

AIDE A LA DECISION POUR LA CONCEPTION D'UNE CHAINE LOGISTIQUE INVERSE POUR L'ALUMINIUM

Joanna DAABOUI*, Julien LEDUIGOU**, Diana PENCIUC***, Benoit EYNARD****

Résumé. - La logistique inverse intéresse depuis récemment les entreprises afin d'atteindre un certain niveau de durabilité et d'écologie parfois imposé par des législations. La logistique inverse concerne toutes les activités qui interviennent directement ou indirectement pour déplacer le produit en fin de vie au début de sa chaîne logistique. Dans cet article, nous proposons une méthodologie pour la conception d'une logistique inverse. Nous présentons aussi un cas d'étude dans le cadre du projet européen Suplight. Ce projet vise à développer ou identifier les outils et méthodes nécessaires pour produire des pièces pour l'automobile et l'aéronautique en utilisant 75% d'aluminium recyclé. L'utilisation d'aluminium pour ces pièces permet de réduire leur poids, et l'utilisation d'aluminium recyclé permet d'être plus efficient d'un point de vue environnemental. L'enjeu est de concevoir une logistique inverse permettant de récupérer l'aluminium recyclé ayant une composition chimique adéquate pour la production des pièces de structure aéronautiques ou automobiles.

Mots-clés: Logistique inverse; Analyse du cycle de vie; Durabilité; Aluminium.

* Maître de conférences, Université de Technologie de Compiègne, Centre PierreGuillaumat, BP60319- rue du DocteurSchweitzer, 60203 Compiègne Cedex, joanna.daaboul@utc.fr.

- ** Enseignant-Chercheur, Université de Technologie de Compiègne, Centre PierreGuillaumat, BP60319- rue du DocteurSchweitzer, 60203 Compiègne Cedex, julien.le-duigou@utc.fr.

- *** Post Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, Centre PierreGuillaumat, BP60319- rue du DocteurSchweitzer, 60203 Compiègne Cedex, diana.penciuc@utc.fr.

- **** Enseignant-Chercheur, Université de Technologie de Compiègne, Centre PierreGuillaumat, BP60319- rue du DocteurSchweitzer, 60203 Compiègne Cedex, benoit.eynard@utc.fr.

1. Introduction

Dans l'optique d'un monde plus durable, les entreprises comme celles de l'industrie aéronautique et automobile sont très intéressées par les composants légers permettant la réduction du poids total du produit. Une des solutions est l'utilisation de l'aluminium qui offre des alliages à haut potentiel pour la réduction du poids de pièces de structure. Néanmoins, la production d'aluminium vierge est très consommatrice d'énergie. Par conséquent, et dans le projet SuPLight, nous nous intéressons à l'aluminium recyclé. Le but de ce projet est de proposer de nouveaux modèles industriels pour la production de solutions légères formées de 75% d'aluminium recyclé dont l'alliage ait les caractéristiques nécessaires aux pièces structurelles cibles. Dans cet article, nous abordons la question de la conception de la logistique inverse afin d'assurer le volume et la qualité nécessaire pour la production des bras inférieurs avant de voiture (Front Lower Control Arms (FLCA)) en aluminium recyclé. Dans ce cas d'étude, nous nous intéressons à la conception de la logistique inverse ayant les caractéristiques suivantes:

1. Le réseau de la logistique inverse doit être respectueux de l'environnement autant que possible.
2. Les différentes installations (lieux de collecte, usines de recyclage, usines de remise à neuf, etc.) ne sont pas nécessairement détenues par une seule entreprise.
3. Le flux inverse dispose de sources diverses.

La logistique inverse est définie comme « le processus de planification, de mise en œuvre et de contrôle de la circulation efficace et rentable des matières premières, en cours de fabrication, des produits finis et des informations connexes du point de consommation au point d'origine dans le but de récupérer de la valeur ou de mise correcte au rebut» (Rogers et TibbenLembke, 2001). Ses principaux facilitateurs sont les législations et les directives, la sensibilisation des consommateurs, les responsabilités sociales envers l'environnement (Ferrer et Ayres, 2000; Bloemhof et van Nunen, 2005; Ravi et Shankar 2005; Castell et al, 2004) et l'intérêt économique (Dupont et Lauras, 2007).

Dans la littérature, la plupart des auteurs, y compris Giuntini et Andel (1995), Rogers et Tibben-Lembke (1998), Schwartz (2000), et Dupont et Lauras (2007), proposent une logistique inverse formée de quatre grandes étapes: filtrage, collecte, tri et traitement (recyclage, remise à neuf, revente, mise au rebut, etc.). Dupont et Lauras ajoutent une 5ème étape : le système d'expédition. Ainsi concevoir une logistique inverse comprend la conception de toutes ses étapes.

Dans ce qui suit, nous résumons dans la section II les recherches antérieures sur la conception d'une logistique inverse. Dans la section III nous décrivons la méthodologie proposée pour concevoir une chaîne logistique inverse, puis nous décrivons le cas d'étude en section IV. Enfin nous décrivons les travaux futurs tout en concluant l'article en section V.

2. Etat de l'art sur la logistique inverse

2.1 Conception de la chaîne logistique inverse

La plupart des recherches en logistique inverse ne se concentre que sur une petite partie de ses systèmes tels que :

- la distribution, le contrôle des stocks et la planification de la production,
- le transport et l'emballage (Carter et Ellram, 1998),
- les interactions entre la durabilité et les chaînes logistiques en tenant compte des questions environnementales concernant la conception des produits, l'extension de vie du produit et la récupération des produits en fin de vie (Linton et al., 2007),
- la gestion de la récupération du flux inverse (Chaves et Pache, 2008), la gestion de la production et de l'inventaire et la gestion de la chaîne logistique (Rubio et al., 2008),
- l'acquisition des produits, la collecte des produits usagés, la structure du réseau de la logistique inverse vis-à-vis de la localisation des usines dédiées à la remise à neuf (Pokharel et Mutha, 2009).

En ce qui concerne la conception d'une logistique inverse, les travaux de recherche se focalisent surtout sur la localisation des points de collection, et des usines de recyclage ou de la remise à neuf en maximisant les profits via des modèles de programmation mathématiques. Certains travaux proposent également de comparer des scénarios possibles d'une logistique inverse. Par exemple, une simulation à événements discrets a été utilisée pour comparer différents scénarios possibles d'une logistique inverse de voitures au Mexique (Cruz-Rivera et Ertel, 2009).

Généralement, un modèle de programmation linéaire (Mixed-Integer Linear Programming) est généré afin de définir les emplacements optimaux des points de collecte et des usines de recyclage (Ramezani et al., 2013). Après une analyse de la littérature sur la conception d'une chaîne logistique inverse, nous avons conclu ce qui suit:

La littérature présente trois grands types de réseaux: logistique avant (Forward Logistics), logistique inverse (Reverse Logistics) et la combinaison des deux chaînes (Ramezani et al., 2013). Dans cet article nous ne considérons que le réseau de la logistique inverse.

Le critère de décision le plus considéré est le coût total du réseau (Listes et al., 2005 ; Min et al., 2006 ; Üster et al., 2007 ; Demirel et Cökçen, 2008; Pishvae et al., 2010), suivi par le niveau de service (Du et Evans, 2008), et le profit généré (Ramezani et al., 2013). Dans notre cas, nous sommes intéressés non seulement par le coût total du réseau, mais aussi par son impact environnemental comme critère de décision principal. Par conséquent, les processus de remise à neuf et de recyclage impactent la performance environnementale du réseau et doivent donc être pris en considération dans l'analyse.

Les principales décisions des modèles existants dans la littérature sont les suivants: emplacement/répartition des usines et points de collecte et coût du réseau de transport (Listes et al., 2005 ; Min et al., 2006 ; Oster et al., 2007 ; Du et Evans, 2008 ; Demirel et Cökçen, 2008 ; Pishvae et al., 2010). La plupart des travaux de la littérature considèrent le problème de conception du réseau en estimant que les points de collecte, de tri et de traitement sont tous détenus par une seule et unique entreprise qui collecte le flux inverse et le réutilise. Mais dans de nombreux cas, la logistique inverse ne comprend pas seulement des installations détenues par l'entreprise elle-même, mais aussi des installations appartenant à d'autres partenaires. Dans ce cas, la conception du meilleur réseau de logistique inverse se compose de deux principaux problèmes: le choix des partenaires et l'optimisation de l'ensemble du réseau formé des installations détenues par les différents partenaires. De plus la logistique inverse fait partie des chaînes d'approvisionnement écologiques (Green Supply Chain) et puisque nous nous intéressons à la performance environnementale du réseau, le choix des partenaires doit être fait en fonction de leur impact non seulement sur le coût total du réseau, mais aussi sur la performance environnementale du réseau.

Enfin, la plupart des travaux de la littérature considèrent principalement l'option de remise à neuf de l'étape de traitement (Min et al., 2006 ; Üster et al., 2007 ; Du et Evans, 2008; Demirel et Cökçen, 2008 ; Pishvae et al., 2010) et seuls quelques-uns considèrent l'option du recyclage de cette étape tels que Listes et al. (2005) et Wang et Hsu (2010). Mais dans notre cas, nous nous intéressons à la fois au recyclage du flux inverse aussi bien qu'à sa remise à neuf. En d'autres termes, nous sommes intéressés par différentes sources de flux inverses qui ont chacune un itinéraire de traitement différent.

Nous proposons une méthodologie pour concevoir un réseau de logistique inverse en considérant des sources différentes du flux inverse, des installations appartenant à différentes entreprises, et en ayant le coût et l'impact environnemental comme critères de décision. Les critères de décision ne sont pas les mêmes dans le cas où les installations appartiennent à la

même entreprise que dans le cas où elles appartiennent à différentes entreprises. Dans ce dernier cas, les critères de décision incorporent des critères de choix d'un partenaire dans la chaîne logistique inverse. Donc, nous analysons, dans la section suivante, la littérature pour déterminer les critères supplémentaires de décision à considérer dus au fait de considérer le choix du partenaire dans le problème de conception d'une chaîne logistique inverse.

2.2 Critères de décision de choix d'un fournisseur (partenaire)

Selon l'analyse et l'état de l'art réalisés par Chen (2011), les critères les plus considérés dans le problème de la sélection des fournisseurs sont les suivants: prix, livraison à temps, qualité, équipement et capacité, emplacement géographique, capacité technique, et, enfin, gestion et organisation. Le tableau ci-dessous répertorie tous les critères importants identifiés.

Critère d'évaluation	Nombre de références considérant ce critère
Prix	61
Livraison à temps	44
Qualité	40
Équipement et capacité	23
Emplacement géographique	16
Capacité technique	15
Gestion et l'organisation	10
Réputation industrielle	8
Situation financière	7
Performance historique	7

Tableau 1: Critères importants pour le choix d'un fournisseur (Chen, 2011).

Parmi les rares travaux considérant l'impact environnemental comme un critère de décision principal, citons les travaux de Karman *et al.* (2013). Ce critère ne figure pas dans l'analyse et l'état d'art exhaustifs réalisés par Chen (2011). Pourtant, et dans le contexte de la chaîne logistique inverse, l'impact sur l'environnement est d'une importance capitale, puisque le concept de logistique inverse est par lui-même en partie mis au point pour des questions environnementales.

3. Proposition d'une méthode pour la conception d'une logistique inverse

Compte tenu de notre analyse de la littérature et en fonction de nos besoins spécifiques, ajouter une approche par analyse du cycle de vie (ACV) semble adéquate pour analyser la performance du réseau choisi. Cette approche permet d'évaluer la performance environnementale du réseau de la logistique inverse en tant que tel aussi bien que son impact sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Ainsi, nous proposons une méthode basée sur la comparaison de scénarios et formée de 5 étapes principales décrites dans la figure 1.

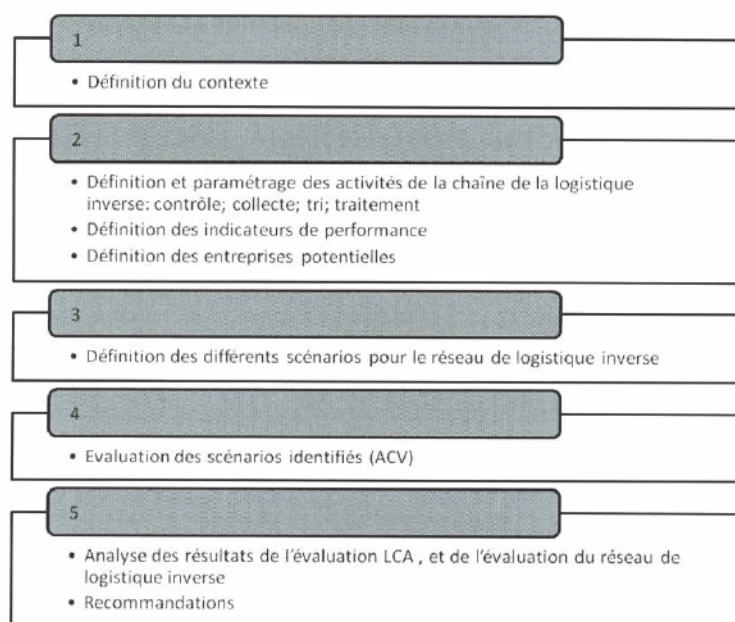


Figure 1: Méthodologie de conception d'une logistique inverse.

3.1 Etapes 1 et 2 : Définition du contexte et des paramètres

La première étape consiste à définir le contexte de l'analyse, donc les types de produits, le flux inverse concerné, les contraintes de délai, de capacité, de coût...

La deuxième étape consiste à définir tous les paramètres de la logistique inverse. Afin d'achever cette étape, la formalisation d'un cadre de référence pour la logistique inverse est nécessaire. Ce cadre est présenté dans la Figure 2 et a été développé en se basant sur la littérature. Il décrit les principales activités dans chacune des étapes de la logistique inverse dans les deux phases de conception et d'implémentation.

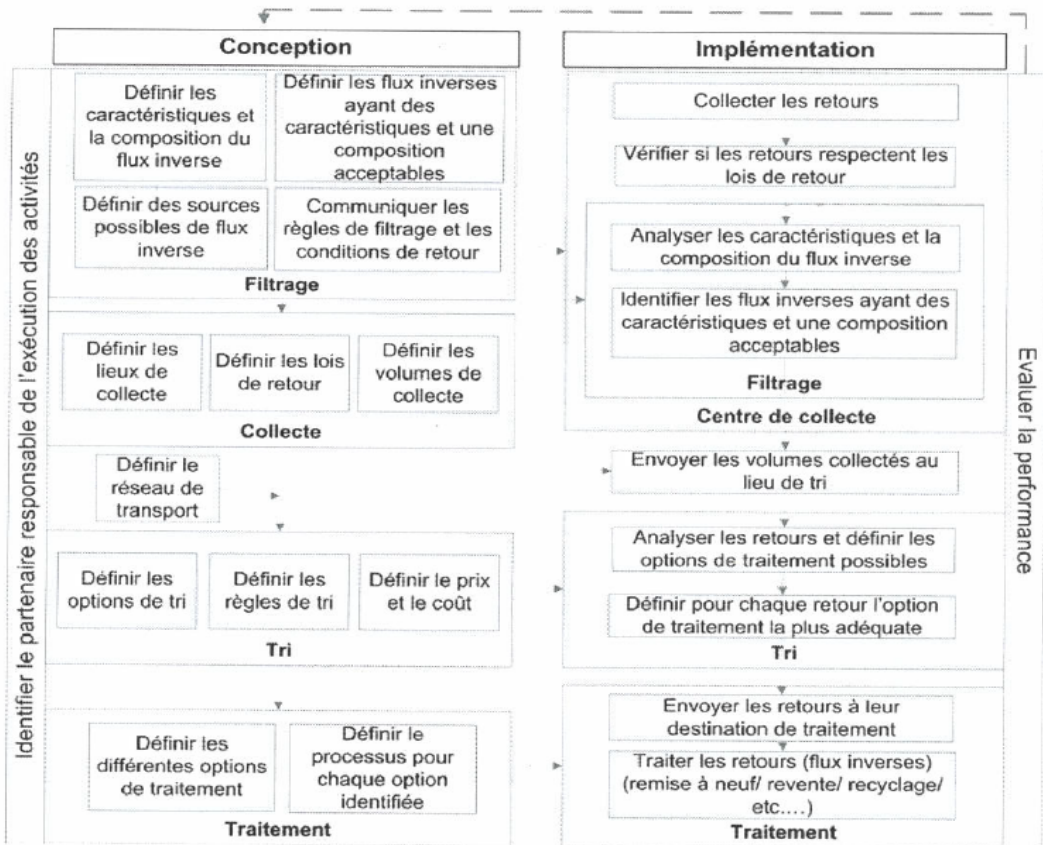


Figure 2 : Cadre pour la logistique inverse.

La conception de la logistique inverse comporte aussi la détermination des différents partenaires dans cette chaîne et de leurs rôles. Comme présenté dans les figures 3 et 4, il existe quatre rôles : responsable de la collecte, responsable du tri, responsable du traitement, et collecteur final du flux inverse. Un même partenaire peut assumer plusieurs rôles. Par exemple le responsable de la collecte peut aussi assumer la responsabilité du tri. De même, le collecteur final du flux inverse peut prendre en charge une partie du traitement. Un même partenaire peut assumer les responsabilités de collecte, de tri et de traitement, etc. Le rôle et les activités de chacun des acteurs sont présentés dans les figures 3 et 4. Pour chaque rôle, les activités dont il est responsable ont été identifiées pour les phases de conception et d'implémentation en se basant sur le cadre présenté précédemment. Ces activités sont à un niveau macro et doivent être détaillées à un niveau micro, pour des cas spécifiques ou des produits spécifiques.

Le collecteur final du flux inverse définit le besoin et détermine les caractéristiques acceptables du flux inverse. Par exemple, et pour notre cas d'étude, ces caractéristiques

représentent les compositions chimiques tolérées pour l'aluminium recyclé afin de respecter les performances attendues de la pièce finale.

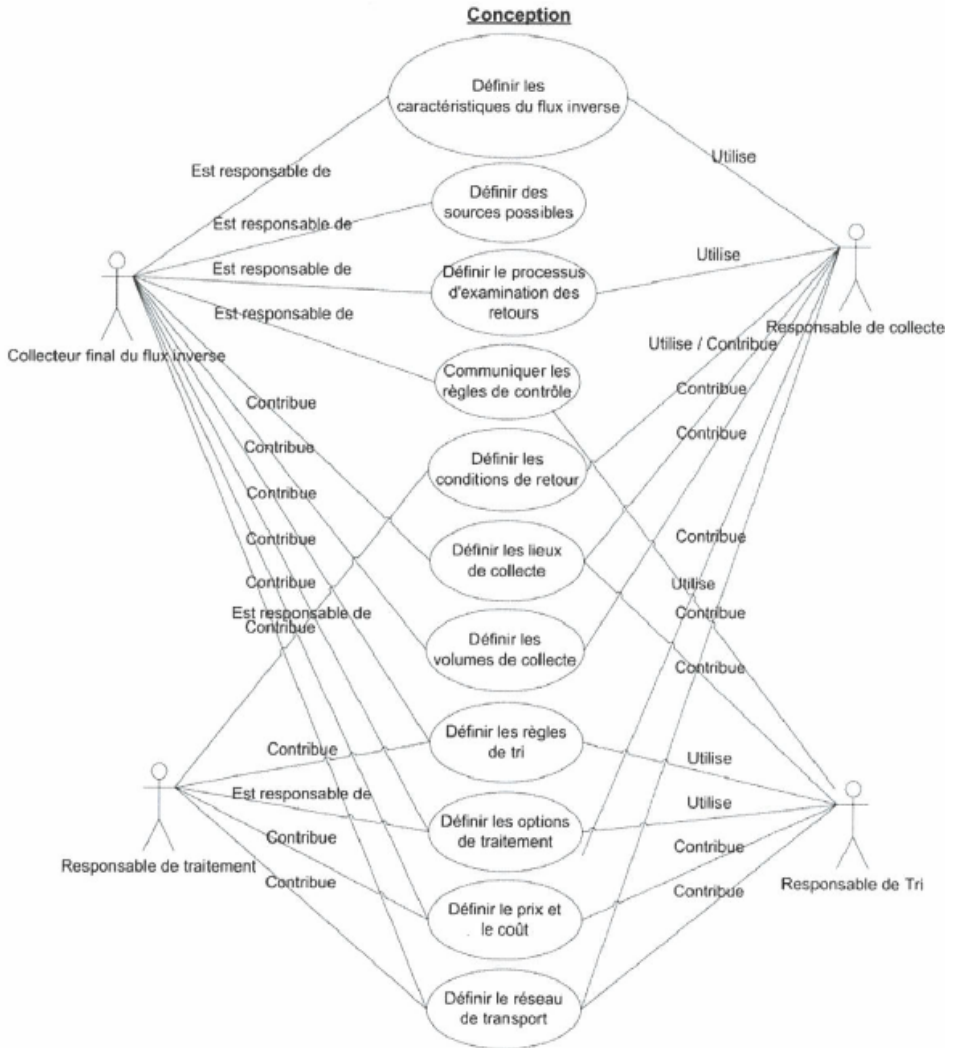


Diagramme de cas d'utilisation, phase de conception d'une logistique inverse.



Figure 4: Diagramme de cas d'utilisation, phase d'implémentation d'une logistique inverse.

La définition des paramètres consiste donc à identifier les différents rôles dans le réseau de logistique inverse, les responsabilités et les activités par rôle, les exigences relatives à ces activités, et les indicateurs de performance. Les exigences par activité dépendent du cas spécifique et du type de produit. Les procédés de recyclage par exemple varient en fonction du type de produit. Les indicateurs de performance sont, quant à eux, généraux et sont les suivants: le coût total du réseau (comprenant le coût de transport, des installations, des achats, du stockage et des différentes activités), une agrégation des principaux indicateurs utilisés en analyse du cycle de vie (ACV) tels que l'empreinte carbone d'un produit, les indicateurs liés à l'énergie, les produits chimiques utilisés, la consommation d'eau, l'utilisation d'énergies renouvelables / non renouvelables et des indicateurs de recyclage tels que la quantité de matériaux recyclés, le quota de collecte CQ (ratio entre la quantité des matériaux qui est

récupérée par les systèmes de collecte et la quantité totale collectée) et le quota de recyclage RQ (rendement des procédés techniques de recyclage) (Quinkkertz et al., 2001).

Dans cette étape, les paramètres propres au cas d'étude sont identifiés et définis. Par exemple, les entreprises candidates pour jouer un ou plusieurs rôles dans le réseau. Pour chaque entreprise une fiche descriptive est remplie. Cette fiche contient des informations sur l'entreprise, certains indicateurs de performance et les contraintes telles que les quantités minimale et maximale de flux inverse disponible, les délais de livraison, etc.

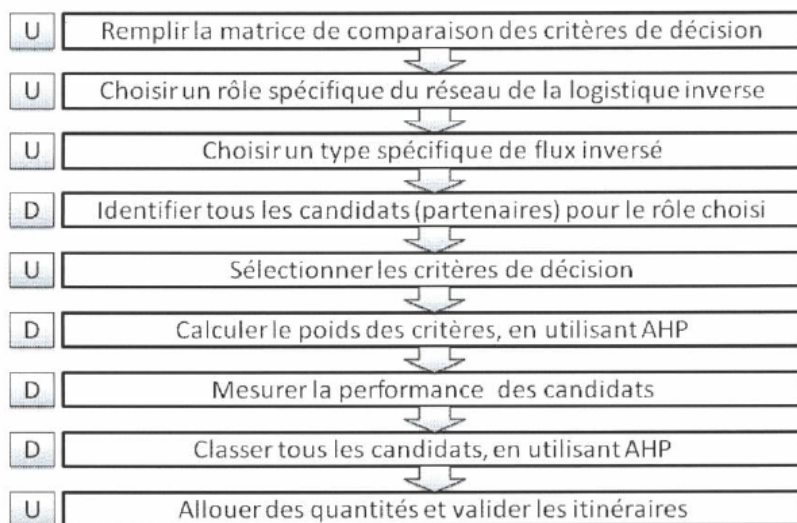
3.2 Etape 3 : Définition des scénarios de logistique inverse

Une fois l'étape deux achevée, les scénarios sont créés en combinant les options pour chacune des étapes de la logistique inverse, tout en respectant les contraintes de corrélation et de faisabilité.

La définition des scénarios est réalisée par l'utilisateur de l'une des 3 façons suivantes:

- 1) Définir un scénario de réseau inverse, en choisissant pour chaque rôle une ou plusieurs entreprises ainsi que le type et la quantité de flux inverse, puis en choisissant le mode de transport entre ces sociétés.
- 2) La définition du réseau optimal en fonction du coût total en utilisant l'option d'optimisation
- 3) Définir le réseau de logistique inverse en utilisant l'option d'aide à la décision multicritères, avec des critères de décision par rôle. Cette option est basée sur la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process) qui est une méthode de classement des alternatives suivant un point de vue (Saaty, 2003) et qui repose sur la comparaison de paires d'options et de critères. AHP est la méthode d'aide à la décision la plus utilisée pour la sélection des fournisseurs (van der Rhee et al., 2009). Ces avantages sont sa capacité de structurer un problème complexe, multicritère, multi-personnes et multi-périodes de façon hiérarchique, la comparaison binaire des éléments (alternatives, critères et sous-critères), et la facilité de son support informatique. Dans ce cas, et pour chaque rôle, l'utilisateur peut demander d'identifier la meilleure entreprise (ainsi que la localisation des usines et entrepôts) basée sur différents critères de décision comme la distance, le coût, la fiabilité du fournisseur, les processus utilisés, les critères écologiques, la qualité du flux inverse, etc. La démarche à suivre pour utiliser cette option est décrite dans la figure 5. Les critères de décision proposés sont basés sur l'état d'art, et sont les suivants:
 - les différents coûts : coût de stockage, coût d'achat, coût de désassemblage, coût variable et fixe de l'installation, coût de transport,

- la distance (calculée en utilisant l'emplacement géographique),
- la qualité du flux,
- la quantité minimale et maximale de flux inverse disponible,
- l'indicateur de livraison à temps,
- la réputation industrielle,
- les équipements et la capacité,
- la performance historique,
- les principaux processus et technologies utilisés,
- les moyens de transport.



Légende: U = Utilisateur ; D = Démonstrateur

Figure 5 : Démarche pour l'option aide à la décision multicritère.

L'utilisateur peut choisir de nombreux scénarios en utilisant une ou plusieurs des méthodes proposées précédemment et comparer leurs performances (coût total de la chaîne logistique inverse, taux de recyclage d'Aluminium, empreinte carbone, utilisation d'eau, etc.) dans les étapes 4 et 5 de la méthode. En d'autres termes, l'utilisateur peut comparer sur la base de tous les critères environnementaux et économiques le scénario optimal (basé sur le coût uniquement) avec des scénarios construits avec l'option aide à la décision et à tout autre scénario construit par l'utilisateur seul, sans aucune aide du système.

3.3 Etapes 4 et 5: Evaluation des scénarios de logistique inverse

Après qu'un ou plusieurs scénarios ont été choisis, les différents indicateurs de performance sont calculés. Une comparaison entre les scénarios est fournie. L'évaluation du

réseau de logistique inverse est réalisée via un logiciel d'évaluation du cycle de vie (SimaPro). Ceci est possible dans le projet SuPLight qui fournit une plateforme collaborative (Suplight, 2012a) permettant la communication et l'échange d'informations entre les différents logiciels dont le logiciel d'ACV et le démonstrateur de logistique inverse. La communication entre le logiciel ACV et le démonstrateur de logistique inverse est présentée dans la figure 6.

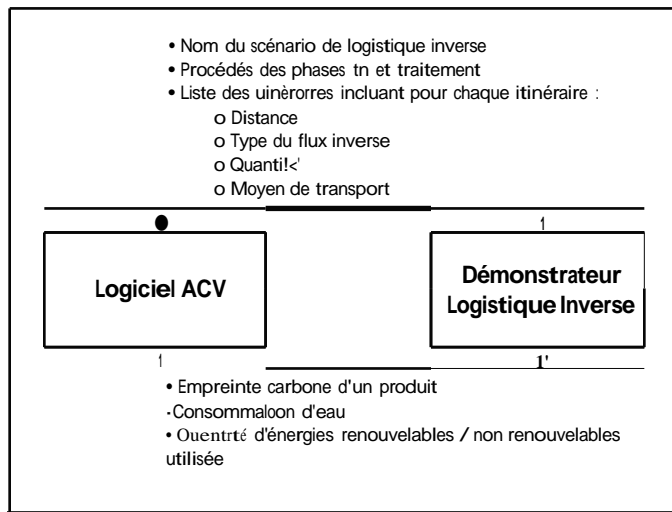


Figure 6 : Communication entre logiciel ACV et démonstrateur de logistique inverse.

Une fois l'évaluation environnementale des différents scénarios reçue du logiciel ACV, une analyse complète est effectuée combinant l'évaluation propre au démonstrateur de logistique inverse (coût total du réseau, la quantité de matériaux recyclés, etc.) et celle obtenue par l'ACV. Une comparaison de tous les scénarios créés est ensuite remise à l'utilisateur.

4. Démonstrateur pour l'aide à la conception d'une logistique inverse

La méthode proposée ci-dessus est outillée grâce à un démonstrateur logiciel. Il a été conçu avec une architecture flexible afin de permettre la portabilité et l'interopérabilité avec n'importe quelle application externe. La mise en œuvre du prototype logiciel est basée sur le modèle MYC architecture logicielle, en utilisant HTMLS et CSS pour créer la vue et la logique de l'application JAX-RS API Java pour les services Web RESTful *qui* sont contrôlés par Javascript (jQuery).

Le démonstrateur est axé sur la définition des scénarios permettant à l'utilisateur de :

- choisir les partenaires et leurs rôles ainsi que de les visualiser sur une carte,

- définir des itinéraires : un itinéraire est caractérisé par des données sur le flux et le transport (le type de flux, la quantité échangée entre les deux partenaires, le moyen de transport et la distance),
- visualiser le résumé du scénario créé et afficher les valeurs des indicateurs de performance comme le coût total et le taux de recyclage.

Le coût total est calculé pour chaque itinéraire. Les services de Google sont utilisés pour le calcul automatique de la distance et affichage de la carte à partir des données fournies par l'utilisateur. L'interface de visualisation des itinéraires créés et l'interface de définition d'un itinéraire sont présentées dans les figures 7 et 8 respectivement. La page principale du prototype montre le scénario de logistique inverse sur une carte avec une description des différents itinéraires, comprenant les noms des entreprises, le type du flux inverse, la quantité de flux, le mode de transport, et la distance entre deux entreprises.

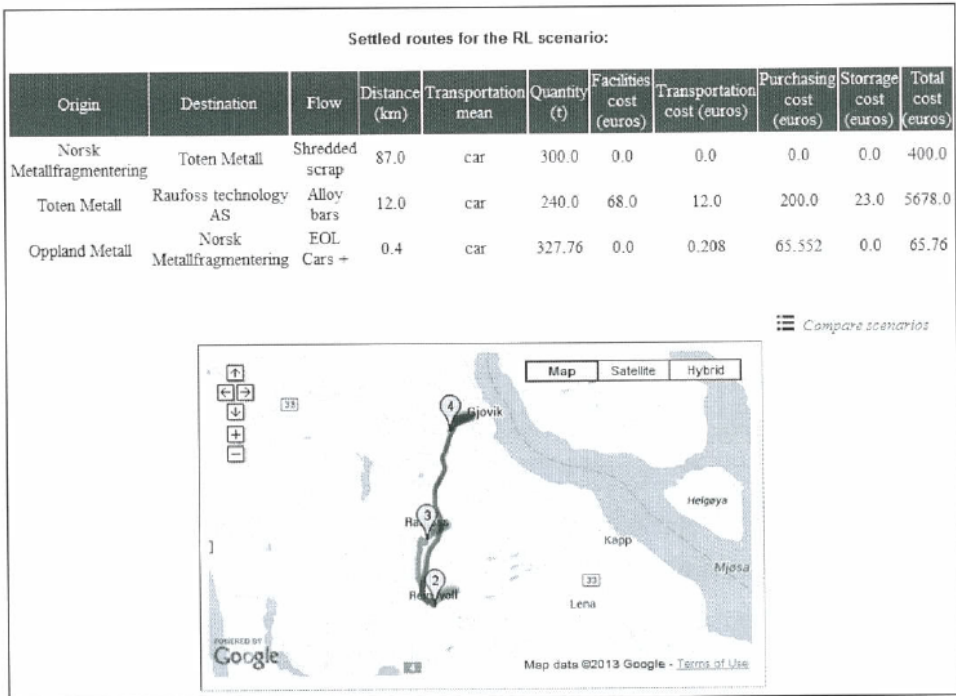


Figure 7 : Interface de visualisation des itinéraires créés.

Roles list: Sorter

Companies list: Norsk Metallfragmentering

Add a company

Role

Company receiving flows: Norsk Metallfragmentering
Norsk Metallfragmentering AS, Mattisrudsvingen, Gjøvik, Norway
Norway

RL routes transporting flows to this company

Define route

Flow Data:

Select the flow to receive: EOL Cars +

Allowed input flow quantity: [2, 50] t

Select flow provider: Oppland Metall

Decision support for provider choice

Allowed output flow quantity: [25, 4000] t

Choose quantity: _____ t

Minimum recommended quantity

Transportation Data:

Transportation mean: Truck

Distance :

Distance: 0.4 km Duration: 1 min

Calculate RL costs

Save

Figure 8 : Interface de définition des itinéraires.

5. Cas d'étude

5.1 Etape 1 : Définition dll contexte

Le cas d'étude concerne un bras inférieur avant de direction automobile qui est produit par Raufoss Neuman en Norvège (Suplight, 2012b). Il est présenté dans la figure 9. Actuellement cette pièce est fabriquée à partir de 100% d'aluminium vierge. L'objectif du projet Suplight est de passer à une fabrication à partir de 75% d'aluminium recyclé et 25% d'aluminium vierge. Une des tâches nécessaires pour réaliser cet objectif est la conception de la logistique inverse afin d'assurer la collecte des 75% d'aluminium recyclé de qualité suffisante pour répondre au cahier des charges du client.

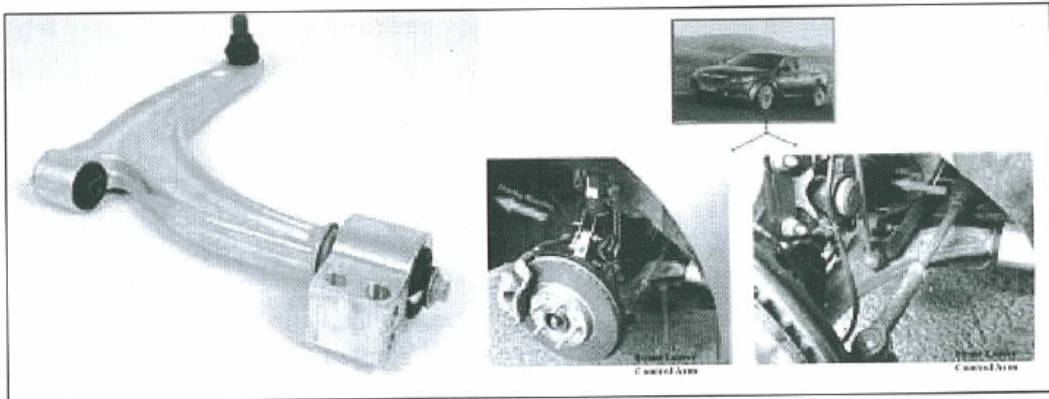


Figure 9 : Bras inférieur avant (Front Lower Control Arm (FLCA)).

5.2 Etapes 2 : Définition des paramètres

5.2.1 Définition et paramétrage des activités de la chaîne de la logistique inverse

Premièrement, les caractéristiques de l'alliage d'aluminium acceptées ont été définies. Une analyse du comportement mécanique de la pièce a permis de définir le taux maximal accepté d'aluminium recyclé pour les différents alliages d'aluminium. Ceux ayant les 3 plus haut taux de recyclage ont été retenus et sont présentés dans le tableau 2.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Zn	Taux d'Al recyclé maximal (en%)
AA6082	1.05	0.25	0.00	0.54	0.81	0.13	0.02	0.02	0
AA6082-	1	3.73	0.23	0.00	0.58	0.84	0.13	0.02	40
	2	5.51	0.23	0.00	0.58	0.84	0.13	0.02	61
	3	1.03	0.66	0.00	0.51	0.82	0.13	0.01	60

Tableau 2 : Alliages d'Al retenus pour le cas d'étude.

Ensuite, les flux inverses respectant ces caractéristiques ont été définis ainsi que les sources de ces flux. Ils sont présentés dans le tableau 3.

Produit	Source	Volume
Pare-chocs	véhicule (démontage)	23kT
Roues	véhicule (démontage)	11 kT
Châssis, suspension...	véhicule (démontage)	78kT
Fermeture, carrosserie, raidisseur...	véhicule (démontage)	237kT

Structure de carrosserie	véhicule (démontage)	338kT
Sièges	véhicule (démontage)	64kT
AA3003	véhicule (casse, broyage, séparation alliage)	112kT
AA5754	véhicule (casse, broyage, séparation alliage)	156kT
AA6016	véhicule (casse, broyage, séparation alliage)	168kT
AA6060	véhicule (casse, broyage, séparation alliage)	391 kT
Alliage forgé 1	véhicule (casse, broyage, séparation alliage)	NN
Alliage forgé 2	véhicule (casse, broyage, séparation alliage)	NN
Revêtement	bâtiment (démolition)	73kT
Cadre de fenêtre	bâtiment (démolition)	
3004 toitures ondulées	bâtiment (démolition)	
Feuilles	emballage (tri)	142kT
Récipients rigides	emballage (tri)	
Fermetures	emballage (tri)	

Tableau 3 : Sources de flux inverse d'Aluminium acceptables pour le bras inférieur avant (Suplight, 2011).

Deuxièmement les activités de tri et de traitement ont été identifiées. L'industrie du recyclage d'aluminium comprend un large éventail de procédés qui nécessite un large éventail de techniques de contrôle (Khoei et al., 2002). Ces différents procédés ont des performances environnementales différentes et produisent différentes qualités de flux inverse. En outre, ils ne sont pas tous adaptés pour tous les types des retours contenant de l'aluminium. En effet, il existe deux méthodes principales pour le recyclage d'aluminium : la méthode conventionnelle ou classique et la méthode par conversion directe nommée aussi recyclage à l'état solide. La figure 10 présente les deux méthodes. La méthode classique comprend une fusion de déchets d'aluminium tandis que la méthode de conversion directe ne nécessite pas de phase de fusion et par conséquent utilise moins d'énergie que la méthode classique. Le procédé le plus courant pour recycler l'aluminium en utilisant la méthode classique utilise un four rotatif qui est chauffé par la combustion de combustibles fossiles (Alberto et al., 2002). Les deux méthodes de recyclage d'aluminium nécessitent une phase de préparation, comprenant le tri, le broyage et le raffinage.

La méthode de conversion directe ne produit pas de pertes de flux contrairement à la méthode classique qui entraîne une perte de 45% d'aluminium (Lazzaro et atzori, 2000). La perte d'aluminium dans le processus de fusion peut atteindre 38% si la fusion a lieu dans un four à gaz ou au fuel et les déchets de coulée peuvent atteindre 8% (Samuel, 2003). Ainsi, le procédé de conversion directe se traduit par un rendement de métal supérieur (Cui et Roven, 2010). Des techniques telles que la charge d'un mélange de sels à bas point de fusion peuvent être utilisées

afin d'accroître le rendement en aluminium dans les méthodes classiques (Alberto et al., 2002). En dépit du développement de nouvelles technologies pour recycler l'aluminium, le processus qui utilise le sel est toujours le plus populaire, en raison de faibles coûts d'investissement, d'une technologie simple, de rendements élevés et de faibles coûts d'entretien (Alberto et al., 2002).

La méthode de recyclage par conversion directe procure environ 70% des économies d'énergie par rapport à la méthode classique (Gronostajski et al., 2000). Selon Samuel (2003), cette méthode présente une pollution de l'air très faible par rapport aux méthodes conventionnelles. De plus, le coût est d'environ 59% du coût de l'aluminium conventionnel. Mais cette technologie est en cours de développement (Cui et Roven, 2010). Les principales difficultés du recyclage à l'état solide de déchets d'aluminium (et en particulier ceux issus de l'automobile) sont des propriétés non homogènes, une contamination par le fer, et un revêtement organique (Cui et Roven, 2010).

La performance du processus de recyclage dépend de nombreux facteurs tels que la charge et la température du four. Des travaux comme ceux de Khoei et al. (2002), ont analysé l'impact de ces facteurs sur la qualité de l'aluminium recyclé.

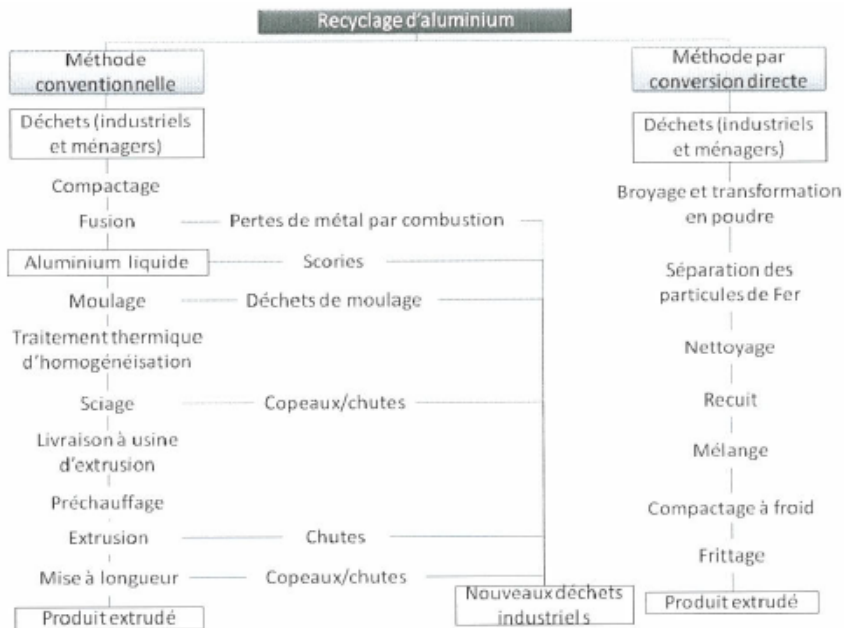


Figure 10 : Méthode conventionnelle versus méthode par conversion directe (adapté de Samuel (2003)).

5.2.2 Définition des indicateurs de performance

Les indicateurs de performance considérés sont décrits dans le tableau 4. L'indicateur le plus considéré dans la littérature pour évaluer ou concevoir une chaîne logistique inverse est le coût total. Il comprend le coût d'achat, de collecte, de transport, de stockage, de traitement, et des installations (coût fixe et variable). En outre, le taux de recyclage permet aussi d'analyser la quantité recyclée générée par la chaîne par rapport au coût induit. Concernant les indicateurs environnementaux, trois indicateurs principaux ont été choisis par rapport à notre cas d'étude avec le partenaire industriel : l'empreinte carbone du produit, l'utilisation d'eau et la quantité d'énergies non renouvelables utilisée.

Indicateurs de performance	Unité	Source
Coat total de la chaîne logistique inverse	Euros	Démonstrateur logistique inverse
Taux de recyclage	%	Démonstrateur logistique inverse
Empreinte carbone d'un produit	kgCO ₂ eq	Logiciel ACV
Consommation d'eau	m ³ watereq	Logiciel ACV
Quantité d'énergies non renouvelables utilisée	MJ	Logiciel ACV

Tableau 4 : Indicateurs de performance.

5.2.3 Définition des entreprises partenaires potentielles

Une enquête menée auprès de Raufos combinée à des recherches internet ont permis d'identifier 19 candidats potentiels. Pour chaque candidat, les données nécessaires à l'analyse ont été collectées. Ces données incluent la description du candidat (nom, flux inverse concerné, localisation géographique) et tous les paramètres permettant le calcul des critères de décision identifiés dans la section 4.2.

5.3 Etape 3 : Définition des scénarios de logistique inverse

En utilisant le démonstrateur et l'option d'aide à la décision, un scénario a été identifié pour chaque alliage d'aluminium accepté (AA6082-1, AA6082-2 et AA6082-3). Les alliages AA6082-2 et AA6082-3 ont donné lieu à un même scénario (suite de partenaires et d'itinéraires identiques), et à une performance des indicateurs quasi-identique. Les scénarios retenus sont celui pour l'alliage AA6082-1 et celui pour l'alliage AA6082-3. Ceux-ci sont présentés dans les figures 11 et 12. Les scénarios ont été définis en utilisant l'option d'aide à la décision multicritère comme décrit dans la section 4.2.

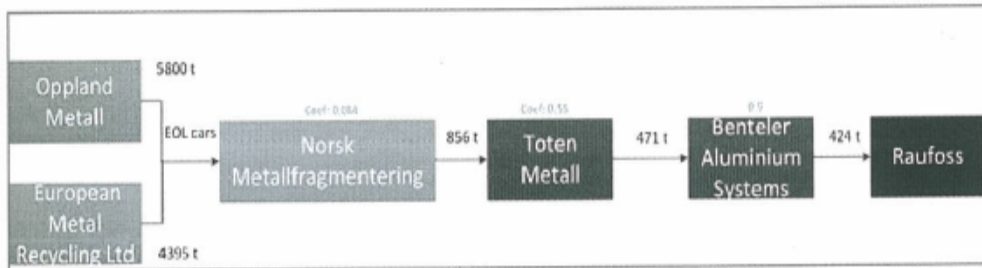


Figure 11: Scénario 1 retenu pour l'alliage AA6082-1.

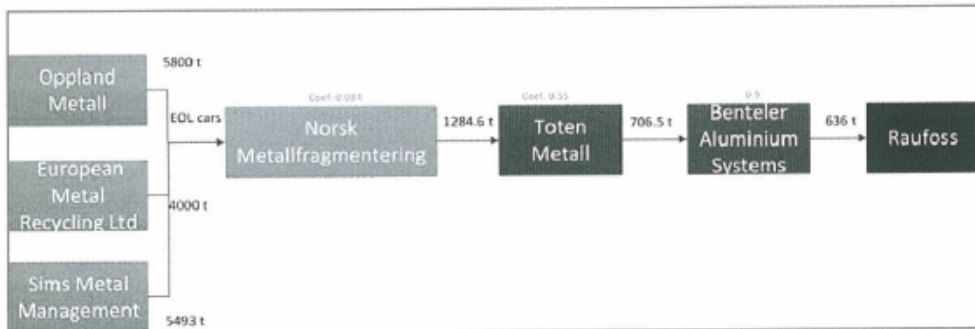


Figure 12 : Scénario 2 retenu pour l'alliage AA6082-3.

5.4 Etapes 4 et 5: Evaluation des scénarios de logistique inverse

Une communication avec le logiciel d'ACV est possible à travers la plateforme de Suplight. Une fois le scénario créé et sauvegardé, il est possible de lancer une analyse ACV. Ceci permet d'envoyer les informations au logiciel ACV qui exécute l'analyse et renvoie les résultats. Pour les 2 scénarios créés les résultats sont présentés dans la figure et le tableau suivant :

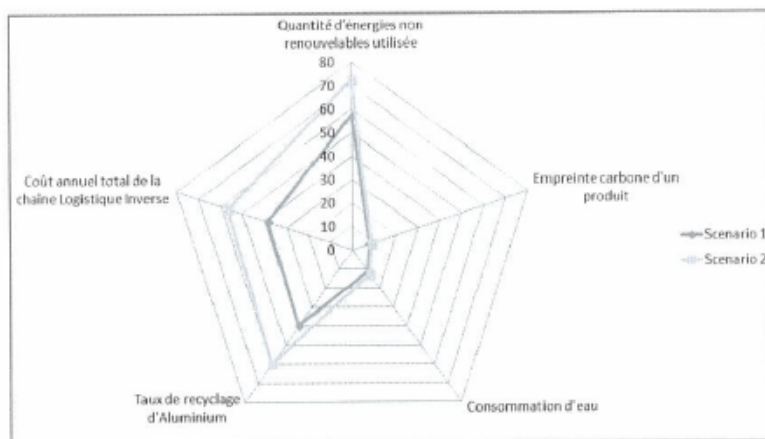


Figure 13 : Comparaison de la performance des deux scénarios.

Indicateurs	Unité	Fourni par logiciel	Scenario 1	Scenario 2
Quantité d'énergies non renouvelables utilisée	MJ	ACV	57,2	72,46
Empreinte carbone d'un produit	kgCO ₂ eq.	ACV	7,74	8,66
Consommation d'eau	m ³	ACV	0,058	0,065
Taux de recyclage d'Aluminium	%	ACV	40	60
Coût annuel total de la chaîne Logistique Inverse	Euros	Logistique Inverse	3848 108,92	5 673 167,78

Tableau 5: Valeur des indicateurs de performance pour les scénarios 1 et 2.

Les résultats obtenus montrent que tous les indicateurs (économiques et environnementaux) perdent en performance en augmentant le taux de recyclage. Il serait intéressant de comparer deux scénarios pour le même alliage mais avec deux traitements différents qui utilisent deux méthodes différentes (la méthode conventionnelle et celle par conversion directe par exemple) pour vérifier cette tendance. Néanmoins, de tous les fournisseurs identifiés, aucun n'utilise la méthode par conversion directe qui aurait eu une meilleure évaluation environnementale, surtout dans l'utilisation des énergies.

6. Conclusion

La logistique inverse est une partie fondamentale du green Supply Chain. Elle permet de réduire les déchets et surtout de réintégrer les produits en fin de vie dans une boucle fermée. Néanmoins, elle n'est pas gérée de la même manière qu'une Supply Chain classique. Dans cet article, nous avons proposé une méthodologie de conception d'une logistique inverse combinée avec une analyse du cycle de vie. La méthode proposée permet de concevoir une chaîne logistique inverse en définissant à la fois la localisation et l'allocation des installations ainsi que le choix des fournisseurs. La méthode est flexible et permet d'incorporer l'avis de l'expert en se basant sur une méthode très répandue dans l'aide à la décision multicritère, l'AHP. Le cas d'étude de la section 6 a implémenté la méthode au travers du démonstrateur logiciel utilisé sur un cas industriel. Dans les travaux futurs, le modèle d'optimisation de la chaîne logistique sera développé en s'intégrant dans le cadre de la chaîne logistique inverse proposé dans cet article.

En outre, un deuxième cas d'étude sera réalisé pour une pièce de structure de l'industrie aéronautique.

Remerciements

Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet FP7 SuPLight (Grant Agreement n° 263302) et ont été supportés par l'Union Européenne et la région Picardie. Nous remercions également l'ensemble des partenaires du consortium pour leurs apports durant le développement des idées et des concepts proposés dans ce papier.

7. Bibliographie

- Alberto J., Tenorio S., Croce D., Espinosa, R. (2002), "Effect of salt / oxide interaction on the process of aluminum recycling". *Journal of Light Metals*, vol. 2, pp. 89-93.
- Bloemhof J., van Nunen J. (2005), "Integration of environmental management and SCM", ERIM Report Series Research in Management.
- Carter C.R., Ellram L.M. (1998), "Reverse logistics: a review of the literature and framework for future investigation", *Journal of Business Logistics*, vol. 19, n° 1, pp. 85-102.
- Castell A., Clift R., France C. (2004), "Extended producer responsibility policy in the European Union—a horse or a camel!", *Journal of Industrial Ecology*, vol. 8, n° 1-2, pp. 4-7.
- Chaves G., Paché G. (2008), "La gestion des retours, composante mésestimée de la logistique inversée? Une enquête exploratoire en contexte agroalimentaire", *Revue Française de Gestion Industrielle*, vol. 27, n° 4, pp. 71-87.
- Cruz-Rivera R., Ertel, J. (2009), "Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico", *European Journal of Operational Research*, vol. 196, n° 3, pp. 930-939.
- Cui J., Roven H. J. (2010), "Recycling of automotive aluminum", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 20, n° 11, pp. 2057-2063.
- Demirel O.N., Gökçen H. (2008), "A mixed-integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 39, n° 11-12, pp. 1197-1206.
- Du F., Evans G.W. (2008), "A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service", *Computers & Operations Research*, vol. 35, n° 8, pp. 2617-2634.
- Dupont L., Lauras M. (2007), "Logistique inverse: un maillon essentiel du développement durable", *Revue Française de Gestion Industrielle*, vol. 26, n° 2, pp. 5-36.
- Ferrer, G., Ayres R. (2000), "The impact of remanufacturing in the economy", *Ecological Economics*, vol. 32, n° 3, pp. 413-429.
- Giuntini R., Andel, T. (1995), "Master the six R's of reverse logistics - Part 2", *Transportation and Distribution*, vol. 36, n° 3, pp. 93-98.

- Gronostajski J., Marciniak H., Matuszak A. (2000), "New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling", *Journal of Material Processing Technology*, vol. 106, pp. 34-39.
- Khoei A. R., Masters I., Gethin D. T. (2002), "Design optimisation of aluminium recycling processes using Taguchi technique", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 127, pp. 96-106.
- Lazzaro G., Atzori C. (1992), "Recycling of aluminium trimmings by conform process" [C]/TMS Annual Meeting. Warrendale, PA, pp. 1230-1235.
- Linton J., Klassen R., Jayaraman V. (2007), "Sustainable supply chains: an introduction", *Journal of Operations Management*, vol. 25, n° 6, pp. 1075-1082.
- Listes O., Dekker R. (2005), "A stochastic approach to a case study for product recovery network design", *European Journal of Operation Research*, vol. 160, n° 1, pp. 268-287.
- Min H., Ko C.S., Ko H.J. (2006), "The spatial and temporal consolidation of returned products in a closed-loop supply chain network", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 51, n° 2, pp. 309-320.
- Pishvae M.R., Kianfar K., Karimi B. (2010), "Reverse logistics network design using simulated annealing", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 47, n° 1-4, pp. 269-281.
- Pokharel S., Mutha A. (2009), "Perspectives in reverse logistics: A review", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 53, n° 4, pp. 175-182.
- Quinkertz R., Rombach G., Liebig, D. (2001), "A scenario to optimise the energy demand of aluminium production depending on the recycling quota", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 33, n° 3, pp. 217-234.
- Ramezani R., Bashiri M., Tavakkoli-Moghaddam R. (2013), "A new multi-objective stochastic mode) for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level", *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, n° 1-2, pp. 328-344.
- Ravi V., Shankar R. (2005), "Analysis of interactions among the barriers of reverse logistics", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 72, n° 8, pp. 1011-1029.
- Rogers D., Tibben-Lembke R. (2001), "An examination of Reverse Logistics Practices", *Journal of Business Logistics*, vol. 22, n° 2, pp. 129-148.
- Rogers O.S., Tibben-Lembke R.S. (1998), "Coing backwards: Reverse logistics trends and practices", *Reverse logistics executive council*, Reno, NV, USA.
- Rubio S., Chamorro A., Miranda F. (2008), "Characteristics of the research on reverse logistics (1995-2005)", *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 4, pp. 1099-120.
- Saaty T., (2003), "Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary", *European Journal of Operational Research*, vol. 145, n° 1, pp. 85-91.
- Samuel M. (2003), "A new technique for recycling aluminium scrap", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 135, pp. 117-124.
- Schwartz, B. (2000), "Reverse logistics strengthens supply chains", *Transportation and Distribution*, vol. 41, n° 5, pp. 95-100.
- SuPLight (2011), "Deliverable 1.3: Study on composition levels in recycled AlMgSi alloys", SuPLight, EU FP7 Project N°263302.

- SuPLight (2012a), "Deliverable 3.2: Generic framework for simulation-based optimization", SuPLight, EU FP7 Project N°263302.
- SuPLight (2012b), "Document Deliverable 1.5: SuPLight application scenarios", SuPLight, EU FP7 Project N°263302
- Oster H., Easwaran G., Akçali E., Çetinkaya S. (2007), "Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model", *Naval Research Logistics*, vol. 54, n° 8, pp. 890-907.
- Van der Rhee B., Verma R., Plaschka G. (2009), "Understanding trade-offs in the supplier selection process: The role of flexibility, delivery, and value-added services/support", *International Journal of Production Economics*, vol. 120, n° 1, pp. 30-41.
- Wang H.F., Hsu H.W. (2010), "A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm", *Computers & Operations Research*, vol. 37, n° 2, pp. 376-389.