or plusieurs auteurs ont montré que dans une plage plus importante l'activité des phytases microbiennes présentait un effet curvilinéaire. Ainsi, Jondreville et Dourmad (2005) ont proposé, pour les 3-phytases, des valeurs décroissantes d'efficacité de la libération du P_{dig} selon leur niveau d'apport dans le régime en linéarisant cette relation par tranche de 250 UI d'activité phytasique entre 0 et 1000 UI. Cet effet non linéaire peut donc ainsi être intégré dans un processus de formulation par programmation linéaire en utilisant

Tableau 9. Répartition entre les coûts d'achat des ingrédients et de traitement du P rejeté pour un aliment «porc croissance» farine avec phytases microbiennes.

€/t	Conjoncture N° 1	Conjoncture N° 2
Prix initial aliment	130	131
Achat des ingrédients	131 (94 %)	132 (96 %)
Traitement des rejets de P	8 (6 %)	6 (4 %)
Charges totales finales	139 (100 %)	138 (100 %)

Coût du " Rejet de P " = 5 €/kg P rejeté.
 Conj. N° 1 : Prix Pois + T. Soja / Son + Blé élevé (Juil. 02).
 Conj. N° 2 : Prix Pois + T. Soja / Son + Blé faible (Déc. 98).

Figure 16 (a) et (b). Interaction entre phytases végétales et microbiennes.



«artificiellement» plusieurs phytases de même prix et de même concentration mais ayant chacune une efficacité différente.

De plus, ces mêmes auteurs proposent, d'une part, que l'action des phytases végétales soit raisonnablement plafonnée à un seuil de 500 UI/kg qui permettrait la libération de 0,4 g de Pdig au maximum, et suggèrent, d'autre part, que la présence des phytases végétales actives (mélange sous forme de farine) entraîne une diminution de l'efficacité des phytases microbiennes comparativement à celle observée dans un mélange granulé, la baisse d'efficacité n'étant pas la même selon le niveau d'activité des phytases végétales présentes. La figure 16 (a) et (b) (Dourmad 2005, communication personnelle) illustre dans deux situations (200 et 500 UI de phytases végétales actives + 600 UI de phytases microbiennes) les conséquences de telles hypothèses en terme de quantité de P digestible libéré par l'action de ces phytases.

Ces différents éléments ont été intégrés dans un nouveau modèle de formulation en créant de nouvelles pseudo-activités, prenant des valeurs Y_j à l'optimum, n'ayant aucun coût dans la fonction économique ni de coefficient dans la contrainte de poids, et reliées entre elles par des pseudo-contraintes selon les principes suivants.

L'activité phytasique totale des matières premières végétales a été cumulée dans une pseudo-activité AV_{tot} , puis ventilée entre deux pseudo-activités : $AV_{(-500)}$, qui représente une classe d'activité phytasique végétale ($0 \leq AV_{(-500)} \leq 500$ UI) ayant une efficacité constante $a_{AV_{(-500)}} = 0,4$ g de Pdig libéré pour 500 UI, et $AV_{(+500)}$, activité phytasique au-delà de 500 UI, dont l'efficacité $a_{AV_{(+500)}}$ pourrait être considérée comme nulle. Les quantités correspondantes de P digestible libéré par ces deux classes sont respectivement $Pdig_{AV_{(-500)}}$ et $Pdig_{AV_{(+500)}}$ et se cumulent au P digestible issu des matières premières, $Pdig_{(-)}$ pour contribuer à couvrir le besoin de l'animal.

Ainsi, un jeu de plusieurs pseudo-contraintes a été mis en œuvre pour permettre de gérer les relations correspondantes :

$$\begin{aligned} \text{Equation S_AVtot} &: \Sigma (\text{ActPhy}_j \times X_j) - \text{AVtot} = 0 \\ \text{Equation Repart_AVtot} &: \text{AVtot} - \text{AV}(-500) - \text{AV}(+500) = 0 \\ \text{Equation S_Pdig(-)} &: \Sigma (\text{Pdig}(-)_j \times X_j) - \text{Pdig}(-) = 0 \\ \text{Equation S_PdigAV}(-500) &: \text{PdigAV}(-500) - a_{\text{AV}(-500)} \times \text{AV}(-500) = 0 \\ \text{Equation S_PdigAV}(+500) &: \text{PdigAV}(+500) - a_{\text{AV}(+500)} \times \text{AV}(+500) = 0 \end{aligned}$$

avec, dans le cas du modèle proposé par Jondreville et Dourmad (2005),
 $a_{\text{AV}(-500)} = 0,4/500$ et $a_{\text{AV}(+500)} = 0$

Cet artifice permet, d'une part, de ne pas contraindre l'activité phytasique totale des matières premières à une limite de 500 UI maximum, ce qui pourrait avoir comme conséquence de restreindre l'entrée dans la formule de certaines matières premières riches en phytases intéressantes nutritionnellement et économiquement (blé et coproduits, triticale...) et, d'autre part, de limiter «artificiellement» la quantité de Pdig libéré par ces phytases végétales à une certaine valeur selon les recommandations de Jondreville et Dourmad (2005).

Par ailleurs, une telle construction permet d'intégrer plus facilement de nouvelles connaissances sur l'efficacité des phytases végétales (éventuelle relation curvilinéaire «linéarisable» selon plusieurs classes possibles, efficacité décroissante selon le niveau d'activité phytasique...) au lieu de restreindre «arbitrairement» leur action à 500 UI.

Un principe sensiblement analogue a été appliqué pour les phytases microbiennes.

Cinq niveaux d'incorporation (PhytM₁, PhytM₂, PhytM₃, PhytM₄ et PhytM₅) d'un même phytase microbienne, de concentration (a_{PHYM_k}) et de prix (c_{PHYM_k}) donnés, ont été créés. A chacun d'entre eux (k), pouvant être incorporés dans le mélange à un niveau PhytM_k ($0 \leq \text{PhytM}_k \leq 100$), a été affectée une classe d'activité phytasique, AM_k, par les pseudo-contraintes correspondantes :

$$\begin{aligned} k \text{ équations S_AphyM}_k &: \\ a_{\text{PHYM}_k} \times \text{PhytM}_k - \text{AM}_k &= 0 \\ \text{avec } 1 \leq k \leq 5 &; \\ 0 \leq \text{AM}_k \leq 250 &\text{ pour } k \leq 4 ; \\ 0 \leq \text{AM}_5 \leq \infty & \end{aligned}$$

La quantité totale de phytase microbienne incorporée, PhytMtot, et l'activité phytasique correspondante, AMtot, sont calculées de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \text{Equation S_PhytMtot} &: \\ \text{PhytMtot} - \Sigma \text{PhytM}_k &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Equation S_AphyMtot} &: \\ \text{AMtot} - \Sigma \text{AM}_k &= 0 \\ \text{avec } 1 \leq k \leq 5 & \end{aligned}$$

Les quantités de P digestible libéré par chacune des classes d'activité phytasique microbienne, PdigAM_k, sont calculées à partir des rendements marginaux décroissants, a_{AM_k} , proposés par Jondreville et Dourmad (2005) dont les valeurs ont été arrondies (respectivement 0,2, 0,1, 0,05 et 0,03 g/kg pour 100 UI pour les classes AM1, AM2, AM3 et AM4 tandis que pour AM5, a_{AM_5} a été supposé nul) :

$$\begin{aligned} k \text{ équations S_PdigAM}_k &: \\ \text{PdigAM}_k - a_{\text{AM}_k} \times \text{AM}_k &= 0 \\ \text{avec } 1 \leq k \leq 5 & \end{aligned}$$

La création de ces différentes pseudo-contraintes permet, en outre, de connaître la répartition des divers critères (niveau d'activité phytasique, Pdig libéré...) selon les différentes classes d'activités phytasiques végétales ou microbiennes.

Par ailleurs, l'interaction entre phytases microbiennes et phytases végétales a été prise en compte selon l'hypothèse émise par Jondreville et Dourmad (2005) : lorsque les phytases végétales sont actives (aliment en farine), leur activité phytasique (≤ 500 UI/kg d'aliment) permet de libérer la quantité PdigAV(-500) de phosphore digestible ($\leq 0,4$ g/kg d'aliment). Cette quantité diminue d'autant la fraction de Pdig libéré par la première classe d'activité phytasique microbienne. Ainsi, le niveau de cette classe AM1, dont la limite maximum est a_{maxiAM_1} , est diminué de la valeur PdigAV(-500)/ a_{AM_1} . La pseudo-contrainte suivante permet de gérer cette interaction :

$$\begin{aligned} \text{Equation S_AM1} &: \\ \text{AM1} + (1 / a_{\text{AM}_1}) \times \text{PdigAV}(-500) &= a_{\text{maxiAM}_1} \\ \text{ou encore} & \\ \text{AM1} + (a_{\text{AV}(-500)} / a_{\text{AM}_1}) \times \text{AV}(-500) &= a_{\text{maxiAM}_1} \\ \text{avec } a_{\text{maxiAM}_1} &= 250 \end{aligned}$$

Cependant, l'utilisation des pseudo-activités représentant les activités phytasiques végétales ou microbiennes dans la formule doit se faire dans un ordre logique : les premières doivent être introduites puis saturées à leur maximum avant que ne puissent rentrer les suivantes.

L'existence des rendements marginaux décroissants associés à ces activi-

tés pour la libération du P digestible contribue normalement à respecter cet ordre logique d'utilisation.

Cependant, cet ordre peut être «artificiellement» favorisé en affectant des prix légèrement croissants aux différentes phytases microbiennes de même concentration :

$$\begin{aligned} \text{Prix PhytM}_{k+1} &= \text{Prix PhytM}_k + \varepsilon \\ \text{avec } 1 \leq k \leq 5 & \end{aligned}$$

ou en tenant compte de concentrations légèrement décroissantes pour les phytases microbiennes de même prix. Leur introduction successive dans la formule se fera donc logiquement en fonction de leur rapport qualité/prix décroissant.

Pour imposer une succession logique d'utilisation des classes de phytases, il est également possible de créer des pseudo-entiers logiques (prenant les valeurs 1 ou 0), qui correspondent à la présence ou l'absence de certaines activités. Ainsi, par exemple, la création d'une pseudo-activité entière-logique, I-AV_k, correspondant à la présence /absence d'une classe d'activité phytasique végétale, AV_k, peut se traduire dans le modèle par un jeu d'inéquations utilisant les limites minimum (a_{miniAV_k}) et maximum (a_{maxiAV_k}) de l'activité AV_k :

$$\begin{aligned} \text{d'une part} &: \\ -\infty \leq \text{AV}_k - a_{\text{maxiAV}_k} \times \text{I-AV}_k &\leq 0 \\ \text{avec } a_{\text{maxiAV}_k} &= 500 \text{ par exemple} \\ \text{et d'autre part} &: \\ 0 \leq \text{AV}_k - a_{\text{miniAV}_k} \times \text{I-AV}_k &\leq +\infty \\ \text{avec } a_{\text{miniAV}_k} &= 10^{-4} \text{ par exemple} \end{aligned}$$

Afin de satisfaire ces inéquations, si AV_k est non nul, alors I-AV_k ne peut qu'être égal à 1 et à l'inverse, si AV_k est nul, I-AV_k doit obligatoirement être nul.

La prise en compte des activités AV_k et AV_{k+1} dans un ordre logique (AV_k puis AV_{k+1} quand AV_k a atteint sa limite maximum) est possible en appliquant la contrainte suivante :

$$\begin{aligned} \text{Equation Sat_AV}_{k/k+1} &: \\ 0 \leq \text{AV}_k - a_{\text{maxiAV}_k} \times \text{I-AV}_{k+1} &\leq +\infty \end{aligned}$$

Un jeu analogue d'inéquations aurait pu également être mis en place pour les différentes classes de phytases microbiennes.

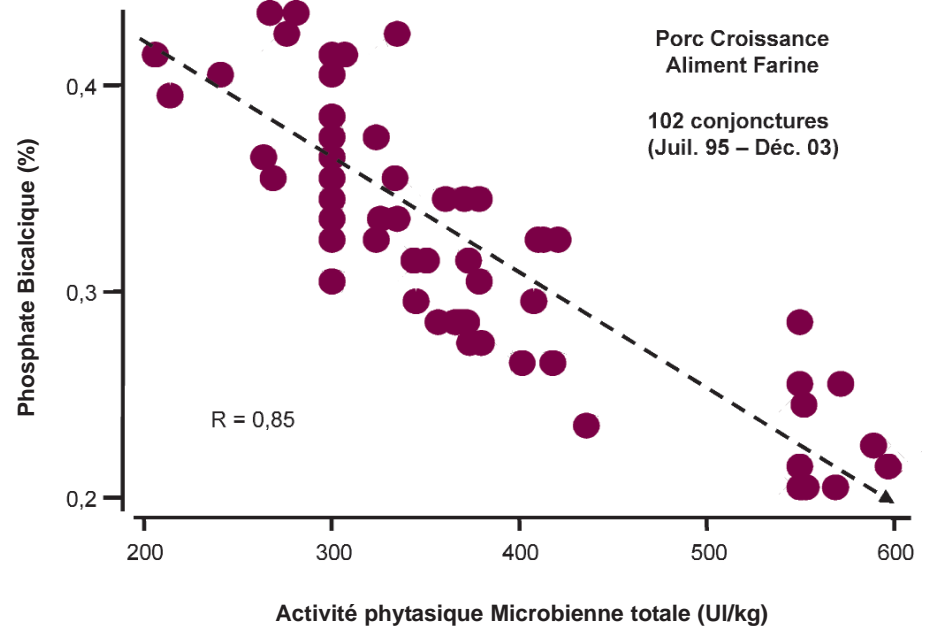
L'introduction de ces différents éléments dans un modèle de formulation plus sophistiqué peut être visualisée sous forme matricielle dans le tableau 10. Ce modèle a été utilisé dans

une série de simulations utilisant les données des tables INRA-AFZ 2004 pour formuler un aliment en farine avec l'ensemble des conjonctures économiques en appliquant les normes CORPEN. Les phytases microbiennes ($5000 \pm \epsilon$ UI/g) ont été utilisées de façon totalement libérale à un coût de $0,9 \pm \epsilon$ €/t pour 500 UI, permettant la comparaison avec les résultats du § 4.

Sur l'ensemble des conjonctures, le prix des formules a évolué entre 131 et 189 €/t. L'incorporation des céréales à paille a varié de 51 à 83 %. Le blé et le triticale y ont été très largement majoritaires. Quelques contextes ont été plus favorables à l'orge, au maïs ou aux coproduits du blé. Le tourteau de soja est systématiquement entré (6-19 %), éventuellement substitué ou complété par tourteau+graine de colza et/ou acides aminés de synthèse. Cependant, contrairement aux simulations du § 4, dans les conditions testées ici le pois n'est jamais rentré dans les formules.

Les phytases végétales sont intervenues pour une activité phytasique totale d'environ 500 UI/kg en moyenne, mais qui a varié de 380 à 720 UI (figure 17). Ainsi, dans 25 % des cas le seuil de 500 UI, imposé comme la limite d'efficacité pour les phytases végétales dans le modèle de Jondreville et Dourmad (2005), a été pénalisante pour la complémentation phosphorée. Ces situations correspondent à des niveaux d'incorporation de céréales à

Figure 18. Incidence de l'activité phytasique microbienne sur la complémentation phosphorée d'un aliment « porc croissance » en tenant compte d'un effet non linéaire et une interaction avec les phytases végétales.



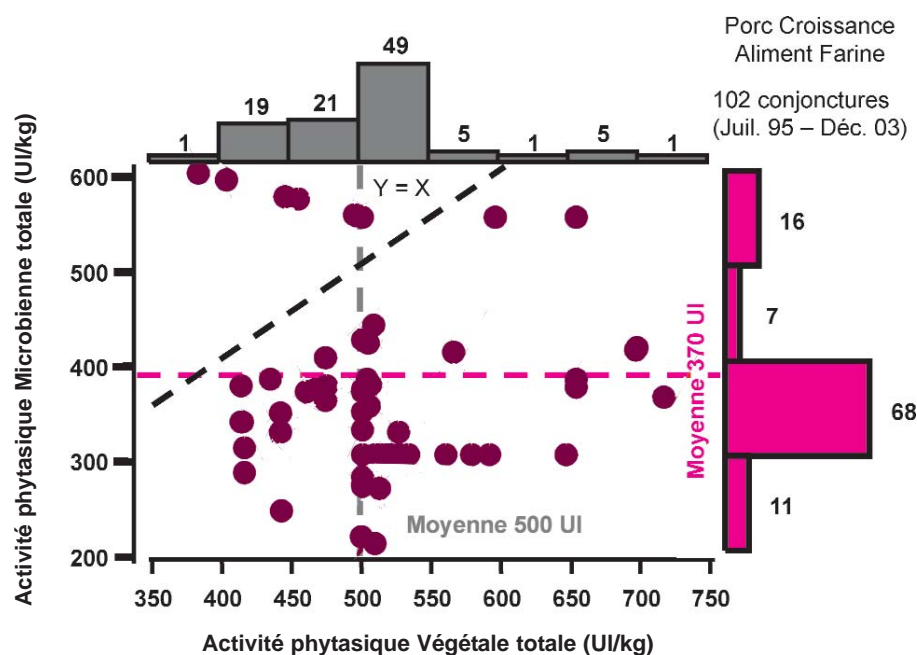
Effet non linéaire des phytases microbiennes (0,9 €/t pour 500 UI)
+ interaction entre phytases végétales et microbiennes

paille + coproduits du blé supérieurs à 70-75 %, notamment dans les conjonctures postérieures à octobre 2000.

L'intervention des phytases microbiennes a été plus faible que celles des phytases végétales : elles n'ont été utilisées en moyenne qu'à raison de 370 UI d'activité phytasique /kg d'ali-

ment, mais ce niveau a varié de 200 à 600 UI (≥ 500 UI dans 15 % des cas) sans qu'il n'apparaisse de liaison avec le niveau des phytases végétales (figure 17). La première classe M1 est intervenue en complément des phytases végétales pour une activité comprise entre 50 et 100 UI seulement (AM1 = 50 UI dans 65 % des cas). Ces niveaux de supplémentation en phytases microbiennes ont été en toute logique plus limités que dans l'étude précédente (§ 4). Dans cette simulation, contrairement à ce que nous observions précédemment, la contribution des phytases microbiennes a été peu influencée par la quantité de Pdig apportée par les matières premières, qui a varié ici dans une plus faible proportion que dans l'approche précédente (1,1 - 1,3 g/kg vs 1,1 - 1,6 g/kg). Par contre, l'activité phytasique microbienne conditionne largement la complémentation par le phosphate bicalcique ($R = 0.85$), dont le taux d'incorporation a évolué dans cette simulation de 0,20 à 0,43 % (moyenne = 0,31 %) (figure 18).

Figure 17. Variations des activités phytasiques végétales et microbiennes dans un aliment « porc croissance » en prenant en compte un effet non linéaire et une interaction.



Effet non linéaire des phytases microbiennes (0,9 €/t pour 500 UI)
+ interaction entre phytases végétales et microbiennes

Ainsi, ce modèle, légèrement plus sophistiqué que les précédents, permet d'intégrer dans une démarche de formulation par programmation linéaire l'essentiel des résultats actuellement disponibles sur l'alimentation phosphorée du porc, y compris les réponses non linéaires aux phytases microbiennes et les interactions possibles avec les phytases végétales.

Il présente également l'intérêt de pouvoir tester le découpage en plusieurs classes (2, 3, 4 ou plus) en vue d'une linéarisation des réponses non linéaires des phytases en s'appuyant notamment sur les coûts marginaux des contraintes associées aux limites de chacune de ces classes et/ou sur les plages d'invariances de ces activités.

En outre, il permettrait d'inclure aisément les nouvelles connaissances issues de la recherche, notamment en matière de réponse non linéaire aux phytases végétales ou encore de non-additivité des diverses activités phytasiques, tout en associant également les aspects relatifs aux «rejets de phosphore» évoqués dans le § 6.

Conclusion

Cette étude, volontairement limitée à la conception de régimes pour porc, a permis de mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation en formulation des nouveaux systèmes «phosphore», qui intègrent les données originales publiées dans les Tables INRA-AFZ 2004.

Comparativement à l'ancien système INRA 1989, ce nouveau système conduit, selon les contextes technico-économiques étudiés, à mieux satisfaire le besoin en P digestible de l'animal et/ou à réduire la quantité de P total du régime.

Références

- BASF, 2005. Fichier http://www.basf-korea.co.kr/02_products/04_finechemicals/document/animal/techinfo/enzyme/down.asp?file=enzymes.pdf édité le 25/04/2005.
- Boussard J.M., Daudin J.J., 1988. La programmation linéaire dans les modèles de production. Masson, Paris, France, 127 p.
- Castaing J., Paboeuf F., Skiba F., Chauvel J., Cazaux J.G., Van Milgen J., Jondreville C., 2003. Estimation du besoin en P digestible apparent du porc charcutier : synthèse d'essais zootechniques effectués au cours des dix dernières années. Journ. Rech. Porcine Fr., 35, 47-54.
- CEREOPA, 2004. Modèle Prospective Aliment. <http://www.cereopa.com/presmodele-france.htm>
- CORPEN, 2003. Estimation des rejets d'azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc des porcs. CORPEN (Eds), Paris, France, 41p.
- Cromwell G.L., 2005. Update on Phytase utilization in swine; Mise à jour sur l'utilisation de la phytase chez le porc. Roche Vitamins Canada
- Inc.Symposium.Fichierhttp://www.dsm.com/en_US/downloads/dnpus/enc_03_4.pdf édité le 25/04/2005.
- Dantzig G.B., 1966. Applications et prolongements de la programmation linéaire. Dunod, (Eds), Paris, France, 433p.
- Eeckhout W., De Paepe M., 1992. Phytase de blé, phytase microbienne et digestibilité apparente du phosphore d'un aliment simple pour porcelets. Rev. Agric., 45, 195-207.
- Faure R., 1971. Eléments de la recherche opérationnelle. Gauthier-Villars (Eds), Paris, France, 319p.
- Guéguen L., Perez J. M., 1981. A re-evaluation of recommended dietary allowances of calcium and phosphorus for pigs. Proc. Nutr. Soc., 40, 273-278.
- INRA, 1989. L'alimentation des animaux monogastriques : porc, lapin, volailles. 2^e édition révisée, INRA, Paris, France, 282p.
- 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. D. Sauvant, J.-M. Perez, G. Tran (eds), 2^e édition révisée, INRA, Paris, 301p.
- Jondreville C., et Dourmad J.-Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. INRA Prod. Anim., 18 (3), 183-192.
- Jongbloed A. W., Everts H., Kemme P. A., Mroz, Z., 1999. Quantification of absorbability and requirements of macro elements. In: I. Kyriazakis (Eds), Quantitative biology of the pig, CAB International, Wallingford UK, 275-298.
- Lescoat P., Travel A., Nys Y., 2005. Lois de réponse des volailles de chair à l'apport de phosphore. INRA Prod. Anim., 18 (3), 193-202.
- Lessire M., 2004. Valeurs nutritives pour les volailles. In : Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins,

tions en matière de limitation des rejets de P par les régimes. La mise en œuvre de cette dimension «rejets de P» dans le modèle de formulation a permis de juger du coût élevé des contraintes CORPEN, qui sont particulièrement difficiles à satisfaire en l'absence de phytases microbiennes. La contribution économique de ces recommandations est fortement diminuée lorsque la conjoncture est favorable aux matières premières riches en P digestible et surtout lorsque les phytases microbiennes sont disponibles. Inversement, le modèle permet aussi de déterminer les limites «économiquement acceptables» en terme de quantité de P rejeté issu du régime selon l'importance du coût de traitement du lisier que l'on met en œuvre en élevage.

Des démarches sensiblement analogues pourraient être appliquées également aux nouveaux systèmes «phosphore» proposés pour les ruminants et pour les volailles.

Remerciements

Les auteurs remercient Catherine Jondreville et Jean-Yves Dourmad, de l'UMR INRA-Agrocampus Rennes Systèmes d'Élevage, Nutrition Animale et Humaine de St Gilles, pour les informations fournies et leurs conseils en matière d'alimentation phosphorée du porc.

ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. D. Sauvant, J.-M. Perez, G. Tran (Eds), INRA Editions, Paris, France, 37-42.

Meschy F., et Ramirez-Perez A.-H., 2005. Evolutions récentes des recommandations d'apport en phosphore pour les ruminants. *INRA Prod. Anim.*, 18 (3), 175-182.

Noblet, J. Sève B., Jondreville C., 2004. Valeurs nutritives pour les porcs. In : Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. D. Sauvant, J.-M. Perez, G. Tran (Eds), INRA Editions, Paris, France, 25-35.

Pointillart A., 1994. Phytates, phytases : leur importance dans l'alimentation des monogastriques. *INRA Prod. Anim.*, 7, 29-39.

Pomar C., Dubeau F., Letourneau-Montminy M.P., Mahé M., Julien P.O., Jondreville C., 2004. Réduction de l'excrétion de phosphore et d'azo-

te chez le porc charcutier par l'ajout d'un objectif environnemental dans l'algorithme traditionnel de formulation. *Journ. Rech. Porcine Fr.*, 36, 251-258.

Sauvant D., Chapoutot P., Peyraud J.-L., Meschy F., Doreau B., 2004. Valeurs nutritives pour les ruminants. In : Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. D. Sauvant, J.-M. Perez, G. Tran (Eds), INRA Editions, Paris, France, 43-50.

Tran G., Skiba F., 2005. Variabilité inter et intra matière première de la teneur en phosphore total et phytique et de l'activité phytasique. *INRA Prod. Anim.*, 18 (3), 159-168.

Tran G., Sauvant D., 2004. Données chimiques et de valeur nutritive. In : Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux,

poissons. D. Sauvant, J.-M. Perez, G. Tran (Eds), INRA Editions, Paris, France, 17-24.

Weremko D., Fandrejowski H., Zebrowska T., Han K., Kim J. H., Cho W. T., 1997. Bioavailability of phosphorus in feeds of plant origin for pigs. A review. *Asian-Austr. J. Anim. Sci.*, 10, 551-566.

Zimmermann B., Lantzsich H.J., Mosenthin R., Biesalski H.K., Drochner W., 2002. Comparative evaluation of the efficacy of cereal and microbial phytases in growing pigs fed diets with marginal phosphorus supply. *J. Sci. Food Agric.*, 82, 1298-1304.

Zimmermann B., Lantzsich H. J., Mosenthin R., Biesalski H. K., Drochner W., 2003. Additivity of the effect of cereal and microbial phytases on apparent phosphorus absorption in growing pigs fed diets with marginal P supply. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 104, 143-152.

Résumé

Les nouvelles Tables INRA-AFZ 2004 fournissent, dans le domaine du phosphore (P), un ensemble de caractéristiques originales des matières premières qui ont conduit à la mise en place de nouveaux systèmes «phosphore» pour les différentes espèces animales. L'utilisation de ces divers éléments a été testée dans le cadre d'une étude de formulation unitaire d'aliments pour porc par programmation linéaire. Ces nouvelles normes ont été comparées à l'ancien système INRA 1989. Par ailleurs, différents modèles ont été proposés permettant d'intégrer l'action des phytases végétales des matières premières ainsi que celle des phytases microbiennes. L'effet des phytases sur la libération du P digestible a été étudié en se basant non seulement sur une liaison linéaire mais aussi à travers une relation non-linéaire tout en prenant en compte également une interaction entre les phytases végétales et microbiennes. De plus, ces modèles ont permis d'associer dans la formulation à moindre coût des régimes pour porc une dimension «rejets de phosphore», dont l'incidence économique a varié selon les contextes technico-économiques étudiés. Ce nouveau système, ainsi mis en œuvre, permet de concevoir des régimes qui couvrent de façon plus satisfaisante le besoin en P digestible de l'animal, en diminuant la place de la complémentation phosphorée. Il conduit à réduire l'apport en P total et, par conséquent, la fraction de P rejetée.

Abstract

Consequences of new «phosphorus unit systems» on diets formulation

The tables published by INRA-AFZ in 2004 supply several new feedstuff characteristics concerning phosphorus (P), which have been integrated in new «phosphorus unit systems» for different animals, particularly for ruminants, pigs and poultry. The utilisation of such systems was studied here in the formulation of compound feeds for growing pigs by linear programming. The new system (INRA-AFZ, 2004) was compared to the previous one (INRA, 1989). Several models were proposed in order to take the action of vegetal and microbial phytases into account. First, a linear effect of microbial phytases on the liberation of digestible phosphorus was studied. Then, microbial phytasic activity was tested through a non-linear relation with an interaction between vegetal and microbial phytases. Moreover, the amount of excreted P was considered in the model. Its economic consequences varied between the situations. With this new feeding system, pig diets are formulated closer to the animal's needs in terms of digestible P and with a lower level of mineral supplementation. The quantity of total P in the diets and, therefore, animal P excretion are reduced.

CHAPOUTOT P., PRESSEDA F., 2005. Conséquences des nouveaux «systèmes d'unités phosphore» sur la formulation des régimes. *INRA Prod. Anim.*, 18, 209-228.