ENZYMES ET PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT EXEMPLE : LE CAS DES PHYTASES ET DU PHOSPHORE

M. BOUGON
CNEVA-Laboratoire Central de Recherches Avicole et Porcine - BP 53 - 22440 PLOUFRAGAN

Les quantités de phosphore rejetées annuellement, en France, par les animaux sont estimées à 200 000 t pour les bovins, 37 000 t pour les volailles, 30 000 t pour les porcins et 15 000 t pour les ovins et caprins (Guégen, 1993 ; volailles : Frapin et Nys, 1994).

Après épandage des déjections, une partie du phosphore parvient aux cours d'eau et plans d'eau, ce qui favorise l'eutrophisation ; celle-ci dépend également de la présence d'azote mais le phosphore joue le rôle de facteur limitant.

I LÉGISLATION

En 1986, la législation hollandaise fixe une limite de phosphore, exprimée en P_2O_5, par exploitation, calculée comme suit :

Tableau 1 : QUANTITÉ DE P_2O_5 PAR HECTARE

Année	Prairie	Maïs	Terre arable
1987-1990	250	350	125
1991-1992	200	250	125
1993	200	200	125
1994	200	150	125
1995	150	110	110
1996	135	90	90
1997	120	80	80
1998	105	75	75

Il est fait un bilan par exploitation. Connaissant le nombre d'animaux par espèce, les quantités d'aliments consommées, les teneurs des aliments en phosphore (déclaration faite par le fabricant), il est facile d'estimer les quantités excrétées. Les achats d'engrais phosphorés sont également pris en compte. Si la production de phosphore par les animaux et l'achat d'engrais dépassent les quotas fixés en fonction des cultures, l'éleveur paye une taxe qui croît très vite avec les excédents.

Grâce à cette législation, les éleveurs ont réduit, entre 1986 et 1995, la production de phosphore, par leurs porcs et volailles, de 30 %.

Il n'existe pas de telle réglementation en France, mais cela ne saurait tarder.

En effet, il a été créé un Comité d'orientation pour la réduction de la pollution des eaux par les nitrates,

* Exposé effectué au Symposium international (17-18 mai 1995 ; École Nationale Vétérinaire d'Alfort), organisé par la Commission Internationale des Industries Agricoles et Alimentaires.

phosphates et produits phytosanitaires, provenant des activités agricoles, dénommé C.O.R.P.E.N.

En outre, dans l'arrêté du 13 juin 1994, fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les élevages de volailles et (ou) de gibiers à plumes soumis à autorisation, au titre de la protection et de l'environnement, l'article 19 stipule "au cas par cas, en fonction des risques d'érosion des terrains ou de ruissellement vers les eaux superficielles, le Préfet peut fixer des limitations des apports phosphatés, s'il apparaît nécessaire de renforcer la protection des eaux superficielles".

Il devient donc urgent de chercher, par tous les moyens, à réduire la pollution provenant des élevages, en particulier, à diminuer les rejets phosphorés.

Nous limiterons notre étude aux cas des volailles et des porcs.

II QUANTITÉS DE PHOSPHORE REJETÉES

Les quantités de phoshore excrétées par les volailles sont étroitement liées aux teneurs des aliments en cet élément, comme le montrent les résultats obtenus dans notre station à partir d'aliments formulés en phosphore **disponible,** regroupés dans le tableau 2 et les figures 1 et 2.

Tableau 2 : RELATION ENTRE LE P EXCRÉTÉ ET LA TENEUR DE L'ALIMENT EN CET ÉLÉMENT

Espèce	Coefficient de corrélation	Équations	P déj. : pour 2 taux de P alt.	
			0,60	0,50
Poulet	r = 0,94	P déj. * = 2,607 P alt. ** – 0,080	1,48	1,22
Pondeuse	r = 0,98	P déj. * = 3,509 P alt. – 0,374	1,73	1,38

* P déj. : teneurs des déjections en phosphore, en % de la matière sèche.
** P alt. : teneurs des aliments en phosphore , en % de la matière brute.

Lorsque le taux de phosphore de l'aliment passe, par exemple, de 0,60 % à 0,50 % (– 17 %), le taux de phosphore dans les déjections sèches se trouve réduit sensiblement dans les mêmes proportions : poulet – 18 % et pondeuse – 20 %.

Pour les porcs, les études de Latimier et de Pointillart (1993, 1994) montrent également qu'une réduction de la teneur de l'aliment en phosphore provoque une diminution des rejets phosphorés, dans des proportions sensiblement identiques.

Il suffirait donc, à priori, de réduire les apports dans les aliments pour diminuer les rejets mais, il existe, naturellement, une limite qui dépend des besoins des animaux (risques de faible minéralisation des os, de réduction des performances, d'augmentation de la mortalité ...) et de la disponibilité du phosphore présent dans les aliments.

Figure 1 : P DÉJECTIONS EN FONCTION DE P ALIMENTS (POULETS)

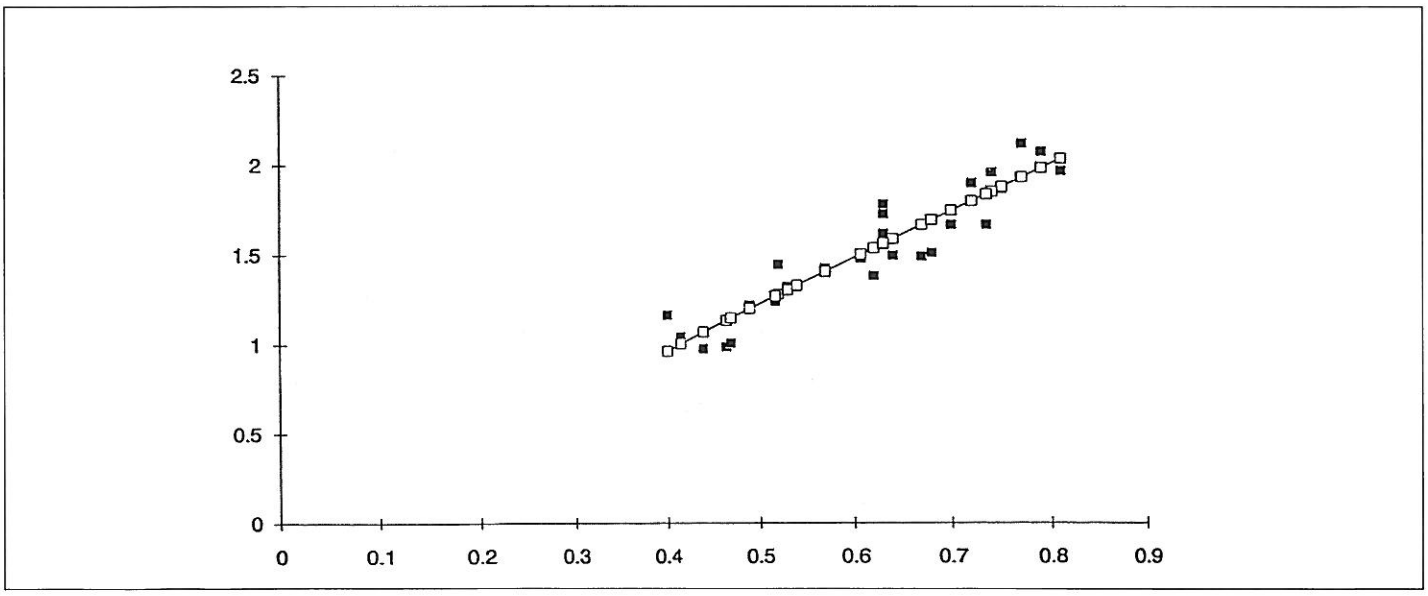
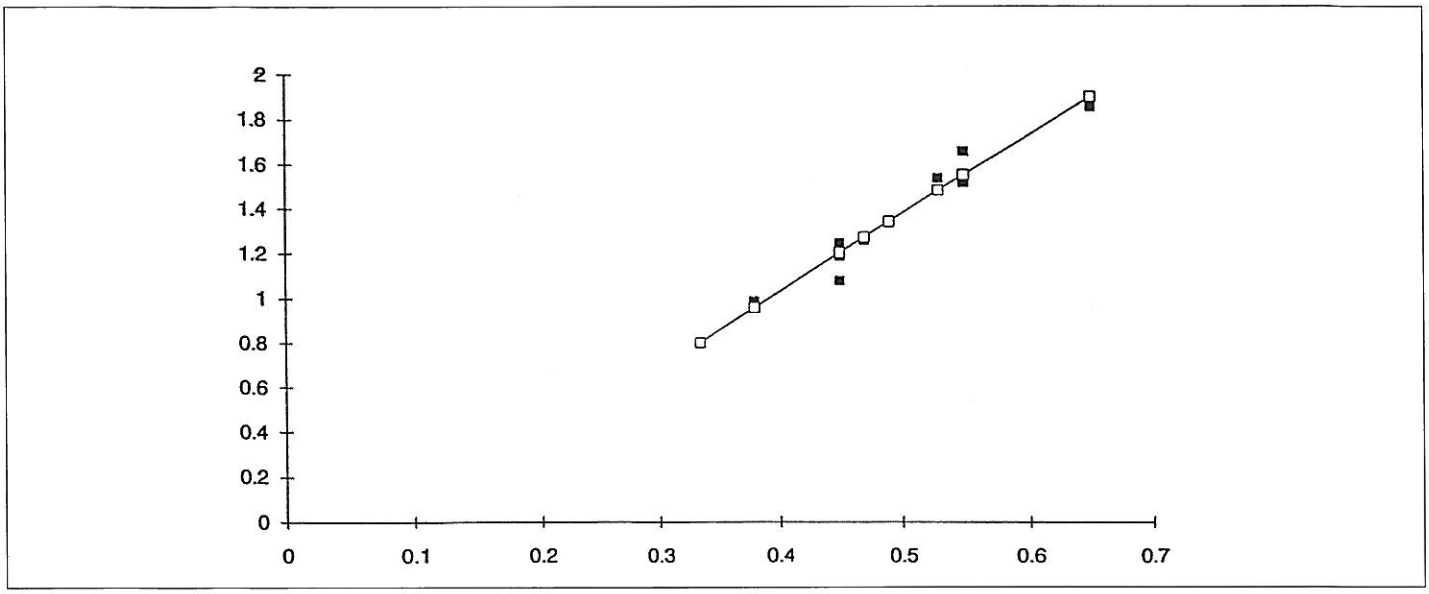


Figure 2 : P DÉJECTIONS EN FONCTION DE P ALIMENTS (PONDEUSES)



III ACIDE PHYTIQUE ; PHYTASES

Les aliments distribués aux animaux renferment du phosphore provenant de trois origines : végétale, animale et minérale. Généralement, seule la forme végétale pose un problème de disponibilité. Une grande partie de ce phosphore se trouve en effet sous une forme chimique complexe : l'acide phytique (ou phytates) qui est un ester de l'inositol (les 6 fonctions alcools étant combinées à 6 groupements phosphates). Ce phosphore ne peut être libéré que par des enzymes spécifiques appelés phytases. La digestibilité dépendra donc de la proportion de phosphore ainsi liée et de la présence éventuelle de phytases dans les matières premières. La biodisponibilité du phosphore, déterminée en mesurant la minéralisation des os de poulets (Sauveur, 1989) sera également liée à ces facteurs.

Les teneurs en acide phytique des principales matières premières, employées en alimentation animale sont précisées dans le tableau 3 (Frapin et Nys, 1993) : les activités phytasiques sont données dans le tableau 4, publié par Pointillart (1994).

Tableau 3 : TENEUR EN PHOSPHORE PHYTIQUE DES MATIÈRES PREMIÈRES UTILISÉES EN ALIMENTATION ANIMALE : MOYENNE (MINIMA - MAXIMA) EXPRIMÉE EN g/kg DE MATIÈRE SÈCHE OU EN % DU PHOSPHORE TOTAL

	Maga, 1992	Sauveur, 1989		Bos, 1990	Maupetit et Gatel, 1992		Pointillart, 1993		Eeckhout et Paepe, 1993	
	g/kg	%	g/kg	g/kg	%	g/kg	%	g/kg	%	g/kg
Céréales										
Maïs		67	1,8	2,42-2,56			66-85	1,7-2,2		
Blé	1,70-3,80	60-77	1,98-2,54	3,04-3,24	52	3,32-(2,5-4,0)	60-77	1,7-2,5		
Avoine	2,30-2,84	55					55-63	1,9-2,3	48-78	1,6-2,8
Sorgho		60-74					60-74	1,8-2,2		
Orge	2,70-3,0	56-72		2,63-3,07	51	1,9-(1,5-3,4)	51-66	1,9-2,5		
Seigle		65					61-73	2,2-2,5		
Triticale							65-68	2,5-2,6		
Sous-produits										
Son blé		85-90	9,35-9,9				70-90	8,1-9,7		
Son seigle							71	7,6		
Remoulage							66-85	4,7-5,8		
Corn				5,2-(2,9-8,3)					44-62	3,5-6,0
Gluten										
Oléagineux										
Graine	2,82-4,14									
Soja										
T.soja							51-61	3,2-3,8		
T.							73-80	6,2-9,0	35-47	3,2-5,1
Tournesol										
T. colza	8,46-14,10						60-63	6,0-7,3		
Protéagineux										
Lupin				1,34-1,69					20	0,5
Féverole									46	2,3
Pois				2,16-3,13	27(19-41)	1,0-(0,8-1,6)	40-50	1,2-1,7		

Tableau 4 : ACTIVITÉ PHYTASIQUE DES MATIÈRES PREMIÈRES (U/kg)

Blé	Remoul de blé	Sons de blé	Seigle	Sons de seigle	Triticale	Orge	Pois	Maïs	Avoine	Riz	T de Colza	T de Soja	T de Tournesol	T d'Arachide
600	1900	1 100	4 900	6 300	1 500	400	80	30	30	125	100	60	60	0
± 60	± 140	± 120	± 620	± 1 100	± 170	± 200	± 20	± 15	± 15	± 60	± 50	± 30	± 20	
11*	12	24	3	8	8	4	20	7	6	7	6	8	11	3

* Nombre d'échantillons analysés.

L'intérêt de l'adjonction de phytases à l'aliment a été démontré, chez le poulet, par Nelson et al. (1968, 1971), en utilisant une préparation phytasique extraite d'*Aspergillus ficuum*. Pointillart (1994) signale que les phytases végétales accroissent l'absorption du phosphore phytique ; ceci ayant été "démontré avec le son de blé (Newton et al. , 1983), le blé (Pointillart et al., 1984), le triticale (Pointillart et al., 1987), le son de seigle (Pointillart, 1991), le remoulage de blé (Eeckhout et De Paepe, 1992), chez le porc, avec le triticale (Sauveur, 1984), chez la poule pondeuse et avec le blé et l'orge (Sauveur, 1983), chez le poulet".

Les phytases microbiennes sont plus efficaces que les phytases végétales (Eeckhout et De Paepe, 1992) ; ces dernières ne sont pas, toutefois, dénuées d'intérêt, puisque l'activité des deux types de phytases peut s'ajouter (Huyghebaert et al., 1992). Frapin et Nys (1995) ont également démontré, sur poulet de chair, l'additivité des phytases végétales et microbiennes au sein d'un régime (ces enzymes agissant sur l'ensemble des phytates de l'aliment) et une moindre efficacité des phytases végétales par rapport à la microbienne.

Comme toutes les enzymes, les phytases sont thermosensibles. Sauveur (1993), à partir d'essais de différents auteurs pensent qu'il est prudent de limiter la température finale des granulés à 70-72 °C. Cette valeur paraît même trop élevée. Lamitier et al. (1994), en effet constatent une perte d'activité de 27 %, pour une température moyenne des granulés, en sortie de presse, de 70 °C.

Il n'est pas toujours possible d'utiliser des matières premières riches en phytases ; en outre l'activité enzymatique varie beaucoup (cf. tableau 4), d'où l'intérêt de pouvoir disposer de phytases microbiennes, à activité garantie. L'une d'elle produite par GIST-BROCADES et commercialisée par BASF, sous le nom de *Natuphos*, est utilisée depuis 1992, aux Pays-Bas. Son emploi, à l'échelon européen, est autorisé dans l'alimentation animale, depuis février 1994 (réf. 94-17-CE). Elle renferme 5 000 U/g ; une unité étant définie comme étant la quantité d'enzyme permettant de libérer une micromole de phosphore, par minute, à 37 °C et à un pH de 5,5, à partir d'une solution de phytate de sodium.

IV EFFICACITÉ DES PHYTASES MICROBIENNES *(Natuphos)*

1. *Poulets de chair* (Bougon, 1993)

Nous avons effectué plusieurs essais, dont deux en période de croissance (7 à 21 jours) et un en période de finition (21 à 39 jours).

Afin de limiter les apports de phytases par les matières premières, seul le maïs est utilisé comme céréale ; en outre, les régimes ne renferment pas de farine de viande.

Les teneurs des aliments en phosphore disponible, entre 7 et 21 jours, varient de 0,12 % à 0,22 %, 0,32 % et 0,42 %, avec un taux identique de calcium (1 %). Douze aliments (essai 1) et seize aliments (essai 2) sont comparés, les quantités de phytases ajoutées étant respectivement 0,600, 1 000 U/kg et 0,400, 600 et 800 U/kg.

Tableau 5 : GAIN DE POIDS DES POULETS (g)

Essai	P. disponible / Phytase	0,12	0,22	0,32	0,42
Essai 1	0	409 d*	559 c	608 ab	621 a
	600	578 bc	603 ab	619 a	613 a
	1 000	552 c	605 ab	607 ab	618 a
Essai 2	0	481 e	556 d	601 c	649 a
	400	565 d	606 c	651 a	638 ab
	600	569 d	608 c	644 ab	625 bc
	800	597 c	622 bc	656 a	642 ab

* Chaque essai est analysé séparément.

Tableau 6 : TENEUR EN MATIÈRES MINÉRALES DES TIBIAS (%)

Essai	P. disponible / Phytase	0,12	0,22	0,32	0,42
Essai 1	0	37,16 c	44,21 b	47,60 a	48,34 a
	600	44,76 b	47,78 a	48,02 a	48,40 a
	1 000	45,17 b	48,05 a	48,61 a	49,07 a
Essai 2	0	34,66 f	40,76 de	44,96 c	48,44 a
	400	39,43 e	44,70 c	48,91 a	48,94 a
	600	42,15 d	45,93 bc	48,17 a	47,82 ab
	800	42,19 d	45,60 c	48,59 a	48,12 ab

Tableau 7 : TENEUR DES DÉJECTIONS EN PHOSPHORE

Aliment	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P. Total* %	0,45 (0,415)			0,55 (0,517)			0,645 (0,607)			0,745 (0,735)		
Phytase	0	600	1 000	0	600	1 000	0	600	1 000	0	600	1 000
P/M sèche %	1,04	0,84	0,72	1,235	1,10	1,01	1,48	1,40	1,31	1,83	1,79	1,75

* Teneurs théoriques ; entre parenthèses : valeurs analytiques.

Pour le 3e essai, les poulets reçoivent, pendant les trois premières semaines d'élevage, un aliment renfermant 0,5 % de phosphore disponible et 1,1 % de calcium. Les teneurs des aliments, en phosphore disponible, distribués de 21 à 39 jours, varient de 0,06 % (0,34 % PT) à 0,16 % (0,47 % PT), 0,26 % (0,55 % PT) et 0,36 % (0,66 % PT), avec un taux identique de calcium (0,9 %). Il est ajouté 0,600 ou 1 000 U/kg de phytases.

Tableau 8 : GAIN DE POIDS DE POULETS (g)

P. disponible / Phytase	0,06	0,16	0,26	0,36
0	1 070 c	1 252 ab	1 373 a	1 326 ab
600	1 285 b	1 373 a	1 317 ab	1 343 ab
1 000	1 339 ab	1 349 ab	1 352 ab	1 357 ab

Tableau 9 : TENEUR EN MATIÈRES MINÉRALES DES TIBIAS (%)

P. disponible / Phytase	0,06	0,16	0,26	0,36
0	34,8 c	43,1 a	43,2 a	43,1 a
600	40,0 b	43,4 a	43,5 a	43,3 a
1 000	41,1 b	43,8 a	43,3 a	44,7 a

Les résultats de ces essais permettent de conclure que l'on peut réduire le phosphore disponible de l'aliment de 0,10-0,12 point, en ajoutant 500-600 U de phytases par kg d'aliment. Naturellement, si la température à la sortie de presse atteignait 70 °C, il faudrait augmenter les quantités de phytases de 25 % environ.

Il semble préférable de réserver l'incorporation de phytases aux aliments distribués entre 3 et 6 semaines d'âge. Il est alors possible, tout en évitant l'apparition de troubles locomoteurs, de réduire nettement la pollution liée au phosphore, les consommations alimentaires, donc les quantités de déjections produites représentant, en effet, près de 80 % de celles obtenues pendant les 6 semaines d'élevage.

2. *Pondeuses* (Bougon, Launay, 1995)

Trois lots sont comparés : le lot témoin (T) qui reçoit successivement des aliments renfermant en phosphore

disponible 0,28 % (20-40 semaines), 0,23 % (40-52 semaines) et 0,18 % (52-60 semaines) ; deux aliments expérimentaux contenant 0,12 % de moins de phosphore disponible (0,16-0,11-0,07 %) enrichis (lot PP-300 U/kg) ou non (lot P), en phytases. Comme pour les essais sur poulets, le maïs constitue la seule céréale utilisée ; le taux de viande diminue graduellement (2,5-1,1 et 0 %).

À partir de 60 semaines, le lot P reçoit l'aliment avec phytases et le lot PP, l'aliment non enrichi en enzymes.

La figure 3 montre les chutes de ponte suite à la consommation de l'aliment pauvre en phosphore, sans phytases.

La mortalité enregistrée de 20 à 52 semaines, varie peu d'un lot à l'autre. En revanche, le taux de mortalité est quadruplé, entre 52 et 60 semaines, avec l'aliment pauvre en phosphore (6,3 % contre 1,5 %), alors qu'il n'est pas augmenté avec l'aliment enrichi en phytases (1,1 % pour le lot PP contre 1,5 % pour le lot T).

Figure 3

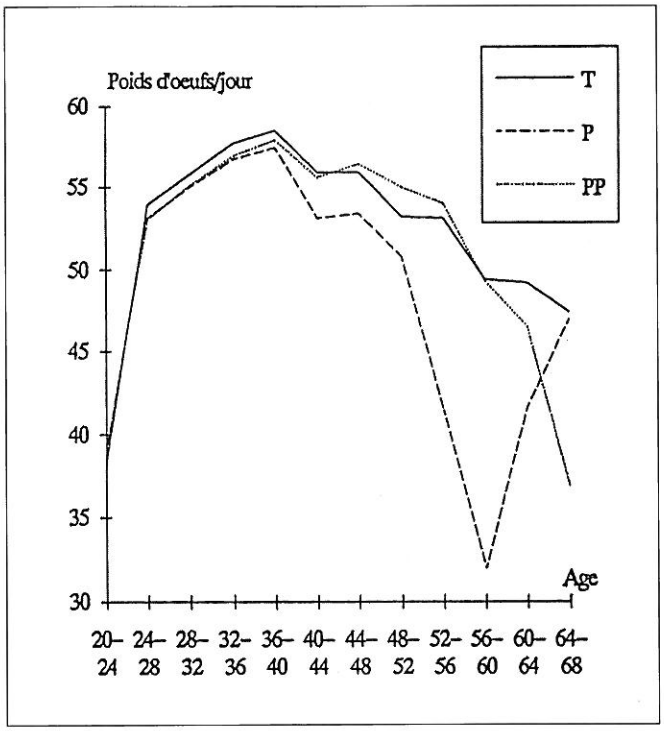


Figure 4

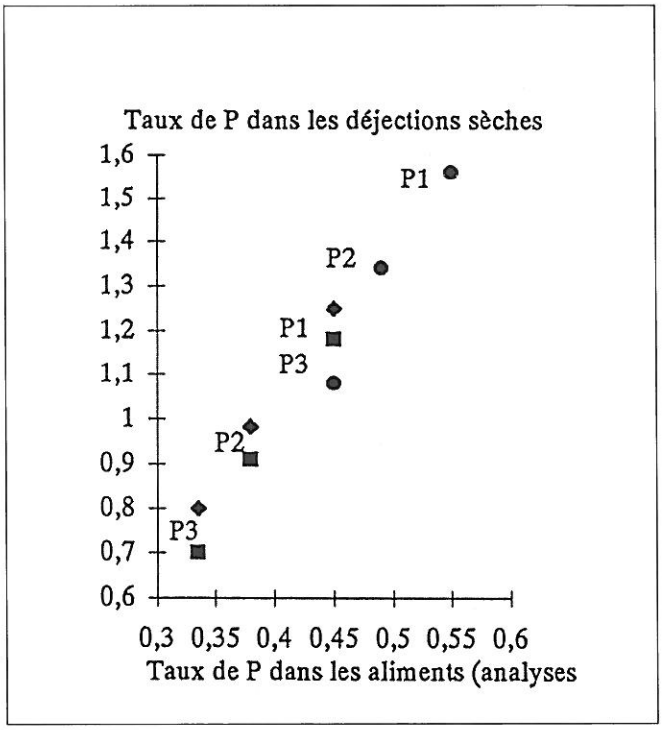


Tableau 10 : TENEUR DES ALIMENTS ET DES DÉJECTIONS EN PHOSPHORE (%)

Période / Lot	20-40 sem.		40-52 sem.		52-60 sem.	
	Aliment (1)	Déjection (2)	Aliment	Déjection	Aliment	Déjection
T	0,55	1,56	0,49	1,34	0,450	1,08
P	0,45	1,25	0,38	0,99	0,335	0,80
PP	0,45	1,18	0,38	0,91	0,335	0,70

(1) Sur produit brut. (2) Sur produit sec.

La teneur en phosphore des déjections sèches varie linéairement avec le taux de phosphore total de l'aliment (cf. figure 4) : une réduction de 0,11 % du second facteur provoque une diminution de l'autre paramètre, en moyenne, de 0,31 % (sans phytases) ou de 0,40 % (avec phytases).

L'aliment pauvre en phosphore ne permet pas de couvrir les besoins en phosphore des pondeuses. Les résultats obtenus (performances, ossification) en ajoutant des phytases (300 U/kg) à cet aliment, sont les mêmes que ceux observés avec l'aliment témoin. L'efficacité de 300 U d'activité phytasique par kg d'aliment est comparable à celle de 0,12 % de phosphore provenant du phosphate bicalcique.

L'emploi de phytases, dans les conditions de cet essai, permet de réduire les rejets de phosphore de 25 à 35 %. Il est à noter que les quantités de phosphore disponible, employées dans cet essai, sont faibles (la teneur maximale étant de 0,28 %, valeur indiquée comme minimale par l'I.N.R.A.) ; avec cet aliment, le taux de phosphore dans les déjections sèches atteint 1,56 % contre 0,70 % (réduction de 55 %) avec l'aliment enrichi en phytases, renfermant le taux le plus faible (0,07 %).

3. *Porcs* (Latimier et al., 1994)

Trois aliments sont distribués aux porcs, pendant toute leur période d'engraissement (poids des animaux au

début et à la fin de l'essai 27 et 102 kg, en moyenne) : l'aliment témoin, renfermant 0,54 % de phosphore total et deux aliments expérimentaux, à teneur plus faible en cet élément, soit 0,37 % apporté que par les matières premières végétales (maïs, blé 25 %, pois, soja), enrichis ou non en phytases. La quantité de phytases ajoutée est théoriquement de 1 000 U/kg mais les analyses ne permettent d'en retrouver que 730 (destruction due à la granulation de l'aliment).

Tableau 11 : RÉSULTATS ZOOTECHNIQUES

Teneurs des aliments en phosphore		**0,54 %**	**0,37 %**	
			Sans phytases	**Avec phytases**
Gain moyen quotidien		805 a	764 b	795 a
Indice de consommation		2,65	2,73	2,66
Résistance à la rupture	Métacarpien III	18,3 a	15,4 b	18,6 a
	Métacarpien IV	13,7 a	11,9 b	14,35 a
Quantité de P. rejeté par porc (kg)		0,50	0,36	0,26

L'addition de phytases, à l'aliment pauvre en phosphore, améliore significativement les performances des porcs et leur résistance osseuse ; elle permet d'obtenir des performances et une minéralisation osseuse équivalentes à celles observées avec l'aliment témoin qui renferme 46 % de plus de phosphore, tout en réduisant de moitié l'excrétion de phosphore.

CONCLUSION

L'emploi de matières premières riches en phosphore **disponible** permet d'abaisser les teneurs des aliments en phosphore **total** et, par contrecoup, les teneurs des déjections en phosphore, compte tenu de la relation linéaire existant entre ces deux paramètres.

Une réduction des apports alimentaires peut également être effectuée mais, au-dessous d'un certain taux, les performances zootechniques seront réduites. Il faut alors incorporer aux aliments des phytases microbiennes ; 600 U/kg (chair), ou 300 U/kg (ponte), étant équivalentes à 0,12 % de phosphore minéral provenant du phosphate bicalcique (0,66 %) ; les phytases étant sensibles à la chaleur, il est préférable, si la température de granulation devient trop élevée (supérieure à 70 °C), de pulvériser, sur les granulés, la solution phytasique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AUBERT C., 1993. Alimentation des pondeuses : influence de la teneur en phosphore indisponible sur les rejets phosphorés. Sciences et Tech. Avicoles, 5, 7-11.

AUBERT C., BOUVAREL I., 1995. Influence de l'addition de phytases dans l'aliment sur les rejets phosphorés issus d'un élevage de poules pondeuses. 1re Journées Recherche Avicole, Angers, 68-70.

BARRIER-GUILLOT B., BOUVAREL I., METAYER J.-P., NYS Y., 1995. Disponibilité du phosphore de cinq matières présentées en farine ou en granulé chez le poulet de chair en croissance. 1res Journées Recherche Avicoles, Angers, 62-64.

BOUGON M., 1993. Intérêt des phytases chez le poulet de chair. Sciences et Tech. Avicoles, 3, 19-23.

BOUGON M., 1993. Intérêt des phytases chez le poulet de chair (suite). Sciences et Tech. Avicoles, 5, 13-19.

BOUGON M., LAUNAY M., 1995. Intérêt des phytases chez les pondeuses. 1res Journées recherche Avicole, Angers, 71-74.

BOUVAREL I., BARRIER-GUILLOT B., BOUGON M., NYS Y., 1995. Diminution des rejets en phosphore chez le poulet de chair en croissance. 1res Journées Recherche Avicoles, Angers, 65-67.

BUDOR J., PROTAIS J., L'HOSPITALIER R., LAUNAY M., BOUGON M., 1995. Effet de l'ajout de phytase dans l'alimentation de poules pondeuses sur l'excrétion et l'assimilation du phosphore, les performances et la qualité des œufs. Archiv. Geflügelk, 59, 168-174.

EECKOUT W., DE PAEPE M., 1992. Phytase microbienne : phytase de blé, phytase microbienne et digestibilité apparente du phosphore d'un aliment simple pour porcelets. Landbouwijdschrift, Rev. Agricult., 45, 195-207.

EECKOUT W., DE PAEPE M., 1992. Phytase microbienne : comparaison de l'effet de 500 unités de phytase de blé et d'une phytase microbienne sur la digestibilité apparente du phosphore d'un aliment pour porcs à l'engrais. Landbouwijdschrift, Rev. Agricult., 45, 209-215.

FRAPIN D., NYS Y., 1993. Disponibilité du phosphore végétal en alimentation avicole.Intérêt des phytases végétales et microbiennes. Carrefour Alimentation, 46-71.

FRAPIN D., NYS Y., 1994. Rôle des phytases dans l'alimentation des volailles : comparaison de l'efficacité des phytases végétale et microbienne. Journée Valicentre, Chambray-les-Tours, 79-91.

FRAPIN D., NYS Y., 1995. Équivalence et additivité des phytases végétale et microbienne. 1res Journées Recherche Avicoles, Angers, 59-61.

GUEGEN L., 1993. Bien nourrir les animaux en minéraux, pour préserver la santé de l'homme et son environnement. Symposium VITOLMIN AFCA, Angers, 9-16.

HUYGEBAERT G., DE GROOTE G., 1992. Meilleure utilisation des aliments. Influence d'une phytase microbienne sur l'utilisation du phosphore par les poulets de chair. Influence sur la disponibilité du P et du Ca. Landbouwijdschrift - Revue de l'Agriculture, 45, 217-218.

LATIMIER P., POINTILLART A., 1993. Influence de l'apport de phosphore (0,4-0,5-0,6 %) sur les performances, les rejets de phosphore et la minéralisation osseuse chez le porc charcutier. Journées Recherche Porcine, 25, 277-286.

LATIMIER P., POINTILLART A.,CORLOUËR A., LACROIX C.,1994. Influence de l'incorporation de phytase microbienne dans les aliments, sur les performances, la résistance osseuse et les rejets phosphorés chez le porc charcutier. Journées Recherche Porcine, 26, 107-116.

MAUTPETIT P., GATEL F., 1992. Phosphore phytique dans les matières premières : variabilité de la teneur en phosphore phytique du blé, de l'orge et du pois. Journée Valicentre, Orléans, 15-23.

NELSON T.-S., SHIEH T.-R., WODZINSKI R.-J., WARE J.-H., 1968. The availability of phytate phosphorus in soybean meal before and after treatment with a mold phytase. Poult. Sci., 47, 1 842.

NELSON T.-S., SHIEH T.-R., WODZINSKI R.-J., 1971. Effect of supplemental phytase on the utilization of phytate phosphorus by chicks. J. Nutr., 101, 1 289-1 293.

NEWTON G.-L., HALE O.-M., PLANK C.-O., 1983. Effect of wheat bran in practical diets on mineral absorption by pigs at two ages. Can. j. Anim. Sci., 63, 399-408.

POINTILLART A., 1991. Enhancement of phosphorus utilization in growing pigs fed phytate-rich diets by using rye bran. J. Anim. Sci., 69, 1 109-1 115.

POINTILLART A., GUEGEN L., 1992. Influence des fibres alimentaires sur la biodisponibilité des minéraux. Cahiers ENSBANA, 18,157-182.

POINTILLART A., FONTAINE N., THOMASSET M., 1984. Phytate phophorus utilization and intestinal phophatases in pigs fed low phosphorus : wheat or corn diets. Nutr. Rep. Int., 29, 473-483.

POINTILLART A., FONTAINE N., THOMASSET M., JAY M.-E., 1985. Phosphorus utilization, intestinal phosphatases and hormonal control of calcium metabolism in pigs fed phytic phosphorus : soyabean or rapeseed diets. Nutr. Rep. Int., 32, 155-167.

POINTILLART A., FOURDIN A., FONTAINE N., 1987. Importance of cereal phytase activity for phytate phosphorus utilization by growing pigs fed diets containing triticale or corn. J. Nutr., 117, 907-913.

POINTILLART A., COLIN P., LACROIX C., RADISSON J., 1993. Réduction chez le porc en croissance de la supplémentation en phosphore minéral par l'utilisation de céréales à activité phytasique élevée. Journées Recherche Porcine, 25, 233-238.

POINTILLART A., 1994. Phytates, Phytases : leur importance dans l'alimentation des monogastriques. I.N.R.A. Prod. Anim., 7 (1), 29-39.

SAUVEUR B., 1983. Bio-availability to poultry of plant-origin phosphorus. Methodological criticisms and results. Proc. 4th. Europ. Poultry Nutrition, Tours, 103-113.

SAUVEUR B., 1984. High availability of triticale phosphorus for laying hens. Nutri. Rep. Int., 29, 911-919.

SAUVEUR B., 1989. Phosphore phytique et phytases dans l'alimentation des volailles. I.N.R.A. Prod. Anim., 2, 343-351.

SAUVEUR B., 1993. Les phytases fongiques dans l'alimentation des volailles. I.N.R.A. Prod. Anim., 6, 265-267.