
Prise en compte de l'état des produits pour la planification de leur désassemblage

**M. Lounes Bentaha¹, Alexandre Voisin¹, Pascale Marangé¹,
Alexandre Dolgui², Olga Battaïa³**

1. Université de Lorraine, CRAN, UMR CNRS 7039, Campus Sciences, BP 70239
54506 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France

(mohand-lounes.bentaha,alexandre.voisin,pascale.marange)¹@univ-lorraine.fr

2. École des Mines de Nantes, IRCCyN, UMR CNRS 6597, BP 20722
F-44307 Nantes Cedex 3, France

alexandre.dolgui²@mines-nantes.fr

3. Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, France

olga.battaia³@isae.fr

RÉSUMÉ. Dans ce travail, nous présentons une première étude sur la planification du processus de désassemblage prenant en compte les états ou qualité des produits à désassembler. Nous proposons une approche qui permet de définir le meilleur niveau de désassemblage en fonction du coût occasionné pour désassembler le produit et de l'état du produit et/ou les états de ses composants et sous-assemblages. L'état d'un produit est modélisé par le concept de potentiel d'utilisation résiduel (PUR) pris comme variable aléatoire normale connue et tronquée. Le problème est modélisé sous forme de programme stochastique. L'objectif est de maximiser le profit du processus de désassemblage, qui est la différence entre les revenus des composants et sous-assemblages et les coûts des tâches de désassemblage. Les revenus sont définis comme fonctions de PUR. L'approche développée est testée sur deux exemples de la littérature pour analyser l'impact de l'état d'un produit sur la planification de son processus de désassemblage.

ABSTRACT. This paper addresses the problem of disassembly process planning taking into account the quality or states of the product to be disassembled. We propose an approach which is able to return the best disassembly level for a product considering the disassembly cost and the state of the product and/or the states of its subassemblies or components. The state of the product is represented using the concept of « Potentiel d'Utilisation Résiduel (PUR) » which is assumed to be a Gaussian random variable with known truncated distribution. A stochastic program is proposed to model the problem with the objective of maximizing the disassembly process profit. The latter is calculated as the difference between the positive revenue generated by recovered parts and the costs of the disassembly tasks. The revenue of a recovered part is a function of PUR. The developed approach is tested on two example case studies from the literature to analyze the impact of uncertain product quality on its disassembly process planning.

MOTS-CLÉS : désassemblage, désassemblage partiel, qualité produit, incertitudes.

KEYWORDS: disassembly, partial disassembly, product quality, uncertainty.

DOI:10.3166/JESA.49.579-605 © 2016 Lavoisier

Journal européen des systèmes automatisés – n° 4-5/2016, 579-605

1. Introduction

Ces dernières années, les problématiques autour des changements climatiques, des gaz à effets de serre, de l'épuisement accéléré des ressources naturelles et de l'augmentation des stockages de déchets sont au cœur des discussions des pouvoirs politiques. En effet, plusieurs projets sont mis en place dans ce sens pour essayer de répondre à ces problématiques. Par exemple, au niveau européen, le projet « Europe 2020 » (Commission-Européenne, 2010) ; au niveau des Nations Unies, la Conférence sur le développement durable (CNUDD) ou Rio + 20. L'objectif de ces projets prend appui sur les trois piliers du développement durable, (environnement, économie, social) et souhaite mettre en place *a development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs* (UN-documents, 1987).

Face à cette évolution, le modèle linéaire de nos économies, production-consommation-abandon, devient obsolète et cède la place à un modèle circulaire. Cette nouvelle économie croissante est promue par divers organismes, comme la fondation Ellen MacArthur Fondation au Royaume-Uni, l'Institut de l'Économie Circulaire en France, la certification internationale Cradle to Cradle, etc. Cette nouvelle économie part du principe que toute matière sortant du cycle peut être réutilisée en matière entrante d'un autre cycle. Il devient nécessaire de recycler la matière et donc de désassembler (démanteler) les produits. Cette idée répond seulement au premier pilier du développement durable. Pour que cela soit applicable et appliqué, il faut que ce soit économiquement viable (deuxième pilier du développement durable).

Compte tenu d'un nombre élevé de systèmes (produits) en usage, e.g. véhicules, produits électriques et électroniques (téléphones, ordinateurs, réfrigérateurs, etc.), il faut concevoir le démantèlement comme un processus industrialisé et non plus, comme actuellement, un ensemble de tâches artisanales. Dans cette optique, il est nécessaire non seulement de concevoir à l'avance les lignes de démantèlement mais également de s'assurer de la viabilité économique de ce démantèlement.

L'objectif de ce papier est d'apporter des éléments de réponse à ce point en proposant une approche permettant de définir le meilleur niveau de désassemblage (démantèlement), en fonction du coût occasionné pour désassembler le produit et de l'état du produit et/ou les états de ses composants et sous-assemblages. L'état d'un composant permet de décider le cycle (i.e. maintenance, réutilisation, régénération, recyclage de sa matière ou retour à l'écosphère (Diez *et al.*, 2015)) dans lequel le composant peut être réintroduit et donc impacter de manière non linéaire son prix de revente. Cette décision nécessite une quantification de la capacité de l'élément, i.e. sous-système (sous-assemblage) ou composant, à réintégrer un cycle. Nous proposons d'utiliser le potentiel d'utilisation résiduel (PUR) pour cette quantification.

L'optimisation économique d'un désassemblage intègre les coûts de chaque tâche de désassemblage mais également les gains potentiels sur les sous-assemblages et/ou composants désassemblés (Johnson, Wang, 1995 ; McGovern, Gupta, 2011). Ces derniers dépendent fortement du cycle de retour à l'usage dans lequel il pourra être réin-

trouvé. La décision de ce dernier est prise grâce au PUR. Il convient alors d'évaluer sur le volume de systèmes à recycler la distribution de PUR du produit et de ses sous-assemblages et de ses composants.

Le papier est structuré comme suit : une brève revue des principaux travaux sur la planification du processus de désassemblage, prenant en compte la qualité des produits en fin de vie, est proposée dans la section 2. La définition du problème étudié est présentée dans la section 3. La section 4 introduit le modèle d'optimisation proposé ainsi que son approche de résolution. La section 5 est dédiée à l'analyse des résultats numériques de deux exemples pris de la littérature. La section 6 conclut le papier et énonce plusieurs pistes de recherche future.

2. Revue de littérature

Les travaux de la littérature qui étudient la définition et la détermination des processus de désassemblage appartiennent principalement à deux catégories : *disassembly sequence (process) planning* et *disassembly line design and balancing*. La planification du processus de désassemblage et la définition des séquences de désassemblage sont étudiées dans de nombreux travaux, parmi lesquels nous pouvons citer Subramani et Dewhurst (1991) ; Santochi *et al.* (2002) ; Kara *et al.* (2006) ; Dong *et al.* (2006) ; A. Lambert et Gupta (2008) ; Duflou *et al.* (2008) ; Peeters *et al.* (2013). Une revue de littérature sur le sujet est présentée dans A. J. D. Lambert (2003). Néanmoins, très peu d'études ont traité le cas de présence d'incertitudes. Parmi ces travaux, les papiers A. J. D. Lambert (2007) et Kalayci et Gupta (2013) traitent le cas de la détermination de séquences de désassemblage dont les durées opératoires des tâches dépendent de l'ordre d'exécution de ces dernières. Une étude de planification du processus de désassemblage, prenant en compte le niveau de désassemblage et l'incertitude du temps global de désassemblage, a été réalisée dans (Tian *et al.*, 2012). Dans Bentaha, Battaïa et Dolgui (2014a), les auteurs ont étudié le problème de séquençement de tâches et équilibrage de ligne de désassemblage sous incertitudes des durées opératoires des tâches de désassemblage.

Les travaux sur la définition de séquence de désassemblage, sous incertitudes, demeurent peu nombreux par rapports aux travaux déterministes. La quasi-totalité des papiers s'intéressent aux incertitudes des durées opératoires des tâches de désassemblage. Nous pouvons citer Turowski et Morgan (2005) ; Agrawal et Tiwari (2006) ; Aydemir-Karadag et Turkbey (2013). En particulier, les travaux dans Bentaha *et al.* (2013a ; 2013b ; 2013c ; 2013d ; 2013e) ; Bentaha, Battaïa, Dolgui et Hu (2014) ; Bentaha, Battaïa et Dolgui (2014a ; 2014b ; 2014c) ; Bentaha, Battaïa *et al.* (2015) ; Bentaha, Battaïa et Dolgui (2015), proposent des modélisations et des approches de résolution exactes permettant la sélection de la meilleure alternative de désassemblage sous incertitudes des durées opératoires des tâches. Cependant, l'état des produits en fin de vie n'a pas été pris en compte de manière explicite. Un résumé de ces différents travaux a été présenté dans (Bentaha, 2015). D'autres études ont traité le cas de défaillances aléatoires de tâches de désassemblage induites par l'état des produits,

Güngör et Gupta (2001) ; Altekin et Akkan (2012). Une revue bibliographique des travaux portant sur la conception et équilibrage des lignes de production sous incertitudes est présentée dans (Bentaha, Battaïa, Dolgui, 2015). Une étude récente, Riggs *et al.* (2015), a proposé une approche se basant sur la technique du graphe conjoint (connu dans la littérature d'équilibrage des lignes d'assemblage multi-produits) pour intégrer l'état d'un produit en fin de vie lors de l'équilibrage d'une ligne de désassemblage. L'état d'un produit dans cette étude est traduit par différents niveaux discrets de ce dernier une fois réceptionné. Cette étude prend l'hypothèse d'un processus de désassemblage complet et d'un processus de désassemblage pré-établi. De plus, cette approche ne traite pas le cas de l'état des composants et/ou sous-assemblages qui sont générés au cours du processus de désassemblage.

Dans le cadre de cette étude, nous sommes en particulier intéressés à définir le niveau de désassemblage qui est fonction des revenus, à optimiser, générés par le processus de désassemblage, à déterminer, en prenant en considération l'état des produits en fin de vie, ainsi que leurs composants et/ou sous-assemblages dans la détermination du prix de re-recyclage. Cette condition économique a toute son importance dès lors qu'elle constitue l'une des attractivités principales au recyclage et donc au désassemblage. À la connaissance des auteurs, aucune étude de la littérature ne traite cette problématique. Ce papier aborde ce problème en se basant sur les travaux antérieurs des auteurs, notamment l'utilisation des graphes AND/OR et les données des instances qui seront utilisées dans la partie d'expérimentations numériques.

3. Définition et formulation du problème

Pour un produit en fin de vie, le problème consiste en la sélection d'une séquence de désassemblage parmi toutes les alternatives possibles de désassemblage de ce même produit, prenant en compte son PUR et les contraintes de précédence entre les tâches. L'ensemble des alternatives sont représentées par l'ensemble I de toutes les tâches de désassemblage possibles du produit. L'objectif est de maximiser le profit généré par le processus (donc l'alternative) de désassemblage à déterminer. Une solution optimale du problème ci-dessus consiste seulement en un sous-ensemble I' de I . Le sous-ensemble I' contient les tâches de désassemblage retenues pour l'alternative de désassemblage optimale ; I' est connu après optimisation. Dans cette étude, les hypothèses suivantes sont considérées :

- un seul type de produit est à désassembler partiellement ou complètement ;
- les produits à désassembler sont complets, c.-à-d. que les produits contiennent tous leurs composants sans rajout ni enlèvement ; Dans l'optique d'un désassemblage industrialisé, i.e. avec une grande quantité de produits, cette hypothèse semble réaliste dès lors qu'un pourcentage important de produits arrivent dans ces conditions ;
- les produits en fin de vie nécessitent un désassemblage. Cette hypothèse est industriellement justifiée puisque la grande majorité des produits en fin de vie nécessitent un désassemblage, (Ilgin, Gupta, 2012 ; Rickli, Camelio, 2014) ;

- le niveau de désassemblage maximum est le niveau composant, nous ne considérons pas les tâches de recyclage de la matière du composant si besoin. Cette hypothèse correspond à une revente du composant pour matière première ;
- un coût fixe est affecté à chaque tâche de désassemblage. Ces coûts sont indépendants des durées opératoires des tâches ;
- un revenu (de revente) est affecté à chaque partie du produit (composant ou sous-assemblage). Ce revenu est fixe mais dépend de l'état du composant ou sous-assemblage. L'état de chaque partie du produit est modélisé en utilisant la notion de PUR et suit une distribution de probabilité. Cette distribution modélise la variabilité du PUR des produits arrivant au désassemblage. Dans une optique d'industrialisation du désassemblage, i.e. un grand nombre de produits de mêmes catégories arrivent, pour obtenir cette distribution, une étude statistique sur des produits désassemblés peut être réalisée.

Dans la sous-section suivante, une modélisation, par un graphe, des alternatives de désassemblage d'un produit est présentée.

3.1. Graphe AND/OR

Le graphe AND/OR représente explicitement toutes les alternatives possibles de désassemblage d'un produit et modélise les relations de précedence entre les tâches et les différentes parties du produit. Il modélise également tous les niveaux possibles de désassemblage d'un produit.

Dans ce papier, nous avons choisi de traiter l'exemple d'un stylo à bille tiré de la littérature (A. J. D. Lambert, 1999). Le stylo est constitué de 10 composants (figure 1). Cet exemple a déjà fait l'objet d'une étude dans nos précédents travaux (Bentaha, Battaïa, Dolgui, 2014a) et nous avons obtenu le graphe AND/OR de la figure 2. Les composants sont identifiables par leurs numéros respectifs et les matières dont ils sont fabriqués (cuivre (Cu), polypropylène (PP) et polychlorure de vinyle (PVC)).

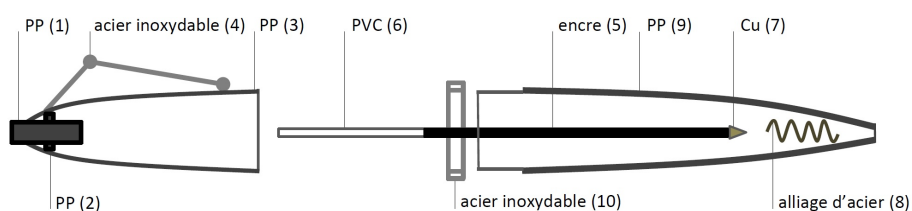


Figure 1. Exemple de l'instance stylo à bille tiré de la littérature

Le graphe AND/OR de la figure 2 est construit comme suit : chaque sous-assemblage est représenté par un sommet $A_k, k \in K$ et chaque sommet $B_i, i \in I$ représente une tâche de désassemblage. L'ensemble K définit les indices de tous les sous-assemblages qui peuvent être générés par les tâches I . Deux types d'arcs définissent les relations de précedence entre les tâches et les sous-assemblages et composants : AND et OR. Si une tâche de désassemblage génère deux sous-assemblages ou plus, alors, elle

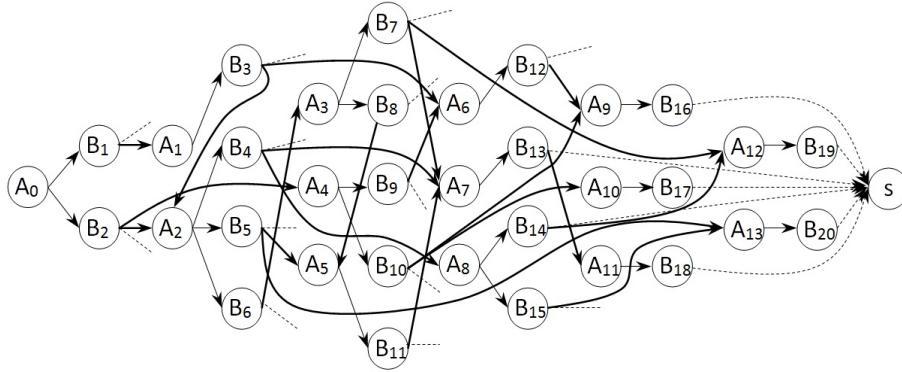


Figure 2. Le graphe AND/OR, pris de la littérature, du stylo à bille

est reliée à ces deux derniers par des arcs de type AND ; arcs représentés en gras dans la figure 2. Si, par contre, plusieurs tâches différentes sont possibles pour le désassemblage d'un sous-assemblage donné, sachant qu'une seule doit être retenue, alors, ce sous-assemblage est relié à ces tâches par des arcs de type OR (représentés par des traits simples).

Pour une raison de simplification du graphe AND/OR, les composants générés par les tâches de désassemblage ne sont pas représentés sur le graphe, seuls les sous-assemblages le sont. Un sommet fictif 's' relié par un arc en tirets à chaque tâche est introduit dans le graphe AND/OR (figure 2). Les arcs en tirets allant de chaque tâche $B_i, i \in I$ vers le sommet 's' permettent de représenter un désassemblage partiel (et ainsi un niveau de démantèlement) pour chaque alternative de désassemblage du produit modélisée par le graphe AND/OR.

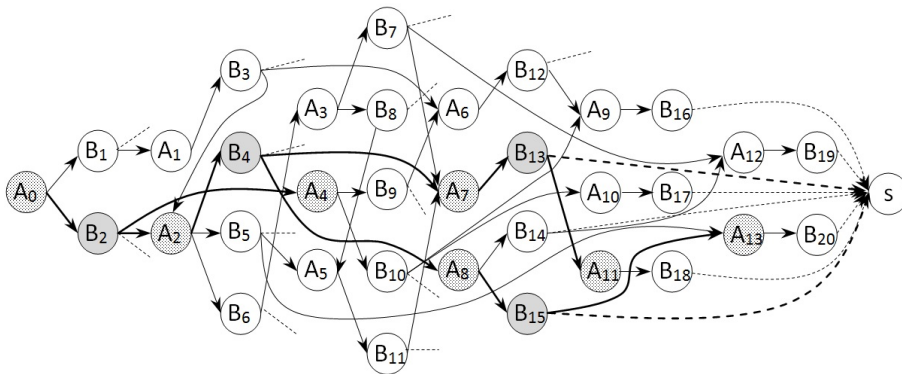


Figure 3. Un exemple d'alternative de désassemblage partiel du stylo à bille

La figure 3, ci-dessus, illustre l'exemple d'une alternative de désassemblage partiel du stylo à bille. En effet, cette alternative de désassemblage est constituée de 9 tâches (pour un désassemblage complet) mais seulement 4 (B_2, B_4, B_{13} et B_{15}) ont été

sélectionnées pour désassembler le produit. Ce désassemblage est ainsi partiel qui permet de récupérer les sous-assemblages A_4 , A_{11} et A_{13} (respectivement 1:4, 5-6 et 9-10) et les composants 7 et 8. Comme les sous-assemblages A_4 , A_{11} et A_{13} ne sont plus désassemblés, alors les tâches les générant (sans arc AND double, c.-à-d. B_{13} et B_{15}) sont directement reliés à 's' par des arcs en tirets comme montré par la figure 3.

Le tableau 1 donne, pour chaque tâche de désassemblage, les sous-assemblages et/ou les composants générés lors de son exécution. Dans cet exemple, le nombre total de composants et sous-assemblages générés par les tâches de l'ensemble I est de 23. Les numéros 1 à 10 représentent respectivement les composants 1 à 10 du stylo à bille (figure 1). Les numéros 11 à 23 symbolisent respectivement les différents sous-assemblages générés par les tâches de désassemblage : le numéro du sous-assemblage A_1 est 11, celui de A_2 est 12, celui de A_3 est 13, ... (il convient de rajouter 10 à l'indice de A à chaque fois). Exemple de lecture du tableau 1 : la tâche B_2 désassemble A_0 (le produit complet) et génère deux sous-assemblages (figure 2) : le sous-assemblage A_2 , constitué des composants 5, 6, 7, 8, 9 et 10 (d'où la représentation '5:10') et le sous-assemblage A_4 constitué des composants 1, 2, 3 et 4 (représentation '1:4'). La tâche B_2 ne génère aucun composant. La tâche B_1 , quant à elle, génère le composant 4 et le sous-assemblage A_1 constitué des composants 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, et 10.

Tableau 1. Tâches de désassemblage (du stylo à bille) avec leurs composants et/ou sous-assemblages générés

tâche	s-assemblages	composants	tâche	s-assemblages	composants
1	A_1 (1:3-5:10)	4	11	A_7 (5:7)	8
2	$A_2;A_4$ (5:10;1:4)	–	12	A_9 (1-2)	3
3	$A_2;A_6$ (5:10;1:3)	–	13	A_{11} (5-6)	7
4	$A_7;A_8$ (5:7;8:10)	–	14	A_{12} (8-9)	10
5	$A_5;A_{13}$ (5:8;9-10)	–	15	A_{13} (9-10)	8
6	A_3 (5:9)	10	16	–	1;2
7	$A_7;A_{12}$ (5:7;8-9)	–	17	–	3;4
8	A_5 (5:8)	9	18	–	5;6
9	A_6 (1:3)	4	19	–	8;9
10	$A_9;A_{10}$ (1-2;3-4)	–	20	–	9;10

Dans la section suivante, pour modéliser l'état d'un produit en fin de vie, le concept du PUR est utilisé. Le revenu d'un tel produit (composant ou sous-assemblage) en fonction du PUR est également présenté.

3.2. Distribution de probabilité du potentiel d'utilisation résiduel (PUR)

Le PUR représente la quantité « d'usage » restante avant le démantèlement d'un produit (ou d'un sous-assemblage ou composant). Au début de la phase d'exploitation d'un produit, PUR a une valeur de 1 ; le produit présente son potentiel maximal d'utilisation. L'usage va faire diminuer cette quantité suivant les conditions d'utilisation qui intègrent l'environnement dans lequel le système évolue, la manière dont il est piloté/conduit/utilisé et enfin la manière dont il est maintenu. À l'opposé, un PUR de 0, signifie que le produit doit subir un recyclage de sa matière.

Ce concept de PUR intègre donc des aspects :

- court terme, qui évalue l'état du système à un instant donné. Il peut donc se rapprocher des notions de fiabilité, état de santé (Byington *et al.*, 2004 ; Shin, 2009 ; Kumar *et al.*, 2009) et *Remaining Useful Life (RUL)* (Camci *et al.*, 2007) qui établissent une « mesure » de l'état du système avant maintenance à un instant particulier.
- long terme, car la capacité du système à être utilisé et maintenu sur un horizon plus lointain va également impacter son cycle de retour à l'usage.

Ainsi, l'usage que nous faisons d'un système induit des dégradations voire des défaillances. Chaque sous-système ou composant n'est pas impacté de la même manière. Sur l'exemple de la figure 1, pour un stylo à bille, le corps bas (composant 9) et le bouton (composant 1) sont fortement sollicités par l'usage du stylo et subissent une abrasion qui les marque et rend la réutilisation difficile. Le ressort (composant 8) est également fortement sollicité mais il reste le plus souvent dans un bon état autorisant sa réutilisation directe. L'anneau (composant 10) et l'agrafe (composant 4) ont une sollicitation quant à eux plus aléatoire.

Dans cette étude, comme indiqué plus haut dans les hypothèses, le PUR suit une distribution de probabilité. Pour ce premier travail, nous supposons que le PUR est distribué selon une loi normale tronquée. Les points de troncature sont le point '0' à gauche et le point '1' à droite. Ainsi, si le PUR est la variable aléatoire symbolisant le PUR d'un produit (système), alors le PUR suit une loi normale tronquée à l'intervalle $[0, 1]$ dont les paramètres sont μ et σ , c.-à-d. $PUR \rightsquigarrow \mathcal{N}_{[0,1]}(\mu, \sigma)$. L'espérance et l'écart type du PUR sont définis par :

$$\mu_{[0,1]} = \mu + \frac{f\left(\frac{0-\mu}{\sigma}\right) - f\left(\frac{1-\mu}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{1-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{0-\mu}{\sigma}\right)}\sigma$$

$$\sigma_{[0,1]}^2 = \sigma^2 \left[1 + \frac{\frac{0-\mu}{\sigma} f\left(\frac{0-\mu}{\sigma}\right) - \frac{1-\mu}{\sigma} f\left(\frac{1-\mu}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{1-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{0-\mu}{\sigma}\right)} - \left(\frac{f\left(\frac{0-\mu}{\sigma}\right) - f\left(\frac{1-\mu}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{1-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{0-\mu}{\sigma}\right)} \right)^2 \right]$$

où $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}$ est la fonction de densité de probabilité de la loi normale standard et $\Phi(\cdot)$ sa fonction de répartition.

La figure 4, illustre les cas de trois distributions normales tronquées à l'intervalle $[0, 1]$ de paramètres $(\mu = 0, \sigma = 0.2)$, $(\mu = 0.5, \sigma = 0.3)$ et $(\mu = 1, \sigma = 0.2)$. Des

échantillons de taille 1000 ont été utilisées pour générer les courbes des différentes lois.

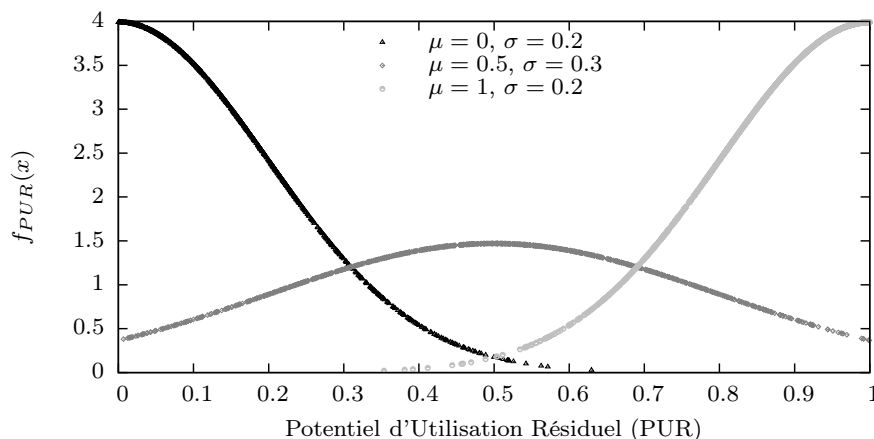


Figure 4. Exemples de distributions du potentiel d'utilisation résiduel suivant des lois normales tronquées en 0 et 1

Chacune des courbes de la figure 4 peut représenter une distribution du PUR d'un produit (système), sous-assemblage (sous-système) ou composant. La courbe à gauche (avec $\mu = 0$ et $\sigma = 0.2$) indique que le produit (ou sous-assemblage, ou composant) est reçu très usé. La courbe à droite (avec $\mu = 1$ et $\sigma = 0.2$) indique que le produit est plutôt dans un bon état et très peu usé. Enfin, la courbe au milieu (avec $\mu = 0.5$ et $\sigma = 0.3$) modélise un produit dans un état moyen.

3.3. Revenu d'un produit en fonction de son PUR

Le revenu (noté R_e) d'un produit à désassembler, dépend de son potentiel d'utilisation résiduel PUR, c.-à-d. $R_e = f(\text{PUR})$. Dans cette première étude du problème, trois cas principaux de variations de R_e en fonction du PUR sont définis. Dans le premier, la fonction $f(\text{PUR})$ est affine, où on suppose que R_e varie de manière linéaire (proportionnelle) en fonction de l'état du produit. Dans le deuxième cas, R_e présente une croissance rapide par rapport à la qualité du produit, mais qui se stabilise pour des produits de qualité moyenne à de bonne qualité. Cette variation du revenu R_e est modélisée par une fonction racine. Ce cas correspond à un produit qui garde un prix de revente important longtemps, malgré la diminution de son PUR et pour lequel le prix diminue rapidement quand le PUR arrive vers 0. Dans le troisième cas, R_e présente des valeurs faibles et une croissance lente pour des produits de mauvaise à moyenne qualité mais qui connaît une croissance rapide pour les produits de bonne qualité. Dans ce cas nous utilisons une fonction exponentielle. Ce cas est l'inverse du précédent, le produit perd rapidement de sa valeur de revente au début de son utilisation; cette valeur décroît moins vite par la suite.

Pour les deux derniers cas de relation R_e -PUR, nous considérons 2 niveaux : un niveau moyen et un niveau plus important. Dans tous les cas, nous supposons que $R_e(\text{PUR} = 0) = a$ (valeur des matières recyclées par exemple) et $R_e(\text{PUR} = 1) = b$ (valeur du produit neuf par exemple); $b > a > 0$. Les différentes fonctions $R_e = f(\text{PUR})$ sont définies comme suit :

$$R_e = (b - a)\text{PUR} + a, \text{ fonction affine} \quad \textbf{(affine)}$$

$$R_e = (b - a)\sqrt{\text{PUR}} + a, \text{ fonction racine carrée} \quad \textbf{(racine 1)}$$

$$R_e = (b - a)\sqrt[4]{\text{PUR}} + a, \text{ fonction racine} \quad \textbf{(racine 2)}$$

$$R_e = a e^{\log(\frac{b}{a})\text{PUR}}, \text{ fonction exponentielle} \quad \textbf{(expo 1)}$$

$$R_e = e^{\frac{1}{e-1}(\log(a)-\log(b))} e^{\frac{1}{e-1}(\log(b)-\log(a))e^{\text{PUR}}}, \text{ fonction exponentielle} \quad \textbf{(expo 2)}$$

Les allures des courbes de ces différentes fonctions, pour $a = 5$ et $b = 50$ sont illustrées par la figure 5. Cette figure illustre les allures du prix de revente résiduel R_e en fonction du PUR suivant les 3 cas présentés dans l'introduction de cette partie.

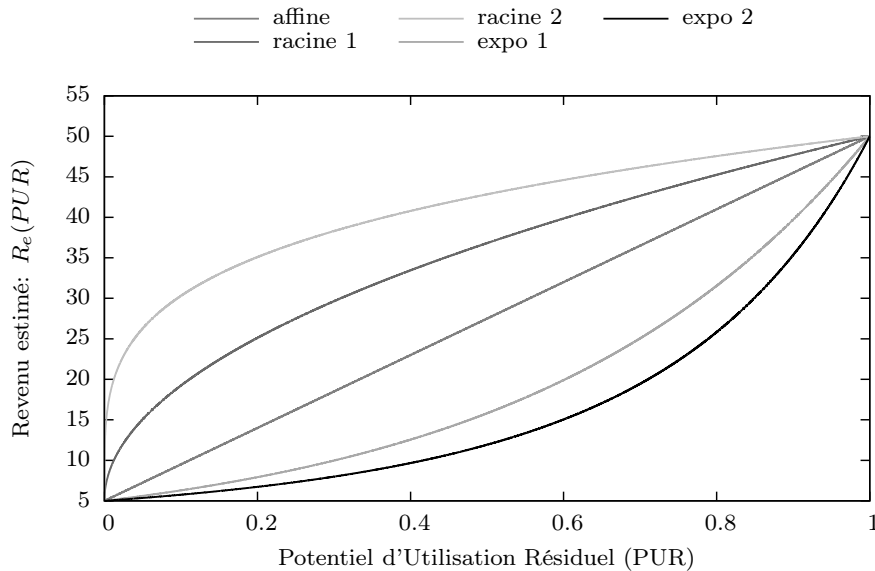


Figure 5. Courbes des différents cas de variations de R_e en fonction de PUR

3.4. Distribution de probabilité du revenu d'un produit

Pour les cinq fonctions de R_e définies ci-dessus, les fonctions respectives de densité de probabilité sont définies par :

$$R_e \rightsquigarrow \mathcal{N}_{[a,b]}((b-a)\mu + a, (b-a)\sigma) \quad \text{(affine')}$$

$$f_{R_e}(x) = \frac{1}{\sigma a^2} \sqrt{\frac{8}{\pi}} (x - (b-a)) e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - (b-a))^2 - \mu a^2}{\sigma a^2} \right)^2} \mathbb{I}_{[a,b]} \quad \text{(racine 1')}$$

$$f_{R_e}(x) = \frac{1}{\sigma a^4} \sqrt{\frac{32}{\pi}} (x - (b-a))^3 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - (b-a))^4 - \mu a^4}{\sigma a^4} \right)^2} \mathbb{I}_{[a,b]} \quad \text{(racine 2')}$$

$$R_e \rightsquigarrow \text{Log-}\mathcal{N}_{[a,b]} \left(\log\left(\frac{b}{a}\right)\mu + \log(a), \log\left(\frac{b}{a}\right)\sigma \right) \quad \text{(expo 1')}$$

$$f_{R_e}(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi x} \log\left(\frac{x}{a}\right)} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \left(\log\left(\log\left(\frac{x}{a}\right)\right) - \mu - \log(b) \right)^2} \mathbb{I}_{[a,b]} \quad \text{(expo 2')}$$

où $\acute{a} = e^{\frac{1}{\epsilon-1} (e \log(a) - \log(b))}$ et $\acute{b} = \frac{1}{e-1} (\log(b) - \log(a))$

Comme illustré par la figure 4, seulement un nombre fini de points (un échantillon) sont considérés pour représenter les distributions de probabilité du PUR. En reprenant l'échantillon de taille 1000 (utilisé pour obtenir les courbes de la figure 4), les allures des courbes des cinq fonctions de densités de probabilité de $R_e = f(\text{PUR})$, définis ci-dessus, sont données par les figures 6, 7 et 8 pour $\text{PUR} \rightsquigarrow \mathcal{N}_{[0,1]}(\mu, \sigma)$, et respectivement pour $(\mu = 0, \sigma = 0.2)$, $(\mu = 0.5, \sigma = 0.3)$ et $(\mu = 1, \sigma = 0.2)$.

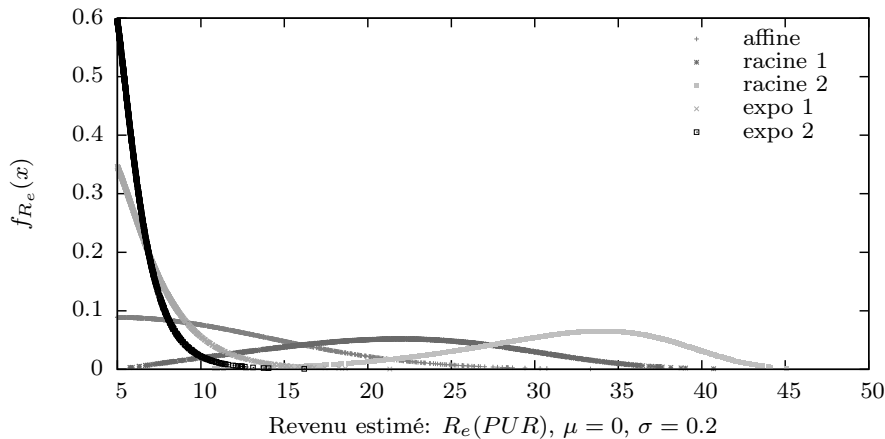


Figure 6. Courbes des différentes distributions de probabilité de R_e , avec un échantillon de taille 1000 ($\mu = 0, \sigma = 0.2$)

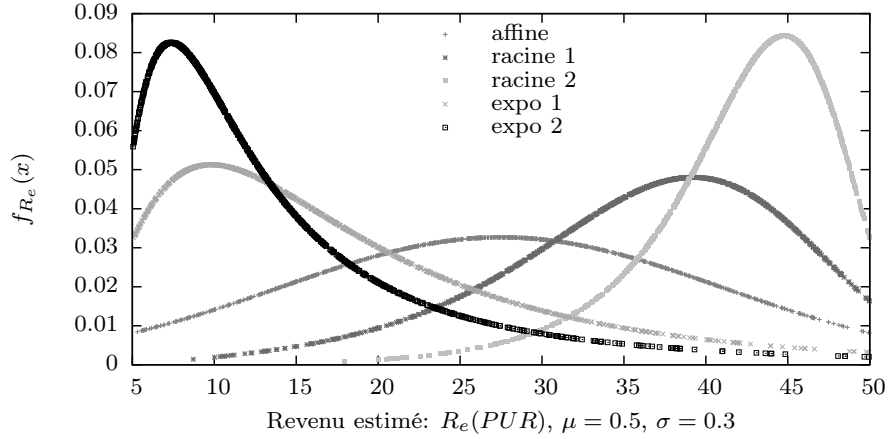


Figure 7. Courbes des différentes distributions de probabilité de R_e , avec un échantillon de taille 1000 ($\mu = 0.5, \sigma = 0.3$)

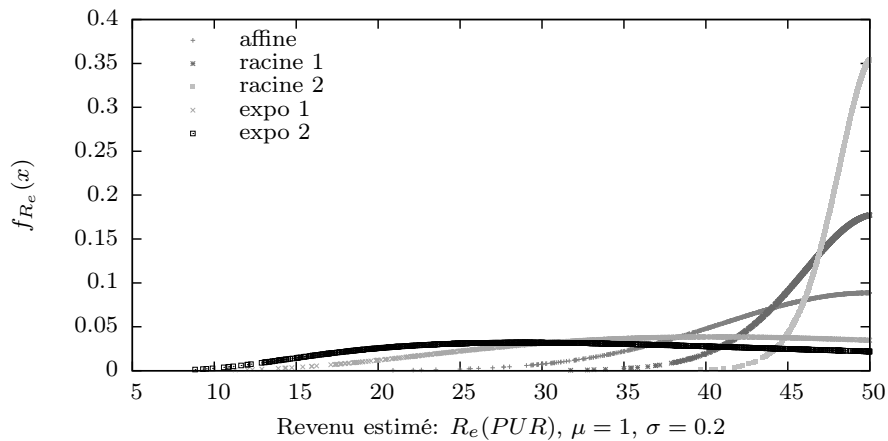


Figure 8. Courbes des différentes distributions de probabilité de R_e , avec un échantillon de taille 1000 ($\mu = 1, \sigma = 0.2$)

Dans le cas où $\mu = 0$ et $\sigma = 0.2$ (voir figure 6), les valeurs des revenus pour les deux cas racine 1 et racine 2 sont relativement importantes (autour de 22 et 33 respectivement), malgré que les produits réceptionnés soient plutôt de mauvaise qualité (recyclage matière dans la plus part des cas). À l’opposé, pour le cas où $\mu = 1$ et $\sigma = 0.2$ (produits plutôt de bonne qualité), les valeurs des revenus pour les deux cas expo 1 et expo 2 sont relativement faibles (voir figure 8). Pour le cas de produits de qualité moyenne (figure 7), les revenus présentent essentiellement de faibles valeurs pour les cas expo 1 et expo 2, des valeurs essentiellement élevées pour les cas racine 1 et racine 2 et des valeurs essentiellement moyennes pour le cas affine.

Dans la section suivante, un modèle de programmation mathématique est proposé pour définir une planification optimisée du processus de désassemblage d'un produit prenant en compte son PUR.

4. Modèle d'optimisation et approche de résolution

Afin de définir le modèle d'optimisation du problème exposé plus haut, les différents paramètres et variables de décision utilisés sont introduits ci-après.

Paramètres

I : ensemble des indices des tâches de désassemblage : $I = \{1, 2, \dots, N\}$, $N \in \mathbb{N}^*$;

L : ensemble des indices des sous-assemblages et composants :

$$L = \{1, 2, \dots, L\}, L \in \mathbb{N}^* ;$$

K : ensemble des indices des sous-assemblages générés :

$$K = \{0, 1, \dots, K\}, K \in \mathbb{N} ;$$

A_k : sous-assemblage ($k \in K$) ;

B_i : tâche de désassemblage, ($i \in I$) ;

L_i : ensemble des indices des sous-assemblages et composants générés par la tâche B_i , $i \in I$;

G_ℓ : ensemble des indices des tâches qui génèrent le sous-assemblage ou composant ℓ , $\ell \in L$;

D_ℓ : ensemble des indices des tâches qui désassemblent le sous-assemblage ℓ , $\ell \in L$;

s : le puits du graphe AND/OR ;

$\widetilde{R}_{e\ell}$: revenu aléatoire, où $\widetilde{R}_{e\ell} = f(\widetilde{PUR}_\ell)$, généré par le sous-assemblage ou composant ℓ , $\ell \in L$, \widetilde{PUR}_ℓ représente le potentiel d'utilisation résiduel aléatoire du composant ou sous-assemblage ℓ , $\ell \in L$;

c_i : coût de l'opération i , $i \in I$;

P_k : ensemble des indices des prédécesseurs de A_k , $k \in K$, c.-à-d. :

$$P_k = \{i \mid B_i \text{ précède } A_k\} ;$$

S_k : ensemble des indices des successeurs de A_k , $k \in K$, $S_k = \{i \mid A_k \text{ précède } B_i\}$.

Variables de décision

Deux types de variables de décision sont introduits. Une variable du premier type consiste à choisir ou ne pas choisir une tâches de désassemblage d'une alternative donnée. Le deuxième type sert d'intermédiaire pour la définition du revenu de désassemblage.

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{si la tâche } B_i, i \in I \text{ est sélectionnée ;} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$y_\ell = \begin{cases} 0, & \text{si } \sum_{i \in D_\ell} x_i = 1 \text{ et } \sum_{i \in G_\ell} x_i = 1, \ell \in L \text{ (} \ell \text{ sous-assemblage);} \\ 1, & \text{sinon.} \end{cases}$$

La variable $y_\ell \in L$ est définie comme suit : pour le sous-assemblage d'indice $\ell \in L$, si une tâche d'indice $i, i \in G_\ell$ qui génère ℓ est choisie et que par la suite une autre tâche $j, j \in D_\ell$ de la même alternative qui le désassemble est aussi choisie, alors son revenu $\widetilde{R}_{e\ell}$ n'est pas comptabilisé pour définir le revenu du processus de désassemblage. Ainsi, seuls les revenus de ses composants et/ou sous-assemblages (non désassemblés) sont considérés. La variable y_ℓ modélise une exclusion entre le revenu d'un sous-assemblage et celui de ses composants.

Notons que $\sum_{i \in D_\ell} x_i, \sum_{i \in G_\ell} x_i \in \{0, 1\}, \forall \ell \in L$ (ℓ sous-assemblage) par le fait qu'une seule tâche peut être sélectionnée pour générer le sous-assemblage d'indice ℓ et une seule autre peut être sélectionnée pour le désassembler. Il s'en suit que $y_\ell = 1$ pour tout composant (non sous-assemblage) $\ell, \ell \in L$.

Programme stochastique

Le programme stochastique (**PS**), proposé ci-dessous, permet de déterminer l'alternative de désassemblage de profit maximum tout en prenant en compte les états des composants et sous-assemblages. Comme mentionné dans la section 3.2, l'état d'un produit (sous-assemblage ou composant) est modélisé par son PUR. Ainsi, en considérant le PUR de chaque composant et sous-assemblage, le modèle permet de déterminer quels sont les composants et les sous-assemblages à récupérer de manière à maximiser le profit du processus de désassemblage. Ce dernier est défini comme la différence entre les revenus de vente des matières et/ou des composants et/ou sous-assemblages et le coût d'exécution des tâches de désassemblage. Comme mentionné dans la section 3.3, le revenu R_e de chaque composant (ou sous-assemblage) est fonction de son PUR, c.-à-d. $R_e = f(\text{PUR})$.

Le programme (**PS**) est défini par :

$$\max \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{\ell \in L_i} \widetilde{R}_{e\ell} \cdot y_\ell \cdot x_i - \sum_{i \in I} c_i \cdot x_i \right\} \quad (\text{PS})$$

s.t.

$$\sum_{i \in S_0} x_i = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{i \in S_k} x_i \leq \sum_{i \in P_k} x_i, \forall k \in K \setminus \{0\} \quad (2)$$

$$\forall \ell \in L \text{ (} \ell \text{ sous-assemblage), si } \sum_{i \in D_\ell} x_i = 1 \text{ et } \sum_{i \in G_\ell} x_i = 1 \text{ alors } y_\ell = 0 \quad (3)$$

$$y_\ell = 1, \forall \ell \in L \text{ (} \ell \text{ composant)} \quad (4)$$

$$x_i, y_\ell \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall \ell \in L \quad (5)$$

Les termes de la fonction objectif représentent respectivement le revenu défini par les composants et les sous-assemblages récupérés et le coût des tâches de désassemblage sélectionnées. La contrainte (1) impose la sélection d'une seule tâche pour débiter le processus de désassemblage du produit. Les produits sont supposés nécessiter un désassemblage afin de les revaloriser. Les contraintes (2) modélisent les relations de précédence entre les tâches et les sous-assemblages et composants. L'ensemble des contraintes (3), comme mentionné précédemment, modélise une exclusion entre le revenu d'un sous-assemblage (désassemblé) et celui de ses composants. Les contraintes (4) sont introduites afin de ne pas exclure les revenus des composants (générés) dans la définition du revenu de désassemblage final. Enfin, les contraintes triviales (5) définissent l'ensemble des valeurs possibles prises par les variables de décision.

Afin de linéariser le programme **(PS)**, posons : $d_\ell = \sum_{i \in D_\ell} x_i$, $g_\ell = \sum_{i \in G_\ell} x_i$, $\forall \ell \in L$ (ℓ sous-assemblage) et $z_{i\ell} = y_\ell \cdot x_i$, $\forall i \in I, \forall \ell \in L_i$. Alors, la fonction objectif devient $\max \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{\ell \in L_i} \widetilde{R}_{e\ell} \cdot z_{i\ell} - \sum_{i \in I} c_i \cdot x_i \right\}$ telle que $z_{i\ell} \leq y_\ell$, $z_{i\ell} \leq x_i$ et $z_{i\ell} \geq y_\ell + x_i - 1$. La contrainte (3) peut être remplacée par $d_\ell + g_\ell - 1 \leq h_\ell$ et $y_\ell = 1 - h_\ell$, $\forall \ell \in L$ (ℓ sous-assemblage), où $h_\ell \in \{0, 1\}$. La version équivalente linéarisée du programme **(PS)** est donnée ci-après.

$$\max \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{\ell \in L_i} \widetilde{R}_{e\ell} \cdot z_{i\ell} - \sum_{i \in I} c_i \cdot x_i \right\} \quad \text{(PS')}$$

s.t.

$$\sum_{i \in S_0} x_i = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{i \in S_k} x_i \leq \sum_{i \in P_k} x_i, \forall k \in K \setminus \{0\} \quad (2)$$

$$d_\ell + g_\ell - 1 \leq h_\ell, y_\ell = 1 - h_\ell, \forall \ell \in L \text{ (}\ell \text{ sous-assemblage)} \quad (3)$$

$$y_\ell = 1, \forall \ell \in L \text{ (}\ell \text{ composant)} \quad (4)$$

$$z_{i\ell} \leq y_\ell, z_{i\ell} \leq x_i, z_{i\ell} \geq y_\ell + x_i - 1, \forall i \in I, \forall \ell \in L_i \quad (6)$$

$$d_\ell = \sum_{i \in D_\ell} x_i, g_\ell = \sum_{i \in G_\ell} x_i, \forall \ell \in L \text{ (}\ell \text{ sous-assemblage)} \quad (7)$$

$$x_i, y_\ell, d_\ell, g_\ell, h_\ell, z_{i\ell} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall \ell \in L \quad (8)$$

Comme première approche de résolution de **(PS')**, nous nous limitons aux cas des moyennes estimées des paramètres $\widetilde{R}_{e\ell}$, $\forall \ell \in L$. Pour ce faire, un échantillon $(R_{e\ell}^1, R_{e\ell}^2, \dots, R_{e\ell}^\lambda)$ de taille λ est généré pour chaque composant ou sous-assemblage ℓ , $\ell \in L$ et une estimation (notée $\widehat{r}_{e\ell}^\lambda$) de la moyenne de $\widetilde{R}_{e\ell}$, $\forall \ell \in L$ est calculée. Cette approche permet d'obtenir une approximation du problème **(PS')** tout en le résolvant comme programme linéaire déterministe. La qualité de cette approximation

dépend notamment des valeurs des écarts types des revenus $\widetilde{R}_{e\ell}$, $\ell \in L$, c.-à-d. les dispersions des valeurs $R_{e\ell}$, $\ell \in L$ autour des valeurs moyennes des revenus $\widetilde{R}_{e\ell}$, $\ell \in L$. Plus les valeurs des écarts types sont faibles, plus l'approximation par des valeurs moyennes serait bonne.

L'estimation $\widehat{r}_{e\ell}^\lambda$ est définie par :

$$\widehat{r}_{e\ell}^\lambda = \frac{1}{\lambda} \sum_{n=1}^{n=\lambda} R_{e\ell}^n \tag{9}$$

Par la suite, l'algorithme du point-intérieur du solveur IBM ILOG CPLEX 12.4 est utilisé pour résoudre le programme (PS') avec l'approximation (9).

5. Illustration numérique

Le modèle (PS') est codé sous Linux avec C++ et est résolu en utilisant le solveur CPLEX 12.4 sur une machine de 4×CPU 2 GHz et 8 Go de RAM. Ce modèle a été appliqué à l'exemple du stylo à bille (figure 1) ainsi qu'une deuxième instance adaptée de la littérature (Bentaha, Battaïa, Dolgui, 2015 ; Tang *et al.*, 2002). Cette dernière représente une torche constituée de 7 composants comme illustré par la figure 9. Son graphe AND/OR est donné par la figure 10 ; le tableau 2 donne les sous-assemblages et/ou les composants générés pour chaque tâche de désassemblage.

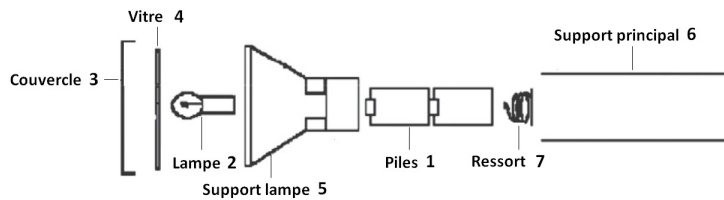


Figure 9. Exemple de l'instance torche tiré de la littérature

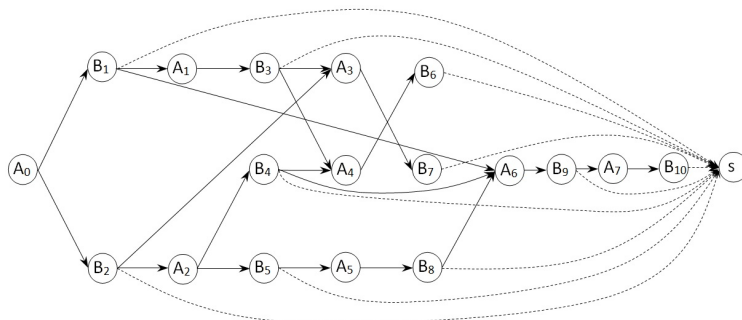


Figure 10. Le graphe AND/OR de la torche, adapté de la littérature

Les données décrivant ces instances sont résumées dans les tableaux 3, 4 et 5. Rappelons que (voir partie Paramètres, section 4) N représente le nombre de tâches de désassemblage, K le nombre de sous-assemblages du produit et L le nombre de tous les composants et sous-assemblages du produit. La colonne ‘arcs’ donne le nombre d’arcs AND et OR des graphes AND/OR de la torche et stylo à bille. La colonne ‘relations-AND’ indique le nombre de tâches de désassemblage sans successeur dans la sous-colonne ‘0’, avec un seul arc de type AND dans la sous-colonne ‘1’ et avec deux arcs de type AND dans la sous-colonne ‘2’.

Tableau 2. Tâches de désassemblage (de la torche) avec leurs composants et/ou sous-assemblages générés

tâche	s-assemblages	composants
1	$A_1; A_6$ (2-5;1-6-7)	–
2	$A_2; A_3$ (1-2-5:7;3-4)	–
3	$A_4; A_3$ (2-5;3-4)	–
4	$A_4; A_6$ (2-5;1-6-7)	–
5	A_5 (1-5:7)	2
6	–	2;5
7	–	3;4
8	A_6 (1-6-7)	5
9	A_7 (6-7)	1
10	–	6;7

Tableau 3. Paramètres des deux instances (torche et stylo à bille)

	N	K	L	arcs	relations-AND		
					0	1	2
Stylo à bille	20	13	23	41	5	9	6
Torche	10	7	14	21	3	3	4

Tableau 4. Les 3 catégories des états des composants et sous-assemblages avec les valeurs de μ et σ correspondantes

état ‘0’	mauvais état	μ	0	σ	0.2
état ‘1’	état moyen		0.5		0.3
état ‘2’	bon état		1		0.2

Pour chaque composant ou sous-assemblage $\ell \in L$, le PUR suit une loi normale de paramètres (μ_ℓ, σ_ℓ) , $\ell \in L$ tronquée en 0 et 1 ; c.-à-d. $\text{PUR}_\ell \rightsquigarrow \mathcal{N}_{[0,1]}(\mu_\ell, \sigma_\ell)$, $\ell \in L$. Les composants et sous-assemblages sont classés en 3 catégories correspondant à des niveaux de PUR différents : catégorie ‘0’ (mauvais état), catégorie ‘1’ (état

moyen) et catégorie ‘2’ (bon état). Les valeurs μ_ℓ et σ_ℓ , pour un composant ou sous-assemblage $\ell \in L$, sont définies selon sa catégorie comme indiqué dans le tableau 4. Ces catégories sont affectées aux composants et sous-assemblages de la torche et stylo à bille selon une règle de bon sens, voir tableau 5. Par exemple : le composant 1 (bouton du stylo à bille, figure 1), étant très sollicité durant sa période d’exploitation, est classé dans la catégorie ‘0’. Les paramètres a_ℓ (revenu minimum) et b_ℓ (revenu maximum), pour chaque composant ou sous-assemblage $\ell \in L$, sont également fixés selon une règle de bon sens. Nous avons considéré comme valeur du stylo à l’état neuf 7 unités monétaires (celle de la torche est de 30). Pour le composant 1 ($\ell = 1$) du stylo à bille, $a_1 = 0.15$ et $b_1 = 0.7$, voir tableau 5. Les valeurs de a et b pour les sous-assemblages sont respectivement les sommes des a et b de leurs composants. Les valeurs des coûts des tâches de désassemblages sont générées manuellement et fixées de manière aléatoire. Ces valeurs sont considérées plus faibles par rapport aux valeurs des revenus des sous-assemblages et/ou composants.

Tableau 5. Affectation à une catégorie d’état et valeurs de a et b de chaque composant ou sous-assemblage (torche et stylo à bille)

Stylo à bille	C ou S-A	1	2	3	4	5	6	7	8
	état	0	0	1	0	0	2	1	2
	a	0.15	0.1	0.6	0.2	0.05	0.1	0.05	0.1
	b	0.7	0.4	2.8	0.7	0.3	0.4	0.3	0.5
Stylo à bille	C ou S-A	9	10	11	12	13	14	15	16
	état	1	1	1	1	1	0	0	0
	a	1.0	0.15	2.4	1.45	1.30	1.05	0.3	0.85
	b	3.0	0.6	8.0	5.1	4.5	4.6	1.5	3.9
Stylo à bille	C ou S-A	17	18	19	20	21	22	23	
	état	0	1	0	0	0	1	1	
	a	0.2	1.25	0.25	0.8	0.15	1.1	1.15	
	b	1.0	4.1	1.1	2.5	0.7	3.5	3.6	
Torche	C ou S-A	1	2	3	4	5	6	7	8
	état	0	0	1	0	2	1	2	1
	a	0.5	0.5	1	1.5	3.5	2	1	6.5
	b	1.5	1.5	3	4.5	10.5	6	3	19.5
Torche	C ou S-A	9	10	11	12	13	14		
	état	0	1	1	1	0	2		
	a	7.5	2.5	4	7	3.5	3		
	b	22.5	7.5	12	21	10.5	9		

C ou S-A : composant ou sous-assemblage.

Ainsi, pour la résolution de (PS’), les lois normales tronquées, représentant les PUR_ℓ de tous les composants et sous-assemblages $\ell \in L$, sont échantillonnées avec une taille de λ . Par la suite, et suivant le type de la fonction du revenu de chaque

composant ou sous-assemblage (affine, racine, etc.), une distribution du revenu $R_{e\ell}$ est déterminée.

Dans le tableau 6, sont présentés les résultats d'optimisation pour différentes tailles λ des échantillons aléatoires des distributions $PUR_{\ell}, \ell \in L$. Six cas différents sont considérés pour les distributions des revenus $R_{e\ell}, \ell \in L$:

- Affine : chaque distribution de profit R_e est une fonction affine du potentiel d'utilisation résiduel PUR. C'est une fonction de type (**affine**) de paramètres a et b .
- Racine 1 : chaque distribution de profit est une fonction de type (**racine 1**).
- Racine 2 : chaque distribution de profit est une fonction de type (**racine 2**).
- Expo 1 : chaque distribution de profit est une fonction de type (**expo 1**).
- Expo 2 : chaque distribution de profit est une fonction de type (**expo 2**).
- Mélange : 20% de distributions des profits sont de type (**affine**), 20% de type (**racine 1**), 20% de type (**racine 2**), 20% de type (**expo 1**) et 20% de type (**expo 2**). Pour ce cas, la catégorie de fonction pour chaque composant ou sous-assemblage est choisie de manière aléatoire.

Les colonnes 'λ', 'objectif', 'nbr-tâches', 'tâches-sélect.', 's-assemblages', 'composants' et 'temps(s)', indiquent, dans l'ordre, la taille de l'échantillon utilisé, la valeur de la fonction objectif, le nombre de tâches de l'alternative de désassemblage sélectionnée, les tâches sélectionnées (le niveau de désassemblage), les sous-assemblages générés, les composants générés et le temps de génération des échantillons et résolution du problème (**PS'**) en secondes.

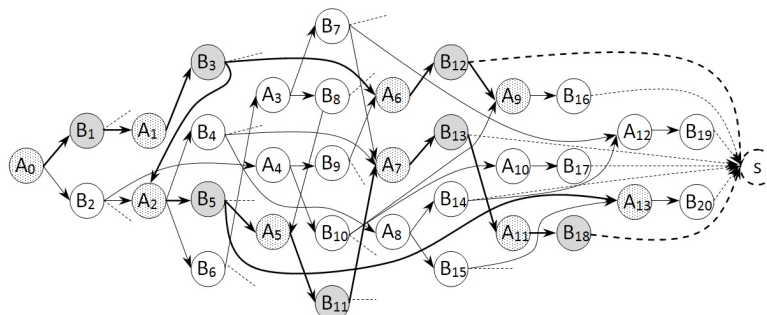
Les résultats du tableau 6 peuvent être résumés comme suit : pour un produit, le profit du processus de désassemblage dépend non seulement de la séquence et du niveau de désassemblage mais aussi de l'état ou qualité du produit.

Effectivement, le profit est la différence entre les revenus (R_e) des composants/sous-assemblages et les coûts des tâches de désassemblage. Comme ces derniers sont connus et fixes, alors, le profit dans notre cas de figure dépend essentiellement des revenus des composants/sous-assemblages. Les revenus sont aléatoires et ils sont fonctions des états des composants/sous-assemblages. Ainsi, le profit du processus de désassemblage dépend de la séquence et du niveau de désassemblage du produit. Ce dernier est lui même dépendant des états (qualité) des composants et sous-assemblages.

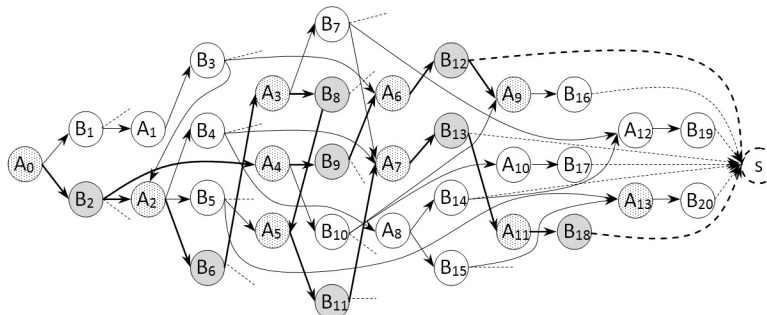
Les figures 11, 12 et 13 présentent en détails la séquence et niveau de désassemblage retournés pour chaque type de fonctions des revenus des composants et sous-assemblages ainsi que la taille de l'échantillon considéré. Pour chaque type de fonctions des revenus, la valeur de la fonction objectif (profit de désassemblage) est la même à 10^{-1} près pour chaque taille λ des échantillons aléatoires. Par conséquent, la taille des échantillons utilisés pourrait être considérée comme suffisante.

Tableau 6. Résultats d'optimisation pour les deux instances torche et stylo à bille

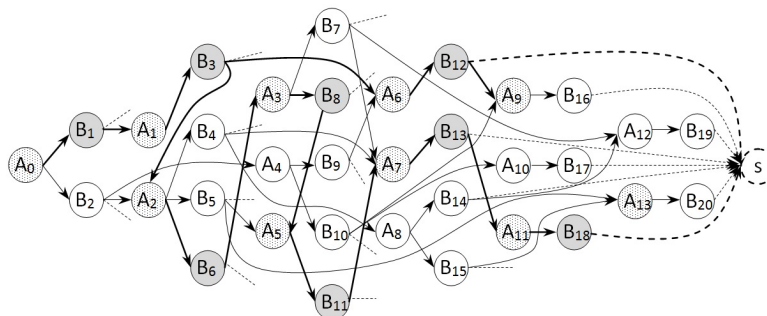
	λ	objectif	nbr-tâches	tâches-sélect.	s-assemblages	composants	temps(s)		
Stylo à bille	Affine	5000	5.66	9	1 3 5 11 12 13 18	19;23	3;4;5;6;7;8	3.6	
		10000	5.67	9	2 6 8 9 11 12 13 18	19	3;4;5;6;7;8;9;10	8.0	
		20000	5.67	9	1 3 5 11 12 13 18	19;23	3;4;5;6;7;8	22.2	
	Racine 1	5000	6.94	9	1 3 6 8 11 12 13 18	19	3;4;5;6;7;8;9;10	3.6	
		10000	6.95	9	1 3 6 8 11 12 13 18	19	3;4;5;6;7;8;9;10	8.1	
		20000	6.94	9	1 3 6 8 11 12 13 18	19	3;4;5;6;7;8;9;10	22.3	
	Racine 2	5000	8.02	9	2 9 12	12;19	3;4	5.3	
		10000	8.02	9	1 3 12	12;19	3;4	11.8	
		20000	8.02	9	1 3 12	12;19	3;4	29.4	
	Expo 1	5000	4.87	9	1 3 5 11 12 13 18	19;23	3;4;5;6;7;8	5.2	
		10000	4.85	9	1 3 5 11 12 13 18	19;23	3;4;5;6;7;8	10.8	
		20000	4.86	9	1 3 6 8 11 12 13 18	19	3;4;5;6;7;8;9;10	22.1	
	Expo 2	5000	4.33	9	1 3 5 11 12 13 18	19;23	3;4;5;6;7;8	5.3	
		10000	4.33	9	2 6 8 9 11 12 13 18	19	3;4;5;6;7;8;9;10	11.4	
		20000	4.33	9	1 3 5 11 12 13 18	19;23	3;4;5;6;7;8	26.2	
	Mélange	5000	7.10	9	2 4 9	16;17;18	4	3.5	
		10000	7.11	9	2 4 9	16;17;18	4	8.1	
		20000	7.11	9	2 4 9	16;17;18	4	22.5	
	Torche	Affine	5000	23.27	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	2.2
			10000	23.26	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	5.0
			20000	23.26	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	13.3
		Racine 1	5000	25.50	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	2.3
			10000	25.51	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	5.0
			20000	25.52	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	13.6
Racine 2		5000	27.18	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	3.1	
		10000	27.18	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	6.9	
		20000	27.18	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	17.5	
Expo 1		5000	21.67	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	2.3	
		10000	21.67	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	5.1	
		20000	21.68	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	14.5	
Expo 2		5000	20.14	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	2.2	
		10000	20.15	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	5.1	
		20000	20.13	6	1 3 6 9	10;14	1;2;5	14.0	
Mélange		5000	25.26	6	2 5	10;12	2	2.2	
		10000	25.25	6	2 5	10;12	2	4.9	
		20000	25.25	6	2 5	10;12	2	13.6	



(a) Résultat pour l'utilisation de fonctions de revenu de types (**affine**) $\lambda = 5000, 20000$, (**expo 1**) $\lambda = 5000, 10000$ et (**expo 2**) $\lambda = 5000, 20000$

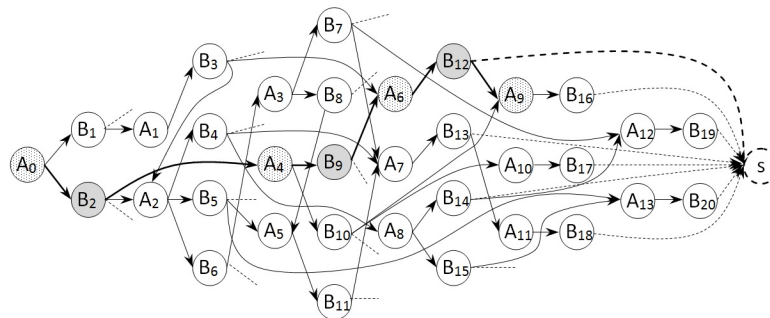


(b) Résultat pour l'utilisation de fonctions de revenu de types (**affine**) $\lambda = 10000$ et (**expo 2**) $\lambda = 20000$

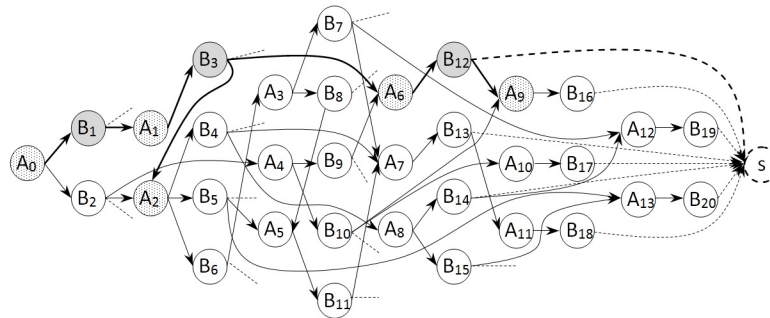


(c) Résultat pour l'utilisation de fonctions de revenu de types (**racine 1**) $\lambda = 5000, 10000, 20000$ et (**expo 1**) $\lambda = 20000$

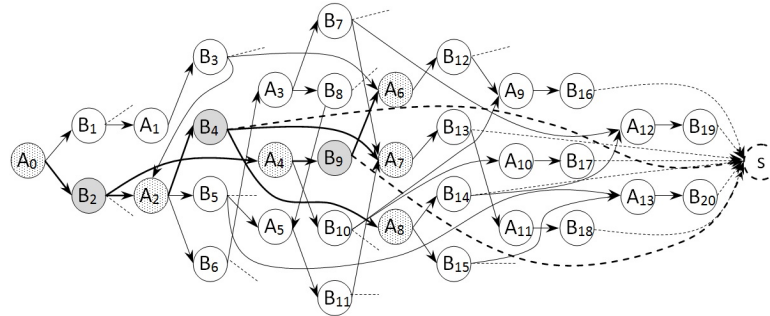
Figure 11. Alternatives (séquences) et niveaux de désassemblage retournés suivant le type de fonctions des revenus et la taille de l'échantillon utilisés



(a) Résultat pour l'utilisation de fonctions de revenu de types (**racine 2**) $\lambda = 5000$

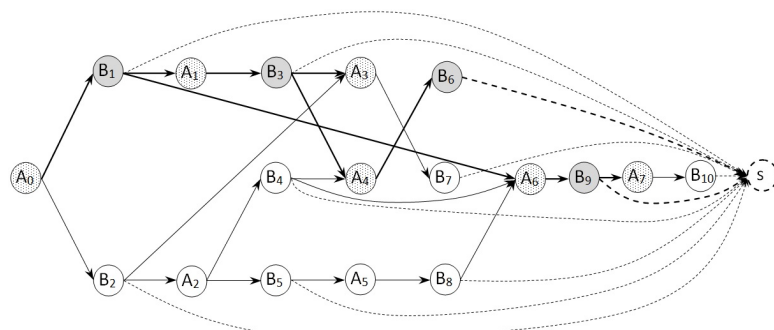


(b) Résultat pour l'utilisation de fonctions de revenu de types (**racine 2**) $\lambda = 10000, 20000$

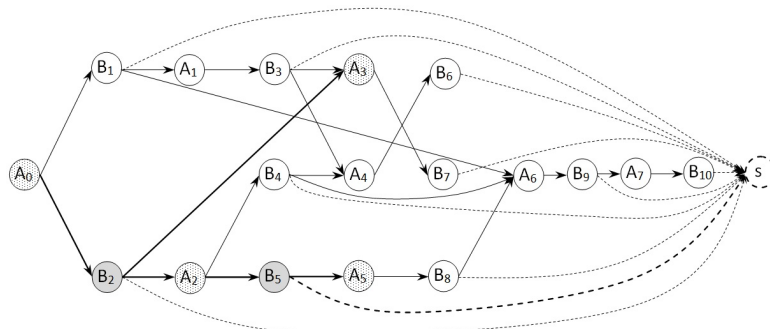


(c) Résultat pour l'utilisation du cas de mélange de tous les types de fonctions

Figure 12. Alternatives (séquences) et niveaux de désassemblage retournés suivant le type de fonctions des revenus et la taille de l'échantillon utilisés (suite)



(a) Résultat pour l'utilisation de fonctions de revenu de type (**affine**), (**racine 1**), (**racine 2**), (**expo 1**) et (**expo 2**)



(b) Résultat pour l'utilisation du cas de mélange de tous les types de fonctions

Figure 13. Alternatives (séquences) et niveaux de désassemblage retournés suivant le type de fonctions des revenus et la taille de l'échantillon utilisés (suite)

On peut observer que la séquence de désassemblage correspondant au profit maximal pour les deux instances (torche et stylo à bille) dépend des fonctions de revenus, (voir figure 13a, figure 13b et figure 11a, 11b, 12c, respectivement). On peut observer également que le niveau de désassemblage pour une même alternative dépend du type de fonctions des revenus utilisé. Par exemple, les figures 11b et 12a illustrent ce cas de figure, tout comme les figures 11c et 12b.

Les résultats montrent aussi que pour une même alternative et même niveau de désassemblage, les valeurs des profits correspondants dépendent du type de fonctions des revenus considéré. Par exemple, pour l'instance torche, l'alternative et le niveau de désassemblage sont les mêmes pour tous les cas sauf celui de mélange de fonctions, mais que les valeurs des fonctions objectives sont toutes différentes (voir tableau 6). Ces valeurs (pour les deux instances) sont relativement importantes pour les cas de fonctions de types (**racine 1**) et (**racine 2**) et relativement faibles pour les cas de fonctions de types (**expo 1**) et (**expo 2**). Elles sont plutôt moyennes pour le cas de fonctions de type (**affine**) par rapport aux autres valeurs.

6. Conclusion

Le processus de désassemblage joue un rôle primordial dans la revalorisation des produits. Il permet, effectivement, l'obtention de composants et/ou de matières qui peuvent être réutilisés ou recyclés avec des taux de récupération beaucoup plus intéressants. Afin de définir un désassemblage efficace et pour tirer les avantages économiques qu'offre le processus de désassemblage, l'incertitude liée à la qualité des produits doit être prise en compte. Afin d'apporter des éléments de réponse à cette attente, nous avons présenté dans ce travail une première étude sur la planification du processus de désassemblage prenant en considération la qualité des produits à désassembler. Cette dernière est modélisée par le concept de potentiel d'utilisation résiduel (PUR). Le PUR représente la quantité « d'usage » restante avant le démantèlement d'un produit (ou d'un sous-assemblage ou composant). Au début de la phase d'exploitation d'un produit, le PUR a une valeur de 1 ; un PUR de 0 signifie que le produit doit subir un recyclage de sa matière. Le PUR est pris comme variable aléatoire normale connue et tronquée en 0 et 1.

Pour modéliser ce problème, un programme stochastique est proposé. L'objectif est de maximiser le profit du processus de désassemblage. Ce dernier est la différence entre les revenus des composants et sous-assemblages et les coûts des tâches de désassemblage. Ces derniers sont fixes et les revenus sont définis comme fonctions de PUR. L'ensemble des alternatives de désassemblage d'un produit ainsi que les relations de précédence entre les tâches et les composants/sous-assemblages sont modélisés avec un graphe orienté.

Le modèle proposé a été appliqué à deux instances (torche et stylo à bille) adaptées de la littérature. Les résultats d'optimisation ont montré que le profit du processus de désassemblage dépend de la séquence et du niveau de désassemblage du produit, et que ce dernier est lui-même dépendant des états ou qualité des composants et sous-assemblages. Les résultats ont montré également que le niveau de désassemblage pour la même séquence ou alternative de désassemblage dépend du type de variation des revenus (des composants et sous-assemblages) en fonction du PUR.

Le processus de modélisation présenté dans ce papier peut être facilement adapté à des cas de taille industrielle comme les véhicules en fin de vie ou les produits électriques et électroniques. Une première piste de recherche future est l'application de la méthode proposée sur de tels cas. Une seconde piste importante est la prise en compte des distributions des revenus aléatoires plutôt que des moyennes échantillonnées, comme cela a été considéré dans cette étude. Enfin, comme constaté dans la réalité industrielle, les durées opératoires des tâches de désassemblage présentent des variabilités très élevées. Dans nos prochains travaux, nous investiguons le cas où les coûts des opérations de désassemblage seraient dépendants de leurs durées opératoires qui seront prises comme variables aléatoires.

Bibliographie

- Agrawal S., Tiwari M. K. (2006). A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed-model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem. *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 6, p. 1405–1429.
- Altekin F. T., Akkan C. (2012). Task-failure-driven rebalancing of disassembly lines. *International Journal of Production Research*, vol. 50, n° 18, p. 4955–4976.
- Aydemir-Karadag A., Turkbey O. (2013). Multi-objective optimization of stochastic disassembly line balancing with station paralleling. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 65, n° 3, p. 413–425.
- Bentaha M. L. (2015). Combinatorial design of disassembly lines under uncertainty. *4OR*, p. 1-2.
- Bentaha M. L., Battaïa O., Dolgui A. (2013a). Chance constrained programming model for stochastic profit-oriented disassembly line balancing in the presence of hazardous parts. In *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 414, p. 103–110. Springer Berlin Heidelberg.
- Bentaha M. L., Battaïa O., Dolgui A. (2013b). A cone programming approach for stochastic disassembly line balancing in the presence of hazardous parts. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Production Research (ICPR 22)*.
- Bentaha M. L., Battaïa O., Dolgui A. (2013c). A decomposition method for stochastic partial disassembly line balancing with profit maximization. In *IEEE Automation Science and Engineering (CASE)*, p. 410–415.
- Bentaha M. L., Battaïa O., Dolgui A. (2013d). L-shaped algorithm for stochastic disassembly line balancing problem. In N. Bakhtadze, K. Chernyshov, A. Dolgui, V. Lototsky (Eds.), *7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control*, vol. 7, p. 407–411.
- Bentaha M. L., Battaïa O., Dolgui A. (2013e). A stochastic formulation of the disassembly line balancing problem. In *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 397, p. 397–404. Springer Berlin Heidelberg.
- Bentaha M. L., Battaïa O., Dolgui A. (2014a). Disassembly line balancing and sequencing under uncertainty. *Procedia CIRP*, vol. 15, p. 239–244.
- Bentaha M. L., Battaïa O., Dolgui A. (2014b). Disassembly line balancing problem with fixed number of workstations under uncertainty. In *19th IFAC World Congress*, p. 3522–3526. Cape Town, South Africa.
- Bentaha M. L., Battaïa O., Dolgui A. (2014c). Lagrangian relaxation for stochastic disassembly line balancing problem. *Procedia CIRP 2014*, vol. 17, p. 56–60.
- Bentaha M. L., Battaïa O., Dolgui A. (2015). A bibliographic review of production line design and balancing under uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, n° 3, p. 70-75. (15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2015)
- Bentaha M. L., Battaïa O., Dolgui A. (2015). An exact solution approach for disassembly line balancing problem under uncertainty of the task processing times. *International Journal of Production Research*, vol. 53, n° 6, p. 1807–1818.

- Bentaha M. L., Battaïa O., Dolgui A., Hu S. J. (2014). Dealing with uncertainty in disassembly line design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 63, n° 1, p. 21 - 24.
- Bentaha M. L., Battaïa O., Dolgui A., Hu S. J. (2015). Second order conic approximation for disassembly line design with joint probabilistic constraints. *European Journal of Operational Research*, vol. 247, n° 3, p. 957–967.
- Byington C. S., Edwards D., Watson M. (2004). Dynamic signal analysis and neural network modeling for life prediction of flight control actuators. In *American Helicopter Society Annual Forum*. Baltimore, USA.
- Camci F., Valentine G., Navarra K. (2007). Methodologies for integration of phm systems with maintenance data. In *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. Montana, USA.
- Commission-Européenne. (2010). *Europe 2020: une stratégie pour une croissance intelligente, durable et inclusive*. Rapport.
- Diez L., Marangé P., Mayer F., Levrat E. (2015). Maintenance as a cornerstone for the application of regeneration paradigm in systems lifecycle. *CSD&M'15*.
- Dong T., Zhang L., Tong R., Dong J. (2006). A hierarchical approach to disassembly sequence planning for mechanical product. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 30, n° 5-6, p. 507-520.
- Dufflou J., Seliger G., Kara S., Umeda Y., Ometto A., Willems B. (2008). Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, n° 2, p. 583-600.
- Güngör A., Gupta S. M. (2001). A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures. *International Journal of Production Research*, vol. 39, n° 7, p. 1427–1467.
- Ilgın M., Gupta S. (2012). *Remanufacturing modeling and analysis*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Johnson M. R., Wang M. H. (1995). Planning product disassembly for material recovery opportunities. *International Journal of Production Research*, vol. 33, n° 11, p. 3119–3142.
- Kalaycı C. B., Gupta S. M. (2013). Ant colony optimization for sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 24, n° 3, p. 413–427.
- Kara S., Pornprasitpol P., Kaebnick H. (2006). Selective Disassembly Sequencing: A Methodology for the Disassembly of End-of-Life Products. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 55, n° 1, p. 37–40.
- Kumar S., Dolev E., Pecht M. (2009). Parameter selection for health monitoring of electronic products. *Microelectronics Reliability*, vol. 50, p. 161-168.
- Lambert A., Gupta S. (2008). Methods for optimum and near optimum disassembly sequencing. *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 11, p. 2845-2865.
- Lambert A. J. D. (1999). Linear programming in disassembly/clustering sequence generation. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 36, n° 4, p. 723–738.
- Lambert A. J. D. (2003). Disassembly sequencing: a survey. *International Journal of Production Research*, vol. 41, p. 3721–3759.

- Lambert A. J. D. (2007). Optimizing disassembly processes subjected to sequencedependent cost. *Computers & Operations Research*, vol. 34, p. 536-551.
- McGovern S. M., Gupta S. M. (2011). *The disassembly line, balancing and modeling* (2011^e éd.). New York, McGraw-Hill Companies.
- Peeters J. R., Vanegas P., R. Duflou J., Mizuno T., Fukushige S., Umeda Y. (2013). Effects of boundary conditions on the end-of-life treatment of LCD TVs. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 62, n° 1, p. 35-38.
- Rickli J. L., Camelio J. A. (2014). Partial disassembly sequencing considering acquired end-of-life product age distributions. *International Journal of Production Research*, vol. 52, n° 24, p. 7496-7512.
- Riggs R. J., Battaia O., Hu S. J. (2015). Disassembly line balancing under high variety of end of life states using a joint precedence graph approach. *Journal of Manufacturing Systems*, In Press.
- Santochi M., Dini G., Failli F. (2002). Computer aided disassembly planning: State of the art and perspectives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 51, n° 2, p. 507-529.
- Shin J. (2009). *Decision support methods for closed-loop conceptual design*. Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Subramani A. K., Dewhurst P. (1991). Automatic generation of product disassembly sequences. *Annals of the CIRP*, vol. 40, n° 1, p. 115-118.
- Tang Y., Zhou M., Zussman E., Caudill R. (2002). Disassembly modeling, planning, and application. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 21, n° 3, p. 200 - 217. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612502801625>
- Tian G., Liu Y., Tian Q., Chu J. (2012). Evaluation model and algorithm of product disassembly process with stochastic feature. *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 14, n° 2, p. 345-356.
- Turowski M., Morgan M. (2005). Disassembly line design with uncertainty. *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 1, p. 954-959.
- UN-documents. (1987). *Report of the world commission on environment and development: Our common future*. Rapport.

Article soumis le 30 juin 2015

Accepté le 7 octobre 2015

