

Conception et pilotage d'une chaîne logistique inverse à plusieurs entités

Mohammed BENNEKROUF^(1,2), Fayçal BELKAID⁽²⁾

(1) Ecole Préparatoire en Sciences et Techniques

(2) Université Abou-bekr Belkaid, Laboratoire MELT
Tlemcen, Algérie
mbenkrouf@yahoo.fr, f_belkaid@yahoo.fr

Abdelkader Neki

Université Cergy Pontoise
Département QLIO
Paris, France
nekiabdel@yahoo.fr

Résumé— Pour se mettre face aux problèmes de récupération des déchets, l'intégration des processus de récupération et de retraitement des produits en fin de vie dans la chaîne logistique de production devient une évidence. En effet en plus de la raréfaction des ressources et la concurrence ardue dans plusieurs secteurs industriels, la vision de la chaîne logistique connue par les trois entités classiques a dépassé ses frontières et doit insérer d'autres noyaux d'entités vertes ou appelées amies de l'environnement. C'est dans ce cadre-là, que nous nous intéressons dans cette étude, à l'optimisation du problème de localisation et d'allocation d'une chaîne logistique bouclée se composant de plusieurs entités dans un environnement stochastique où la quantité et la qualité des produits à retraités sont incertaines. À partir d'un modèle mathématique linéaire en nombre entier conçu, les décisions stratégiques et tactiques résumant les localisations des sites potentielles et les orientations des flux physiques des sous-produits issus du désassemblage sont investiguées. Pour des systèmes de quelques entités, le solveur LINGO12 est utilisé où plusieurs essais de simulation des données puis optimisation sont testés.

Mots clés— Gestion de la chaîne logistique inverse, problème de localisation-allocation, Modélisation mathématique, Simulation et optimisation.

I. INTRODUCTION

Actuellement, la mise en valeur des produits en fin de vie devient une nécessité. La durée de vie des produits devient de plus en plus courte. Les ressources naturelles sont rares et chères pour qu'à la fin le produit fini soit exposé dans un marché de consommation concurrentielle. L'une des tentatives qui reste ouverte pour soulever les différentes visions d'intérêt économique, environnementale et législative, est la récupération des valeurs positives des déchets. Malheureusement, les preneurs de décisions tardent à ce jour de prendre en compte cette étape, en jugeant que le marché inverse n'est pas économiquement rentable. Mais selon les travaux de Sympson la coordination en les noyaux structurels de la chaîne directe en termes de l'information, la collaboration et l'interaction est quasiment absente, empêchant ainsi la réinsertion des composants de valeur dans la production de nouveau produit [1]. En pratique la réussite de telles installations doit être minutieusement investiguée dans une démarche stratégique de conception et pilotage de chaîne

logistique. Comme c'est évoquer dans la littérature, Cette conception du réseau logistique inverse est très complexe et peut grouper en plus des trois entités basic de ce réseau, d'autres entités faisant la jonction avec le réseau direct [2], et d'autres processus faisant réflexion à la logistique verte [3]. Néanmoins on présente dans ce qui suit, une présélection des travaux originaux dédiées au problème de conception et pilotage de chaînes logistiques bouclées. Egalement plusieurs paramètres techniques liés à la structure de chaque chaîne paraissent de façon explicite. Après une synthèse, et en se mettant dans une approche dynamique où la qualité et la quantité des données sont incertaines, modèle générique est présenté où toutes les activités de récupération sont considérées. En premier lieu, une interprétation mathématique du problème en deux niveaux est formulée en entier mixte linéaire. Puis, pour prendre en compte le caractère incertain, plusieurs essais de simulation des données puis optimisation sont investigués. Les résultats concernant le profit net et les taux de récupérations par modules sont interprétés.

II. REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES PROBLEME DE CONCEPTION ET PILOTAGE DES CHAINES LOGISTIQUES BOUCLEES

Avec les exigences très raisonnables concernant l'exploitation des ressources naturelles de façon plus rationnelle, on remarque que dans ces 5 dernières années, les études menées dans la conception et le pilotage des chaînes logistiques directes et inverses à la fois dites bouclées, portent un grand intérêt à l'échelle économique et environnementale [4]

A. Approche déterministe

Parmi les travaux cités dans la littérature, Zhaohua et Jianhua ont présenté un exemple concret pour la récupération des ordinateurs [5]. Aussi, en partant de l'hypothèse que les produits récupérés sont de même qualité que les nouveaux produits, Zhou et al ont développé un modèle regroupant quatre partenaires: clients, centres de distribution, usines et centres de récupération (CRC) [6]. En termes de collaboration, ils adoptent la possibilité de réparer et/ou de refabriquer un produit au niveau d'un CRC. Par ailleurs, Lua *et al.* ont traité la localisation de trois usines (l'usine de production, le centre de remanufacture et le centre intermédiaire) tels que les

Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées, CPI 2015, 2-4 Décembre 2015, Tanger - Maroc.

Xth International Conference on Integrated Design and Production, CPI 2015, December 2-4, 2015, Tangier - Morocco.

activités de nettoyage, de désassemblage, de vérification et de tri sont restreintes au centre intermédiaire [7]. Aussi, pour le retraitement de plusieurs produits, Lee *et al* ont étudié la minimisation des coûts de distribution (transport) et d'ouverture des sites (centres de désassemblage et de traitement) [8]. Vu la complexité du problème, où la chaîne étudiée regroupe trois niveaux, les problèmes d'optimisation ont été gérés par **GA** (Genetic Algorithm) combinés avec de nouveaux opérateurs croisés appelés WMX (Weight Mapping Crossover).

B. Approche dynamique

Quant aux cas dynamiques, Tang et Xie ont présenté un travail motivant destiné à respecter les nouvelles lois de protection de l'environnement [9]. Du fait qu'il est possible d'intégrer un produit où une parcelle de ce produit dans la chaîne globale, leur intérêt s'est manifesté sur l'optimisation des coûts opérationnels liés à la réparation des produits retournés par les clients. Pour cela, ils ont conçu une chaîne à quatre entités : (client, centre de collecte, centre de réparation et usine) dotée de la possibilité de transmettre un produit du client vers l'usine ainsi que le choix d'ouverture ou la fermeture périodique des centres de réparation et de collecte.

Par ailleurs, Min *et al.* ont traité un problème de conception et pilotage d'un réseau logistique de à deux échelons. Par le bien de chercher les localisations optimales des sites potentiels (centres de collections et **CRC**), ils ont minimisé les distances et les coûts (inventaire, location, manutention, installation et transport). L'avantage remarqué dans leurs modèle est l'insertion du temps en tant qu'une variable dans la fonction objectif, et ceci dans le but de quantifier les temps d'opérations et les périodes de collecte.

Aussi, malgré l'importance économique qu'apporte la réparation des produits retournés encore sous garantie, une minorité de travaux ce sont lancés dans l'intégration des sites de réparation dans la logistique de leur chaîne. Néanmoins, une autre étude de Min *et al* tient compte de l'activité de réparation [11]. En se mettant dans un environnement dynamique multi-produits, ils ont conçu une chaîne à trois entités classiques (usine, centre de distribution, client) et le centre de réparation comme une quatrième entité potentielle. Leur travail a conduit à la recherche optimale du nombre de centres de distribution et de réparation, en tenant compte de la coordination entre les clients et les usines. Egalement, le centre de distribution peut devenir un centre de réparation.

Si les performances de la qualité du service client peuvent être investiguées lors de la conception d'un réseau logistique bouclé, Liu et Ni s'intéressent à ce cas dans une approche dynamique, multi produit à capacité limité des sites (usine, centres intermédiaires (*récupération + entrepôt*)) [12]. Afin de fermer la boucle, le flux de retour passe du client vers l'usine via le centre de récupération. Vu la complexité du problème (multi produit, multi période) et pour un service client de qualité, la localisation des centres de récupération et des entrepôts, qu'ils soient anciens ou nouveaux, est assez stratégique et demande un outil de calcul très puissant. C'est ainsi que les auteurs ont développé une nouvelle méta-heuristique dite "Immune Genetic Algorithm", inspirée de la

biologie et qui s'avère plus rapide que les algorithmes génétiques dans le temps d'exécution.

Enfin, pour la chaîne logistique et dans une vision intégrale, également, le choix de fournisseurs reste un élément précurseur pour la durabilité de n'importe quel système d'entreprises. C'est ainsi que S. Hassanzadah et Zhang ont contribué dans l'investigation du problème de choix de fournisseurs dans la logistique durable et verte [13]. Sur le plan technique leur effort s'est manifesté sur la pondération des fournisseurs principaux qui devrait alimenter la chaîne bouclée par la méthode du choix multicritère de Process Analytique Hiérarchique (AHP) combinée avec la logique floue.

C. Approche stochastique

Dans un environnement incertain, l'analyse stochastique du problème de conception et pilotage de chaîne logistique bouclée tend à se rapprocher de la réalité. Notamment, El-sayed *et al* ont développé un modèle à tous les niveaux, stochastique, multi-produit, multi-échelon, logistique directe et inverse, avec considération des capacités des sites où plusieurs liens de flux inverse sont considérés [14]. En s'appuyant sur l'outil d'analyse par scénario (variation du taux des retours), des minimisations des coûts fixes et variables se sont moyennées, pour un profit de récupération avant fabrication.

Egalement Salema *et al.*, ont proposé un travail original cité par plusieurs auteurs traitant l'optimisation de localisation-allocation d'un réseau logistique global dans un environnement incertain de capacités limitées des sites [15] inspiré des travaux Feischmann [16]. Pour visualiser les cas aléatoires, des capacités minimales et maximales ont été supposées pour différentes configurations sélectionnées. Afin de voir la balance de la fiabilité de la demande directe par rapport au flux de retour (satisfaction, non satisfaction), des procédures d'analyse probabiliste par scénario ont été appliquées.

Aussi, un autre cas distinctif de conception du réseau logistique global dans le cas stochastique à plusieurs niveaux développé par, Lee *et al* [17]. La structure de la chaîne étudiée contient une nouvelle entité dite **Hybrid Processing Facility**, dont le rôle est de muter, selon le besoin et la période de la demande, d'un centre de distribution vers un centre de collection ou l'inverse. De plus, dans le cas stochastique, le recours à la représentation vectorielle du modèle devient inévitable où une fonction probabiliste a été ajoutée, pour exprimer à grande échelle les scénarios possibles dépendant des paramètres incertains.

Sachant que les produits **OEM** (Original Equipment Manufacturing) tiennent une grande part de la logistique inverse de récupération, et dans une inspiration que tous les partenaires doivent contribuer au problème de retour **EPR** (Extended Producer Responsibility), Mutha *et al* ont développé un modèle mathématique qui cherche un équilibre entre le volume des produits retournés et les différentes demandes (remanufacture, réutilisation et recyclage) [2]. Quant aux destinations inverses des articles, ils se collectent dans un entrepôt, puis seront amenés vers le centre **RPC**

(*Reprocessing Center*) pour être démantelés en module puis inspectés. Selon l'état du module obtenu, le choix des affectations de flux sera plus clair ; c.à.d du **RPC** : vers les usines de manufacture, ou le marché secondaire (réutilisation sans valeur ajoutée), ou le centre de recyclages ou finalement vers les sites d'enfouissement. Partant d'un objectif de minimiser *les coûts* (de transport, d'opération, d'installation des sites [usine, centre de distribution et **RPC**] et d'inventaire) avec la prise en considération des capacités des sites (entrepôt, **RPC**, centre de recyclage, centre d'enfouissement), les auteurs ont utilisé le logiciel **GAMS** pour l'optimisation du problème en combinaison d'une analyse par scénario concernant le choix de la capacité des **RPC**.

Pour une analyse multi-objectif d'une chaîne logistique bouclée composée de trois échelons dans le sens direct (groupant les entités classiques : fournisseurs, usines, centres de distribution et client) et deux échelons dans le sens inverse (client, centre de collecte et centre d'élimination), Ramzani et al, ont fait une analyse multi-configurationnelle du réseau logistique sachant que leur modèle mathématique est de type MILP comprenant trois fonctions objectives. Leur étude est classée parmi les plus récentes, qui traitent la conception et la planification simultanément avec une certaine robustesse marquée par l'addition de deux autres fonctions objectives. Une fonction cherche l'amélioration du service client et une autre injectée dans le formalisme pour réduire le nombre de la matière première défectueuse provenant des fournisseurs afin de faire croître le niveau de qualité.

Dans l'industrie de métallurgie telle que celle du fer et de l'acier, les déchets des produits que ce soit dans la phase de modelage ou dans la phase de récupération sont importants et doivent être recyclés. C'est dans ce contexte que Vahdani et al ont apporté une connexion harmonieuse entre les deux chaînes opposées [19]. Plusieurs nouveaux concepts sont introduits dans leur étude de conception et pilotage pour une planification plus robuste. Pour le centre de recyclage on distingue des considérations comme : le facteur de file d'attente pour un produit avec probabilité de changement de sa longueur au centre de recyclage ainsi que la variation du taux et de nombre de serveurs de recyclage pour un produit. Par ailleurs, pour une satisfaction totale des zones de la clientèle et sachant que la cadence des retours d'un ou des produits sature parfois les centres de collectes installés allant jusqu'à leur blocage, l'option d'ajouter un centre de collecte d'urgence est réalisable. Pour une meilleure localisation de centres de collections et de recyclages, l'analyse de la robustesse par la variation des données avec une probabilité. Autrement dit, pour un affinement plus intelligent des données, la théorie de logique floue multi-objective de Torabi et Hassine est appliquée. L'optimisation et la simulation du problème est résolue à l'aide du solveur GAMS [20].

D. Analyse et position du problème

D'après les travaux relatés, les approches de modélisation mathématique en entier mixte ont montré leurs fruits d'utilisation dans beaucoup de cas génériques ainsi que pratiques. A partir de la synthèse d'analyse structurelle et technique des travaux, et dans une tentative de faire une

liaison entre la chaîne directe et inverse avec une vision plus réaliste, nous sommes arrivés à concevoir un modèle de trois échelons portant de conception et pilotage d'une chaîne logistique bouclée. Comme hypothèse, l'étape de la collecte se manifeste en flux poussé tandis que les étapes de récupération s'acheminent vers les différentes entités se trouvant en aval de la collecte en flux tendu. Ces deux considérations sont respectées pour avoir plus de réflexe et ainsi de coordination au niveau des planifications à court, moyen et long termes. De plus, si on réfère dans le cas d'étude du problème de récupération où l'intervention de la main d'œuvre humaine qualifiée est importante et indispensable. Ce travail fait l'objet de cette pratique qui peut servir la récupération d'articles d'électroménager, de bureautique, de mécanique etc. Aussi notre travail fait l'objet d'une démarche de récupération d'un produit lorsque leur désassemblage en module a plus de valeur et de visibilité. Les cas d'application sont si nombreux à l'égard des bateaux, avions, camions et tout article non homogène en grande quantité et ayant beaucoup de valeurs de récupération après son désassemblage.

Notons de plus, plusieurs perspectives socioprofessionnelle, environnementale et durable sont présentées dans ces approches dans un contexte dynamique, stochastique à capacité limitée.

III. CONCEPTION ET PILOTAGE DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE BOUCLEE

A. Description du problème

Cette partie est consacrée à l'étude de la conception et pilotage d'une chaîne logistique bouclée à plusieurs échelons impliquant les processus de recyclage, de retraitement et d'élimination dans une approche de logistique verte pour un seul type de classe de produits.

Le but de cette étude est de localiser les centres de collecte/désassemblage et de refabrication où les entités compléments de la chaîne fermée, sont déjà localisées. L'application de cette étude est dédiée à la récupération d'une classe de produit par module. Parmi ces modules, certains nécessitent un traitement plutôt technique au lieu de leurs éliminations brutales qui peuvent aussi engendrer une pollution. Comme application, ceci est très favorable dans la chaîne logistique moderne où le processus de remanufacture tient une partie importante.

Au niveau de l'approvisionnement du produit, les liens de transport se manifestent dans la première étape des points de collecte vers les centres de collectes/désassemblages. Après le test de qualité et selon la demande pour une offre fréquemment inférieure, les produits qui peuvent être encore utilisés sont vendus dans le marché secondaire. Une fois que le produit en entier est désassemblé en module, chaque module est destiné à son centre de traitement le plus approprié. Les modules recyclables sont expédiés vers les centres de recyclage. Pour les modules qui nécessitent de la remise à neuf ou un traitement technique, ils sont dépêchés vers les fournisseurs via les centres de retraitement. Et pour les

modules sans valeurs, ils sont envoyés vers la déchèterie (enfouissement ou incinération). (Voir figure III-2)

Comme l'investissement des centres de remanufacture nécessite une volonté et une collaboration des trois partenaires responsables, ces installations sont progressives pendant plusieurs années. De ce fait, cela induit certainement des cas de l'incapacité de traiter tous les modules récupérables au centre de retraitement, et par conséquent, l'excédant des modules sera envoyé vers le centre d'élimination. Pour voir l'effet du coût de retraitement par module un coefficient d'évaluation de la qualité est inséré dans la modélisation et la simulation. D'autre part, pour évaluer le caractère incertain des quantités retournées au point de collection pendant les différents périodes, ces grandeurs sont variées aléatoirement entre une borne minimale et maximale au cours de la simulation

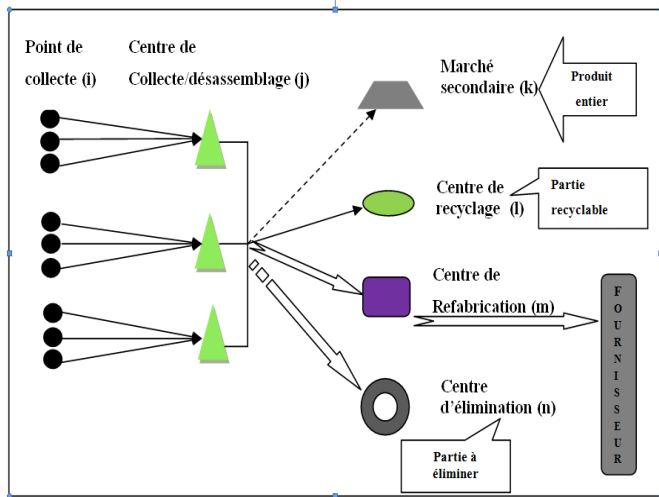


Fig. 1. Structure de la chaîne bouclée

Sur le plan technique, l'optimisation du problème subdivisé en deux modèles, permet de définir respectivement les meilleures localisations des centres collection/désassemblage et de retraitement. Aussi pour approcher les deux décisions stratégique et tactique, en plus des modèles déjà cités, on a considéré deux types de charges de retraitement des modules. Le premier type est relatif à une charge totale en volume de temps de travail dédié à certains types de modules qui ont une charge élémentaire de retraitement. Cependant, le deuxième type de charge est restreint à une capacité typique de retraitement qui est spécifique à un seul module. En effet, ceci reflète la réalité de l'ordonnement dans les ateliers ou certains ateliers peuvent traiter plusieurs produits, alors que d'autres ne traitent qu'un seul module.

B. Hypothèses prédéfinies du problème

Certaines hypothèses de simplification et d'explication sont postulées comme suit :

- ✓ Les entités: point de collecte, centres de recyclage, centre d'élimination sont déjà localisés.

- ✓ Pour alléger la formulation mathématique du modèle, on décrit uniquement les modules de remanufacture.
- ✓ Les modules de recyclage sont présentés par une partie de recyclage dédiée aux amas de recyclage.
- ✓ La distance de lien entre deux entités est euclidienne.
- ✓ Le centre de remanufacture installé a la possibilité d'éliminer les modules de remise à neuf défectueux et irréparables.
- ✓ Les coûts fixes et opérationnels sont supposés invariables durant l'horizon de planification
- ✓ La demande des fournisseurs en module est inférieure à la quantité réparée de même module au centre de remanufacture.
- ✓ La fraction de la qualité d'un module dédié à la remanufacture est variée aléatoirement entre de bornes.

C. Formulation mathématique du problème

La structure de la chaîne conçue est divisée en deux sous niveaux. Le premier niveau représente la première barrière de la collecte qui fait : la collecte, le contrôle de la qualité du produit en entier, le désassemblage en module, le test de chaque module destiné à la refabrication. Après le désassemblage en module les destinations des flux seront dédiées par type c.à.d soit pour le recyclage ou la refabrication ou bien l'élimination. Afin de voir l'effet de l'investissement progressif sur les taux de récupération des modules valables pour la refabrication (techniquement appelé remise à neuf), l'approche de modélisation proposé est de type P median.

Nombreux paramètres sont insérés dans le modèle $CPLL$. Des coûts fixes liés à l'ouverture de centres de refabrication. Des coûts variables comprennent les frais de transport, frais d'exploitation et des bénéfices sur le marché secondaire, les centres de recyclage et les fournisseurs à travers des centres de remanufactures. Pour interpréter les effets néfastes de l'élimination des coûts de pénalité suite à l'élimination des modules irrécupérables et récupérables (mais que les usines installées ne couvrent pas la totalité des modules) sont considérés.

Les ensembles et indices utilisés dans ce modèle sont comme suit :

$i \in I$, indice des points de collecte, (qui peuvent être les consommateurs ou les détaillants),

$j \in J$, indice des sites potentiels des centres de collecte et désassemblage,

$k \in K$, indice des centres de gravité des amas des centres de recyclage,

$l \in L$, indice des centres d'élimination,

$m \in M$, indice des sites potentiels des centres de refabrication,

$n \in N$, indice des sites potentiels des fournisseurs,

$o \in O$, indice des marchés secondaires,

$r \in R$, indice des modules dédiés à la refabrication,

$t \in T$, indice des périodes de temps,

Les paramètres, les variables et la formulation mathématique du problème sont définis explicitement dans ce qui suit :

Problème de localisation et d'allocation du premier niveau

Paramètres du premier niveau

- S : volume moyen du produit en m^3 ,
 W : poids moyen du produit en kg ,
 FS_j : coût fixe d'installation d'un centre de collecte au site j ,
 Fop_j^t : coûts fixes pour le fonctionnement d'un centre de collecte j pendant la période t ,
 Cap_j^{\min} : capacité minimale du centre de collecte j ,
 Cap_j^{\max} : capacité maximale du centre de collecte j ,
 Q_{pi}^t : quantité réelle de produits disponible au point de collecte/désassemblage i durant la période t ,
 $Q_{\max, pi}^t$: quantité maximale de produits pouvant être collectés et désassemblés au point de collecte/désassemblage i en période t ,
 d_{ij} : distance entre le point de collecte i et le centre de collecte/désassemblage j en km,
 α_1 : coût de transport par km et par kg dans le premier niveau,
 Opc : coût opérationnel associé au désassemblage du produit,

Modèle de location-allocation du premier niveau

Respectivement les variables représentant le choix de site j et les affectations formant le premier lien de la chaîne sont notées par :

$X_j = 1$, si un centre de collecte est mis en place au site j de façon permanente pour toutes les périodes t , 0, si non,
 $Y_{ij} = 1$, si le point de collecte i est assigné de façon permanente au centre de collecte j pour toutes les périodes t , 0, si non,
L'objectif du sous problème 1 est de minimiser la fonction objectif Z_1 tel que :

$$Z_1 = \sum_j (F \cos t_j + Fop_j^t) X_j + \sum_i \sum_j (Opc + \alpha_1 W d_{ij}) Y_{ij} Q_{\max, i}^t \quad (1)$$

Sous les contraintes:

$$\sum_j Y_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (2)$$

$$Y_{ij} \leq X_j, \forall i \in I \ \& \ \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_i Q_{\max, i}^t S Y_{ij} \leq Cap_j^{\max} X_j, \forall j \in J \ \& \ \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_i Q_{\max, i}^t S Y_{ij} \geq Cap_j^{\min} X_j, \forall j \in J \ \& \ \forall t \in T \quad (5)$$

$$X_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \quad (6)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I \ \& \ \forall j \in J \quad (7)$$

La fonction objectif Z_1 minimise les coûts fixes d'ouverture et de fonctionnement des centres de collectes et les coûts variables de transport, et de désassemblage. L'ensemble des contraintes (2) assurent que chaque point i de collecte est connecté à un seul centre de collecte j . Les contraintes (3) assignent la connexion du point de collecte i au centre de collecte j au cas où ce dernier est ouvert. Les inégalités (4, 5) sont des contraintes de capacité. Les contraintes (6,7) imposent des conditions de binarité.

Par ailleurs, afin d'éviter le problème de sous dimensionnement lié à la capacité globale de stockage en fonction du nombre de centres de collecte à ouvrir, au cours de calcul le maximum sur toutes les périodes de la quantité $\sum_p \sum_i Q_{\max, i}^t S$ est utilisé. De ce fait, si la variable de décision X_j doit être égale à 1, le centre de collecte j restera ouvert sur tout l'horizon de la planification. Aussi pour passer au deuxième niveau, on définit le résultat dans l'équation (8). La quantité V_j^t est le volume réel de la classe des produits p collectée à partir des points de collecte i et groupées dans le centre de collecte j à la fin de la période t .

(8)

Après que la phase de collection intervienne, une seconde phase durant laquelle les centres de refabrication doivent être localisés pour passer au retraitement. Cela correspond à la période $t=t+1$.

Modèle de localisation et d'allocation p-médian du second niveau

Les paramètres, variables et formulation du problème sont comme suit :

d_{ab} : distance entre entité a et b en km

β : coût de transport par km et par kg

a- Paramètres et variables de décisions liées aux centres de gravité d'amas de recyclage k :

W_k : la masse moyenne de la partie du produit dédiée au recyclage,

M_k : capacité du centre de gravité de l'amas de recyclage k ,

$Pcost_k$: coût moyen de profit relatif à la partie recyclée du produit au centre de gravité de l'amas de recyclage k ,

v_{jk}^{t+1} : volume de la partie du produit destiné au recyclage et transporté du centre de collecte/désassemblage j vers le centre d'amas de recyclage k pendant la période $t = t+1$

b- Paramètres et variables de décisions liées aux centres d'élimination l :

W_l : la masse moyenne de la partie du produit sans valeur dédiée à l'élimination,

M_l : capacité du centre d'élimination l .

$PNcost_l$: coût de pénalité lié à l'élimination de la partie du produit sans valeur au centre d'élimination l ,

v_{jl}^{t+1} : volume de la partie sans valeur dédiée à l'élimination transportée du centre de collecte/désassemblage j vers le centre d'élimination l pendant la période $t = t+1$,

c- Paramètres et variables de décisions liées aux centres de refabrication m:

Après le désassemblage soit une donnée d'entrée V_{rj}^t correspondant à la quantité de modules désassemblés au centre de collecte/désassemblage et valables pour la refabrication pendant la période t . Cette quantité est un multiple de $(*) \times V_j^t$ avec $*$ désignant le nombre de répétition du même module après le désassemblage entier du produit.

W_r : la masse moyenne du module r ,

f_r : la fraction moyenne du module r spécifié par sa bonne qualité et qui peut être vendu au fournisseur n ,

wld_{rm} : charge de travail en unité de temps nécessaire pour le traitement du module r au centre de refabrication m ,

$OPcost_{rm}$: coût opérationnel pour le traitement du module r au centre de refabrication m ,

Wld_{totm} : charge de travail total en unité de temps disponible au centre de refabrication m ,

FS_m : coût fixe d'installation d'un centre de refabrication au site m ,

$PNcost_{rm}$: coût de pénalité lié à l'élimination d'un module de mauvaise qualité r au voisinage du centre de refabrication m (hypothèse d'existence d'un processus d'élimination qui concerne la fraction $(1-f_r)$),

V_{ojm}^{t+1} : volume de modules r caractérisés par leur mauvaise qualité transportés du centre collect/désassemblage j vers le centre de refabrication m puis éliminés au voisinage de ce dernier pendant la période $t+1$,

N_m^{t+1} : nombre de centres de refabrication m ouvert en fonction de l'investissement possible au niveau de la période t ,

$$X_l^{t'} = \begin{cases} 1 & \text{si un centre de refabrication est} \\ & \text{localisé au site } l \text{ pour être ouvert} \\ & \text{dès la période } t' \text{ et aussi pour tous } t'' \geq t' \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

$Open_{a_{rm}}$: variable binaire autorisant le traitement du module r au centre de refabrication m dont la charge de traitement du module r tient une part de la charge totale Wld_{totm} ,

$Open_{b_{rm}}$: variable binaire autorisant le traitement du module r au centre de refabrication m dont la charge de traitement est restreint au module r et tient part de la capacité spécifique M_{rm} ,

M_{rm} : charge totale de travail spécifique au traitement du module r au centre de refabrication m ,

d- Paramètres et variables de décisions liées aux fournisseurs n:

Dem_m^{t+1} : demande unitaire en module r par le fournisseur n pendant la période t ,

$Pcost_{rn}$: coût moyen de profit du module r par le fournisseur n ,

V_{rjmn}^{t+1} : volume de modules r expédiés du centre de collecte/désassemblage j vers le fournisseur n via le centre de refabrication m pendant la période t ,

e- Paramètres et variables de décisions liées à l'élimination des modules r au centre d'élimination l suite à la surcharge des centres de refabrication installés:

Wld_{totl} : charge de travail total en unité de temps disponible au centre d'élimination l dédiée pour l'élimination de l'ensemble de module de refabrication r ,

wld_{rl} : charge de travail en unité de temps nécessaire pour l'élimination du module r au centre d'élimination l ,

$PNcost_{rl}$: coût de pénalité lié à l'élimination d'un module r au centre d'élimination l ,

V_{rjl}^{t+1} : volume de modules r expédié du centre de collecte/désassemblage j pour être éliminés au centre d'élimination l pendant la période t ,

f- Paramètres et variables de décisions liées au marché secondaire o

Dem_o^{t+1} : demande du marché secondaire o du produit en entier pendant la période t .

$Pcost_o$: coût moyen unitaire de profit revenant à la vente du produit en entier au marché secondaire o , (pour le produit en entier le coût de désassemblage est introduit dans cette valeur)

V_{jo}^{t+1} : volume du produit de bonne qualité expédié du centre de collecte/désassemblage j vers le marché secondaire o ,

$fgood_j^{t+1}$: fraction du bon produit testé au centre collecte/désassemblage j durant la période de la collecte t .

Ainsi dans le seconde niveau, le p-médian de localisation allocation consiste à la minimisation d'une variété de coûts insérés dans la fonction objective Z_2 :

$$Z_2 = \sum_t \sum_j \sum_k (\beta W_k d_{jk} + p \cos t_k) V_{jk}^t + \sum_t \sum_j \sum_l (\beta W_l d_{jl} + PN \cos t_l) V_{jl}^t + \sum_t \sum_m FS_m X_m^t + \sum_t \sum_j \sum_m \sum_r (\beta W_r d_{jm} + PN \cos t_m) V_{ojm}^t + \sum_t \sum_j \sum_m \sum_n (\beta W_r (d_{jm} + d_{mn}) + OP \cos t_m + P \cos t_n) V_{ojm}^t + \sum_t \sum_j \sum_l \sum_r (\beta W_r d_{jl} + PN \cos t_{rl}) V_{rjl}^t + \sum_t \sum_j \sum_o (\beta W d_{jo} + p \cos t_o) V_{jo}^t \quad (9)$$

Sous les contraintes

$$\sum_k V_{jk}^t = (1 - fgood_j^t) V_j^t, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_j V_{jk}^t \leq M_k, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_l V_{jl}^t = (1 - fgood_j^t) V_j^t, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (12)$$

$$\sum_j V_{jl}^t \leq M_l, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_o V_{jo}^t = fgood_j^t V_j^t, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_j V_{jo}^t \leq Dem_o^t, \forall o \in O, \forall t \in T \quad (15)$$

$$\sum_m V_{rjm}^0 + \sum_{mm} V_{rjmm}^1 + \sum_l V_{rjl}^t = (1 - f_{good}^t) V_{rj}^t, \forall j \in J, \forall r \in R, \forall t \in T \quad (16)$$

$$\sum_m V_{rjm}^0 + \sum_m \frac{(1-f_r)}{f_r} V_{rjm}^0 + \sum_l V_{rjl}^t = (1 - f_{good}^t) V_{rj}^t, \forall j \in J, \forall r \in R, \forall t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{mm} V_{rjmm}^1 + \sum_{mm} \frac{f_r}{(1-f_r)} V_{rjmm}^1 + \sum_l V_{rjl}^t = (1 - f_{good}^t) V_{rj}^t, \forall j \in J, \forall r \in R, \forall t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{rj} open_{rj} - a_{rm} wld_{rm} V_{rjm}^0 + \sum_{rjn} open_{rjn} - a_{rm} wld_{rm} V_{rjmm}^1 = * Wld_{totm} X_m^t, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (19)$$

$$\sum_j open_j - b_{rm} wld_{rm} V_{rjm}^0 + \sum_{jn} open_{jn} - b_{rm} wld_{rm} V_{rjmm}^1 = * M_{rm} X_m^t, \forall r \in R, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (20)$$

$$\sum_{jm} V_{rjmm}^1 \leq Dem_{rm}^t, \forall r \in R, \forall n \in N \quad (21)$$

$$\sum_{rj} wld_{rj} V_{rjl}^t \leq \delta Wld_{totl}, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (22)$$

$$X_m^t \in \{0,1\}, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (23)$$

$$\sum_m X_m^t = N_m^t, \forall t \in T \quad (24)$$

$$V_{jk}^t \geq 0, V_{jl}^t \geq 0, V_{jmm}^t \geq 0, V_{jmo}^t \geq 0, V_{jo}^t \geq 0, \forall j \in J, \forall K \in K, \forall l \in L, \forall m \in M, \forall n \in N, \forall o \in O, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (25)$$

Les égalités (10, 12) permettent de comptabiliser respectivement le volume en parties de produits dédiés au recyclage et à l'élimination. En complément, les équations (11, 13) assurent les conditions de capacité liées respectivement à l'approvisionnement des flux physiques vers: l'amas de recyclage pour les parties dédiées au recyclage et le centre d'élimination pour les parties sans valeurs et qui doivent être éliminées.

Par ailleurs, la contrainte (14) comptabilise le volume de bon produit existant dans le centre de collecte/désassemblage et la contrainte (15) manage le flux physique restreint au bon produit retourné vers le centre de collecte/désassemblage pour être vendu dans le marché secondaire en vérifiant la balance de la demande.

Au niveau de la logistique de refabrication, l'ensemble de contraintes (16, 17, 18) ajuste la quantité de modules dédiés à la refabrication (fraction de modules de bonne qualité, ou à

l'élimination au centre de refabrication (fraction de module de mauvaise qualité), ou bien à l'élimination au centre d'élimination (suite à l'insuffisance de capacité des centres de retraitement installés). Les inégalités dans les contraintes (19, 20) vérifient les volumes en modules de refabrication tout en respectant les capacités des usines de refabrication installées par rapport à l'unité charge de travail modulaire et le degré d'autorisation de traitement de chaque module. Comme le flux physique pour les modules de refabrication s'achemine des centres de collecte/désassemblage vers les fournisseurs à travers le centre de refabrication, où bien vers le centre d'élimination (suite à l'insuffisance de capacité des centres de retraitement installés), respectivement les équations (21,22) vérifient le non dépassement qui peut paraître soit au niveau de la demande des fournisseurs (pour les modules de bonne qualité) ou bien au niveau de la capacité des centres d'élimination (pour les modules non traités suite à l'incapacité des centres de refabrication installés). La contrainte (23) impose la condition de binarité et la contrainte (24) indique le nombre de centre de refabrication ouvert. Les inégalités (25) garantissent la non négativité des variables de décisions.

N.B:

$\gamma^{t'} = 1$ si un lien est possible entre le centre de collecte/désassemblage et le centre d'élimination à la période t' .

Entre autre, $\gamma^{t'} = 0$ et $=*$ devient \leq si les centres de remanufacture localisés suffisent pour les traitements des tous les modules de valeurs à la période t' .

IV. EXEMPLE NUMERIQUE DE VALIDATION DU MODELE

Dans cette dernière partie, on a étudié une seule classe de produit mais avec une vision plus détaillée puisque l'unité de traitement est en module. Pour le choix d'exemple numérique afin de voir l'intérêt économique et environnemental du modèle proposé, plusieurs données sont générées aléatoirement. En plus des quantités du produit récupéré auprès 20 points de collectes, d'autres variations aléatoires sont considérées au niveau des fractions de bon produit qui peut être revendu dans le marché secondaire en entier. Aussi les qualités des modules destinées à la remanufacture, varient aléatoirement entre des fractions limitées par une borne minimale et maximale. Pour alléger la modélisation et les calculs, les parcelles de produit destinées au recyclage sont vues comme un seul bloc. Pour les parcelles sans valeurs de récupération sont considérées comme un seul bloc aussi. Dans l'hypothèse que les centres de remanufacture installés ne suffisent pas pour traiter tous les modules, l'excès de module de remanufacture pourra être éliminé au centre d'élimination mais avec un coût de pénalité.

A. Génération des données d'entrée du problème

Le benchmark est choisit selon la référence (Thanh et al., 2008), et il est testé sur le solver d'optimisation **LINGO**. Aussi les centres intermédiaires de récupération (centre de

collecte et centre de remanufacture) sont sélectionnés de la même façon que pour les modèles précédents. Idem pour l'horizon d'étude et le nombre de centre de remanufacture à installer durant ce planning.

TABLE I. INTERVALLE DE QUANTITE POSSIBLE DU PRODUIT POUR LES QUATRES SAISONS

Point de collecte i	Automne		hiver		Printemps		Eté	
	Q _{min}	Q _{max}	Q _{min}	Q _{max}	Q _{min}	Q _{max}	Q _{min}	Q _{max}
1	1000	1250	1500	1875	1750	2187,5	2000	2500
2	1500	1800	2250	2700	2625	3150	3000	3600
3	1300	1700	1950	2550	2275	2975	2600	3400
4	1800	2000	2700	3000	3150	3500	3600	4000
5	2000	2200	3000	3300	3500	3850	4000	4400
6	2200	2500	3300	3750	3850	4375	4400	5000
7	2100	2450	3150	3675	3675	4287,5	4200	4900
8	2800	3100	4200	4650	4900	5425	5600	6200
9	3300	3600	4950	5400	5775	6300	6600	7200
10	1200	1500	1800	2250	2100	2625	2400	3000
11	2800	3100	4200	4650	4900	5425	5600	6200
12	2600	3000	3900	4500	4550	5250	5200	6000
13	3000	3250	4500	4875	5250	5687,5	6000	6500
14	3400	3500	5100	5250	5950	6125	6800	7000
15	3600	3800	5400	5700	6300	6650	7200	7600
16	2900	3150	4350	4725	5075	5512,5	5800	6300
17	2700	2950	4050	4425	4725	5162,5	5400	5900
18	3300	3480	4950	5220	5775	6090	6600	6960
19	4000	4350	6000	6525	7000	7612,5	8000	8700
20	1100	1350	1650	2025	1925	2362,5	2200	2700

TABLE II. DONNEES GENEREES DANS LES DEUX NIVEAUX

Masse de produit [kg] W _p	W : 25
Taille du produit [m ³] S _p	S : 0.8
Coût de désassemblage U	OPC: 3.5
Cap _j ^{max} [m ³]: $\frac{Max\ sur\ tous\ les\ period\ (Q\ max\ p\ *)}{\sqrt{nombre\ de\ centre\ de\ collecte\ condit}}$	35292.2482
Cap _j ^{min} [m ³]: 0.8 * Cap _j ^{max}	28233.798
Fcost _j [MU]: aléatoire [100,110]* $\sqrt{Cap_{j}^{max}}$	17659.05731
Fop _j ⁱ [MU]: aléatoire [10,20]* $\sqrt{Cap_{j}^{max, i}}$	Automne : 7722.95 Hiver: 6688.27 printemps: 7224.15 Eté: 7722.95
Centre de remanufacture m	
FS _m : 601883.333 U	PNcost _{1m} + OPCost _{1m} : 13 U pour tous r et m
f ₁ : aléatoire [45,55] % f ₂ : aléatoire [40,50] % f ₃ : aléatoire [65,75] % f ₄ : aléatoire [30,40] %	W ₁ : 2 [MU] wld _{1m} : 25 U W ₂ : 3 [MU] wld _{2m} : 30 U W ₃ : 4.5 [MU] wld _{3m} : 15 U W ₄ : 5 [MU] wld _{4m} : 18 U
Wld _{totm} : 1059500	OPcost _{1m} + Pcost _{1m} : -100 OPcost _{2m} + Pcost _{2m} : -80 OPcost _{3m} + Pcost _{3m} : -70 OPcost _{4m} + Pcost _{4m} : -180 Pour tous m et n

pour tous m	M _{rm} :			
Open _{b_{rm}} :	0	0	0	0
0 0 0 0	0	0	0	0
0 0 0 0	0	0	0	0
0 0 0 0	319800	319800	319800	319800
1 1 1 1				
Open _{a_{rm}} :				
1 1 1 1				
1 1 1 1				
1 1 1 1				
0 0 0 0				
Marché secondaire O				
Dem _o ^{t'} : 80000 U quelque soit o et t'				
fgood _j ^{t+1} : aléatoire [10,20] % quelque soit o et t'				
Pcost _o : -23 U				
Centre de recyclage k				
Wk: 8	M _k : 60000	Pcost _k : -6		
Centre d'élimination l quelque soit l				
Wl: 5	Wld _{totl} : 1200000	M _l : 60000		
wld _{nl} : 11	PNcost _l : 7	PNcost _{nl} : 11		
Fournisseur n				
Dem _m ^{t+1} : 250000 pour tous r et n				

Le réseau proposé regroupe 20 points de collecte, 6 centres de collecte/désassemblage candidat, 4 centres de remanufacture candidat, deux marchés secondaires, 3 centres de recyclage, 3 centres d'éliminations et deux fournisseurs. Les données d'entrées pour les deux niveaux sont groupées dans les tableaux I et II.

B. Interprétation des résultats

Les décisions de localisation des centres de récupération intermédiaires sont présentées dans la figure ci-dessus. Les positions des entités sont générées aléatoirement sur une surface carrée de 1200 km de côté. La structure géographique de la chaîne logistique fermée regroupe huit différentes entités à savoir : 20 points de collecte, 6 centres de collectes, trois amas de recyclage (de grande capacité) présentés par leurs centres de gravité sur la figure, trois centres d'élimination (de grande capacité), deux marchés secondaires (la demande est supposée supérieure à l'offre pour toutes les périodes), deux fournisseurs (la demande est supposée supérieure à l'offre pour toutes les périodes) et quatre centre de refabrication avec une politique d'installer trois centres sur l'horizon de trois ans. Les flèches noires montrent les affectations permanentes des points de collecte aux centres de collecte. Parmi les 6 centres de collectes candidats, seulement trois sont ouverts sur tout le planning d'étude avec un taux d'occupation de plus de 80% pendant la période d'été. Respectivement, les ouvertures annuelles des centres de remanufacture sont 1RC en première année, puis 1RC et 2RC en deuxième année. Enfin en troisième année les centres 1RC, 2RC est 3RC sont en marche. Pour un choix robuste des centres de refabrication, des tests de génération des données aléatoires sont effectués pour trois variables entre deux bornes limites. Ceci est mentionné respectivement dans le tableau I pour les quantités collectées aux points de collecte et le tableau II pour les fractions de bon produit ainsi que les fractions de bons modules. Evidemment,

les modules arrivant au centre de refabrication et évalués comme mauvais et non récupérables sont éliminés dans ce centre de retraitement. Pour un nombre de répétition de 20 fois dont les données instables citées sont introduites de façon aléatoire suivant une loi de distribution uniforme avec la même probabilité, des moyennes des taux de récupération de bons modules par rapport aux mauvais modules sont présentés dans le tableau III. Suivant la balance du coût négatif de profit de chaque module par rapport à ces coûts positifs de transport et de fonctionnement, l'avantage est donné en priorité au module 4, puis au module 1, ensuite au module 2 et enfin au module 3 sur toutes les périodes. Mais comme la fraction du module 1 est faible par rapport à celle du module 4 en terme de bon module, la récupération totale du module 1 est atteinte quand deux centres de remanufacture sont ouverts pour toutes les périodes. Aussi, comme le processus dédié au traitement du module 4 est indépendant d'autres modules (voir $Open_{b_{mm}}$ et M_{mm} dans le tableau II) les capacités disponibles M_{4m} ne suffisent pas pour une récupération totale de ce module durant les saisons (2-3-4).

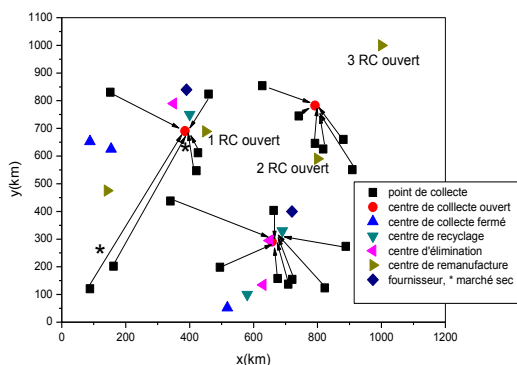


Fig. 2. Plan de localisation des centres intermédiaires

TABLE III. TAUX DE RECUPERATION DES MODULES VALABLES LA REUTILISATION ALLOUES AU FOURNISSEURS

<i>Taux de récupération par module alloués au fournisseur en % 1 seule centre de refabrication ouvert</i>				
	Automne	Hiver	printemps	Eté
Module 1	0,492 ± 0,030	0,353 ± 0,057	0,291 ± 0,064	0,262 ± 0,023
Module 2	0,029 ± 0,029	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000
Module 3	0,020 ± 0,020	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000
Module 4	0,297 ± 0,021	0,195 ± 0,023	0,167 ± 0,035	0,143 ± 0,007
<i>Taux de récupération par module alloués au fournisseur en % 2 centres de refabrication ouverts</i>				
	Automne	Hiver	printemps	Eté
Module 1	0,492 ± 0,030	0,504 ± 0,055	0,484 ± 0,070	0,501 ± 0,045
Module 2	0,414 ± 0,195	0,122 ± 0,122	0,103 ± 0,103	0,022 ± 0,012
Module 3	0,160 ± 0,150	0,134 ± 0,132	0,140 ± 0,053	0,019 ± 0,019
Module 4	0,595 ± 0,041	0,389 ± 0,045	0,334 ± 0,070	0,286 ± 0,013

<i>Taux de récupération par module alloués au fournisseur en % 3 centres de refabrication ouverts</i>				
	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Module 1	0,492 ± 0,030	0,504 ± 0,055	0,484 ± 0,070	0,501 ± 0,045
Module 2	0,552 ± 0,040	0,341 ± 0,192	0,222 ± 0,339	0,151 ± 0,153
Module 3	0,294 ± 0,040	0,202 ± 0,175	0,165 ± 0,350	0,134 ± 0,174
Module 4	0,684 ± 0,065	0,584 ± 0,068	0,501 ± 0,104	0,430 ± 0,020

Enfin les modules 2 et 3 prennent une lenteur dans leur traitement aux centres de remanufactures du fait que leurs transports vers ces derniers centres sont quasiment faibles durant les saisons (2-3-4) et pour tous les scénarios suite à l'occupation de chaque centre de refabrication dans le traitement du module 1. Une analyse économique de cet exemple numérique est valorisée pour l'estimation du coût global d'investissement par scénario présenté dans le Tableau IV. Nous constatons qu'un net bénéfice apparaît dès la première installation du centre de refabrication qui est associé au renforcement des liens entre la chaîne inverse et le marché secondaire. Puisque le coût de profit autant qu'un produit récupéré au marché secondaire ou bien qu'un module vendu au fournisseur, est important, l'évaluation de la valeur économique d'un produit est directement proportionnelle au nombre de centres de remanufacture ouverts. Aussi, nous remarquons que les écarts de fluctuations des résultats sont importantes et peuvent atteindre 200 % dans le premier scénario pour diminuer jusqu'à moins de 20% dans le dernier scénario. En effet, cette diminution est expliquée par la fraction indirecte sur le nombre de centres de remanufacture ouverts aux niveaux des trois variables d'incertain considérées dans cet exemple à savoir : le nombre de bon produit, le nombre de bon module et le nombre de produit collectés au centre de collecte.

Aussi nous pouvons distinguer les observations suivantes:

- ✓ Le calcul des moyennes des résultats associées à leurs intervalles d'erreurs converge vers une certaine stabilité au niveau de la variation des résultats.
- ✓ Pour des cas similaires à cette étude, dans le problème de récupération des déchets de valeur avec l'incertain, la gestion de la chaîne peut être managée avec beaucoup moins de risque.
- ✓ Pour des systèmes de grandes tailles, les écarts des erreurs deviennent de plus en plus faibles quand le nombre de sites augmentent.
- ✓ L'évaluation des prévisions sur les taux et les coûts de récupération peut être accomplie avec une certaine robustesse, surtout dans le cas d'une grande taille de chaîne même si l'écart de la largeur des variations des grandeurs remarquées par leur incertitude est spacieux.

TABLE IV. COUT GLOBAL D'INVESTISSEMENT ET LE COUT MOYEN UNITAIRE D'UN PRODUIT

Coût globale d'investissement			
	1 C. refabricatoïn	2 C. refabricatoïn	3 C. refabricatoïn
Aut	-2035648 ±284033	-5497587 ±578857	-6728081 ±783885
Hiv	-1139177 ± 572048	-4810776 ±748298	-8202529 ±882755
Prin	-578764 ±956972	-4289750 ±1335598	-7640504 ±1488219
Eté	-143473 ±246379	-4015521 ±467527	-7391321 ±396248
An	-3897062 ± 956972	-18613634 ±1335598	-29962436±1488219
Coût moyen unitaire d'un produit			
	1 C. refabricatoïn	2 C. refabricatoïn	3 C. refabricatoïn
Aut	-39,556 ± 5,415	-106,822 ±10,993	-130,738 ±14,909
Hiv	-14,800 ± 7,320	-62,528 ±9,288	-106,618 ±10,736
Prin	-6,434 ± 10,667	-47,713 ±14,796	-84,987 ±16,412
Eté	-1,396 ± 2,413	-39,078 ±4,552	-71,935 ±3,757
An	-17,228 ± 10,667	-65,168 ±14,796	132,456 ±16,412

V. CONCLUSION

Dans cette dernière partie de notre travail, nous avons présenté trois exemples numériques d'optimisation itérative pour atteindre de meilleures robustesses des résultats. Sachant que les quantités des produits retournées et les paramètres d'évaluation des qualités ne sont pas stables, nous avons réussi à estimer les prévisions d'évaluation des paramètres économiques et environnementaux en fonction des scénarios des investissements possibles. Le choix de la localisation permanente des sites intermédiaires de récupération, affecte indirectement leurs fonctionnements optimaux plutôt qu'économique non visible dans la modélisation. Même si ce choix nous ne semble pas optimal sur le plan de calcul mais indirectement les facteurs sociaux et de la qualification de la main d'œuvre sont respectés. Néanmoins pour un cas réel d'étude dotée d'un benchmark plus visible et structuré sur une zone de grande taille et groupant un nombre important d'entités apportera plus de stabilité des résultats. Du plus, la mise en place d'une plateforme de modélisation et optimisation dynamique d'un modèle fragmenté en sous modèle représente notre challenge. Enfin pour avoir plus de flexibilité sur la dynamique du système, nous prévoyons la mise en œuvre d'une heuristique pour l'hybridation de la simulation et l'optimisation.

Références

- [1] D. Sympson, Use of supply relationships to recycle secondary materials, *International Journal of Production Research*, p. 1-23. (2008).
- [2] M. Bennekrouf, L. Benyoucef. et Z. Sari , Problème de conception et pilotage des chaînes logistiques inverses et globales : un état de l'art, *MOSIM* (2010).
- [3] S. K. Srivastava, Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review, *International Journal of Management Reviews* . vol 9 (1), p.53-80. (2007).
- [4] S. Pokharel et A. Mutha, Strategic design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules, *Computers and Industrial Engineering*, 56(1), 2009, pp.334-346.
- [5] W. Zhaohua, Y. Jianhua. Y. Modeling for Facility Location Optimization of Spent Computer's Reverse Logistics, *IEEE Forth International Conference on Wireless Communication, Networking and Mobil Computing* (2009).
- [6] Y. Zhou et S. Wang, Generic model of reverse logistics network design, *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, vol 8 (3), p.71-78.(2008)
- [7] Z. Lua et N. Bostel, A facility location model for logistics systems including reverse flows: the case of remanufacturing activities, *Computers & Operations Research*, Vol34, p. 299-323.(2007)
- [8] J-E. Lee, M. Gen et K-G. Rhee K-G, Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm, *Computers and Industrial Engineering*. vol 56 (3), p.951-954. (2009).
- [9] (2008)
- [10] Q. Tang. Q et F. Xie, A Genetic Algorithm for Reverse Logistic Network Design, *IEEE Third International Conference on Naturel Computation*(2007)
- [11] H. Min. H et Y-J. Ko, The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers, *International Journal in Production and Economics*, Vol113, p. 176-192(2008).
- [12] H. Min. H. Ko. H. J et C.S. Ko, A genetic Algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns, *The International Journal of Management Science, Omega*, vol34, p. 56-69.(2006)
- [13] J. Liu. J et J. Ni, A hybrid Immune Genetic Algorithm approach to optimize the integrated forward/reverse logistics network for 3 PLs, *IEEE Third International Conference on Natural Computation*.(2007)
- [14] A. SamanHassanzadeh et G.Zhang, An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi objective approach, *Expert Systems with Applications Volume 39*(8), p. 6782-6791. (2012)
- [15] M. El-Sayed, N. Afia. Et H. Al-Kharbotly, A stochastic model for forward-revere logistics Network design under risk, *Computers and Industrial Engineering*. vol 58 (3), p. 423-431. (2007).
- [16] M.I.G. Salema, A.P. Barbosa-Povoa et Q.N. Augusto, Simultaneous design and planning of supply chain with reverse flows: A generic modelling framework, *European Journal of Operational Research, Volume 203* (2), P 336-349.(2010).
- [17] M. Fleischmann, The impact of product recovery on logistics network design, *Production and Operations Management*, vol 10, p.156-173. (2011).
- [18] M. Ramezani, M. Baschiri, et R. Tavakkoli-Moghaddam, A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain environment. *Int J Adv Manuf Technol* 66(5):825-843. (2010)
- [19] B. Vahdani., M. Tavakkoli, R. Modarres et A. Baboli, Reliable design of forward/reverse logistics network under uncertainty: A robust - M/M/c queuing model, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* Volume 48,(6), P. 1152-1168. (2012).
- [20] S.A. Torabi et E. Hassini. E, An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning, *Fuzzy set and systems*, vol(159), p.193-214.(2008).