



HAL
open science

Émissions de carbone dans un modèle de production-stocks multi-echelon avec prise en compte des contraintes de délai

Imen Noura, Ramzi Hammami, Yannick Frein

► **To cite this version:**

Imen Noura, Ramzi Hammami, Yannick Frein. Émissions de carbone dans un modèle de production-stocks multi-echelon avec prise en compte des contraintes de délai. MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nov 2014, Nancy, France. hal-01166639

HAL Id: hal-01166639

<https://hal.science/hal-01166639>

Submitted on 23 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉMISSIONS DE CARBONE DANS UN MODELE DE PRODUCTION-STOCKAGE MULTI-ECHELON AVEC PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES DE DELAI

Imen Nouira, Ramzi Hammami

ESC Rennes School of Business / 2 rue Robert
d'Arbrissel CS 76522 35065 Rennes CEDEX France
imen.nouira@esc-rennes.fr
ramzi.hammami@esc-rennes.fr

Yannick Frein

Grenoble-INP / UJF-Grenoble 1 / CNRS, G-SCOP
UMR5272 Grenoble, F-38031, France
YANNICK.FREIN@G-SCOP.INPG.FR

RESUME : Dans cet article, nous développons un modèle mathématique d'optimisation qui intègre les émissions de carbone dans un modèle de gestion de production-stockage multi-échelle sous des contraintes de délai. Le modèle proposé étudie la relation entre les décisions logistiques et les émissions de carbone. Nous nous intéressons principalement aux décisions liées à la production (des produits finis et intermédiaires), à l'approvisionnement chez des fournisseurs internes et externes, au positionnement des stocks. Dans ce papier, nous considérons deux types de réglementation environnementale à savoir : (1) taxe sur les émissions et (2) seuil limite d'émissions carbone. Nous exploitons le modèle proposé pour réaliser un ensemble d'expérimentations afin de déduire un ensemble d'implications managériales.

MOTS-CLES : modèles de production-stockage, émissions de carbone, délai, taxe carbone, seuil d'émissions.

1 INTRODUCTION

Pendant longtemps, l'optimisation des activités logistiques et de production s'est basée principalement sur des critères économiques (minimisation des coûts ou maximisation du profit) sans tenir compte des impacts négatifs que ces activités peuvent avoir sur l'environnement, essentiellement en termes d'émissions de carbone. Mais dans la dernière décennie, les problématiques environnementales sont devenues au cœur des préoccupations des industriels.

La prise de conscience grandissante des menaces environnementales a en effet poussé les gouvernements à mettre en place un cadre législatif strict afin de limiter les impacts négatifs des activités industrielles sur l'environnement. De leur côté, les consommateurs sont de plus en plus concernés par les problèmes environnementaux. Dans ce contexte où les défis environnementaux viennent s'ajouter aux défis économiques, les entreprises sont obligées d'intégrer les problématiques environnementales dans leur gestion. Ainsi, plusieurs problèmes « traditionnels » de gestion de la production et des activités logistiques ont été revisités afin de prendre en considération ces problématiques environnementales.

La plupart de ces travaux se sont concentrés sur l'étude des impacts environnementaux (principalement en termes des émissions de carbone) liés aux décisions de localisation des sites, de sélection des fournisseurs (Seuring 2013, Tang et Zhou 2012, Dekker et al., 2012) et de sélection des technologies. Cependant, comme le souligne Benjaafar et al. (2013), la littérature de gestion des opérations basée sur des modèles analytiques, tend à négliger les émissions de carbone liées aux décisions opérationnelles et essentiellement celles liées aux activités de production et de gestion des stocks.

En général, le problème production-stockage s'intéresse principalement aux décisions liées aux quantités fabriquées et aux niveaux des stocks. Ces décisions ont certainement un impact significatif sur les émissions de carbone. Dans ce papier, nous revisitons le modèle production-stockage avec prise en compte des émissions de carbone tout en considérant le contexte complexe d'une chaîne logistique (CL) multi-échelle avec la prise en compte des contraintes de délai.

Notre modèle détermine pour chaque commande, le délai consommé dans toute la CL et impose que chaque commande soit livrée dans les délais souhaités par le client final. Au delà de l'étude de la corrélation entre les décisions de production-stockage et les émissions de carbone (déjà adressées dans la littérature), le modèle proposé permet d'adresser de nouvelles problématiques liées à la considération des délais de livraison dans la problématique production-stockage et émissions de carbone.

Ce papier est organisé comme suit : dans la section 2, nous présentons une revue de la littérature sur les modèles de production-stockage et les considérations environnementales. La problématique étudiée ainsi que la formulation mathématique du modèle sont décrits dans la section 3. Dans la section 4, nous présentons la modélisation mathématique. Nous consacrons la section 5 à l'expérimentation de notre modèle. Enfin, nous donnons des observations et nous présentons certaines perspectives de travail.

2 REVUE DE LA LITTERATURE

Dans cette revue de la littérature, nous nous focalisons sur les modèles de production et de gestion des stocks qui tiennent compte des problématiques environnementales. Les questions environnementales ont été abordées dans la littérature de la gestion des opérations de façons différentes. Nous présentons quelques papiers sélection-

nés en fonction de leur adéquation avec le thème de notre papier.

Wu et Chang (2004) présentent un programme optimal de planification de la production en tenant compte des coûts environnementaux. Les auteurs considèrent un modèle multi-objectif qui permet de (1) minimiser les coûts de production, (2) maximiser la capacité de production et (3) minimiser les coûts de stockage. Les coûts environnementaux ont été intégrés dans les différents coûts de l'entreprise (coûts de production et coûts de stockage). Une application de ce modèle sur l'industrie de textile de Taiwan a été présentée.

Letmathe et Balakrishnan (2005) intègrent les problématiques environnementales dans un modèle de planification de la production qui tient compte des législations environnementales. Les auteurs considèrent que pour la fabrication d'un produit donné, il existe plusieurs processus de production qui diffèrent par leurs niveaux d'émissions polluantes, leurs consommations d'énergie et de ressources. L'objectif est de maximiser le profit total (revenus - coûts). Les revenus sont générés par la vente de produits et les émissions négociables (vente des permissions de pollution). Les coûts sont les coûts de la production, d'achat des émissions négociables, et les pénalités à payer pour les émissions. Les auteurs supposent que la demande des produits diminue en fonction de l'augmentation des émissions.

Radulescu et al. (2009) présentent deux modèles de planification de la production en tenant compte des questions économiques et environnementales dans un environnement incertain. Les modèles peuvent être considérés comme des modèles de prévention de la pollution. Les auteurs ont formulé deux problèmes de programmation stochastique. L'objectif du premier modèle est de maximiser le profit de l'entreprise, tandis que le deuxième minimise les risques environnementaux en agissant sur les taux des émissions. Ces modèles visent à obtenir des plans optimaux de production pour une entreprise du secteur de textile.

Nouira et al., (2014) développent deux modèles d'optimisation qui s'intéressent aux choix des procédés de production et aux choix des composants achetés. Les émissions du procédé de production sélectionné et le taux des composants verts choisis, déterminent la qualité environnementale du produit fini fabriqué. Dans le premier modèle proposé, les auteurs considèrent qu'un seul produit est offert par l'entreprise et que la demande de ce produit dépend de son niveau de qualité environnementale. Dans le second modèle, les auteurs considèrent que le marché est segmenté entre des clients ordinaires et des clients verts et que l'entreprise offre une variété différente du produit fini pour chaque segment du marché. Dans ce cas, la demande et le prix du produit fini dépendent de son niveau de qualité environnementale.

Absi et al., (2013) étudient le problème de taille des lots dans un contexte multi-sourcing en considérant les contraintes liées aux émissions de carbone. Les contraintes considérées par les auteurs visent à limiter les émissions de carbone par unité de produit. Les auteurs considèrent

qu'un produit peut être obtenu avec différents modes. Un mode correspond à la combinaison d'un site de production et un type de transport. Chaque mode est caractérisé par un coût économique et également des émissions unitaires (par unité de produit) de carbone.

Helmrich et al., (2014) considèrent le problème de gestion des tailles des lots en considérant la contrainte sur les émissions de carbone. En plus des coûts financiers habituels, les auteurs considèrent les émissions associées à la production, de possession de stock et de mise en place des processus de production. Les auteurs montrent que le problème de taille des lots avec la contrainte de capacité d'émission est NP-Hard et proposent différentes méthodes de résolution.

Nous soulignons que plusieurs autres travaux de la littérature portent sur l'intégration des questions environnementales dans les problématiques de gestion des opérations (Chen and Monahan (2010), Hua et al. (2011), Wahab et al. (2011), Drake et al. (2012), Bouchery et al. (2012), Krass et al. (2013), Jaber et al. (2013), Benjaafar et al. (2013)). Nous ne détaillons pas dans ce papier ces différents travaux. Pour une plus ample étude de littérature sur le sujet, nous invitons les lecteurs à se référer à Nouira et al., (2014).

Suite à cette revue de la littérature nous soulignons un manque de modèle de gestion de production-stockage qui tiennent compte des problématiques environnementales et qui s'intéressent également aux : (1) contraintes de délais de livraison et (2) au contexte de la chaîne logistique multi-échelle où les produits d'entrée et les produits intermédiaires (semi-fini) sont gérés simultanément avec les produits finis. Notre travail de recherche apporte une contribution à la littérature : d'une part en s'intéressant au problème production-stockage en tenant compte des problématiques environnementales tout en considérant également les contraintes de délai et le contexte complexe de CL multi-échelle, d'autre part, en exploitant les modèles développés pour dériver une série de recommandations managériales qui ne peuvent pas être déduites avec les modèles existants.

3 PROBLEMATIQUE

3.1 Configuration de la chaîne étudiée

Nous considérons le cas d'une entreprise possédant un ensemble de sites de production et un seul centre de distribution qui satisfait la demande du client final. Nous considérons un ensemble de fournisseurs externes (nœuds sans antécédents) indexés par $j=I, \dots, V$. Les sites de production sont indexés par $j=V+I, \dots, M$ et le centre de distribution est indexé par $j=M+I=R$. Le centre de distribution satisfait les demandes des clients en produits finis sur un horizon de planification multi-période. L'entreprise achète la matière première (composants) chez des fournisseurs externes. Ces composants sont transformés en produits intermédiaires qui vont être ensuite utilisés pour fabriquer le produit fini. Nous notons par P le nombre total des produits (composants).

Comme dans Simchi-Levi and Zhao (2005), nous considérons que chaque site j ($V < j \leq R$) gère un seul produit en sortie (qui peut être un produit intermédiaire ou fini). Une unité de ce produit de sortie peut être obtenue à partir de plusieurs unités de différents produits d'entrée (qui peuvent être des matières premières ou des produits intermédiaires). Ainsi pour chaque site j , on associe un ensemble de produits d'entrée et un seul produit de sortie. Nous notons par $In(j)$ l'ensemble des produits d'entrée du site j tandis que $Out(j)$ représente les produits de sortie du site j . Il est clair que pour le site de distribution ($j=R$), le produit fini est en même temps le produit d'entrée et de sortie. Le scalaire Φ_{qp} indique le nombre de produits d'entrée p nécessaires pour fabriquer une unité du produit de sortie q . Nous supposons que chaque site j possède un seul nœud en amont pour chacun de ces produits en entrée. Ce nœud en amont peut être un fournisseur externe ou un site de production. Nous notons $Up(j)$ l'ensemble des sites en amont qui fournissent le site j et $Down(j)$ l'ensemble des sites en aval qui sont fournis par j . La figure 1 illustre la structure de la chaîne logistique étudiée.

3.2 Décisions du problème production-stock

Concernant la demande, nous considérons qu'une commande est passée par le client final au début de chaque période. Les périodes sont indexées par $t=1, \dots, T$. Nous notons par Γ^t la longueur de la période t (par exemple en jours). Nous signalons que les périodes de planification peuvent être de longueurs différentes (c.-à-d., nous pouvons avoir $\Gamma^t \neq \Gamma^{t'}$). Nous notons par D^t la demande du client final à la période t . Comme dans Hammami et Frein (2014), nous supposons que la quantité et la date de livraison demandée par le client sont connues au début de l'horizon de planification. Un tel scénario de demande correspond à une situation réaliste et habituelle dans le contexte de B to B, notamment dans l'industrie automobile et électronique (Hammami et Frein, 2014). On considère Δ^t le temps disponible pour la livraison de la commande de la période t ($\Delta^t = \text{date exprimée par le client} - \text{date de passation de commande}$). Etant donné les contraintes liées au délai de livraison et/ou les législations environnementales, l'entreprise peut être incapable de satisfaire la totalité d'une commande donnée ou elle peut également accepter la perte de certaines ventes, quand ceci s'avère plus profitable. Dans ce cas, il y a un coût de perte de vente.

L'entreprise doit déterminer, pour chaque site de production ou de distribution j ($V < j \leq R$) : (1) la quantité à commander à chaque période de chaque produit d'entrée, (2) la quantité produite à chaque période (uniquement pour les sites de production), et par conséquent (3) la quantité à garder en stock pour chaque produit à chaque période. Notons que chaque site (de production ou de distribution) est un lieu potentiel pour le stockage des produits de sortie et des produits d'entrée. Ces décisions sont prises en ayant comme objectif la minimisation des coûts totaux de la CL sur un horizon de planification donné et en considérant les contraintes liées aux délais de livraison et aux émissions de carbone.

3.3 Problématique d'émissions carbone

Etant donné les contraintes d'émission de carbone, l'entreprise doit considérer les différentes émissions associées aux différentes décisions du problème de production-stockage à savoir les décisions de passation des commandes, de production et de possession des stocks. Comme signalé par Benjaafar et al. (2013), il peut y avoir des émissions associées à la passation de commande à un fournisseur interne ou externe (par exemple, les émissions dues aux transports) ou par la production. Il peut y avoir également des émissions variables associées à chaque unité commandée ou fabriquée et des émissions associées au stockage de chaque unité à chaque période de temps.

Tous ces types d'émissions sont considérés dans notre modèle avec la prise en compte de deux types de législation environnementale: (a) taxe sur la quantité d'émissions dégagées et (b) des seuils d'émission carbone qui ne peuvent pas être franchis (Nouira et al., 2014, Benjaafar et al., 2013, Letmathe et Balakrishnan 2005). Rappelons que les seuils d'émission peuvent limiter les quantités produites par l'entreprise et par la suite engendrer des pertes de vente.

3.4 Problématique de délai

Pour chaque commande passée par le client final, nous imposons que le délai de livraison ne dépasse pas le délai imposé par le client. Une commande de client qui ne peut pas être livrée à temps sera partiellement ou totalement perdue. Nous considérons trois types de délais dans le calcul du délai de livraison de chaque commande : (1) le délai d'approvisionnement chez les fournisseurs externes et internes, (2) le délai de production, et (3) le délai de traitement dans le site de distribution. Le délai d'approvisionnement auprès des fournisseurs externes désigne l'intervalle de temps entre la passation de la commande auprès du fournisseur et la réception des produits sur le site de l'acheteur. Le délai d'approvisionnement du fournisseur interne (c.-à-d., un autre site) désigne l'intervalle de temps entre le moment où toute la quantité nécessaire est disponible à l'usine du vendeur jusqu'à ce que la réception des produits à l'usine de l'acheteur soit faite. Nous notons par TO_{pij} le délai d'approvisionnement en produit p à partir du nœud i pour le nœud j , ceci inclut le délai de transport. On considère que TO_{pij} est indépendant de la quantité considérée. Le délai de production est l'intervalle de temps à partir du moment où tous les composants nécessaires sont prêts dans le site de production jusqu'à la fin de la production. Comme nous considérons une capacité de production finie, le délai de production dépend de la quantité produite. Nous notons par TM_j le temps nécessaire pour faire une unité du produit de sortie du site j . Approximativement, le délai de production de N unités peut être estimé à $TM_j \times N$. Le délai de traitement dans le site de distribution représente l'intervalle de temps entre le moment de la réception du produit fini (à partir du site en amont) et sa préparation pour la livraison. Nous notons par TP le délai de traitement par unité de produit

fini. Il est important de noter que le délai de livraison d'une commande donnée dépend également des niveaux de stocks des différents produits dans les différents niveaux de la chaîne logistique.

4 MODELISATION MATHEMATIQUE

Précisons que dans Hammami et Frein (2014), les auteurs ont présenté un modèle production-stockage multi-échelon sous des contraintes de délai. Dans ce papier, nous étendons ce modèle afin de tenir compte des questions environnementales à travers la considération des émissions carbone et l'intégration des réglementations environnementales qui s'y rattachent. Dans ce papier, nous décrivons les différents paramètres et variables de décisions. Nous présentons la fonction objectif et les principales contraintes du modèle. Pour certaines contraintes notamment celles liées à la gestion des flux, nous invitons les auteurs à se référer à Hammami et Frein (2014).

4.1 Variables de décision et paramètres

Nous présentons dans ce qui suit les différentes variables de décisions ainsi que les paramètres de délai et les facteurs de coûts :

Variables Flux:

- z^t : quantité du produit fini livré pour le client final pour satisfaire l'ordre de la période t ($z^t \leq D^t$).
- h_{pj}^t : niveau du stock du produit p dans le site j ($V < j \leq R$) au début de la période t .
- x_{pj}^t : quantité du produit de sortie p fabriqué dans le site j ($V < j \leq M$) à la période t pour satisfaire la demande en aval à la période t . Ceci ne considère pas la quantité nécessaire pour assurer le stock de p dans j (pour la période suivante).
- s_{pj}^t : quantité du produit de sortie p fabriqué dans le site j ($V < j \leq M$) à la période t afin d'assurer le stock de p dans j pour la période suivante. Ceci ne comprend pas la quantité nécessaire pour assurer la demande en aval à la période t .
- y_{qij}^t : quantité totale du produit d'entrée q commandé (et reçu) par le site j ($V < j \leq R$) à partir du nœud i ($1 < i \leq M$) à la période t .

Variables binaires nécessaires pour modéliser les émissions fixes et les coûts

- a_{pj}^t : égal à 1 si $x_{pj}^t + h_{pj}^t > 0$, 0 sinon.
- b_{qij}^t : égal à 1 si $y_{qij}^t > 0$, 0 sinon.

Variables de modélisation des délais

- n_{qj}^t : besoin net du produit d'entrée q dans le site j ($V < j \leq R$) déclenché par la demande en aval à la période t . Si j est un site de production alors n_{qj}^t représente la quantité de q qui est encore nécessaire (après avoir considéré le stock disponible de q au début de t) pour fabriquer x_{pj}^t du produit de sortie p . Si j est un site de distribution alors n_{qj}^t représente la

quantité de q encore nécessaire (après avoir pris en compte le stock disponible de q au début de t) pour obtenir la quantité z^t du produit fini.

- m_{qj}^t : besoin net du produit d'entrée q dans le site j ($V < j \leq M$) déclenché par la demande en aval et la mise à jour du stock en produit de sortie à la période t (pas uniquement pour la demande en aval comme dans le cas de n_{qj}^t). Ceci représente la quantité de q encore nécessaire (après considération du stock disponible de q au début de la période t) pour fabriquer la quantité $x_{pj}^t + s_{pj}^t$ du produit de sortie p .
- $\bar{\delta}_{pj}^t$: délai nécessaire pour obtenir dans le site j la quantité du produit de sortie p correspondant à la demande en aval à la période t . Cette quantité est donnée par z^t pour $j = R$ et $\sum_{i \in \text{Down}(j)} y_{qij}^t$ pour $V < j \leq M$.
- \bar{n}_{qj}^t : délai nécessaire pour remplir le besoin n_{qj}^t du produit d'entrée q dans le site j .
- \bar{m}_{qj}^t : délai nécessaire pour remplir le besoin m_{qj}^t du produit d'entrée q dans le site j .
- \bar{y}_{qij}^t : délai nécessaire pour recevoir la quantité commandée y_{qij}^t du produit d'entrée q dans le site j .

Facteurs Coûts:

- CL^t : Coût par unité de vente perdue associée à la commande du client final à la période t
- CI_{pj}^t : coût unitaire de possession de stock du produit p dans le site j durant la période t
- COF_{pij}^t : coût fixe par commande du produit p passée par le site j au site (ou fournisseur externe) i à la période t . Ceci inclut le coût fixe de transport.
- COV_{pij}^t : coût par unité de produit p transporté du site (ou fournisseur externe) i au site j à la période t . Ceci inclut le coût variable du transport.
- CMV_j^t : coût unitaire de production du produit de sortie dans le site j à la période t . Notez qu'il n'est pas nécessaire de rajouter l'indice de produit à CMV_j^t , puisqu'il a été convenu qu'il y a un seul produit de sortie dans chaque site de production.

Paramètres de modélisation des émissions carbone

- EI_{pj}^t : quantité variable d'émissions de carbone par unité du produit p stocké dans le site j durant la période t .
- EMF_j^t : quantité fixe d'émission de carbone associée à la production du produit de sortie dans le site j à la période t (par ex., les émissions dues à la mise en place du processus)
- EMV_j^t : quantité variable des émissions de carbone par unité de produit de sortie fabriqué dans le site j à la période t .
- EOF_{pij}^t : quantité fixe d'émission de carbone associée à la commande de produit p livrée par le site (ou fournisseur externe) i au site j à la période t (exemple, les émissions dues aux transports)

- EOV_{pij}^t : quantité variable des émissions de carbone par unité de produit p envoyé par le site (ou fournisseur externe) i au site j à la période t

Paramètres de délai

- TO_{pij} : délai d'approvisionnement de produit p à partir du site (ou fournisseur externe) i pour le site j . Ce délai comprend principalement le délai de transport.
- TP : délai de traitement par unité de produit fini dans le site de distribution
- TM_j : délai de production par unité de produit de sortie dans le site j .

4.2 Fonction objectif et modélisation des émissions de carbone

On note par c le coût total regroupant les coûts des ventes perdues, d'approvisionnement, de production et de stockage sur l'horizon de planification étudié. La fonction objectif minimise le coût total de la chaîne qui, en plus de c , intègre le coût des émissions dans le cas où nous considérons la politique de taxe carbone. Le coût total c est donné par l'équation (1). Pour mieux comprendre comment c est calculé, noter que le niveau des ventes perdues à la période t est donnée par $(D^t - z^t)$, la quantité totale du produit p fabriqué dans le site j à la période t est $(x_{pj}^t + s_{pj}^t)$ et le niveau moyen des stocks de produits p dans un site j sur la période t est $((h_{pj}^t + h_{pj}^{t+1}) / 2)$.

$$c = \sum_{t=1}^T CL^t (D^t - z^t) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{j=v+1}^R \sum_{p=1}^P (COF_{pij}^t b_{pij}^t + COV_{pij}^t y_{pij}^t) + \sum_{t=1}^T \sum_{j=v+1}^M \sum_{p=1}^P CMV_j^t (x_{pj}^t + s_{pj}^t) + \sum_{t=1}^T \sum_{j=v+1}^R \sum_{p=1}^P CI_{pj}^t \frac{(h_{pj}^t + h_{pj}^{t+1})}{2} \quad (1)$$

Nous notons par e_j la quantité totale des émissions de carbone associées au site j sur l'horizon de planification étudié. e_j comprend les émissions fixes et variables liées aux approvisionnements faits à partir des sites en amont, les émissions fixes et variables générées par la production (uniquement pour les sites de production) et également les émissions associées à la possession des stocks. La quantité totale des émissions associées au site j est donnée par l'équation (2). La quantité totale des émissions de la chaîne logistique est $e = \sum_{j=v+1}^R e_j$

$$e_j = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{p=1}^P (EOF_{pij}^t b_{pij}^t + EOV_{pij}^t y_{pij}^t) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P (EMF_j^t a_{pj}^t + EMV_j^t (x_{pj}^t + s_{pj}^t)) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P EI_{pj}^t \frac{y_{pj}^t + y_{pj}^{t+1}}{2} \text{ si } V < j \leq M \end{array} \right\} \\ \left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{p=1}^P (EOF_{pij}^t b_{pij}^t + EOV_{pij}^t y_{pij}^t) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P EI_{pj}^t \frac{y_{pj}^t + y_{pj}^{t+1}}{2} \text{ si } j = R \end{array} \right\} \end{cases} \quad (2)$$

4.3 Prise en compte de la taxe carbone :

Notons par α la valeur de la taxe carbone payée pour chaque unité d'émission dérogée. La fonction objectif du modèle avec taxe carbone est la suivante.

$$\text{Min } (c + \alpha e) \quad (4)$$

4.4 Prise en compte des seuils d'émissions

Dans le cas de la politique de seuils d'émission limites, nous considérons la fonction objectif de minimisation de coût total c et nous rajoutons au modèle une contrainte sur la quantité d'émission. On suppose d'abord que le seuil d'émission est imposé sur l'ensemble de la chaîne logistique. En d'autres termes, l'échange (partage) des émissions entre les différents sites de la CL est permis. Nous notons par Cap , la valeur du seuil d'émissions. Ainsi, la contrainte suivante est ajoutée au modèle.

$$e \leq Cap \quad (5)$$

Nous pouvons aussi avoir le cas où le seuil d'émissions est imposé « individuellement » pour chaque site. Le partage des émissions entre les sites n'est pas autorisé. On note par CAP_j le seuil d'émissions imposé au site j . Ainsi, nous ajoutons la contrainte suivante au modèle.

$$e_j < CAP_j \quad \forall j \leq R \quad (6)$$

5 EXPERIMENTATIONS ET IMPLICATIONS MANAGERIALES

Nous exploitons le modèle proposé pour réaliser des expérimentations et en déduire un ensemble d'implications managériales. Les résultats des expérimentations sont présentés sous la forme d'une série d'observations basées sur les résultats numériques générées à partir de la résolution du modèle pour différentes instances et en faisant varier différents paramètres. Nous résolvons le modèle avec Cplex.

Nous considérons la chaîne décrite dans la figure. 1. Nous considérons 1 seul fournisseur externe s qui fournit les sites de production $m1$ et $m2$ avec la matière première $p1$. Les sites $m1$ et $m2$ utilisent $p1$ pour fabriquer respectivement, $p2$ et $p3$. Ces produits sont ensuite transférés vers le site $m3$ où ils sont utilisés pour fabriquer le produit fini $p4$. Le produit $p4$ est livré au site de distribution d pour servir le client final. Le délai de production unitaire est $TM_j = 0,02 \forall j$. Le délai de traitement unitaire (dans le site d) est égal à 0,01. Le délai de passation de commande est donné dans la figure 1 (en dessous de chaque arc). Nous supposons que $\Phi_{qp} = 1 \forall p, q$. Le coût de vente perdu $CL^t = 100 \forall t$.

L'horizon de planification est constitué de 4 périodes. Dans les différentes expérimentations, nous imposons que le niveau de stock des différents produits au début de l'horizon de planification doit être égal au niveau de stock à la fin de l'horizon de planification. La demande

finale pour chaque période est générée de façon indépendante à partir d'une distribution uniforme sur l'intervalle [20, 100]. Il est important de noter que chaque point de données indiqué dans les figures suivantes correspond à la moyenne des différentes séries de la demande. Nous soulignons que les données considérées dans ces expérimentations sont théoriques et basées principalement sur le papier de Hammami et Frein (2014).

Dans ce qui suit, nous présentons tout d'abord les expérimentations du modèle avec taxe carbone. Ensuite, nous nous intéressons au modèle avec seuil d'émission.

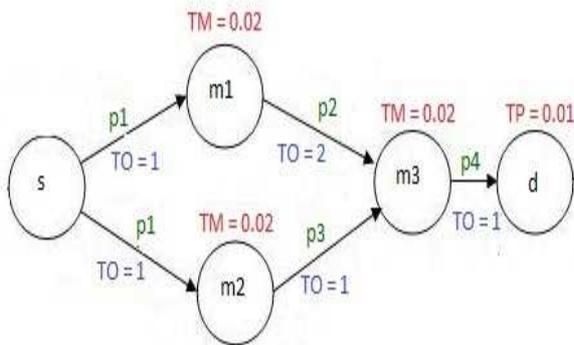


Figure 1. Etude de cas

5.1 Modèle avec taxe carbone:

Observation 1 : La réduction des émissions de carbone suite à l'augmentation de la taxe est très sensible aux délais imposés. En effet, avec l'augmentation de la taxe carbone, le niveau de réduction des émissions peut être négligeable si les délais de livraison sont serrés (stricts). Si les délais de livraison ne sont pas très stricts alors une légère augmentation de la taxe peut conduire à une réduction significative des émissions.

Dans la figure 2, nous montrons la variation de la quantité totale des émissions en fonction de la valeur de la taxe carbone, pour différentes valeurs du délai imposé par le client Δ^t et différentes valeurs de la longueur de la période Γ^t . Rappelons que Γ^t représente l'intervalle de temps entre deux commandes successives passées par le client final. Chaque point de la figure 2 correspond à la moyenne de 10 instances (10 séries de demande).

Pour des valeurs strictes de délai ($\Delta^t = \Gamma^t = 3$), la totalité des émissions est réduite par seulement 2.3% si nous augmentons la taxe carbone de 0 à 4. Dans ce cas, ces délais de livraison bien serrés ne permettent pas de procéder à des ajustements importants au niveau des décisions opérationnelles afin de réduire les émissions. Il y a plus de flexibilité pour $\Delta^t = \Gamma^t = 6$ ce qui explique la réduction des émissions de 10% si la taxe de carbone est augmentée de 0 à 4. Pour $\Delta^t = \Gamma^t = 9$, les émissions sont significativement réduites lorsque la taxe carbone augmente de 0 à 0.5 mais ensuite la quantité des émissions devient presque insensible à la valeur de la taxe. Pour expliquer cette observation, nous signalons tout d'abord que la réduction des émissions dans le cas du modèle avec taxe de carbone est possible uniquement

suite à la réduction du niveau de stock, du nombre d'ordres de production et du nombre de livraison. En effet, les autres émissions, à savoir les émissions variables associées à la production et à l'approvisionnement, ne peuvent être réduites. En effet, la réduction de ces dernières émissions signifie que la demande ne peut pas être totalement satisfaite, ce qui n'est pas optimal compte tenu du coût élevé de la perte de ventes.

Lorsque les contraintes de délai sont faibles (ici, $\Delta^t = \Gamma^t = 9$), il n'est pas nécessaire de garder des stocks élevés et, par conséquent, les émissions associées aux stocks ne sont pas élevées. Ainsi, dans ce cas, la réduction des émissions passe par la diminution du nombre de livraisons et des commandes de production. Cependant, ceci peut conduire à augmenter les stocks et, par conséquent, le niveau des émissions et les coûts. Ainsi, la possibilité de réduire le nombre des livraisons et des commandes de production est limitée. Cela explique pourquoi on ne peut plus réduire de façon considérable les émissions.

En résumé, l'observation 1 montre que la réduction des émissions et les contraintes liées au délai sont fortement corrélées. Cela prouve l'intérêt de revoir les questions d'émission de carbone dans les modèles de production-stockage en tenant compte des délais de livraison. L'observation 1 permet également de conclure que l'effet de la législation environnementale liée à la taxe carbone peut être marginal dans le cas où les entreprises opèrent dans un environnement concurrentiel avec des délais serrés. En outre, l'imposition d'une faible taxe peut être une politique judicieuse si les contraintes liées au délai sont faibles.

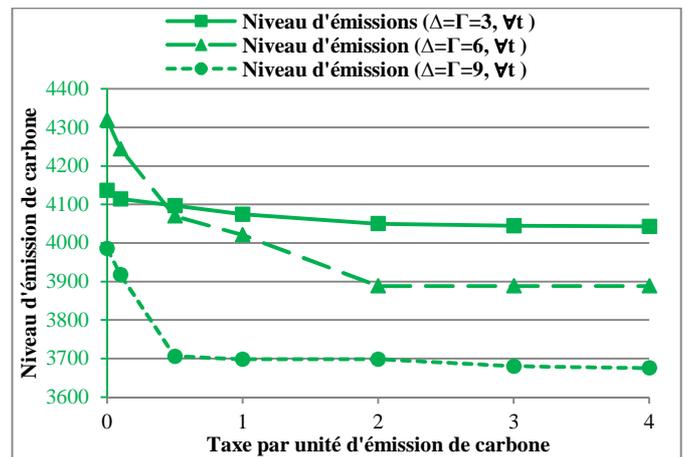


Figure 2. Impact de la variation de la taxe carbone sur la quantité des émissions pour différentes valeurs de délai

Observation 2 : Dans une chaîne logistique multi-échelon, l'augmentation de la capacité de production dans un site donné peut conduire à la réduction des émissions dans les autres sites.

Un site qui augmente sa capacité de production peut certes voir ses propres émissions augmenter tandis que la

quantité totale des émissions tout au long de la chaîne logistique diminue.

Cette observation est illustrée par les figures 3 et 4 où nous montrons la variation ascendante (augmente si positif et diminue si négatif) de la quantité des émissions dans la totalité de la chaîne logistique et également dans le site $m3$ pour des valeurs croissantes de la capacité de production dans le site $m3$. La Figure 3 traite le cas où $\Delta^t = \Gamma^t = 3$, tandis que la figure 4 illustre le cas de $\Delta^t = \Gamma^t = 6$. Comme nous pouvons le voir dans le cas de $\Delta^t = \Gamma^t = 6$, si nous augmentons la capacité de 2 à 2,5 (soulignons que 2,5 signifie 2,5 * capacité actuelle), la quantité totale des émissions de l'ensemble de la CL diminue tandis que les émissions du site $m3$ augmente. En effet, l'augmentation de la capacité dans un site de production peut aider les sites en aval à baisser leurs niveaux de stocks en produits d'entrée puisque le site de production a une capacité suffisante pour fabriquer et livrer les commandes à temps. Ceci peut aider les sites en amont également à baisser leurs stocks en produits de sortie puisque le site de production a plus de flexibilité pour la réception de ces produits. De toute évidence, il serait difficile dans un système décentralisé de convaincre un site d'augmenter sa capacité afin de réduire les émissions dans d'autres sites de la CL. Un système de compensation devrait être mis en place pour que les entreprises acceptent de coopérer.

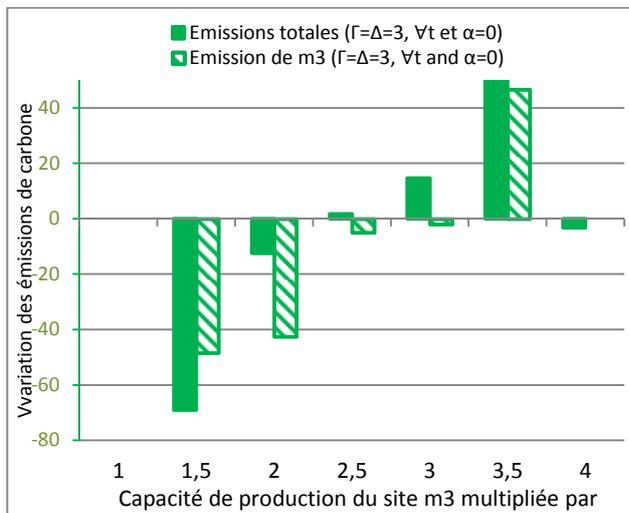


Figure 3. Variation locale et globale des émissions en fonction de l'augmentation de la capacité de $m3$ pour $\Gamma = \Delta = 3$

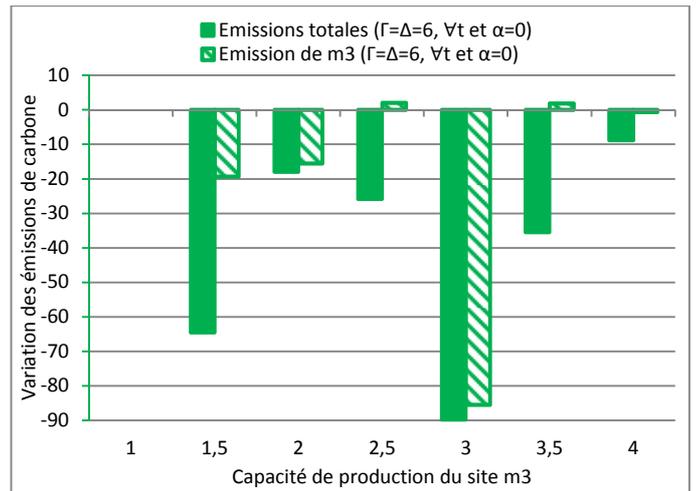


Figure 4. Variation locale et globale des émissions en fonction de l'augmentation de la capacité de $m3$ pour $\Gamma = \Delta = 6$

Observation 3 : La politique de la gestion dynamique des stocks, considérée dans notre modèle, est à priori meilleure que la politique de « stock de base » et la politique de « quantité de commande fixe » en termes d'émissions de carbone.

Dans notre modèle, le niveau de stock et la taille de commande de chaque produit dans les différents sites peuvent varier d'une période à l'autre. Beaucoup de modèles dans la littérature, considèrent la politique de « stock de base » qui considère un niveau cible de stock constant qui ne varie donc pas en fonction de temps (voir, par exemple, Simchi-Levi and Zhao, 2005). Par ailleurs pour des raisons contractuelles ou de gestion, dans de nombreux cas les entreprises commandent toujours la même quantité de produit. Cette politique de gestion dynamique des stocks (considérée dans notre modèle), permet bien sûr une réduction de coûts puisque l'on a moins de contraintes sur la taille des commandes et les niveaux des stocks. Mais il nous a semblé intéressant d'évaluer l'impact de chacune des politiques sur les émissions de carbone. Nous avons généré pour ceci 90 cas (30 séries de la demande pour $\Delta^t = \Gamma^t = 3$, $\Delta^t = \Gamma^t = 6$ et $\Delta^t = \Gamma^t = 9$) et nous avons calculé la moyenne des émissions pour chaque politique avec et sans taxe carbone. Les résultats, présentés sur la figure 5, illustrent cette Observation 3.

Suite à cette observation, nous concluons que les entreprises peuvent réduire de façon significative leurs émissions en ajustant leurs politiques de stockage et de passation de commandes. En outre, dans ce cas, la réduction des émissions est en ligne avec la diminution des coûts, ce qui peut convaincre les managers à adopter de nouveaux modèles de production-stockage comme celui proposé par notre modèle.

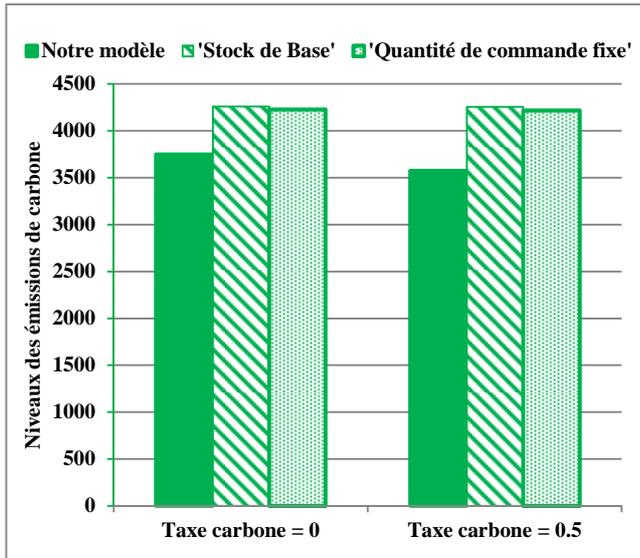


Figure 5. Impact de la politique de stockage et de passation des commandes sur les émissions

5.2 Modèle avec seuil de carbone

Observation 4 : Dans une chaîne logistique multi-échelle, le niveau des émissions totales obtenues avec un système de seuils individuels (imposé à chaque site) est nettement inférieur à la quantité des émissions totales obtenues avec un seuil global imposé à la totalité de la chaîne logistique (dont la valeur est la somme de tous les seuils individuels). Cependant, l'émission par unité de produit est plus grande dans le cas où on considère des seuils individuels.

Dans une CL multi-échelle, un seuil d'émission peut être imposé individuellement pour chaque site ou globalement pour l'ensemble de la CL. Benjaafar et al. (2013) ont abordé cette question et ont expliqué qu'un système avec un seuil infranchissable pour l'ensemble de la CL ne peut être possible que dans le cas où les entreprises sont considérées comme des entités appartenant à une seule grande entreprise (et non pas des entités indépendantes). Dans ce travail, nous considérons que les entreprises fonctionnent dans un cadre collaboratif. Un système avec un seuil global est également possible si la réglementation environnementale permet l'échange des permissions d'émission de carbone (carbon trade) entre les différentes entités de la même CL.

Les figures 6 et 7 montrent les résultats de la comparaison entre un système de seuil d'émissions global et un système de seuils individuels respectivement en termes de quantité totale d'émissions et de quantité d'émission par unité de produit. Cette comparaison a été réalisée sur un échantillon de 30 cas (10 séries de demande pour chacun des trois cas suivants : $\Delta^t = \Gamma^t = 3$, $\Delta^t = \Gamma^t = 6$ et $\Delta^t = \Gamma^t = 9$). Nous avons généré différentes valeurs du seuil global comme suit : nous avons tout d'abord exécuté le modèle sans seuils d'émissions, nous avons calculé le niveau total des émissions dans ce cas, et en

suite nous avons réduit ce niveau de 5%, 10%, 20%, ..., 50% afin d'obtenir des valeurs différentes du seuil global d'émissions pour l'ensemble de la CL. Pour chaque valeur du seuil global, nous avons calculé le seuil individuel correspondant à chaque site en divisant le seuil global par 4 (rappelons que nous avons 4 sites dans notre CL étudiée).

Benjaafar et al. (2013) ont étudié le problème de stock et passation de commande dans une chaîne logistique constituée d'un acheteur et un vendeur sans tenir compte des délais de livraison. Les auteurs ont conclu que l'imposition d'un seuil global infranchissable pour l'ensemble de la CL au lieu des seuils individuels pour chaque entreprise permet de générer moins d'émissions à moindre coût. Les auteurs expliquent la réduction des émissions par le fait que le seuil global offre aux entreprises au sein de la même CL plus de flexibilité en permettant à certaines entreprises d'émettre plus que leurs seuils individuels si ceci peut être compensé par une réduction des émissions des autres entreprises.

Contrairement aux conclusions formulées par Benjaafar et al. (2013), nous avons constaté qu'un système avec des seuils individuels entraîne une baisse des émissions totales dans la CL (figure 6). En effet, imposer des seuils individuels stricts, conduit dans notre modèle à la réduction de la quantité fabriquée puisque l'ajustement des décisions opérationnelles uniquement ne permet pas de respecter les seuils d'émissions. Par conséquent, dans ce cas, il y a des ventes perdues. En moyenne, le niveau de la perte de ventes est de 40 unités dans le cas où on considère un seuil global et de 82 unités en cas de seuils individuels. La meilleure performance de seuils individuels en termes des émissions s'explique principalement par la réduction des émissions associées à la production.

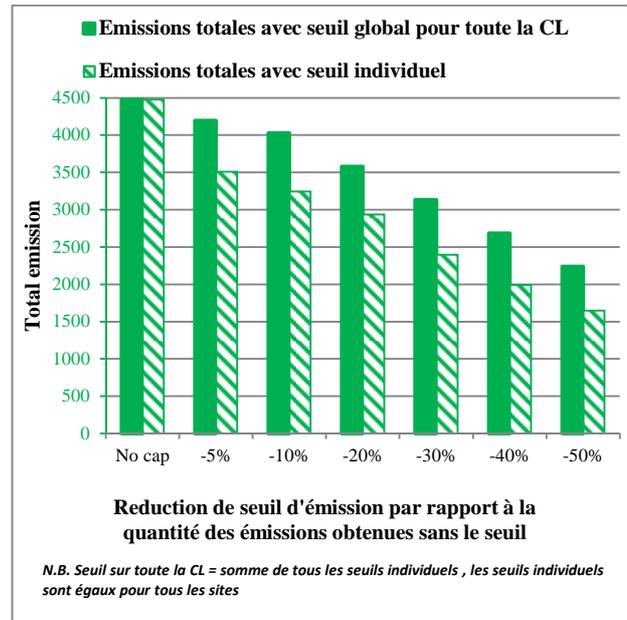


Figure 6. Seuils individuels vs seuil global : émission totale

D'après ces expérimentations, nous avons observé que le système de seuils individuels entraîne une baisse des émissions totales en comparaison avec le système de seuil global. Une autre observation importante est la suivante : les seuils individuels conduisent par contre à une quantité d'émissions plus élevée par unité de produit fini, comme illustré sur la figure 7. En effet, les seuils individuels permettent de réduire la quantité totale des émissions (en comparaison au cas de seuil global imposé pour l'ensemble de la chaîne), mais par la réduction du nombre de produits finis fabriqués. Dans l'ensemble, dans le cas d'un système de seuils individuels, la quantité des émissions par unité de produit augmente parce que la quantité fabriquée des produits finis diminue.

En résumé, de ces dernières expérimentations, nous pouvons énoncer les implications managériales suivantes : un seuil global d'émissions est plus adapté pour les entreprises qui visent à assurer que leur produit fini ait une faible empreinte carbone. Ceci leur permettra, par exemple, d'attirer les clients verts ou de justifier un prix élevé de leur produit. Les seuils individuels peuvent être considérés comme une réglementation environnementale efficace qui peut être utilisée par les gouvernements afin de limiter les émissions totales des entreprises.

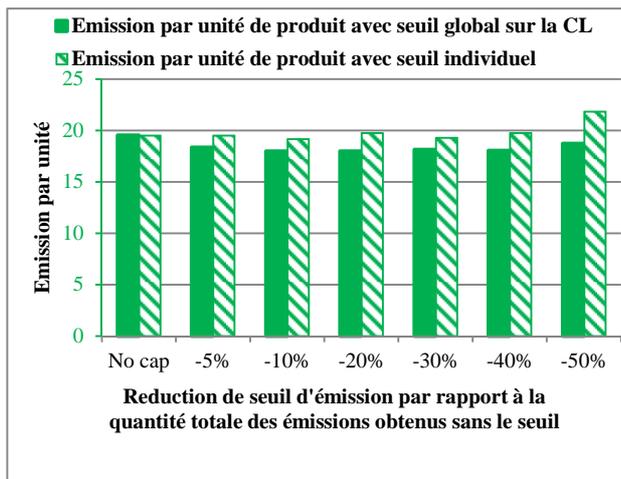


Figure 7. Seuils individuels vs seuil global : émission par unité de produit

6 CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons intégré les émissions de carbone dans un modèle de production-stockage multi-échelons en considérant les contraintes de délai. Nous avons considéré deux types de réglementations environnementales : des taxes sur les émissions de carbone et des valeurs seuils infranchissables. Nous avons démontré grâce aux différentes expérimentations la corrélation qui existe entre les émissions de carbone et les décisions liées à la production, la passation des commandes et le positionnement des stocks. En outre, nous avons montré comment les contraintes liées au délai, les contraintes de capacité et le contexte multi-échelon peuvent impacter le niveau des émissions. Notre objectif a été d'évaluer les

émissions de carbone dans un système complexe de production-stock qui capture les contraintes des situations du monde réel tel que celles liées au délai. La richesse de ce modèle compte tenu des observations intéressantes que nous avons dégagé, nous encourage pour approfondir les tests et réaliser d'autres expérimentations. Par ailleurs, dans ce travail, nous nous sommes basés dans nos expérimentations sur des données théoriques extraites de la littérature. Une perspective de notre travail est d'appliquer notre modèle à une étude de cas réel. Il serait également intéressant de considérer le cas d'une politique combinant les seuils limites d'émission et les permissions échangeables d'émissions.

REFERENCES

- Absi N., S., Dauzère-Pérès, S., Kedad-Sidhoum, B., Penz, C., Rapine (2013). Lot sizing with carbon emission constraints. *European Journal of Operational Research*, 227 (1), 55–61.
- Benjaafar, S., Li, Y., Daskin, M., (2013). Carbon Footprint and the Management of Supply Chains: Insights from Simple Models. *Automation Science and Engineering*, IEEE Transactions, 10, 99-116.
- Dekker, R., Bloemhof, J., Mallidis L., (2012). Operations Research for green logistics -- An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219, 671-679.
- Hamami R., Y. Frein, (2014). A Capacitated Multi-echelon Inventory Placement Model under Lead Time Constraints. *Production and Operations Management*, 23 (3), 446-462.
- Helmrich, M J. R, R., Jans, W. van den Heuvel, A P.M., Wagelmans, (2014). The economic lot-sizing problem with an emission capacity constraint. *European Journal of Operational Research*. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.06.030
- Letmathe, P., Balakrishnan, N., (2005). Environmental considerations on the optimal product mix. *European Journal of Operational Research*, 167, 398--412.
- Nouira, I., Frein, Y., Hadj-Alouane, A.B., (2014). Optimization of manufacturing systems under environmental considerations for a greenness-dependent demand. *International Journal of Production Economics*, 150, 188-198.
- Radulescu, M., Radulescu, S., Radulescu, CZ., (2009). Sustainable production technologies which take into account environmental constraints. *European Journal of Operational Research*, 193, 730-740.

Seuring, S., (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, 54, 1513-1520.

Simchi-Levi, D., Zhao, Y., (2005). Safety stock positioning in supply chains with stochastic lead times. *Manufacturing and Service Operations Management*, 7(4), 295--318.

Tang, C.S., Zhou, S., (2012). Research advances in environmentally and socially sustainable operations. *European Journal of Operational Research*, 223, 585--594.

Wu, C.C., Chang, N.B., (2004). Corporate optimal production planning with varying environmental costs: A grey compromise programming approach. *European Journal of Operational Research* 155, 68--95.