

CIGI 2011

Stratégie de planification et risque sanitaire dans les chaînes agroalimentaires à flux poussés-tirés

DANIEL THIEL¹, THI LE HOA VO², VINCENT HOVELAQUE³

¹ UMR CNRS 7234, CEPN, UNIVERSITE DE PARIS 13, PRES SORBONNE PARIS CITE
99 avenue Jean-Baptiste Clément 93430 Villetaneuse, France
daniel.thiel@univ-paris13.fr

² UMR CNRS 6211 CREM, IAE-IGR, UNIVERSITE DE RENNES 1
11 rue Jean Macé CS 70803, 35708 Rennes Cedex 7, France
thi-le-hoa.vo@univ-rennes1.fr

³ UPSP LARGEZIA, ONIRIS NANTES, PRES L'UNAM
rue de la Géraudière BP 82225, 44322 Nantes Cedex 3, France
vincent.hovelaque@oniris-nantes.fr

Résumé – Dans cet article, nous nous intéressons aux entreprises agroalimentaires subissant une forte variabilité de la demande (liée à une crise par exemple) et contraintes par un approvisionnement poussé (exemple de l'élevage de volailles standard en 40 jours). Dans cette configuration, les industriels sont amenés soit à supporter des stocks (en cas de chute de la demande) tout en évitant leur péremption ; soit à avoir recours à des achats externes en cas de rupture de stocks. Dans les deux cas, ces stratégies reposent sur leur capacité à prévoir l'évolution de la demande, et donc à élaborer un Programme Directeur de Production (PDP) fiable. Au niveau applicatif, nous avons construit un modèle de simulation de la chaîne logistique de la filière avicole française faisant face à la crise de l'Influenza Aviaire de 2005-2006. Nous avons pris l'hypothèse d'un PDP construit à partir d'un modèle de diffusion de type « bouche-à-oreille » (*word-of-mouth*) qui a tout son sens dans un contexte de crise sanitaire. Nous avons constaté une relation non linéaire entre le risque sanitaire (qui augmente en fonction du stock de volailles abattues et la durée de stockage) et la quantité de produits achetés (en cas de faible production expliquée par un PDP insuffisant élaboré 40 jours avant le besoin commercial). Par ailleurs, le modèle devient instable quand le niveau de stock tampon de volailles abattues après élevage est trop bas. En résumé, cette recherche s'est intéressée au calibrage d'un modèle de planification visant à minimiser simultanément les coûts supplémentaires d'achat et les stocks excédentaires de produits périssables provoquant un risque sanitaire.

Abstract – This paper concerns food industries which are faced with high variations on fresh produce demand (in case of food crisis for instance) and a push production (due for example to a 40 days chicken breeding time). In this configuration, these companies have to simultaneously manage excessive shelf-life stocks (in case of demand falling) and external purchases due to inventory shortages. In these two cases, these strategies are based on the firm ability to accurately forecast demand and to establish a reliable Master Production Schedule (MPS). As an application case, we developed a simulation model of the French poultry supply chain facing Avian Influenza crisis in 2005-2006. As hypothesis, we used a MPS based on a word-of-mouth forecasting diffusion model which makes sense in a sanitary crisis context. The results showed a non-linear relationship between the sanitary risk (which increases according to the slaughtered chicken's volume and the storage time) and the additional external purchases (in case of low production generated by an insufficient MPS launched 40 days before customer orders). To summarize, this research focused on calibration of a MPS model aiming to simultaneously minimize the additional purchasing costs and the excessive perishable products causing a sanitary risk.

Mots clés – industries alimentaires, sécurité alimentaire, flux poussés-tirés, Plan Directeur de Production, gestion de stock, dynamique des systèmes, simulation, modèles de diffusion.

Keywords - food industry, food safety, push-pull supply chain, Master Production Scheduling, inventory management, system dynamics, simulation, diffusion models.

1 INTRODUCTION

De nos jours, les marchés sont de plus en plus dynamiques et volatiles, qu'il s'agisse des marchés d'offre (matières premières) ou de demande (produits finis). La notion d'incertitude est un facteur de plus en plus pris en compte par

les responsables logistiques qu'elle soit liée à des facteurs endogènes ou exogènes. De nombreux travaux ont montré que le comportement d'une chaîne logistique est régi par des interrelations non-linéaires entre les nombreuses composantes du système global [Shapiro, 2001]. La complexité et

l'incertitude sont donc les deux facteurs essentiels à prendre en compte pour réfléchir à une stratégie de planification efficace à partir d'un Programme Directeur de Production (PDP). Celui-ci consiste à mettre en cohérence les besoins exprimés en aval de la chaîne (cf. la demande) et les capacités du système de production et de distribution. Face à des variations de la demande, [Tang et Grubbstrom, 2002] suggèrent une réactualisation du PDP visant à ajuster la production et à minimiser les coûts tout en assurant un bon niveau de service.

Quelques systèmes hybrides fréquents dans l'agroalimentaire s'organisent autour d'un stock tampon évoluant sous la contrainte d'un flux poussé en amont (délai de production/approvisionnement long) et sous la pression d'un flux tiré en aval (demande à satisfaire dans un délai court). Les enjeux du PDP consistent à diminuer les coûts de stockage en réduisant le risque sanitaire de dépréciation des produits et de contamination mais aussi en limitant les achats externes supplémentaires en cas d'insuffisance de stock. Dans une telle situation, la qualité du PDP est cruciale mais difficile à réaliser à cause de la forte incertitude de la demande, en particulier dans les cas de crises inhabituelles comme celle de la grippe aviaire par exemple.

C'est dans ce contexte de crise exceptionnelle où nous ne disposons pas d'historiques de ventes que nous avons simulé différents modèles de planification de la production de volailles. Notre recherche s'est intéressée à la sensibilité de la filière avicole soumise à de fortes perturbations dans la demande à différents modèles de PDP. Il s'agissait d'étudier aussi bien la stabilité globale de la chaîne et sa performance que l'équilibre entre la qualité, la sécurité (cf. le niveau de stock tampon) et les coûts supplémentaires (cf. les coûts d'achat sur le marché externe).

Dans cet article, nous présenterons dans un premier temps, une revue de littérature qui justifiera notre approche de cette problématique par la dynamique des systèmes de [Forrester, 1961]. Dans un second temps, pour analyser le comportement de cette chaîne, nous présentons un modèle de simulation de la chaîne logistique avec une production en amont pilotée par différents modèles de PDP. Finalement, nous analysons le comportement global du système face à différents types de PDP selon deux critères, le premier lié à la sécurité alimentaire et le second à la minimisation des coûts exceptionnels d'achats externes.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

Les chaînes logistiques peuvent être instables face à des variations de consommation causant des perturbations dans le système de production en amont. [Nagatani et Helbing, 2004] expliquent ce phénomène par des retards d'adaptation de la production et des capacités de stockage ou encore par des mécanismes de retour d'informations le long de la chaîne. Beaucoup de recherches ont mis l'accent sur les stratégies de pilotage des flux logistiques [Chopra et Meindl, 2001 ; Helbing et al., 2003]. Par exemple, [Nagatani et Helbing, 2004] ont montré qu'une analyse linéaire de la stabilité d'une chaîne logistique perturbée permet d'obtenir une adaptation efficace pour faire face aux variations de la consommation en aval et aussi aux fluctuations des capacités de stock en amont. En effet, ils ont proposé une technique d'anticipation du niveau futur du stock pour stabiliser le système logistique. Néanmoins, cette approche est limitée car les amplitudes des

oscillations peuvent être plus considérables et les effets non-linéaires sont prédominants.

Par ailleurs, selon [Tang et Grubbstrom, 2002], deux approches ont été suggérées pour améliorer la qualité d'un PDP : geler le PDP et/ou ajouter le niveau de stock de sécurité dans la prévision. Dans le cas où la chaîne logistique agroalimentaire fait face à une crise sanitaire, la méthode habituelle consiste à geler le PDP et à réajuster le PDP à chaque fois que l'on connaît les ventes réelles, mais cette solution génère l'instabilité et augmente les stocks [Sridharan et Berry, 1990]. Dans le cas d'une chaîne logistique de volailles, le contrôle du pipeline n'est pas un mécanisme de régulation essentiel à cause des quarante jours fixes d'élevage avec des contrats antérieurs entre les fabricants et les éleveurs et une mortalité moyenne bien connue. Par conséquent, le niveau de stock tampon et la prévision de ventes sont les deux variables essentielles à mettre en œuvre pour optimiser le PDP.

Dans le cas spécifique de contrôle du stock tampon dans une chaîne hybride de type poussé-tirée, plusieurs travaux se sont concentrés sur le modèle du *newsvendor* [Golçalves, 2003; Swaminathan et Tayur, 2003]. Dans les chaînes logistiques multi-échelons, certains modèles *newsvendor* multi-périodes ont été proposés (voir par exemple [Salameh et Ghattas, 2001]). Cependant, dans des chaînes logistiques complexes avec des boucles de rétroaction non-linéaires et des délais exponentiels, le problème de taille du stock tampon avec des contraintes complexes de sécurité sanitaire ne peut pas être représenté par un tel modèle d'optimisation. C'est pourquoi de nombreux auteurs préconisent une approche par simulation pour étudier l'évolution d'un stock tampon à partir de différents modèles de PDP [Ballou, 1992 ; Beamon, 1998 ; Wyland et al., 2000].

Cependant, nous avons également constaté qu'il existait très peu de travaux de simulation de comportement de chaînes logistiques agroalimentaires. Parmi eux, [Van der Vorst et al., 2000] ont utilisé la simulation à événements discrets pour modéliser le comportement dynamique d'une chaîne logistique agroalimentaire et évaluer différentes structures alternatives proposées pour la chaîne. [Minegishi et Thiel, 2000] se sont concentrés sur la compréhension du comportement complexe de l'industrie de volaille en étudiant l'influence des fluctuations de demande sur le comportement du système de production. Les auteurs ont souligné le besoin d'étudier les problèmes opérationnels du processus de production et suggéré certaines prises de décision. Néanmoins, ces travaux n'ont pas intégré la sécurité sanitaire et l'influence de différents PDP qui font l'objet de notre communication.

3 METHODE DE RECHERCHE ET COLLECTE DES DONNEES

Nous avons construit un modèle de dynamique des systèmes s'inspirant de la théorie de Forrester présentée dans son ouvrage "*Industrial Dynamics*" [1961]. L'idée consiste à considérer que les organisations peuvent être mieux décrites en se concentrant sur les flux de régulation plutôt que sur les entités composantes. Les modèles sont construits à partir de boucles fermées où une variable de contrôle agit sur une variable d'action qui à son tour rétroagit par *feed-back* sur cette variable de contrôle via d'autres variables possibles.

Les données de base du modèle proviennent de statistiques sur la production et la consommation de poulets standards entiers

frais¹ pendant la crise de l'influenza aviaire (IA) en France entre octobre 2005 et mars 2006. Elles ont été collectées auprès des organismes suivants: Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques (Agreste/SCEES), *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), *World Health Organization*, *World Bank*.

Pour faciliter la validation empirique du modèle, nous avons également réalisé des interviews dans les quatre plus grands groupes du secteur avicole (LDC, Doux, Arrivé, Glon) ainsi que dans le premier groupe coopératif en France (Terrena) ; ces cinq groupes représentaient à eux seuls 70% du chiffre d'affaires de la filière en 2005. Cette démarche qualitative a consisté à valider la structure, les modes de fonctionnement et les réactions des entreprises face à la crise de l'IA. Nous avons complété cette phase empirique par des entretiens auprès de structures liées à la filière comme le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, l'Office de l'Elevage, l'Institut Technique de l'Aviculture (ITAVI), la Fédération des Industries Avicoles (FIA), etc.

Après cette phase de représentation, les caractéristiques principales de la chaîne logistique avicole peuvent être décrites comme suit.

Pour la partie amont de la chaîne organisée en flux poussés :

- il s'agit d'une production par lot avec des contrats établis entre fabricants et éleveurs ;
- le délai d'élevage est fixe (40 jours) et le taux de mortalité est relativement bas;

L'objectif économique consiste à minimiser les coûts, réduire le stock tampon de poulets abattus, assurer la sécurité alimentaire et réduire les achats externes.

Pour la partie aval de la chaîne organisée en flux tirés :

- la demande est fortement incertaine en raison de la crise influençant le comportement du consommateur ;
- le délai de livraison est très court (24 heures).

La chaîne doit répondre parfaitement à la demande. En cas d'insuffisance de stock, elle déclenchera des achats externes (marchés *spot*). Dans le cas de surproduction, il s'agira de surveiller le niveau du stock tampon et des stocks intermédiaires de manière à garantir la sécurité alimentaire.

4 MODELE DE DYNAMIQUE DES SYSTEMES

Cette étude préalable nous a permis de construire une représentation systémique du pilotage des flux logistiques au sein de la filière avicole à l'aide d'une formalisation causale des comportements réels observés durant la dernière crise d'IA survenue de France.

En résumé, les décisions à court-terme les plus significatives durant la crise sont :

- Les réajustements des volumes d'élevage face aux fluctuations de la demande.
- Le déclenchement d'achats externes lorsque le stock disponible de produits fraîchement abattus est insuffisant pour répondre à la demande (i.e. qui engendre des coûts supplémentaires).
- Le stockage de poulets abattus en cas de demande insuffisante (i.e. qui augmente les coûts et le risque sanitaire).

¹ La filière avicole française produit 60 % de poulets entiers et 40 % de produits élaborés et de découpe (incluant des carcasses conditionnés et des plats cuisinés).

4.1 Hypothèses du modèle

Pendant cette courte période de crise, les décisions courantes consistent à planifier les volumes de production en fonction des fluctuations prévisionnelles de la demande ceci en élaborant un PDP.

Dans le cadre de l'élaboration du PDP, nous avons retenu trois hypothèses :

Hypothèse 1. La fonction objectif retenue consiste à : (1) minimiser les coûts supplémentaires liés aux achats externes et (2) à minimiser le niveau du stock tampon de produits frais et assurer la sécurité alimentaire. Pendant la période de la crise (six mois), nous avons considéré que les coûts unitaires d'élevage, de fabrication et de distribution étaient constants pour tous les scénarios de simulation.

Hypothèse 2. Les politiques de gestion des stocks à chaque échelon de la chaîne logistique sont les suivantes:

- au niveau de l'élevage : le niveau des encours est ajusté et basé sur la planification de production (PDP).
- aux niveaux de l'abattage et de la transformation : les niveaux de stock nécessitent un contrôle permanent de manière à minimiser les risques sanitaires.
- au niveau de la distribution et de la consommation : le niveau de stock des produits finis dépend du taux de ventes réelles. Son contrôle se base sur l'ajustement du niveau de stock réel au niveau de stock souhaité dans les points de vente.

Hypothèse 3. Nous considérons qu'il n'y a aucune modification structurelle de la chaîne logistique parce que nous nous concentrons sur l'étude du comportement à court terme de cette chaîne².

De plus, le modèle a été construit en respectant certaines règles empiriques constatées sur le terrain:

- Les commandes sont toujours satisfaites à l'aide d'achats externes.
- Les marchés extérieurs peuvent toujours répondre à une demande d'achat de produits frais.
- Les produits sont toujours livrés à temps.

4.2 Construction et validation du modèle

La structure détaillée de ce modèle a déjà été présentée dans [Vo et Thiel, 2011] ainsi que sa validation³ (voir figure 1). Cette communication se focalise sur un aspect non abordé dans ces précédents travaux à savoir le risque sanitaire et l'élaboration de différents modèles de PDP.

² A long terme, suite aux différentes périodes de crise de l'AI, la filière a repensé son organisation logistique et mis en place de nouveaux investissements.

³ Une différence relative moyenne entre la production réelle et la production obtenue par la simulation égale à 6,3% signifiant un taux d'erreur « relatif » de 6,3%. Ceci a été considéré comme acceptable pour valider le modèle.

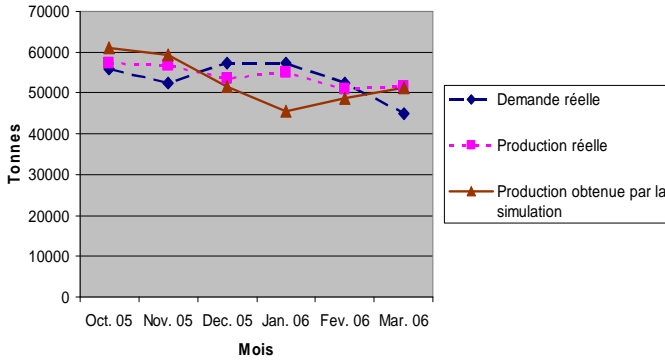


Figure 2. Ecart entre production réelle et production simulée

Les variables principales définies dans l'enquête préalable, leurs interactions ainsi que les boucles de rétroaction mises en évidence ont fait l'objet d'une représentation sous forme d'un diagramme de causalité (figure 2). Ce diagramme s'inspire également d'un modèle générique de la chaîne logistique proposé par [Sterman, 2000]. Dans notre cas d'application, nous avons pu identifier cinq boucles homéostatiques (négatives) principales⁴ qui représentent les relations causales entre les variables endogènes sous l'influence de deux variables exogènes en amont et aval de la chaîne.

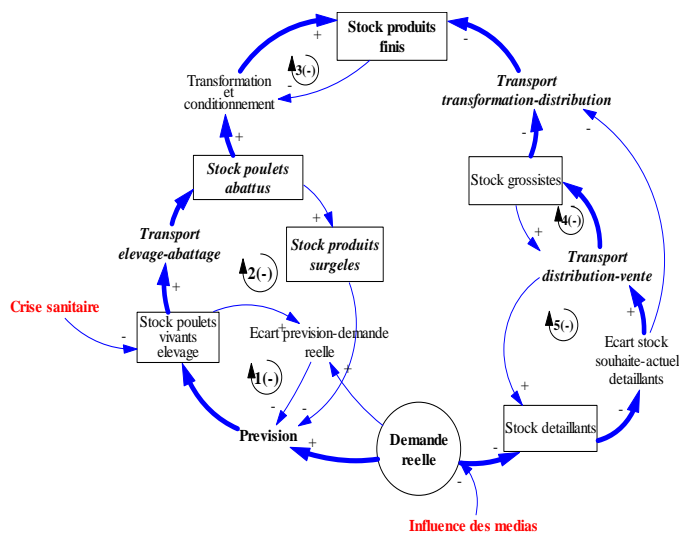


Figure 2. Diagramme de causalité de la chaîne logistique de la filière poulets standard

- *Boucle 1* : Cette boucle permet d'ajuster les encours d'élevage de poulets et par la suite les poulets matures prêts à abattre.
- *Boucle 2* : L'objectif de cette boucle 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.
- *Boucle 3* : Cette boucle permet de réguler le niveau de stock de produits finis en adaptant le volume de transformation.
- *Boucle 4* : Cette boucle permet d'organiser le transport de produits finis vers les détaillants en fonction du niveau de stock chez les grossistes.
- *Boucle 5* : Cette boucle permet d'ajuster le niveau de stock chez les détaillants en fonction de l'écart entre le niveau de

⁴ Notre modèle comporte 96 boucles interconnectées.

stock souhaité et le stock réel.

Basé sur ce diagramme de causalités et sur une formulation mathématique par équations aux différences finies, le modèle a été implémenté à l'aide du logiciel de simulation *Ithink*[®].

5 IMPACTS DES DIFFERENTES POLITIQUES DE PLANIFICATION DE PRODUCTION

Nous rappelons que cette recherche s'est concentrée sur les variations du stock tampon après abattage et sur les achats supplémentaires nécessaires en cas de reprise de la consommation. De l'abattage au consommateur final, les durées de stockage et les délais de transport augmentent le risque de contamination alimentaire. Par ailleurs, en considérant les taux de croissance de pathogènes microbiens pour une température de chambre froide donnée, le temps est un facteur critique touchant à la croissance microbienne lorsque la durée de vie d'un produit est déterminée. Ainsi, le problème à résoudre est de déterminer une planification de production qui permette de trouver un bon équilibre entre la réduction du stock tampon de produits frais pour un niveau de sécurité donné, et les achats externes nécessaires pour assurer la qualité de service. Dans la première phase expérimentale, nous avons étudié le comportement de la chaîne logistique utilisant une politique de planification de production habituelle basée sur le lissage de la demande. Dans la deuxième phase, nous avons proposé une méthode pour établir le PDP se basant sur des modèles de diffusion de type « bouche à oreille ».

5.1 Simulation d'une planification de production basée sur un lissage des ventes passées

Nous commençons par simuler le modèle avec un taux de production constant basé sur la moyenne de consommation de viande de poulet durant les six mois de crise soit 1 895,5 tonnes par jour.

Nous avons choisi une période de simulation exprimée en jours avec un intervalle de temps $dt = 0,25$ jours et un enregistrement des données à partir de $t = 41$ (en fait après les 40 jours d'élevage) jusqu'à $t = 121$ (40 jours avant la fin de la période de crise de l'IA).

En cas de taux de production fixe (hypothèse "théorique") les achats externes totaux s'élèvent sur la période à 9 131 tonnes pour un niveau de stock tampon cumulé égal à 1 179 tonnes. Cette politique de production triviale est (comme on s'en doutait) trop coûteuse au niveau des achats externes. Ceci nous amène à ajuster le PDP pendant une telle crise selon différentes méthodes et à comparer les performances du modèle au cas théorique précédent.

Nous choisissons tout d'abord le principe du lissage exponentiel de premier ordre de la demande réelle comme :

$$S(t + dt) = S(t) + dt (I(t) - S(t)) / \alpha$$

avec S = entrées lissées, I = entrées réelles, α : temps moyen (constant).

La valeur observée dans la réalité a été d'environ $\alpha = 8$ jours. Nous posons l'hypothèse que l'évaluation du risque de contamination est définie par un taux égal à la totalité de poulets stockés dans le stock tampon chaque jour (en tonnes) divisé par la consommation totale pendant la même période.

Les résultats de simulation sont présentés dans la figure 3 et montrent une augmentation alternée dans les achats externes (en cumul évalués à 3 539 tonnes) et dans les stocks tampons (en cumul évalués à 3 805 tonnes). Du fait de l'augmentation du stock tampon le taux de risque sanitaire atteint en moyenne 2,35 %.

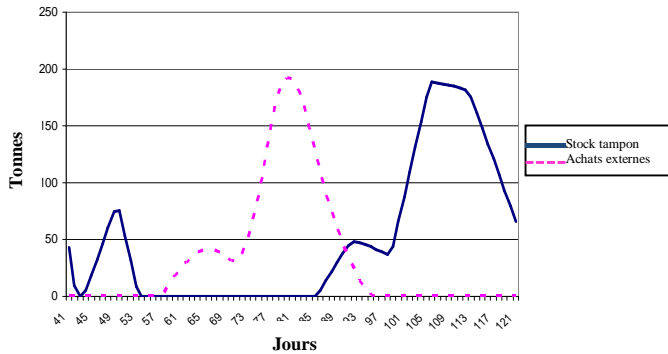


Figure 3. Evolution des volumes d'achats externes et des stocks de produits périssables selon un PDP basé sur les ventes lissées

Nous avons aussi observé que la moyenne du stock tampon n'excède jamais un jour de consommation, donc le risque de contamination peut être évalué par une dégradation de qualité alimentaire d'un jour sur huit jours de la durée de vie totale.

Nous avons ensuite mené une étude de sensibilité en modifiant la valeur du coefficient de lissage de manière à rechercher le coefficient α le plus performant.

Tableau 1. Impact des différentes valeurs du coefficient de lissage

Coefficient de lissage α	1	8	20	50	100
Achats externes	3 538	2 733	1 454	138	0
Stock tampon	3 804	4 068	4 419	6 028	8 262
Risque sanitaire (%)	2,35	2,51	2,72	3,72	5,1

Comme nous pouvons voir dans ce tableau 1, en augmentant le coefficient de lissage nous pouvons réduire la quantité d'achats externes au détriment d'un volume de stock qui a doublé entraînant un taux de risque sanitaire plus haut de 5,1 %. Au contraire, en baissant le coefficient de lissage à 1, nous pouvons réduire tant le niveau du stock que le taux de risque sanitaire.

La figure 4 montre qu'il n'est pas recommandé de chercher un coefficient de lissage qui cherche à trop réduire le taux de risque sanitaire (cf. la taille du stock tampon) parce que les coûts externes d'achat augmentent exponentiellement quand le risque est inférieur à 2,5 %.

Achats Externes vs Risque Sanitaire

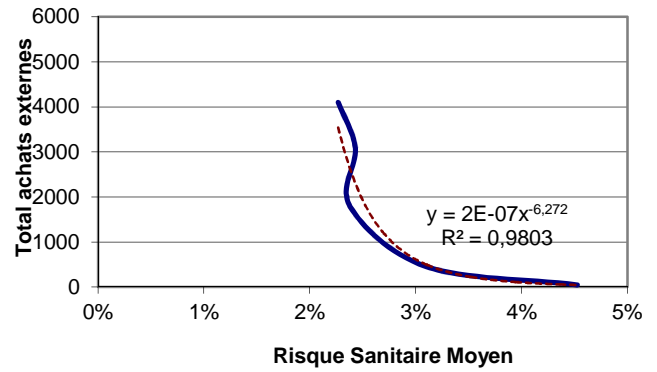


Figure 4. Relation entre le volume d'achats externes et le risque sanitaire

Ce résultat intéressant montre un équilibre sensible entre les achats externes et la taille du stock tampon et une instabilité forte de la chaîne logistique lorsque nous visons l'objectif théorique du zéro achat externe et du zéro stock. Nous remarquons que cette observation est basée sur une seule méthode de planification de production et sur des données réelles de ventes observées pendant la dernière crise de l'IA en France.

Néanmoins, ces résultats montrent la grande complexité à bâtir un modèle de prévision pertinent qui de par la non-linéarité du modèle de la chaîne logistique ne peut être traité analytiquement avec une recherche d'optimisation de α .

Dans la section suivante, nous avons choisi de construire un PDP à partir d'un modèle de diffusion de rumeurs de type «*word-of-mouth* » (bouche-à-oreille) représentant la diffusion d'un risque de contamination alimentaire dans la population.

5.2 Proposition d'un PDP basé sur un modèle de diffusion de type «*word-of-mouth* »

De nombreux travaux de recherche portent sur la peur du consommateur et la perception du risque alimentaire pendant une crise sanitaire, mais très peu d'études ont mentionné les modèles de diffusion «*word-of-mouth* » avec effets négatifs dans une situation de crise.

[Dahlgran et Fairchild, 2002] ont étudié l'ampleur des pertes de ventes par l'analyse de l'impact de couverture médiatique de contamination bactérienne de poulets aux États-Unis de 1982 à 1991. Ils ont utilisé un modèle de demande inverse qui montre que l'effet de la publicité défavorable à la contamination de poulets a diminué la demande mais que les consommateurs oublient rapidement cette contamination et retournent à leurs habitudes de consommation en quelques semaines. [Mark et al., 1988] ont montré que la médiatisation après des incidents de contamination alimentaire a un impact significatif sur des achats de lait et que l'effet négatif de cette médiatisation est plus important que l'effet positif. Leur modèle d'évaluation des pertes de ventes est basé sur une fonction de prix, des informations de qualité et des revenus. Néanmoins, les auteurs reconnaissent qu'il est plus pertinent de représenter la diffusion d'informations sur un incident de contamination ou n'importe quel incident où la qualité de produit a changé.

Nous proposons un modèle de diffusion qui peut être utilisé pour mettre en œuvre un PDP visant aussi bien à réduire au minimum le risque sanitaire que les coûts des achats externes. Dans un premier temps, nous choisissons de baser notre modèle de prévision sur le modèle de rumeur proposé par [Daley et Kendall, 1965]. Celui-ci consiste à étudier l'évolution de trois types d'individus au sein d'une même population : les personnes susceptibles d'être informées, celles qui transmettent l'information et enfin celles qui sont « immunisées » ou qui ont cessé de véhiculer l'information. Un seul transmetteur initial introduit une rumeur dans une population fermée. Initialement le reste de la population n'est pas au courant de la rumeur et comme tel est désigné susceptible. Les membres de la population se rencontrent. Une interaction entre le transmetteur et la population non informée convertit cette population en transmetteurs. Quand deux transmetteurs interagissent, ils arrêtent de propager la rumeur.

Nous formalisons ce problème de la manière suivante.

Soit :

- N : la population totale
- X_1 : les personnes qui consomment de la viande de poulet
- X_2 : les personnes qui ont décidé d'arrêter de consommer de la viande de poulet suite à des rumeurs et qui véhiculent le danger auprès de X_1
- X_3 : les personnes "neutres" sans influence sur la population X_1
- k_1 : le coefficient de propagation de la rumeur de la population X_2 vers la population X_1 dans l'objectif de convaincre X_1 d'arrêter de consommer de la viande de poulet
- k_2 : le coefficient qui correspond à l'arrêt de la transmission de la rumeur entre X_2 et X_1

Nous proposons de représenter le mécanisme de diffusion de la rumeur par le système d'équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 N &= X_1 + X_2 + X_3 \\
 dX_1/dt &= -k_1 X_1 X_2 \\
 dX_3/dt &= k_2 X_2
 \end{aligned}$$

Les conditions initiales après estimation des coefficients de diffusion k_1 et k_2 pendant la crise sont choisies de manière empirique:

- $k_1 = 0,0008$
- $k_2 = 0,0068$ avec un rapport $k_2/k_1 = 8,5$

Posons : $N = 100$ personnes, $X_1 = 89$, $X_2 = 11$ (11% de la population qui décide d'arrêter de consommer de la viande au début de la crise IA), $X_3 = 0$.

Le modèle est alors simulé avec différentes valeurs du ratio k_2/k_1 et de son impact sur le volume d'achats externes et sur le niveau de risque sanitaire. Nous avons aussi comparé chaque résultat du modèle de diffusion avec les ventes réelles (voir la figure 5 pour un exemple avec $k_2/k_1 = 8$). L'Erreur Quadratique Moyenne (EQM) a également été calculée (voir le tableau 2).

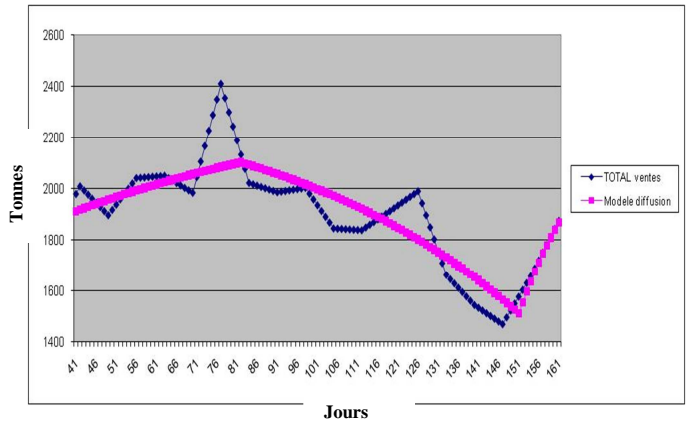


Figure 5. Estimation des ventes avec $k_2/k_1 = 8$

Tableau 2. Influences du ratio k_2/k_1 sur les achats externes et le risque sanitaire

k_2/k_1	6	7	8	8.5	9	10	11	12
Achats externes	1798	2080	2355	2539	2823	3579	4466	5400
Risque sanitaire(%)	4,96	3,94	3,01	2,58	2,22	1,68	1,28	0,98
EQM	212	189	171	163	156	146	140	137

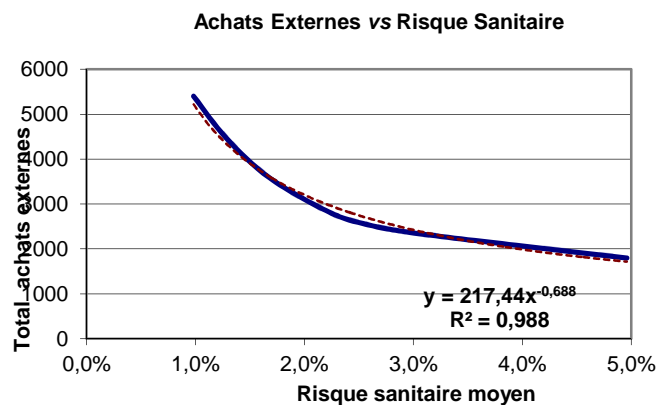


Figure 6. Relation entre les achats externes et le risque sanitaire

La figure 6 montre une relation de type exponentielle entre les achats externes et le niveau de stock tampon. Cela signifie que si le PDP tente de réduire le risque sanitaire moyen en dessous de 2%, il provoque un important besoin d'achats externes. Le modèle montre que cette chaîne logistique peu flexible devient très sensible lorsque le PDP cherche un équilibre entre les coûts des achats externes et le niveau de stock tampon. Nous analysons également l'évolution des achats externes et le taux de risque sanitaire en fonction des erreurs du modèle de prévision EQM (voir la figure 7).

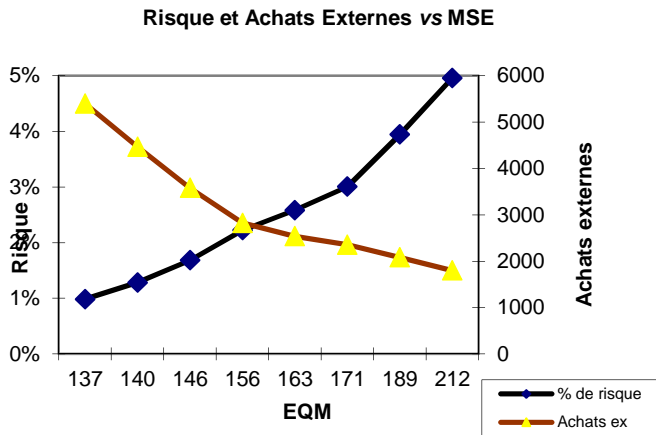


Figure 7. Evolution des achats externes et du risque sanitaire en fonction de l'erreur du modèle EQM

Si le modèle de diffusion est bien ajusté aux ventes réelles (i.e. avec une valeur EQM faible), le risque sanitaire diminue et la quantité d'achats externes augmente de manière quasi linéaire. Cette recherche peut ici être étendue à un problème d'« optimisation » qui consiste à trouver « le meilleur » ajustement (i.e. la meilleure valeur de EQM) permettant de minimiser les coûts supplémentaires des achats et la taille du stock tampon⁵.

Ce modèle ne tient compte que d'un mode de diffusion endogène par interaction entre les consommateurs. Or, il est bien connu qu'en période de crise sanitaire, plusieurs actions exogènes sont également entreprises comme par exemple l'intervention d'instances officielles ou encore par des actions de promotion et de communication menées par des industriels et les associations professionnelles. Ce modèle pourrait donc s'enrichir en prenant en compte de telles actions par exemple en se fondant sur des modèles prenant en compte la diffusion interne et externe.

6 CONCLUSION

Cette recherche s'est intéressée à l'influence du PDP sur les coûts exceptionnels d'achats externes et le risque sanitaire dans une chaîne logistique hybride en période de forte incertitude sur la demande (exemple d'une crise sanitaire sans historique de consommation).

Les résultats de simulation montrent que les coûts d'achats externes diminuent fortement (exponentiellement) en fonction du risque. Viser un faible risque sanitaire est générateur d'importants coûts d'achats externes. Nous avons pu constater que si la méthode d'élaboration du PDP vise uniquement à minimiser le risque sanitaire avec un stock tampon tendant vers zéro, la chaîne logistique devient très sensible aux fluctuations de la demande et peut faire augmenter très fortement le niveau d'achats externes. Ce comportement instable est seulement observé lorsque la politique de production génère une situation de stock tampon très bas. La solution « optimale » consiste donc à trouver un équilibre entre un stock tampon raisonnable et une quantité faible d'achats externes. Nous avons également observé que l'erreur de prévision dans la planification a une influence sur le taux de

risque sanitaire mais pas sur les achats externes. Finalement, grâce à ces résultats de simulation, les managers peuvent choisir une méthode appropriée afin d'améliorer leur planification de production leur permettant de minimiser les coûts supplémentaires d'achat et risque sanitaire.

Dans le futur, un travail plus systématique d'analyse comportementale d'une telle chaîne logistique face à des « artefacts » classiques dans la demande sera réalisé. Par ailleurs, de nouveaux scénarios seront également étudiés comme l'effet du partage d'information essentiel pour améliorer le PDP. Enfin, il est également prévu d'intégrer des modèles dynamiques microbiologiques dans ce modèle de la chaîne logistique. Pour cela nous utiliserons le compte viable total de bactéries (*Total Viable Count of bacteria* (TVC)) exprimé en microorganismes par gramme de viande fraîche qui permet de déterminer la date limite de consommation. L'intégration d'un modèle continu de croissance des bactéries dans le modèle global de la chaîne permettra de mieux représenter le lien fort entre une logistique maîtrisée et un système de management de la qualité évitant des risques de contamination en aval de la filière.

7 REMERCIEMENTS

Ce travail a été cofinancé par les Ministères de la Recherche et de l'Agriculture ainsi que par l'Ambassade de France au Viêt-Nam.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Ballou, R.H., (1992) *Business Logistics Management*, Englewood Cliffs, N-J, Prentice Hall.
- Beamon B.M., (1998) Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55(3), pp. 281-294.
- Chopra, S., Meindl, P., (2001) *Supply chain management: Strategy, planning, and operation*. Prince Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Dahlgran R. A., Fairchild D. G. (2002). The demand impacts of chicken contamination publicity - a case study. *Agribusiness*, 18(4), pp. 459 – 474.
- Daley, D.J., Kendall, D.G., (1965) Stochastic rumors. *Journal of the Institute of Mathematics and its Applications*, 1, pp. 42-55.
- Forrester, J.W., (1961) *Industrial dynamics*. Portland (OR): Productivity Press.
- Golçalves, P.M., (2003) Demand bubbles and phantom orders in supply chain, PhD Thesis MIT, USA.
- Helbing, D., Platkowski, T., Seba, P., (2003) Stability of regular and random supply networks. Preprint.
- Mark E. Smith M.E., van Ravenswaay E.O, Thompson S. R. (1988) Sales Loss Determination in Food Contamination Incidents: An Application to Milk Bans in Hawaii. *American Journal of Agricultural Economics*, 70(3), pp. 513-520.
- Minegishi, S., Thiel, D., (2000) System dynamics modeling and simulation of a particular food supply chain. *Simulation Practice and Theory*, 8(5), pp. 321-339.
- Nagatani, T., Helbing, D., (2004) Stability analysis and stabilization strategies for linear supply chains. *Physica A*, Elsevier, 335(3-4), pp. 644-660.
- Salameh, M.K., Ghattas, R.E., (2001) Optimal just-in-time buffer inventory for regular preventive maintenance, *International Journal of Production Economics*, 74(1-3), pp. 157-161.

⁵ Nous avons finalisé ce premier travail en recherchant un modèle de diffusion ajusté avec une EQM de 82 qui permet de réduire le stock tampon et de minimiser le risque sanitaire moyen à 1,58 %. La quantité totale d'achats externes reste cependant très élevée avec 4200 tonnes pendant toute la période de crise.

- Shapiro, J. F., (2001) *Modelling the Supply Chain*, Duxbury, Pacific Grove.
- Sridharan, V., Berry, W. L. (1990) Master production scheduling make-to-stock products: A framework for analysis. *International Journal of Production Research*, 28(3), pp. 541-558.
- Sterman, J.D., (2000) *Business dynamics : systems thinking and modeling for a complex world*. Boston, Mass.: Irwin/McGraw-Hill. 982.
- Swaminathan, J.M., Tayur S.R., (2003) "Tactical planning models for supply chain management", In *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 11: Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation, editors De Kok A.G., Graves S.C., Elsevier Science, pp. 423-454.
- Tang O. and Grubbstrom R. W., (2002) Planning and replanning the master production schedule under demand uncertainty, *International Journal of Production Economics*, 78(3), pp. 323-334.
- Van der Vorst, J.G.A.J., Beulens A.J.M, Beek, van P. (2000) Modelling and simulating multi-echelon food systems. *European Journal of Operational Research*, 122(2), pp. 354-366.
- Vo T.L.H., Thiel D., (2011). Economic Simulation of a Food Supply Chain facing a Sanitary Crisis, *British Food Journal*, 113(8).
- Wyland, B., Buxton, K., Fuqua, B., (2000) Simulating the Supply Chain. *IIE Solutions*, 32(1), pp. 37-42.

Sites internet:

1. AGRESTE / SCEES:
http://agreste.agriculture.gouv.fr/conjoncture_1/aviculture_16/index.html
2. FAO: http://www.fao.org/avianflu/fr/index_fr.html
3. FIA: <http://www.fia.fr/>
4. ITAVI :
<http://www.itavi.asso.fr/economie/conjoncture/volailles.php>
5. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche,
http://mesdemarches.agriculture.gouv.fr/article.php3?id_article=29
6. Office de l'Élevage :
<http://www.office-elevage.fr/dei/liste2.htm>
7. WHO :
<http://www.who.int/csr/don/archive/disease/influenza/en/>
8. The World Bank: <http://www.worldbank.org/http://econ.worldbank.org/external/default/main?menuPK=51515855&pagePK=64256479&piPK=64165424&q=influenza&theSitePK=469372>