



UCL/LSM-LLN



**Intégration de prix des matières premières dans l'optimisation de la
formulation des aliments complets pour volaille**

Par

Paul MALUMBA KAMBA

Travail présenté dans le cadre du Master en Science de gestion (à horaire décalé)

GEHD20M1

Sous la direction du prof. Philippe CHEVALIER

2011

Introduction

La gestion de stock et les prix de matières premières sont au centre des préoccupations des gestionnaires du *supply chain*. Ces deux paramètres peuvent affecter les processus de fabrication lorsque les entreprises disposent des possibilités d'adaptation de leur production. L'industrie de formulation des aliments pour volailles est l'une des industries qui dispose d'une telle flexibilité. Les préférences des animaux n'étant pas sujettes à d'importantes contraintes sensorielles, les formules employées peuvent varier en fonction de prix des matières premières et des stocks disponible dans les entreprises.

En aviculture, les aliments employés sont majoritairement des produits agricoles et des sous produits de l'industrie agroalimentaire, dont les prix d'achat sont actuellement soumis à des fluctuations dues à l'emballement des marchés des produits agricoles. Pour se couvrir des risques générés par la volatilité de ces prix, les entreprises de formulation des aliments doivent disposer de moyens d'information et d'action qui leur permettent de prendre des options limitant les effets néfastes et capitalisant au mieux ces changements.

Tirant parti du développement des connaissances en nutrition animale, de la rationalisation des pratiques d'élevage et de l'accès à des d'importants moyens de calcul, des logiciels d'optimisation des aliments ont été développés et commercialisés aux firmes d'élevage. Ces logiciels peu vulgarisés ne sont détenus que par un nombre restreint des gestionnaires des unités de formulation des aliments. Une meilleure exploitation des mises à jour des connaissances scientifiques, concernant les besoins des animaux et la composition des nouvelles matières premières exige que les gestionnaires des unités de formulation d'aliment connaissent les fondements des moyens de calcul qu'il utilise, de façon à les adapter aux changements et à en tirer une meilleure interprétation des résultats.

Dans le présent travail, les approches employées dans la formulation des aliments complets pour volaille sont présentées (Chapitre 1). Au départ des contraintes nutritionnelles d'une catégorie de volailles, des caractéristiques des matières premières disponibles et des informations sur leur prix, une étude de cas de formulation d'un aliment pour volailles employant le solveur Excel est présentée (Chapitre 2). Les optima obtenus en intégrant les variations des prix des matières premières sont analysés et les conséquences d'une telle démarche dans la gestion opérationnelle des industries de formulation des aliments sont discutées (Chapitre 3).

Chapitre 1 : Les approches de formulation des aliments pour volailles

1.1. Problématique de la formulation des aliments pour volailles

Le but de la formulation des aliments est de fournir aux animaux un produit consommable dont les caractéristiques permettent, dans les conditions d'élevage données, d'obtenir une production de viande ou d'œufs assurant le bénéfice le plus élevé (Larbier et Leclercq, 1992). Pour y arriver, il est important de connaître les besoins du consommateur et de lui apporter ce dont il a réellement besoin, en quantité nécessaire sous une forme adéquate et en temps voulu.

La formulation des aliments consiste à confectionner, à moindre coût, des mélanges appétants d'aliments, ayant des caractéristiques facilitant leur fabrication, leur manutention et leur conservation et répondant aux besoins des animaux (entretien, croissance, production, reproduction) à partir de matières premières disponibles. Elle implique le calcul des proportions de matières premières à intégrer dans les processus de fabrication afin de satisfaire les exigences du consommateur et les objectifs de production.

1.2. Différentes approches de formulation conceptuelle des aliments

1.2.1. Les méthodes empiriques de formulation

Ces méthodes sont basées sur l'expérience des formulateurs à proposer un mélange des ingrédients satisfaisant les besoins de la production, et à réajuster ces proportions en fonction des performances observées et de l'évolution du marché des matières premières. Les choix incrémentales qu'elles proposent simplifient la complexité des exigences de formulation en se focalisant sur un nombre restreint de critères à optimiser.

Les entreprises qui basent leurs démarches de formulation sur l'expérience et la modification intuitives des formules ont tendance à percevoir la volatilité des prix des matières premières, comme une menace sur la rentabilité de leurs productions et ne saisissent pas souvent les opportunités qu'elle peut offrir en termes d'avantage concurrentiel. La prise en compte tardive et implicite des critères d'efficacité financières dans ces méthodes conduit au rejet d'un nombre important de résultats de calcul et rend aléatoire l'adoption d'une formule optimale.

1.2.2. Méthodes algébriques simples

Pour exploiter au maximum les données scientifiques et satisfaire aux critères de décision impliqués dans le choix des matières premières à incorporer dans une ration, les formulateurs des aliments ont en premier lieu appliqué les méthodes algébriques, fondée sur la résolution des d'équations linéaires à fonctions objectives implicites.

La prise en compte à posteriori de la fonction objective (minimisation de coût) ne permet pas d'affirmer avec certitude si la solution algébrique proposée est celle qui garantit le meilleur rapport qualité/prix. En outre, ces approches ne prennent généralement pas en charge les objectifs divers poursuivis dans la formulation des aliments tels que la protection de l'environnement, la limitation de perte des nutriments pouvant générer d'importantes excréctions de composants nocifs et d'autres paramètres techniques.

1.2.3. La formulation à moindre coût et les techniques employés

Pour exploiter au maximum les données scientifiques et satisfaire aux nombreux critères de décision impliqués dans le choix des matières premières à incorporer dans une ration, la formulation conceptuelle recourt aujourd'hui aux techniques de formulation à moindre coût, tirant parti de la résolution des problèmes formalisés sous forme de programmation linéaire.

L'utilisation de la programmation linéaire dans la formulation des aliments pour bétails introduite par Brigham (1959) et Jewel (1959), a conduit au, avec le développement de l'informatique, à la conception des logiciels (Ultramix livestock rationing ; Farm works software, etc cité par Munford, 1995) de formulation des aliments pour bétails. L'acquisition de licence d'utilisation de ces logiciels n'est pas à la portée de nombreuses petites et moyennes entreprises, ce qui ne facilite pas la vulgarisation de ces outils.

Quand bien même l'utilisation des logiciels est facilitée par des interfaces interactives, leur présentation de type « boîte noire » et la complexité de leur fonctionnement sont un frein à leur adaptation aux nouveaux paradigmes des industries agroalimentaires. La pertinence des résultats que ces outils fournissent dépend des informations qu'ils contiennent, et qui ne peuvent être modifiées que si les praticiens disposent, outre des notions de nutrition, des connaissances de base dans la formalisation des problèmes par programmation linéaire.

1.3. Formalisation d'un problème de formulation par programmation linéaire

Soit à formuler un aliment complet de croissance au départ des ingrédients (M_i) disponibles dans le marché et dont la composition (Y_{ij}) en nutriments (Y_j) et les prix (p_i) unitaires sont connus. Le mélange des ingrédients retenu devant satisfaire à des recommandations définies. Le programme défini s'écrit comme suit :

$$\text{Minimiser } (C_m = \sum_i P_i X_i)$$

sous contraintes

Nutritionnelles

$$\sum_{i=1}^n Y_{ij} X_i \leq Y_{j \max} \quad ; \quad \sum_{i=1}^n Y_{ij} X_i \geq Y_{j \min}$$

D'incorporation et d'enchaînement

$$\sum X_i \leq L_{i \max} \quad ; \quad \sum X_i \geq L_{i \min}$$

De masse et de non négativité

$$\sum_i X_i \leq Q$$

C_m : coût minimisé ; Y_{ji} : concentration du nutriment j dans l'ingrédient i ; X_i : proportion retenue de l'ingrédient i dans la ration formulée ; L_i : quantité limite d'incorporation de l'ingrédient i ; Q : masse unitaire acceptable dans le mélange à formuler ; P_i : prix unitaire de l'ingrédient X_i , traduisant son degré de disponibilité dans le marché.

La présentation détaillée de l'utilisation de la programmation linéaire dans la formulation des aliments est présentée dans les articles de Brigham (1959) et Jewel (1959). Les problèmes récents posés quant à l'application de cette approche sont détaillés dans les publications de Jean dit Bailleul (2001), de Castrodeza et al. (2005) et de Pathumnakul et al. (2011).

1.4. Principe algorithmique de résolution d'un programme de formulation

Un algorithme particulièrement important en programmation linéaire est celui de Simplexe, développé par Dantzig en 1947 (Rennard et., 2009). Compte tenu qu'une infinité de solutions techniques est envisageable pour associer les matières premières et que c'est la solution de l'optimum économique qui est recherchée, l'algorithme de simplexe procède par itération en tirant partie de la notion mathématique de convexité, qui dépasse le cadre de notre étude. L'algorithme de Simplexe offre les avantages d'arriver à l'optimum après un nombre limité d'itérations et offre l'avantage de systématiser les calculs à l'aide des tables. Il introduit une logique de calcul et se prête à l'automatisation; d'où son large emploi dans l'industrie et en gestion (Rennard et al, 2009).

La mise en œuvre manuelle de la méthode de Simplexe reste néanmoins fastidieuse et conduit à des erreurs dues à des approximations à plusieurs niveaux de calcul. Ainsi, son utilisation dans la pratique de la formulation recourt à des logiciels d'optimisation. Les plus populaires de ces logiciels sont le solveur d'Excel, les langages de programmation AMPL, AIMMS, GAMS, LINGO, etc. (Taha, 2007).

De ces outils, le solveur qui est une macro commande du logiciel Excell demeure l'outil le plus accessible à des nombreux praticiens, notamment grâce à la large diffusion de ce logiciel et du fait qu'il n'exige pas de rudiment en programmation. AMPL et, AIMMS, pouvant, deux outils pouvant conduire à une création des interfaces personnalisées et facilitant le traitement des problèmes vastes, nécessitent l'apprentissage d'une codification particulière.

Chapitre 2 : Etude du cas de l'intégration des prix des matières premières dans une démarche d'optimisation d'un aliment pour poules pondeuses

En vue d'élucider la démarche d'intégration des prix des matières premières dans l'optimisation des formules alimentaires, nous avons considéré le cas de la formulation d'un aliment pour une poule pondeuse de 20 à 45 semaines. Ce chapitre présente les contraintes nutritionnelles considérées, les matières premières et leurs contraintes d'incorporation, ainsi que les bases de données de leurs caractéristiques et prix historiques.

2.1. Les contraintes nutritionnelles employées

En aviculture, les aliments sont souvent formulés en fonction de l'âge de l'animal et tenant compte d'un nombre important des critères de qualité à optimiser. Ces aliments sont considérés comme étant complets lorsque leur formulation permet qu'ils soient administrés seuls, dans le but d'entretenir les animaux ou leurs productions sans exiger un autre aliment que l'eau. Le tableau 1 présente les exigences nutritionnelles de l'aliment complet à formuler.

Tableau 1 : Les contraintes nutritionnelles fixées dans le programme

Contraintes	Minimal	Maximal
EM/Kg	2750,0	
Humidité (%)		14,0
Protéines brute (%)	16,0	18,5
Fibres brutes (cellulose) (%)	3,5	6,0
Matière -grasse totale (%)	5,0	9,0
Amidon (%)	32,0	
Calcium (g/Kg)	30,0	37,5
Sodium (g/Kg)	1,4	5,0
Chlore (g/Kg)	1,4	5,0
Acides linoléiques (g/Kg) C18:2	15,0	
Méthionine (g/Kg).	3,6	
Lysine (g/Kg)	7,0	
Vitamine A (1000 UI/Kg)	10,0	
Vitamine E (mg/Kg)	15,0	
Vitamine K (mg/Kg)	2,0	

Ces contraintes nutritionnelles sont inspirées des recommandations de la DSM, une multinationale active dans les domaines de la santé, de la nutrition et des matériaux.

2.2. Les matières premières employées

Selon leur nature et le mode de leur obtention, les matières premières employées dans l'alimentation de volailles peuvent être classés en sept groupes :

Les céréales : Constituants de base de l'alimentation des volailles et riche en amidon, leur utilisation n'est limitée que par la nécessité de maintenir l'équilibre énergie-protéines. L'on trouve dans cette catégorie le maïs, le blé, l'orge, le riz, le seigle, le triticale et le sorgho.

Les protéagineux : Dans ce groupe on trouve des graines riches en protéines et en matières grasses parmi les quelles les légumineuses tel que le soja, le pois, l'arachide, la luzerne, le tournesol et le colza occupent une place de choix.

Les sous-produits de l'industrie céréalière : Issues de la fabrication des farines des céréales, on trouve dans cette catégorie le son de blé, le blé cassé, le remoulage de blé et les issus du riz et de maïs. Avec des nouveaux sous produits des céréales tels que les glutens de blé, de corn gluten feed et du DDGS émergent.

Les tourteaux : Sous-produits de l'industrie d'extraction d'huiles végétales, ils sont pauvres en matières grasses, surtout lorsqu'ils proviennent d'un procédé d'extraction par solvant. Ils renferment des proportions élevées de protéines qui font tout leur intérêt. Ces protéines sont de valeur inégale selon l'espèce végétale d'origine. On trouve dans cette catégorie le tourteau de soja, le tourteau de colza, le tourteau de tournesol, le tourteau palmiste.

Les huiles et graisses végétales : Elles apportent les acides gras et de l'énergie métabolisable. Ces huiles participent également à la structuration des mélanges et diminuent des émissions des poussières. Elles ont donc, par delà leurs fonctions nutritionnelles, des aptitudes fonctionnelles. Selon les régions on emploie de l'huile de palme, de tournesol, de colza, d'arachide et de soja.

Farine d'origine animale : Les farines d'origine animale comprennent l'ensemble des sous-produits des industries de la viande, du poisson et du lait. On trouve principalement dans cette catégorie des farines de poisson qui ont d'excellentes teneurs en matières azotées et sont recherchées pour leur haute teneur en acides aminés essentiels et en contenu minéral.

Les concentrés minéraux, acides aminés et vitamines de biosynthèse : En vue de palier à des carences probables des éléments minéraux, des acides aminés et des vitamines dans les

matières premières traditionnelles, l'industrie de formulation des aliments recourt à des additifs concentrés en ces éléments. Il s'agit soit des roches et sels minérales comme le calcaire, le phosphate bi calcique, le sel de chlorure de sodium ou encore des acides aminés et vitamines de biosynthèse. L'ajout de ces concentrés dans la formulation est fort limité et peut se faire sous forme de pré mélanges déjà formulés.

2.3. Base des données des caractéristiques des matières premières

Pour la présente étude, nous avons sélectionné 21 matières premières (tableau 2). La restriction à ces 21 matières premières a été imposée par la disponibilité des informations sur leurs compositions et par l'accessibilité aux données historiques de leur prix ou indices de prix. Les compositions mentionnées dans le tableau 2 sont celles décrites par Sauvent et al. (2002) dans leurs tables de composition et de la valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage.

Tableau 2 Composition des matières premières employées (Sauvant et al. 2002)

	Maïs	Blé tendre	Orge	Riz	Remou-lage de blé tendre	Son de blé pellet	Luzerne 17-18%	Pois	Soja Entier toastée	Graine de Colza	Tourteau de soja 48	Tourteau de colza	Farine de poisson 65	Huile De palme	Huile de tournesol	Huile De colza	L-lysine HCl	DL-méthionine	Calcaire	Phosph bicalcique hydraté	Sel de cuisine
Variables	X1	X2	X2	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21
EM/Kg	3350	2980	2610	3490	2390	1680	1030	2490	3380	3390	2280	1460	3220	7970	9100	9100	3350	4630	0	0	0
Humidité (%)	14	13,2	13,3	12,6	12,1	12,9	9,4	13,6	11,4	8,8	12,2	11,3	8,3	0	0	0	0,5	0	3		0
Protéines brute (%)	8,1	10,5	10,1	8	14,9	14,8	15,8	20,7	35,2	19,1	45,3	33,7	65,3	0	0	0	956	600	0	0	0
Fibres brutes (%)	2,2	2,2	4,6	0,5	4,9	9,2	26,7	5,2	5,6	8,2	6	12,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matière -grasse (%)	3,7	1,5	1,8	1,2	3,5	3,4	2,5	1	19,2	42	1,9	2,3	8,9	1000	0	0	0	0	0	0	0
Amidon (%)	64,1	60,5	52,2	75,9	37,8	19,8	0	44,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Calcium (g/Kg)	0,4	0,7	0,7	0,1	1,2	1,4	19,7	1,1	3,2	4,7	3,4	8,3	38,5	0	0	0	0	0	350	280	0
Phosphore (g/Kg)	2,6	2	2,6	2	7,1	9,9	2,4	4	5,3	6,6	6,2	11,4	25,2	0	0	0	0	0	0,2	180	0
Potassium (g/Kg)	3,2	4	4,8	14,9	9,1	12,3	22,8	9,8	18,4	7,8	21,1	12,3	9,7	0	0	0	0	0	0	0	0
Sodium (g/Kg)	0,04	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,8	0,2	0,3	0,4	11,3	0	0	0	0	0	0	0	370
Chlore (g/Kg)	0,5	0,9	1,1	0,1	0,8	0,9	6	0,8	0,5	0,9	0,5	0,7	17,7	0	0	0	10	0	0	0	600
Cuivre (mg/Kg)	2	5	9	2	14	17	5	7	34	3	18	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0
Fer (mg/Kg)	32	47	158	16	116	143	312	92	143	216	283	172	351	0	0	0	0	0	0	0	0
Acides linoléiques (g/Kg)	17,3	6,3	55,4	35,9	15,7	15,6	2,4	10,2	97	81,8	7,4	3,8	1,5	9,9	64,9	20,5	0	0	0	0	0
Méthionine (g/Kg).	1,7	1,7	1,7	1,9	2,3	2,3	2,2	2	5,3	4,2	6,4	6,9	16,3	0	0	0	0	990	0	0	0
Lysine (g/Kg)	2,7	3,1	3,8	3	5,9	5,8	7,2	15	21,8	11,9	27,8	18	46,4	0	0	0	798	0	0	0	0
Vitamine A (1000 UI/Kg)	0,83	0,01	0,2	0	0	0,03	55	0,04	0	0	0	0	0	130	0	200	0	0	0	0	0
Vitamine E (mg/Kg)	17	15	16	9	54	18	122	4	36	117	4	14	5	95	625	219	0	0	0	0	0
Vitamine K (mg/Kg)	0,31	0	0	0	0	0,8	20	0,79	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Eur/tonne sept 2010	216	215	193	367	160	148	164	211	289	394	333	220	1320	697	874	672	1750	3510	50	385	60

2.4. Les contraintes d'incorporation

Certaines matières premières peuvent avoir des effets délétères sur la santé animale ou sur une propriété de la formulation lorsque leurs seuils d'incorporation dans la formule ne respectent pas certaines limites. Conformément aux recommandations de l'INRA et de la DSM nous avons considéré les seuils d'incorporation mentionnés dans le tableau 3. Etant donné le manque de compromis sur ces seuils d'incorporation, les limites d'incorporation peuvent varier d'une organisation à l'autre.

Tableau 3 : seuils d'incorporation des matières premières

Matières premières	Seuils d'incorporation des matières premières en %	
	Limite inférieure	Limite supérieure
Grain de maïs	20	40
Grain de blé	0	40
Pois	0	10
Soja	0	8
Grain de colza	0	8
Farine de poisson	0	3,5
Huile de tournesol	0	4
Huile de colza	0	4
Sel de chlorure de sodium	0,1	1

2.5. Les prix des matières premières sélectionnées

En vue d'étudier l'intégration de prix des matières premières dans la démarche d'optimisation de la formulation des aliments pour volaille et d'en tirer des leçons sur la gestion de la logistique d'approvisionnement des entreprises de formulation nous avons créé une base de donnée des prix historiques des 21 matières premières sélectionnées dans cette étude. Les prix mentionnés dans le tableau 4 reposent sur le suivi mensuels des cotations de ces matières premières en France, publiées mensuellement dans :

- Le tableau de bord de prix des aliments publié par « Coop de France », une organisation professionnelle unitaire de la coopération agricole en France.
- La base de données de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE) sur les prix et indices de prix des produits et des moyens de production agricoles ;
- La base de données « feedbase » : accessible sur <http://www.feedbase.com/index.php?>

Ces prix ont été comparés et consolidés sur une base mensuelle sous forme de la base de données présentée dans le tableau 3 couvrant la période allant d'avril 2008 à décembre 2010.

Tableau 4 : base de données consolidées des prix mensuels des matières premières employées dans la formulation des aliments pour volailles

M	Maïs	Blé	Orge	Riz	Remou-l age de blé tendre	Son de blé (pellet)	Luzerne 17-18%	Pois	Soja entier toastée	Graine de Colza	Tourteau De soja 48	Tourteau de colza	Farine de poisson	Huile De palme	Huile de tournesol	Huile De colza	L-lysine HCl	DL- méthionine	Carbonate De calcium	Phosp. bicalcique hydraté	Sel de cuisine
	P1	P2	P3	P4	P4	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21
déc-10	222	230	211	415	176	168	174	229	362	491	348	225	1267	935	1029	672	1750	3520	50	430	60
nov-10	213	214	195	376	177	150	171	215	330	436	338	224	1268	816	1020	672	1750	3510	50	430	60
oct-10	209	208	187	361	167	136	170	213	295	402	325	218	1266	716	937	672	1750	3460	50	400	60
sept-10	216	215	193	367	160	148	164	211	290	394	333	220	1320	698	874	672	1750	3510	50	385	60
août-10	218	207	189	358	145	150	147	208	287	376	327	209	1420	699	822	672	1750	3570	50	385	60
juil-10	113	103	184	358	111	96	121	160	288	359	289	178	1450	634	730	672	1800	3570	50	390	60
juin-10	140	133	116	374	105	87	131	185	284	329	310	189	1495	659	728	672	1870	3570	50	390	60
mai-10	144	130	111	375	95	78	123	181	276	313	320	186	1552	652	722	672	1930	3570	50	380	60
avr-10	136	121	104	363	75	70	120	162	264	317	311	161	1445	618	687	670	2010	3560	50	320	60
mars-10	125	113	97	392	80	70	120	157	255	305	317	164	1380	614	707	665	2100	3550	50	280	60
févr-10	125	115	99	415	95	79	120	159	248	297	327	186	1335	579	687	660	2100	3540	50	275	60
janv-10	129	120	104	422	100	89	121	165	247	288	327	183	1266	550	682	655	2100	3440	50	275	60
déc-09	129	123	106	411	99	82	120	163	256	285	321	164	1200	537	666	650	1900	4200	50	280	60
nov-09	127	126	107	364	91	82	120	159	242	279	313	150	1100	483	608	645	1550	4000	50	275	60
oct-09	118	117	103	358	78	60	125	148	236	267	306	136	1005	456	564	640	1490	3227	50	320	60
sept-09	113	111	99	386	78	40	129	146	239	259	321	134	995	468	556	635	1450	3220	50	330	60
août-09	129	118	108	397	84	67	133	151	283	277	340	140	930	505	581	615	1400	3220	50	350	60
juil-09	129	118	108	417	80	55	133	151	284	278	345	162	917	455	574	620	1250	3220	50	360	60
juin-09	129	118	108	392	82	58	133	151	317	321	348	185	852	515	661	635	1200	3300	50	400	60
mai-09	142	134	107	392	90	68	132	161	308	324	315	183	858	578	682	655	1200	3470	50	400	60
avr-09	125	124	104	434	96	77	132	151	282	292	300	181	866	533	632	675	1200	3550	50	500	60
mars-09	128	132	116	455	110	89	136	165	256	276	280	159	860	460	578	695	1200	3650	50	639	60
févr-09	135	139	123	454	110	107	139	176	264	289	321	185	855	444	635	710	1200	3900	50	640	60
janv-09	133	141	123	426	104	102	141	168	270	301	310	178	835	417	608	725	1330	4190	50	710	60
déc-08	170	191	175	408	100	90	158	153	230	284	310	159	830	366	591	730	1500	3580	50	950	60
nov-08	224	244	232	496	106	91	218	230	252	330	311	205	830	394	675	730	1600	3780	50	950	60
oct-08	242	259	246	540	105	85	242	261	242	339	326	219	866	412	773	730	1650	3790	50	950	60
sept-08	298	311	288	480	128	109	250	304	293	376	319	268	882	536	879	730	1650	3510	50	935	60
août-08	313	353	201	488	144	134	247	312	316	401	412	260	892	592	1115	730	1650	3250	50	925	60
juil-08	201	189	162	472	142	129	235	249	350	439	370	270	890	706	1115	730	1600	3100	50	912	60
juin-08	189	186	162	521	125	116	232	233	350	469	355	280	868	774	115	730	1600	3800	50	900	60
mai-08	187	202	188	530	169	166	222	263	308	451	333	234	851	769	120	730	1600	3800	50	900	60
avr-08	226	213	200	532	204	200	208	292	296	454	373	232	825	738	1258	730	1600	2750	50	900	60

2.6. Mise en équation du problème

La mise en équation du problème a été faite à l'aide d'un tableur Excel 12.0 en suivant les règles présentées dans la section 1.3 du premier chapitre. Cette mise en équation a été basée sur l'utilisation, des matières premières ayant les caractéristiques présentées dans les bases données des compositions (tableau 2) et des prix (tableau 3). La fonction objectif a été définie comme la somme des coûts engendrés par l'achat des matières premières nécessaires à la fabrication de l'aliment souhaité, hors frais de transport. Cette fonction étant minimisée pendant l'optimisation. Les variables de décision fixes sont les proportions des différentes matières premières devant intégrer une unité de formulation. Chacune de ces variables de décision ne peut prendre qu'au moins une valeur nulle dans la solution (non négativité). Les caractéristiques nutritives de l'aliment et les seuils d'incorporation des matières premières ont constitué les principales contraintes du programme.

2.7. La résolution du problème avec le solveur

Le solveur est une macro commande disponible avec le tableur Excel. Son menu permet de choisir les variables de décision, d'écrire les contraintes et la fonction économique. Le temps accordé au solveur pour chercher la solution optimale était fixé à 100 secondes ; avec 100 itérations possibles. La différence acceptable entre les valeurs et la limite de la contrainte fixée à 10^{-6} et le problème supposé linéaire afin d'obliger le programme à utiliser le simplexe. Les estimations d'origine des variables de base étant linéaires de la tangente à la fonction à optimiser, en partant à chaque fois du résultat de l'itération précédente (l'option à droite). Les détails de mise en œuvre du solveur de l'Excel 12.0 sont fournis dans les ouvrages de Rennard et al. (2009) et de Taha (2007).

Chapitre 3 : Analyse des optima obtenus et de l'influence de l'évolution des prix des matières premières

3.1. Présentation de l'optimum obtenu

Le tableau 5 présente à titre illustratif la solution optimale obtenue aux prix des matières premières observés en décembre 2010. On y observe que l'ensemble des contraintes de formulation sont satisfaites, traduisant le caractère faisable du programme. Le prix imputable à l'acquisition de ces matières premières (hors transports et traitements supplémentaires) nécessaire à l'obtention d'une tonne de cet aliment est estimé à 243,3 euros.

Tableau 5 : solution optimale obtenue aux prix des marchés observés en décembre 2010

	Mais	Blé	Orge	Riz	Remou lage blé	Son de blé	Luzer ne 17-18%	Pois	Soja entier	Colza	Tour de soja	Tour. de colza	Farin De poisson	Huile de palme	Huile Tour nesol	Huile de colza	L-lysine HCl	DL- Méth nine	Calcair	Phos. bicalc	Sel	Seuil	Min	Max
Proportion	0,5	0	0	0	0,06	0	0,09	0	0,08	0	0,13	0,04	0	0,00	0	0,02	0	0,001	0,077	0,000	0,003	1,0	1	1
EM/Kg	1675	0	0	0	137,50	0	92,63	0	270,40	0	301,43	51,10	0	6,82	0	210,87	0	4,248	0,000	0,000	0,000	2750,0	2750	
Humidité (%)	7	0	0	0	0,70	0	0,85	0	0,91	0	1,61	0,40	0	0,00	0	0,00	0	0,000	0,231	0,000	0,000	11,7	0	14
Protéines brute (%)	4,05	0	0	0	0,86	0	1,42	0	2,82	0	5,99	1,18	0	0,00	0	0,00	0	0,550	0,000	0,000	0,000	16,9	16	18,5
Fibres brutes (cellulose) (%)	1,1	0	0	0	0,28	0	2,40	0	0,45	0	0,79	0,43	0	0,00	0	0,00	0	0,000	0,000	0,000	0,000	5,5	3,5	6
Matière -grasse totale (%)	1,85	0	0	0	0,20	0	0,22	0	1,54	0	0,25	0,08	0	0,86	0	0,00	0	0,000	0,000	0,000	0,000	5,0	5	9
Amidon (%)	32,05	0	0	0	2,17	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,000	0,000	0,000	0,000	34,2	32	
Calcium (g/Kg)	0,2	0	0	0	0,07	0	1,77	0	0,26	0	0,45	0,29	0	0,00	0	0,00	0	0,000	26,963	0,000	0,000	30,0	30	37,5
Phosphore (g/Kg)	1,3	0	0	0	0,41	0	0,22	0	0,42	0	0,82	0,40	0	0,00	0	0,00	0	0,000	0,015	0,000	0,000	3,6		
Magnésium (g/Kg)	0,5	0	0	0	0,13	0	0,13	0	0,18	0	0,38	0,17	0	0,00	0	0,00	0	0,000	0,000	0,000	0,000	1,5		
Potassium (g/Kg)	1,6	0	0	0	0,52	0	2,05	0	1,47	0	2,79	0,43	0	0,00	0	0,00	0	0,000	0,000	0,000	0,000	8,9		
Sodium (g/Kg)	0,02	0	0	0	0,01	0	0,02	0	0,06	0	0,04	0,01	0	0,00	0	0,00	0	0,000	0,000	0,000	1,239	1,4	1,4	5
Chlore (g/Kg)	0,25	0	0	0	0,05	0	0,54	0	0,04	0	0,07	0,02	0	0,00	0	0,00	0	0,000	0,000	0,000	2,009	3,0	1,4	5
Acides linoléiques (g/Kg)	8,65	0	0	0	0,90	0	0,22	0	7,76	0	0,98	0,13	0	0,01	0	0,48	0	0,000	0,000	0,000	0,000	19,1	15	
Acide linoléique (g/Kg)	0,15	0	0	0	0,34	0	0,40	0	1,08	0	0,13	0,06	0	0,00	0	0,23	0	0,000	0,000	0,000	0,000	2,4		
Méthionine (g/Kg).	0,85	0	0	0	0,13	0	0,20	0	0,42	0	0,85	0,24	0	0,00	0	0,00	0	0,908	0,000	0,000	0,000	3,6	3,6	
Lysine (g/Kg)	1,35	0	0	0	0,34	0	0,65	0	1,74	0	3,68	0,63	0	0,00	0	0,00	0	0,000	0,000	0,000	0,000	8,4	7	
Met+ cyst (g/Kg)	1,95	0	0	0	0,30	0	0,40	0	0,88	0	1,73	0,53	0	0,00	0	0,00	0	0,000	0,000	0,000	0,000	5,8	5,8	
Vitamine A (1000 UI/Kg)	0,415	0	0	0	0,00	0	4,95	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,11	0	4,63	0	0,000	0,000	0,000	0,000	10,1	10	
Vitamine E (mg/Kg)	8,5	0	0	0	3,11	0	10,97	0	2,88	0	0,53	0,49	0	0,08	0	5,07	0	0,000	0,000	0,000	0,000	31,6	15	
Vitamine K (mg/Kg)	0,155	0	0	0	0,00	0	1,80	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,05	0	0,000	0,000	0,000	0,000	2,0	2	
Vitamine B1 - (mg/Kg)	2	0	0	0	1,04	0	0,27	0	0,80	0	0,79	0,11	0	0,00	0	0,00	0	0,000	0,000	0,000	0,000	5,0		
Niacine (mg/Kg)	10,5	0	0	0	6,16	0	3,69	0	1,76	0	5,16	5,81	0	0,00	0	0,00	0	0,000	0,000	0,000	0,000	33,1		
Activité phytasique (UI/Kg)	10	0	0	0	194,45	0	0,00	0	0,00	0	2,64	0,35	0	0,00	0	0,00	0	0,000	0,000	0,000	0,000	207,4		
Prix total	111	0	0	0	10,13	0	15,65	0	28,98	0	46,01	7,88	0	0,80	0	15,57	0	3,229	3,852	0,000	0,201	243,3		

3.2. Analyse de sensibilité d'un optimum

L'analyse de sensibilité présentée dans les tableaux 6 et 7 permet d'évaluer la sensibilité de la solution optimale quand certains paramètres changent de valeur. Les augmentations et les réductions admissibles présentés dans ce tableau, montre pour chacune des matières premières employées les variations isolées de leur prix qui n'affecteraient pas la solution optimale trouvée. Toutes choses restant égales, des variations au delà des limites d'acceptabilité, conduiraient à des réajustements de la solution optimale. On observe dans le tableau 6 que le maïs, le soja et de tourteau de colza sont saturés et présentent des coûts réduits négatifs. Ceci suppose que l'acceptation des quantités supplémentaires de ces matières dans le programme entrainerait une modification de la solution optimale et une diminution de coût.

Le tableau 6 : analyse de sensibilité obtenue à l'aide du solveur pour la formulation optimale de décembre 2010

Nom	Valeur finale	Coût réduit	Coefficient objectif	Augmentation admissible	Réduction admissible
Maïs	0,50	-10,29	222,00	10,29	0,00
Blé (tendre)	0,00	27,31	230,00	0,00	27,31
Orge	0,00	43,81	211,00	0,00	43,81
Riz	0,00	174,67	415,12	0,00	174,67
Remoulage de blé tendre	0,06	0,00	176,00	27,07	10,92
Son de blé pellet	0,00	48,87	168,00	0,00	48,87
Luzerne déshydratée 17-18%	0,09	0,00	174,00	983,58	129,89
Pois	0,00	51,66	229,00	0,00	51,66
Soja entier toastée	0,08	-43,21	362,24	43,21	0,00
Graine de Colza	0,00	123,87	490,64	0,00	123,87
Tourteau de soja 48	0,13	0,00	348,00	122,34	51,33
Tourteau de colza	0,04	-96,66	225,00	96,66	0,00
Farine de poisson 65	0,00	551,50	1267,00	0,00	551,50
Huile de palme	0,00	0,00	934,57	3095,49	377,17
Huile de tournesol	0,00	369,71	1028,96	0,00	369,71
Huile de colza	0,02	0,00	672,00	316,43	72,98
L-lysine HCl	0,00	1610,74	1750,00	0,00	1610,74
DL-méthionine	0,00	0,00	3520,00	40443,76	3266,11
Calcaire (craie alimentaire)	0,08	0,00	50,00	528,53	213,53
P. bicalcique hydraté	0,00	422,74	430,00	0,00	422,74
Sel de cuisine	0,00	0,00	60,00	19019,00	223,72

Le blé, l'orge, le riz, le son de blé pellet, le pois, les graines de colza, la farine de poisson, l'huile de tournesol, la L-lysine et le phosphates bi calciques ne sont pas incorporés dans la solution optimale. Leur coût réduit positif et traduit l'inefficience de l'utilisation de ces matières première dans les conditions de la période analysée.

La solution optimale proposée fixe les valeurs d'énergie métabolisable, des matières grasses brutes, de calcium, de sodium, de méthionine, de vitamine K et de l'ensemble de méthionine+cystéines à leurs valeurs minimales.

Tableau 7 : analyse de sensibilité des contraintes nutritionnelles

Nom	Valeur finale	Shadow cost	Contrainte à droite	Augmentation admissible	Réduction admissible
Seuil	1,0	-163,7	1,0	0,0	0,0
EM/Kg Seuil	2750,0	0,1	2750,0	114,2	3,7
Protéines brute (%) Seuil	16,9	0,0	18,5	0,0	1,6
Protéines brute (%) Seuil	16,9	0,0	16,0	0,9	0,0
Fibres brutes (cellulose) (%) Seuil	5,5	0,0	6,0	0,0	0,5
Fibres brutes (cellulose) (%) Seuil	5,5	0,0	3,5	2,0	0,0
Matière -grasse totale (%) Seuil	5,0	0,0	9,0	0,0	4,0
Matière -grasse totale (%) Seuil	5,0	0,4	5,0	3,8	0,9
Amidon (%) Seuil	34,2	0,0	32,0	2,2	0,0
Calcium (g/Kg) Seuil	30,0	0,0	37,5	0,0	7,5
Calcium (g/Kg) Seuil	30,0	0,6	30,0	7,5	0,5
Sodium (g/Kg) Seuil	1,4	0,6	1,4	1,3	0,6
Chlore (g/Kg) Seuil	3,0	0,0	1,4	1,6	0,0
Acides linoléiques (g/Kg) C18:2 Seuil	19,1	0,0	15,0	4,1	0,0
Méthionine (g/Kg). Seuil	3,6	3,3	3,6	1,7	0,9
Lysine (g/Kg) Seuil	8,4	0,0	7,0	1,4	0,0
Vitamine A (1000 UI/Kg) Seuil	10,1	0,0	10,0	0,1	0,0
Vitamine E (mg/Kg) Seuil	31,6	0,0	15,0	16,6	0,0
Vitamine K (mg/Kg) Seuil	2,0	6,4	2,0	0,5	0,0
Sodium (g/Kg) Seuil	1,4	0,0	5,0	0,0	3,6
Chlore (g/Kg) Seuil	3,0	0,0	5,0	0,0	2,0

Le tableau de synthèse de l'analyse de sensibilité des contraintes nutritionnelles (tableau 7) présente une colonne particulièrement importante le "shadow cost" qui détermine le coût fictif (coût dual) du seuil de fixation de chaque contrainte. Ce coût dual informe sur la variation de la fonction objectif lorsque la contrainte varie d'une unité.

3.3. Evolution des optima avec les prix des matières premières

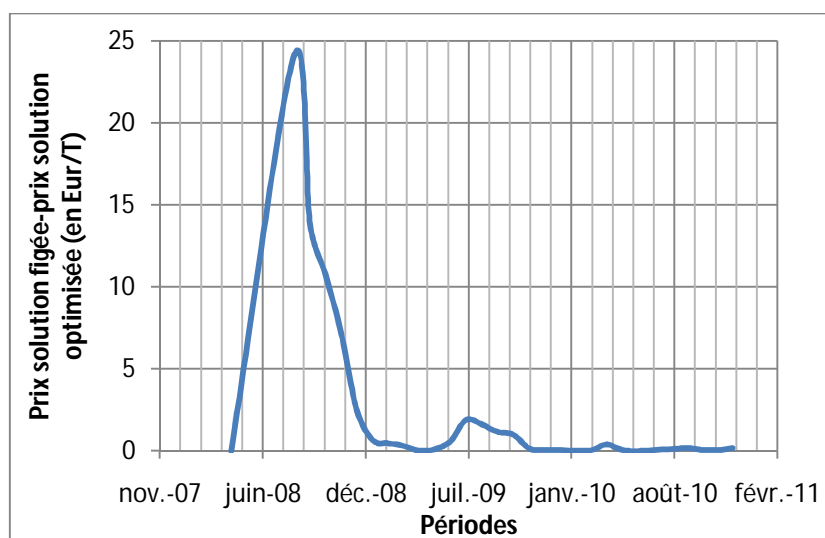
Toutes choses restant égales, l'évolution des prix des matières première a influencé les solutions optimales de formulation. Le tableau 8 présente les solutions optimales mensuelles déterminé en intégrant les prix des matières premières depuis avril 2008 à décembre 2010. On y observe des réajustements des optima avec les changements des prix du marché. Certaines matières premières telles que l'orge, le riz, le son de blé pellet, le pois, le phosphates bicalciques et la lysine n'ont été retenu à aucun moment de la période analysée.

Tableau 8 : les optima obtenus aux pris de marché entre avril 2008 et décembre 2010

	Mais	Blé	Orge	Riz	Remou lage de blé tendre	Son de blé pellet	Luzerne 17-18%	Pois	Soja entier toastée	Graine de Colza	Tourteau de soja 48	Tourteau de colza	Farine de poisson 65	Huile de palme	Huile de tournesol	Huile de colza	L-lysine HCl	DL- méthionine	Calcaire	Phosph. Bicalcique hydraté	Sel NaCl	Prix (eu/T)
déc-10	50,0	0,00	0,0	0,0	5,75	0,0	8,99	0,0	8,0	0,00	13,22	3,5	0,00	0,09	0,0	2,32	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	243,3
nov-10	50,0	0,00	0,0	0,0	5,75	0,0	8,99	0,0	8,0	0,00	13,22	3,5	0,00	0,09	0,0	2,32	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	234,5
oct-10	50,0	0,00	0,0	0,0	5,75	0,0	8,99	0,0	8,0	0,00	13,22	3,5	0,00	0,09	0,0	2,32	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	227,0
sept-10	50,0	0,00	0,0	0,0	5,75	0,0	8,99	0,0	8,0	0,00	13,22	3,5	0,00	0,09	0,0	2,32	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	230,3
juin-10	50,0	0,65	0,0	0,0	5,10	0,0	9,00	0,0	8,0	0,00	13,28	3,5	0,00	0,09	0,0	2,26	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	181,6
mai-10	50,0	0,00	0,0	0,0	5,66	0,0	9,00	0,0	8,0	0,36	13,01	3,5	0,00	0,07	0,0	2,27	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	182,9
avr-10	50,0	0,00	0,0	0,0	5,75	0,0	8,99	0,0	8,0	0,00	13,22	3,5	0,00	0,09	0,0	2,32	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	174,4
mars-10	50,0	0,00	0,0	0,0	5,66	0,0	9,00	0,0	8,0	0,36	13,01	3,5	0,00	0,07	0,0	2,27	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	169,2
févr-10	50,0	0,00	0,0	0,0	5,66	0,0	9,00	0,0	8,0	0,36	13,01	3,5	0,00	0,07	0,0	2,27	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	171,3
janv-10	50,0	0,00	0,0	0,0	5,66	0,0	9,00	0,0	8,0	0,36	13,01	3,5	0,00	0,07	0,0	2,27	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	173,3
déc-09	50,0	0,00	0,0	0,0	5,66	0,0	9,00	0,0	8,0	0,36	13,01	3,5	0,00	0,07	0,0	2,27	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	172,9
nov-09	50,0	0,00	0,0	0,0	5,62	0,0	9,03	0,0	8,0	0,00	13,27	3,5	0,00	0,49	0,0	1,99	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	168,5
oct-09	44,2	0,00	0,0	0,0	9,62	0,0	9,10	0,0	8,0	5,33	9,71	3,5	0,00	0,28	0,0	2,13	0,0	0,09	7,65	0,0	0,33	160,6
sept-09	44,2	0,00	0,0	0,0	9,69	0,0	9,08	0,0	8,0	5,62	9,51	3,5	0,00	0,00	0,0	2,32	0,0	0,09	7,65	0,0	0,33	159,9
août-09	44,2	0,00	0,0	0,0	9,69	0,0	9,08	0,0	8,0	5,62	9,51	3,5	0,00	0,00	0,0	2,32	0,0	0,09	7,65	0,0	0,33	173,9
juil-09	44,2	0,00	0,0	0,0	9,69	0,0	9,08	0,0	8,0	5,62	9,51	3,5	0,00	0,00	0,0	2,32	0,0	0,09	7,65	0,0	0,33	175,0
juin-09	44,6	0,00	0,0	0,0	18,27	0,0	9,08	0,0	8,0	0,00	2,53	3,5	4,05	0,05	0,0	2,29	0,0	0,07	7,32	0,0	0,22	180,7
mai-09	50,0	0,00	0,0	0,0	5,75	0,0	8,99	0,0	8,0	0,00	13,22	3,5	0,00	0,09	0,0	2,32	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	183,6
avr-09	50,0	0,00	0,0	0,0	5,66	0,0	9,00	0,0	8,0	0,36	13,01	3,5	0,00	0,07	0,0	2,27	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	171,9
mars-09	50,0	0,00	0,0	0,0	5,62	0,0	9,03	0,0	8,0	0,00	13,27	3,5	0,00	0,49	0,0	1,99	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	169,4
févr-09	50,0	0,00	0,0	0,0	5,62	0,0	9,03	0,0	8,0	0,00	13,27	3,5	0,00	0,49	0,0	1,99	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	180,3
janv-09	50,0	0,00	0,0	0,0	5,62	0,0	9,03	0,0	8,0	0,00	13,27	3,5	0,00	0,49	0,0	1,99	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	178,2
déc-08	44,2	0,00	0,0	0,0	9,62	0,0	9,10	0,0	8,0	5,33	9,71	3,5	0,00	0,28	0,0	2,13	0,0	0,09	7,65	0,0	0,33	192,4
nov-08	31,4	0,00	0,0	0,0	31,49	0,0	9,31	0,0	8,0	0,00	0,00	3,5	4,64	0,45	1,7	2,02	0,0	0,07	7,24	0,0	0,20	224,3
oct-08	31,1	0,00	0,0	0,0	31,91	0,0	9,14	0,0	8,0	0,00	0,00	3,5	4,62	0,45	0,0	3,76	0,0	0,07	7,25	0,0	0,20	233,7
sept-08	27,8	0,00	0,0	0,0	37,50	0,0	9,22	0,0	8,0	0,00	0,00	0,0	6,15	0,43	0,0	3,53	0,0	0,06	7,14	0,0	0,16	265,7
août-08	31,0	0,00	0,0	0,0	32,08	0,0	9,12	0,0	8,0	0,00	0,00	3,5	4,60	0,17	0,0	4,00	0,0	0,07	7,25	0,0	0,20	277,6
avr-08	50,0	0,65	0,0	0,0	5,10	0,0	9,00	0,0	8,0	0,00	13,28	3,5	0,00	0,09	0,0	2,26	0,0	0,09	7,70	0,0	0,33	248,9

3.4. Evolution de prix des optima calculés

Des entreprises qui ne disposent pas des compétences en matière d'optimisation des aliments emploient des formules figées d'aliments jugées par ailleurs performantes. Dans le cadre de cette étude nous avons comparé le prix des formulations obtenus après optimisation du programme aux conditions du marché (solutions optimisées) et les prix observés à différentes périodes pour une formulation figée, en prenant comme solution de base l'optimum calculé aux conditions de marché d'avril 2008 (solution figée).



La figure 1 Différence des prix des solutions optimisées et celles des solutions figées.

Du fait probablement des variations de prix des matières premières, maintenir une formulation figée occasionne un surplus de coût qu'on aurait évité en appliquant une solution optimisée. En effet lorsque les prix des matières premières ne changent pas dans les mêmes proportions, le programme peut conduire à un réajustement de l'optimum en opérant des substitution entre les groupes des matières premières de contenu similaires et en compensant les matières premières par d'autres qui équilibrent l'apport total des nutriments dans la ration.

3.5. Analyse des complémentarités et substitutions dans la formulation

Le tableau 9 présente une matrice de corrélation de Pearson établi à l'aide du logiciel Minitab 15 des quantités des matières premières employées dans tous les scénarii optima observés dans l'étude.

Un coefficient de corrélation positif montre que les quantités des deux matières premières analysées varient dans le même sens. Plus grand est ce coefficient positif, plus ces deux matières sont complémentaires. Un coefficient de corrélation négatif entre deux matières montre que

l'accroissement de l'une dans la solution optimale induit une diminution de l'utilisation de l'autre. Ces matières sont donc dites substituables.

Le tableau 9 Coefficients obtenus au départ des données à partir des solutions optimales

	Maïs	Son de blé	Remoulage de blé	Luzerne	colza	T. soja	T. colza	Farine De poisson	Huile de palme	Huile De tournes	huile colza	Méthionine	calcium
Blé	0,165												
Remoulage	-0,980	-0,163											
Luzerne	-0,902	-0,182	0,864										
Graine colza	-0,099	-0,142	-0,073	0,23									
Tourteau soja	0,957	0,175	-0,972	-0,875	-0,046								
Tourteau colza	0,513	0,053	-0,536	-0,423	0,098	0,415							
Farine de poisson	-0,906	-0,128	0,97	-0,787	-0,235	-0,951	-0,546						
Huile de palme	-0,371	-0,154	0,385	0,459	-0,233	-0,301	-0,275	0,368					
Huile tournesol	-0,413	-0,053	0,416	0,666	-0,098	-0,415	0,037	0,39	0,290				
Huile colza	-0,747	-0,071	0,763	0,386	-0,143	-0,698	-0,445	0,732	0,085	-0,144			
Méthionine	0,890	0,123	-0,961	-0,769	0,268	0,935	0,572	-0,995	-0,373	-0,377	-0,717		
Calcium	0,938	0,147	-0,984	-0,835	0,132	0,975	0,513	-0,994	-0,356	0,409	-0,715	0,987	
sel	0,908	0,128	-0,971	-0,789	0,232	0,952	0,545	-1	-0,368	-0,391	-0,732	0,999	0,994

Le maïs est substituable au remoulage de blé, probablement du fait des leurs apports contenus en amidon et en matières grasses. Il est par contre plus complémentaire avec le tourteau de soja et les concentrés de méthionine et de minéraux.

3.6. Comparaison des indices prix des optima avec l'indice ITAVI

L'Institut Technique de l'aviculture (ITAVI) calcule et publie un indice mensuel caractérisant l'évolution des coûts matières premières de différents aliments pour volailles. Le calcul de l'indice ITAVI repose sur la détermination d'un coût des matières premières dans l'aliment selon une formulation au moindre coût. Cet indice qui exprime le prix d'une formulation optimale employé comme base 100 le coût d'aliment optimisé en janvier 2006.

Nous avons calculé un indice similaire (*indicecalculé*) en partant du prix de la formulation optimisé pour avril 2008 (*Prixavril08*), à qui nous avons attribué la valeur de l'indice ITAVI calculé en avril 2008 (150,6) et du prix optimisé pour chaque période (*prixOpt*). Les indices des prix de formulations calculées ont été extrapolés en employant la formule :

$$\text{Indicecalculé} = \frac{\text{PrixOpt}}{\text{Prixavril08}} * 150,6.$$

La figure 2 présente l'évolution de l'indice de prix publié par ITAVI et celui calculé. On observe une certaine proximité des tendances évolutives de ces deux indices traduisant leur sensibilité commune à l'évolution des prix des matières premières. La figure 3 illustre le degré de corrélation linéaire existant entre ces deux indices.

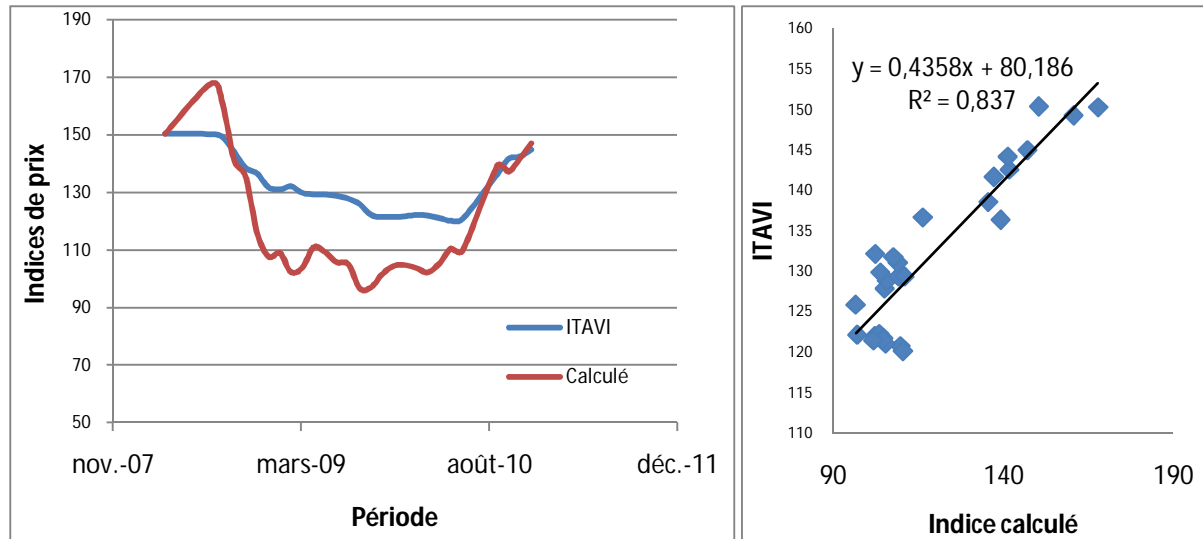


Figure 2 : évolution de l'indice ITAVI et de l'indice de prix calculé.

L'indice calculé semble présenter une plus grande sensibilité aux variations des prix des matières premières que l'indice publié par ITAVI. Plusieurs raisons peuvent être à l'origine de cette différence de sensibilité, parmi les quelles :

1. Le calcul de l'indice ITAVI est basé sur le suivi d'une trentaine de matières premières (Guerini et al. 2010), alors que la présente étude n'intègre que 21 matières premières. Plus une base de données intègre des ressources, plus grand est le degré de liberté du programme dans la recherche de l'optimum.
2. Les prix moyens mensuels employés par ITAVI sont lissés sur les trois derniers mois, de façon à introduire une notion de stockage et de couverture des achats des matières premières achetées (Guerini et al., 2010). Ce fait confère une plus grande stabilité à l'évolution de cet indice.
3. Les niveaux des contraintes employées dans l'optimisation préalable au calcul de l'indice ITAVI ne sont pas connus. Elles émanent d'une concertation avec les aviculteurs. L'existence des contraintes lâches dans le programme ITAVI peut être à l'origine de la faiblesse de sensibilité de cet indice aux variations de prix des matières.

Conclusion

Pour se couvrir des risques générés par la volatilité des prix des matières premières intégrant les aliments pour volailles, les gestionnaires des entreprises de formulation des aliments doivent disposer des moyens d'information et d'action qui leur permettent de prendre des options limitant les effets néfastes et capitalisant au mieux les changements des prix observés.

Dans la présente étude, une approche de formulation à moindre coût des aliments complets pour volailles a été développée en appliquant la technique de la programmation linéaire. La résolution de ce programme de formulation a nécessité au préalable la création de trois bases des données portant sur les caractéristiques des matières premières, sur leurs prix historiques et sur les contraintes nutritionnelles et d'incorporation à satisfaire dans la formulation.

La formalisation du programme de formulation et sa résolution à l'aide du solveur du tableur Excel montre qu'il est possible aux gestionnaires des unités de formulation des aliments de recourir aux instruments à leur portée, pour améliorer leurs processus de prise de décision et se prémunir des effets néfastes de la variation des prix des matières premières.

Il ressort des analyses présentées dans ce travail que du fait de la variation des prix des matières premières, maintenir figée une formulation d'aliment pour volaille est susceptible d'occasionner des surplus de coût qu'on peut éviter en appliquant à chaque fois une solution optimisée. En effet, au delà de certaines limites les prix des matières premières peuvent induire un réajustement de l'optimum en opérant des substitutions entre les matières premières à contenus similaires et en compensant les carences de certaines matières sélectionnées par d'autres qui équilibrent l'apport total des nutriments dans la ration.

Quoique pouvant servir utilement, la technique d'aide à la décision que nous avons présentée n'est certainement pas une panacée. Pour être vraiment utiles, il importe que des approches performantes de prévision des prix des matières premières soient développées, et que les industries de formulation des aliments optimisent leur processus d'approvisionnement et de livraison des produits, en s'intégrant dans des systèmes logistiques comprenant aussi bien leurs fournisseurs des matières premières et leurs clients.

Références

- Brigham, G.** (1959). A Classroom example of linear programming. *Operations Research*, **7**, 524-533
- Castrodeza, C., Lara, P., Peña, T.** (2005). Multicriteria fractional model for feed formulation: economic, nutritional and environmental criteria. *Agricultural Systems*. **66** 76-96.
- Guerini, C., Gallot, S., Bouravel, I., Braine, A.** (2010). Actualisation de l'indice coût matières premières ITAVI. Consulté le 15 mai sur <http://www.itavi.asso.fr/economie/conjoncture/NoteNouvelIndice.pdf>
- Jean dit Bailleul, P., Rivest, J., Dubeau, F., Pomar, C.** (2001). Reducing nitrogen excretion in pigs by modifying the traditional least-cost formulation algorithm. *Livestock Production Science*, **72**, 199-211.
- Jewel, W.S.** (1959). A classroom example of linear programming (Lesson 2). *Operations Research*, **8**, 565-570
- Insee** (2011). Institut National des Statistiques et des études économiques. <http://www.insee.fr/fr/default.asp> (site consulté le 18 mai 2011).
- Itavi** (2011). Institut Technique de l'Aviculture. <http://www.itavi.asso.fr/>(consulté le 25 mai)
- Larbier, M. et Leclercq, B.**(1992). Nutrition et alimentation des volailles; INRA:Paris, 1992
- Munford, A.G.** (1996). The use of iterative linear programming in practical applications of animal diet formulation. *Mathematics and Computers in Simulation*. **42**, 255-261
- Pathumnakula, S., Ittiphalin, M., Piewthonggam, K., Rujikietkumjorn, S.** (2011). Should feed mills go beyond traditional least cost formulation? *Computers and Electronics in Agriculture* **75**, 243–249
- Rennard, J.-P., Humbert, M., Duymedjian, R.** (2009). Simulation, modélisation et décision : en pratique avec les tableurs Excel, Calc et gnumeric. Édition Vuibert, Paris., 271 p.
- Taha, H.A.** (2007). Operations research : an introduction. 8 ème edition. Pearson International (Printice Hall). London. 813 p.

Intégration de prix des matières premières dans l'optimisation de la formulation des aliments complets pour volaille

Par

Paul Malumba Kamba

Sommaire

Introduction.....	1
CHAPITRE 1 : LES APPROCHES DE FORMULATION DES ALIMENTS POUR VOLAILLES.....	3
1.1. Problématique de la formulation des aliments pour volailles.....	3
1.2. Différentes approches de formulation conceptuelle des aliments.....	3
1.3. Formalisation d'un problème de formulation par programmation linéaire.....	5
1.4. Principe algorithmique de résolution d'un programme de formulation.....	6
CHAPITRE 2 : ETUDE DU CAS DE L'INTEGRATION DES PRIX DES MATIERES PREMIERES DANS UNE DEMARCHE D'OPTIMISATION D'UN ALIMENT POUR POULES PONDEUSES	7
2.1. Les contraintes nutritionnelles employées.....	7
2.2. Les matières premières employées.....	8
2.3. Base des données des caractéristiques des matières premières.....	9
2.4. Les contraintes d'incorporation	11
2.5. Les prix des matières premières sélectionnées	11
2.6. Mise en équation du problème.....	13
2.7. La résolution du problème avec le solveur	13
CHAPITRE 3 : ANALYSE DES OPTIMA OBTENUS ET DE L'INFLUENCE DE L'EVOLUTION DES PRIX DES MATIERES PREMIERES.....	13
3.1. Présentation de l'optimum obtenu	13
3.2. Analyse de sensibilité d'un optimum	15
3.3. Evolution des optima avec les prix des matières premières.....	16
3.4. Evolution de prix des optima calculés	18
3.5. Analyse des complémentarités et substitutions dans la formulation.....	18
3.6. Comparaison des indices prix des optima avec l'indice ITAVI.....	19
CONCLUSION.....	21