

# *La modularité produit et chaîne logistique dans un contexte collaboratif et durable : revue de littérature et cadre conceptuel*

Abdennacer Bouaïssi

Univ. Artois, EA 3926

Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois LGI2A

Béthune, F-62400, France

abdennacer.bouaïssi@gmail.com

abdennacer\_bouaïssi@ens.univ-artois.fr

Hamid Allaoui & Jean Christophe Nicolas

Univ. Artois, EA 3926

Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois LGI2A

Béthune, F-62400, France

hamid.allaoui@univ-artois.fr

jchristophe.nicolas@univ-artois.fr

**Résumé**—Aujourd'hui, l'entreprise se trouve face à de nouveaux enjeux socioéconomiques, de nouvelles contraintes réglementaires et des aspirations louables de ses collaborateurs et de l'opinion publique. Elle doit être profitable et seule l'innovation qui crée les richesses peut assurer sa pérennité. Néanmoins, elle se doit d'intégrer les préoccupations sociales et environnementales dans ses activités et ses interactions avec l'ensemble des parties prenantes. Notre approche résulte d'un équilibre entre les différents aspects (2ES) : Economique, Environnemental et Social pris en compte lors de la conception conjointe d'un produit et de la chaîne logistique associée. Cet article vise l'établissement d'une approche concourante, facilitant l'optimisation de la conception conjointe dans un contexte durable avec une forte considération de la collaboration et de la modularité de produit et de la chaîne logistique. Pour mieux positionner notre contribution nous dressons une revue de littérature avec un focus sur l'ingénierie concourante et le développement durable et nous définissons un cadre conceptuel de nos travaux de recherche.

**Mots clés**—Modularité, conception produit, conception chaîne logistique, conception conjointe, collaboration, développement durable.

## I. INTRODUCTION

La mondialisation a intensifié la concurrence entre les entreprises, elles doivent assurer leur compétitivité dans des marchés sous contraintes économiques, environnementales, et sociales. Le client est de plus en plus exigeant en termes de prix, de qualité et de disponibilité. Les entreprises sont partagées d'une part, entre répondre au besoin fonctionnel client allant jusqu'à traitement d'un besoin personnalisé et, la réduction des coûts. Ces deux composantes dominantes sont difficilement atteignables au moment où l'augmentation des volumes de production est un des facteurs de réduction de coûts de produit. D'autre part, elles doivent satisfaire les attentes sociales (conditions de travail, salaires,...) et respecter les exigences environnementales. Pour mieux aborder ce défi il faut avoir une vision globale qui intègre à la fois la Conception Produit (CP) et la Conception Chaîne Logistique (CCL) dans un contexte durable. Bien entendu, le but principal

est de satisfaire l'ensemble des acteurs liés à cette chaîne et en particulier le client. Aussi il faut réduire les coûts et les délais d'obtention produit tout en augmentant les niveaux de flexibilité et de réactivité de la chaîne logistique. Il s'agit donc de créer des réseaux logistiques agiles par l'intégration effective de la (CP) et de la (CCL) et, respectueux de l'environnement et de la société.

Pour cela nous comptons proposer une approche globale qui intègre dès la première étape de la conception conjointe, l'objectif socio-économique et l'impact environnemental (bilan CO2, bilan énergétique, consommation d'eau, traitement des déchets...) qui dans la plus part des cas s'avère négligé. Maintenant faut-il répondre aux interrogations suivantes :

- *Comment la conception produit va intégrer les problématiques liées à la conception et la configuration des chaînes logistiques durables ?*
- *Comment la configuration des chaînes logistiques peut intégrer les problématiques de la conception et l'architecture des produits dans un contexte durable ?*

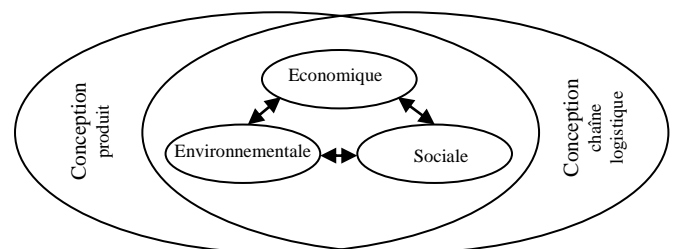


Fig. 1. Conception conjointe dans un contexte durable.

## II. ETAT DE L'ART

### A. *Intégration conception produit et conception chaîne logistique, où en sommes-nous ?*

La dépendance entre l'activité conception produit et l'activité conception chaîne logistique et de plus en plus forte.

Le compromis (QCDHE) Qualité, coût, délai, homme et environnement dépend du niveau d'intégration établi entre les deux activités.

L'ingénierie concurrente "Concurrent Engineering", est une démarche qui consiste à intégrer dès la phase de conception tous les éléments ayant impact sur le cycle de vie produit Pasard [1]. Ainsi, nous réalisons une adéquation entre les pratiques de conception produit selon un processus séquentiel et les nouveaux défis économiques qui intègrent les contraintes et les enjeux de la chaîne logistique. Dès la phase conception ou même préconception du réseau logistique nous devons tenir compte de la (CP) et vice-versa. La (CCL) doit prendre en considération les spécificités de la structure des familles de produits à savoir : le nombre de variantes à gérer et les nomenclatures associées ainsi que les éléments traitant les différents aspects techniques tel que :

- L'agencement des nomenclatures ;
- La modularité ;
- La standardisation ;
- La commonalité ;
- La diversité technique et fonctionnelle.

De ce fait, la construction du réseau logistique est capable de simuler le coût de plusieurs scénarii de (CP) et choisir celui qui optimise un ou plusieurs critères prédéfinis. En outre, la chaîne logistique finale doit être flexible et capable de s'adapter aux changements et aux modifications que peut subir un ou plusieurs produits. Cela peut conduire à une reconfiguration de l'organisation logistique ou de son mode de production et amenant parfois à un changement dans les procédés d'élaboration.

Le Design For X (DFX) est une démarche qui vise à intégrer la conception produit et la conception procédé Huang [2]. Le (DFMA) Design For Manufacturing and Assembly est une approche qui permet d'agir efficacement sur la (CP) pour faciliter la fabrication et l'assemblage. Le (DFL) Design For Logistics et le (DFSCM) Design For Supply Chain Management Dowlatshahi [3] traite la relation entre la (CP) et le reste des processus qui lui succèdent : l'approvisionnement, l'élaboration, le stockage et la distribution. Cette approche intégrée tient compte des contraintes logistiques.

Les travaux considérant la conception conjointe du produit et de la chaîne logistique se révélés rares, c'est ainsi que le besoin d'intégration entre les deux processus de conception est mis en importance par Riopel et al. [4]. Plus-tard Gan et Grunow [5] ont proposé un cadre conceptuel et une revue de littérature détaillée. La nouvelle approche que propose Hadj Hamou [6] intègre simultanément le problème de choix de solution de conception produit et le problème de dimensionnement de chaîne logistique. Ce travail tient compte des nomenclatures génériques qui influencent la modélisation des contraintes d'assemblage entre les différentes fonctionnalités des produits et apporte des solutions à la maîtrise de la diversité technique. La résolution de ce problème consiste à la fois à rechercher la meilleure solution de (CP) et à définir la structure à moindre coût de son réseau

logistique. Dans un contexte de personnalisation de masse Daaboul et al. [7] proposent une approche pour évaluer à la fois la variété des produits et des processus avec une étude de l'impact sur la perception de la valeur par le client. Plus loin cette approche à été développée dans Daaboul et al. [ 8 ] au sein d'un modèle qui intègre non seulement la perception de la valeur par le client mais qui s'étend à tous les partenaires du réseau. Ils proposent un cadre conceptuel et un outil pour modéliser, simuler et analyser un réseau de valeur en tant que système d'aide à la décision. La méthode étend l'approche SimulValor et son langage, illustrée et validée par une étude de cas dans l'industrie de la chaussure.

Lamothe et al. [9] ont développé un modèle d'optimisation qui sélectionne une famille de produit et configure sa chaîne d'approvisionnement. Chen et al. [10] et Chen [11] traitent dans leurs modèles des nomenclatures détaillées dans une chaîne logistique intégrée avec comme acteurs indépendants, les fournisseurs "suiveurs" et les producteurs "meneurs". Un algorithme génétique est présenté ainsi qu'une méthode exacte. ElMaraghy et Mahmoudi [12] ont mis au point un modèle linéaire d'aide à la décision traitant la conception simultanée de la structure modulaire optimale de produits et des configurations globales de la chaîne logistique multi-sites afin de minimiser le coût total. Gokhan et al. [13] ont participé au développement d'une conception simultanée des processus de la chaîne logistique pour l'optimisation de la conception produit et la configuration du réseau d'approvisionnement. El Hadj Khalf et al. [14] traitent la conception simultanée d'une famille de produits et sa chaîne d'approvisionnement en utilisant un algorithme Tabu. Dans Luo et al. [15] le choix du réseau logistique aval se fait en tenant compte des contraintes fournisseurs qui déterminent aussi les familles de produits. Baud-Lavigne et al. [16] étudient les impacts mutuels de la standardisation des produits et de la chaîne d'approvisionnement.

Pour mettre en œuvre le concept de la personnalisation de masse durable Kashif M. Shahrazad et Hadj Hamou [17] ont proposé un modèle de Programmation Linéaire Mixte en Nombres Entiers (PLMNE) sous des contraintes Logistiques et des contraintes associées aux nomenclatures génériques des produits (GBOP) Generic-Bill-Of-Products. Ce Modèle est testé dans un marché à forte diversification de la demande. Les résultats des simulations fournissent un (GBOP) optimal qui tient compte des décisions respectives sur l'ouverture ou la fermeture des segments du marché pour soutenir les efforts de personnalisation de masse. Chen et Huang [18] ont développé une méthode améliorée de décision simultanée de l'architecture du produit et la configuration de la chaîne logistique via un modèle de programmation mixte en nombres entiers orienté optimisation du coût total de la chaîne. Behncke et al. [19] proposent une procédure en plusieurs étapes pour faire correspondre la (CCL) avec l'architecture produits en utilisant l'information structurelle de deux points de vue, documentée dans un modèle (MDM) Multiple-Domain-Matrix. Gan et Grunow [5] nous présentent une synthèse des méthodes utilisées dans les différents travaux liés à la conception intégrée comme Mixed-Integer Linear

Programming (MILP) Weighted Goal-Programming (WGP) Genetic Algorithm (GA) et Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II).

### B. Modularité produit et chaîne logistique

Cette partie traite et expose l'évolution de la modularité, les concepts et les définitions qui lui sont liées. Nous allons traiter les avancées dans ce domaine en mettant le focus sur les impacts de la modularité et plus particulièrement au niveau de la structure du réseau de la chaîne logistique.

1) *La modularité technique et ses applications* : Selon Simon [20] l'idée "modularité" renvoi à une nouvelle méthodologie dans la conception des produits relativement complexes. Cette méthode consiste à décomposer l'architecture du produit en plusieurs parties de composants fonctionnelles. Alexander [21] propose un ensemble de solutions utilisables par les concepteurs afin d'adapter la forme d'un système complexe au contexte des besoins et des exigences spécifiques à la conception architecturale. Selon les pratiques de la "production modulaire" Starr [22] la modularité permet de configurer facilement les différents produits, de simplifier la complexité des processus de production, de réduire la variété des stocks, ainsi que les délais d'obtention des produits finis.

La modularité consiste à réduire la complexité d'un produit en le décomposant en une série de sous-ensembles qui sont accouplés par des interfaces prédéfinies formant une architecture modulaire Ulrich [23]. Il fait distinction entre les composants d'un produit et la façon dont ils sont incorporés. Pour Baldwin et Clark [24] la modularité est une stratégie qui permet de structurer méthodiquement des produits complexes et d'organiser leurs processus de production. La réutilisation des modules dans différents produits permet d'augmenter leurs volumes de production, de favoriser la flexibilité des processus et donc de réduire leurs coûts de revient Pine [25].

Dans Galsworth [26] cette méthode nouvelle vise le développement des produits avec des modules de composants interchangeable. L'interchangeabilité peut ne pas se limiter uniquement à la standardisation des modules mais peut atteindre également les interfaces entre modules. Selon Baldwin et Clark [27] les modules fonctionnent d'une manière homogène, ils sont définis comme étant des sous-ensembles pouvant être conçus et réalisés séparément. Les travaux de Huang et Kusiak [28] montrent que la conception modulaire est prometteuse pour produire une large variété de produits à coûts réduits. Un niveau de modularité fort permet de réduire les coûts de développement et de production en générant des économies d'échelle Tarondeau [29]. Ceci est indispensable lorsqu'une entreprise veut augmenter sa diversité fonctionnelle et réduire sa diversité technique Lamothe et Aldanondo [30], et donc standardiser ses moyens de production, optimiser les temps d'assemblage et agir efficacement sur son mode organisationnel. Agard [31] fait référence à la notion de "cas d'emploi" d'un module dans différents produits. Ainsi, un indicateur de la modularité mesure le nombre de cas d'emploi c.-à-d. le degré de

modularité en tenant compte des différentes utilisations et combinaisons possibles. L'enjeu est de réduire le nombre de composants en favorisant l'intégration de modules communs dans différents produits relativement complexes et de les découper sous formes de blocs fonctionnels interactifs. Cette conception permet d'obtenir une variété de produits finis à partir d'un nombre réduit de composants modulaires. Nous soulignons que dans Kusiak [32] une étude exhaustive est largement traitée et une analyse soigneusement illustrée à travers de nombreux cas de la conception modulaire.

2) *La modularité dans la chaîne logistique, évolutions et perspectives* : La modularité a été toujours présentée comme une stratégie de conception se limitant à l'aspect technique lié à l'architecture produit. Une abondante littérature traite la modularité organisationnelle comme une nouvelle approche d'organisation de la production Ron Sanchez et Joseph Mahoney [33], Frigant et Talbo [34], Fixson et Sako [35] et Sturgeon [36]. Il en ressort que la modularité a dépassé la dimension technique pour atteindre la dimension organisationnelle. Certes, cette nouvelle dimension place la modularité à la limite entre la technologie et les frontières verticales des entreprises. Pour Ulrich [23] l'architecture du produit relève des décisions stratégiques de l'entreprise vue les nombreuses et profondes conséquences qu'elles impliquent. Dans Ron Sanchez et Joseph Mahoney [33] les spécificités du produit déterminent la nature de l'organisation. Leur approche montre l'idée que la modularité des produits tend à influencer la modularité de l'organisation qui conçoit et réalise ces produits et donc l'intérêt d'optimiser les coûts associés à cette dernière. Une nouvelle approche modulaire a fait surface avec Koppl et Langlois [37] au-delà les aspects techniques et organisationnels, ils mettent le focus sur les échanges inter-organisationnels et donc lié la modularité aux aspects communication, interaction et corrélation entre processus. Dans Calcagno [38] la modularité a été présentée par la littérature sous trois concepts :

- Modularité en conception ;
- Modularité en production ;
- Modularité en organisation inter-firmes.

La modularité est aujourd'hui une question-clé dans l'industrie automobile, aéronautique, informatique,...etc. En effet, une importance particulière est réservée au secteur automobile Salerno et Dias [39] et [Frigant et Talbo [40], Les constructeurs automobiles appliquent les concepts de la production modulaire car elle réduit considérablement le temps et les coûts de production. L'impact positif de la conception modulaire est d'une importance notable dans la dynamique de la chaîne logistique Erixon [41] et Van Hoek et Weken [42]. Fisher [43] a souligné l'importance de la coordination entre le produit et la chaîne logistique. Selon son approche les produits innovants nécessitent des chaînes logistiques flexibles, tandis que les produits fonctionnels

devraient être organisés avec des chaînes logistiques visant la minimisation des coûts. Fine [44] insiste sur l'intérêt d'utiliser le processus de décision "faire" ou "acheter" dans la configuration des modules de la chaîne logistique, ce qui décide des compétences principales de l'organisation et celles de ses partenaires. Le choix d'une structure modulaire adaptée aux compétences du réseau logistique définit le niveau d'intégration des activités, détermine la structure des coûts et ne peut être qu'un véritable avantage concurrentiel pour une meilleure compétitivité globale et une bonne flexibilité et d'adaptabilité aux mutations du marché.

Une nouvelle idée est apparue dans Wolters [45] et place la modularité non seulement au centre de la restructuration des produits et des processus mais également dans l'axe de la gestion des chaînes logistiques. La modularité d'une chaîne logistique classique permet de générer des variétés de chaînes logistiques avec différentes fonctionnalités voire différents niveaux de performance. L'utilisation d'une architecture modulaire de produit facilite pour l'entreprise la gestion et l'organisation de son réseau, ainsi elle passe d'une architecture modulaire de produit classique en une réelle stratégie de coordination. En outre, Wolters [45] soutient l'idée de la conception conjointe des produits, de leurs processus et leurs réseaux de la chaîne logistique. Pour lui des produits modulaires mènent à des chaînes logistiques modulaires et vice versa ce qui permet d'améliorer la performance de l'ensemble.

La stratégie présentée dans Arnheiter et Harren [46] montre comment la modularité transforme la chaîne logistique en un réseau compact. Ils précisent qu'en modélisant les opérations de fabrication, d'assemblage et de distribution, il est possible de réduire considérablement le nombre d'intervenants dans la chaîne logistique. Ceci restreint la taille du réseau, réduit les coûts et facilite la communication entre les différents partenaires. Fine et al. [47] ont étudié les interdépendances entre les produits, les processus et la chaîne logistique. Ils ont développé Le premier modèle quantitatif (GPM) Goal-Programming Model qui permet d'analyser les compromis entre les différentes alternatives liées à l'architecture du produit, aux processus d'assemblage et aux choix des décisions de la chaîne logistique. Blackhurst et al. [48] présentent une autre méthode qui tient compte de l'intégration conception produit et chaîne logistique en se basant sur les nomenclatures produits. Leurs travaux intègrent la phase de conception détaillée du produit par conséquent les décisions qui en découlent n'ont qu'un impact limité.

D'après ElMaraghy [49] la modularité et les concepts des plateformes produits permettent de satisfaire la diversité des clients et leurs exigences et d'assurer un niveau de flexibilité élevé non seulement sur le plan de l'architecture des produits mais aussi des systèmes de fabrication. [Zhang et al. [50] ont développé un modèle de programmation (PLMNE) qui intègre à la fois la conception des plateformes produits et les décisions d'achats à base des facteurs de coûts sensibles à la commonalité et la modularité. Ils ont simplifié davantage le modèle et ainsi aidé à développer un algorithme avec une

solution efficace. Un exemple numérique est présenté pour illustrer la façon dont les fabricants cherchent à ajuster dynamiquement leurs stratégies de conception des produits en réponse aux changements du marché. La réflexion de [Bush et al. [51] a montré que la conception modulaire du produit améliore la réactivité et la performance de la chaîne logistique. Plus récemment, Népal et al. [52] ont utilisé le modèle de programmation (WGPM) Weighted Goal Programming Model pour optimiser les coûts de la chaîne logistique. Les performances de la chaîne logistique pour les architectures des produits intégrales et modulaires sont comparées et discutées.

### *C. La conception conjointe produit ou / et chaîne logistique dans un contexte durable*

Cette partie expose les contraintes environnementales intrinsèques à la conception conjointe produit et chaîne logistique. Les préoccupations environnementales et sociales sont aujourd'hui une réalité que nous devons prendre en considération. Les recherches dans ce sens sont peu nombreuses et les entreprises s'y intéressent de plus en plus. Beamon [53] a mis en évidence les enjeux et les éléments clés de l'intégration du facteur environnemental. Seuring et Muller [54] ont proposé à partir d'une revue de littérature un cadre conceptuel qui s'intéresse à la chaîne logistique durable. Frota Neto et al. [55] présentent un modèle qui tient compte de la dimension environnementale d'une chaîne logistique et son impact. Ramudhin, et al. [56] ont utilisé la méthode Goal Programming (GPM) en considérant quatre niveaux : les fournisseurs, les unités de production, les centres de distribution et les clients. La méthodologie proposée permet d'évaluer les compromis entre les coûts totaux de la logistique et de la compensation carbone en tenant compte des stratégies d'exploitation de la chaîne d'approvisionnement, des contraintes réglementaires et environnementales ainsi que l'évolution du marché du carbone. L'approche est présentée à travers un cas illustratif provenant de l'industrie de l'acier. Wang et al. [57] s'intéressent à une optimisation multicritères qui réunit entre l'aspect économique et l'aspect environnemental. Chaabane, et al. [58] présentent un modèle (PLMNE) pour la conception de la chaîne logistique durable et qui intègre l'analyse de cycle de vie et distingue entre les déchets solides et liquides, ainsi que les émissions de gaz dues à divers procédés de fabrication et à des systèmes de transport. Aït-Kadi et al. [59] montrent l'intérêt de la logistique inverse dans la valorisation des produits via un réseau de création de valeur intégrant les processus de récupération, de traitement, de recyclage, de distribution ou d'élimination propre dans une perspective de développement durable. Pour le (DFS) Design For Sustainability Arnette, et al. [60] présentent un concept qui intègre la remise à neuf, la réutilisation et le recyclage comme une action respectueuse de l'environnement pour la fin de vie produit. Elbounjimi et al. [61] exposent une revue de littérature de la chaîne logistique verte permettant de clarifier les différentes perceptions et les raisons d'évolution de ce nouveau concept. Les auteurs comparent les chaînes logistiques traditionnelles avec les principaux modèles de conception des chaînes logistiques vertes et proposent des perspectives de recherche. Baud-Lavigne et al. [62] proposent une étude qui intègre à la fois les contraintes

environnementales liées à la conception d'une gamme de produits et sa chaîne logistique. Le modèle mathématique proposé considère trois parties responsables des émissions de CO2 à savoir : la production, le transport et le composant. Ce modèle permet d'optimiser le coût sous contraintes de l'empreinte carbone et vice-versa. Des illustrations graphiques sont fournies pour mieux faciliter l'analyse. Trois études de cas académiques sont prises en compte. Plus récemment Majid Eskandarpour [63] à mis au point une méthode avec une

flexibilité différente des méthodes basiques ou spécifiques pour résoudre plusieurs problèmes liés à la localisation et la planification stratégique dans les réseaux logistiques. Cette réflexion à conduit en premier temps au développement d'un modèle mathématique générique mono-objectif orienté optimisation des coûts et qui a connu une extension vers un modèle bi-objectif qui intègre en plus de l'aspect économique, l'aspect environnemental.

TABLE I. ETAT DE L'ART : INGENIERIE CONJOINTE (ARTICLES AVEC FORTE CONSIDERATION DES NOMENCLATURES)

Caractéristiques des modèles	[62]	[6]	[11]	[9]	[17]	[13]	[16]	[64]	[12]	[50]	[65]	[68]	[66]	[48]	[67]
Contrainte nomenclature		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Nomenclature générique matière GBOM		X		X					X	X					X
Nomenclature générique produit GBOP					X										
Nomenclature alternative	X		X						X						
<b>Spécificités de conception</b>															
Standardisation	X						X								
Modularité					X			X	X	X	X	X	X		
Commonalité					X					X					
Conception par pack		X		X											X
<b>Nœuds du réseau</b>															
Fournisseurs	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	
Usines de production	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Distribution-Transport	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	
Client	X	X		X	X	X						X		X	X
<b>Fonction objectif</b>															
Maximisation des profits			X		X										
Minimisation des coûts	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Délai						X		X							
Optimisation coût et impact environnement	X														
<b>Paramètres environnementaux</b>															
CO2	X														
Consommation d'eau															
Consommation d'énergie															
Déchets															
<b>Paramètres sociaux</b>															
<b>Méthodes de résolution</b>															
PLMNE (MILP)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
Métaheuristique (TS)												X			
Algorithme génétique (AG)						X							X		
Programmation Goal (PGO)													X		
Décomposition de Benders (DB)					X										
Méthode d'aide à la décision (MAD)					X									X	

Baud-Lavigne [62] – Hadj Hamou [6] – Chen [11] – Lamothe et al. [9] – Kashif et Hadj Hamou [17] – Gokhan et al. [13] – [Baud-Lavigne, 2012 [16] – Chiu et Okudan [64] – ElMaraghy et Mahmoudi [12] – Zhang Xinyan [50] – Ramudhin et Benkaddour [65] – Hadj Khalaf et al. [68] – Monplaisir et al. [66] – Blackhurst et al. [48] – Lamothe et al. [67].

### III. UN PAS VERS LA MODULARITÉ PRODUIT ET CHAÎNE LOGISTIQUE DANS UN CONTEXTE COLLABORATIF ET DURABLE. LE CONCEPT CO-MODULARITÉ DURABLE (Co-MD). DISCUSSION ET PERSPECTIVE

A. *Le concept Co-MD, un levier de développement durable*  
 Jusqu'à présent la plupart des travaux (Tableau 1) qui concerne l'optimisation conjointe de la (CCL) et la (CP) s'intéresse à des objectifs traditionnels qui se limitent à

l'optimisation des coûts et la réduction des délais. Seuls les travaux de Baud-Lavigne et al. [62] font exception par l'intégration de l'aspect environnemental représenté par l'optimisation des émissions de CO2 avec une particularité réservée à la standardisation des produits. Dans un contexte de l'ingénierie concourante, rares sont les travaux qui intègrent la composante environnementale ou sociale. Cependant, le niveau des exigences liées à ces deux composantes ne cesse d'augmenter et crée de nouveaux

enjeux. Dans une logique de Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE), il paraît nécessaire de repenser la perception de la notion de performance quand il s'agit de planifier conjointement les activités liées aux réseaux logistiques et aux produits. Nos travaux de recherche visent la création d'un nouveau concept de l'ingénierie concourante qui repose sur l'architecture modulaire produits et chaînes logistiques avec une forte considération de la collaboration et de la durabilité. Une stratégie combinatoire profitable à l'ensemble des parties prenantes de la chaîne. Il s'agit de souligner le potentiel de la (Co-MD) entre les acteurs logistiques qui se sont fixés comme objectif stratégique de mettre en place une structure modulaire et collaborative susceptible de dynamiser leurs efforts et d'accroître leur compétitivité et donc assurer leur pérennité. La modularité dans un cadre collaboratif favorise la flexibilité décisionnelle des entreprises et augmente leur capacité à agir ensemble pour s'adapter aux mutations environnementales et sociales sous contraintes économiques. La (Figure 2) projette en 3D notre stratégie multidirectionnelle qui s'articule autour de trois axes principaux. Le premier axe prend en considération l'architecture modulaire du produit. Le deuxième axe traite la collaboration multi-échelons. Le troisième axe intègre la triple performance (3BL) dans un contexte multiobjectif.

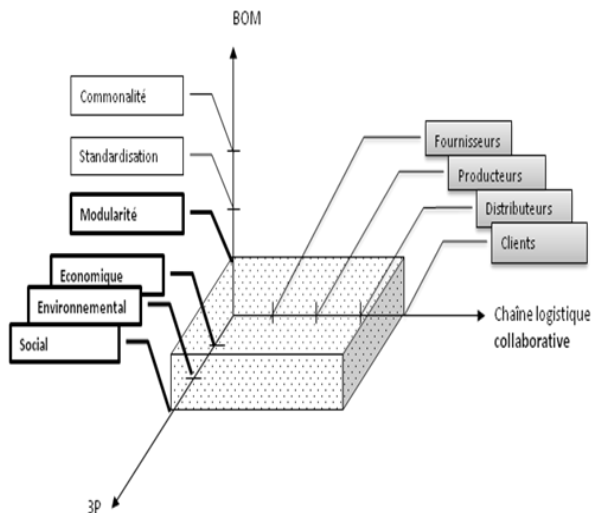


Fig. 2. Axes de Co-modularité durable.

## B. Modélisation du concept Co-MD

1) *Domaine d'application* : Nos travaux de recherches s'intéressent au secteur aéronautique qui doit améliorer plus que jamais les performances de sa chaîne logistique. Il s'agit d'une industrie prometteuse qui ne cesse de s'étendre, devenue un acteur principal de développement dans certaines régions comme l'Amérique Latine et l'Afrique du Nord. En effet, les entreprises doivent revoir leurs méthodes et leurs stratégies logistiques pour faire face aux exigences sectorielles. Dans un environnement concurrentiel exacerbé, le marché aéronautique est contraint de produire des avions

à moindre coût. Cette exigence doit s'intégrer dans un contexte inter-firmes collaboratif et durable, accompagner le développement de la société et respecter l'environnement. La demande est de plus en plus forte, les volumes de production augmentent et la taille des réseaux logistiques s'élargit, d'où la nécessité de restructurer le tissu socio-économique de l'industrie aéronautique selon une organisation modulaire. Il faut encourager la philosophie qui vise de standardiser d'une manière globale et rationnelle les méthodes dont les produits sont fabriqués, manipulés, transportés, stockés, distribués, utilisés et retraités. Ainsi, nous pourrions définir une solution optimale ou pseudo optimale grâce à laquelle l'entreprise trouve des réponses à des problèmes multiobjectifs où elle est contrainte de tenter d'optimiser des objectifs contradictoires.

### 2) Paramétrage du concept Co-MD

Le nouveau concept (Co-MD) vise la conciliation des objectifs économiques, environnementaux et sociaux de la chaîne logistique. L'environnement de notre concept (Co-MD) prend en considération plusieurs facteurs à effets divers. Nous détaillons ci-après les paramètres de chaque facteur (Figure 3) :

- Le marché nous renseigne sur le cycle de vie produit et sur la demande.
- La réglementation impose un niveau de respect des conditions sociales et de l'impact environnemental (émissions CO2, Consommation d'eau, énergie...).
- La conception produit détermine les nomenclatures plates et les nomenclatures alternatives.
- La modularité produit décide des différentes possibilités de composition des modules potentiels.
- Les nœuds sont caractérisés par la capacité, les délais et la disponibilité.
- Les flux sont caractérisés par les modes de transport, les capacités et les volumes à transporter.
- L'affectation des produits se fait par nœud, fournisseur ou sous-traitant.
- La collaboration simule les différentes possibilités de collaborer entre les acteurs du réseau logistique.

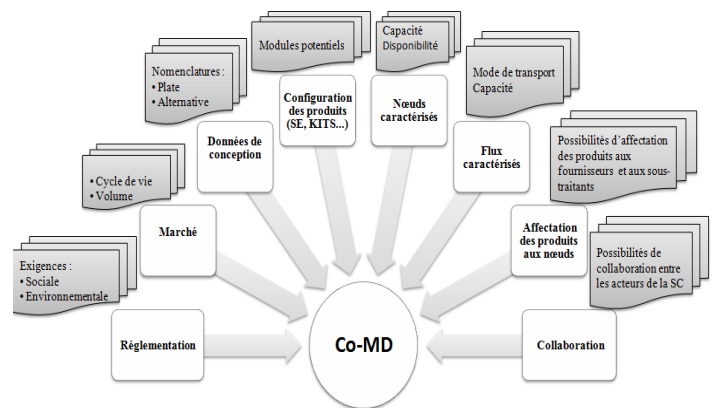


Fig. 3. Concept Co-MD

Tous ces paramètres sont traités par notre modèle (Co-MD) afin de déterminer le réseau optimal collaboratif qui minimise les coûts, qui respecte l'environnement et qui considère la responsabilité sociale de l'entreprise.

### 3) Indice de Co-modularité durable iCo-MD

Quel est le rôle de l'indice (iCo-MD) (Figure 4) ?

L'indice de la Co-modularité durable est un instrument de mesure de l'évolution du niveau d'intégration de la modularité, la collaboration et la durabilité destiné aux entreprises pour établir et revoir leurs stratégies décisionnelles.

L'indice (iCo-MD) joue un rôle multiobjectif :

a) *Economique* : il permet de suivre la rentabilité de l'entreprise à travers son processus décisionnel. La minimisation des coûts logistiques est un des objectifs principaux du concept (Co-MD).

b) *Socio-économique* : il est utilisé pour maintenir un équilibre entre la dimension économique et sociale. Il prend en considération le niveau d'intégration de la responsabilité sociale de l'entreprise au niveau stratégique.

c) *Environnemental* : il se conforme aux normes internationales en vigueur afin de permettre des comparaisons entre les nœuds du réseau logistique et d'orienter la décision quant à leur affectation.

d) *Modulaire* : Il tient compte du niveau de modularité intégrée dans le processus de conception conjointe.

e) *Collaboratif* : Il nous renseigne sur le degré de collaboration entre les acteurs du réseau logistique. L'effet de la synergie de groupe et les retombées y associées impactent l'indice (iCo-MD).

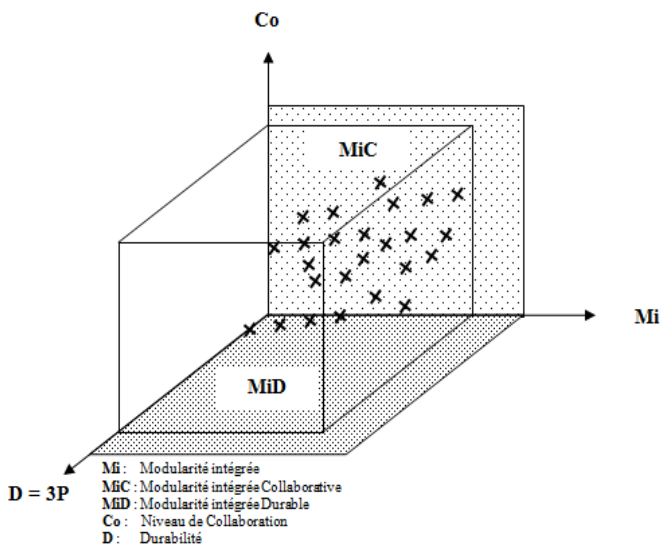


Fig. 4. Indice de Co-modularité durable iCo-MD

## IV. CONCLUSION

Le défi du 3ème millénaire consiste à intégrer l'ingénierie concurrente dans un contexte durable de façon à ce qu'on obtienne une optimisation tripartite intégrant les dimensions économique, sociale et environnementale. L'enjeu face à un tel besoin croissant sans cesse est dû à une tendance du marché. Notre projet s'inscrit pleinement dans cette démarche qui vise à optimiser davantage la chaîne logistique intégrée et renforcer son agilité dans un contexte collaboratif et durable.

Ce document met en évidence le besoin de travaux de recherche qui intègrent en plus de la performance économique des objectifs d'ordre socio-environnementaux dans la conception conjointe produit et chaîne logistique. Nos travaux de recherche vont être orientés vers le Design For Sustainable Logistics (DFSL). Nous développerons un modèle intégré selon une approche qui améliore la performance tridimensionnelle (2ES) et qui optimise la conception simultanée produit et chaîne logistique tout en réduisant l'émission de CO<sub>2</sub>, la consommation énergétique, la consommation d'eau et ayant comme perspective l'intégration de la dimension sociale : emploi, conditions de travail, revenus. Grâce à la (Co-MD) et son indice (iCo-MD) nous allons réétudier à travers un cas industriel, la stratégie actuelle de la chaîne logistique pour renforcer son rôle dans la construction d'un modèle économique durable. Il s'agit d'une solution globale pour atteindre les objectifs de compétitivité durable des entreprises. Nous proposons de développer un modèle mathématique optimal ou pseudo optimal appliqué à un cas de l'industrie aéronautique. La finalité est d'établir une approche concurrente, facilitant l'optimisation de la conception conjointe dans un contexte durable et collaboratif avec une forte considération de la modularité intégrée du produit et de la chaîne logistique.

Nous avons la forte conviction que si nous agissons tous dans cette direction ; chercheurs, ingénieurs, techniciens, chefs d'entreprises... nous pouvons résoudre beaucoup de problèmes pour lesquels nous ne disposons pas de solutions efficaces à l'heure actuelle.

## Références

- [1] B. Prasad, "Concurrent engineering fundamentals: integrated product and process development," V. 1, Prentice Hall: New Jersey, 1996.
- [2] G.Q. Huang, "Design for X: concurrent engineering imperatives," Chapman & Hall: London, 1996.
- [3] S. Dowlatshahi, "The role of logistics in concurrent engineering," *International Journal of Production Economics*, 44, pp. 189-199, 1996.
- [4] D. Riopel, A. Langevin and J.F. Campbell, "Integrating logistics in concurrent product and process design," Cahiers du GERAD, 1998.
- [5] T-S. Gan and M. Grunow, (2013) Concurrent Product – Supply Chain Design: A Conceptual Framework & Literature Review. *Procedia CIRP*, 7, pp. 91-96, 2013.
- [6] K. Hadj-Hamou, "Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes," Thèse de doctorat, INP Toulouse, 2002.
- [7] J. Daaboul, P. Castagna, C. Da Cunha, A. Bernard, F. Laroche "Design for mass customization: Product variety vs. process variety" *Manufacturing Technology*, 60(1), pp. 169-174, 2011.

- [8] J. Daaboul, P. Castagna, C. Da Cunha, A. Bernard "Value network modeling and simulation for strategic analysis: a discrete event simulation approach" " *International Journal of Production Research*, 52(17), pp. 5002-5020, 2014.
- [9] J. Lamothe, K. Hadj-Hamou and M. Aldanondo, "An optimization model for selecting a product family and designing its supply chain," *European Journal of Operational Research*, 169, pp. 1030-1047, 2006.
- [10] H-Y.S. Chen, C-W.R. Lin and Y. Yih, (2007) "Production-distribution network design of a global supply chain alliance from the key player's perspective," *International Journal of Production Research*, 45, pp. 245-265, 2007.
- [11] H-Y.S. Chen, "The impact of item substitutions on production-distribution networks for supply chains," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46, pp. 803-819, 2010.
- [12] H.A., ElMaraghi and N. Mahmoudi, "Concurrent design of product module structure and global supply chain configurations". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22(6), pp. 483-493, 2009.
- [13] N.M. Gokhan, K.L. Needy and B.A. Norman, "Development of a simultaneous design for supply chain process for the optimization of the product design and supply chain configuration problem," *Engineering Management Journal*, 22(4), pp. 20-30, 2010.
- [14] R. El Hadj Khalef, B. Agard and B. Penz, "Simultaneous design of a product family and its related supply chain using a Tabu Search algorithm," *International Journal of Production Research*, 49:19, pp. 5637-5656, 2011.
- [15] X. Luo, C. Kwong, J. Tang, S. Deng and J. Gong, "Integrating supplier selection in optimal product family design," *International Journal of Production Research*, 49, pp. 4195-4222, 2011.
- [16] B. Baud-Lavigne, "Conception conjointe des nomenclatures et de la chaîne logistique pour une famille de produits : outils d'optimisation et d'analyse," Thèse de doctorat en cotutelle entre Université de Grenoble et l'École Polytechnique de Montréal, 2012.
- [16] B. Baud-Lavigne, B. Agard and B. PENZ, "Mutual impacts of product standardization and supply chain design". *International Journal of Production Economics*, 135, pp. 50-60, 2012(b).
- [17] M. Kashif Shahrzad and K. Hadj-Hamou, *Springer Science+Business Media*, LLC, 2012.
- [18] J. Chen and Y. Huang, "Concurrent Decision-Making of Product Architecture And Supply Chain Configuration," *Advanced Materials Research*, 915-916, pp. 1518-1527, 2014.
- [19] F-G.H. Behncke, F-M.A. Walter and U. Lindemann, "Procedure to Match the Supply Chain Network Design with a products Architecture," *Procedia CIRP*, 17, pp. 272-277, 2014.
- [20] H. Simon, "The architecture of complexity," *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106, pp. 467-82, 1962.
- [21] C. Alexander, "Notes on the synthesis of form," Harvard University Press: Cambridge, 1964.
- [22] M.K. Starr, "Modular production: a new concept," *Harvard Business Review*, 43(6), pp. 131-142, 1965.
- [23] K.T. Ulrich, "The role of product architecture in the manufacturing firm," *Research Policy*, 24(3), pp. 419-440, 1995.
- [24] C.Y. Baldwin and K.B. Clark, "Managing in an age of modularity," *Harv Bus Rev*, 75(5), pp. 84-93, 1997.
- [25] B.J. Pine, "Mass customization: The new frontier in business competition," Boston: *Harvard Business School Press*, 1993.
- [26] G.D. Galsworth "Smart, Simple Design: Using Variety Effectiveness to Reduce Total Costs and Maximise Customer Selection," *John Wiley & Sons*, 1994.
- [27] C.Y. Baldwin and K.B. Clark, "Design rules: The power of modularity," *MIT Press*: Boston, 2000.
- [28] C.C. Huang and A. Kusiak, "Modularity in design of products," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 28(1), pp. 66-77, 1998.
- [29] J.C. Tarondeau, "Stratégie industrielle," 2nd Ed, Collection Gestion. Vuibert, 1998.
- [30] J. Lamothe and M. Aldanondo, "Une approche d'ingénierie intégrée pour la logistique : intérêts et limites de la coopération," MOSIM 2001, Troyes : France, 2001.
- [31] B. Agard, "Contribution à une méthodologie de conception de produits à forte diversité," Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble: France, 2002.
- [32] A. Kusiak, "Engineering Design: Products, Processes, and System," First edition, *Academic Press*, San Diego: California, 1999.
- [33] R. Sanchez and J.T Mahoney, "Modularity, flexibility, and knowledge management in Product and organization design," *Strategic Management Journal*, Special Issue: Knowledge and the Firm, 17, pp. 63-76, 1996.
- [34] V. Frigant and D. Talbot, "Proximités et logique modulaire dans l'automobile et l'aéronautique : vers une convergence des modèles d'approvisionnement ?," 3<sup>ème</sup> journée de la proximité, nouvelles croissances et territoires, Paris, 13-14 décembre 2001.
- [35] S. Fixson and M. Sako, "Modularity in product architecture: will the auto industry follow the computer industry?," Presented at the fall meeting, IMVP, Cambridge, USA, 2001.
- [36] T.J. Sturgeon, "Modular production networks: a new American model of industrial organization," *Industrial and Corporate Change*, 11(3), pp. 451-496, 2002.
- [37] R. Koppl and R.N Langlois, "Embeddedness, Organizations, and Language Games," *Paper for the SCANCOR Conference on "Crossing Boundaries: Economics, Sociology and Organizational Theory"*, 30 September - 1 October, Stanford: California, 2000.
- [38] M. Calcagno, "Dynamics of modularity. A critical approach," *EURAM conference*, Convegno, 2<sup>nd</sup> Ed, EURAM conference, MAGGIO, 2002.
- [39] M.S. Salerno and A.V.C. Dias, "Product design modularity, modular production, modular organization: the evolution of modular concepts," *Actes du GERPISA*, (33), pp. 61-73, 2000.
- [40] V. Frigant and D. Talbot, "Convergence et diversité du passage à la production modulaire dans l'aéronautique et l'automobile en Europe," *Actes du GERPISA*, (37), pp.107- 118, 2004.
- [41] G. Erixon, "Design for Modularity, Design for X: concurrent engineering imperatives," (Huang G.Q. Ed.), *Chapman & Hall*, pp. 356-379, 1996.
- [42] R.I. Van Hoek and H.A. Weken, The impact "of modular production on the dynamics of supply chains," *The International Journal of Logistics Management*, 9(2), pp. 35-50, 1998.
- [43] M. Fisher, "What is right supply chain for Your product?," *Harvard Business Review* March/April 1997.
- [44] C.H., Fine, "Clockspeed - Winning Industry Control in the Age of Temporary Advantage," *Perseus Books*, Reading, Massachusetts, 1998.
- [45] M.J.J. Wolters, "The business of modularity and the modularity of business," in: P.H.L. Bovy (Ed.), 5th Trail Annual Congress 1999: Transport, Infrastructure and Logistics, The Netherlands TRAIL Research School, December 1999, Scheveningen: the Netherlands.
- [46] E.D Arnheiter and H. Harren, "A typology to unleash the potential of modularity," *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16(7), pp. 699-711, 2005.
- [47] C.H. Fine, B. Golany and H. Naseraldin, "Modeling tradeoffs in three-dimensional concurrent engineering: A goal programming approach," *Journal of Operations Management*, 23(3-4), pp. 389-403, 2005.
- [48] J. Blackhurst, T. Wu, and P. O'Grady, "PCDM: A decision support modeling methodology for supply chain, product and process design decisions," *Journal of Operations Management*, 23, pp. 325-343, 2005.
- [49] H.A ElMaraghy, "Changing and evolving products and systems—models and enablers," Ed, changeable and reconfigurable manufacturing systems. New York: Springer Verlag, pp. 25-45, 2008.
- [50] X. Zhang, Q.G Huang and M.J Rungtusanatham, *International Journal of Production Research*, 1 November, 46(21), pp. 6137-6162, 2008.
- [51] A.A Bush, A. Tiwana and A. Rai, "Complementarities between product design and IT infrastructure flexibility in IT-enabled supply chain," *IEEE Transactions on Engineering Management*, 57(2), pp. 240-254, 2010.
- [52] B. Nepal, L. Monplaisir and O. Famuyiwa, "Matching product architecture with supply chain design," *European Journal of Operational Research*, 216(2), pp. 312-325, 2011.
- [53] B.M Beamon, "Designing the green supply chain," *Logistics Information Management*, 12, pp. 332-342, 1999 (a).
- [54] S. Seuring and M. Muller, "From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management," *Journal of Cleaner Production*, 16, pp. 1699-1710, 2008.



- [55] J. Frota Neto, J. Bloemhof-Ruwaard, J. Van Nunen and E. Van Heck, "Designing and evaluating sustainable logistics networks," *International Journal of Production Economics*, 111, pp. 195-208, 2008.
- [56] A. Ramudhin, A. Chaabane and M. Paquet, "Carbon market sensitive sustainable supply chain network design," *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 5(1), pp. 30-38, 2010.
- [57] F. Wang, X. Lai and N. Shi, "A multi-objective optimization for green supply chain network design," *Decision Support Systems*, 51, pp. 262-269, 2011.
- [58] A. Chaabane, A. Ramudhin and M. Paquet, "Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme," *International Journal of Production Economics*, 135, pp. 37-49, 2012.
- [59] D. Ait-Kadi, M. Chouinard, S. Marcotte and D. Riopel, "Sustainable Reverse Logistics Network," Wiley-ISTE: Londres, 2012.
- [60] A.N. Arnette, B.L. Brewer and T. Choal, "Design for Sustainability (DFS): the intersection of supply chain and Environment" *Journal of Cleaner Production*, 83, pp. 374-390, 2014.
- [61] M. Elbounjimi, G. Abdalnour and D. Ait kadi "Contribution à la conception de la chaîne logistique verte, 10<sup>e</sup> Congrès international de génie industriel, CIGI'13, la Rochelle : France, 12-14 Juin, 2013.
- [62] B. Baud-Lavigne, B. Agard and B. PENZ, "Environmental constraints in joint product and supply chain design optimization," *Computers & Industrial Engineering*, 76, pp. 16-22, 2014.
- [63] M. Eskandarpour, "Generic models and optimization algorithms for sustainable supply chain network design," Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Nantes, 2014.
- [64] M.C. Chiu and G. Okudan, "An investigation on the impact of product modularity level on supply chain performance metrics: an industrial case study," *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25, pp. 129-145, 2012.
- [65] A. Ramudhin and M.A Benkaddour, "Using Modularization in Supply Chain Network Models," IESM 2007, Beijing – China, 30 Mai au 2 Juin, 2007.
- [66] L.F Monplaisir, B. Nepal and F.O Oluwafemi, "A Multi-Objective Supply Chain Configuration Model for Modular Product Design," *The Journal of the Association of Professional Engineers of Trinidad and Tobago*, 40(1), pp.4-12, 2011.
- [67] J. Lamothe, A. Bonnafé, M. Gorgas, L. Dupont and M. Aldanondo, "Expérimentation d'un modèle de conception d'une famille de produits et de sa chaîne logistique," la 7<sup>e</sup> conférence internationale de modélisation et simulation - MOSIM'08, Paris, France, 31 Mars au 2 Avril 2008.
- [68] R. El-Hadj-Khalaf, B. Agard, B. Penz, "An experimental study of a product and supply chain design problem for mass customization," *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(6), p. 703-716, 2010.