

Impact de décisions logistiques sur la qualité environnementale des produits

IMEN NOUIRA^{1,2}, YANNICK FREIN¹, ATIDEL B.HADJ-ALOUANE²

¹ Grenoble-INP / UJF-Grenoble 1 / CNRS, G-SCOP UMR5272 Grenoble, F-38031, France
yannick.frein@g-scop.inpg.fr, imen.nouira@g-scop.inpg.fr

² Laboratoire OASIS, ENI Tunis BP 37, LE BELVEDERE 1002 TUNIS
atidel.hadj@enit.rnu.tn

Résumé - Dans ce papier nous présentons un modèle mathématique qui illustre l'impact d'activités logistiques sur la qualité environnementale des produits à fabriquer en maximisant les profits de l'entreprise sous plusieurs contraintes telles que celles reliées aux législations environnementales. La qualité environnementale des produits est déterminée par leurs caractéristiques intrinsèques (nature des composants verts ou traditionnels) et d'autres caractéristiques qui ne sont pas liés au produit lui-même mais plutôt à l'impact des activités de la chaîne logistique (les émissions polluantes du procédé de fabrication).

Abstract – In this paper we present a mathematical model that illustrates the impact of supply chain activities on the environmental quality of manufactured products while maximizing the profits of the company under a set of constraints such as those related to the environmental legislation. The environmental quality of a product is determined by some intrinsic characteristics (product components characteristics) and other characteristics that are not related to the product itself but rather to the impact of the supply chain (manufacturing process emissions).

Mots clés - qualité environnementale de produit, marché segmenté, législation environnementale, programme linéaire mixte.

Keywords - environmental quality, market segmentation, environmental constraints, mixed linear program.

1 INTRODUCTION

Avec la globalisation économique et l'internationalisation géographique des activités de production, les chaînes logistiques des entreprises deviennent de plus en plus étendues et complexes et cette tendance va certainement se poursuivre. Des activités telles que le transport et le stockage se sont alors développées, les consommations et les émissions énergétiques sont à la hausse, et les conséquences sur l'environnement sont plus que jamais alarmantes. Dans leur démarche pour contrôler l'impact des activités industrielles sur l'environnement, les gouvernements imposent des lois et des législations environnementales de plus en plus strictes.

Durant les dernières années, les clients ne cessent d'augmenter leur attention vers les problèmes écologiques. Ils sont de plus en plus à la recherche des produits qui respectent l'environnement et qui ne nuisent pas à l'écosystème. Il est évident que la sensibilité envers les problèmes écologiques diffère selon les clients. Certains sont plus sensibles aux problèmes environnementaux que d'autres. Ils sont connus dans la littérature comme étant les clients « verts ». Ces derniers s'intéressent principalement à la qualité environnementale du produit. D'autres clients sont plutôt sensibles aux prix des produits. Ces clients sont caractérisés comme clients « ordinaires » [Chen, 2001]. D'autres cherchent plutôt un compromis entre les deux critères : qualité environnementale et prix. Le marché est alors devenu segmenté par une clientèle plus au moins sensible envers l'environnement.

La prise de conscience collective envers l'environnement et le poids croissant des contraintes réglementaires et des taxes environnementales appliquées par les gouvernements, poussent

les entreprises à réfléchir plus finement sur la configuration de leurs chaînes logistiques (CL), d'une part, et sur la qualité environnementale de leurs produits, d'autre part.

Or, nous mettons en évidence dans ce papier que la configuration de la CL et la définition des caractéristiques environnementales des produits fabriqués sont deux aspects interdépendants et ne doivent donc pas être considérés séparément mais plutôt de façon simultanée. En effet, les activités de la chaîne logistique telles que l'achat, la production, et la livraison ont un grand impact sur la qualité environnementale du produit.

Dans la littérature, des travaux très importants s'intéressent aux aspects de conception et de définition des produits en tenant compte des facteurs environnementaux ([Ljungberg, 2007], [Gehin et al., 2008] , [Borchardt, 2011], etc.). La plupart de ces travaux ne considèrent pas la configuration de la CL.

Par ailleurs, les travaux portant sur la CL en général et même ceux portant sur la CL verte ignorent souvent les problématiques de caractérisation environnementale des produits élaborés (décisions relatives à la qualité environnementale des produits proposés) ainsi que les caractéristiques des différents segments de marché.

Il s'avère alors très utile de compléter les approches existantes dans la littérature par une approche qui intègre la configuration de la CL et la caractérisation des produits finis en tenant compte des aspects environnementaux. Ce travail se veut une contribution à cette problématique.

Dans ce papier, après une étude bibliographique portant sur la relation entre les activités de la CL et la qualité environnementale des produits et sur les réglementations

environnementales, nous proposons un premier modèle mathématique d'optimisation qui choisit les procédés de fabrication (traditionnels et/ou verts), les composants du produit (traditionnels et/ou verts), la caractérisation des produits proposés aux clients (ordinaires et/ou verts), sous des contraintes environnementales. La fonction objectif consiste à maximiser les profits qui tiennent compte des revenus de vente des produits, des incitations financières données par les gouvernements pour le respect de l'environnement, des pénalités et taxes environnementales, etc. Les contraintes sont de plusieurs types et incluent principalement les contraintes environnementales. Le modèle obtenu est non linéaire. Nous procédons donc à sa linéarisation pour pouvoir le résoudre avec les solveurs commerciaux.

Ce papier est organisé comme suit. Dans la deuxième section nous explorons la relation entre les activités de la chaîne logistique et la qualité environnementale des produits. La troisième section est dédiée à une revue de la littérature sur les indicateurs de performance environnementale des produits et sur les contraintes environnementales. Dans la quatrième section, nous présentons le modèle mathématique et son illustration sur un exemple numérique. Finalement, nous décrivons les contributions de notre travail ainsi que ses limites et nous présentons nos principales perspectives.

2 RELATION PRODUITS - CHAÎNE LOGISTIQUE

Dans cette section, nous nous focalisons sur la relation entre la configuration d'un produit et celle de sa CL. Plusieurs auteurs ont étudié cette problématique dans un contexte général sans prendre en compte l'aspect environnemental. Rungtusanatham et Forza considèrent que la conception des produits et des processus de production ne doivent pas être considérés comme deux décisions séparées et séquentielles dans le temps mais plutôt comme deux décisions coordonnées et inter-reliées [Rungtusanatham et Forza, 2005]. Fixson avance que les caractéristiques et l'architecture du produit influencent les décisions logistiques aux niveaux stratégique, tactique et opérationnel [Fixson, 2005]. Le degré de standardisation et les interactions entre les composants du produit impactent les différentes décisions logistiques. Le nombre et le type des composants constituant un produit orientent généralement les décisions concernant le nombre et la localisation des différents fournisseurs, le niveau de service et les fréquences de livraison. L'utilisation des composantes communes par exemple, permet de diminuer le niveau des stocks. Certains auteurs considèrent que les familles de produits, leurs processus de production et la CL doivent être étudiés de manière intégrée ([Lamothe et al., 2006] ; [El Hadj Khalaf et al., 2009]). De façon générale, plusieurs auteurs considèrent que l'architecture du produit oriente les décisions logistiques et que la CL doit s'adapter aux exigences de l'architecture du produit.

En considérant la relation entre la CL et ses produits sous une dimension environnementale, Chen considère que pour déterminer la réelle performance environnementale d'une CL, il est important d'étudier la qualité environnementale de ses produits [Chen, 2001]. Réciproquement la CL avec ses différentes décisions et activités impacte la qualité environnementale de ses produits.

Il existe donc une relation d'interdépendance entre la performance environnementale des CL et la performance environnementale des produits.

Dans le contexte environnemental, il est important de tenir compte des activités environnementales comme principalement le recyclage et la refabrication (considérées généralement dans

le cadre de la logistique inverse). Il faut aussi considérer les activités classiques tels que l'achat (coopération avec des fournisseurs ayant une certification environnementale, sélection des fournisseurs géographiquement rapprochés), la production (choix des procédés de fabrication avec des faibles émissions polluantes et des technologies vertes permettant de minimiser la consommation de l'énergie ou l'utilisation des ressources énergétiques renouvelables), et le transport (optimisation des livraisons, choix des moyens de transport les moins polluants). Toutes ces activités ont un grand impact sur la qualité environnementale du produit.

Nous concluons que la relation d'interdépendance entre les produits et la configuration de leurs CL se renforce dans le contexte environnemental. D'où la nécessité d'intégrer la configuration du produit avec les décisions logistiques et de production dans ce contexte.

3 INDICATEURS DE PERFORMANCES ET REGLEMENTS ENVIRONNEMENTAUX

Pour développer notre modèle, il est tout d'abord nécessaire de comprendre ce que c'est un produit vert et les indicateurs de performance environnementale d'un produit. Ceci fait l'objet de la première partie de cette section. Ensuite, nous dédions la deuxième partie à la revue des contraintes et des législations environnementales et comment elles sont prises en compte par les modèles mathématiques de CL.

3.1 Indicateurs de performance environnementale des produits

Dans la littérature, la qualité environnementale d'un produit est définie généralement comme étant un ensemble d'attributs (qualités) environnementaux pour lesquels les clients présentent des préférences différentes ([Shi et al., 2001], [Chen, 2001]). L'intégration des attributs environnementaux peut être considérée au niveau des différentes phases de la conception des produits ; par exemple dans la sélection des composants, la conception de l'emballage et le choix du type d'énergie [Chen, 2001].

Ottman et al., avancent qu'il n'existe aucun produit dont l'impact sur l'environnement est nul. « Produit vert » ou « produit environnemental », sont des termes couramment utilisés pour désigner des produits qui visent à protéger ou à améliorer l'environnement naturel en conservant l'énergie et les ressources et en réduisant la pollution, les déchets et l'utilisation des agents toxiques [Ottman et al., 2006]. Cette définition souligne les principaux enjeux sur lesquels doit être axé le développement des produits environnementaux à savoir l'énergie, les ressources, les émissions et les déchets.

D'autres définitions de produit vert mettent l'accent sur les phases du cycle de vie du produit pendant lesquelles la qualité environnementale peut être exprimée. Peattie définit un produit vert comme étant un produit dont les performances environnementales et sociétales pendant les phases de la production, de l'utilisation et de fin de vie sont nettement améliorées par rapport à d'autres produits compétitifs [Peattie, 1995]. Cette définition met en relief la relativité de la notion de produit vert.

Notre étude de la littérature portant sur la performance environnementale du produit appuie nos conclusions sur la relation entre produit et CL. En effet nous dégagons suite à cette revue que certains critères de mesure de la performance environnementale des produits sont également des métriques de mesure de la performance environnementale de la CL (par

exemple, consommation d'énergie et dégagement des polluants lors de la phase de production).

Nous classons alors les indicateurs de la performance environnementale des produits en deux catégories :

- Indicateurs intrinsèques qui sont liés aux caractéristiques du produit (longue durée de vie, recyclabilité, réutilisabilité, teneur en matière recyclée, énergie consommée et émissions dégagées durant la phase d'utilisation, etc.)
- Indicateurs qui ne sont pas liés aux caractéristiques du produit lui-même, mais qui dépendent plutôt des activités de la CL. Par exemple, le nombre de kilomètres parcourus par un produit (indiqué sur certains produits et qui représente un des critères d'évaluation de la qualité environnementale pour les clients verts) ne change rien dans ses caractéristiques intrinsèques mais reflète les caractéristiques de la CL. Les technologies de fabrication traditionnelles polluantes et celles vertes (qui diffèrent en terme des émissions dégagées lors de la fabrication du produit ou encore en terme de quantité totale de l'énergie consommée) peuvent donner lieu à des produits finis identiques en terme de fonctionnalité mais possédant chacun une image environnementale différente. Ces critères n'impactent pas le fonctionnement du produit mais impactent l'image environnementale de ce produit.

3.2 Règlements environnementaux

Les législations environnementales font référence aux lois et aux règlements imposés par les gouvernements afin d'inciter les firmes à minimiser l'impact de leurs activités sur l'environnement. Différents types de lois et de législations environnementales sont décrites dans la littérature ([Dobos I., 1999], [Radulescu et al., 2009], [Chen and Monahan, 2010]). Selon le type des émissions et leur nuisance à l'environnement, ces lois peuvent, dans certains cas, consister en des règlements stricts avec des valeurs seuils dont la violation est strictement interdite. Dans d'autres cas, les lois sont plus souples : le dépassement des seuils déterminés par les gouvernements est possible mais dans ce cas le gouvernement applique des sanctions et des taxes sur les entreprises. Dans d'autres situations, des quotas d'émission peuvent être négociés. En effet, pour encourager les entreprises à agir sur leurs émissions, les gouvernements offrent aux entreprises la possibilité de vendre ces quotas de permission de pollution quand elles polluent moins que le seuil permis. Cela prend donc la forme d'une incitation financière. Dans le cas contraire, lorsque l'entreprise dépasse le seuil, elle peut acheter des quotas de permission de polluer. Cela prend donc la forme d'une pénalité. Plus de détails et d'amples exemples sur ce type de règlement sont donnés dans les travaux de [Letmathe et Balakrishnan, 2005]. Il existe d'autres types de législations qui ne sont pas basées sur des seuils d'émission mais qui imposent par contre aux entreprises d'introduire l'activité de recyclage et/ou de re-fabrication. Il est également important de mentionner que ces lois diffèrent selon les pays et selon les secteurs d'activité.

Dans le tableau suivant, nous présentons des travaux qui proposent des programmes mathématiques modélisant différents types de contraintes environnementales.

Tableau 1: Travaux modélisant des contraintes environnementales

Règlements	Seuils limites (strict)	Taxes environnementales	Négociation des permissions
[1]	X	X	X
[2]	X	X	X
[3]		X	
[4]	X	X	
[5]	X		

[1] Letmathe and Balakrishnan, (2005).

[2] Chen and Monahan, (2010),

[3] Radulescu et al., (2009),

[4] Dobos I. (1999),

[5] Hartl and Kort (1997)

4 DESCRIPTION DU PROBLEME CONSIDERE

Il s'agit d'une entreprise qui se trouve face à un marché segmenté en clients verts et d'autres ordinaires. L'entreprise cherche à offrir à chaque segment du marché un produit avec la qualité environnementale qui permet de maximiser son bénéfice. Nous développons alors un modèle où on modélise l'impact de certaines décisions logistiques et de production sur la qualité environnementale des produits en tenant compte des législations environnementales. Ce modèle ne tient pas compte de tous les facteurs discutés ci-dessus mais constitue un premier pas vers un modèle plus complet.

Nous considérons que le prix du produit vert est généralement supérieur au prix du produit ordinaire comme indiqué par plusieurs auteurs ([Chen, 2001], [Mahenc, 2008]). En général, plus le produit est vert plus son prix augmente. Une enquête menée par l'institut international depuis 1992, signale que 65% des américains, 59% des allemands et 31% des japonais se déclarent prêts à payer une « prime verte » pour des produits écologiques.

Pour modéliser la qualité environnementale du produit, nous considérons un vecteur de qualité environnementale. Les composantes de ce vecteur décrivent deux indicateurs de performance environnementale du produit. Le premier étant un attribut intrinsèque au produit et le deuxième un attribut plutôt lié à la chaîne logistique et son impact sur le produit :

- Le taux de "composition verte" du produit fini. Ce taux va dépendre du nombre de composants verts utilisés pondéré par l'importance de chacun. Notons que nous utilisons la notion de composant dans un sens très large. Ce peut être au sens premier du terme (une sous-partie du produit fini) mais ce peut être aussi une matière première achetée pour fabriquer le produit fini. Le calcul précis de ce taux est donné dans la suite.
- Le taux des émissions polluantes dégagées lors de la production. Ce taux est obtenu par rapport à une quantité maximale totale des émissions qui est généralement obtenue dans des systèmes de production similaires. Il s'agit d'un critère non intrinsèque au produit mais plutôt lié à l'activité de production. L'entreprise a donc le choix entre plusieurs procédés de fabrication qui diffèrent essentiellement par les dégagements des émissions polluantes comme cela a été fait dans [Letmathe et Balakrishnan, 2005].

Pour des raisons d'homogénéisation, nous considérons que la valeur de chacun des deux attributs environnementaux varie

entre 0 et 1. La valeur de l'attribut relatif à la composition du produit (noté : a) est égale à 1 si tous les composants du produit sont verts ; ou égale à 0 si les différents composants sont ordinaires. La valeur de l'attribut (noté : b) lié aux émissions du processus de fabrication est égal à 1 si le procédé de fabrication est parfaitement propre (pas d'émissions polluantes), il est égal à 0 dans le cas contraire. La qualité environnementale du produit est représentée par la somme (a+b).

Nous supposons que la demande et les prix de vente d'un produit dépendent de sa qualité environnementale et donc de la valeur des attributs a et b. La qualité environnementale du produit, représentée par la somme de ces attributs, peut varier de 0 à 2. Plus la somme est grande plus le produit est vert.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, il existe différentes attitudes des clients envers les produits écologiques. Nous supposons dans notre papier que le marché est segmenté principalement en deux types de clients : verts et ordinaires. Nous considérons également qu'il existe I intervalles de qualité environnementale pour un produit ($[0, \alpha_1[$; $[\alpha_1, \alpha_2[$... $[\alpha_{i-1}, 2[$). Le prix de la variété du produit avec la qualité environnementale $[\alpha_{i-1}, \alpha_i[$ est S_i et la demande du segment ordinaire et celle du segment vert sont respectivement D_i^o et D_i^e . Généralement plus la qualité environnementale du produit augmente plus son prix augmente et plus la demande du segment vert augmente ($D_i^e < D_i^o < \dots < D_{i-1}^e < D_{i-1}^o$).

Par contre la demande du segment ordinaire diminue avec l'augmentation de la qualité environnementale du produit et de son prix ($D_i^o > D_{i-1}^o > \dots > D_{i-1}^o > D_i^o$). Pour certains intervalles dont la qualité environnementale est très faible, la demande du segment vert peut être nulle (une telle variété n'intéresse pas les clients du segment vert). Réciproquement quand la qualité environnementale est assez élevée la demande du segment ordinaire s'annule, vue l'augmentation du prix de cette variété. Les valeurs des α_i sont des données du problème. Pour les déterminer, il faut faire une étude de marché afin de dégager les exigences des clients ainsi que la variation de la demande en fonction de la qualité environnementale et le prix des produits.

La demande en fonction de la qualité environnementale est généralement modélisée comme une fonction linéaire croissante pour le segment vert du marché et décroissante pour le segment ordinaire. La figure suivante présente ce comportement selon [Chen, 2001].

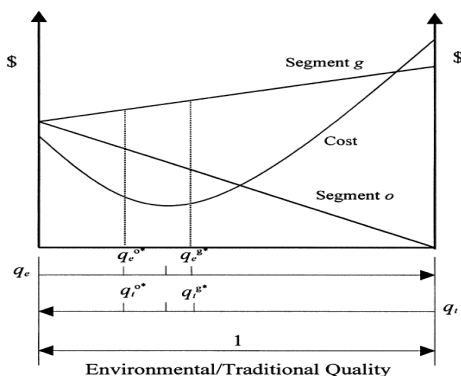


Figure 1 Variation de la demande en fonction de la qualité environnementale [Chen, 2001]

Dans ce papier nous présentons une modélisation de la demande par intervalle de qualité environnementale (discrétisation de la demande).

Le modèle permet de décider quelle variété de produit (quelle qualité environnementale) doit-on fabriquer et offrir à chaque

segment du marché (vert et ordinaire). Cela dépend du choix des procédés de fabrication et du choix des composants.

Il serait probablement intéressant pour l'entreprise, afin de maximiser sa part du marché, d'offrir pour le segment ordinaire un produit avec la qualité environnementale minimale ($[0, \alpha_1[$) et pour le segment vert le produit avec la qualité environnementale la plus élevée. Ainsi l'entreprise satisfait la demande ordinaire D_i^o et la demande verte D_i^e (où D_i^o est la demande ordinaire maximale et D_i^e est la demande verte maximale). Mais en présence des contraintes environnementales et des seuils limites des émissions ainsi que des coûts élevés pour la mise en place des alternatives logistiques et de production vertes, ces choix ne sont pas évidents. On pourrait penser intéressant pour l'entreprise de choisir une variété moins verte pour le segment vert et de perdre ainsi en terme de demande mais elle peut ainsi minimiser les coûts logistiques (coût de mise en place de procédé vert et de procuration des composants écologiques). Dans une logique symétrique il peut être plus intéressant pour l'entreprise de choisir un produit avec une haute qualité environnementale importante et par conséquent perdre en demande ordinaire mais aussi minimiser les coûts des taxes et des pénalités environnementales.

Nous distinguons dans ce papier trois intervalles de qualité environnementale : $[0, \alpha_1[$, $[\alpha_1, \alpha_2[$ et $[\alpha_2, 2[$. Les prix de vente des trois variétés correspondantes sont respectivement (S_1, S_2 et S_3) et les demandes du segment ordinaire et vert sont respectivement (D_i^o et D_i^e avec $i=1, 2, 3$).

L'entreprise doit supporter plusieurs types de coûts : coûts fixes de mise en place des différents procédés, coûts de gestion des fournisseurs différents, etc. Elle doit aussi se conformer aux lois qui règlementent les émissions polluantes des entreprises. Dans ce travail, nous modélisons les trois types de contraintes environnementales décrites précédemment (des seuils limites, achat/vente de droits de pollution, et pénalités). Comme nous l'avons déjà dit, selon la valeur de la pénalité, des prix d'achat/vente de droits de pollution, il peut être intéressant pour l'entreprise de franchir les seuils limites et de payer des pénalités. Dans d'autres contextes, où les gouvernements sont stricts et imposent des pénalités très élevées, l'entreprise serait probablement obligée de ne pas satisfaire la demande des clients verts afin de diminuer les coûts de conformité aux règlements environnementaux.

5 PRESENTATION DU MODELE

5.1 Paramètres du modèle

F : nombre des procédés de fabrication

M : nombre des différents types d'émissions

N : nombre des émissions soumises à des taxes ou à des valeurs seuils ($N \leq M$)

R : nombre total de composants nécessaires pour fabriquer une unité de produit fini.

μ_r : représente l'importance du composant r dans la composition du produit fini en termes d'impact environnemental. La somme $\sum_{r=1}^R \mu_r$ est égale à 1.

Par exemple, si la qualité environnementale du produit fini est calculée en fonction du nombre de ses composants verts par rapport au nombre total de composants alors μ_r représente le ratio : nombre de composants r utilisés/nombre total de composants utilisés. Si la qualité environnementale dépend fortement d'un composant particulier qui s'avère par exemple nocif à l'environnement (tel que le mercure dans les piles) alors dans ce cas, μ_r va-t-être très grand pour ce composant (proche de 1) et plus petit pour les autres. Dans certains

produits, μ_r peut aussi représenter un pourcentage en termes de masse, etc.

Q_m : pénalité unitaire relative à l'émission de type m ($m=1..N$)

Q_m^+ : prix unitaire d'achat de permission relative à l'émission m ($m=N+1..M$)

Q_m^- : prix unitaire de vente de permission relative à l'émission m ($m=N+1..M$)

E_m^T : quantité permise pour l'échange (vente/ achat) de l'émission m

E_m : quantité maximale permise pour l'émission m ($m=1..N$)

\mathcal{E}_{mf} : quantité de l'émission m dégagée lors de la fabrication d'une unité de produit fini en utilisant le procédé f

\mathcal{E}_{max} : quantité maximale des émissions dégagées par le procédé le plus polluant (parmi les procédés potentiels considérés) lors de la fabrication d'une unité de produit fini

C_f : coût unitaire de production en utilisant le procédé f

k_f : coût fixe de mise en place du procédé de fabrication f . Ce coût peut englober le coût d'achat des machines, les coûts de formation, etc.

P_r^T : prix unitaire d'achat du composant traditionnel r

P_r^G : prix unitaire d'achat du composant vert r

δ_r : quantité nécessaire de r pour fabriquer une unité du produit fini (selon la nomenclature)

S_1 : prix de vente du produit ordinaire si la qualité environnementale du produit est dans l'intervalle $[0, \alpha_1[$

S_2 : prix de vente du produit si la qualité environnementale du produit est dans l'intervalle $[\alpha_1, \alpha_2[$

S_3 : prix de vente du produit vert si la qualité environnementale du produit est dans l'intervalle $[\alpha_2, 2[$

D_1^O : demande du segment ordinaire si la qualité environnementale du produit est dans l'intervalle $[0, \alpha_1[$

D_2^O : demande du segment ordinaire si la qualité environnementale du produit est dans l'intervalle $[\alpha_1, \alpha_2[$

D_3^O : demande du segment ordinaire si la qualité environnementale du produit est dans l'intervalle $[\alpha_2, 2[$

D_1^G : demande du segment vert si la qualité environnementale du produit est dans l'intervalle $[0, \alpha_1[$

D_2^G : demande du segment vert si la qualité environnementale du produit est dans l'intervalle $[\alpha_1, \alpha_2[$

D_3^G : demande du segment vert si la qualité environnementale du produit est dans l'intervalle $[\alpha_2, 2[$

En fonction de la qualité environnementale du produit, on peut déduire le prix du produit ordinaire (S^O) et celui du produit vert (S^G) qui peuvent être égaux à S_1 , S_2 ou S_3 .

Selon la qualité environnementale du produit nous déduisons aussi la demande du produit ordinaire (D^O) et celui vert (D^G).

5.2 Variables de décision

z_f^g : 1 si le procédé de production f est utilisé pour la fabrication du produit vert, 0 sinon

z_f^o : 1 si le procédé de production f est utilisé pour la fabrication du produit ordinaire, 0 sinon

x_f^O : quantité du produit ordinaire fabriqué par le procédé f

x_f^G : quantité du produit vert fabriqué par le procédé f

$v_r^O = 1$ si le composant r choisie pour la fabrication du produit ordinaire est vert ; 0 s'il est traditionnel.

$v_r^G = 1$ si le composant r choisie pour la fabrication du produit vert est vert ; 0 si il est traditionnel.

5.3 Décisions déduites

Le modèle détermine principalement les procédés de fabrication utilisés (à travers les variables binaires z_f^g et z_f^o), le type des composants utilisés (vert ou traditionnel) à travers les

variables (v_r^O et v_r^G) et les quantités produites de chaque variante de produit (x^O et x^G).

En fonction des valeurs de z_f^g et z_f^o et v_r^O et v_r^G nous déterminons les valeurs des autres variables tels que la qualité environnementale des produits verts et ordinaires (a^O , a^G , b^G , b^O) ainsi que les autres variables citées ci-dessous :

a^O : attribut de qualité environnementale du produit ordinaire lié au choix du composant

a^G : attribut de qualité environnementale du produit vert lié au choix du composant

b^G : attribut de qualité environnementale du produit vert lié aux émissions

b^O : attribut de qualité environnementale du produit ordinaire lié aux émissions

e_m : quantité totale de l'émission m dégagée lors de la production

e_m^+ : nombre d'unités de permissions d'émission m achetées ($m = N + 1..M$)

e_m^- : nombre d'unités de permissions d'émission m vendues ($m = N + 1..M$)

θ_r^O : quantité totale de composant r de type traditionnel, nécessaire pour la fabrication des produits ordinaires ($\theta_r^O = \sum_{f=1}^F x_f^O (1 - v_r^O) \delta_r$)

θ_r^G : quantité totale de composant r de type traditionnel, nécessaire pour la fabrication des produits verts ($\theta_r^G = \sum_{f=1}^F x_f^G (1 - v_r^G) \delta_r$)

β_r^O : quantité totale de composant r de type vert, nécessaire pour la fabrication des produits ordinaires ($\beta_r^O = \sum_{f=1}^F x_f^O v_r^O \delta_r$)

β_r^G : quantité totale de composant r de type vert, nécessaire pour la fabrication des produits verts ($\beta_r^G = \sum_{f=1}^F x_f^G v_r^G \delta_r$)

$\sigma_f = 1$ si le procédé f est choisi ; 0 sinon

5.4 Fonction objectif

L'objectif est de maximiser le profit qui est la différence entre les revenus (obtenus par la vente des produits verts et traditionnels + la vente des permissions de pollution) et le coût total (engendré par les coûts d'achat des composants, les couts de production, les couts fixes de mise en place des différents procédés de fabrication et les pénalités payées en cas de dépassement des seuils imposés par les lois, et l'achat des permissions de pollution). La fonction objectif s'exprime comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Max} (S^G \sum_{f=1}^F x_f^G &+ S^O \sum_{f=1}^F x_f^O - \sum_{f=1}^F C_f (x_f^O + x_f^G) - \sum_{r=1}^R (\theta_r^O P_r^T \\ &+ \beta_r^O P_r^G) - \sum_{r=1}^R (\theta_r^G P_r^T + \beta_r^G P_r^G) - \sum_{f=1}^F k_f \sigma_f \\ &- \sum_{m=1}^M Q_m e_m + \sum_{m=N+1}^M Q_m^- e_m^- \\ &- \sum_{m=N+1}^M Q_m^+ e_m^+) \end{aligned}$$

5.5 Les contraintes du modèle

Nous considérons qu'une variété donnée du produit fini ne peut être fabriquée que par un seul procédé de production (contraintes (1) et (2)). Toute la quantité destinée au segment vert est fabriquée par le même procédé de fabrication (idem pour les produits ordinaires).

$$\sum_{f=1}^F z_f^O = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{f=1}^F z_f^G = 1 \quad (2)$$

La contrainte (3) identifie la quantité totale de chaque émission résultant de la production de tous les produits. Ensuite, la contrainte (4) modélise les seuils de pollution pour certaines émissions.

$$e_m = \left(\sum_{f=1}^F \varepsilon_{mf} (x_f^g + x_f^o) \right) \quad \text{pour } m \text{ donné} \quad (3)$$

$$e_m \leq E_m \quad \text{pour } m = 1..N \quad (4)$$

La contrainte (5) modélise l'ensemble des émissions pour lesquelles la négociation des quotas (achats/ventes des permissions de polluer) est possible.

$$e_m + e_m^- - e_m^+ = E_m^T \quad \text{pour } m = N+1..M \quad (5)$$

Comme nous l'avons déjà dit, la qualité environnementale de chaque variété est exprimée en fonction de deux attributs : la quantité totale des émissions dégagées lors de sa production et les types de composants choisis. Les contraintes (6) et (8) expriment le pourcentage de composants verts utilisés par rapport à la composition totale du produit respectivement pour le produit ordinaire et le produit vert.

Les contraintes (7) et (9) présentent les attributs environnementaux liés à des émissions polluantes dégagées lors du processus de production. Plus les émissions dégagées augmentent plus cet attribut est faible.

$$a^o = \sum_{r=1}^R v_r^o \mu_r \quad (6)$$

$$b^o = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_o}{\varepsilon_{\max}} \quad \text{avec } \varepsilon_o = \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M \varepsilon_{mf} z_f^o \quad (7)$$

$$a^g = \sum_{r=1}^R v_r^g \mu_r \quad (8)$$

$$b^g = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_g}{\varepsilon_{\max}} \quad \text{avec } \varepsilon_g = \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M \varepsilon_{mf} z_f^g \quad (9)$$

Comme nous l'avons indiqué, si la qualité environnementale du produit ordinaire est dans l'intervalle $[0, \alpha_1[$, le prix de vente de ce produit n'est pas élevé et la demande du segment ordinaire est à son maximum. Mais ce produit n'est pas intéressant pour les clients verts vue la faiblesse de sa qualité environnementale ($D_1^g = 0$).

Si la qualité environnementale est dans l'intervalle $[\alpha_2, 2]$, le produit présente une qualité environnementale élevée. Vu son prix de vente élevé ce produit ne peut être destiné qu'au segment vert du marché ($D_3^o = 0$).

Les contraintes (10), (11), (12) et (13) sont des contraintes logiques qui expriment la relation entre la qualité environnementale, le prix et la demande. Ces contraintes doivent être linéarisées. Ça sera l'objectif de la section 6.

$$\text{Si } 0 \leq (a^o + b^o) < \alpha_1 \text{ alors } D^o = D_1^o \text{ et } S^o = S_1 \quad (10)$$

$$\text{Si } \alpha_1 \leq (a^o + b^o) < \alpha_2 \text{ alors } D^o = D_2^o \text{ et } S^o = S_2 \quad (11)$$

$$\text{Si } \alpha_1 \leq (a^g + b^g) < \alpha_2 \text{ alors } D^g = D_2^g \text{ et } S^g = S^o = S_2 \quad (12)$$

$$\text{Si } \alpha_2 \leq (a^g + b^g) \leq 2 \text{ alors } D^g = D_3^g \text{ et } S^g = S_3 \quad (13)$$

L'entreprise décide quelle variété offrir à chaque segment du marché sachant que pour chaque segment, l'entreprise a le choix entre deux variétés uniquement.

La contrainte suivante assure que le produit ordinaire n'ait pas une qualité environnementale supérieure à α_2 . Le niveau maximal de qualité environnementale pour que le prix du produit ordinaire ne soit pas très élevé et reste acceptable pour les clients ordinaires.

$$(a^o + b^o) < \alpha_2 \quad (14)$$

La contrainte suivante assure que la qualité environnementale du produit vert soit supérieure à α_1 . Le niveau minimal de

qualité environnementale pour que le produit soit offert aux clients verts.

$$\alpha_1 \leq (a^g + b^g) \quad (15)$$

Les contraintes (16) et (17) assurent que les quantités produites de chaque variété de produit soient limitées par sa demande.

$$\sum_{f=1}^F x_f^g \leq D^g \quad (16)$$

$$\sum_{f=1}^F x_f^o \leq D^o \quad (17)$$

Toutes les contraintes suivantes concernent la relation entre les variables continues et les variables binaires.

$$\frac{1}{M} z_f^g \leq x_f^g \leq M z_f^g \quad \text{avec } M \text{ est assez grand}$$

$$\frac{1}{M} z_f^o \leq x_f^o \leq M z_f^o$$

$$\theta_r^o \leq M(1 - v_r^o)$$

$$\sum_{f=1}^F x_f^o \delta_r - v_r^o M \leq \theta_r^o \leq \sum_{f=1}^F x_f^o \delta_r$$

$$\theta_r^g \leq M(1 - v_r^g)$$

$$\sum_{f=1}^F x_f^g \delta_r - v_r^g M \leq \theta_r^g \leq \sum_{f=1}^F x_f^g \delta_r$$

$$\beta_r^o \leq M v_r^o$$

$$\sum_{f=1}^F x_f^o \delta_r - (1 - v_r^o) M \leq \beta_r^o \leq \sum_{f=1}^F x_f^o \delta_r$$

$$\beta_r^g \leq M v_r^g$$

$$\sum_{f=1}^F x_f^g \delta_r - (1 - v_r^g) M \leq \beta_r^g \leq \sum_{f=1}^F x_f^g \delta_r$$

$$z_f^o \leq \sigma_f \leq z_f^o + z_f^g$$

$$z_f^g \leq \sigma_f$$

Les dernières contraintes sont les contraintes de signe pour les différentes variables de décision.

$$e_m, e_m^-, e_m^+, a^o, b^o, a^g, b^g, x_f^o, x_f^g \geq 0$$

$$z_f^o, z_f^g \in \{0, 1\}$$

$$\sigma_f \in \{0, 1\}$$

$$v_r^o, v_r^g \in \{0, 1\}$$

6 LINEARISATION ET APPLICATION DU MODELE

Nous procédons dans cette section à la linéarisation des contraintes (12), (13), (14) et (15). Nous illustrons ensuite notre modèle par un exemple du domaine du textile.

6.1 Linéarisation des contraintes "Si alors"

$$\text{Si } 0 \leq (a^o + b^o) < \alpha_1 \text{ alors } D^o = D_1^o \text{ et } S^o = S_1^o \quad (12)$$

$$\text{Si } \alpha_1 \leq (a^o + b^o) < \alpha_2 \text{ alors } D^o = D_2^o \text{ et } S^o = S \quad (13)$$

Nous considérons que la qualité environnementale du produit ordinaire est inférieure à la valeur α_2 (hypothèse exprimée par la contrainte (14)) alors les contraintes (12) et (13) reviennent à :

$$\text{Si } (a^o + b^o) < \alpha_1 \text{ alors } D^o = D_1^o \text{ et } S^o = S_1^o$$

ET

$$\text{Si } (a^o + b^o) \geq \alpha_1 \text{ alors } D^o = D_2^o \text{ et } S^o = S$$

La linéarisation de ces deux contraintes (12 et 13) est comme suit:

Soit M est assez grand

ρ^o et ω^o deux variables binaires

$$D^o = \rho^o D_1^o + \omega^o D_2^o$$

$$S^o = \rho^o S_1^o + \omega^o S$$

$$\frac{1}{M} \rho^o - M \omega^o \leq \alpha_1 - (a^o + b^o)$$

$$\frac{1}{M} \omega^o - M \rho^o \leq (a^o + b^o) - \alpha_1$$

$$\rho^o + \omega^o = 1$$

Pour les contraintes (14) et (15), la linéarisation aboutit aux contraintes suivantes:

Soit M est assez grand

ρ^g et ω^g deux variables binaires

$$D^g = \rho^g D_2^g + \omega^g D_3^g$$

$$S^g = \rho^g S + \omega^g S_1^g$$

$$\frac{1}{M} \rho^g - M \omega^g \leq \alpha_2 - (a^g + b^g)$$

$$\frac{1}{M} \omega^g - M \rho^g \leq (a^g + b^g) - \alpha_2$$

$$\rho^g + \omega^g = 1$$

Un travail de linéarisation de la fonction objectif a aussi été effectué au niveau de $S^g \sum_{f=1}^F x_f^g + S^o \sum_{f=1}^F x_f^o$. Mais nous ne citons pas dans ce papier les détails de cette linéarisation.

6.2 Exemple Numérique

Pour illustrer notre modèle, nous l'appliquons sur un exemple du secteur du textile. La production de textiles a sans conteste un impact important sur notre environnement. Lors des différents traitements au cours de la production (teintures notamment), et aussi pendant leur utilisation, jusqu'à leur élimination. Il existe des technologies classiques qui en général génèrent un niveau élevé de polluants et d'autres technologies écologiques qui génèrent moins de polluants. Les technologies écologiques les plus connues dans le domaine de textile sont ceux à base des enzymes.

Dans notre exemple, nous nous sommes basés sur des paramètres recueillis de la littérature [Radulescu et al., 2009]. Certains paramètres et valeurs des émissions sont inspirés des sites web du domaine public. Nous présentons les principales données. Pour plus de détails voir [Radulescu et al., 2009].

Le tableau 2 résume quatre procédés de fabrication potentiels et présente les taux de trois types d'émissions polluantes dégagées par chacun de ces procédés (ϵ_{mf} : quantité du polluant m dégagé par le procédé f pour fabriquer une unité du produit).

Le procédé 1 est considéré comme étant le procédé le plus écologique. Il s'agit d'un procédé se basant sur l'utilisation des enzymes pour la fabrication du coton et sur les colorants réactifs pour la coloration. Le procédé 4 est le plus polluant ; il se base sur des technologies classiques de fabrication de coton et des colorants directs pour la teinture.

Tableau 2 : Taux des émissions (ϵ_{mf})

Polluants / Procédés	CCO-Cr	CBO5	Détergent biodégradable
Procédé 1	1.86	1.21	0.11
Procédé 2	1.7	1.22	0.13
Procédé 3	1.56	1.1	0.11
Procédé 4	2.0	1.33	0.13

Tableau 3: Niveaux maximums admissibles des polluants

Pollution indicators	Niveau max admissible (E_m)
CCO-Cr	500
CBO5	350
Biodegradable detergent	25

Le tableau 3 présente les niveaux limites acceptables pour les trois types de polluants considérés.

Prix de vente S1, S2, S3 120, 130, 150

Demandes du segment ordinaire D_1^o, D_2^o, D_3^o 200, 170, 0

Demandes du segment vert D_1^g, D_2^g, D_3^g 0, 100, 150

α_1, α_2 0.5, 1

Dans nos expérimentations nous nous intéressons principalement à l'impact des valeurs seuils des émissions sur le choix du procédé de fabrication et par la suite sur les demandes et les prix considérés. Plusieurs expérimentations ont été faites. Nous donnons quelques détails numériques de ces expérimentations mais nous citons nos principales constatations.

Dans le tableau suivant, nous présentons trois exemples pour différentes valeurs seuils des différentes émissions considérées (E_m).

Tableau 4 Quelques résultats

E1	E2	E3	$a^g + b^g$	$a^o + b^o$	z_f^g	z_f^o	D^o	X_f^o	D^g	X_f^g
500	350	25	0.5 + 0.36	0+0.36	1	1	D_1^o	200	D_2^g	27
500	350	<u>20</u>	0.5+0.44	0+0.36	1	3	D_1^o	181	D_2^g	0
<u>400</u>	350	25	0.5 + 0.36	0+0.44	3	1	D_1^o	200	D_2^g	27

• Le tableau 4 représente les premiers résultats relatifs à l'impact des taxes environnementales sur la qualité environnementale et la variation de la demande considérée. La première ligne du tableau indique que le produit vert est d'une qualité environnementale égale à 0.86 (le ratio de composition écologique est 0.5 et le procédé de fabrication choisie est le Procédé 1 ($z_f^g=1$) dont l'indicateur d'économie des émissions est 0.36). Le demande du segment vert considérée est D_2^g qui est satisfaite partiellement ($x_f^g = 27$). Le produit ordinaire fabriqué est dans la plage minimale de la qualité environnementale (0.36). Il est fabriqué par le même procédé 1 mais ne contient pas de composant écologique. La demande du segment ordinaire considérée est maximale ($D_1^o = 200$) et elle est totalement satisfaite.

Dans la deuxième ligne, la diminution du seuil maximal pour E_3 n'impacte pas la valeur de la qualité environnementale du produit ordinaire offert. Donc la demande ordinaire considérée est D_1^o ; par contre cette demande n'a pas pu être complètement satisfaite ($x_f^o = 181$). Pour ce nouveau scénario, l'entreprise a identifié une solution pour le produit vert mais pour des raisons de minimisation des coûts, l'entreprise a choisi de ne pas fabriquer ce produit ($x_f^g = 0$).

Pour la 3^{ème} ligne du tableau, les constatations sont similaires à la première ligne.

Dans ce qui suit nous donnons des constatations générales suite à des tests dont les détails numériques ne sont pas donnés.

• Les politiques environnementales des gouvernements influencent considérablement les décisions environnementales des entreprises. En effet en absence de contraintes environnementales (ou dans le cas où les valeurs seuils sont très élevés), le procédé 4 est celui choisi pour la fabrication du produit ordinaire (il s'agit du procédé le plus polluant mais le moins coûteux). Le choix de ce procédé, en absence de contrainte environnementale permet de considérer la demande ordinaire maximale. Sous les valeurs seuils exigés par le gouvernement (décrites dans tableau 3), le procédé de fabrication choisi pour la production de la variété ordinaire est le procédé 2.

• La réduction du seuil limite d'un polluant peut orienter le modèle vers des décisions qui diminuent non seulement les émissions de ce polluant mais également d'autres polluants. Par exemple la diminution du seuil limite de (CCO-Cr) à 400

unités (au lieu de 500) a permis de réduire le dégagement de (CCO–Cr) et du (CBO5). Dans d'autres cas, la diminution du seuil limite d'un polluant peut orienter le modèle vers des décisions qui diminuent le dégagement de ce polluant mais qui entraînent l'augmentation de l'émission d'autres polluants. Par exemple si la valeur seuil d'émission de Détergent biodégradable passe à 20 (au lieu de 25) nous remarquons que les choix décisionnels du modèle entraînent une augmentation dans la quantité totale du (CCO–Cr) dégagée.

Ces résultats montrent que les gouvernements doivent mener des études sur les interactions entre les différents types de polluants avant de préciser les seuils des émissions afin de ne pas conduire à des effets inverses (diminuer certains taux de polluants en augmentant d'autres).

7 CONCLUSION

Ce travail constitue une première tentative de développement de modèles qui abordent la relation entre la performance environnementale de la chaîne logistique et celle du produit sous des contraintes environnementales.

Pour les gouvernements, de tels modèles plus complets peuvent constituer un outil de décision qui leur permet d'étudier leurs politiques environnementales afin de garantir à la fois le respect de l'environnement et la compétitivité des entreprises.

Pour ces dernières, de tels modèles leur permettent de répondre aux règlements environnementaux d'une manière proactive plutôt que réactive. Elles seront capables de satisfaire les clients verts et de gagner de nouveaux parts du marché. Ainsi les contraintes environnementales peuvent être vues comme moteur d'innovation et de compétitivité plutôt que des obstacles.

Les principales contributions de notre travail sont les suivantes:

- Modélisation de la qualité environnementale des produits.
- Décision sur la qualité environnementale du produit fabriqué en tenant compte des facteurs de production.
- Modélisation du prix et de la demande qui dépendent du segment du marché considéré. Dans ce papier nous présentons une modélisation de la demande par intervalle de qualité environnementale (discrétisation de la demande).
- Modélisation de l'impact des procédés de fabrication et de choix des composants sur la qualité environnementale des produits.
- Prise en compte des réglementations environnementales.

Parmi les limites de ce modèle on peut citer la nécessité d'intégrer les activités de recyclage et de refabrication, ainsi que les activités de transport.

Dans nos prochains travaux nous cherchons à développer ce modèle en prenant en compte les différents aspects cités précédemment. Notre ambition est à terme de fournir de vrais outils d'aide à la décision qui peuvent être utiles pour les gouvernements et/ou pour les entreprises.

8 REFERENCES

Bei, L.-T., E.M. Simpson. (1995). The determinants of consumers' purchase decision for recycled products: An application of acquisition-transaction utility theory. *Adv. Consumer Res.* 22, pp. 257–261.

Borchardt M., M. H. Wendt, G. M. Pereira, M. A. Sellitto (2011). Redesign of a component based on ecodesign practices: environmental impact and cost reduction

achievements. *Journal of Cleaner Production*, 19, pp: 49–57

Chen C., (2001). Design for the Environment: A Quality-Based Model for Green Product Development, *Management Science*, 47 (2).

Chen C. and Monahan G. E.. (2010). Environmental safety stock: The impacts of regulatory and voluntary control policies on production planning, inventory control, and environmental performance. *European Journal of Operational Research*

Dobos I.. (1999). Production strategies under environmental constraints in an Arrow-Karlin model. *Int. J. Production Economics* 59, pp : 337-340.

El Hadj Khalaf R., B. Agard, et B. Penz. (2009). Conception conjointe de familles de produits et chaîne logistique : Entre diversité et standardisation. *8ème Congrès International de Génie Industriel CIGI'09*, Tarbes, France, 11_13 Juin, 2009.

Fixson S.K., (2005). S.K. Product architecture assessment: a tool to link product, process, and supply chain design decisions. *Journal of Operations Management* 23, pp. 345–369.

Gehin A., P. Zwolinski, D. Brissaud (2008). A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. *Journal of Cleaner Production*, 16, (5), pp. 566-576

Hartl R. F. and Kort P. M. (1997) Optimal input substitution of a firm facing an environmental constraint. *European Journal of Operational Research* 99, pp. 336-352.

Lamothe J., K. Hadj-Hamou, et A. Aldanondo (2006). An optimization model for selecting a product family and designing its supply chain. *European Journal of Operational Research*, 169, pp. 1030-1047.

Letmathe P., N. Balakrishnan (2005). Environmental considerations on the optimal product mix. *European Journal of Operational Research*, 167, pp. 398–412.

Ljungberg L. Y. (2007). Materials selection and design for development of sustainable products. *Materials & Design*, 28, pp. 466-479

Luttrupp, C., Lagerstedt, J., (2006). EcoDesign and the ten golden rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production* 14 (15/16), pp. 1396-1408.

Mahenc P., (2008). Signaling the environmental performance of polluting products to green consumers. *Int. J. Ind. Organ.* 26, pp. 59–68.

Ottman, J.A., Stafford, E.R., Hartman, C.L., (2006). Green marketing myopia. *Environment* 48 (5), pp. 22-36.

Peattie, K., (1995). *Environmental Marketing Management: Meeting the Green Challenge*. Pitman Publishing, London, UK.

Radulescu, M., S. Radulescu, CZ. Radulescu (2009). Sustainable production technologies which take into account environmental constraints. *European Journal of Operational Research* 193, pp. 730-740

Roy R., Wiold, D., Gardiner, J.P., Potter, S., (1996). *Innovative Product Development*. The Open University, Milton Keynes, UK.

Rungtusanatham M., Forza C., (2005). Coordinating product design, process design, and supply chain design decisions, *Journal of Operations Management* 23, pp. 257–265.

Shi L., Ólafsson S., Chen Q., (2001). An Optimization Framework for Product Design. *Management Science*, 47, (12), pp. 1681–1692.