

**LA GESTION DES DECHETS D'EQUIPEMENTS ELECTRIQUES ET
ELECTRONIQUES ET UNE APPLICATION**
(ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK AYGIT ATIKLARI YÖNETİMİ
VE BİR UYGULAMA)

Réalisé par
İlke BEREKETLİ, Ingénieur en Génie Industriel

Thèse

Présenté en vue de
l'obtention du diplôme de

MASTER

Date de soumission : Mai 18, 2007

Date de soutenance : Juin 04, 2007

Directrice : Yrd. Doç. Dr. Müjde EROL GENEVOIS (M. de Conf.)

Membres de Jury : Prof. Dr. H. Ziya ULUKAN

Yrd. Doç. Dr. Ruhi TUNCER (M. de Conf.)

PREFACE

De nos jours, la production et la consommation des équipements électriques et électroniques augmentent de plus en plus. D'une part, les équipements électriques et électroniques facilitent la vie, d'autre part ils portent des grands dangers à l'environnement et à la santé humaine quand ils deviennent des déchets. En outre, à cause de leur consommation répandue, leur cycle de vie diminue et ils provoquent plus de consommation de ressources.

J'ai voulu examiner dans ce projet les types de traitement pour réduire des déchets d'équipements électriques et électroniques et réaliser une application dans la ligne de production afin d'optimiser le système en minimisant le coût total.

Je voudrais bien remercier à mon professeur **Yrd. Doç. Dr. Müjde EROL GENEVOIS** pour ses aides et ses supports motivants; à mon ami **Taylan BİLAL** pour ses aides sur l'informatique ; et à ma famille qui m'a encouragé durant toute ma vie d'éducation.

le 18 mai 2007

İlke BERKETLİ

TABLES DES MATIERES

Liste des Figures	v
Liste des Tableaux	vii
Résumé	viii
Abstract	xi
Özet	xiv
1. Introduction	1
2. Gestion des Déchets	4
2.1. Les Déchets	4
2.1.1. Qu'est-ce qu'un déchet ?	4
2.1.2. Qu'est-ce qu'un EEE?	5
2.1.3. Qu'est-ce qu'un DEEE?	5
2.2. La revue de Littérature	7
2.3. Les Applications de traitement de DEEE dans le monde	9
2.4. DEEE en Turquie	14
3. Les Types de traitement des DEEEs	16
3.1. Recyclage	16
3.1.1. Les Bénéfices de Recyclage	18
3.2. Réutilisation	19
3.2.1. Les Bénéfices de Réutilisation	20
4. Modélisation	22
4.1. Définition du système	22
4.2. Réingénierie	23
5. Application	28
5.1. Le Changement du coût total en fonction du ratio de réutilisation	28
5.1.1. Les hypothèses du modèle	28
5.1.2. L'optimisation	30

5.2. Le Changement du coût total en fonction du ratio de réutilisation et du ratio de recyclage	38
6. Conclusion	51
Bibliographie	55
Appendices	58
Appendice – A	58
Appendice – B	60
Appendice – C	62
Appendice – D	64
Biographie	66

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1. : Le modèle de production et de traitement de DEEE après les arrangements de réingénierie.	25
Figure 4.2. : La nouvelle séquence de travail illustrée par UML	27
Figure 5.1. : L'effet de l'augmentation du ratio de réutilisation (r_2) sur la différence des coûts avant et après les arrangements de réingénierie.	29
Figure 5.2. : L'effet de l'augmentation du ratio des produits retournés (r_1) sur la différence des coûts avant et après les arrangements de réingénierie.	29
Figure 5.3. : L'effet de l'augmentation du ratio de recyclage (r_3) sur la différence des coûts avant et après les arrangements de réingénierie.	30
Figure 5.4. : Le changement du coût total quand $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$	35
Figure 5.5. : Le changement du coût total quand $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$	36
Figure 5.6. : Le changement du coût total quand $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$	36
Figure 5.7. : Le ratio optimal de réutilisation quand $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$	37
Figure 5.8. : Le ratio optimal de réutilisation quand $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$	37
Figure 5.9. : La quantité optimale des produits retournés quand $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$	38
Figure 5.10. : Le changement du coût total quand $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$	43
Figure 5.11. : Le ratio optimal de réutilisation quand $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$	44
Figure 5.12. : Le ratio optimal de recyclage quand $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$	44
Figure 5.13. : La quantité optimale de X_t quand $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$	45
Figure 5.14. : Le changement du coût total quand $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$	45
Figure 5.15. : Le ratio optimal de réutilisation quand $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$	46
Figure 5.16. : Le ratio optimal de recyclage quand $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$	46
Figure 5.17. : La quantité optimale de X_t quand $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$	47

Figure 5.18. : Le changement du coût total quand $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$	47
Figure 5.19. : Le ratio optimal de réutilisation quand $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$	48
Figure 5.20. : Le ratio optimal de recyclage quand $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$	48
Figure 5.21. : La quantité optimale de X_t quand $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1. : Les résultats moyens de la programmation linéaire	33
Tableau 5.2. : Les résultats de la programmation linéaire	34
Tableau 5.3. : Les résultats moyens de la programmation non linéaire	41
Tableau 5.4. : Les résultats de la programmation non linéaire	42

RESUME

Dans ce temps où les développements technologiques augmentent de jour au jour, que la culture de consommation nous insiste à utiliser/acheter le plus nouveau produit et qu'elle devient une folie ; les équipements électriques et électroniques (EEE) ont déjà commencé à s'accumuler dans les décharges. Les EEE représentent la catégorie de déchets dont l'expansion est la plus rapide car les consommateurs remplacent leurs équipements plus souvent qu'auparavant du fait de la progression rapide des technologies.

D'après la Commission Européenne, dans UE15, la quantité produite de DEEE est variée entre 3.3–3.6 kg par personne pour la période 1990–1999 et a été projetée comme 3.9–4.3 kg par personne pour la période 2000–2010. La production annuelle de DEEE est de 1.8 millions tonnes en Allemagne, 1.5 millions tonnes en France et à peu près 6 millions tonnes en Europe. Malheureusement, la quantité de DEEE en Turquie ne peut pas être précisée facilement à cause du manque des données statistiques. Quand même, la production annuelle de DEEE de la Turquie est supposée comme approximativement 1 million tonne en prenant référence celle de l'Allemagne.

L'innovation technologique et l'expansion de marché continuent à accélérer le remplacement des équipements qui mène à une augmentation de DEEE. Plusieurs pays ont esquissé des législations pour améliorer la réutilisation, le recyclage et les autres formes de rétablissements de ces déchets et pour réduire leur disposition. La Commission Européenne a identifié le besoin de législation pour adresser le problème de DEEE dans le niveau de Communauté, et cela a pris la forme de la DIRECTIVE DEEE. La directive s'est étendue la responsabilité des producteurs comme son principe central et a visé d'augmenter les ratios de réutilisation, de recyclage et de rénovation.

La Turquie, un des candidats pour l'adhésion en UE, est en train de préparer une nouvelle réglementation sur DEEE dans le but d'adaptation aux législations de l'UE.

DEEE est un terme générique embrassant de diverses formes d'équipement électrique et électronique qui a cessé être de n'importe quelle valeur à leurs propriétaires ou un type de déchet consistant en appareils électriques ou électroniques cassés ou superflus. Quand même, il n'y a pas encore une définition standard. Dans ce travail, la définition de l'UE est acceptée.

Etant donné les problèmes écologiques et étant donné la haute valeur résiduelle de DEEE, le système de la gestion de DEEE devrait être établi pour étendre le cycle de vie d'EEE. Conformément à l'efficacité potentielle économique et écologique, les stratégies de traitement peuvent être classées en cinq catégories : réutilisation, entretien, rémanufacture, recyclage et disposition. Dans cette recherche, les catégories centrales sont le recyclage et la réutilisation.

Recyclage est une série d'activités qui inclut de collecter des matériels recyclables qui seraient autrement considérés du déchet, de trier et de traiter des recyclables aux matières premières, et de fabriquer les matières premières aux nouveaux produits.

Réutilisation est définie comme suivant : toute opération par laquelle des DEEE, ou leurs composants, sont utilisés pour le même usage que celui pour lequel ils ont été conçus, y compris la poursuite de l'utilisation des équipements ou des composants déposés aux points de collecte, chez les distributeurs, chez les recycleurs ou chez les fabricants.

Dans cette étude, la structure de production existante d'un producteur d'EEE est analysée et un nouveau modèle est proposé. Pendant la phase de réingénierie, les nouvelles lignes de traitement et les zones de stockage ont été ajoutées au système existant. Les opérations pour réutilisation et recyclage sont incluses dans le nouveau système pour traiter les produits retournés par les clients avec les raisons diverses.

Pour le travail d'optimisation, premièrement le système a été réparé sur la chaîne de réutilisation et la minimisation de coût a été faite en prenant le ratio de réutilisation comme la variable de décision. Dans la première partie du problème, les solutions optimales sous les scénarios différents ont été atteintes par l'usage de *linprog*, fonction de programmation de linéaire du MATLAB. Sous 3 scénarios différents, le ratio optimal de réutilisation est environ 90% et on observe que ces valeurs sont proches à l'un à l'autre, de même que proche à 1. Donc, il peut être recommandé aux producteurs d'EEE de rétablir leurs chaînes de production et aussi de concevoir les produits dans une façon plus modulaire et en utilisant plus de morceaux standard, pour que les produits deviennent plus appropriés pour être réutilisés.

Dans la deuxième partie du problème, le ratio de recyclage a été ajouté au problème d'optimisation. Cette fois-ci le problème est devenu non linéaire, résolu sous 3 scénarios différents utilisant la fonction de *fmincon* de MATLAB. Les résultats pour les ratios de réutilisation qui étaient dans un petit voisinage de 90%, ont été similaires au problème précédent. D'autre part, les ratios optimaux de recyclage sont dispersés dans un beaucoup de plus grand intervalle. Cette différence dans la dispersion est provenue du coût de recyclage qui est beaucoup plus élevé que celui de réutilisation. L'augmentation dans le coût de réutilisation après les arrangements de réingénierie n'a pas pour résultat une grande différence, donc les ratios optimaux de réutilisation sont presque pareils pour les 3 scénarios différents. Dernièrement, il peut être conclu que les producteurs doivent chercher des façons à diminuer le coût de recyclage afin d'augmenter le ratio de recyclage.

Pour le travail futur, on peut ajouter au système des nouvelles variables comme par exemple le ratio des produits retournés r_1 , etc. L'étude pourra aussi être étendue par une application de la programmation dynamique stochastique pour le même modèle. La différence entre deux méthodologies doit être comparée.

ABSTRACT

Nowadays, technological developments increase day after day and we all see plenty of hi-tech samples in the global market. These frequently sold products created shorter life cycles for them. Hence, electrical and electronic equipments, which are a subset of technological equipments, have already begun to accumulate at the garbage dumps.

The UNEP (United Nations Environment Programme) estimates that the world produces up to 50 million tons of waste electrical and electronic equipment (or e-waste for short) per year. The current annual production of e-waste is 1.8 million tons in Germany, 1.5 million tons in France, and roughly 6 million tons in Europe. Unfortunately, quantity of e-waste in Turkey cannot be stated clearly because of the lack of statistical data. However, Turkey's annual e-waste production is assumed to be around 1 million tons, with reference to Germany's e-waste quantity. This assumption is made on the similarity between Turkey's and Germany's population and consumption habits.

Both technological innovation and market expansion continue to accelerate the replacement of equipment leading to a significant increase of waste electric and electronic equipment (WEEE). Many countries have drafted legislation to improve the reuse, recycling and other forms of recovery of such wastes so as to reduce disposal.

The European Commission identified the need for legislation to address the escalating problem of WEEE at the Community level, and this has taken the form of the WEEE Directive. The Directive has extended producer responsibility as its central tenet and aims to increase rates of reuse, refurbishment and recycling. Turkey, as one of the candidates for EU membership, is also on the way to prepare a new regulation about

WEEE for the purpose of adaptation to EU's legislation.

Waste electrical and electronic equipment is a generic term embracing various forms of electric and electronic equipment that have ceased to be of any value to their owners, or a waste type consisting of any broken or unwanted electrical or electronic appliance. There is, as yet, no standard definition. EU's Directive 2002/96/EC defines 'waste electrical and electronic equipment' or 'WEEE' as follows: WEEE means electrical or electronic equipment including all components, subassemblies and consumables which are part of the product at the time of discarding. In this study, it will be accepted the definition of EU's Directive 2002/96/EC.

There are generally five different ways of treating of WEEE: reuse, servicing, remanufacturing, recycling and disposal (such as incineration, landfill). In this search, it will be focused on reuse and recycling in order to reduce the disposed waste quantity.

Reuse of electrical and electronic equipment designates repeated use of an item for the same purpose as it was designed for. Reuse extends the product life by second hand use and, if necessary, prior repair. According to aforesaid directive, recycling means the reprocessing in a production process of the waste materials for the original purpose or for other purposes, but excluding energy recovery which means the use of combustible waste as a means of generating energy through direct incineration with or without other waste but with recovery of the heat.

In this work, current production mentality of an EEE producer is analysed, and a new model of enterprise based on recycling and reuse is proposed. During the reengineering phase, new processing lines and stock areas have been added to the existing system. The operations for reuse and recycling are included in the new system for treating the returning products brought in by the clients with various reasons.

For the optimization work, firstly the system has been fixed on the reuse chain and cost minimization has been done by taking the reuse ratio as the decision variable. In the first part of the problem, optimal solutions under different scenarios have been attained

with the use of MATLAB's linear programming function *linprog*. Under all 3 different scenarios, the optimal reuse ratio turned out to be around 90%. Observe that these values are close to each other as well as close to 1. Thus, it can be said that high ratios of reuse serve in diminishing the overall cost and increases efficiency. Therefore, it can be recommended to the EEE producers to re-establish their production lines in view of obtaining high reuse ratios, and also re-design their products in a more modular way and by using more standard pieces, so that the products become more appropriate for reusing.

In the second part of the problem, the recycling ratio has been added aside the reuse ratio to the optimization problem. This time the problem became non-linear, which has been solved under 3 different scenarios using MATLAB's *fmincon* function. The results for reuse ratios have turned out similar to the previous problem, being in a small neighborhood of 90%. Because of the relative independence between recycling and reuse ratios, changes of the recycling ratio didn't have much impact on the other. On the other hand, the optimal recycling ratios are dispersed in a much larger interval. For the second scenario, this ratio is 17%, but for the third, it is 90%. This difference in dispersion is originated from the recycling cost being much higher than reuse cost. The increase in the reuse cost after reengineering arrangements doesn't result in a big difference, hence the optimal reuse ratios are almost the same for the 3 different scenarios. Or, after reengineering, for the scenarios in which recycling cost is assumed to be increased, the high recycling cost is increased even more. So, it is less preferred by the system which tries to minimize the overall cost. From this it can be concluded that the producers should look for ways of diminishing the recycling cost in order to increase recycling ratio.

For the future work, the new variables as for example the ratio of the returned products r_1 , etc. can be added to the system. This study will be extended by an application of stochastic dynamic programming for the same model. The difference between two methodologies will be compared.

ÖZET

Günümüzde teknolojik gelişmeler hızını gün geçtikçe arttırmakta, en son model ürünler küresel pazarda yerini almaktadır. Sürekli satışı yapılan ürünler, kendi yaşam döngülerini kısaltmaktadır. Böylece ürünler daha kısa sürede elden çıkarılmakta, atık durumuna gelmekte ve çoğunlukla çöplere yığılmaktadır. Son yıllarda en büyük artışı gösteren atık çeşidi elektrikli ve elektronik aygıt atıklarıdır (EEAA).

Avrupa Komisyonu'na göre, AB 15 kurucu ülkesindeki EEAA miktarı 1990-1999 yılları arasında 3.3-3.6 kg/kişi olarak ölçülmüş ve 2000-2010 arasındaki yıllar için bu rakam, 3.9-4.3 kg/kişi olarak öngörülmüştür. Avrupa'da ise bu sayının yaklaşık 6 milyon ton olduğu düşünülmektedir. Ne yazık ki, istatistiksel veri eksikliğinden dolayı Türkiye'nin e-atık miktarı tam olarak bilinmemektedir. Ancak Almanya ile nüfus ve tüketim alışkanlıkları benzerliğinden yola çıkılarak tahmin yapılabilmektedir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı'na göre Almanya'daki atık miktarı 1,5 milyon tondur. Buradan hareketle Türkiye'de de yaklaşık 1 milyon ton e-atık olduğu söylenmektedir.

Teknolojik gelişmeler ve EEA pazarının gittikçe yaygınlaşması, EEAA'ların hızla artışına neden olmaktadır. Bu atıklar insan sağlığını ve çevreyi ciddi biçimde tehdit etmektedir. Birçok ülke, yeniden kullanım ve geri dönüşümü destekleyip atık bertarafını azaltabilmek için yasal yükümlülükler getirmekte ve yönergeler hazırlamaktadır. Bu doğrultuda Avrupa Birliği, 2003 yılında yürürlüğe giren 2002/96/EC numaralı EEAA yönergelerini hazırlamış ve üye ülkelerin EEA üreticilerinin sorumluluklarını belirlemiştir. Türkiye de, AB üye aday ülkelerinden biri olarak, AB uyum yasaları çerçevesinde e-atıklarla ilgili bir yönetmelik hazırlama aşamasındadır. Yakın gelecekte, Çevre ve Orman Bakanlığı'nca yürürlüğe sokulacak olan bu yönetmelikle Türkiye'deki EEA üreticileri de organizasyonlarını yeniden

biçimlendirmek ve kendi atığının sorumluluğunu yüklenmek zorunda kalacaktır.

EEAA; kullanıcıları için değer taşımayan EEA'ları ya da bozulmuş, kullanıcı tarafından istenmeyen EEA'ları kapsayan atık tipine verilen genel addır. Ancak farklı kuruluşlara ait farklı tanımlar bulunmaktadır ve henüz standart bir tanım oluşturulmamıştır. Bu çalışmada AB'nin belirlediği EEAA tanımını kabul edilmiştir.

Günümüzde e-atıklardan kurtulmanın en kolay ve düşük maliyetli yolu, birçok üretici için gömme ya da yakma (insinerasyon)'dır. Ancak, çevre ve insan sağlığına zarar veren, e-atıklar içindeki zehirli maddelerin toprağa, su kaynaklarına ya da havaya karışmasına neden olan bu yöntemlerden mümkün olduğunca kaçınmak gerekmektedir. EEAA'ları bertaraf etmek yerine, değerlendirmenin beş temel yolu vardır: yeniden kullanım, bakım, yeniden üretim, geri dönüşüm ve bertaraf. Bu çalışmada ele alınan atık değerlendirme yöntemleri yeniden kullanım ve geri dönüşümdür.

Geri dönüşüm, atık malzemelerin, başlangıçtakiyle aynı ya da farklı amaçlar için üretim hattında yeniden işlenmesidir.

Yeniden kullanım, kullanılmış eşyaların, malzemelerin, araç ve gereçlerin atılması yerine yeniden kullanılması ile ilgilidir. EEAA'ların yeniden kullanımı, aynı amaç için tasarlanmış parçaların birçok kez kullanılması temeline dayanmaktadır.

Bu çalışmada, bir EEA üreticisinin var olan üretim yapısı incelenmiş ve yeni bir model önerilmiştir. Bu model doğrultusunda, farklı koşullar altında maliyet en küçüklemesi problemi çözülmüştür. Var olan üretim yapısının üzerine geliştirilen yeniden yapılanma uygulamalarıyla, sistemde yeni stok alanları ve atık değerlendirme için yeni hatlar açılmıştır. Buna göre, müşterilerden çeşitli nedenlerle dönecek EEA'ların değerlendirilebilmesi için yeniden kullanım ve geri dönüşüm işlemleri sisteme eklenmiştir.

Maliyet en küçüklemesi problemimizin ilk aşamasında yalnızca yeniden kullanım kanalına odaklanılmıştır ve yeniden kullanım oranı karar değişkeni alınarak en iyi

maliyet değeri elde edilmiştir. Üç farklı senaryo için en iyi değerlere, MATLAB yazılımı içindeki linprog fonksiyonu kullanılarak doğrusal programlama mantığı ile ulaşılmıştır. Her senaryo için en iyi yeniden kullanım oranlarının yaklaşık %90 civarında ve birbirlerine çok yakın değerler aldığı gözlenmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak, EEA üreticilerine önerilmesi gereken, yeniden kullanım oranlarını mümkün olduğunca yukarıya çekmeye çalışmalarıdır. Buna göre üretim hatları ve ürünler yeniden tasarlanmalı, modülerliğe ve standart parça kullanımına büyük önem verilmelidir. Böylece verimlilik artışı sağlanacaktır.

Uygulamanın ikinci aşamasında, geri dönüşüm oranı yeni değişken olarak en iyileme problemine eklenmiş ve böylece problem doğrusal olmayan problem tipine dönüşmüştür. Bu kez problem, üç farklı senaryo için MATLAB içindeki *fmincon* fonksiyonuyla çözülmüştür. Yeniden kullanım oranları, doğrusal programlamayla aşamasındakilere benzer olarak her üç senaryo için yaklaşık %90 çıkmıştır. Buna karşılık, en iyi geri dönüşüm oranları daha geniş bir aralıkta dağılmaktadır. Dağılım aralığının daha geniş olması, geri dönüşüme maliyetinin yeniden kullanım maliyetinden daha yüksek olmasındandır. Son olarak, EEA üreticilerine geri dönüşüm ve yeniden kullanım maliyetlerini düşürmeye çalışmaları önerilmektedir. Böylece geri dönüşüm ve yeniden kullanım oranları artacak ve buna bağlı olarak daha az hammadde kaynağı tüketilecektir. Bu da, hem DEEE'lerin fabrikada yeniden değerlendirilerek büyük miktarlarda bertaraf edilmesinin önüne geçecek, hem de hammadde tüketimini azaltarak doğanın korunumunu sağlayacaktır.

Bu çalışma, gelecekte, probleme yeni değişkenler eklenerek, örneğin geri dönen ürün oranı r_1 , ele alınacaktır. Ayrıca aynı model, stokastik dinamik programlama yaklaşımı ile geliştirilecek ve iki yaklaşım arasındaki farklar karşılaştırılacaktır.

1. Introduction

Dans ce temps où les développements technologiques augmentent de jour au jour, que la culture de consommation nous insiste à utiliser/acheter le plus nouveau produit et qu'elle devient une folie ; les équipements électriques et électroniques (EEE) ont déjà commencé à s'accumuler dans les décharges.

Les EEE représentent la catégorie de déchets dont l'expansion est la plus rapide car les consommateurs remplacent leurs équipements plus souvent qu'auparavant du fait de la progression rapide des technologies.

D'après la Commission Européenne, la quantité totale des déchets en Europe est prévue d'augmenter de 45% entre les années 1995-2020 [1]. Dans les premiers quinze pays d'UE (UE15), la quantité produite de DEEE est variée entre 3.3–3.6 kg par personne pour la période 1990–1999 et a été projetée comme 3.9–4.3 kg par personne pour la période 2000–2010 [2]. Comme DEEE est reconnu comme le plus rapide croissant courant de déchets dans l'UE, il augmente à environ trois fois plus grand que la moyenne des déchets municipaux. [3]

PNUE (Programme des Nations Unis pour l'Environnement) estime que le monde produit plus de 50 millions tonnes de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) par an. La production annuelle de DEEE est de 1.8 millions tonnes en Allemagne, 1.5 millions tonnes en France et à peu près 6 millions tonnes en Europe.

Malheureusement, la quantité de DEEE en Turquie ne peut pas être précisée facilement à cause du manque des données statistiques. Quand même, la production annuelle de DEEE de la Turquie est supposée comme approximativement 1 million tonne en

prenant référence celle de l'Allemagne. Cette supposition est faite sur la similarité entre la population et les habits de consommation des deux pays.

Les raisons plus répandues qui causent à former les « montagnes » de décharge sont le développement rapide de la technologie, le fait de ne pas avoir un plan de recyclage, une surveillance, des services techniques de réparation sur les équipements et utilisation des produits illégaux surtout dans des pays peu développés. Ces décharges portent un grand danger à la nature et aux êtres humains. Il y a des substances extrêmement toxiques dans l'e-déchet tel que cadmium, mercure et plomb. Cependant, l'e-déchet contient aussi des substances valables telles qu'en or et cuivre. Recouvrir ces métaux de l'e-déchet est devenu une affaire profitable, pour le résultat global et le commerce d'e-déchet. C'est pour cela on doit chercher les chemins de traiter les déchets. [4]

L'innovation technologique et l'expansion de marché continuent à accélérer le remplacement des équipements qui mène à une augmentation de DEEE. Plusieurs pays ont esquissé des législations pour améliorer la réutilisation, le recyclage et les autres formes de rétablissements de ces déchets et pour réduire leur disposition.

La Commission Européenne a identifié le besoin de législation pour adresser le problème de DEEE dans le niveau de Communauté, et cela a pris la forme de la DIRECTIVE DEEE. La directive s'est étendue la responsabilité des producteurs comme son principe central et a visé d'augmenter les ratios de réutilisation, de recyclage et de rénovation. [3]

L'objectif de la directive est défini comme suivant :

« La présente directive a pour objectif prioritaire la prévention en ce qui concerne les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) et, en outre, leur réutilisation, leur recyclage et les autres formes de valorisation de ces déchets, de manière à réduire la quantité de déchets à éliminer. Elle vise aussi à améliorer les performances environnementales de tous les opérateurs concernés au cours du cycle de vie des équipements électriques et électroniques, tels que les producteurs, les

distributeurs et les consommateurs, et en particulier les opérateurs qui sont directement concernés par le traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques. » [5]

Le décret publié le 22 juillet 2005 oblige les fabricants, importateurs ou distributeurs d'équipements électriques et électroniques à contribuer ou pourvoir à l'élimination des déchets d'équipements électriques et électroniques proportionnellement à leur part de marché, à renforcer l'éco-conception des nouveaux produits et à marquer les nouveaux produits, qui ne doivent plus être jetés à la poubelle, d'un pictogramme spécifique.

La DIRECTIVE DEEE d'UE oblige aussi les entreprises d'EEE à ramasser/reprendre gratuitement les anciens équipements des clients et à disposer ces déchets par une façon environnementale [6]. Ceci fournira des encouragements pour concevoir l'équipement électrique et électronique dans une façon écologiquement plus efficace, qui prend les aspects de traitement des déchets entièrement dans le compte. Les consommateurs pourront retourner leur équipement gratuitement.

La Turquie, un des candidats pour l'adhésion en UE, est en train de préparer une nouvelle régulation sur DEEE dans le but d'adaptation aux législations de l'UE. Au futur proche, la nouvelle régulation va être promulguée par le Ministère de l'Environnement et de Forêt et chaque producteur d'EEE doit reformer son organisation et prendre la responsabilité de ses déchets.

Dans le chapitre-2, on va parler de la gestion de DEEE, définir les termes, revoir les études faites dans la littérature et parler des applications de traitement dans le monde et en Turquie. Dans le chapitre-3, on va citer les types de traitement pour DEEE et se concentrer sur le recyclage et la réutilisation. Dans le quatrième chapitre, le système existant de production d'un producteur d'EEE va être analysé et un nouveau modèle va être proposé après les arrangements de réingénierie. Dans le chapitre suivant, on va faire une application en deux étapes ; premièrement par la programmation linéaire et deuxièmement par la programmation non linéaire. Finalement, dans le chapitre-6 on va conclure.

2. Gestion des Déchets

La gestion des déchets est définie comme la somme d'activités de collection, le transport, l'emmagasinage temporaire, réutilisation et le traitement (recyclage et le rétablissement d'énergie) de DEEE ou/et leurs composants et leurs sous-ensembles (y compris leurs consommables), alors après leur réutilisation ou le traitement, ils sont coulés de retour dans le marché. Le but de la gestion des déchets est de réduire les effets des déchets sur la santé humaine, l'environnement, l'esthétique ou l'agrément local. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation. Elle concerne tous les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique.

Pour avancer dans la recherche, il faut d'abord définir les mots clés de la gestion des déchets, surtout les termes auxquelles on s'intéresse dans la conception de DEEE.

2.1 Les Déchets

2.1.1 Qu'est-ce qu'un déchet?

Un **déchet** est un résidu de production, de transformation ou d'utilisation que son détenteur destine à l'abandon.

D'après cette définition, on peut générer en permanence une multitude et une grande diversité d'objets auxquels s'applique cette définition. On peut classer tous ces déchets par catégories, lesquelles peuvent varier en fonction de leur nature, de leur provenance ou encore de leur caractère plus ou moins toxique. On distingue les déchets des ménages et les déchets des entreprises ou d'activités professionnelles. Cette

classification a le mérite de rappeler que tous les déchets ne proviennent pas tous de notre vie privée et que certains produits peuvent être plus ou moins dangereux [7].

Parmi ces types de déchets, on va se concentrer sur ceux électriques et électroniques qui génèrent des équipements électriques et électroniques.

2.1.2 Qu'est-ce qu'un EEE?

L'Union Européenne définit « équipements électriques et électroniques, ou EEE » comme *les équipements fonctionnant grâce à des courants électriques ou à des champs électromagnétiques, et les équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs, relevant des catégories mentionnées à l'annexe I A, et conçus pour être utilisés à une tension ne dépassant pas 1000 volts en courant alternatif et 1500 volts en courant continu.* [5]

2.1.3 Qu'est-ce qu'un DEEE?

DEEE est un terme générique embrassant de diverses formes d'équipement électrique et électronique qui a cessé être de n'importe quelle valeur à leurs propriétaires ou un type de déchet consistant en appareils électriques ou électroniques cassés ou superflus. Quand même, il n'y a pas encore une définition standard [4]. Dans ce travail, la définition de l'UE est acceptée.

D'après la définition de la Directive 2002/96/CE de l'UE « *déchets d'équipements électriques et électroniques* » ou « *DEEE*»: *les équipements électriques et électroniques constituant des déchets au sens de l'article 1er, point a), de la directive 75/442/CEE, y compris tous les composants, sous-ensembles et produits consommables faisant partie intégrante du produit au moment de la mise au rebut.* [5]

DEEE a une structure très complexe dans les termes de matériels et de composants. Pour développer un système de recyclage et de réutilisation, il est important d'identifier les matériels précieux et les substances hasardeuses.

DEEE, étant un mélange des matériels variés, peut être considéré comme une source des métaux (cuivre, aluminium, or, etc.) et des plastiques. La séparation effective de ces matériels, basée sur les différences de leurs caractéristiques physiques a un rôle important dans le système de recyclage mécanique. C'est pour cela, une caractérisation détaillée est impérative [8].

Les types des équipements/appareils concernant la Directive 2002/96/CE sont les suivants :

1. Gros appareils ménagers
2. Petits appareils ménagers
3. Equipements informatiques et de télécommunications
4. Matériel grand public
5. Matériel d'éclairage (à l'exception des appareils d'éclairage domestique et des ampoules à filament, auxquels s'appliquent néanmoins les articles 4 et 5 du décret n° 2005-829 du 20 juillet 2005)
6. Outils électriques et électroniques (à l'exception des gros outils industriels fixes)
7. Jouets, équipements de loisir et de sport
8. Dispositifs médicaux (à l'exception de tous les produits implantés ou infectés)
9. Instruments de surveillance et de contrôle
10. Distributeurs automatiques

Quelques parties du marché de l'Équipement Électrique et Électronique (EEE), comme les télévisions et les machines à laver etc., montrent des signes de saturation; tandis que beaucoup d'autres secteurs montrent la croissance significative. Par exemple, TI et l'équipement de télécommunication de même que les jouets électroniques sont de bons exemples du secteur en expansion dynamique de marché d'EEE. Les défis rencontrés

par la gestion de DEEE sont non seulement des conséquences de quantités croissantes de déchets mais aussi la complexité de DEEE: C'est un des plus complexes courants des déchets à cause de la grande variété de produits, des appareils mécaniques aux systèmes extrêmement intégrés et de l'accélération des innovations technologiques. [9]

2.2 La Revue de Littérature

Sur le sujet de la gestion de DEEE, on écrit des papiers et fait des applications depuis à peu près une décennie.

Cebeci, Kılıç et Yüksel ont publié un papier « Une Application de Logistique Inverse dans une entreprise d'appareil électroménager en Turquie » en 2005. Dans leur recherche, MILP (Mixed Integer Linear Programming) est utilisé pour une conception optimale de réseau. L'objectif est de déterminer les locations de sites de stockage et des facilités de recyclage pour minimiser les coûts totaux. Le revenu des matériels secondaires est aussi pris en considération. Le modèle inclut les contraintes de conservation de flux, les contraintes de capacité de site de stockage et de la facilité, la limite de nombre de facilité et de sites de stockage et la contrainte de taux de recyclage. [10]

Nagurney et Toyasaki, ils développent un cadre intégré pour la modélisation de la gestion de chaîne de provision inverse des déchets électroniques, qui inclut recyclage. Ils décrivent le comportement des divers décideurs, consistant en sources de déchets électroniques, des recycleurs, des processeurs, de même que les consommateurs associés aux marchés de demande pour les produits distincts. Ils construisent le modèle d'équilibre de réseau d'e-cyclage, établissent la formulation de variation d'inégalité, dont la solution produit les flux matériels de même que les prix, et fournissent les deux propriétés qualitatives du modèle d'équilibre de même que les exemples numériques qui sont résolu utilisant l'algorithme proposé. [11]

Kang et Schoenung, ont décrit et comparé les différents processus de recyclage des DEEE à la base des technologies, des ressources et des systèmes input-output des matériels. Pour les DEEE, les méthodes de recyclage chimique, de recyclage mécanique, et e recyclage thermique sont analysées. [12]

White et al., utilisant la recherche de cas de l'industrie d'ordinateur et électronique, dans ce papier ont présenté un aperçu général généralisé de rétablissement de produit. Le but de leur papier est suivant: décrire le rétablissement d'ordinateurs comme un procédé détaillé, et encadrer un ordre de recherche écologique du jour pour la gestion de rétablissement. Ils ont utilisé la description de l'industrie d'ordinateur et électronique pour souligner des défis larges que les directeurs confrontent à chaque étape du procédé et identifier des dimensions écologiques de décisions de la gestion de rétablissement des produits qui exigent la recherche supplémentaire. [13]

Sheu a présenté un système de CRL (Coordinated Reverse Logistics – Logistique Inverse Coordonnée) pour la gestion de déchets dangereux régionale avec le but de minimiser les coûts d'opérations et les risques persuadés. En identifiant les activités critiques et conditions opérationnelles apparentées du système proposé de CRL, une fonction composite multi-objectif et dix groupes de contraintes sont formulés. [14]

Cui et Forssberg, dans leur travail sur le recyclage mécanique des DEEE, ont précisé que pour la séparation maximum de matériels, DEEE devrait être déchiqueté à toutes petites particules, généralement au-dessous de 5 ou 10 mm. Ils y ont souligné une discussion de procédés de séparation mécaniques pour les petites particules. [8]

Hu et al., présentent un modèle de minimisation de coût pour un multi-temps-étape, pour les multi-type déchets dangereux des systèmes de logistique inverse dans leur étude. Un modèle analytique linéaire de temps discret qui minimise le total coûts d'opération de logistique inverses exposant aux contraintes qui tiennent compte de tels facteurs internes et externes comme les affaires fonctionnant des stratégies et des règlements gouvernementaux est formulé. Ils ont présenté les cas d'application pour démontrer la possibilité de leur approche proposée. [15]

Etendre la vie de produit d'équipement électrique et électronique par réutilisation est considéré comme un moyen efficace pour contribuer au but de conservation de ressource (les matériels et l'énergie) puisque moins d'appareils doivent être produits pour couvrir la demande de consommateur. Truttmann et Rechberger ont étudié la contribution à la conservation de ressource par la réutilisation des DEEEs. Dans leur étude, ils ont déterminé la contribution à la conservation de ressource comme les équilibres de matériels et énergie. Ils ont comparé deux scénarios extrêmes: un scénario sans réutilisation de produits (la vie de produit normale) et un autre scénario supposant que tous EEE choisis sont réutilisés. A la fin, ils ont eu pour résultat les extensions de vie de produit entre 50 et 100%. Le résultat est le suivant : même la réutilisation intensive d'équipement électrique et électronique réduit la consommation de ressource totale (les matériels et l'énergie) d'une économie industrielle extrêmement développée par moins que 1%. Alors, ils ont montré qu'un recyclage efficace est crucial pour épargner les matériels primaires. [16]

2.3 Les applications de traitement de DEEE dans le monde

La gestion des DEEEs devient plus en plus populaire et obligatoire pour tous les pays. Malheureusement, parmi tous les pays, peu d'entre eux se sont concentrés légalement sur le traitement des e-déchets.

Dans l'Union Européenne, la transposition de la directive sur les DEEE, malgré un peu de retard, finit par voir le jour. La Belgique et l'Allemagne ont déjà mis en place leurs filières de collecte et de recyclage, la France devrait être prête à la fin de 2006. Les nouveaux pays membres de l'union ont eu droit à un sursis : la Slovénie a obtenu une extension d'un an, la Lituanie, Malte, la Slovaquie et la Lettonie de deux ans, pour atteindre l'objectif de 4kg de DEEE collectés et valorisés par an et par habitant fixé par la directive. [17]

En France, la directive de DEEE a finalement été adaptée au droit français avec un an de retard en 2005, et a été parachevée par un dernier arrêté daté du 13 mars 2006,

publié au Journal Officiel le 22 mars 2006. Elle impose un volume de collecte auprès des ménages de 4 kg/an et 4 kg/habitant au 31 décembre. L'arrêté du 13 mars 2006 oblige les producteurs d'équipements électriques et électroniques (EEE) à s'inscrire au Registre national des producteurs. Chaque semestre, les entreprises devront déclarer les quantités d'EEE mises sur le marché et les quantités collectées. [18]

La Belgique est un état fédéral où l'environnement est de la compétence des régions. Les autorités belges n'ont pas attendu la directive européenne sur les déchets d'équipements électriques et électroniques pour mettre en place un système de collecte, tri, réutilisation et recyclage. Les obligations de collecte et de traitement des DEEE ont été intégrées dès 2001 dans les trois législations régionales à travers des conventions environnementales signées entre les autorités et les industries sur la base du volontariat. En 2001, on a créé un organisme appelé Recupel. Cet organisme organise la collecte, le tri et le traitement des DEEE en faveur des producteurs. [19]

La Suisse est le premier pays dans le monde qui a appliqué un système organisé pour la collection et recycler des déchets électroniques. Ayant été opérationnel pour une décennie, le système suisse fournit la meilleure occasion d'étudier l'évolution d'un système de traitement des e-déchets. La loi suisse sur le traitement des déchets accentue le principe de « qui pollue, paie » et a encouragé la réduction, réutilisation et recyclage des déchets. La collection efficace d'e-déchet en Suisse est principalement en raison de la gestion efficace du courant de déchets par deux Organisations de Responsabilité de Producteur, SWICO6 et S.EN.S.7. [20]

Le projet des Industries de Technologie de Finlande, introduit en été de 2003, se fixe sur les influences de la directive de DEEE sur les fabricants et sur les producteurs d'EEE. Le but du projet est de soutenir des compagnies à arriver à un consensus sur les détails d'implémentation de la directive. En plus, le projet vise à inaugurer la coopération de compagnie dans les différentes catégories de produit et à prendre les procédés optimaux de recyclage dans l'usage. Le système informatique de base d'internet sera aussi développé pendant le projet et il sera conçu pour rencontrer les devoirs d'information des producteurs d'EEE imposé par la directive de DEEE. [9]

En Angleterre, après plusieurs faux départs, le Ministère du Commerce et de l'Industrie de Royaume-Uni a relâché son final papier de consultation le dernier 2006 Juillet. La consultation s'est rapprochée en Octobre 2006. Les Règlements préparés doivent commencer le 1^{er} Janvier 2007, mais toutes provisions ne seront pas valides jusqu'au le 1^{er} Juillet 2007.

La Directive laisse les Etats Membre libres pour déterminer la structure précise de l'arrangement de collection de DEEE. La Belgique, La Hollande et Suède, qui tous avaient les arrangements de collection à sa place avant la Directive de DEEE, ont un seul arrangement de collection national. Typiquement ceux-ci sont courus par les compagnies de non-profit établies par les associations professionnelles pertinentes. Le Royaume-Uni a plutôt opté pour le modèle compétitif de chambre de compensation qui a été favorisé par 16 des 25 pays d'UE. Selon les Règlements préparés du Royaume-Uni, chaque producteur doit être membre d'un arrangement de conformité des producteurs. [21]

Quant aux voisins de la Turquie, la Grèce et la Bulgarie, étant des pays membres d'UE, préparent aussi des systèmes d'arrangements de déchets dans la direction de la directive de DEEE d'UE.

En Grèce, le décret présidentiel n° 117 publié le 5 mars 2004 transpose les deux directives et applique les dispositions de la Loi sur les Déchets n° 2939/2001 aux DEEE. La Grèce a appliqué la Directive de DEEE par le Décret Présidentiel 117/2004 qui a été publié dans la Gazette de Gouvernement, le Bulletin 82, au 5 Mars 2004. Les producteurs sont exigés à enregistrer avec l'Unité responsable du traitement alternatif des déchets au Ministère d'Environnement avant de lancer des produits électroniques au marché grec. En enregistrant pour les électroniques de ménage, les producteurs peuvent choisir de subventionner la collection de DEEE individuellement ou par un système collectif. [22]

Les actes légaux actuellement valides en Bulgarie, réglant les relations sociales à propos de la protection de l'environnement et de la gestion des déchets ont été adoptées

au cours de l'intégration de Bulgarie dans l'UE, et pour cette raison, la législation nationale est principalement harmonisée avec les conditions européennes. En Bulgarie il y a un système de fonctionnement pour la collection et le transport, l'emmagasinage et l'exportation temporaires pour recyclage des déchets fluorescent et des autres qui contiennent des lampes à mercure. [23]

Gaëlle Bohé a précisé la situation actuelle des Etats-Unis comme suivant : « Aux États-Unis, la situation est encore contrastée à celle en Europe. Il n'existe pas de décision commune aux différents États, mais des initiatives fédérales. Précurseur, l'État Californien a décidé de s'adapter à la directive et aux objectifs de l'UE. L'État de Washington s'est également inspiré de la directive européenne en imposant la responsabilité du producteur, mais a retenu comme échéance le 1^{er} janvier 2009. Pour mettre en place la filière de collecte et de recyclage, l'Etat de Washington a créé la "Washington Materials Management and Financing Authority". Cette autorité compétente assurera une collecte gratuite pour les collectivités locales. Quant aux professionnels, ils auront le choix d'utiliser ce programme ou de créer leur propre circuit. De leurs côtés, les États du Maine et le Maryland ont également créé leur propre législation sur les DEEE. Une disparité des réglementations qui inquiète les fabricants ; la confusion risque de provoquer une segmentation des marchés. » [17]

Quant au Japon, la loi sur les déchets ménagers a été introduite en 2001, et devrait être étendue à l'équipement informatique en 2006. Le Japon a aussi interdit le plomb dans le processus de fabrication des équipements électriques et électroniques (EEE) et a prélevé depuis 1998 de fortes taxes sur le recyclage des équipements qui en contiennent. [17]

Le problème sanitaire et environnemental de la gestion des DEEE en Asie est loin d'être résolu. Ainsi la Chine vient de mettre en place un cadre législatif très contraignant pour interdire les produits toxiques dans la fabrication des EEE. Également, la Thaïlande a formé un haut conseil gouvernemental chargé d'assurer le suivi des directives RoSH et DEEE, et de proposer un plan d'action.

Trois législations majeures et au niveau national ont été esquissées en réponse au problème perçu de direction de DEEE dans Chine. Préparé par les différentes agences du gouvernement, les trois nouvelles législations se fixent sur les différentes étapes de la gestion de DEEE, avec deux projets de lois dans un format similaire à deux directives d'UE sur DEEE et sur RoSH (Restriction des Substances Hasardeuses), et une troisième politique technique fournissant la direction pour la gestion de DEEE l'Administration de Protection Ecologique de l'état (SEPA - State Environmental Protection Administration). Un programme pilote national a été aussi inauguré par le Développement National et la Commission de Réforme (NDRC - National Development and Reform Commission) pour déterminer le modèle le plus convenable pour un système chinois de la gestion de DEEE. En Chine, comme dans les autres pays en développement et industrialisés, le déchet est regardé comme une ressource et une occasion de revenu. Il y a une répugnance générale pour payer le recyclage des déchets et les services de disposition, particulièrement quand les consommateurs peuvent gagner de l'argent en vendant leurs appareils vieux et cassés. En plus, les recherches montrent que les services de collection et disposition des déchets dans les pays en développement coûtent plus haute proportion du revenu moyen que dans les pays développés. Un autre défi pour la réforme de recyclage de DEEE de la Chine et de pratiques de disposition est le manque de conscience des dangers potentiels de DEEE parmi les consommateurs, les collecteurs et recycleurs.

Il y a aussi une différence fondamentale entre les modèles actuels européens de la gestion de DEEE et la réalité de recyclage de DEEE en Chine. Dans le divers Européen et dans le système japonais de recyclage de DEEE, les consommateurs paie pour retourner des appareils de déchets ou les retourne gratuitement. Des compagnies de recyclage peuvent produire le revenu de la vente des appareils rénové, des composants et les matières recyclées, de même que la charge des frais aux producteurs ou aux consommateurs. Cependant, en Chine, un consommateur ou une compagnie espère recevoir le paiement pour leur DEEE, qui est regardé comme une ressource potentiellement valable. Des entreprises de recyclage doivent payer leurs matériels et perdent le revenu supplémentaire de charge de frais. [24]

2.4 DEEE en Turquie

La quantité produite de DEEE en Turquie augmente de jour en jour mais son nombre n'est pas déterminé précisément. Le recyclage et la réutilisation des DEEE ne sont pas considérés suffisamment. De plus, contrairement aux plusieurs pays européens, Turquie n'a pas une infrastructure de la gestion de DEEE. Malgré le manque des législations et des considérations gouvernementales, quelques municipalités locales ont formé des systèmes de collection des DEEEs. A part des municipalités, quelques grands producteurs d'EEE de la Turquie, comme Arçelik, Beko et Vestel, se préparent d'après la directive de DEEE de l'UE. Ils sont en train de reformer leur produit et leur organisation.

La Turquie veut construire son infrastructure aussi rapidement que possible. C'est pour cela, la Turquie a décidé d'appliquer des directives et des politiques de l'UE. Avec cette directive, les producteurs seront responsables du recyclage de DEEE proportionnellement à leur part du marché. Dans cette direction, l'une des activités du Ministère de l'Environnement et de Forêt est l'application des directives sur DEEE. Le gouvernement des Pays-Bas a commencé à un projet pour aider le Ministère de l'Environnement et de Forêt sur l'application en question. On a choisi un Consortium conduit par DHV Environment and Transportation pour diriger ce projet.

L'objectif général du projet est d'aider la Turquie pour son adhésion à l'UE. Il est obligatoire pour la Turquie, étant un candidat de membre, de s'adapter aux directives 2002/96/EEC et 2002/95/EEC. Pour cela le projet se fixe sur le développement d'un cadre institutionnel. [25]

En 2006, la Ministère de l'Environnement et de Forêt et sa présidence de la Gestion des Déchets ont préparé une esquisse de la directive sur DEEE.

Le gouvernement encourage la réduction des déchets et l'utilisation des ressources naturelles et insiste surtout sur la réutilisation, le compost et l'obtention de l'énergie des

déchets. La réutilisation et le recyclage des déchets sont les alternatives les plus favorables au point de vue de l'environnement.

D'après cette esquisse, les consommateurs sont responsables de ne pas mélanger les DEEE avec les autres types de déchets, d'amener leur DEEE aux centres de collection ou de porter leur ancien EEE aux magasins d'EEE.

Les détaillants et les distributeurs sont responsables de reprendre gratuitement les DEEE que les consommateurs ont ramené.

Les producteurs sont responsables de prendre gratuitement les DEEE des consommateurs, des distributeurs, des détaillants et des municipalités. Mais par contre, ils ne sont pas obligés de ramasser les DEEE activement. Ils peuvent réaliser leurs devoirs en s'accommodant avec les entreprises spéciales. Un autre devoir pour les producteurs est de préparer des campagnes instructives pour rendre les consommateurs plus conscients sur les DEEE.

Dans la gestion des DEEE, les municipalités ont aussi des responsabilités, comme par exemple prévenir le mélange des DEEE avec les ordures ménagères dans les zones de déchets. En plus, les municipalités doivent corroborer les producteurs dans leurs campagnes et dans la collection des DEEE. [26]

3. Les Types de Traitement des DEEEs

Etant donné les problèmes écologiques et étant donné la haute valeur résiduelle de DEEE, le système de la gestion de DEEE devrait être établi pour étendre le cycle de vie d'EEE. Ce système de la gestion comprend la collection, la classification, le prétraitement, etc., et cinq conventionnelles stratégies de traitement. Conformément à l'efficacité potentielle économique et écologique, ces stratégies peuvent être classées en cinq catégories : réutilisation, entretien, remanufacture, recyclage et disposition. [24]

Dans cette recherche, les catégories centrales sont le recyclage et la réutilisation.

3.1 Recyclage

Recyclage est l'un des sujets très importants dans la gestion des déchets. Il nous assure le rétablissement des matériels précieux. Utiliser des matériels recyclés au lieu des matières premières aboutit à une économie remarquable en énergie.

Recyclage est une série d'activités qui inclut de collecter des matériels recyclables qui seraient autrement considérés du déchet, de trier et de traiter des recyclables aux matières premières, et de fabriquer les matières premières aux nouveaux produits.

Actuellement, recyclage d'DEEE peut être globalement divisé en trois étapes essentielles:

- *Désassemblage*: C'est le démontage sélectif. Il vise surtout sélectionner les composants hasardeux ou précieux. C'est un processus indispensable et une approche systématique qui permet d'enlever un composant, une partie ou un groupe de parties

d'un produit (c'est à dire désassemblage partiel) ; ou bien séparer un produit dans toutes ses parties (c'est à dire désassemblage complet) pour un certain but.

- *Amélioration*: C'est l'utilisation des traitements mécaniques/physiques et/ou métallurgique pour améliorer le contenu des matériels désirés, c'est à dire la préparation des matériels pour le processus de raffinage.

- *Raffinage*: Dans cette dernière étape, des matériels rétablis retournent à leur cycle de vie.

Un processus mécanique est fait pour améliorer le recyclage d'DEEE, parce qu'il assure un rétablissement complet des matériels dans lesquels des plastiques sont inclus.

La force économique principale pour le recyclage des déchets électroniques est le rétablissement des métaux précieux. Mais quand même, le contenu des métaux précieux dans DEEE diminue continuellement. [8]

La taille des particules, la forme et le degré de libération jouent un rôle très important dans les processus de recyclage mécanique.

En fait, savoir les propriétés de taille est essentiel pour une effective séparation technique. En plus, il est répandu d'améliorer le contenu des métaux par un processus de « screening ».

De nos jours, l'assemblage automatisé des équipements électroniques est bien avancé. Mais malheureusement, une application d'automation dans le désassemblage pour recycler des équipements électroniques est pleine de frustrations. Couramment, il n'y a que quelques projets pour le désassemblage automatisé des claviers, des moniteurs et des PCBs, et il n'y a pas une solution automatisée pour les ordinateurs eux-mêmes.

Pendant que le recyclage a grandi en général, recyclage de matériels spécifiques a grandi même plus radicalement : 50% de tout papier, 34% de toutes bouteilles de

boisson en plastique, 45% de toute bière d'aluminium et les boîtes de boisson, 63% de tout emballage d'acier, et 67% de tous appareils majeurs sont maintenant recyclés.

3.1.1 Les bénéfices de recyclage

- *La conservation des ressources naturelles* : En utilisant des matériels recyclés au lieu des arbres, les minerais et les minéraux en métal, il y a moins de pressions pour augmenter l'exploitation des forêts et extrait la production.
- *Le fournissement des sources des matières premières préférables pour l'environnement*: Recyclage est plus qu'une stratégie de traitement des déchets ; c'est aussi une stratégie importante pour réduire les effets écologiques de production industrielle. L'industrie fournissant avec les matériels recyclés, au lieu des ressources primaires extraites des forêts et des mines, est préférable parce qu'il épargne de l'énergie, réduit de l'air dangereux et des polluants d'eau, émissions tels que de serre gaz, et parce qu'il préserve des ressources naturelles rares.
- *La conservation de l'énergie* : L'économie de l'énergie est un avantage écologique important de recyclage, parce que l'utilisation de l'énergie exige d'habitude que la consommation de fossile carburant et implique les émissions de polluant d'eau et de l'air. L'énergie exigée de fabriquer le papier, les plastiques, le verre et le métal des matériels recyclés est généralement moins que l'énergie exigée de les produire des matières premières. Fournissement plus des matériels recyclés à l'industrie (y compris la collection, traitant et le transport) utilise typiquement moins d'énergie que le fournissement des matières premières à l'industrie (y compris l'extraction, le raffinement, le transport et traitant).
- *La réduction des émissions de la serre gaz* : Une grande quantité d'énergie utilisée dans les procédés industriels et dans le transport implique les carburants de fossile ardents. Recyclage aide la tige des dangers de changement de climat

global en réduisant la quantité d'énergie utilisée par l'industrie, ainsi réduisant les émissions de serre gaz.

3.2 Réutilisation

Pendant les 35 années passées, la quantité de déchets que chaque personne crée à presque doublé de 2,7 à 4,4 livres par jour. La façon plus efficace pour arrêter cette tendance est d'empêcher les déchets en premier lieu. La réduction de ressource se réfère à n'importe quel changement dans la conception, la manufacture, l'achat, ou l'usage de matériels ou de produits (y compris l'emballage) pour réduire leur quantité ou leur toxicité avant qu'ils deviennent des déchets.

L'empêchement de déchet, aussi nommé comme « la réduction de ressource» est la pratique de concevoir, fabriquer, acheter, ou utiliser les matériels (tel que les produits et les emballages) dans les façons qui réduisent la quantité ou la toxicité de déchets créés. Réutiliser des articles sont une autre façon pour arrêter des déchets à la source parce qu'il retarde ou évite cette entrée de l'article dans la collection de déchets et le système de disposition.

La réduction de ressource, y compris réutilisation, peut aider réduire les coûts de traitement des déchets et maniement, parce qu'il évite les coûts de recyclage, de compost municipal, de l'enterrement, et la combustion (incinération). La réduction de ressource préserve aussi des ressources et réduit la pollution, y compris les gaz de serre qui contribuent au réchauffement de l'atmosphère.

Dans beaucoup de cas, les déchets qui ne peuvent pas être empêchés peuvent être réutilisés. Réutiliser aide épargner des ressources naturelles valables.

Réutiliser ou réemployer, c'est prolonger la durée de vie d'un objet en le réparant ou en lui affectant une nouvelle place.

La Directive 2002/96/CE de l'UE définit « réutilisation » comme suivant : toute opération par laquelle des DEEE, ou leurs composants, sont utilisés pour le même usage que celui pour lequel ils ont été conçus, y compris la poursuite de l'utilisation des équipements ou des composants déposés aux points de collecte, chez les distributeurs, chez les recycleurs ou chez les fabricants.

Réutilisation des EEE désigne l'utilisation répétée d'un article pour le même but. Réutilisation étend la vie de produit par le deuxième usage et, si nécessaire, par la réparation préalable. Donc, moins de produits, qui servent pour le but pareil, doivent être produits. Donc, la promotion de réutilisation est souvent considérée comme une mesure convenable pour atteindre deux but-orientés stratégies de traitement des déchets : la réduction de génération de déchets et de conservation de ressource [16]. Réutiliser, en plus étant une alternative écologiquement préférable, profite aussi la société.

3.2.1 Les bénéfices de réutilisation

- *La conservation des ressources naturelles* : Le déchet n'est pas créé juste quand les consommateurs jettent des articles. A travers le cycle de vie d'un produit— de l'extraction de matières premières au transport, au traitement et aux facilités industrielles pour fabriquer et utiliser—le déchet est produit. Réutiliser des articles ou en faire avec moins de matériel diminue des déchets de façon spectaculaire. Finalement, moins de matériels auront besoin d'être recyclé ou être envoyé aux décharges ou les facilités de combustion de déchets.
- *La réduction de la toxicité des déchets* : Choisir des articles sans risque ou moins hasardeux est un autre composant important de réduction de source. Utilisation de moins d'alternatives hasardeuses pour certains articles, partage des produits qui contiennent des produits chimiques hasardeux au lieu d'en jeter, lecture des directions d'étiquette soigneusement, et utilisation de la plus petite quantité nécessaire sont des façons pour réduire de la toxicité de déchets.

- *La réduction des coûts* : Les avantages d'empêcher de déchets vont au-delà de réduire de confiance sur les autres formes de traitement des déchets. L'empêchement des déchets peut signifier aussi des économies pour les communautés, les entreprises, les écoles, et les consommateurs individuels. [27]

4. Modélisation

4.1 Définition du système

Equipements électriques et électroniques sont largement utilisés dans beaucoup de secteurs, de TI à la télécommunication, des appareils médicaux aux appareils électroménagers, etc. Dans cette recherche, on illustre le procédé de production d'un composant standard dans le secteur de télécommunication, et non pas du produit fini entier. Cette décision est prise afin d'éviter la possibilité de travailler dans chaque zone avec différents nombres de semi-produits qui peuvent générer des différentes quantités nécessaires aux niveaux de l'arbre de produit, et d'équilibrer leurs nombres à l'entrée et à la sortie de chaque zone.

Le système existant consiste en une ligne de processus de matière première, une chaîne de montage et trois zones de stockage, l'un pour les matières premières, l'un pour les demi-produits et le dernier pour les produits finis. Chaque opération dans le système est accomplie dans une période de temps. Au début de chaque période, la nouvelle demande est reçue. La demande est normalement distribuée par un moyen de 1000 et par une déviation standard de 150. Les clients viennent à la facilité et obtiennent leur propre ordre deux périodes plus tard.

Les produits vendus peuvent retourner à la facilité à cause de trois raisons majeures :

- EEE est en panne et le consommateur préfère abandonner le produit au lieu de le réparer.

- EEE fonctionne sans problème mais sa plus nouvelle version est introduite au marché. Le consommateur abandonne son produit afin d'obtenir l'un d'une modernité outrée.
- EEE est à la fin de son cycle de vie. Le consommateur l'abandonne.

Quoi que la raison, ceux-ci sont des produits abandonnés et superflus. Alors, selon notre définition précitée, ils sont appelés de l'e-déchet. Ils devraient être traités conformément aux principes de traitement des déchets, cependant, dans le cas existant il n'y a pas d'opération pour le traitement de déchet et ils deviennent des jonques.

Les paramètres du système existant sont les suivants :

D_t : la demande stochastique dans le temps t .

C_H : le coût de processus et de transportation des matières premières.

C_Y : le coût de transportation des matières traitées à la ligne de montage et le coût de montage.

X_t : la quantité de matières premières tirée de la zone de stockage dans le temps t .

S_t : la quantité de stock devant la zone de montage dans le temps t .

TC: le coût total.

4.2 Réingénierie

Réingénierie inclut des changements dans les procédés dans la quête pour l'amélioration significative d'une organisation. Il appelle l'examen et réplannification de tous les aspects des opérations pour les faire plus efficace. C'est la recherche et l'implémentation des changements radicaux dans les processus [28]

Du côté de l'approche de réingénierie, on examine le système existant et le conçoit afin de créer un nouveau qui traite son propre déchet. On ajoute quelques nouveaux centres de procédé et les points de décision pour améliorer l'organisation. On alloue une

nouvelle zone de stockage pour les produits de retour. Dans cette zone, ces produits prêts à être réutilisés et être recyclés sont séparés, contrôlés et réparés, si nécessaire. Dans le champ de recyclage, les déchets venant de la zone de stockage deviennent des matières secondaires. La résiduelle est envoyée à la zone de disposition. Le nouveau système après les arrangements de réingénierie est illustré sur la figure 4.1.

Dans le nouveau système, il est recommandé que les clients amènent leurs e-déchets au centre de collection de déchets. Dans ce centre, les e-déchets sont contrôlés s'ils sont en qualité de retourner à la plante ou pas. S'ils ne sont pas, ils sont directement envoyés à la zone de disposition du centre de collection. Autrement, ils sont amenés à la plante pour être traité.

Les paramètres du nouveau système sont les suivants :

D_t : la demande stochastique dans le temps t .

C_{H1} : le coût de processus et de transportation des matières premières.

C_{H2} : le coût de recyclage et de transportation des matières recyclées.

C_{Y1} : le coût de transportation des matières traitées à la ligne de montage et le coût de montage.

C_{Y2} : le coût de transportation des matières réutilisées à la ligne de montage et le coût de montage.

C_{WC} : le coût pour les opérations dans le centre de la collection des déchets.

C_S : le coût dans la zone de stockage pour les produits retournés (les déchets).

C_R : le coût de transportation des matières recyclées.

C_D : le coût de disposition.

R_t : les produits retournés totaux (DEEE) collectés des clients dans le temps t .

r_1 : pourcentage des DEEEs transportés du centre de la collection des déchets à la plante.

r_2 : pourcentage des DEEEs réutilisés.

r_3 : pourcentage des DEEEs recyclés.

S_t : quantité du stock devant la zone de montage dans le temps t .

X_t : la quantité de matières premières tirée de la zone de stockage dans le temps t .

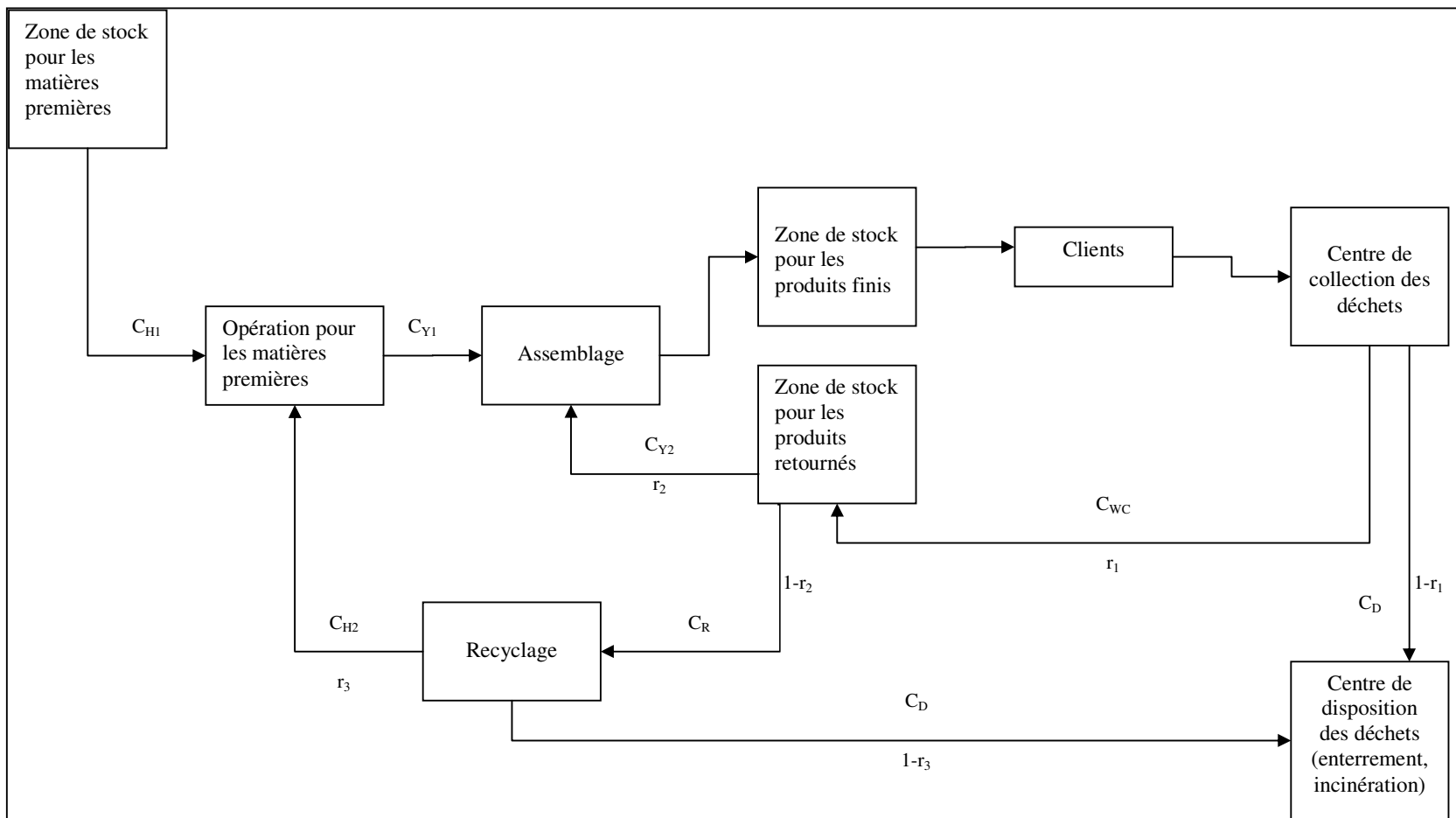


Figure 4.1 Le modèle de production et de traitement de DEEE après les arrangements de réingénierie.

a_1 : le temps nécessaire par unité dans la ligne de processus pour les matières premières.
 a_2 : le temps nécessaire par unité dans la ligne de processus pour les matières secondaires.

b_1 : le temps nécessaire par unité dans la ligne de montage pour les matières traitées.

b_2 : le temps nécessaire par unité dans la ligne de montage pour les matières réutilisées.

H_1 : la capacité du processus des matières première.

H_2 : la capacité du processus des matières recyclées.

M_1 : la capacité du processus de montage des matières traitées.

M_2 : la capacité de la ligne de montage des matières réutilisées.

TC: le coût total.

L'équation du coût total du système est devenue comme suivant :

$$\begin{aligned}
 TC = & (C_{H1} + C_{Y1}) \times \sum_{t=1}^{T-2} X_{t+2} + \sum_{t=1}^T R_t \times r_1 \times r_3 \times (C_{H2} + C_{Y1}) \\
 & + r_1 \times r_2 \left(\begin{aligned} & - \sum_{t=1}^T R_t \times r_3 \times C_{H2} - \sum_{t=1}^T R_t \times r_3 \times C_{Y1} + \sum_{t=1}^{T-2} R_{t+2} \times C_{Y2} \\ & - \sum_{t=1}^{T-2} R_{t+2} \times (1 - r_3) \times C_D - \sum_{t=1}^{T-2} R_{t+2} \times C_R \end{aligned} \right) \\
 & + \sum_{t=1}^{T-2} R_{t+2} \times r_1 (C_{WC} - C_D \times r_3 + C_R) + \sum_{t=1}^{T-2} R_{t+2} \times C_D
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Dans cette équation, on voit des paramètres aux temps différents. Par exemple la quantité des matières premières, X, se trouve dans le temps t+2 ; par contre pour quelques éléments de l'équation, la quantité des produits retournés, R, se trouve dans le temps t. Cette différence vient de la propriété de la durée des opérations. Quand un produit retourne à la plante dans le temps t, ça doit passer 2*t comme la durée pour qu'il soit traité dans la première zone de l'opération avec les matières premières tirées du stock dans le temps t+2. Parce que le produit retourné au temps t passe une unité de temps dans la zone de stockage pour les produits retournés et encore une unité de temps dans la zone de recyclage, et enfin il arrive à la zone de l'opération au temps t+2.

Donc, pour la synchronisation, les matières premières doivent être tirées du stock au temps $t+2$.

La nouvelle séquence de travail du système est montrée sur la figure 4.2., en utilisant le diagramme d'activité du langage de modélisation unifié (UML).

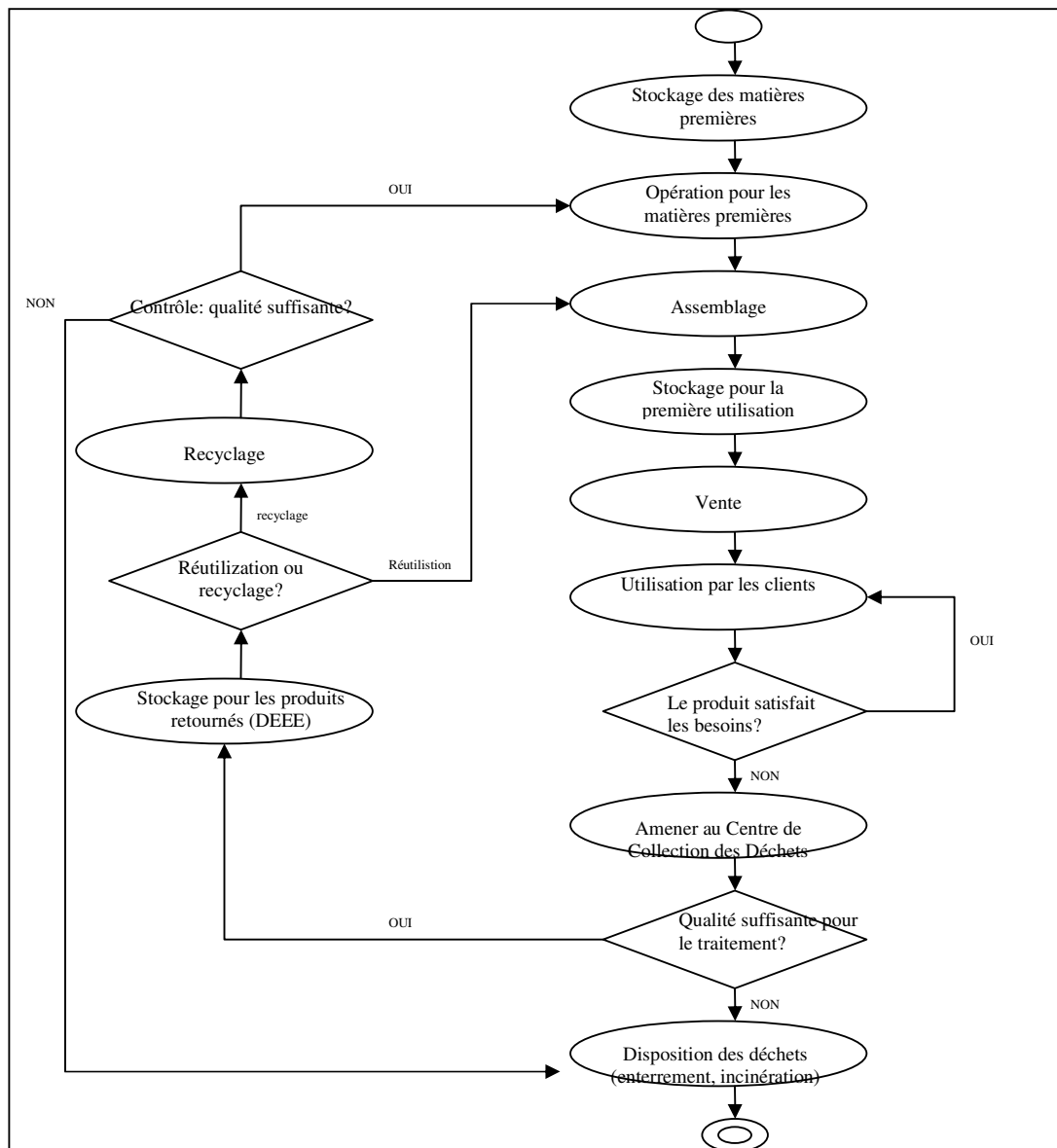


Figure 4.2 La nouvelle séquence de travail illustrée par UML.

5. Application

5.1 Le Changement du Coût Total en fonction du Ratio de Réutilisation

Programmation linéaire sont des problèmes l'optimisation d'une fonction de variables soumises à des contraintes sous forme d'égalité ou d'inégalités non strictes. Elle permet une modélisation assez générale des problèmes rencontrés en gestion et qui sont relativement complexes. [29]

5.1.1 Les Hypothèses du Modèle

Le premier objectif est de comparer les coûts avant et après les arrangements de Réingénierie et de décider où converger pour plus d'efficacité. Afin de comparer les coûts sous plusieurs conditions, on code des situations différentes dans MATLAB et on les calcule pour voir clairement les changements entre deux systèmes. On analyse les changements de pourcentages (r_1 , r_2 et r_3) et les coûts opérationnels un à un, *ceteris paribus*, et leur effet sur le coût total. L'effet de l'augmentation du ratio de réutilisation sur la différence de coûts totaux avant et après Réingénierie est donné sur la Figure 5.1.

Après plusieurs examens, on observe que l'impact du paramètre r_2 , c'est à dire le ratio de réutilisation, est le plus fort que ceux de r_1 et r_3 . Comme on voit sur la Figure 5.1., après ~32% du ratio de réutilisation, le coût total après réingénierie devient inférieur à celui avant réingénierie, car leur différence devient supérieure à 0 dès ce pourcentage.

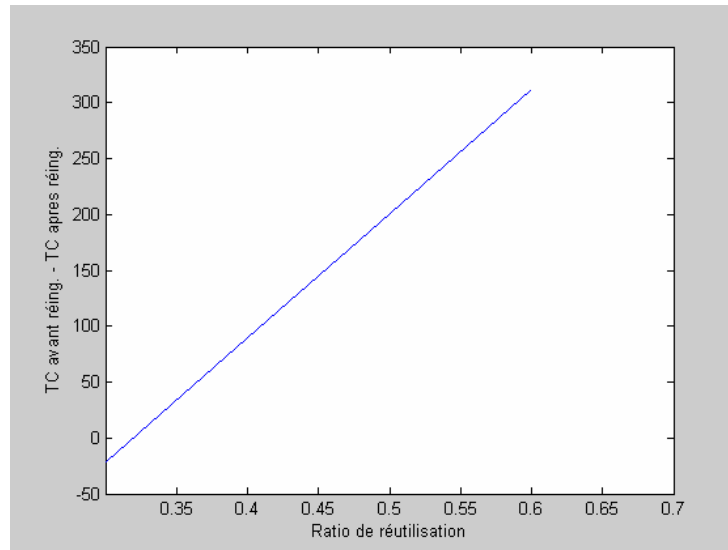


Figure 5.1 L'effet de l'augmentation du ratio de réutilisation (r_2) sur la différence des coûts avant et après les arrangements de réingénierie.

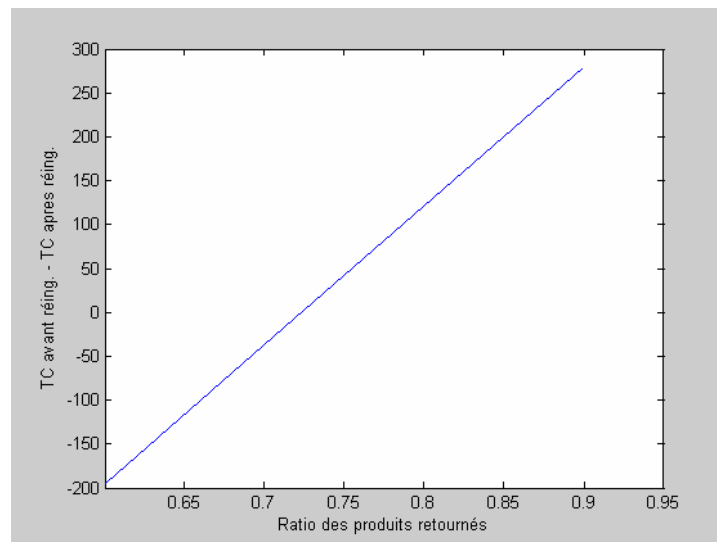


Figure 5.2 L'effet de l'augmentation du ratio des produits retournés (r_1) sur la différence des coûts avant et après les arrangements de réingénierie.

Les ratios des produits retournés et de recyclage sont entre 70-75% pour r_1 et r_3 , comme on observe sur les Figures 5.2. et 5.3. respectivement. On voit clairement que dès ces pourcentages, le droit signifiant l'effet de l'augmentation des ratios sur la différence des coûts avant et après les arrangements de réingénierie change de signe, il passe de la

zone négative à celle positive. Cela veut dire que le coût après réingénierie devient plus petit qu'avant réingénierie. Donc, on décide de continuer l'étude en se fixant sur la chaîne de réutilisation, grâce à sa plus grande contribution au système.

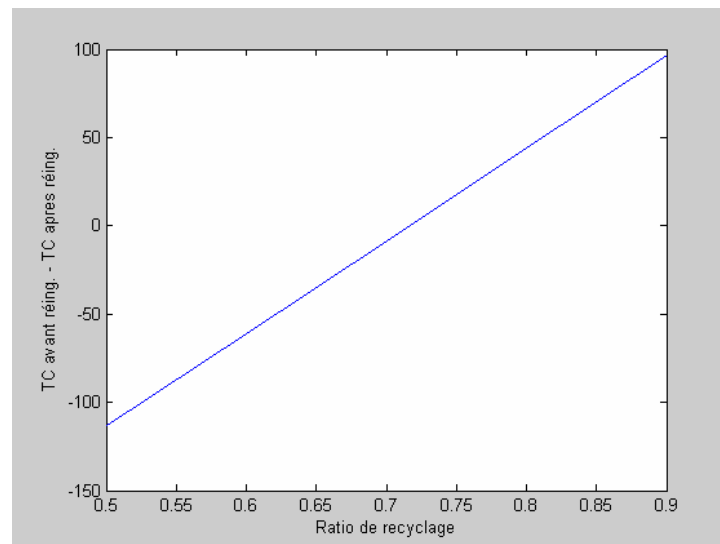


Figure 5.3 L'effet de l'augmentation du ratio de recyclage (r_3) sur la différence des coûts avant et après les arrangements de réingénierie.

5.1.2 L'optimisation

Le deuxième objectif est d'optimiser le nouveau système en utilisant la programmation linéaire. On trouve le ratio optimal de réutilisation et la quantité de matière première, quand le coût total après réingénierie est minimisé.

Les variables de décision :

X_t : la quantité de matières premières tirée de la zone de stockage dans le temps t .

r_2 : pourcentage des DEEEs réutilisés.

La fonction objectif :

$$\begin{aligned}
 \text{Min}Z &= (C_{H1} + C_{Y1}) \times \sum_{t=1}^{T-2} X_{t+2} - (C_{H2} + C_{Y1}) \times \sum_{t=1}^T R_t \times r_1 \times r_2 \times r_3 \\
 &- \sum_{t=1}^{T-2} R_{t+2} \times (1 - r_3) \times C_D \times r_1 \times r_2 - \sum_{t=1}^{T-2} R_{t+2} \times C_R \times r_1 \times r_2 \\
 &+ \sum_{t=1}^{T-2} R_{t+2} \times C_{Y2} \times r_1 \times r_2 + M
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Cette fonction objectif est une dérivée de l'équation (4.1) du coût total TC. Puisque la fonction objectif est un élément des problèmes d'optimisation et que l'on fait l'optimisation avec les variables de décisions, ici, on élimine les composants qui ne possèdent pas les variables de décisions et on les renomme comme constant M.

Les équations de balance :

$$X_{t+2} + R_t \times r_1 \times (1 - r_2) \times r_3 = S_{t+3} \tag{5.2}$$

$$S_{t+3} + R_{t+2} \times r_1 \times r_2 = D_{t+4} \tag{5.3}$$

Ces équations de balance sont pour l'entrée de la zone d'assemblage. Les quantités des matières premières et secondaires sont égales à la quantité du stock placée devant la ligne d'assemblage. En plus, cette quantité de stock avec la quantité des composants prêts à être réutilisés doivent être égales à la demande de la période t+4. La différence entre les temps des paramètres, comme R_t , X_{t+2} , S_{t+3} et D_{t+4} , vient des durées des opérations pour chaque étape, comme on a déjà expliqué. Si un produit retourne à la plante au temps t, alors il doit y passer $2 \times t$ pour qu'il arrive à la première zone de l'opération afin d'être traité avec les matières premières tirées du stock au temps t+2, et

puis après être traité pendant une unité de temps t dans la première zone, il doit se trouver dans la zone de stockage devant la ligne d'assemblage au temps $t+3$. Ce même produit doit composer la demande du temps $t+4$ avec les composants prêts à être réutilisés après être assemblé pendant une unité de temps t .

Les explications pareilles peuvent être données pour les contraintes de capacité suivantes.

Les contraintes de capacité:

$$a_1 \times X_{t+2} \leq H_1 \quad (5.4)$$

$$a_2 \times R_t \times r_1 \times (1 - r_2) \times r_3 \leq H_2 \quad (5.5)$$

$$b_1 \times (X_{t+2} + R_t \times r_1 \times (1 - r_2) \times r_3) \leq M_1 \quad (5.6)$$

$$b_2 \times R_t \times r_1 \times r_2 \leq M_2 \quad (5.7)$$

$$X_t \geq 0 \quad (5.8)$$

$$0 \leq r_2 \leq 1 \quad (5.9)$$

(5.8) est l'équation de non négativité et (5.9) précise les bornes inférieures et supérieures du ratio de réutilisation.

On a résolu le problème linéaire en utilisant MATLAB, qui est un logiciel de calcul numérique. La fonction convenable dans MATLAB était « linprog ». Pour trois différents scénarios ; $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$, $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$, et $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$, on a obtenu des solutions pour $T = 12$. Afin d'acquérir des résultats

statistiques, on a répété la même procédure 30 fois. Les résultats optimaux du ratio de réutilisation, de la quantité des matières premières et du coût total sont sur les tableaux 1 et 2.

Tableau 5.1 Les résultats moyens de la programmation linéaire

	Scénario-1 $CH_1=CH_2$ et $CY_1=CY_2$	Scénario-2 $CH_1<CH_2$ et $CY_1<CY_2$	Scénario-3 $CH_1>CH_2$ et $CY_1>CY_2$
X_t^*	976	980	993
r_2^*	0,9056	0,8964	0,9140
TC*	3,89*1e+005	3,9019*1e+005	3,95*1e+005

Le résultat qu'on déduit du tableau 5.1 est de réutiliser à peu près les mêmes pourcentages des produits retournés, d'après les scénarios 1, 2 et 3. Mais il y a quand même des différences entre les ratios optimaux de réutilisation. Ces différences génèrent du coût et de la variation des distributions de D_i et R_i . Puisque les coûts après les arrangements de réingénierie dans le scénario-1 sont inférieurs aux ceux dans le scénario-2, il doit y avoir un plus grand ratio de réutilisation dans le scénario-1 et le système préfère ce qui est moins coûteux. Par le même raisonnement, puisque les coûts après les arrangements de réingénierie dans le scénario-3 sont inférieurs aux ceux dans le scénario-1, il doit y avoir un plus grand ratio de réutilisation dans le scénario-3 et le système préfère ce qui est moins coûteux. Donc on peut conclure qu'il existe une proportion inverse entre le ratio de réutilisation et les coûts de réutilisations.

Un autre résultat déduit du même tableau est le parallélisme entre les quantités optimales de X_t et les coûts totaux correspondants aux trois scénarios différents. On y observe que quelque soit le scénario, le coût total augmente, quand X_t^* augmente aussi. Donc, la minimisation du coût étant l'objectif du problème, l'augmentation de la quantité des matières premières tirée de la zone de stockage est un cas indésirable.

Alors, ce que l'on doit recommander aux producteurs est d'essayer d'augmenter les ratios de réutilisation au plus haut possible, d'où acheter/tirer beaucoup plus moins des matières premières. Donc, le premier but des producteurs d'EEE doit être créer des processus moins coûteux pour augmenter les ratios de réutilisation dans le contexte de traitement d'e-déchet.

Tableau 5.2 Les résultats de la programmation linéaire

Scénario-1			Scénario-2			Scénario-3		
TC* (1.0e+005)	r2*	Xt*	TC* (1.0e+005)	r2*	Xt*	TC* (1.0e+005)	r2*	Xt*
4,0818	0,8606	1017	3,8671	0,838	907	3,7957	0,8354	941
3,7601	0,862	1001	3,8329	0,9606	984	3,9598	1	1045
4,0049	1	1013	4,0060	0,8613	998	3,7808	0,9945	888
3,7789	1	1020	4,0611	0,8782	986	3,9612	0,8548	926
3,9270	1	1019	3,9204	0,8396	1012	3,9064	0,9822	1018
3,8215	0,9239	924	3,7371	1	934	3,7409	0,8526	929
4,0187	0,9271	962	3,7816	1	949	3,8187	0,9525	950
3,9595	0,9146	959	3,7534	0,9221	983	3,8371	0,8628	959
4,0914	1	963	3,7573	0,8352	977	4,0285	0,8936	958
4,0608	0,8498	963	3,9197	0,9419	1046	3,9486	0,8334	1026
3,9474	0,8671	955	3,8970	0,8433	1002	3,5160	0,9012	960
4,0045	0,8717	925	3,8095	1	990	4,0613	0,9249	976
3,6713	0,9193	988	3,9655	0,8759	1057	3,7468	0,8592	963
4,0262	1	1061	3,7332	0,8778	970	0,3878	0,9261	976
3,9823	0,8662	1031	3,9189	0,9052	994	4,0864	0,841	967
3,9347	0,8874	978	4,0690	1	934	3,9928	0,8366	947
3,5956	0,8639	869	3,8570	0,8558	963	3,9741	0,8692	975
4,0801	0,9148	928	3,6754	0,8995	981	3,7026	0,8367	1001
3,7281	0,8656	981	3,8018	0,865	946	3,6260	0,9083	960
3,7072	0,8758	969	3,8520	0,8958	1026	4,0032	0,9738	998
3,9643	1	993	4,0213	0,9058	961	3,8605	0,9062	1009
3,9015	1	1021	3,7963	1	929	3,4622	0,8489	966
4,0922	0,8559	972	3,8994	1	963	3,7487	0,8768	1031
4,2863	0,8799	938	4,0913	0,8884	1010	3,7612	0,8914	1054
3,8458	0,8857	968	3,7164	0,9876	985	3,9638	0,8788	917
3,8408	0,8385	999	4,0828	0,9129	977	3,8068	1	991
4,0323	0,9377	960	4,0778	0,9722	945	3,5368	0,8521	1026
3,8633	1	1001	3,7447	1	1097	4,0145	0,9116	981
3,7814	0,8626	996	4,0438	0,8936	962	3,9467	0,9264	1008
3,9515	0,8427	1006	4,0133	0,8425	1048	3,7961	0,8382	969

Afin d'accroître les ratios de réutilisation, les producteurs doivent reformer leur ligne de production et leurs produits, et attacher plus d'importance à la modularité et à l'utilisation des composants standard. A la fin, ils vont obtenir un coût total inférieur et un surcroît de productivité.

Quand on analyse les ratios optimaux de réutilisation pour trois scénarios, on constate rapidement qu'ils sont déjà des valeurs assez hautes, très proches à 1. Cela veut dire, quel que soit le scénario, réutiliser est toujours favorable grâce à sa contribution au système par la réduction d'utilisation des nouvelles ressources qu'il assure.

Les graphes appartenant aux changements des coûts totaux pour 30 tours sous trois scénarios différents sont donnés sur les figures 4, 5 et 6.

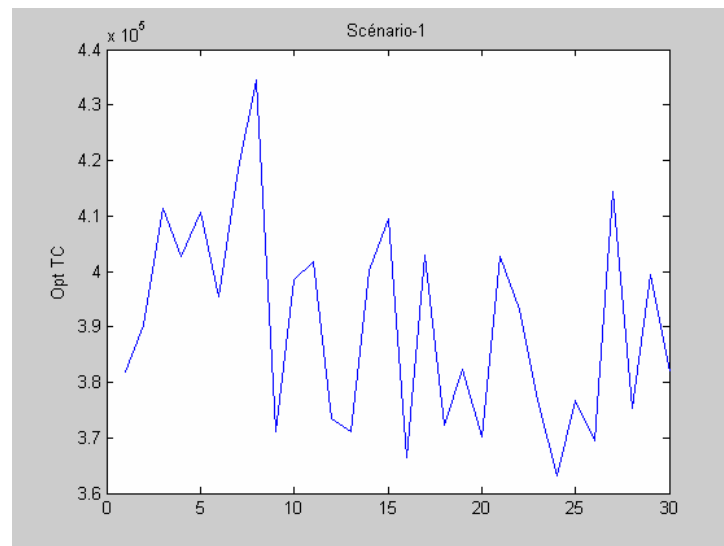


Figure 5.4 Le changement du coût total quand $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$

Quand on regarde les Figures 5.4, 5.5, et 5.6., on peut dire que pour les scénarios 1 et 3, les coûts optimaux en majorité ont la tendance d'être au dessous de la valeur moyenne, bien que pour chaque scénario la valeur moyenne des coûts optimaux soient à peu près la même.

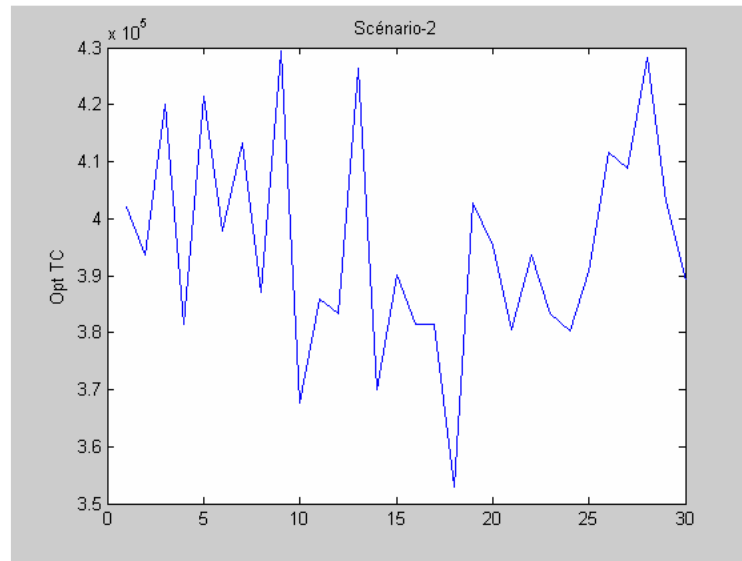


Figure 5.5 Le changement du coût total quand $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$

En plus, bien que la valeur moyenne la plus élevée appartienne au scénario-3, dans le scénario-2 il y a plus des valeurs au-dessus de la moyenne que dans le scénario-3.

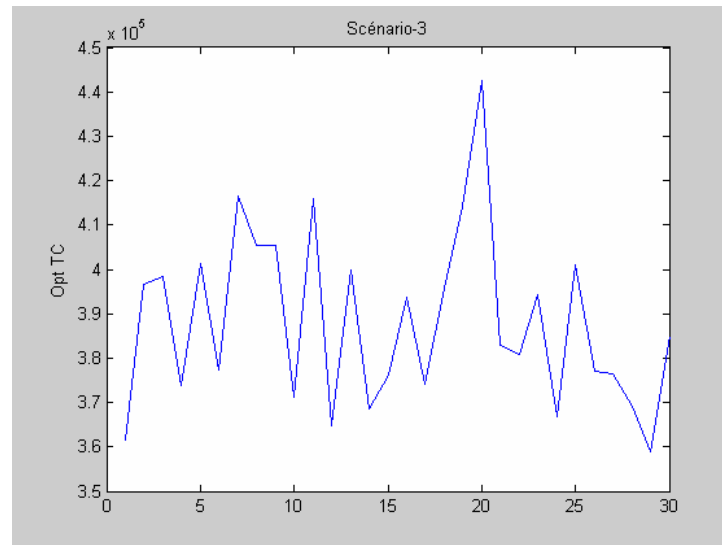


Figure 5.6 Le changement du coût total quand $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$

On a tracé trois graphes qui montrent les ratios optimaux de réutilisation pendant le temps, quand $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$, $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$, et $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$. Les graphes sont vus sur la figure 7, la figure 8 et la figure 9 respectivement.

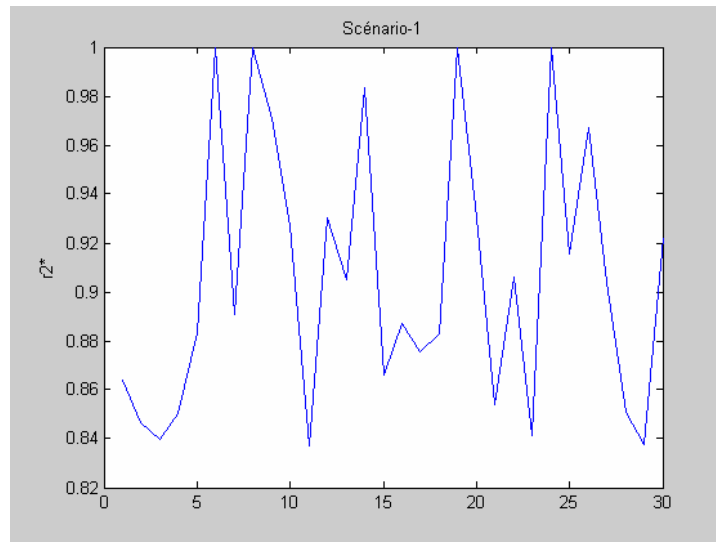


Figure 5.7 Le ratio optimal de réutilisation quand $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$

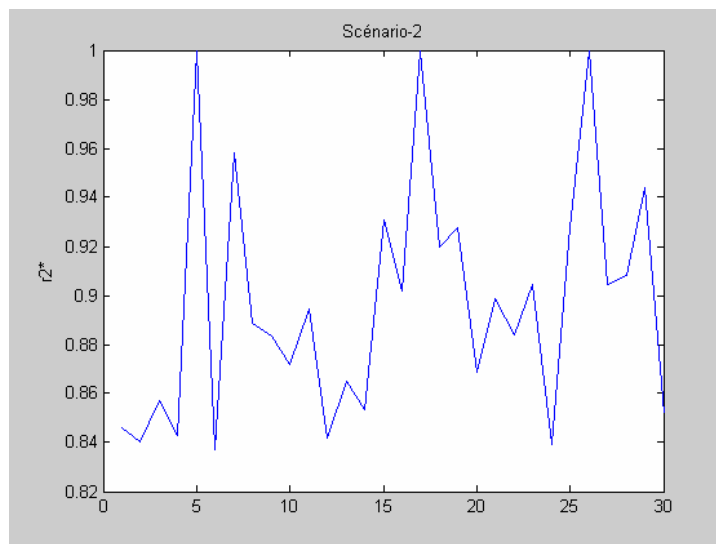


Figure 5.8 Le ratio optimal de réutilisation quand $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$

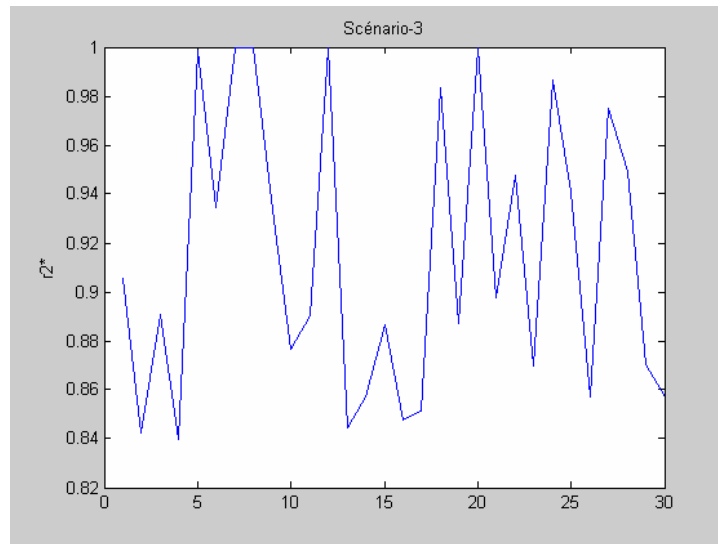


Figure 5.9 La quantité optimale des produits retournés quand $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$

Pour les Figures 5.7., 5.8., et 5.9. on peut constater que l'allure des ratios optimaux de réutilisation est à peu près même pour les trois scénarios différents.

5.2 Le Changement du Coût Total en fonction du Ratio de Réutilisation et du Ratio de Recyclage

Le nouveau but de la recherche dans cette étape est d'analyser les effets complémentaires de recyclage. Pour cela, on a ajouté une nouvelle variable de décision au système. La variable de décision ajoutée est le ratio de recyclage, c'est à dire r_3 . D'où le problème est devenu non linéaire par la multiplication de deux variables r_2 et r_3 . La programmation non linéaire étudie le cas général dans lequel l'objectif ou les contraintes (ou les deux) contiennent des parties non linéaires.

Les variables r_2 et r_3 sont indépendantes. Donc, la nouvelle équation pour le coût total est devenue comme celui-ci :

$$\begin{aligned}
TC &= (C_{H1} + C_{Y1}) \times \sum_1^{T-2} X_{t+2} + r_1 \times \left(\sum_1^{T-2} R_{t+2} (C_{Y2} - C_D) - \sum_1^T R_t \times C_R \right) \times r_2 \\
&+ r_1 \times \left(\sum_1^T R_t (C_{H2} + C_{Y1}) - \sum_1^{T-2} R_{t+2} \times C_D \right) \times r_3 \\
&- r_1 \times \left(\sum_1^T R_t \times (C_{H2} + C_{Y1}) - \sum_1^{T-2} R_{t+2} \times C_D \right) \times r_2 \times r_3 \\
&+ \sum_1^{T-2} R_{t+2} \times (r_1 \times C_{WC} + C_D) + \sum_1^T R_t \times r_1 \times C_R
\end{aligned} \tag{5.10}$$

La nouvelle équation du coût total est trouvée par la même logique que (4.1). Seule différence est que cette fois ci r_3 est considéré aussi comme la variable de décision.

La fonction objectif de la programmation non linéaire:

$$\begin{aligned}
MinZ &= (C_{H1} + C_{Y1}) \times \sum_1^{T-2} X_{t+2} + r_1 \times \left((C_{Y2} - C_D) \times \sum_1^{T-2} R_{t+2} - C_R \times \sum_1^T R_t \right) \times r_2 \\
&+ r_1 \times \left((C_{H2} + C_{Y1}) \times \sum_1^T R_t - C_D \times \sum_1^{T-2} R_{t+2} \right) \times r_3 \\
&- r_1 \times \left((C_{H2} + C_{Y1}) \times \sum_1^T R_t - C_D \times \sum_1^{T-2} R_{t+2} \right) \times r_2 \times r_3 + K
\end{aligned} \tag{5.11}$$

Cette fonction objectif est aussi une dérivée de la nouvelle équation (5.10) du coût total TC. Puisque la fonction objectif est un élément des problèmes d'optimisation et que l'on fait l'optimisation avec les variables de décisions X_t , r_2 et r_3 , ici, on élimine les composants qui ne possèdent pas les variables de décisions et on les renomme comme constant K .

L'équation de balance de la programmation non linéaire:

$$X_{t+2} + R_{t+2} \times r_1 \times r_2 + R_t \times r_1 \times r_3 - R_t \times r_1 \times r_2 \times r_3 = D_{t+4} \quad (5.12)$$

L'équation (5.12) s'est dérivée des équations (5.2) et (5.3) par le même raisonnement, mais avec une seule différence qui est la variable de décision ajoutée r_3 .

Les contraintes de capacité de la programmation non linéaire:

$$a_1 \times X_{t+2} \leq H_1 \quad (5.13)$$

$$a_2 \times R_t \times r_1 \times r_3 - a_2 \times R_t \times r_1 \times r_2 \times r_3 \leq H_2 \quad (5.14)$$

$$b_1 \times X_{t+2} + b_1 \times R_t \times r_1 \times r_3 - b_1 \times R_t \times r_1 \times r_2 \times r_3 \leq M_1 \quad (5.15)$$

$$b_2 \times R_t \times r_1 \times r_2 \leq M_2 \quad (5.16)$$

$$X_t \geq 0 \quad (5.17)$$

$$0 \leq r_2 \leq 1 \quad (5.18)$$

$$0 \leq r_3 \leq 1 \quad (5.19)$$

Les solutions optimales TC^* , r_2^* , r_3^* et X_t^* données sur le tableau 5.3. sont les moyens des solutions de 30 cycles. On y voit, comme dans le tableau 5.1 de la programmation linéaire, que les coûts totaux optimaux des trois scénarios ont une tendance parallèle à

celle des quantités optimales des matières premières. Quand on doit tirer plus de X_t , alors le coût total augmente. Donc on peut dire que même si les ratios de recyclage et de réutilisation augment ou diminuent, le coût total varie d'après la quantité optimale de X_t . D'où la conclusion est assez claire ; les producteurs doivent chercher les chemins de diminuer les X_t pour avoir un coût minimal. Deux des chemins que l'on recommande ici est le recyclage et la réutilisation.

Tableau 5.3 Les résultats moyens de la programmation non linéaire

	Scénario-1 $CH_1=CH_2$ et $CY_1=CY_2$	Scénario-2 $CH_1<CH_2$ et $CY_1<CY_2$	Scénario-3 $CH_1>CH_2$ et $CY_1>CY_2$
X_t^*	823	828	817
r_2^*	0,9034	0,9344	0,8992
r_3^*	0,1514	0,0789	0,9081
TC^*	3,9627e+005	3,9940e+005	3,9310e+005

On observe aussi sur le tableau-5.3 que les quantités optimales des matières premières X_t montrent des variations différentes selon les changements des ratios de recyclage et de réutilisation. X_t^* diminue pendant que r_3^* augmente, par contre il augmente quand r_2^* augmente en même temps. Logiquement, la diminution de X_t^* doit résulter de l'augmentation des ratios de recyclage ou de réutilisation car plus on recycle ou réutilise les déchets, moins on achète des matières premières. A l'opposé de r_2^* , le changement de X_t^* d'après r_3^* assure ce raisonnement. La cause de cette déviation de X_t^* peut être engendrée de celle de la distribution uniforme de R_t . Alors, les producteurs doivent viser à éliminer les déviations dans la distribution des produits retournés pour atteindre à une quantité définie de R_t , et d'où à obtenir des situations moins déviées.

Tableau 5.4 Les résultats de la programmation non linéaire

Scénario-1				Scénario-2				Scénario-3			
TC* (1.0e+005)	r2*	r3*	Xt*	TC* (1.0e+005)	r2*	r3*	Xt*	TC* (1.0e+005)	r2*	r3*	Xt*
4,1800	0,8364	0	869	3,9400	1	0,1889	818	4,0172	0,8801	1	834
4,0133	0,8735	0	834	4,1093	0,9396	0	854	3,8428	0,8636	1	799
4,2626	1	0,1705	887	3,8780	0,9741	0	804	3,7878	0,8547	1	787
3,7296	1	0	775	4,0802	0,8376	0	845	3,9195	0,9817	1	816
4,2231	1	0,1603	878	3,9417	1	0,1736	818	3,8428	1	0,82	797
3,5727	0,8442	0	743	4,1833	1	0	869	3,8583	1	0	803
4,0599	0,9321	0	844	3,9663	0,8406	0	822	3,7928	1	0	790
4,0150	1	0	835	3,7715	0,8484	0	782	4,1101	1	1	855
3,9188	0,8844	0	814	4,0642	1	0	843	4,1355	0,8658	1	859
3,7794	1	0,168	786	3,9051	0,9109	0	811	3,9150	1	0,905	813
3,8733	0,9841	0	805	3,9640	0,9765	0	823	3,8772	0,8536	1	805
4,0655	0,837	0	845	3,9721	1	0,19	823	3,9742	0,8883	1	826
4,1566	1	0	864	3,9152	0,836	0	811	4,1091	0,9092	1	854
4,0623	0,9432	0	844	3,9460	1	0,2286	820	4,0512	0,9013	1	842
3,8919	0,8355	0	809	4,2853	1	0,1639	888	4,1463	0,8893	1	861
4,0973	0,8734	0	851	4,0921	0,8365	0	848	3,9357	0,8343	1	817
3,7755	1	0	785	3,9116	1	0,1602	811	3,8774	0,8682	1	805
4,0158	0,9213	1	833	4,1073	1	0,1595	853	4,0754	0,9533	1	848
4,1798	0,8564	0,9545	867	4,1520	0,878	0	860	3,7924	0,8928	1	788
3,8017	0,8527	0,9266	788	4,1520	0,8392	0	862	3,9676	0,8516	1	824
3,8675	1	0	804	4,0773	1	0,2358	847	3,8133	0,9904	1	794
4,0318	0,8827	0	838	3,7724	1	0,1697	782	3,7032	0,8549	1	768
3,8830	1	0	807	3,9865	0,8596	0	827	4,1062	0,8749	1	853
3,9205	0,8389	0	815	3,8261	0,8586	0	794	3,6777	0,9897	1	765
4,1667	1	0	866	4,0228	1	0	834	4,0240	0,9134	1	836
4,1701	0,8349	0	867	3,9560	1	0,1881	821	4,0870	0,9584	1	850
3,4703	1	0	721	3,8018	1	0	789	3,7847	0,9009	1	786
4,0000	1	1	831	3,9726	0,8386	0	823	3,7983	0,8386	1	788
3,5461	0,9394	0	737	4,2281	1	0,1611	877	3,9070	0,835	0,8094	811
4,1507	0,9397	0	863	3,8377	1	0,1621	795	4,0010	0,9219	1	832

Quant aux ratios de recyclage et de réutilisation, on constate que ceux de réutilisation ont encore une fois, des valeurs élevées et très proches à l'un à l'autre, comme dans la programmation linéaire. Cela encore montre que la réutilisation est favorable pour le système afin de minimiser le coût total et la consommation des matières premières. Par contre, les ratios optimaux de recyclages varient dans un plus grand intervalle. Cela

revient de la différence des coûts de recyclage et de réutilisation. Le coût de recyclage est plus élevé que celui de réutilisation, donc pour les scénarios 1 et 2, c'est à dire pour les cas où $C_{H2} = C_{H1}$ ou $C_{H2} > C_{H1}$, le processus de recyclage est beaucoup plus cher pour le système. Par conséquent, pour ces deux scénarios, la programmation préfère recycler beaucoup moins de déchets afin de minimiser le coût total. Puisque le coût de réutilisation n'est pas élevé, on n'observe pas un long intervalle pour ses valeurs optimales.

Les solutions optimales de ces quatre paramètres pour chaque cycle (30 cycles) sont sur le tableau 5.4. Ce tableau donne les résultats détaillés de la programmation non linéaire.

Les graphes appartenant au scénario-1 sont les suivantes :

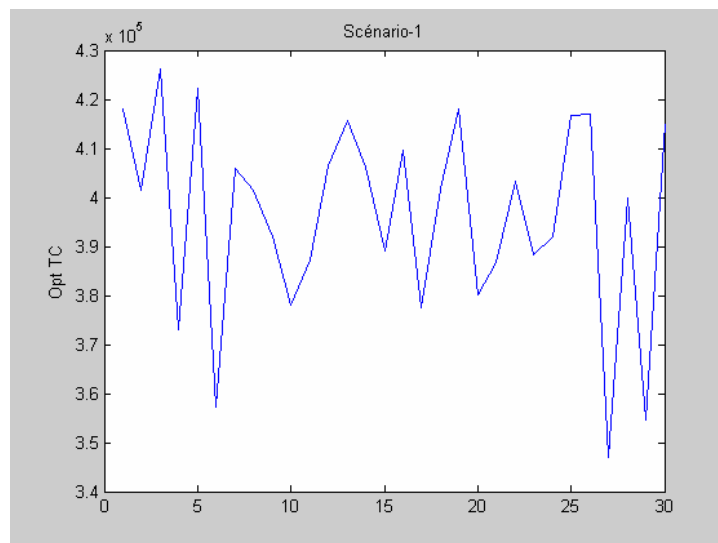


Figure 5.10 Le changement du coût total quand $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$

Le coût total optimal montre une tendance moyenne en général mais pour 3 cycles, il montre des chutes.

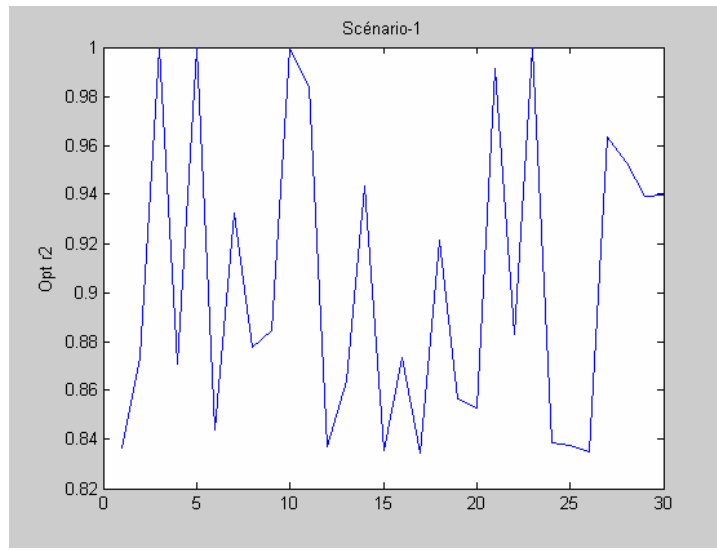


Figure 5.11 Le ratio optimal de réutilisation quand $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$

On voit sur la figure 5.11. que le ratio optimal de réutilisation varie entre une petite intervalle.

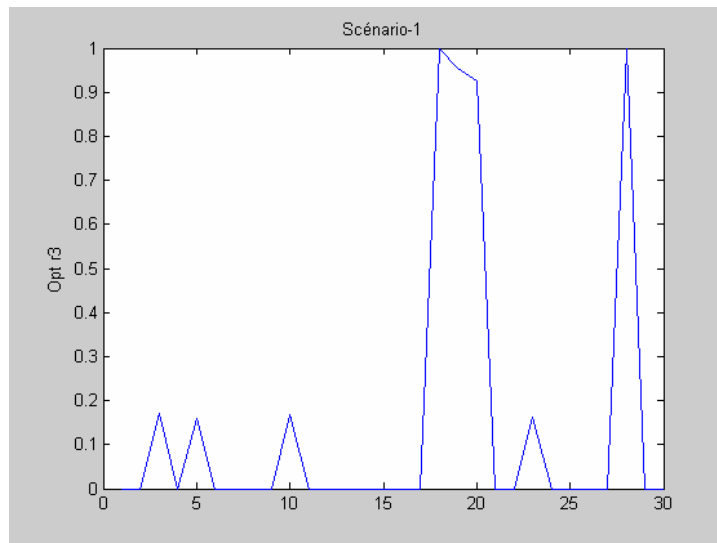


Figure 5.12 Le ratio optimal de recyclage quand $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$

On voit sur la figure 5.12. que le ratio optimal de recyclage est très varié. Il prend des valeurs 0 et 1. Il n'a pas une tendance dans un intervalle plus précis.

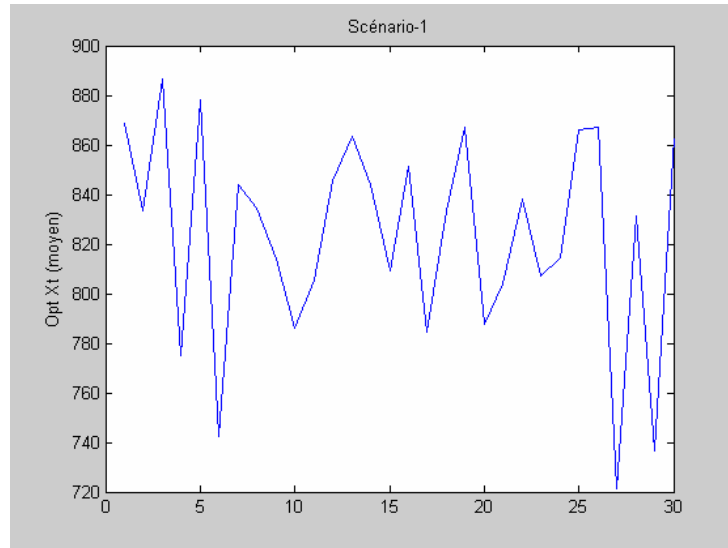


Figure 5.13 La quantité optimale de X_t quand $C_{H1} = C_{H2}$ et $C_{Y1} = C_{Y2}$

Les graphes appartenant au scénario-2 sont les suivantes :

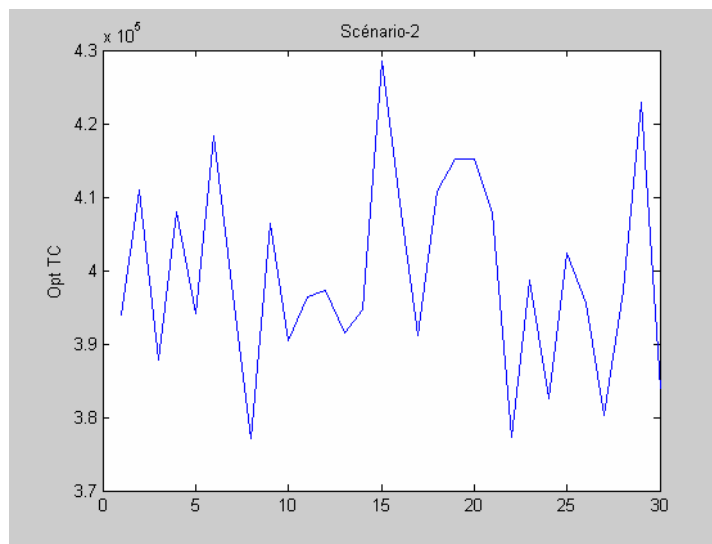


Figure 5.14 Le changement du coût total quand $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$

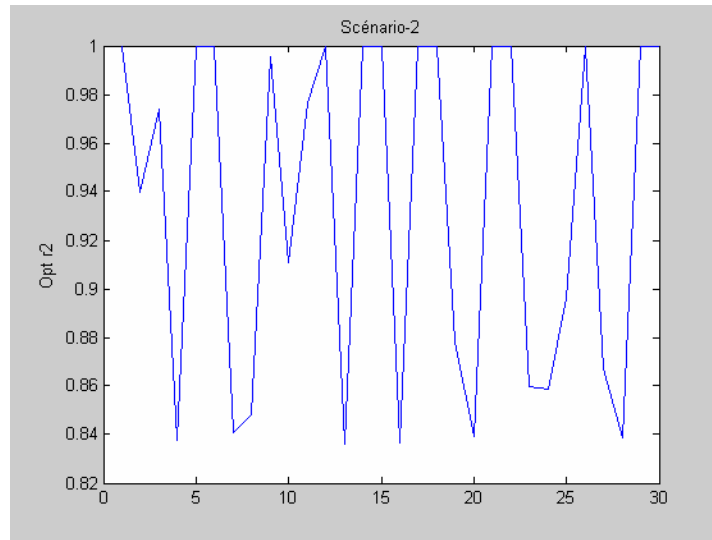


Figure 5.15 Le ratio optimal de réutilisation quand $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$

Sur la figure 5.15. on observe que le ratio optimal de réutilisation varie encore une fois dans un petit intervalle mais cette fois ci il montre des variations brusques. Soit il prenne sa valeur maximale soit il prenne sa valeur minimale.

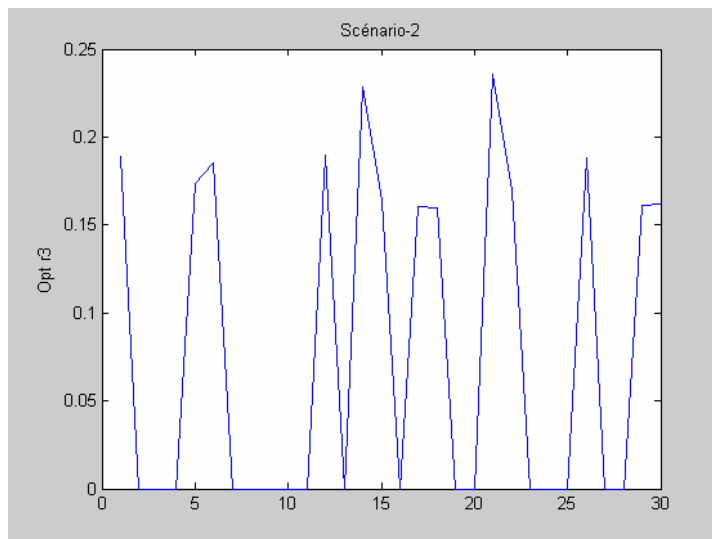


Figure 5.16 Le ratio optimal de recyclage quand $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$

Sur la figure 5.15. on observe que le ratio optimal de recyclage varie cette fois ci, à l'opposite du scénario précédent, dans un petit intervalle, entre 0 et ~ 0.25 .

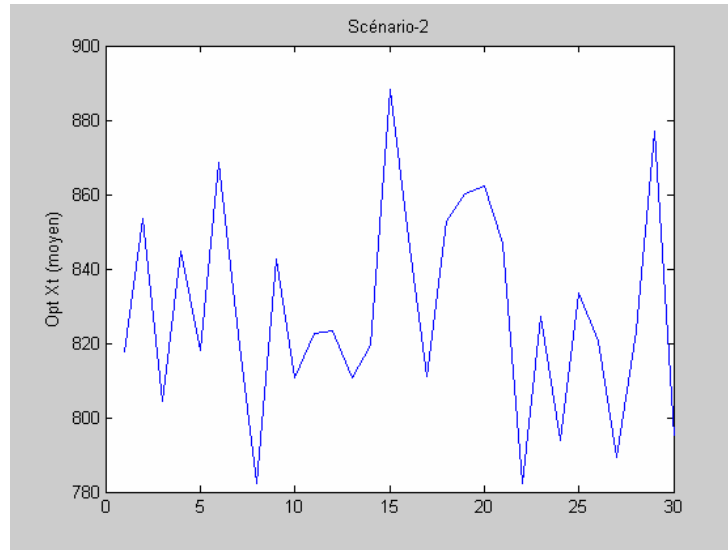


Figure 5.17 La quantité optimale de X_t quand $C_{H1} < C_{H2}$ et $C_{Y1} < C_{Y2}$

Les graphes appartenant au scénario-3 sont les suivantes :

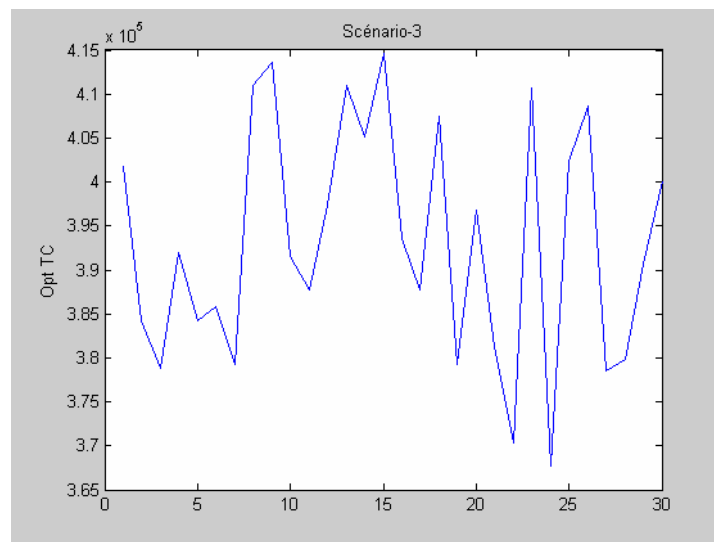


Figure 5.18 Le changement du coût total quand $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$

On voit sur la figure 5.18. que les coûts optimaux prennent des valeurs très variées à chaque cycle.

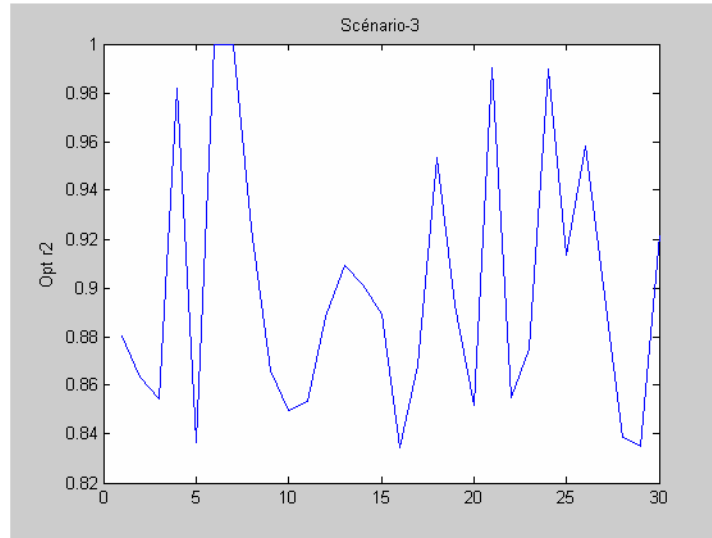


Figure 5.19 Le ratio optimal de réutilisation quand $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$

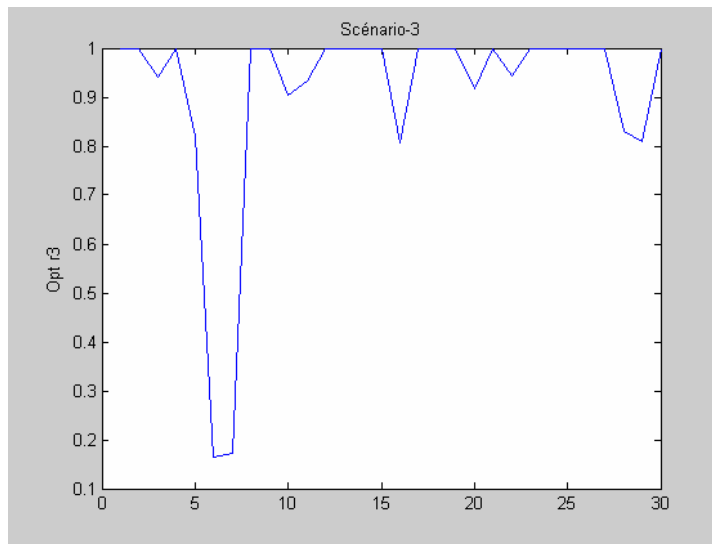


Figure 5.20 Le ratio optimal de recyclage quand $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$

Sur la figure 5.20. on voit la meilleure performance de ratio de recyclage. Sauf deux cycles, les valeurs sont beaucoup élevées et elles sont en majorité égales à 1.

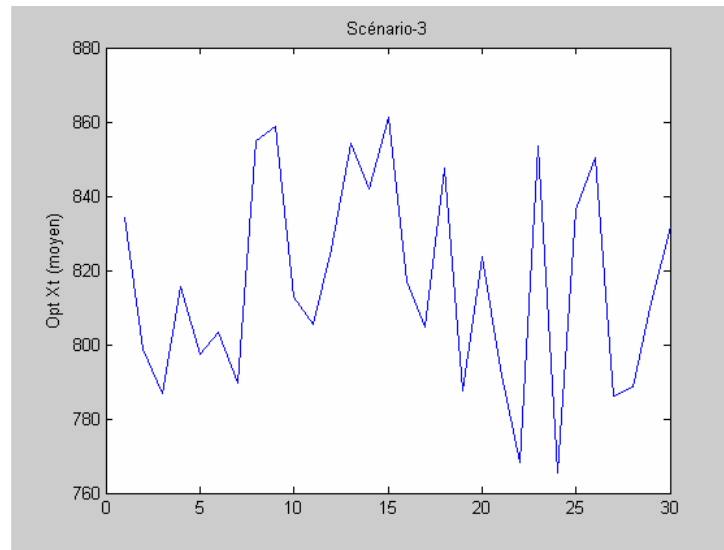


Figure 5.21 La quantité optimale de X_t quand $C_{H1} > C_{H2}$ et $C_{Y1} > C_{Y2}$

Quant à la comparaison des solutions de la programmation linéaire et non linéaire, la différence la plus remarquable est celle des quantités optimales des matières premières achetées/tirées de la zone de stockage. Dans le problème linéaire, ces quantités sont {976, 980, 993}, en contrepartie dans le problème non linéaire elles sont {823, 828, 817}. On observe qu'il faut au moyen 160 unités de plus si l'on n'est que dans la chaîne de la réutilisation. Il est clair que quand le problème devient non linéaire par l'ajoutage de la chaîne de recyclage, les quantités optimales des matières premières achetées/tirées de la zone de stockage diminuent d'une façon évidente grâce à la contribution de la chaîne de recyclage au système.

Un autre point remarquable dans la comparaison est la supériorité des coûts totaux du problème non linéaire pour les scénarios 1 et 2. Pour le scénario 3, cette supériorité s'est détériorée à cause de la haute valeur du coût total du problème linéaire mais comme on a déjà précisé, cette détérioration génère de la déviation de la distribution des produits retournés. Malgré cette déviation dans le problème linéaire, la tendance générale des coûts totaux est raisonnable. Pendant que les ratios de recyclage dans le problème non linéaire augmentent, les quantités de matières premières diminuent, d'où la diminution des coûts.

En conclusion, on a obtenu les ratios de réutilisation assez élevés dans l'optimisation de deux types de problèmes. Alors il faut les accroître au plus haut niveau possible en reformant la ligne de production et recréant les EEE selon les conceptions de modularité et de standardisation. Dans le problème non linéaire, bien que les ratios de recyclage montrent des grandes variabilités, ils augmentent de plus en plus inversement proportionnellement aux coûts totaux. Donc, dans ce cas-là, les quantités optimales des matières premières réduisent d'une façon remarquable. Pour lors, ce que l'on doit conseiller aux producteurs d'EEE est d'essayer d'accroître les ratios de réutilisation et de recyclage et de diminuer les coûts après les arrangements de réingénierie pour la réduction d'utilisation des ressources. Certes, les coûts additionnels sont ajoutés au système après l'installation des opérations de réutilisation et de recyclage au point de vue de réingénierie. Le processus de production devient plus cher. Quand même il n'est pas très difficile de trouver le coût minimal de ce processus plus cher. Comme dans cette recherche, on peut obtenir des solutions optimales pour le coût total et elles peuvent être visées par l'organisation.

6. Conclusion

De nos jours, l'épuisement de ressources et la pollution sont deux problèmes sérieux dans le monde. DEEE, ou l'e-déchet pour court, est un des facteurs plus influents sur ces problèmes. L'e-déchet est un terme générique embrassant de diverses formes d'équipement électrique et électronique qui a cessé porter valeur à leurs propriétaires, ou un type de déchet consistant en n'importe quel appareil cassé ou superflu, électrique ou électronique. Pendant que les substances hasardeuses dans l'e-déchet polluent l'environnement, leur cycle de vie plus court cause la consommation rapide et la surproduction continue ; donc l'épuisement de ressources augmente. Pour pallier de ces problèmes, les gouvernements doivent faire la loi du traitement de déchet et les producteurs doivent prendre la responsabilité d'e-déchet.

Dans ce travail, la mentalité existante de production d'un producteur de EEE est analysée et un nouveau modèle d'entreprise est proposé. Pendant la phase de réingénierie, les nouvelles lignes de processus et les zones de stockage sont ajoutées au système existant. Les opérations pour réutilisation et recyclage sont incluses dans le nouveau système afin de traiter les produits de retour qui sont rapportés par les clients à la plante à cause des diverses raisons.

Pour les études d'optimisation, le système est d'abord fixé sur la chaîne de réutilisation. En utilisant *linprog*, fonction de programmation linéaire dans MATLAB, les solutions optimales sont atteintes. Pendant que le coût total soit minimisé, les ratios optimaux de réutilisation d'e-déchet sont approximativement environ 90%. Cela signifie ~90% de la quantité d'e-déchet dans la zone de stockage pour les produits de retour sont choisis être réutilisé et ne pas être recyclé. La solution optimale montre toujours le cas idéaliste et les résultats obtenus dans cette recherche semblent assez idéalistes et en plus réalistes. Puisque le coût de réutilisation n'est pas élevé, le système préfère utiliser la chaîne de

réutilisation au niveau plus haut possible, quel que soit le scénario. Bien sûr qu'on ne peut pas traiter tous les e-déchets par la voie de la chaîne de réutilisation. Quelques composants dans les e-déchets devraient être recyclés de toute façon. Alors, il est conclu par des solutions optimales de la programmation linéaire que les producteurs doivent attacher plus d'importance à la chaîne de réutilisation, essayer d'obtenir la proportion de réutilisation aussi haute que possible, et reformer leur EEE avec haute modularité et la conception de standardisation. Grâce à la modularité et à la standardisation que le ratio de la réutilisation accroît, ainsi un système de production plus efficace est atteint.

Les quantités des matières premières achetées/tirées de la zone de stockage dépendent aussi du ratio de la réutilisation et de la distribution des produits retournés. De plus, elles sont proportionnelles au coût total. Alors, on conclut d'ici qu'il faille diminuer les quantités des matières premières achetées/tirées de la zone de stockage, c'est à dire augmenter le ratio de la réutilisation et essayer d'équilibrer la distribution des produits retournés pour la minimisation du coût total.

A la deuxième étape de l'optimisation, on s'est concentré en addition sur la chaîne de recyclage. Le nouveau but dans cette étape était d'analyser les effets complémentaires de recyclage. Pour cela, on a ajouté une nouvelle variable de décision au système. La variable de décision ajoutée était le ratio de recyclage, c'est à dire r_3 .

On a obtenu des solutions optimales du problème non linéaire en utilisant la fonction *fmincon* de MATLAB.

On constate que les ratios de réutilisation ont encore une fois, des valeurs élevées et très proches à l'un à l'autre, comme dans la programmation linéaire. Cela encore montre que la réutilisation est favorable pour le système afin de minimiser le coût total et la consommation des matières premières. Par contre, les ratios optimaux de recyclages varient dans un plus grand intervalle. Cela revient de la différence des coûts de recyclage et de réutilisation. Le coût de recyclage est plus élevé que celui de réutilisation. Par conséquent, pour les scénarios 1 et 2, la programmation préfère

recycler beaucoup moins de déchets afin de minimiser le coût total. Puisque le coût de réutilisation n'est pas élevé, on n'observe pas un long intervalle pour ses valeurs optimales.

D'après les quantités optimales des matières premières achetées/tirées de la zone de stockage pour le problème non linéaire, on peut faire le même commentaire que le problème linéaire. Les coûts totaux optimaux des trois scénarios ont une tendance parallèle à celle des quantités optimales des matières premières. D'où les producteurs doivent chercher les chemins de diminuer les X_i pour avoir un coût minimal.

A la suite de la comparaison des solutions de la programmation linéaire et non linéaire, on a constaté que la différence la plus remarquable était celle des quantités optimales des matières premières achetées/tirées de la zone de stockage. Il est clair que quand le problème devient non linéaire par l'ajoutage de la chaîne de recyclage, les quantités optimales des matières premières achetées/tirées de la zone de stockage diminuent d'une façon évidente grâce à la contribution de la chaîne de recyclage au système.

Un autre point remarquable dans la comparaison est la supériorité des coûts totaux du problème non linéaire pour les scénarios 1 et 2. Pour le scénario 3, cette supériorité s'est détériorée à cause de la haute valeur du coût total du problème linéaire mais comme on a déjà précisé, cette détérioration génère de la déviation de la distribution des produits retournés.

En conclusion, on a obtenu les ratios de réutilisation assez élevés dans l'optimisation de deux types de problèmes. Alors il faut les accroître au plus haut niveau possible en reformant la ligne de production et recréant les EEE selon les conceptions de modularité et de standardisation. Dans le problème non linéaire, bien que les ratios de recyclage montrent des grandes variabilités, ils augmentent de plus en plus inversement proportionnellement aux coûts totaux. Donc, dans ce cas-là, les quantités optimales des matières premières réduisent d'une façon remarquable. Pour lors, ce que l'on doit conseiller aux producteurs d'EEE est d'essayer d'accroître les ratios de réutilisation et

de recyclage et de diminuer les coûts après les arrangements de réingénierie pour la réduction d'utilisation des ressources.

A part de tout cela, même si on surveille le coût minimal, pour la réduction des ressources et la protection de la nature, il faut tolérer un coût défini en peu plus élevé ; parce qu'il est vital de traiter les DEEE dans le cadre environnemental pour la santé humaine.

Pour le travail futur, on peut ajouter au système des nouvelles variables comme par exemple le ratio des produits retournés r_1 , etc. L'étude pourra aussi être étendue par une application de la programmation dynamique stochastique pour le même modèle. La différence entre deux méthodologies doit être comparée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Hirsch R., P. Wager, J. Gauglhofer, “Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE)”, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol.No.25, 525– 539, (2005).
- [2] Streicher-Portea M., R. Widmerb, A. Jainc, H-P. Baderd, R. Scheideggere, S. Kytzia, “Key drivers of the e-waste recycling system: Assessing and modelling e-waste processing in the informal sector in Delhi”, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. No. 25, 472-491, (2005).
- [3] Darby L., Obara L., “Household recycling behaviour and attitudes towards the disposal of small electrical and electronic equipment”, *Resources, Conservation and Recycling* Vol. 44 17–35, (2005).
- [4] Widmera R., H. Oswald-Krapf, D. Sinha-Khetriwal, M. Schnellmann, H. Böni, “Global perspectives on e-waste”, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. No. 25, 436-458, (2005).
- [5] Directive 2002/96/Ec of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE), *Official Journal of the European Union*, L 37/24-38, (2003).
- [6] Schmidt M., “A production-theory-based framework for analysing recycling systems in the e-waste sector”, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. No. 25, 505-524, (2005).
- [7] <http://www.syctom-paris.fr/edi/traiter/dechet/categorie.html>, (2007).
- [8] Cui J., Forssberg E., “Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.No.B99, 243–263, (2003).

- [9] Yla-Mella J., Pongracz E., Keiski R.L., “Recovery of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) in Finland”, *Proceedings of the Waste Minimization and Resources Use Optimization Conference*, June 10th University of Oulu, Finland, Oulu University Press: p. 83-92, (2004).
- [10] Cebeci U., Kılıç H.S., Yüksel T., “A Reverse Logistics Application In A Household Appliance Manufacturer In Turkey”, *Proceedings of the 35th International Conference Computers and Industrial Engineering*, İstanbul, (2005).
- [11] Nagourney A., Toyasaki F., “Reverse supply chain management and electronic waste recycling: a multitiered network equilibrium framework for e-cycling”, *Transportation Research Part, E* 41, 1-28, (2005).
- [12] Kang H.Y., Schoenung J.M., “Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options”, *Resources, Conservation and Recycling* Vol. 45 368-400, (2005).
- [13] White C. D., Masanet E., Rosen C. M., Beckman S. L., “Product recovery with some byte: an overview of management challenges and environmental consequences in reverse manufacturing for the computer industry”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 11 445–458, (2003).
- [14] Sheu J-B., “A Coordinated reverse logistics system for regional management of multi-source hazardous wastes”, *Computers & Operations Research*, (2005).
- [15] Hu T-L., Sheu J-B., Huang K-H., “A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes”, *Transportation Research Part, E* 38, 457-473, (2003).
- [16] Truttmann N., H. Rechberger, “Contribution to resource conservation by reuse of electrical and electronic household appliances”, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.No.48, 249–262, (2006).
- [17] Bohé G., “Législation des DEEE : Progrès au Nord, Lacunes au Sud”, <http://www.novethic.fr/novethic/site/dossier/index.jsp?id=100223>, (2006).
- [18] Bohé G., “Adoptée, la loi française sur les DEEE doit désormais être appliquée”, <http://www.novethic.fr/novethic/site/dossier/index.jsp?id=100224&dos=100223>, (2006).

- [19] http://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/DEEE/DEEE_en_belgique.php4, (2007).
- [20] Khetriwala D.S., Kraeuchib P., Schwaninger M., “A comparison of electronic waste recycling in Switzerland and in India”, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 25 492– 504 (2005).
- [21] Turner M., Callaghan D., “UK to finally implement the WEEE Directive”, *Computer law & Security report*, Vol. 23 73 – 76 (2007).
- [22] <http://www.eiatrack.org/s/440>, (2007).
- [23] Ministry Of Environment And Water Republic Of Bulgaria Implementation Program For Directive 2002/96/Ec On Waste Electrical And Electronic Equipment And Directive 2002/95/Ec On The Restriction Of The Use Of Certain Hazardous Substances In Electrical And Electronic Equipment In Bulgaria,
http://www.moew.government.bg/recent_doc/legislation/waste/en/IP_WEEE%2009_09_04%20EN.pdf, (2004).
- [24] He W., G. Li, X. Ma, H. Wang, J. Huang, M. Xu, C. Huang, “WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.No.B136, 502-512, (2006).
- [25] http://www.atikyonetimi.cevreorman.gov.tr/matra/Website3/Index_t.htm, (2006).
- [26] <http://www.tobb.org.tr/organizasyon/sanayi/kalitecevre/mevzuat/atik.doc>, (2007)
- [27] <http://www.epa.gov/msw/sourcred.htm> , (2006).
- [28] Crowley A., “Construction as a manufacturing process: Lessons from the automotive industry”, *Computers and Structures* Vol. 67 389-400, (1998).
- [29] http://www.univ-angers.fr/docs/etudquassi/Optimisation_Lineaire.pdf , (2002).

APPENDICES

Appendice - A

Le code de fonction écrit dans MATLAB pour la programmation linéaire est suivant :

```
function [fval, r2, Hm] = surec_fonk(r1,T,CH1,CH2,CY1,CY2,r3,Cd,Cgd)

% parametreler
a1 = 5; a2 = 3; b1 = 5; b2 = 3; H1 = 7000; H2 = 16; M1= 7000; M2 = 100;

D = max(0,random('Normal',1000,150,T,1));
R = max(0,random('unif',0,100,T,1));
R(T+1) = 36;
R(T+2) = 36;
D(T+1) = 1000;
D(T+2) = 1000;

f = zeros(T+1,1);
f(T+1) = r1*(-sum(R(1:T))*r3*(CH2+CY1)) + sum(R(3:T+2))*CY2 - sum(R(3:T+2))*((1-
r3)*Cd + Cgd);
for i = 3:T
    f(i) = (CH1 + CY1);
end

% Aeq, beq olustur
Aeq = zeros(T,T+1);
beq = zeros(T,1);

for i=1:T-2
    Aeq(i,i+2) = 1;
    Aeq(i,end) = -r1*(R(i)*r3 - R(i+2));
```

```

    beq(i) = D(i+4) - R(i)*r1*r3;
end

% X(1) ve X(2) kısıtları
Aeq(end-1,1) = 1;
Aeq(end,2) = 1;
beq(end-1) = D(3);
beq(end) = D(4);

% A, b olustur
A = zeros(4*(T-2), T+1);
b = zeros(4*(T-2), 1);

for t = 1:T-2
    A(4*t-3,t+2) = a1;
    A(4*t-1,t+2) = b1;
    A(4*t-2,end) = -a2*R(t)*r1*r3;
    A(4*t-1,end) = -b1*R(t)*r1*r3;
    A(4*t,end) = b2*R(t)*r1;
    b(4*t-3) = H1;
    b(4*t-2) = H2 - a2*R(t)*r1*r3;
    b(4*t-1) = M1 - b1*R(t)*r1*r3;
    b(4*t) = M2;
end

lb = zeros(T+1,1);
ub = ones(T+1,1);
ub(1:end-1) = inf;

[X,fval,exitflag,output,lambda] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
r2 = X(end);
Hm = X(1:T);

```

Appendice - B

Le code écrit dans MATLAB pour faire tourner 30 fois la fonction de la programmation linéaire pour le scénario-3 est suivant :

```
clear;
clc;

T = 12;
CH1 = 30;
CH2 = 21;
CY1 = 10;
CY2 = 7;
Cd = 4;
Cr = 1;
Cwc = 4;
Cs = 2;
Ce = 6;
a1 = 5;
a2 = 3;
b1 = 5;
b2 = 3;
H1 = 7000;
H2 = 16;
M1 = 7000;
M2 = 100;

r1 = .4; r3 = 0.65;

OptM = [];
```

```
Optr2 = [];  
OptHm = [];  
  
for i = 1:30  
    [M, r2, Hm] = surec_fonk(r1,T,CH1,CH2,CY1,CY2,r3,Cd,Cr);  
    OptM = [OptM M];  
    Optr2 = [Optr2 r2];  
    OptHm = [OptHm Hm];  
end  
  
O_M = sum(OptM)/length(OptM);  
O_r2 = sum(Optr2)/length(Optr2);  
O_Hm = sum(OptHm)/length(OptHm);
```

Appendice - C

Le code de fonction écrit dans MATLAB pour la programmation non linéaire est suivant :

```
function [fval, x, r2, r3] = surecfonk(r1,T,CH1,CH2,CY1,CY2,Cd,Cgd)

% parametreler
a1 = 5; a2 = 3; b1 = 5; b2 = 3;
H1 = 7000; H2 = 16; M1= 7000; M2 = 100;

D = max(0,random('Normal',1000,150,T,1));
R = max(0,random('unif',0,100,T,1));
R(T+1) = 36;
R(T+2) = 36;
D(T+1) = 1000;
D(T+2) = 1000;

x0 = zeros(T+2,1);
% A'yı ve b'yi oluştuyorum
A = zeros(2*T-2,T+2);
b = zeros(2*T-2,1);
for t = 1:T-2
    A(t,t+2) = a1;
end
i = 0;
for t = T-1:2*T-2
    i = i+1;
    A(t,end-1) = b2*R(i)*r1;
end
```

```
b(T-1:end) = M2;
b(1:T-2) = H1;
Aeq = []; beq = [];
lb = zeros(T+2,1); ub = inf(T,1); ub = [ub; [1;1]];

[x,fval] = fmincon(@(u)objfun(T,CH1,CY1,r1,CY2,Cd,Cgd,R,CH2,u),...
    x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,@(u)confun(T,b1,R,r1,M1,a2,H2,D,u));
r2 = x(end-1);
r3 = x(end);
```

Appendice - D

Le code écrit dans MATLAB pour faire tourner 30 fois la fonction de la programmation linéaire pour le scénario-3 est suivant :

```
clear;
```

```
clc;
```

```
T = 12;
```

```
CH1 = 30;
```

```
CH2 = 21;
```

```
CY1 = 10;
```

```
CY2 = 7;
```

```
Cd = 4;
```

```
Cgd = 1;
```

```
Cam = 4;
```

```
Cs = 2;
```

```
Ce = 6;
```

```
a1 = 5;
```

```
a2 = 3;
```

```
b1 = 5;
```

```
b2 = 3;
```

```
r1 = .4;
```

```
OptM = [];
```

```
Opnr2 = [];
```

```
Opnr3 = [];
```

```
Optx = [];
```

```
for i = 1:30
```

```
    while 1
```



```
[M, x, r2, r3] = surecfonk(r1,T,CH1,CH2,CY1,CY2,Cd,Cgd);  
if (r2>=0) & (r2<=1) & (r3>=0) & (r3<=1)  
    break  
end  
end  
end  
OptM = [OptM M];  
Optr2 = [Optr2 r2];  
Optr3 = [Optr3 r3];  
Optx = [Optx x];  
end  
  
O_M = sum(OptM)/length(OptM);  
O_r2 = sum(Optr2)/length(Optr2);  
O_r3 = sum(Optr3)/length(Optr3);
```

BIOGRAPHIE

L'auteur de ce mémoire est née le 1^{er} Décembre 1981 à Istanbul.

Elle a suivi ses études de lycée entre 1992-2000 au Lycée Français Saint Joseph.

A la fin de l'année scolaire 1999-2000, elle est entrée au concours d'entrée à l'université et elle a été admise en Génie Chimique à l'Université Technique d'Istanbul. En même temps, elle a été acceptée à l'Université Galatasaray, Faculté d'Ingénierie et de Technologie, département de Génie Industriel à la suite d'un examen spécial interne qui est fait pour les élèves des écoles francophones en Turquie.

Elle a terminé ses études universitaires à l'Université Galatasaray en 2005.

A l'année académique 2005-2006, elle a commencé sa maîtrise en Génie Industriel à l'Université Galatasaray.

Au premier semestre de ses études de maîtrise, à la fin du mois de décembre de l'année 2005, elle a commencé à travailler à l'Université Galatasaray comme assistante chercheuse dans le département de Génie Industriel.

En juillet 2006, elle a participé au 26^{ième} Congrès National YA/EM à Kocaeli et l'article qu'elle a écrit avec les co-auteurs E. Alptekin, G. Işıklar et M. Erol Genevois, « Le Réingénierie utilisant UML dans l'implémentation de PGI : une Application » a été publié dans le livre du congrès.