

Quel paramètre a le plus d'influence sur les émissions de CO₂ le long d'une chaîne logistique ?

ANICIA JAEGLER^{1,2}, PATRICK BURLAT²

¹ IDRAC CENTER OF APPLIED RESEARCH, IDRAC ECOLE SUPERIEURE DE COMMERCE
47 rue Sergent Berthet, CP 607, 69258 Lyon Cedex, France
anicia.jaegler@idraclyon.com

² LABORATOIRE EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION, INSTITUT HENRI FAYOL, ECOLE DES MINES DE SAINT-ETIENNE
158, Cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne Cedex 2, France
lagier-jaegler@emse.fr, burlat@emse.fr

Résumé - Les entreprises sont, de plus en plus, poussées à analyser leurs émissions de carbone. Notre recherche s'intéresse donc à celles-ci quand elles sont dues au transport et au stockage le long de la chaîne logistique. Pour ce faire, nous avons développé un modèle utilisant la simulation à événements discrets. L'outil proposé modélise une stratégie de réponse à la demande et coordonne les flux en Make To Stock. Trois paramètres variables sont pris en compte : la performance industrielle avec l'utilisation d'un taux de rendement synthétique, la localisation des entreprises et le type de produits fabriqués. Les données des produits sont issues de l'entreprise Carrier, fabricant de climatiseurs. Différents scénarii, à politique industrielle homogène, type de produits différents et localisations dégradées sont simulés. L'objectif est de comparer les critères environnementaux (émissions de carbone) mais aussi financiers (niveau de stock, kilométrage) de ces configurations. Cette méthode est appliquée aux secteurs mécanique et plasturgique. Les principaux objectifs de l'étude sont les suivants : développer des références pour la simulation de chaîne logistique et conduire des expériences pertinentes afin d'optimiser les chaînes logistiques vertes.

Abstract - Rendering the supply chain more eco-friendly is an innovative idea progressively adopted by industry. Our research focuses on the CO₂ emissions along the supply chain due to freight energy use and storage. A supply chain approach by using a discrete event model was developed. Our proposed tool is able to model Re Order Point production management policy (ROP). Moreover, it can consider the main demand response strategy Make To Stock (MTS). Manufacturing capability is also taken into account using an Overall Equipment Effectiveness indicator (OEE). In addition, the location of the firms and their type of products are modeled. The product data are from Carrier, a cool manufacturer. Simulations were conducted by varying the manufacturing capacity, the type of product and degrading the firm location in MTS environment and a ROP planning policy. The purpose is to compare supply chain CO₂ emissions and financial elements of different configurations. This method is applied to mechanical and plastic industries. The principle objectives of the study are twofold: develop a supply chain simulation benchmark and conduct pertinent experiments to improve green supply chains.

Mots clés - simulation, émissions de CO₂, chaîne logistique

Keywords - simulation, carbon emissions, supply chain

1 INTRODUCTION

La gestion de la chaîne logistique intéressa les entreprises dès les années 80 tandis qu'à la même époque, l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature donna la première définition du développement durable qui passa presque inaperçu (Mebratu, 1998). En 1987, le rapport Bruntland introduit la définition de « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » (Bruntland, 1987). Les entreprises ont commencé à adopter ce concept ces dernières décennies car il leur permet de se différencier de leurs concurrents. Cette tendance a pour résultats l'amélioration de facteurs environnementaux et sociaux, la réduction des coûts et même l'augmentation de leur compétitivité. Aujourd'hui, le développement durable prend habituellement en compte trois paramètres : le progrès social, l'environnement et l'économie.

Or, la chaîne logistique manque encore d'outils conceptuels pour comprendre la complexité des liens entre les indicateurs industriels (principalement stocks et délais) et l'impact environnemental d'une gestion quotidienne. Par exemple, depuis 1993, Carrier (groupe UTC), un grand fabricant de climatiseurs, s'est employé à réduire son empreinte écologique. En 2003, l'Agence Américaine pour la Protection de l'Environnement l'a reconnu comme leader dans la protection environnementale. Il fabrique des produits innovants en travaillant sur la diminution de consommation d'eau et d'énergie. A présent, un autre axe de travail est le choix des fournisseurs comme le préconise (Seuring and Müller, 2008).

Dans ce contexte, notre article étudie comment la localisation et l'efficacité des fournisseurs influence la performance industrielle et la performance environnementale d'une chaîne logistique. Ainsi, notre modèle composé de trois entreprises

manufacturières s'adressant à un client final permet d'évaluer les émissions de CO₂ tout au long de cette chaîne logistique. Différents scénarii peuvent être générés pour comparer ces émissions. Un des objectifs est de déterminer le poids d'une dégradation des localisations des fournisseurs ou de l'entreprise elle-même dans les émissions de CO₂. Pour ce faire, une simulation à événements discrets associe les paramètres standards d'une chaîne logistique. Celle-ci sera composée d'entreprises d'efficacité homogène choisie entre quatre possibles. Les trois entreprises fabriquent un produit parmi quatre types (dépendants de leur poids et de leur encombrement) et ont quatre choix d'implantation. Nous évaluons les résultats de la chaîne logistique en termes de niveau de stocks, de nombre de kilomètres parcourus et d'émissions de CO₂ dues au transport et au stockage.

L'article est organisé comme suit : la section 2 présente un bref état de l'art sur la modélisation et la simulation d'une chaîne logistique verte. La section 3 propose un modèle de chaîne logistique. La section 4 explique comment la bibliothèque du modèle a été définie. La section 5 présente la configuration et la calibration du simulateur et l'approche expérimentale. La section 6 montre les principaux résultats. La section 7 approfondit les résultats et donne des perspectives de gestion. Enfin, la conclusion fournit des perspectives de futures recherches.

2 ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION ET DE LA SIMULATION D'UNE CHAINE LOGISTIQUE VERTE

Les entreprises sont de plus en plus poussées par leurs clients, leurs actionnaires et les gouvernements à adopter des mesures environnementales (Akono and Fernandes, 2009). Pour (Carter and Rogers, 2008), il existe un lien entre performances environnementale et économique voire sociétale. De plus, plusieurs auteurs montrent de manière empirique que ce lien est positif (King A. and Lenox M., 2001), (Klassen R-D and McLaughlin C., 1996), (Porter M. E. and Van der Linde C., 1995). D'autres articles établissent une relation entre initiatives vertes et augmentation de la compétitivité mais n'ont pas assez de preuves pour en mesurer l'importance (Rao and Holt, 2005), (Kiernan, 2001).

Pour évaluer la performance environnementale, des indicateurs verts ont été étudiés (Brent and Visser, 2005), (Siracusa G., 2004), (Scherpereel et al., 2001), (Tsoufias and Pappis, 2008). En plus de cela, (Saling P. et al., 2002) ont mené une analyse d'éco-efficience. Dans leur étude, ils indiquent que les trois principaux facteurs sont les émissions et les consommations d'énergie et de matières premières (approximativement 20% chacun). De plus, parmi les émissions, les émissions aériennes comptent pour 50%. Pour celles-ci, le CO₂, gaz à effet de serre, est la mesure de référence. Selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), le principal problème auquel la planète doit et devra faire face est le réchauffement climatique résultant de l'augmentation des émissions de CO₂ (Soytas and Sari, 2009). Le Protocole de Kyoto a quantifié, pour les pays signataires, ces émissions en 1997.

(Srivastava, 2007) écrit qu'il faudrait plus de recherches pour soutenir l'écologisation de l'ensemble d'une chaîne logistique. Pour cette dernière, (Rizet and Keïta, 2005) et (Cholette and Venkat, 2009) montre que le transport et le stockage compteraient pour 50% dans son impact environnemental.

En se basant sur la littérature mentionnée ci-dessus, notre recherche se concentre donc sur les émissions de CO₂ dues au transport et au stockage le long d'une chaîne logistique.

Une étude de (Vachon and Mao, 2008) montre que la performance industrielle d'une chaîne logistique et un niveau faible d'émissions de gaz à effet de serre (principalement le CO₂) sont positivement liés. Pour (Sundarakani et al., 2010), ces émissions le long de la chaîne logistique sont un élément crucial à prendre en compte.

Un article basé sur une analyse à classification hiérarchique (AHP) propose de faire évaluer la chaîne logistique d'un point de vue environnemental par un groupe Delphi d'experts environnementaux (Handfield et al., 2002). Cette méthode a été complétée en incluant un point de vue managérial (Lu et al., 2007). Mais l'AHP semble avoir quelques limites : il n'y a pas de hiérarchie simple pour la plupart des critères et le point de vue humain peut biaiser les résultats. (Chan, 2003) et (Kannan et al., 2008) utilisent un modèle appelé Modèle de Sélection Interactive qui automatise les étapes de l'implémentation de l'AHP. Mais toutes ces études reposent sur des analyses statistiques basées sur des données collectées. Ceci réduit les cas et requiert une grande qualité des données. Ces limitations nous ont motivé à proposer une autre approche méthodologique basée sur une simulation à événements discrets.

La méthode par simulation prend de plus en plus de place autant en recherches qu'en industries. En effet, l'un des avantages de la simulation est de pouvoir tester des scénarii avant de les appliquer réellement (Banks J., 1998). Cette capacité à évaluer des scénarii « que se passe-t-il si ? » avec un grand panel d'entrées fait de la simulation un outil très utile pour l'analyse des chaînes logistiques (Hellström J. and Johnsson M., 2002). Certains auteurs argumentent que l'actuelle popularité de la simulation est due à son excellente capacité à évaluer des systèmes variables et interdépendants (Wyland et al., 2000). Cela permet aux preneurs de décisions de choisir entre différentes solutions en connaissant l'impact de leur choix sur tous les maillons de la chaîne logistique.

Une étude récente utilise la simulation pour créer une chaîne logistique verte (Hui K. et al., 2006). Elle concerne la distribution d'aluminium et compare la pollution due au transport avec différents autres paramètres. Elle est basée sur des conditions idéales et les auteurs soulignent qu'il serait intéressant de rendre le modèle plus réaliste.

Par conséquent, étudier un indicateur CO₂ le long d'une chaîne logistique et démontrer le poids qu'il peut avoir paraît pertinent. Pour ce faire, un modèle de chaîne logistique est proposé ici afin d'analyser différents choix de taux de rendement synthétique, de localisations et de produits.

3 MODELE CONCEPTUEL DE LA CHAINE LOGISTIQUE

Le modèle proposé consiste en un fournisseur de matière première, une chaîne logistique composée de trois entreprises et d'un client final (figure 1). L'ensemble des entreprises est au même niveau de décisions : il y a partage d'informations. Le fournisseur de matières premières est considéré comme un stock infini. Les commandes du client final suivent une demande externe stochastique.

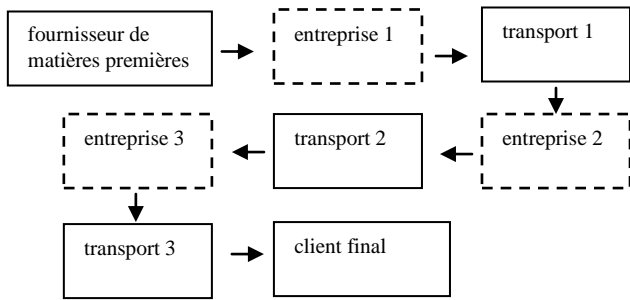


Figure 1. Modèle de la chaîne logistique

Chaque entreprise comporte:

- un système de planification et de contrôle qui gère les achats par la stratégie de réponse à la demande et coordonne les flux selon une stratégie Make To Stock (MTS).
- un système physique composé de :
 - un module réception,
 - deux processus en série, transformant les matières premières (MP) en produits semi-finis (PSF) et les PSF en produits finis (PF). Les processus de production sont des lignes de transfert sur lesquelles deux flux de produits sont traités simultanément (figure 2).

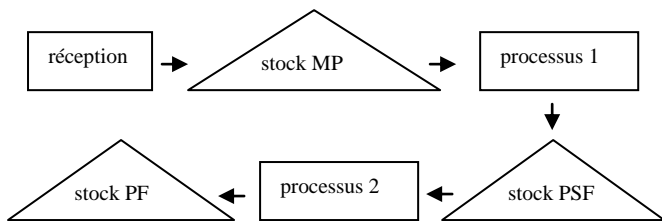


Figure 2. Modèle de l'entreprise

Enfin, entre chaque entreprise, un module livraison permet de simuler le transport et les stocks tampons inhérents aux délais de livraison. Ce module est composé de (figure 3) :

- une ressource transport qui peut être un camion, un bateau ou un avion, selon la distance entre deux entreprises.
- des stocks tampons amont et aval qui sont dimensionnés selon la fréquence et le délai de livraison.

Un collecteur de données CO₂ est relié aux trois modules livraison.

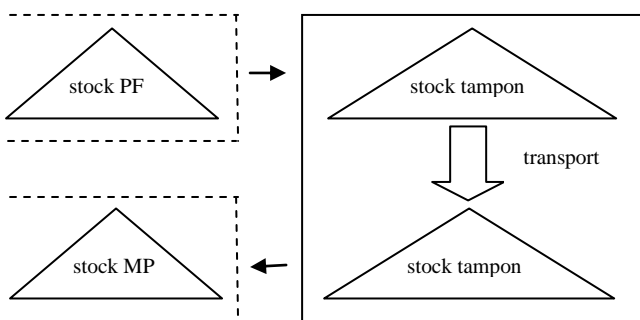


Figure 3. Modèle du transport

4 BIBLIOTHEQUE DES PARAMETRES DU MODELE

Une bibliothèque de données a été créée pour construire les trois maillons de la chaîne. Des paramètres réels de fabrication sont utilisés pour construire cette bibliothèque de manière réaliste. Dans cet article, les données proviennent de l'entreprise Carrier. Plus généralement, les entreprises ont été classées selon trois attributs : taux de rendement synthétique (TRS), localisation et type de produit fabriqué.

4.1. Taux de Rendement Synthétique (TRS)

Le modèle utilise un niveau d'efficacité pour classer les systèmes industriels. Le TRS est défini comme suit : $TRS = Disponibilité \times Performance \times Qualité$. La Disponibilité est mesurée en temps d'arrêt de production. La Performance est évaluée à partir des pertes de productivité. Enfin, la Qualité est définie en pourcentage de rebuts. Le TRS est un indicateur généralisé, facile à calculer pour les entreprises et offre une évaluation globale du processus de production. De plus, le TRS peut être implémenté facilement comme paramètre de simulation (cadences, pannes, taux de rebuts, temps de réglage). De nombreuses études donnent des niveaux de TRS selon des secteurs industriels variés (Konopka J. and Trybula W., 1996), (Steege P., 1996), (Leachman R. and Hodges D., 1997), (Waterson et al., 1999), (Ahmad and Dhafr, 2002), (Wacker and Sheu, 2006), (Muchiri and Pintelon, 2008). Nous avons donc défini quatre TRS différents : A, B, C et D. Le TRS de chacune est aléatoire selon les simulations mais compris entre 90% et 99% pour une A, 80% et 89% pour une B, 70% et 79% pour une C et entre 60% et 69% pour une D (Miltenburg, 1995).

4.2. Localisations et types de produits

Les produits sont envoyés d'une entreprise à l'autre par bateau, par camion ou par combinaison de ces trois modes de transport. Pour calculer les émissions de CO₂, nous devons modéliser la distance entre deux compagnies et estimer le poids et l'encombrement des produits. Les émissions dépendent du poids transporté, du mode de transport utilisé, de la distance parcourue et de l'encombrement de stockage. En effet, l'unité des émissions de CO₂ est g ou kg par m² ou tonne.km (ADEME, 2007).

D'abord, la distance entre deux maillons de la chaîne logistique est définie selon quatre possibilités. Le tableau 1 montre ces distances associées à leur délai de livraison. Dans le module livraison, en cas de retard, un mode de transport express en avion est modélisé. Celui-ci est automatiquement choisi si la date de livraison (incluant le transport) n'est pas réalisable. Ici, la simulation à événements discrets est un outil puissant pour calculer de manière dynamique les retards et déclencher des transports express tout en respectant les contraintes de production (réglages, pannes, rebuts, stocks).

Configuration	Locale	Régionale	Continentale	Globale
Notation	l	r	c	g
Temps de transport en heures	4	8	40	240
Temps d'attente en heures	4	8	20	40
Nombre de km	50	500	1500	8000

Tableau 1. Données du transport

Ensuite, nous avons ordonné les produits en quatre classes selon les attributs suivants : lourd/léger, encombrant/non encombrant. Les produits seront illustrés par les données de Carrier pour trois d'entre-eux. Le produit encombrant mais léger sera instancié par des données du secteur de la plasturgie. Le tableau 2 montre les données utilisées dans la simulation.

Les hypothèses suivantes ont été retenues pour calculer l'encombrement au sol des produits. Il n'est pas possible d'empiler des produits (3) et (4) donc leur dimension en m² correspond à leur encombrement au sol. Pour les autres produits, des racks de cinq mètres de hauteur sont utilisés. Le nombre de produits stockables sur une telle hauteur est estimé

et nous déterminons ainsi la surface au sol nécessaire pour un produit. Enfin, dans le hangar de stockage, les allées et passages représentent 60% de la surface de stockage.

produit	1	2	3	4
type	thermostat	compresseur	SPA	chiller
encombrant	non	Non	oui	oui
lourd	non	Oui	non	oui
poids en tonnes	0.0000055	0.29	0.45	8.44
aire totale en m ²	0.000039	0.17	5.06	53.83

Tableau 2. Données des produits

Le poids des produits et le nombre de kilomètres parcourus entre deux entreprises permettent de calculer les émissions de CO₂ dues au fret. L'Agence De l'Environnement Et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) détermine des émissions moyennes par tonne.km à partir d'émissions par véhicule.km et d'une estimation de poids transportés par véhicule. Le tableau 3 indique la valeur des émissions en gCO₂ équivalent par tonne.km selon le mode de transport employé. Pour les destinations locale, régionale ou continentale, le mode de transport est le camion ; pour la destination globale le bateau. L'avion sera employé pour les transports continentaux ou globaux express.

Pour le tableau 3, on notera que les camions utilisés pour les destinations locales sont plus petits que pour les destinations régionales ou continentales par conséquent les émissions par tonne.km de CO₂ sont plus importantes dans le premier cas. L'ADEME, d'après des données du Ministère de l'Équipement français considère que le taux moyen de remplissage des camions est de 30% de leur charge utile. Pour les transports par avion, le décollage et l'atterrissage sont plus émetteurs de CO₂ d'où les émissions par km plus élevées pour les moyens que pour les longs courriers. Les émissions dues au stockage représentent l'empreinte carbone en kgCO₂ par m² de la construction d'un hangar de stockage. Toutes ces données proviennent de l'ADEME.

Transport	gCO ₂ équivalent par tonne.km (incertitude)
Local (l)	145,10 (10%)
Regional (r) ou Continental (c)	74,90 (10%)
Global (g)	
Produit 1	3,57(10%)
Produit 2	42,86(10%)
Produit 3	33,33(10%)
Produit 4	13,64(10%)
Express continental	570 (20%)
Express global	320 (20%)
Stockage	par m ² (incertitude)
Hangar industriel	75 000 (50%)

Tableau 3. Emissions de CO₂

5 MODELE DE SIMULATION ET CALIBRAGE

5.1. Configuration de la simulation

Avant de commencer la simulation, la chaîne logistique a besoin d'être configurée. Ajouter un type d'entreprise revient à choisir dans la bibliothèque : une localisation (l, r, c ou g), un type de produit (1, 2, 3, 4) et un TRS (A, B, C, D). Par conséquent, les trois maillons ont des profils différents. Une fois les informations extraites de la bibliothèque, le modèle est automatiquement formé. Le logiciel de simulation ARENA version 12 est utilisé.

5.2. Caractéristiques de la simulation

La demande finale suit une loi normale de moyenne 50 et d'écart-type 5 avec une fréquence d'arrivée journalière. Elle est directement transformée en ordre de livraison de produits finis qui suit une production sur stock (MTS). Si les produits finis sont en stock, ils sont automatiquement livrés. Sinon, si la date de livraison n'est pas réalisable, une livraison express est ordonnée pour les destinations continentales et globales. Deux stocks tampons sont prévus : l'un dû aux délais de livraison, l'autre dû aux fréquences de livraison.

Les processus de production, de réglage, de changement d'outillage suivent une loi triangulaire. La disponibilité est ajustée via les pannes qui sont modélisées par une fonction exponentielle. Cette dernière représente les temps moyens entre les pannes, les réparations et les réglages. La performance est réglée selon les cadences des machines. Tous ces paramètres sont fixés pour atteindre le taux de TRS requis pour le cas étudié. Après avoir rentré ces variables dans le profil de l'entreprise, les variables de commande comme le point de pénétration de la commande et la taille de lots sont calibrées. Dans notre approche, les stocks sont calibrés pour un taux de service de 100% et des transports express sont modélisés en dernier recours. Dans une précédente étude (Jaegler and Burlat, 2010), ces deux hypothèses étaient différentes : le stockage était moins élevé et les transports plus fréquents.

Cinq simulations de 40 000 heures chacune sont effectuées pour chaque configuration. Les campagnes de simulations sont donc suffisamment nombreuses et longues pour dépasser la phase transitoire du système et tenir compte de la possibilité de phénomènes aléatoires.

6 RESULTATS DES SIMULATIONS

6.1 Configurations des simulations

Nous simulons les combinaisons ayant les caractéristiques suivantes pour :

- un TRS homogène : AAA, BBB, CCC, DDD, soit 4 combinaisons possibles.

- le type de produits : 1, 2, 3, 4 constant tout au long de la chaîne logistique soit 4 combinaisons possibles

- la localisation dégradée: ll, rll, lrl, llr, cll, lcl, llc, gll, lgl, llg, rrr, crr, rcr, rrc, grr, rgr, rrg, ccc, gcc, cgc, ccg, ggg. soit 22 combinaisons possibles.

Nous avons considéré les configurations homogènes ll, rrr, cc et ggg puis introduit un maillon plus éloigné : r, c ou g pour ll, c ou g pour r, g pour c. Ceci constitue les configurations dégradées.

6.2 Résultat

Nous analysons donc 352 configurations au total. Nous nous focalisons dans un premier temps sur 22 configurations à localisation dégradée mais à TRS AAA et de type de produit 1. Nous effectuons une analyse en composantes principales sur les quatre critères suivants: émissions dues au stockage et au transport, nombre de produits stockés, nombre de kilomètres. Les classes sont représentées selon la localisation des trois maillons. Par exemple, ll signifie qu'il y a 50 km entre chaque entreprise de la chaîne. Plus les classes sont à droite, plus leurs critères financiers et environnementaux augmentent.

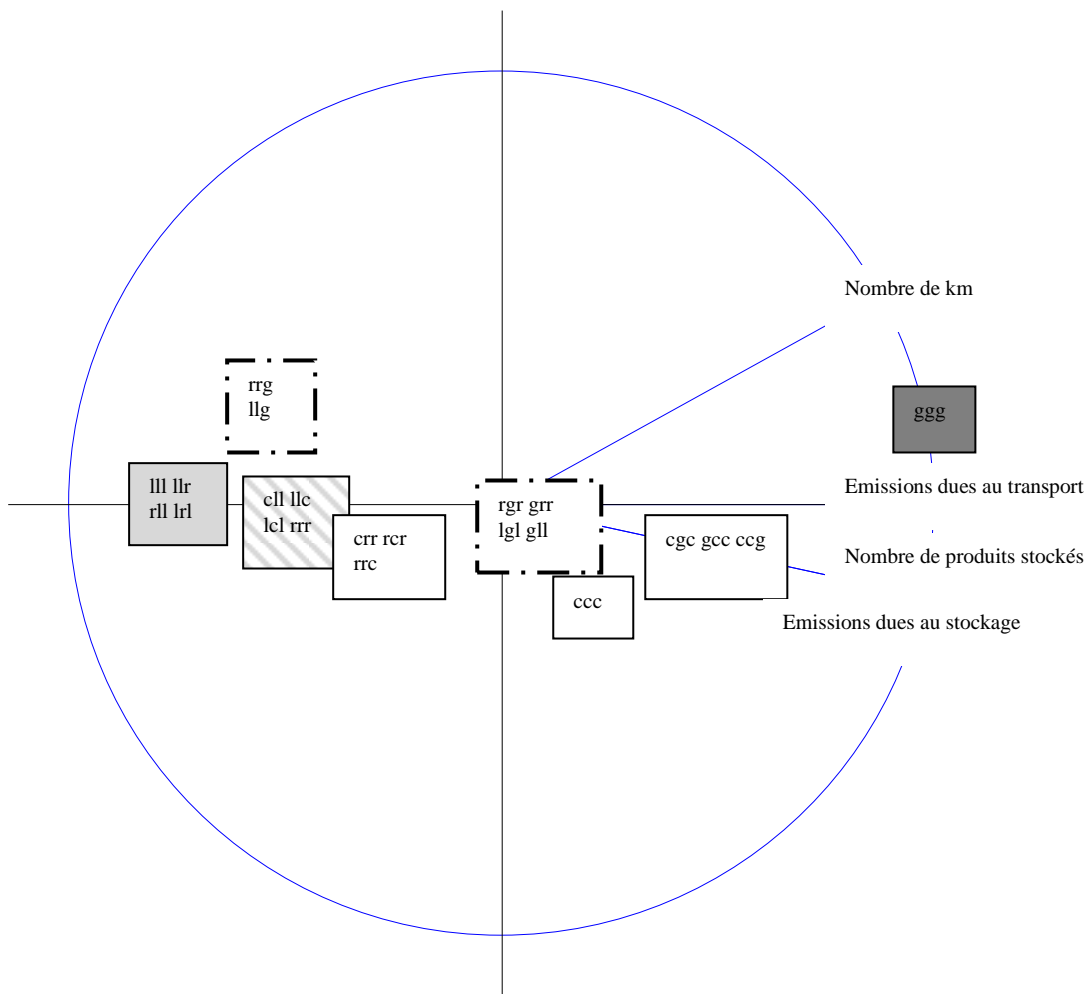


Figure 4. Représentation des 22 configurations

Les configurations en lll et ses dégradations (en gris clair) avec une localisation r émettent moins que les autres configurations. La configuration homogène globale (en gris foncé) est celle qui émet le plus.

Par contre, les autres classes méritent des explications car les résultats ne sont pas forcément triviaux. Les configurations dégradées en c de lll sont équivalentes à une configuration entièrement régionale (en hachuré). Si nous nous intéressons à la configuration continentale, nous voyons que dès que celle-ci est dégradée avec une localisation globale le nombre de kilomètres et les émissions augmentent quelle que soit la place de la dégradation de même avec la configuration régionale et ses dégradations avec une configuration continentale.

Les dégradations des configurations locale et régionale avec une configuration globale (en pointillé) apportent une information intéressante : les configurations où la localisation globale est en position finale sont moins émettrices que les configurations où cette localisation est en amont.

Nous réalisons un focus sur ces configurations. Nous avons paramétré notre modèle pour un taux de service de 100%. Les stocks et les niveaux de sécurité de ceux-ci sont paramétrés en conséquence. Lorsque la localisation globale se situe en première ou seconde position, les transports express, plus émetteurs que les transports classiques, se déclenchent pour livrer la dernière entreprise afin que celle-ci puisse livrer à l'heure le client final. Lorsque le client final se situe très loin de la dernière entreprise, il y a peu de transports express puisque les stocks de la dernière entreprise sont paramétrés pour un taux de service de 100%. Les émissions dues au

stockage, selon les configurations, sont de 7 à 200 fois moins importantes que celles dues au transport.

Nous reprenons les 22 configurations précédentes en les appliquant aux quatre types de produits soit 88 configurations (figure 5). Si nous effectuons la même classification par analyse des composantes principales, nous constatons que le type de produits est très influent. Les produits 1 et 2 sont dans les mêmes classes quelle que soit la classe. Plus les localisations sont dégradées plus les classes se décalent vers le haut et la droite : les critères financiers augmentent fortement ainsi que les critères environnementaux dans une moindre mesure. Les résultats des émissions des produits 3 et 4 sont très importants (en gris) et prennent le dessus par rapport aux autres facteurs.

Un point est à noter : la présence dans la même classe des produits 1 et 2 en configuration ccc et des produits 3 et 4 (en gris foncé). Nous pouvons expliquer ce point par le nombre de kilomètres parcourus en camion et non en bateau comme dans la configuration ggg. Or le bateau émet du CO₂ en quantité moindre par rapport au camion. Le type de produits ne compense pas cette différence. Or, une configuration cgc par exemple avec le produit 1 émettra donc moins en termes d'émissions dues au transport qu'une configuration ccc. En simplifiant, nous aurions 8000 kilomètres multipliés par un facteur d'émissions de 3.57 soit 28 560 contre 1600 kilomètres par 74.90 soit 119 840. Nous avons étudié l'influence des produits dans les résultats des configurations à localisation dégradée. Nous allons à présent étudier l'influence du TRS.

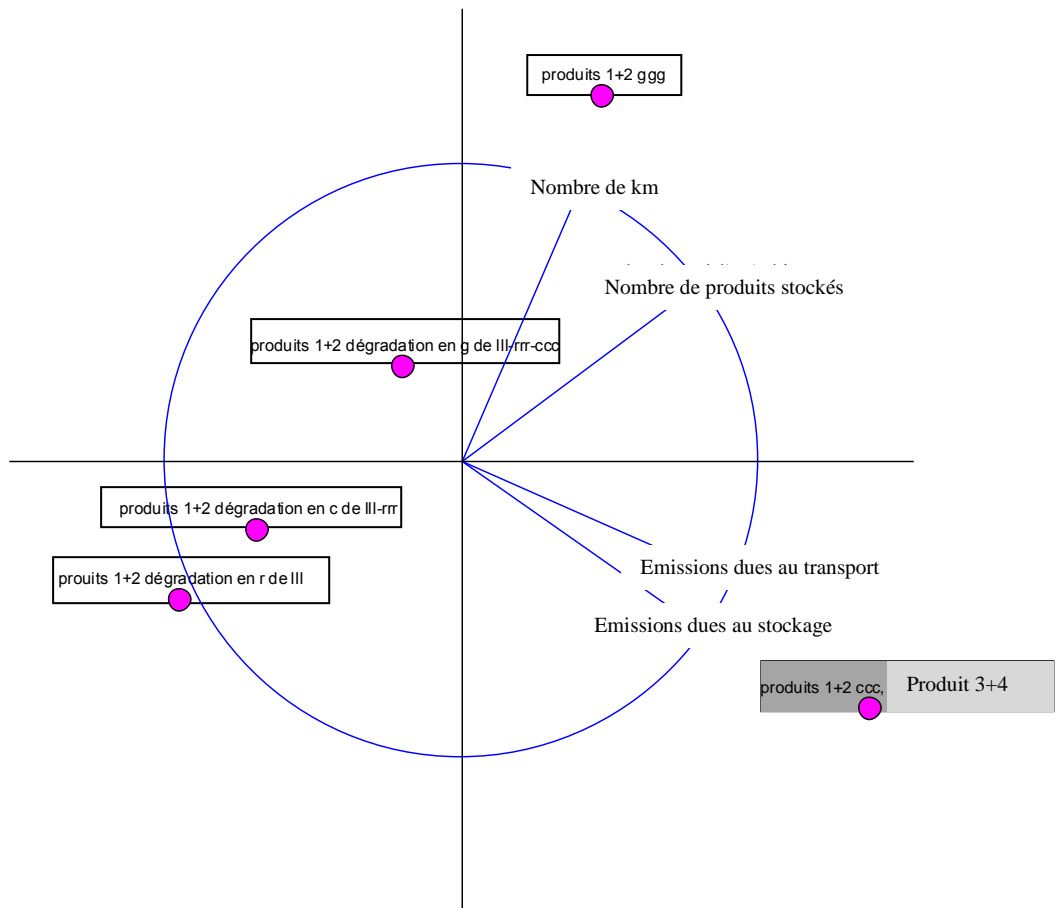


Figure 5. Représentation des 88 configurations

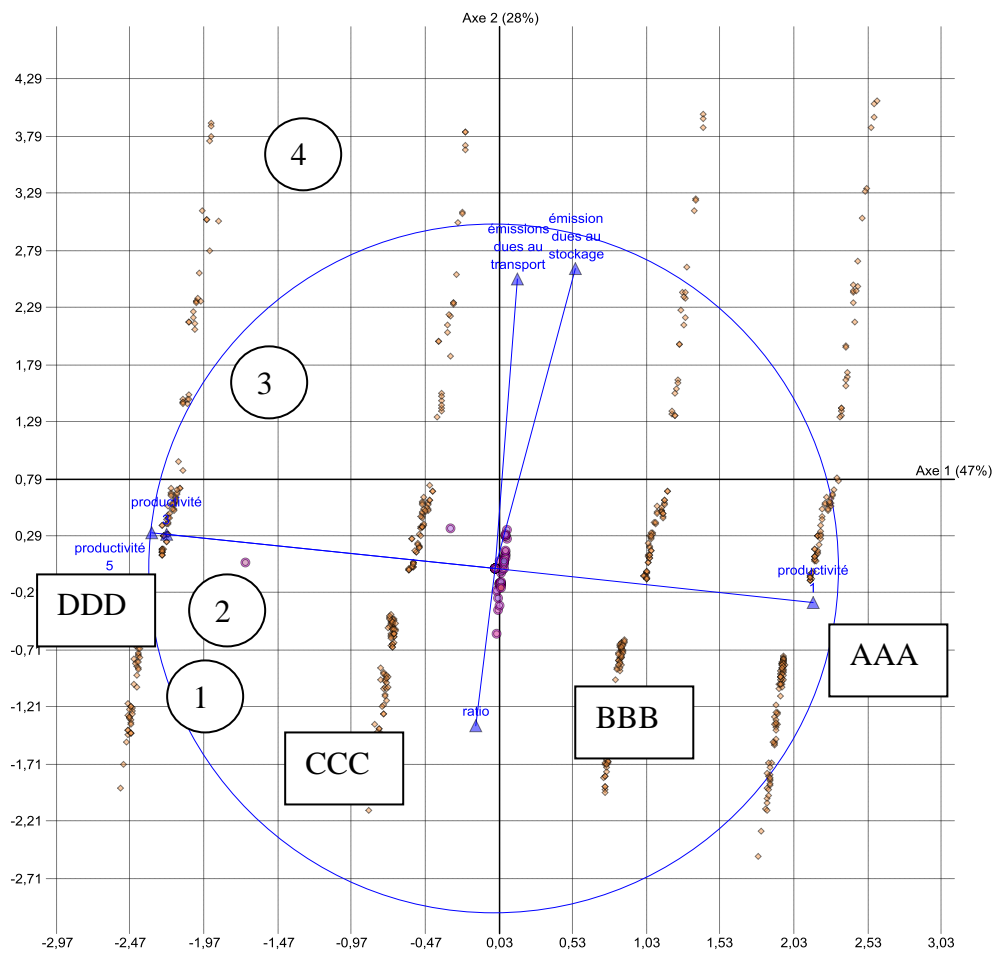


Figure 6. Répartition des configurations selon les axes 1 et 2

En effectuant une analyse en composantes principales sur six critères (émissions dues au stockage et au transport, productivité des trois entreprises et ratio nombre de kilomètres sur nombre de produits livrés), nous obtenons deux axes :

	Premier 1	Second axe
% information	47%	28%
contributions positives	productivité 2+3	Emissions dues au stock et au transport
contributions négatives	productivité 1	

Tableau 5. Contributions aux axes

La répartition des configurations selon les deux premiers axes est en figure 6 ci-dessus. Nous spécifions la répartition des observations selon les TRS sur le premier axe. Les ordonnées des configurations à TRS différent varient peu ce qui signifie que les émissions sont peu impactées par cette donnée.

Nous positionnons également facilement la répartition des produits. Le produit 4 (avec des ordonnées élevées) est celui qui émet le plus de CO₂ suivi du produit 3 (avec des ordonnées moins élevées). Les produits 1 et 2 sont proches avec des ordonnées plus faibles. Ceci est vrai quel que soit le TRS.

Nous nous apercevons que les TRS ont moins d'influence que les types de produits sur les émissions de CO₂.

7 DISCUSSION ET IMPLICATIONS MANAGERIALES

Les résultats de la simulation mettent en lumière les faits suivants : quand la chaîne logistique est homogène, les émissions de carbone augmentent logiquement. Trois localisations locales émettent moins que trois régionales, qui émettent moins que trois continentales, qui émettent elles-mêmes moins que trois globales. Dans le cas d'une chaîne logistique très hétérogène (avec des localisations globales et locales), plus la localisation globale est en amont de la chaîne, plus la configuration ainsi formée est émettrice de CO₂. De manière générale, quand les configurations sont hétérogènes, plus la localisation éloignée est en amont de la chaîne, plus la chaîne logistique émet de CO₂ : les configurations llr, llc, llg sont moins émettrices que les configurations lrl, lcl, lgl qui, elles-mêmes, émettent moins que les configurations rll, cll, gll.

De plus, de manière plus logique, le changement de TRS nous indique qu'il vaut mieux choisir un TRS homogène élevée mais que celle-ci au niveau des émissions de carbone a une influence moindre par rapport au type de produits. Cependant à produits égaux, plus le TRS est haut, plus l'impact environnemental sera faible.

Ces résultats fournissent un guide pour les partenaires logistiques dans leur choix de fournisseur pour obtenir une chaîne logistique verte. Un fait qui n'est pas forcément trivial consiste à s'intéresser à la place de celui-ci dans la chaîne logistique. Plus le fournisseur sera placé en amont de la chaîne logistique plus il faudra prêter attention à sa localisation. Même si les derniers maillons sont proches les uns des autres, plus les derniers seront éloignés les uns des autres plus la chaîne logistique émettra de CO₂ dans le cadre d'hypothèses prises pour cette étude. En termes écologiques, il est donc ici préférable d'être plus proche du fournisseur de matières premières que du marché final.

8 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons développé, implémenté et évalué un modèle de chaîne logistique. La simulation est utilisée pour jauger une grande variété de scénarii de chaînes logistiques. Cet outil de simulation a été testé dans le cas d'un environnement de production en Make To Stock pour le flux de quatre produits avec quatre localisations d'entreprises possibles. De manière inattendue, la localisation du premier maillon influence considérablement les résultats de la simulation. Enfin, nous concluons que le type de produits a une très forte influence sur les émissions de CO₂ ainsi que la localisation de la première entreprise. Plus l'entreprise est en aval de la chaîne logistique, moins sa localisation est impactante. De même, le TRS est peu influent au regard des autres données d'entrée.

Se pose à présent la question suivante : qu'en est-il de ces résultats si nous dégradons également les TRS? De manière plus générale, quels changements si nous prenons des hypothèses de départ différentes et notamment la variabilité de la demande ?

Nos prochaines recherches se focaliseront sur cette question. Ainsi, nous simulerons une vue plus complète de la performance écologique de la chaîne logistique.

9 REFERENCES

- ADEME (2007). Guide des facteurs d'émissions Report: Mission interministérielle de l'Effet de Serre.
- Ahmad, M. M. and Dhafr, N. (2002). "Establishing and improving manufacturing performance measures." *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing* 18(3/4): 171.
- Akono, D. and Fernandes, V. (2009). "Impacts du développement durable sur les organisations logistiques. (French)." *Revue Management et Avenir*(26): 241-255.
- Banks J. (1998). *Handbook of Simulation : Principles, Methodology, Advances, Applications, and Praticce*. New York: John Wiley.
- Brent, A. C. and Visser, J. K. (2005). "An environmental performance resource impact indicator for life cycle management in the manufacturing industry." *Journal of Cleaner Production* 13(6): 557-565.
- Carter, C. R. and Rogers, D. S. (2008). "A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory." *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 38(5): 360-387.
- Chan, F. T. S. (2003). "Interactive selection model for supplier selection process: an analytical hierarchy process approach." *International Journal of Production Research* 41(15): 3549-3579.
- Cholette, S. and Venkat, K. (2009). "The energy and carbon intensity of wine distribution: A study of logistical options for delivering wine to consumers." *Journal of Cleaner Production* 17(16): 1401-1413.
- Handfield, R., Walton, S. V., Sroufe, R. and Melnyk, S. A. (2002). "Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the Analytical Hierarchy Process." *European Journal of Operational Research* 141(1): 70-87.
- Hellström J. and Johnsson M. (2002). "Using discrete-event simulation in supply chain planning." *The 14th Annual Conference for Nordic Researchers in Logistics*.
- Hui K., Spedding T.A., Bainbridge I. and Taplin D.M. (2006). "Creating a green supply chain : a simulation and a modeling

- approach." In Springer (ed.), *Greening the supply chain* by J. Sarkis pp. 341-363). London.
- Jaegler, A. and Burlat, P. (2010). "Linking Carbon Performance and Effectiveness of Supply Chain." In L. M. Camarinha-Matos, X. Boucher and H. Afsarmanesh (eds.), *PRO-VE, IFIP AICT 336*. Saint-Etienne.
- Kannan, G., Noorul Haq, A., Sasikumar, P. and Arunachalam, S. (2008). "Analysis and selection of green suppliers using interpretative structural modelling and analytic hierarchy process." *International Journal of Management & Decision Making* 9(2): 1-1.
- Kiernan, M. J. (2001). "Eco-Value, Sustainability, and Shareholder Value: Driving Environmental Performance to the Bottom Line." *Environmental Quality Management* 10(4): 1-12.
- King A. and Lenox M. (2001). "Does it really pay to be green? An empirical study of firm environmental and financial performance." *The Journal of Industrial Ecology*.
- Klassen R-D and McLaughlin C. (1996). "The impact of environmental management on firm performance." *Management Science* 42: 1199-1214.
- Konopka J. and Trybula W. (1996). "Overall Equipment Effectiveness (OEE) and cost." *IEEE/CPMT-Electronics Manufacturing Technology Symposium*.
- Leachman R. and Hodges D. (1997). *Benchmarking Semiconductor Manufacturing Report*.
- Lu, L. Y. Y., Wu, C. H. and Kuo, T. C. (2007). "Environmental principles applicable to green supplier evaluation by using multi-objective decision analysis." *International Journal of Production Research* 45: 4317-4331.
- Mebratu, D. (1998). "Sustainability and sustainable development : historical and conceptual review." Elsevier Science Inc. .
- Miltenburg, J. (1995). *Manufacturing strategy*. Portland, Oregon: Productivity Press
- Muchiri, P. and Pintelon, L. (2008). "Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion." *International Journal of Production Research* 46(13): 3517-3535.
- Porter M. E. and Van der Linde C. (1995). "Green and competitive : ending the stalemate." *Harvard Business Review* 73: 120.
- Rao, P. and Holt, D. (2005). "Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance?" *International Journal of Operations & Production Management* 25(9): 898-916.
- Rizet, C. and Keïta, B. (2005). "Chaînes logistiques et consommation d'énergie : cas du yaourt et du jean." In *Inrets-Dest* (ed.).
- Saling P., Kicherer A., Dittrich-Krämer B., Wittlinger R., Zombik W., Schmidt I. and al (2002). "Eco-efficiency analysis by BASF : the method." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 7(4): 203-218.
- Scherpereel, C., van Koppen, C. S. A. and Heering, G. B. F. (2001). "Selecting Environmental Performance Indicators." *Greener Management International*(33): 97.
- Seuring, S. and Müller, M. (2008). "From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management." *Journal of Cleaner Production* 16(15): 1699-1710.
- Siracusa G., L. R. A. D., Sterlini S.E. (2004). "A new methodology to calculate the environmental protection index. A case study applied to a company producing composite materials." *Journal of Environmental Management* 73: 275--284.
- Soytas, U. and Sari, R. (2009). "Energy consumption, economic growth, and carbon emissions: Challenges faced by an EU candidate member." *Ecological Economics* 68(6): 1667-1675.
- Srivastava, S. K. (2007). "Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review." *International Journal of Management Reviews* 9(1): 53.
- Steege P. (1996). "Overall Equipment Effectiveness in Resist Processing Equipment." *IEEE/SEMI- Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*.
- Sundarakani, B., de Souza, R., Goh, M., Wagner, S. M. and Manikandan, S. (2010). "Modeling carbon footprints across the supply chain." *International Journal of Production Economics* In Press, Corrected Proof.
- Tsoufas, G. T. and Pappis, C. P. (2008). "A model for supply chains environmental performance analysis and decision making." *Journal of Cleaner Production* 16(15): 1647-1657.
- Vachon, S. and Mao, Z. (2008). "Linking supply chain strength to sustainable development: a country-level analysis." *Journal of Cleaner Production* 16(15): 1552-1560.
- Wacker, J. G. and Sheu, C. (2006). "Effectiveness of manufacturing planning and control systems on manufacturing competitiveness: evidence from global manufacturing data." *International Journal of Production Research* 44(5): 1015-1036.
- Waterson, P. E., Clegg, C. W., Bolden, R., Pepper, K., Warr, P. B. and Wall, T. D. (1999). "The use and effectiveness of modern manufacturing practices: a survey of UK industry." *International Journal of Production Research* 37(10): 2271.
- Wyland, B., Buxton, K. and Fuqua, B. (2000). "Simulating the supply chain." *IIE Solutions* 32(1): 37.