

MODELISATION DYNAMIQUE DES FLUX LOGISTIQUES DE LA FILIERE AVICOLE FRANÇAISE DANS UN CONTEXTE D'INFLUENZA AVIAIRE

Thi LE HOA VO*

Résumé. - Ce travail vise à étudier les comportements d'une chaîne logistique tout au long d'une filière avicole menacée par des incertitudes fortes pesant aussi bien sur l'offre (propagation de l'influenza aviaire et effets sur l'élevage) que sur la demande (comportement imprévisible du consommateur et effets sur les ventes). Nous analysons la stabilité du système logistique dans un contexte de perturbations exogènes en développant un modèle de simulation continue de dynamique des systèmes de Forrester. Des simulations nous permettent d'observer les mécanismes prééminents pour différents scénarios concernant le degré de développement de l'influenza aviaire et l'évolution de la consommation ainsi que les politiques de régulation et décision. Des analyses de sensibilité sont également menées pour étudier l'influence des délais de réactivité dans la gestion des flux matières sur le comportement global de la filière. Les apports de ce travail pourraient éventuellement intéresser les décideurs d'autres filières agro-alimentaires qui doivent fréquemment faire face à des situations similaires.

Mots-clés : Filière avicole, Crise sanitaire, Influenza aviaire, Supply Chain Management, Dynamique des systèmes, Modélisation, Simulation.

1. Introduction

La France est le premier producteur européen de viande de volaille et le sixième dans le monde (derrière les Etats-Unis, la Chine, le Brésil, le Mexique et l'Inde) en tonnage¹. Les filières

* Université de Nantes, LEMNA- LARGECIA et Université de Rennes I, IGR-IAE, CREM, UMR CNRS 6211, 11 rue Jean Macé, CS 70803, 35708 Rennes Cedex 7, thi-le-hoa.vo@univ-rennes1.fr.

^{1, 2} Source : Xerfi, 2008.

avicoles françaises se singularisent par la diversité de leur production². Le poulet représente près de la moitié des tonnages produits. La production de dinde représente 25% de la production de volaille, 15% pour les filières canard et 2,5% pour la pintade en tonnage. La France est le second producteur mondial de canard et le premier en pintade. Nous nous intéressons particulièrement dans ce travail à la filière poulet standard car il est le plus demandé (près de 70% de la consommation) et la productivité des produits standards est la plus élevée (75% de la production de poulet de chair).

Toutefois, depuis quelques années, ces filières ont subi des crises sanitaires comme l'influenza aviaire et aussi des risques sanitaires émergents tels que les toxi-infections alimentaires de type *Campylobacter jejuni*. D'une part, ces problèmes sanitaires ont provoqué des conséquences économiques importantes dues à des défaillances du pilotage à différents niveaux de la chaîne logistique de la filière. Par exemple, en six mois de crise de l'influenza aviaire, l'ensemble de la filière avicole française a perdu environ le quart de son activité et les stocks excédentaires atteignent 50 000 tonnes². Les pertes de chiffre d'affaires sont importantes. Elles sont estimées à 40 millions d'euros par mois pendant la période de la crise pour l'ensemble de la filière³. D'autre part, la médiatisation des problèmes sanitaires, même non avérés, entraîne une perte de confiance du consommateur. Par conséquent, des baisses de ventes sur le marché français et des pertes de débouchés à l'exportation en découlent. De plus, l'inquiétude des décideurs de la filière porte essentiellement sur la fréquence de ces crises et sur leurs effets économiques à long terme.

Les incertitudes liées à l'environnement extérieur d'une chaîne logistique exigent aujourd'hui une gestion de plus en plus complexe de la chaîne globale. Dans notre cas particulier qui est celui de la filière avicole, ces incertitudes se caractérisent par des fluctuations simultanées de l'offre en amont et de la demande en aval. L'épizootie d'influenza aviaire influence d'abord la capacité de production en amont puis la consommation en aval de la chaîne par peur du consommateur face aux rumeurs médiatiques et du bouche à oreille⁴. Cela nécessite donc une gestion de la chaîne globale avec une coordination efficace des flux de matières et d'information entre les membres de la chaîne.

Par ailleurs, la modélisation et la simulation sont devenues des méthodes courantes d'amélioration et de pilotage de chaînes logistiques, notamment pour les chaînes qui sont dans des situations de déséquilibre et d'instabilité. De nombreux travaux portent, en effet, sur la modélisation formelle d'une *supply chain* comme le montre par exemple la classification par

² Biaggini, RIA (Revue de l'Industrie Agro-alimentaire), 2006

³ Source : Rapport du Sénat, 2006.

⁴ Exemple : CNADA, 2006, <http://www.influenza-h5n1.org/article-1947416.html> ou http://lemaraudeur82.club.fr/cariboost2/crbst_2.html

technique de recherche opérationnelle présentée par Min et Zhou (2002) ou encore la typologie des modèles de simulation proposée par Kelton et alii, (2002). Dans notre travail de recherche, nous avons choisi une approche fondée sur le paradigme forrestérien (1961) pour développer un modèle de dynamique des systèmes appliqué à la logistique de la filière avicole. Ce travail s'inscrit dans une logique suivie par certains chercheurs. Par exemple, dans le domaine de filières agro-alimentaires, à partir d'un modèle générique de simulation, Minegishi et Thiel, (2000) ont montré des phénomènes d'instabilité et les moyens de contrôler les systèmes de la filière face à des fluctuations importantes des ventes aux consommateurs. Par ailleurs, Kamath B. et Roy (2005) ont utilisé le formalisme de la dynamique des systèmes de Forrester (1961) pour représenter la structure de la chaîne logistique de produits à DLC (Dates Limites de Consommation) courtes. Dans leur recherche, ils ont montré que la performance de la chaîne pouvait être améliorée par un meilleur contrôle des boucles de rétroaction.

Notre recherche s'appuie tout d'abord sur des observations empiriques portant sur les acteurs de la filière avicole et les décisions logistiques à court terme. Cette approche préalable nous permet de construire un modèle des processus de décisions et des interactions entre les différents acteurs durant une crise sanitaire. Ce modèle élaboré à partir des principes de la dynamique des systèmes de Forrester a pour objectif d'étudier les comportements et les instabilités que peut rencontrer ce type de système complexe dans une situation de crise. Cette analyse nous permet de comprendre certains problèmes de gestion de flux logistiques et de proposer des pistes d'amélioration du pilotage de ce type de chaînes logistiques multi-échelons.

2. Problématique de la gestion des flux logistiques en situation de crise

Dans cette partie, nous allons révéler les problématiques particulières liées à la gestion des flux logistiques de cette chaîne spécifique durant la période de crise afin de définir les objectifs de la recherche.

Cette filière se caractérise par une grande complexité s'expliquant par les différents stades de transformation nécessaires pour aboutir à des produits consommables (simple abattage et vente en viande fraîche jusqu'à l'élaboration de plats cuisinés élaborés). La filière avicole en général et la filière « poulets standard » en particulier sont organisées en une succession de phases allant de la production primaire à la distribution et au consommateur final. Il s'agit d'une « chaîne logistique multi-échelons » qui présente la particularité d'un flux poussé en amont et d'un flux tiré en aval (Figure 1).

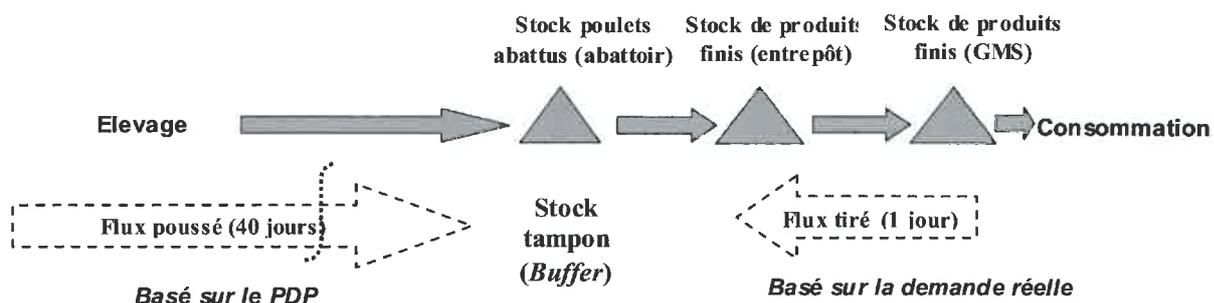


Figure 1 : Schéma des flux logistiques de la filière poulets standard.

De manière plus détaillée, les activités d'élevage en amont de la chaîne sont planifiées plusieurs semaines à l'avance à l'aide d'un Programme Directeur de Production⁵ (PDP), en tenant compte du stock existant. Dans cette filière intégrée et pour assurer une bonne qualité, les poulets standard vivants dans l'élevage doivent être abattus après un délai d'élevage fixé à 40 jours. En revanche, les opérations de fabrication des produits finis (poulets entiers, produits découpés et élaborés), dans les phases suivantes (découpe, transformation, conditionnement), sont lancées quotidiennement en fonction de la disponibilité de stock des matières premières et des demandes réelles. Cela montre que les flux physiques de la filière ont deux caractéristiques, en amont des flux poussés et en aval des flux tirés, impliquant une complexité dans la gestion des stocks et le pilotage des flux logistiques de cette filière. Chaque membre de cette filière est entièrement lié à un autre membre en amont et en aval ; la moindre défaillance de l'un des maillons pouvant entraîner des conséquences sur l'ensemble de la chaîne. Ce qui en fait une complexité structurelle de cette chaîne de valeur.

Par ailleurs, une complexité organisationnelle provient de la synchronisation entre le volume des stocks de poulets vivants et le volume des commandes client réelles. En effet, lorsque le volume de poulets vivants disponibles est inférieur à la demande actuelle, les entreprises d'abattage doivent faire appel à des fournisseurs extérieurs nationaux ou

⁵ Le PDP (ou *Master Production Schedule* (MPS) en anglais) a pour objectif de planifier les besoins en produits afin de satisfaire la demande finale. Il décompose d'abord les données agrégées (familles de produits) du Plan Industriel et Commercial (PIC) en références finales individuelles. Ensuite, il planifie sur un horizon plus court avec des sous-périodes plus fines la demande réelle et donc la production de chaque produit fini. Il révèle l'état des stocks disponibles par produit fini et leur évolution sur l'horizon de planification. Enfin, il déclenche le processus de calcul des besoins nets en références finales, puis en composants et matières (source : Logistique Conseil, <http://www.logistiqueconseil.org>).

internationaux (par importation). Par conséquent, ils doivent subir des coûts imprévus à cause de la différence de prix et des coûts de transport. En revanche, si le stock disponible de poulets abattus dépasse la demande réelle, les entreprises d'abattage doivent congeler (ou détruire) leurs produits après cinq jours en chambre froide en raison de la périssabilité de ces produits. Cela engendre des coûts supplémentaires par la perte et la dépréciation des produits.

Une autre complexité organisationnelle repose sur la succession de différents délais dits exponentiels⁶ tout au long de la filière. Différents délais dans la prise de décision comme par exemple, des durées d'ajustement de stock rendent la chaîne logistique des flux fortement non-linéaires. Ceux-ci engendrent des comportements imprévisibles de la chaîne (Paulré, 1985). Par exemple, l'ajustement des encours d'élevage dépend d'un certain nombre de facteurs (l'approvisionnement, les conditions d'élevage, la propagation de l'épizootie, etc.), la réactivité des décideurs correspondant à un comportement non-linéaire.

L'incertitude de l'environnement (demande versatile, offre dépendant de l'épizootie) ainsi que les complexités structurelles et organisationnelles nous amènent à étudier le comportement logistique à court terme de cette filière sous trois angles :

- ⇒ La stabilité de la filière face aux situations imprévisibles causées par cette crise.
- ⇒ L'influence des éléments d'ajustement en matière de gestion des flux logistiques sur le comportement global.
- ⇒ Une réflexion sur des problèmes de gestion des flux dans les chaînes logistiques multi-échelons à flux poussés en amont et tirés en aval, notamment les chaînes logistiques des produits périssables.

3. Modèle de dynamique des systèmes des flux logistiques de la filière avicole française

Dans ce travail de recherche, pour appréhender le comportement dynamique global de la filière avicole, il nous faut observer les comportements réels de chaque acteur de la filière et leurs interactions comportementales en vue d'analyser le comportement global de la filière entière perturbée par la crise de l'influenza aviaire. L'approche de la dynamique des systèmes de Forrester (1961) nous paraît la plus intéressante pour un système complexe dont le nombre

⁶ Les délais exponentiels au sens de Forrester sont des retards (*delays* en anglais) correspondant à une réponse d'une organisation suite à une sollicitation, réponse souvent non-linéaire.

d'éléments est très grand et où les interactions sont nombreuses et évoluent dans le temps comme c'est le cas d'une filière agro-alimentaire. En effet, selon Aracil (1984), en pratique, pour prévoir les valeurs les plus probables caractérisant un phénomène donné, on utilisera normalement des techniques statistiques tandis que, pour mieux comprendre un type de comportement d'un système sous des conditions données, l'emploi de la dynamique des systèmes est préférable. La simulation de dynamique des systèmes avec ses systèmes d'équations différentielles non-linéaires paraît l'approche la plus adaptée pour étudier le comportement complexe de l'ensemble de cette filière.

3.1 Principes de la dynamique des systèmes

La dynamique des systèmes, une approche systémique et une application de la théorie générale des systèmes aux systèmes économiques au sens large est souvent utilisée pour observer des évolutions et des tendances de façon macroscopique des systèmes. Développée par Jay W. Forrester (1958) avec les concepts fondamentaux de rétroaction et de délai qui déterminent le comportement du système, la dynamique des systèmes est devenue un outil important pour analyser et résoudre les problèmes complexes. Les applications contemporaines de la modélisation de dynamique des systèmes se retrouvent particulièrement dans les domaines aussi variés que la fluctuation et amplification de l'offre et de la demande, design et intégration de la chaîne logistique, politique de management et de développement.

La philosophie de la dynamique des systèmes est donc basée sur trois principes fondamentaux :

- ⇒ La structure détermine le comportement. La structure ici est une structure comportant les interrelations complexes entre les différentes parties de l'organisation et aussi les processus de la prise de décision humaine.
- ⇒ La structure des systèmes organisationnels comporte souvent les variables comportementales humaines comme la perception de la qualité, la satisfaction des utilisateurs, le moral, etc.
- ⇒ La modélisation de la dynamique des systèmes commence par l'identification des modes comportementaux de référence pour ensuite créer un diagramme de causalité représentant la structure sous-jacente afin d'expliquer ces modes de référence.

Les étapes principales de construction d'un modèle de dynamique des systèmes sont :

- ⇒ A partir de l'observation de la réalité d'un système, un diagramme de causalité sera réalisé permettant de la représenter en montrant les mécanismes dynamiques du système observé (Forrester, 1969). Dans ce diagramme, les arcs représentent la relation de causalité entre les variables, les causes (origines de l'arc) et leurs effets immédiats (extrémités terminales de l'arc)). Ces arcs sont polarisés et montrent le sens de l'influence : un signe (-) indique que si un changement dans la variable d'origine se produit, la variable de destination tend à changer en sens contraire et un signe (+) indique que les deux variables tendent à évoluer dans le même sens. Il existe généralement deux types de boucle causale dans un diagramme : les boucles homéostatiques ou négatives (qui contiennent un nombre impair des arcs négatifs) ont pour objectif de ramener le système vers un état d'équilibre et les boucles de rétrocontrôle positif (qui contiennent un nombre pair des arcs négatifs ou zéro arc négatif) ont tendance à amplifier les causes des phénomènes observés.
- ⇒ Basé sur ce diagramme, un modèle flux-stock sera développé en élaborant les formulations mathématiques, notamment les équations différentielles, qui décrivent les relations cause-effet pour toutes les variables et en construisant le diagramme flux-stock. Il y a deux types de variables essentiels, les *variables de stock* et les *variables de flux*. Les *variables de stock* expriment non seulement l'état du système mais aussi les intégrations dans le temps des flux d'entrée et de sortie représentés par les *variables de flux*. Il y a également les *variables auxiliaires* qui permettent de simplifier la formulation des interactions agissant sur une équation de flux. Le modèle flux-stock est donc une façon graphique permettant de représenter en détail la structure de la chaîne et les boucles de rétroaction présentées dans le diagramme de causalité.
- ⇒ Ce modèle sera lui-même simulé faisant donc objet d'expérimentation à travers la simulation. Les résultats de simulation vont nous permettre par induction de comprendre des phénomènes émergeant de ce système et ils serviront à proposer éventuellement des modifications nécessaires.

Nous allons appliquer cette démarche à la filière poulet standard (dont 60% poulets entiers (PE) et 40% des produits de découpe et élaborés (PDE)) afin d'étudier les comportements de gestion des flux logistiques de cette filière dans la partie suivante.

3.2 Construction du modèle

3.2.1 Description des mécanismes

La réalité de cette filière a été observée pendant les discussions avec les acteurs de la filière et les collections de données sur la production et la consommation pendant la crise de l'influenza aviaire en France entre octobre 2005 et mars 2006. En effet, nous avons réalisé quelques visites auprès des entreprises de quatre premiers groupes familiaux (LDC, Doux, Arrivé, Glon) et du premier groupe coopératif (Terrena) représentant 70% du chiffre d'affaires de toute la filière⁷. Ce sont des entreprises dont nous avons une bonne connaissance et avec lesquelles nous avons une relation relativement étroite grâce aux travaux en collaboration (ex : les formations d'ingénieur) et aux projets dans le domaine agro-alimentaire (ex : projet Regat⁸). Les informations sont recueillies pendant les discussions avec les dirigeants des entreprises, les visites d'usine et lors des réunions avec les représentants des entreprises. Ces discussions et visites se sont centrées sur la structure, les modes de fonctionnement et les réactions des entreprises face à la crise de l'influenza aviaire. Nous avons également procédé à quelques entretiens ouverts auprès des *stakeholders*⁹ de la filière, par exemple le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, l'Office de l'Élevage, l'Institut Technique de l'Aviculture (ITAVI), la Fédération des Industries Avicoles (FIA), etc.

Ensuite, nous avons effectué une collecte des données paramétriques sur la production et la consommation de la filière pendant la crise de l'influenza aviaire selon quelques sources d'information : Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques (Agreste/SCEES), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), World Health Organization, World Bank.

Les informations recueillies nous ont servi à déterminer la structuration de la filière, à caractériser les flux logistiques et à analyser la réactivité des acteurs de la chaîne lors de la crise. Les variables principales sont également définies avec leurs interactions formant les boucles de rétroaction mises en évidence par un diagramme de causalité. Nous avons identifié cinq boucles homéostatiques (négatives) principales (en réalité, nous avons observé qu'il existe 96 boucles dans le modèle proposé) (Figure 2) qui représentent les relations causales entre les variables endogènes sous l'influence de deux variables exogènes en amont et aval de la chaîne.

⁷ Source : Xerfi2008.

⁸ Source: Cluster West, <http://www.ouest-atlantique.eu/west.php>

⁹ *Stakeholders* : Dans ce travail, il s'agit des acteurs de la chaîne logistique et des organismes de la filière.

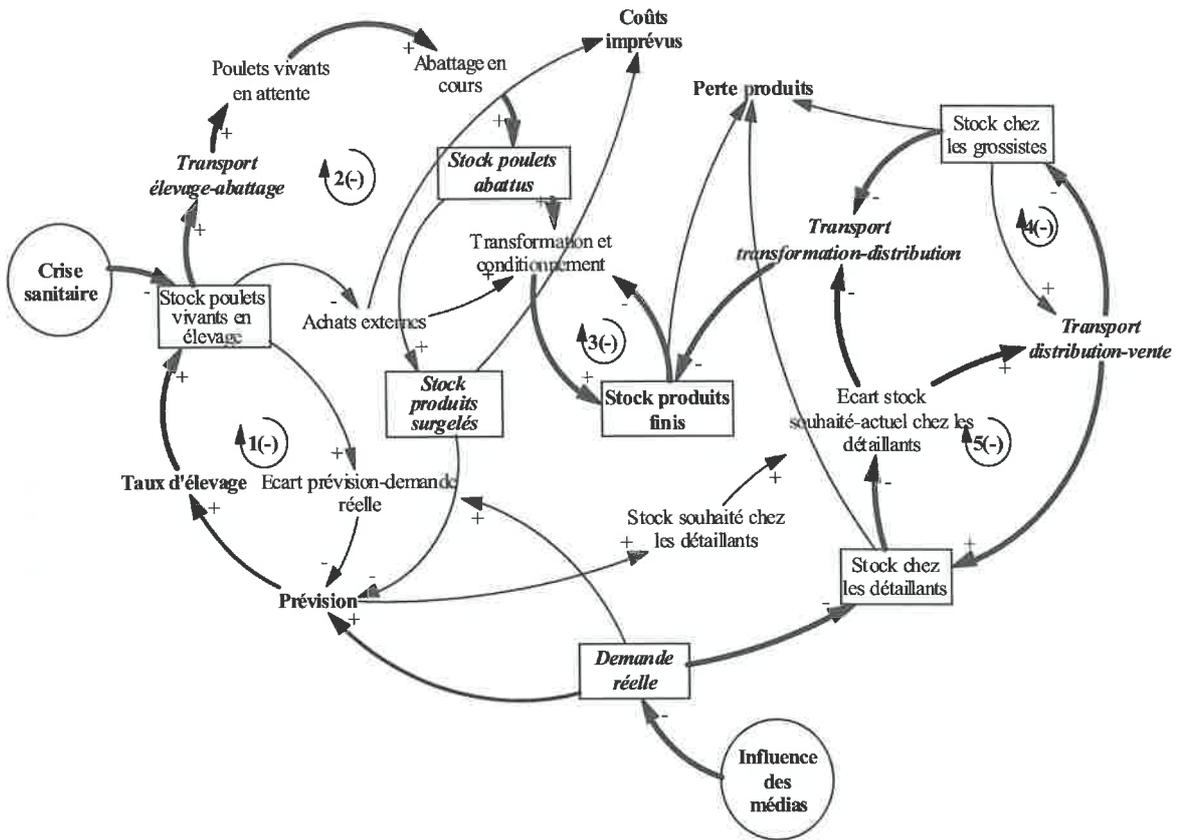


Figure 2 : Diagramme de causalité de la chaîne logistique de la filière.

Boucle 1 : Dynamique de l'élevage de poulets vivants

Cette boucle permet d'ajuster les encours d'élevage de poulets et par la suite les poulets matures prêts à abattre. Néanmoins, à cause d'un long cycle de production (55 jours), les effets correcteurs de cette boucle sur le taux d'élevage se font à longue échéance. C'est pour cela que les achats externes sont réalisés à ce niveau lorsqu'il n'y a pas assez de poulets matures (poulets vivants de 40 jours) pour l'abattage.

Boucles 2 et Boucle 3 : Dynamique de l'abattage et de la fabrication des produits finis

L'objectif de la Boucle 2 est de réduire au maximum le surplus de produits finis non-livrés par rapport à la demande réelle afin de minimiser les pertes de produits finis par la congélation car ce système permet de prolonger le cycle de vie des produits frais.

La boucle 3 permet de régulariser le niveau de stock des produits finis en modifiant le volume de fabrication. Lorsque le niveau de stock des produits finis dépasse les besoins, le volume de fabrication sera baissé et en revanche, ce volume sera augmenté quand il n'y a pas assez de produits en stock.

Boucle 4 et Boucle 5 : Dynamique logistique selon la distribution et les ventes

La boucle 4 permet donc un ajustement du volume transporté de produits finis vers les détaillants par le niveau de stock chez les grossistes. La boucle 5 permet d'ajuster ce volume par l'écart entre le niveau de stock souhaité et le stock réel chez les détaillants.

3.2.2 Formalisation mathématique des politiques de décision

De ce diagramme des causalités, nous proposons des équations différentielles permettant de caractériser notre modèle s'inspirant du modèle générique de la chaîne logistique de Sterman (2000). L'originalité de notre modèle est d'une part la représentation d'une structure particulière de cette chaîne logistique de type push-pull de produits périssables et d'autre part la prise en compte des perturbations simultanées en amont et en aval de la chaîne.

Politiques de prévision et d'approvisionnement

Comme nous l'avons expliqué dans les parties précédentes, le taux de lancement en élevage en amont dépend du taux d'approvisionnement en élevage calculé en se basant sur la prévision et le niveau de stock de poulets surgelés. La prévision pour les produits PE et PDE est calculée en se basant sur un historique fixé par un lissage exponentiel de la demande du client final :

$$\text{Prevision}(t) = \int_0^t \frac{\text{Demande_Client}(t) - \text{Prevision}(t-dt)}{\text{Delai_Prevision}} dt + \text{Prevision}(t_0)$$

$$\text{Demande_Client}(t) = \text{Demande_Client_Initiale} * \text{Tx_Aleas}(t)$$

Avec :

Prevision (t) : Quantité prévisionnelle des ventes futures à l'instant t

Prevision (t-dt) : Quantité prévisionnelle des ventes futures à l'instant t-dt

Prevision (t₀) : Valeur initiale de la prévision égale à la demande commerciale.

Delai_Prevision : Délai de prévision (7 jours)

Demande_Client (t) : Demande du client final à l'instant t

Demande_Client_Initiale : Demande du client final au début de la simulation

Tx_Aleas (t) : Taux d'influence des bruits sur la commercialisation à l'instant t

Le taux d'approvisionnement en élevage est ensuite calculé sur la base de la différence entre la prévision et le niveau de stock de poulets abattus non utilisés et surgelés par la suite :

$$\text{Tx_Appro_Total (t)} = \text{Prevision (t)} - \text{Stock_Poulets_Surgelés (t)}$$

Avec :

Tx_Appro_Total (t) : Taux d'approvisionnement en élevage à l'instant t

Prevision (t) : Quantité prévisionnelle des ventes futures à l'instant t

Stock_Poulets_Surgelés (t) : Niveau de stock de poulets surgelés à l'instant t

Ajustement du niveau des encours et des stocks

Le niveau des encours d'élevage est ajusté par une régulation du niveau réel des encours d'élevage jusqu'à l'atteinte du niveau souhaité par les éleveurs après un certain délai d'ajustement. Pour déterminer ce niveau, il est d'abord nécessaire de définir le niveau souhaité de ces encours en se basant sur le taux d'élevage souhaité en tenant compte de la durée d'élevage :

$$\text{Encours_Elevage_Souhaite (t)} = \text{Tx_Elevage_Souhaite (t)} * \text{Delai_Elevage}$$

$$\text{Tx_Elevage_Souhaite (t)} = \text{Tx_Appro_Total (t)}$$

Avec :

Encours_Elevage_Souhaite (t) : Quantité des encours d'élevage souhaitée à l'instant t

Tx_Elevage_Souhaite (t) : Taux d'élevage souhaité à l'instant t

Tx_Appro_Total (t) : Taux d'approvisionnement en à l'instant t

Delai_Elevage : Durée d'élevage (40 jours)

L'ajustement des encours d'élevage est donc calculé par l'équation suivante :

$$Ajustement_Encours_Elevage(t) = \frac{Encours_Elevage_Desire(t) - Encours_Elevage(t)}{Delai_Ajust_Encours_Elevage}$$

Avec :

Ajustement_Encours_Elevage (t) :	Quantité ajustée des encours d'élevage à l'instant t
Encours_Elevage_Souhaites (t) :	Quantité souhaitée des encours d'élevage à l'instant t
Encours_Elevage (t) :	Niveau réel des encours d'élevage à l'instant t
Delai_Ajust_Encours_Elevage :	Délai d'ajustement des encours d'élevage (55 jours)

Le niveau de stock à chaque échelon de la chaîne (stock de produits finis, stock chez les grossistes et stock chez les détaillants) est défini par :

$$Stock_Echelon(t) = \int_0^t [Tx_Recept(t) - Tx_Livraison(t)] dt + Stock_Echelon(t_0)$$

Avec :

Stock_Echelon(t) :	Niveau de stock à chaque échelon de la chaîne à l'instant t
Tx_Recept(t) :	Taux de réception de produits finis à chaque échelon à l'instant t
Tx_Livraison(t) :	Taux de livraison de produits finis à chaque échelon à l'instant t
Stock_Echelon(t ₀) :	Valeur initiale du niveau de stock à chaque échelon

Performance économique

La filière subit des coûts imprévus lorsque :

- ⇒ il est nécessaire d'acheter les poulets entiers sur le marché extérieur à cause de la différence de prix et les coûts de transport,
- ⇒ il y a des poulets non utilisés surgelés. Cela engendre le coût de stockage des poulets surgelés.

$$Coûts_Imprevus(t) = Achats_Externes(t) * Cout_Unitaire_Achat + Stock_Surgelation(t) * Cout_Unitaire_Surgelation$$

Avec :

Achats_Externes(t) :	Quantité de produits achetés sur le marché extérieur à l'instant t
Cout_Unitaire_Achat :	Prix d'une tonne de produits achetés
Stock_Surgelation(t) :	Niveau de stock de surgélation à l'instant t
Cout_Unitaire_Surgelation :	Coût d'une tonne de produits surgelés

A cause de la périssabilité des produits, la chaîne doit subir également des pertes de produits arrivés à expiration dans le stock de produits finis ; stock chez les grossistes et chez les détaillants. Dans notre modèle, le délai de stockage est fixé à 7 jours maximum pour les produits PE et à 14 jours pour les produits PDE.

$$\text{Perte_Produits}(t) = (\text{IF TIME}>7 \text{ THEN Stock_Echelon_PE}(t)/7 \text{ ELSE } 0) + (\text{IF TIME}>14 \text{ THEN Stock_Echelon_PDE}(t)/14 \text{ ELSE } 0)$$

Avec :

Perte_Produits(t) :	Pertes des produits expirés à l'instant t
Stock-Echelon_PE(t) :	Niveau de stock à chaque échelon de la chaîne pour les produits PE à l'instant t
Stock-Echelon_PDE(t) :	Niveau de stock à chaque échelon de la chaîne pour les produits PDE à l'instant t.

3.2.3 Architecture globale du modèle flux-stock proposé

Basé sur le diagramme de causalité et les formulations mathématiques, le modèle de dynamique des systèmes est construit à l'aide du logiciel de simulation dynamique Ithink®. Dans la Figure 3, nous présentons la structure générale du modèle. Ces systèmes sont représentés par quelques composants principaux : demande et planification, élevage, abattage, transformation et produits finis, transport et distribution des deux types de produits finis, vente, secteur de régulation (ajustement des stocks et des commandes en attente), mesures de performance économique (coûts imprévus et pertes de produits). Ces composants sont liés entre eux par les flèches qui représentent les flux de matière, d'information et de décision.

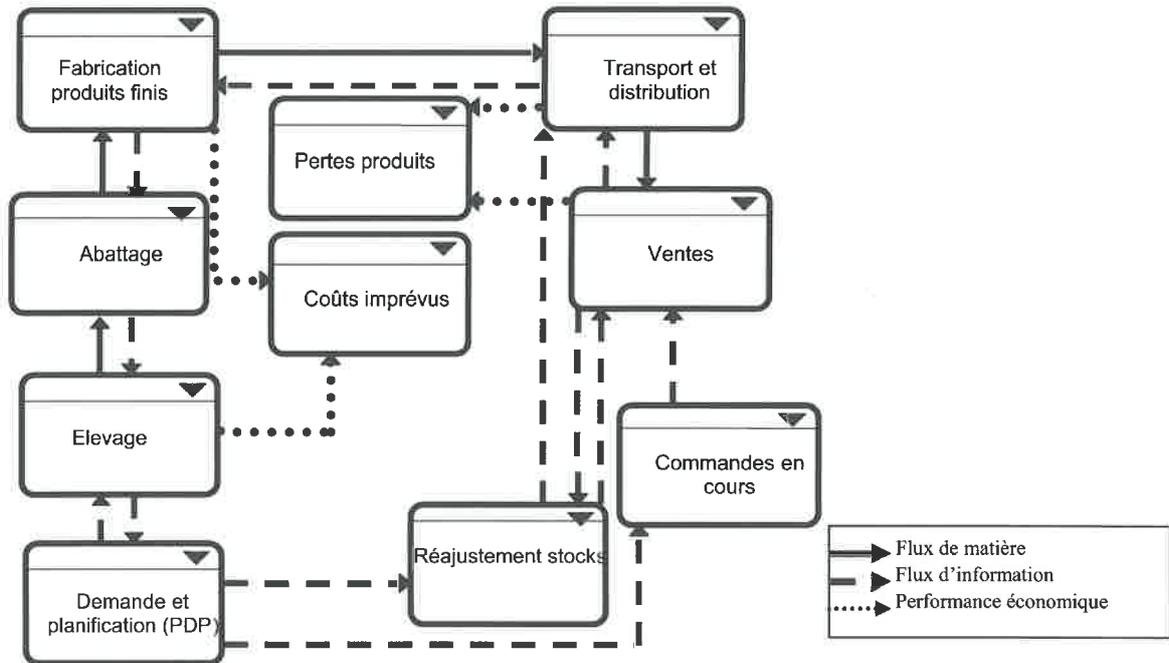


Figure 3. Architecture générale du modèle de la chaîne logistique de la filière avicole.

3.3 Analyse des résultats de simulation

Dans cette partie, nous allons d'abord analyser le comportement de la chaîne logistique de la filière avicole face à la crise de l'influenza aviaire entre octobre 2005 et mars 2006. Ensuite, nous allons présenter les analyses de sensibilité de la chaîne logistique sous différents scénarios de perturbations exogènes et de politiques de régulation et décision. Ces analyses nous permettront de mieux comprendre cette dynamique complexe puis de proposer des améliorations nécessaires de mécanismes de régulation pour la chaîne logistique afin de faire face à des situations de crise.

3.3.1 Essai de compréhension des comportements logistiques durant la crise à l'aide de la simulation

Nous allons analyser le comportement de la chaîne logistique de la filière avicole pendant la crise de l'influenza aviaire. La Figure 4 montre l'évolution du *taux d'approvisionnement total* et du volume des poulets matures sortis de l'élevage (*poulets vivants disponibles*) en fonction de la variation de la *demande réelle* et de l'influence de l'influenza aviaire en élevage pendant la crise.

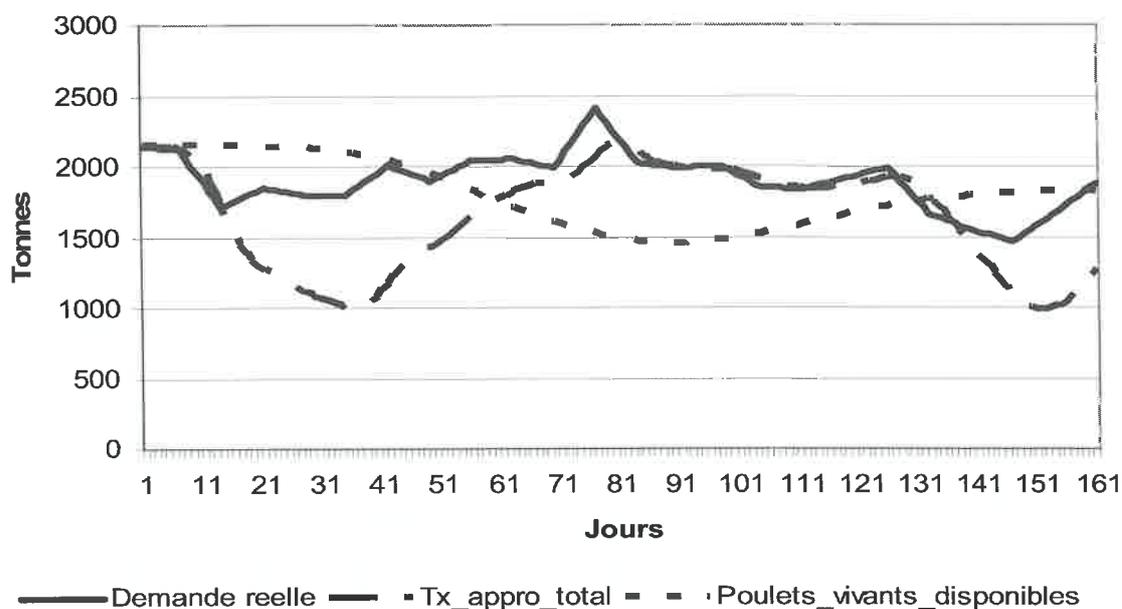


Figure 4 : Variation de l'approvisionnement et de la quantité d'élevage pendant la crise.

Nous pouvons voir dans la Figure 4 que les deux courbes du *taux d'approvisionnement total* et de la quantité des *poulets vivants disponibles* n'ont pas la même forme que la courbe de la *demande réelle*. Par exemple, la demande baisse dès le début de la simulation mais elle commence à augmenter fortement de 1.984 tonnes au 69^e jour de simulation à 2.409 tonnes au 76^e jour. La production reste encore à un niveau très élevé lorsque la demande baisse au début de la simulation. Cependant, alors que la demande augmente, la production commence à baisser et reste à un niveau inférieur à la demande. Les longs délais d'approvisionnement (7 jours), d'élevage (40 jours) et de vide sanitaire¹⁰ (15 jours) sont la cause principale de cette différence. En effet, ces longs délais provoquent des difficultés pour les acteurs de la chaîne en amont qui doivent réajuster la production pour l'adapter à la variation quotidienne de la demande.

Pour faire face à cet écart entre la production et la demande, la solution consiste à surgeler les poulets abattus lorsqu'il n'y a pas assez de demande et à faire appel à des *achats externes* si la production est insuffisante. Par conséquent, le *stock de poulets surgelés* et la quantité d'*Achats externes* varient en fonction de cet écart (Figure 5). Dans cette Figure, nous pouvons observer que le niveau de *stock de poulets surgelés* atteint son niveau maximum à 814 tonnes au 35^e jour et le volume des *achats externes* reste toujours à 0. Inversement, le volume des *achats externes*

commence à augmenter et atteint 677 tonnes au 81^e jour alors que le *stock de poulets surgelés* descend à son plus bas niveau de 13 tonnes au 127^e jour pendant la période de la crise (161 jours). La totalité du stock de poulets surgelés pendant la période de crise dans ce modèle de simulation est 43.348 tonnes et celle des achats externes est de 26.247 tonnes.

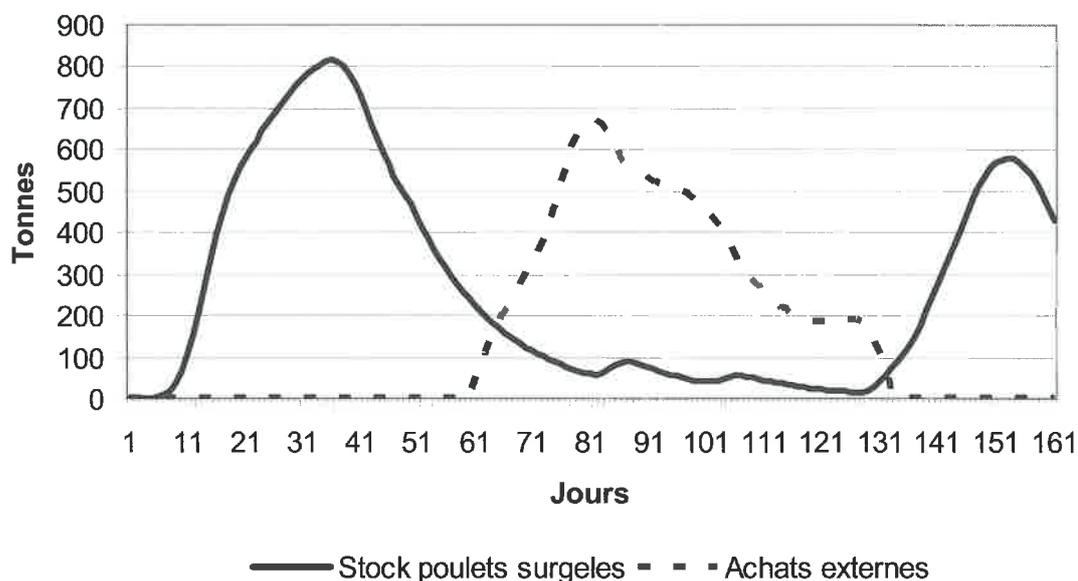


Figure 5. Variation du niveau de stock de poulets surgelés et des achats externes pendant la crise.

Ces fluctuations du niveau de *stock de poulets surgelés* et d'*achats externes* provoquent des *coûts imprévus* pour la chaîne. Ces coûts imprévus totaux pour toute la période ont atteint 23,4 millions d'euros.

Cette analyse nous a donc permis de comprendre le comportement dynamique de la chaîne logistique pendant la crise de l'influenza aviaire de 2005-2006. Les résultats de la simulation montrent qu'en réalité, la politique de réactivité des acteurs de la chaîne, consistant à faire appel à la surgélation et aux *achats externes* pour faire face à la variation de la demande et à la fluctuation de la production, a provoqué des pertes de produits et des coûts supplémentaires considérables. Cela nécessite des politiques plus pertinentes pour, non seulement réagir de manière efficace à des situations de crise, mais aussi améliorer la performance de la chaîne. C'est pour cette raison que nous allons continuer à étudier dans la partie suivante la sensibilité de la

¹⁰ Le nettoyage et la désinfection des bâtiments après l'enlèvement de la bande de poulets matures (de 40 jours).

chaîne logistique, son adaptabilité et les mécanismes de régulation sous différents scénarios de crise.

3.3.2 Analyse des politiques de décision de production en amont

Pour minimiser les coûts imprévus, nous proposons d'agir sur la prise de décision de production en élevage. Nous proposons dans cette partie cinq scénarios correspondant à différentes politiques de décision fréquemment observées dans les entreprises en général. Ces scénarios représentent différents types de réaction au niveau de la quantité d'élevage. Ils sont basés sur le ratio entre les *encours élevage actuels* et les *encours élevage souhaités* pour faire face aux perturbations de l'environnement pendant la période de crise. Si la valeur de ce ratio change, le *taux de sortie d'élevage* doit être proportionnellement diminué ou augmenté. Ces cinq scénarios correspondent donc aux différentes pratiques empiriques représentant chaque type de réaction des décideurs :

- ⇒ Scénario 1 : Les encours d'élevage sont réajustés proportionnellement aux variations de la demande.
- ⇒ Scénario 2 : La quantité produite baisse fortement au début et à la fin de la simulation mais elle est quasi stable au milieu de la période. Par ailleurs, dans ce scénario, si le niveau des encours d'élevage actuel est égal au niveau des encours souhaités, la réaction des décideurs consisterait à réduire la production. Cela n'est pas une réaction habituelle mais elle est quelquefois utile pour raison de « sécurité » par exemple (pour éviter les surstocks).
- ⇒ Scénario 3 : La quantité de production est globalement stable.
- ⇒ Scénarios 4 et 5 : La quantité de production est fortement modifiée.

Le Tableau 1 montre les résultats de la simulation pour chaque scénario.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
Stock poulets surgelés (tonnes)	22.894	27.317	25.504	22.819	23.925
Achats externes (tonnes)	7.693	9.298	8.400	6.288	5.179
Coûts imprévus (millions d'euros)	7,2	8,8	7,9	6,2	5,3

Tableau 1 : Résultats des scénarios.

Comme nous pouvons l'observer dans le tableau ci-dessus, pour réduire fortement les *achats externes*, une réaction très forte des décideurs en cas de reprise de la demande

correspondant à un scénario d'anticipation de la production (scénario 5) s'avère la plus intéressante. Le scénario 4 n'anticipe pas suffisamment la demande puisque le volume des *achats externes* reste quasi identique au scénario 5. Ceci est dû à des réajustements plus modérés voire proportionnels aux variations de la demande. Ainsi le scénario 4 génère le moins de surgélation de produits.

Le scénario 2 consistant à ne pas réagir quand les stocks varient de +/- 40% par rapport aux objectifs est le scénario le moins rentable car il nécessite de congeler plus de produits. C'est également le cas pour le scénario 3 qui agit très peu sur les stocks en cas d'augmentation de la demande.

Nos observations ont montré que durant la crise sanitaire observée, cette chaîne logistique est très sensible aux décisions de réduction de la production en cas de stock suffisant et beaucoup moins sensible à la réaction en cas de stock insuffisant. Cela conduit à une production (par exemple le scénario 2 est un scénario passif par rapport aux scénarios 1, 3 et 4) et à un besoin d'*achats externes* assez semblables. Ce n'est que le scénario 5 qui déclenche une réelle amélioration des coûts grâce à une bonne anticipation des décideurs de la situation.

3.3.3 Etude de sensibilité du modèle

Cette étude nous permettra d'analyser la stabilité de la chaîne logistique face à différentes variations des entrées du modèle et l'adaptabilité du modèle aux variations des paramètres internes de la chaîne.

Réponses du système face à différents types de fluctuation des variables exogènes

La chaîne logistique est influencée à la fois par la propagation de l'influenza aviaire dans l'élevage en amont et par la variation de la consommation en aval. Les facteurs exogènes de la crise sont donc représentés par deux variables principales dans notre modèle : *Demande réelle* et *Crise sanitaire*.

Nous allons examiner les effets de différents degrés de fluctuation de ces deux variables sur le comportement du modèle selon trois types d'évolution (Tableau 2).

Types d'évolution	Description
<i>a. Variations brutales et durables</i>	- Une diminution brutale et durable de la consommation en aval suite à une augmentation brutale et durable de la propagation de l'influenza aviaire en amont (type <i>Step</i> négatif ). - Une augmentation brutale et durable de la consommation en aval suite à une diminution brutale et durable de la propagation de l'influenza aviaire en amont (type <i>Step</i> positif ).
<i>b. Variations exceptionnelles et répétitives</i>	- Des diminutions répétitives sur une courte durée de la consommation en aval suite à des augmentations répétitives sur une courte durée de la propagation de l'influenza aviaire en amont (type <i>Pulse</i> négatif ). - Des augmentations répétitives sur une courte durée de la consommation en aval suite à des diminutions répétitives sur une courte durée de la propagation de l'influenza aviaire en amont (type <i>Pulse</i> positif ).
<i>c. Variations aléatoires</i>	- Des aléas dans la consommation en aval et la propagation de l'influenza aviaire en amont (types <i>Random</i> négatif et positif  .

Tableau 2 : Les différents types de fluctuation des variables exogènes.

- ⇒ Pour les variations brutales et permanentes : La chaîne s'adapte plus facilement à une augmentation légère de la consommation suite à une diminution de l'influence de la propagation de l'influenza aviaire en élevage. La chaîne arrive à assurer son équilibre face aux baisses de la consommation et à l'augmentation de la propagation du virus en élevage.
- ⇒ Pour les variations exceptionnelles et répétitives : La chaîne réagit mieux face aux plus faibles variations (+/- 10%). Il y a une grande différence du niveau de stock chez les grossistes et les détaillants lorsque l'amplitude des variations est plus élevée.
- ⇒ Pour les variations aléatoires : La chaîne réagit mieux face aux variations de faible amplitude (+/- 10%). Elle arrive à assurer une stabilisation au niveau des achats externes quel que soit l'amplitude des aléas.

Réponse du système face à des variations des délais d'ajustement

Selon Towill (1996), le principe de la réduction des délais est d'aider les décideurs à réagir rapidement et de manière efficace aux changements de la demande et de pouvoir prévoir la

progression de la performance globale de la chaîne. Notre objectif dans cette partie est d'analyser l'influence des différents délais sur le comportement de la chaîne afin de proposer des modifications pour améliorer la performance de la chaîne.

En augmentant le délai d'ajustement demande d'1 jour à 13 jours, le niveau de *stock de poulets surgelés* augmente progressivement tandis que le volume des *achats externes* diminue légèrement. Par conséquent, les *coûts imprévus* dûs aux *stocks de poulets surgelés* et *achats externes* ont graduellement baissé. Nous pouvons constater que la chaîne logistique peut limiter légèrement les *achats externes* et réduire les *coûts imprévus* avec un *délai d'ajustement demande* plus long.

Une réduction du *délai d'élevage* de 5 jours pour répondre plus rapidement à la variation quotidienne de la demande peut réduire le volume des *achats externes*. Néanmoins, cela engendre une augmentation du *stock de poulets surgelés* lorsqu'il y a une baisse de la consommation. En revanche, une augmentation du *délai d'élevage* de 5 jours peut réduire significativement le *stock de poulets surgelés* sans augmenter les *coûts imprévus* car les *achats externes* restent quasiment constants. Cela veut dire qu'une prolongation du *délai d'élevage* peut être une solution pour faire face aux variations de la demande pendant la crise. Cependant, en réalité, ce délai est figé pour des raisons de qualité.

Une très courte durée (1 jour) du stock tampon peut provoquer à la fois un surstock considérable de poulets surgelés et une augmentation très élevée des *achats externes* et donc un grand surcoût pour la chaîne. En revanche, une prolongation du *délai d'ajustement de surgélation* peut réduire de manière efficace, non seulement le niveau de *stock de poulets surgelés*, mais aussi le besoin d'*achats externes*. Néanmoins, en réalité nous ne pouvons pas prolonger ce délai à cause de la contrainte de qualité pour les produits frais.

Une réponse plus rapide aux commandes en attente (une demi-journée au lieu d'un jour) peut aider à réduire très légèrement le niveau de *stock chez les détaillants*, mais un délai plus long d'une demi-journée seulement (un jour et demi au lieu d'un jour) peut causer une forte augmentation (de 50%) pour ce niveau de stock.

3.4 Résultats clés en termes d'amélioration du pilotage logistique

Nos principaux résultats de recherche obtenus montrent qu'à court terme, la chaîne logistique est capable de réagir pour faire face à des perturbations de l'environnement grâce à des modifications de sa politique de régulation du volume disponible de produits finis. Cette politique repose sur l'utilisation des stocks de surgélation lorsqu'il y a des surproductions ou sur la sous-traitance pour répondre à des problèmes de manque de produits. Néanmoins, cette

politique provoque des problèmes de performance à cause des pertes de produits (produits surgelés non-utilisables) et des coûts supplémentaires dûs à des surcoûts de produits achetés sur le marché externe.

Par ailleurs, les résultats de simulation ont montré que les fluctuations de la demande client et de la production sont progressivement amplifiées à chaque phase de la chaîne logistique et affectent la stabilité et la performance de toute la chaîne. De plus, le comportement global de la chaîne logistique est influencé non seulement par les facteurs environnementaux exogènes mais aussi par les facteurs de contrôle endogènes tels que les délais d'ajustement, les politiques d'approvisionnement et le partage des informations. En ajustant ces facteurs endogènes, il est possible de réduire les conséquences liées aux facteurs exogènes de la chaîne logistique.

Nos observations montrent également d'autres résultats intéressants comme par exemple que le comportement de la chaîne logistique est très réactif aux politiques de réduction rapide de la production en amont dans le cas de stocks excessifs mais, est moins réactif à une augmentation de volume de production augmentée lors de stocks insuffisants. Nos résultats les plus originaux suggèrent donc une politique de décision consistant à fortement anticiper la production ce qui peut aider la chaîne logistique à faire face efficacement à une situation de crise.

Enfin, grâce à l'approche de la dynamique des systèmes, notre recherche a pu porter un « regard » économique sur les comportements des acteurs des filières agro-alimentaires, particulièrement la filière avicole en crise, qui n'ont pas été mentionnés dans d'autres travaux de recherche s'intéressant à la gestion des chaînes logistiques agro-alimentaires (Filser, 2001 ; Lossouarn, 2003 ; Raynaud et *alii*, 2005 ; Marouseau, 2007). Il est en effet plus courant d'observer des recherches proposant des modèles permettant d'améliorer la performance par différents outils de restructuration de la chaîne ou de politiques d'optimisation, plutôt que d'analyser le comportement dynamique globale d'une chaîne logistique soumise à la fois à des perturbations en amont et en aval (Vorst van der et *alii*, 2000 ; Erkoç et *alii*, 2005 ; Kamath et Roy, 2007). C'est pour ces raisons que la dynamique des systèmes nous a paru la méthode la plus pertinente pour mener notre recherche et une analyse de la dynamique de la chaîne logistique globale en général.

4. Conclusion

Cette recherche vise à améliorer la connaissance des comportements dynamiques de la chaîne logistique particulière d'une filière avicole soumise à la crise de l'influenza aviaire durant la période d'octobre 2005 à mars 2006. Un modèle de dynamique des systèmes basé sur les

principes de Forrester a permis d'analyser la stabilité de cette chaîne et les variations des coûts imprévus dans ce contexte de « double » perturbation exogène non symétrique. Le comportement de cette chaîne logistique a été étudié et discuté montrant qu'un modèle de dynamique des systèmes permet d'améliorer notre compréhension de cette problématique du pilotage, et qu'il pourrait être utile comme outil d'aide à la décision pour le management de la chaîne logistique. L'accent a été mis sur l'étude de l'influence des mécanismes de régulation et de décision sur le comportement global de la chaîne logistique. Par conséquent, ce modèle de dynamique des systèmes pourrait être appliqué à d'autres filières agro-alimentaires comme la filière bovine ou la filière porcine confrontées à différentes crises sanitaires. En effet, notre modèle de représentation nous paraît pertinent pour représenter les mécanismes de fonctionnement de leur chaîne logistique en cas de crise afin de faire face à diverses perturbations. Pour le futur, nous nous intéressons à une extension de notre modèle actuel par un couplage entre le modèle continu de flux logistiques des systèmes et deux modèles de simulation discrète représentant les perturbations exogènes simultanées de l'offre et de la demande. Il s'agira de faire interagir simultanément les évolutions provenant de ces trois composants dynamiques. Par ailleurs, il nous paraît judicieux d'étudier les effets sur la chaîne logistique d'une perturbation chaotique et d'analyser des phénomènes éventuels d'auto-organisation.

5. Bibliographie

- Aracil, J., 1984. Introduction à la dynamique des systèmes. Presses Universitaires de Lyon, p.201-237.
- Biaggini, F., 2006. Volaille, la crise couve. *Revue de l'Industrie Agro-alimentaire*, n°668, p.6-7.
- Erkoc, M., Lakovou E.T., Spaulding A.E., 2005. Multi-stage onboard inventory management policies for food and beverage items in cruise liner operations. *Journal of Food Engineering*, vol.70, n°3, p.269-279.
- Filser, M., 2001. Crise alimentaire ou crise du marketing ? *Revue Française du Marketing*, n°183/184, p.11-19.
- Forrester J.W., 1958. *Industrial Dynamics : A Major Breakthrough for Decision Makers*. Harvard Business Review, vol.36, n°4, p.37-66.
- Forrester, J.W., 1961. *Industrial Dynamics*. Portland (OR): Productivity Press.
- Forrester, J. W., 1969. *Industrial Dynamics*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 6th edition.
- Kamath, B.N., Roy R., 2007. Capacity Augmentation of a Supply Chain for a Short Lifecycle Product: A System Dynamics Framework. *European Journal of Operational Research*, vol.179, n°2, p.334-351.
- Kelton, W. D., Sadowski, R. P. et Sadowski, D. A., 2002. *Simulation with Arena*, 2ème édition, McGraw-Hill, New York.
- Lossouarn, J., 2003. Stratégies dans les filières animales. *INRA Productions Animales*, n°16, p.317-324.

- Marouseau, G., 2007. Information et management des risques face à la crise de la grippe aviaire. Colloque AIM « Instabilité des Systèmes d'Information et de Décision dans les Organisations », juin 2007, ENTIAA, Nantes.
- Min, H. et Zhou, G., 2002. Supply Chain Modelling: Past, Present and Future. *Computers and Industrial Engineering*, Pergamon Press, Inc., n°43, p.231-249.
- Minegishi, S., Thiel, D., 2000. System Dynamics Modelling and Simulation of a Particular Food Supply Chain. *Simulation Practice and Theory*, vol.8, n°5, p.321-339.
- Paulré, B., 1985. La causalité en économie: Signification et portée de la modélisation structurelle. Lyon: Presse universitaires de Lyon.
- Raynaud, E., Sauvée, L. et Valceschini, E., 2005. Signaler et garantir la qualité du produit : La gouvernance des transactions dans les filières agro-alimentaires, FaçSADe, INRA, n°22.
- Sterman, J.D., 2000. *Business Dynamics : Systems Thinking and Modelling for a Complex World*. Boston, Mass.: Irwin/McGraw-Hill. 982.
- Thiel, D., 1998. La dynamique des systèmes: Complexité et chaos. Eds. Hermès, collection systèmes complexes.
- Towill, D.R., 1996. Time Compression and Supply Chain Management- a Guided Tour. *Supply Chain Management*, vol.1, n°1, p.15-27.
- Vorst, van der, J.G.A.J., Beulens A.J.M, van Beek P. 2000. Modelling and simulating multi-echelon food systems. *European Journal of Operational Research*, vol.122, n°2, p.354-366.