



**HAL**  
open science

## Éco-conception

Zineb Simeu-Abazi, Amal Kobeissi

► **To cite this version:**

Zineb Simeu-Abazi, Amal Kobeissi. Éco-conception. Environnement, Ingénierie & Développement, 2003, N°31 - 3ème Trimestre 2003, pp.14-21. 10.4267/dechets-sciences-techniques.2431 . hal-03177985

**HAL Id: hal-03177985**

**<https://hal.science/hal-03177985v1>**

Submitted on 23 Mar 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# ÉCO-CONCEPTION

## INTÉGRATION DE LA NOTION D'ÉVALUATION DANS LA CONCEPTION DE PRODUITS

Zineb Simeu-Abazi, Amal Kobeissi  
*Laboratoire d'automatique de Grenoble*

**Cet article concerne l'intégration des contraintes de recyclage dans la conception des produits. Il présente d'une part, l'étude sur les techniques utilisées pour l'évaluation du produit/process et les travaux de recherche sur l'éco-conception. D'autre part, suite aux travaux sur l'évaluation des produits en fin de vie, nous présenterons les différents problèmes rencontrés, ainsi que les solutions envisagées comme la mise en œuvre d'un module d'auto-diagnostic facilitant la testabilité des produits.**

**This paper relates to the integration of the constraints of recycling in the design of products. It presents, on the one hand, the study on the techniques used in the evaluation of product/process and the research done on ecodesign. On the other hand, following the work on evaluation of the end of life products, we will present the various encountered problems, as well as the solutions considered such as the implementation of a self-diagnosis module which make easy the testability of products.**

### INTRODUCTION

Depuis quelques décennies, l'abondance de produits techniques usagés devient un problème de société dans la mesure où nous ne sommes pas encore capables de gérer correctement nos déchets. Face à une demande croissante de la consommation durant les années 1950 et 1960, les entreprises se sont orientées vers une production de masse, aux cadences élevées. Les produits ainsi conçus ont des durées de vie de plus en plus courtes. Cette tendance s'accroît encore à cause de la rapidité de mise sur le marché de nouvelles générations de produits. Lorsque les produits deviennent vieux, obsolètes ou qu'ils ne fonctionnent plus, leur remplacement devient nécessaire et par conséquent leur mise au rebut l'est aussi.

En France, et au niveau de l'électroménager, le nombre de produits bruns<sup>1</sup> rejetés est supérieur 120 000 tonnes

par an, comprenant 2 500 000 appareils, soit environ 50 000 tonnes de déchets [Bomstein 2000]. Parmi ces déchets, des tubes cathodiques qui sont considérés comme des déchets spécialement polluants dans la mesure où ils contiennent des terres rares et des métaux lourds. Ces substances sont nocives pour l'homme, et actuellement il n'existe pas de traitement permettant de neutraliser ses effets nocifs. De plus, la quantité de produits blancs<sup>2</sup> en fin de vie est estimée à plus de 400 000 appareils pour l'année 1996, ce qui représente environ 25 000 tonnes de déchets, seulement en région Rhône-Alpes [guide déchets 1997].

Plusieurs procédures de revalorisation des déchets sont actuellement en cours d'étude tel que le désassemblage qui exploite au mieux la valeur résiduelle des produits en fin de vie. Le désassemblage permet d'extraire des composants en vue de les trier non seulement pour séparer les matériaux incompatibles lors de la refonte en matières premières, mais aussi pour sélectionner ceux qui peuvent être réparés et/ou re-conditionnés.

Une plate-forme de recyclage [Chevron 1999] a été développée. Elle est formée d'un poste d'évaluation, d'un atelier de réparation et d'un atelier de désassemblage (voir figure 1, page suivante).

Un produit en fin de vie passe d'abord dans le poste d'évaluation qui détermine si le produit est réparable ou non. Dans le premier cas, le produit est dirigé vers l'atelier de réparation dans lequel un remplacement des composants défectueux sera effectué. Sinon, il est orienté vers l'atelier de désassemblage dans lequel des pièces sont extraites et classées selon leurs matières premières.

Dans ce contexte de recyclage, nous nous sommes intéressés à l'évaluation des produits techniques en fin de vie. Le rôle de l'évaluation est de déterminer ce qui peut être réutilisé dans un produit usagé. Ceci revient à tester ses services. Si la qualité des services testés n'est pas celle prévue, alors, suivant la dégradation observée, la

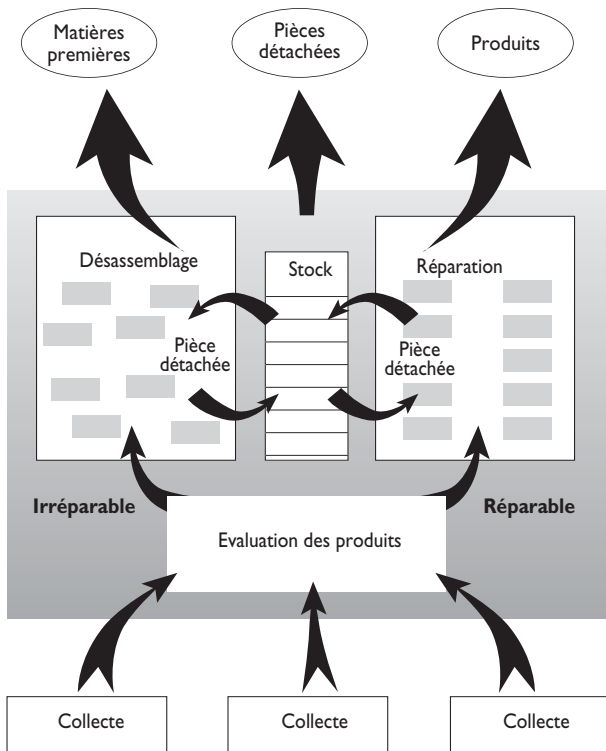


Figure 1 : La plate forme de recyclage

fonction « évaluation » prend une décision de réparer ou de désassembler pour réutiliser et recycler.

Ainsi, après avoir fait un tour d'horizon sur l'application de l'éco-conception en milieu industriel, nous présentons dans la première partie notre approche pour l'évaluation ainsi que les différentes difficultés rencontrées. Puis, pour faciliter l'évaluation et remédier à ces difficultés, nous présentons notre démarche vis-à-vis de l'éco-conception. Elle est basée sur l'utilisation des arbres de défaillances (AdD) et des coupes minimales. Avant de conclure cet article, nous présentons une application de l'approche proposée sur un exemple concret.

## L'ÉCO-CONCEPTION DANS L'INDUSTRIE ET DANS LA RECHERCHE

Nous présentons ici quelques exemples d'intégration du recyclage dans l'industrie<sup>3</sup>.

Le recyclage du verre est devenu en quelques années une réalité incontournable. Le verre a la particularité de se recycler parfaitement. Aujourd'hui, toute nouvelle bouteille fabriquée contient plus de 50 % de verre récupéré, obtenu par la transformation de l'emballage usagé en une nouvelle matière première : le calcin. Actuellement, les industriels insèrent jusqu'à 80 % de calcin dans leurs fours.

L'éco-conception des voitures s'appuie sur des principes, aujourd'hui normalisés (norme Afnor) qui permettent d'optimiser la valorisation en fin de vie à savoir :

faciliter la dépollution des fluides, batteries, fonctions pyrotechniques, permettre une bonne accessibilité et un désassemblage aisé des pièces.

PSA Peugeot Citroën p.ex. a adopté une politique « matières » rigoureuses fondée sur le nombre de famille de polymères utilisées, l'emploi des matériaux les plus facilement recyclables, la conception mono matériau et la limitation de l'association de matériaux non-compatibles.

La nouvelle classe C, mise sur le marché par Mercedes-Benz est conçue de manière à ce que la plupart des composants de la carrosserie soient facilement démontables et 85 % d'entre eux se prêtent à la revalorisation. Dans le domaine de l'électronique ou de l'informatique, les constructeurs des produits ont pris des mesures proactives vers une conception de produits plus consciente des contraintes de valorisation en fin de vie. Elle est basée sur la réduction des pièces composant le produit, la rationalisation des matériaux et la réutilisation des composants.

Les produits et les composants électroniques sont des assemblages complexes constitués de nombreux matériaux. Cette diversité de matériaux trouvés dans quelques produits peut empêcher leur réutilisation. Dans ce sens les grandes compagnies cherchent à incorporer les matériaux qui sont facilement recyclables.

Les nouvelles contraintes dans les conceptions des télévisions ont été introduites. A titre d'exemple, Panasonic incorpore une structure modulaire de sorte que les modules soient facilement désassemblés et triés selon les matériaux ou les composants pour assurer une plus grande réutilisation.

Rank Xerox a réduit la production de déchets solides de 50 %. En effet, lorsqu'un photocopieur parvient en fin de vie, il est emporté dans un atelier Xerox, pour être examiné, partiellement démonté, puis déposé sur la ligne d'assemblage de Xerox, afin d'être reconstruit. Si l'opération s'avérait impossible, l'appareil serait envoyé vers un site de « strip and scrap » (déshabillage et récupération) afin de récupérer les pièces encore bonnes qui sont envoyées sur un autre site pour être nettoyées et remises en stock, tandis que le reste est broyé et recyclé.

Dans le souci de concevoir des produits respectueux de l'environnement, un bon nombre de projets ou programmes de recherche a été consacré à l'éco-conception. Ces projets, pour la plupart, concernent le domaine des produits électriques et électroniques et ont comme but principal d'élaborer les performances environnementales des produits [Janin 2000].

Ainsi aux Etats Unis un outil a été élaboré – le diagramme en arrête de poisson inversée (reverse fishbone diagram) [Ischii et al. 1995], [Ischii et al. 1996]. C'est une représentation graphique qui donne la possibilité de

visualiser les étapes de désassemblage sur un arbre de procédures. Cet outil est en fait utile pour optimiser les séquences de désassemblage d'un produit à reconcevoir afin d'améliorer sa recyclabilité.

## L'ÉVALUATION DES PRODUITS EN FIN DE VIE

Après avoir été collecté, le produit doit être évalué afin de déterminer la liste de pièces à récupérer ou à réparer. Pour cela un certain nombre d'informations sont pré-requises au traitement d'évaluation comme la gamme du produit, sa marque ou encore son état général (rouillé, déformé,...).

L'objectif du système d'évaluation est de déterminer, à partir des caractéristiques d'un produit (marque, gamme et son état général), sa destination : désassemblage ou réparation. En cas de désassemblage, il doit aussi, fournir la liste des pièces à récupérer et la séquence de démontage à suivre. En cas de réparation, le système doit donner la liste des éléments défectueux. La décision est prise en fonction du stock (un stock de pièces détachées et de produits d'occasion). En effet, elle dépend du besoin de stock qui doit répondre à la demande des clients ou de l'atelier de réparation. Elle dépend aussi d'un coût économique (coût de l'opération de réparation du produit ou de récupération d'une pièce) et d'un coût écologique (les conséquences écologiques si l'opération « récupérer une pièce donnée » n'est pas exécutée). La figure 2 donne une spécification globale du système.

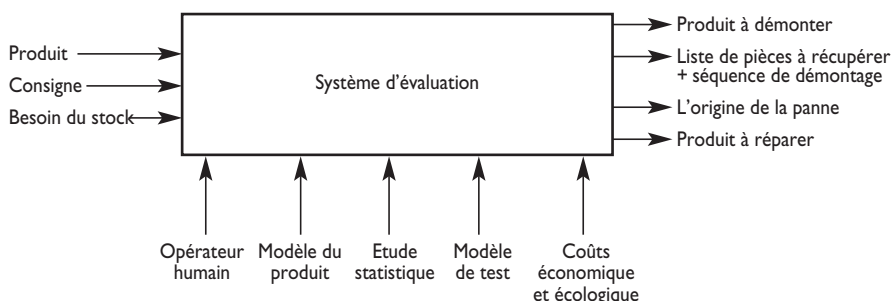


Figure 2 : Le système d'évaluation

Une procédure systématique pour déterminer la destination du produit assurant un bénéfice maximum a été proposée. Cette procédure a été divisée en deux niveaux distincts : (1) l'analyse de l'état du produit et (2) l'analyse économique.

### I- l'analyse de l'état du produit :

Dans cette phase, l'historique du produit est construit. En effet, une pré-évaluation du produit selon son état externe et ses caractéristiques est réalisée. Ceci donne lieu à deux possibilités : tester le produit ou non. Dans le cas du test, des séquences de tests sont appliquées aux produits afin de caractériser leur état de fonction-

nement et celui de leurs composants. Pour cela, plusieurs modèles sont utilisés pour la description des différents objectifs impliqués dans la génération de séquences de test : l'objectif du test, la spécification du produit et l'arbre du test. Ces modèles sont alors employés pour définir des règles formelles pour la construction de la séquence de test la plus adaptée.

Une fois que le produit est testé et qu'une caractérisation des symptômes est réalisée, l'identification de l'origine de la panne (le diagnostic) est effectuée. A cet effet, nous avons conçu un système expert basé sur des règles de production et le formalisme objet. Ces règles de production ont été récupérées à partir d'une classification de défaillances réalisée à l'aide d'arbre des défaillances et du modèle structurel/fonctionnel du produit. Dans le cas où le produit n'est pas testé soit pour des raisons économiques liées aux coûts de l'évaluation et/ou à la plate-forme ou que le produit ne peut simplement pas subir du test, nous nous sommes appuyés sur des probabilités conditionnelles pour l'étude de l'état de fonctionnement du produit et de ses composants. Ainsi, le système expert récupère ces informations et propose un diagnostic approximatif basé sur les probabilités attribuées aux règles de production et à leurs composantes [Kobeissi 2000a,b] [Kobeissi 2001].

### 2- l'analyse économique :

Cette phase évalue en tenant compte de la dégradation observée du produit, la différence, d'un point de vue profit, entre la récupération et le désassemblage du produit (ou de ses composants). A cet effet, un certain nombre d'indicateurs économiques ont été définis. L'état de la dégradation est fourni par la phase précédente (test, détection et diagnostic). Trois variables de décision ont été proposées : recyclabilité, désassemblabilité et réparabilité d'un produit ou d'un de ses composants [Gerner & Kobessi 2000].

Parmi les difficultés rencontrées dans la phase d'analyse on peut noter :

#### - Le manque de standardisation et la variété des données nécessaires pour l'évaluation :

En effet, les produits techniques que nous traitons appartiennent à une large famille (produits techniques blancs, bruns, gris, etc.), leurs modèles ne sont pas standardisés et ne regroupent pas tous les aspects nécessaires pour l'évaluation (comportemental, fonctionnel, structurel, défaillances). Ceci, nous a amené à utiliser plusieurs modèles pour représenter le produit.

#### - La détermination des probabilités conditionnelles :

Ces probabilités dépendent de plusieurs facteurs : la

qualité du produit, sa durée d'utilisation, le milieu et les conditions d'utilisation, etc.

**- L'absence d'une ressource capable de récupérer automatiquement les réponses du produit.**

En effet, l'approche proposée est semi-automatique et s'appuie fortement sur la présence d'un opérateur humain.

En conséquence et afin de remédier à ces difficultés, nous nous sommes intéressés à l'éco-conception dans le but de faciliter l'évaluation et les tests des produits. L'objectif consiste en l'intégration d'un composant d'auto-diagnostic dans le produit. Ce module remplacera tout le système d'évaluation des produits. Par conséquent, la maintenance des produits devient plus facile.

### L'ÉCO-CONCEPTION POUR UNE ÉVALUATION RAPIDE

Le but principal de cette communication est la conception d'un module d'auto-diagnostic qui doit être intégré dès la conception des produits. Par définition, le terme « auto-diagnostic » est associé à l'aptitude d'un constituant à détecter et éventuellement diagnostiquer et corriger ses propres défauts [Apave Télémechanique].

Dans cet article, nous ne nous intéressons qu'aux aspects auto-détection et auto-diagnostic sans considérer la correction automatique. Or, pour effectuer le diagnostic, voire l'auto-diagnostic d'un produit ou d'un processus, il est nécessaire de disposer d'un minimum d'informations. Ces informations, liées par exemple à la défaillance du produit, sont fournies par des capteurs. En conséquence, nous nous sommes intéressés aux différents sortes de capteurs à utiliser pour l'ensemble des défaillances possibles. De plus, afin de réaliser un diagnostic exact, il faut déterminer le nombre de capteurs ainsi que leur emplacement permettant d'avoir une accessibilité maximale aux éléments à diagnostiquer.

La démarche que nous proposons consiste à élaborer l'arbre de défaillances pour un produit donné. La construction d'un tel arbre nous permet d'effectuer une classification des défaillances (première, seconde, de commande, de type électrique, de type mécanique etc.). Une fois l'arbre de défaillances conçu, nous établissons les types de capteurs et leur emplacement. En ce qui concerne l'optimisation du nombre de capteurs, nous réduisons l'arbre de défaillances afin de réduire le nombre de capteurs nécessaires au diagnostic global du produit.

Dans ce but, nous proposons de déterminer les coupes minimales pour l'arbre de défaillances déjà élaboré. Ainsi, nous

présentons tout d'abord quelques définitions et détails sur les AdD et les coupes minimales. Ensuite nous présenterons notre approche suivie d'un exemple illustratif.

### Arbre de défaillances et coupe minimale

Un arbre de défaillances est une des représentations de plus en plus utilisées de la logique d'un système. Elle est connue aussi sous les noms d'arbre des défauts, d'arbre des causes ou d'arbre des fautes.

On part d'un événement indésirable unique et bien défini qui correspond au non fonctionnement d'un système et l'arbre de défaillances représentera graphiquement les combinaisons d'événements qui conduisent à la réalisation de cet événement indésirable (méthode déductive). Il sera formé de niveaux successifs tels que chaque événement soit généré à partir des événements de niveau inférieur par l'intermédiaire de divers opérateurs (ou portes) logiques. Ce processus déductif est poursuivi jusqu'à ce qu'on arrive à des événements de base, indépendant entre eux et probabilisables qui peuvent être des pannes, des erreurs humaines, des conditions extérieures, etc...

Considérons le système composé de quatre composants X1, X2, X3 et X4. Il peut être représenté par le diagramme de la figure 3a. Le système est en panne si les deux chemins allant de E vers S sont en pannes. Le système est en panne si X1 ou X3 (resp. X2 ou X4) est défaillant et si X2 ou X4 (resp. X3 ou X1) est défaillant. En remplaçant les ou et le et par les portes logiques correspondantes, on obtient l'arbre de défaillances de la figure 3b.

#### Définition :

Une coupe est un ensemble d'événements entraînant l'événement indésirable. Une coupe minimale est la plus petite combinaison d'événements entraînant l'événement indésirable ; ainsi, par définition, si un des événements d'une coupe minimale ne se produit pas, l'événement

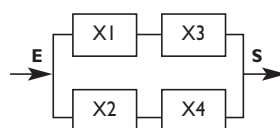


Figure 3a : Exemple d'un système à quatre composants

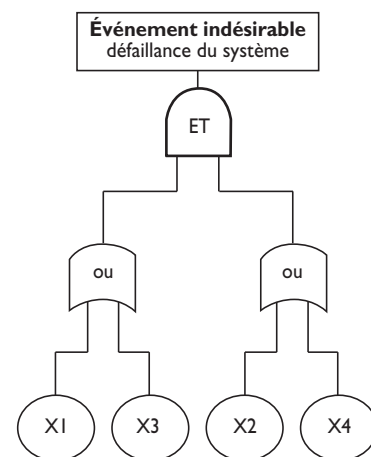


Figure 3ab : Arbre de défaillances du système

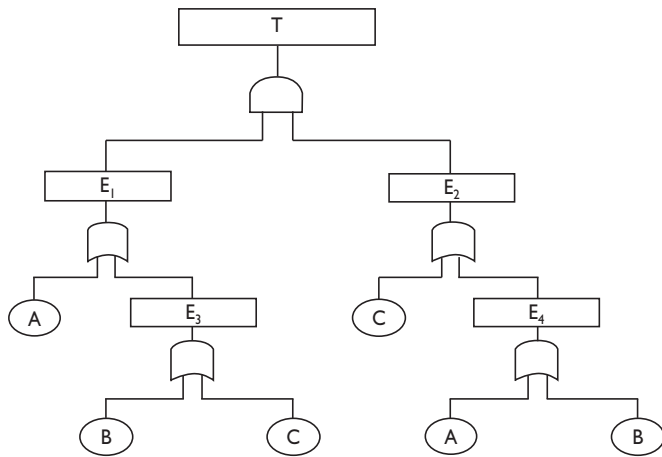


Figure 4a : Arbre de défaillances

ment indésirable ne se réalise pas [Villemeur 88]. Un arbre de défaillances a un nombre fini de coupes minimales. Il existe plusieurs types de coupes minimales seules les coupes minimales suivantes sont prises en compte :

- une coupe minimale d'ordre 1 représente (si elle existe) les défaillances simples qui entraînent l'événement indésirable ;
- une coupe minimale d'ordre 2 représente (si elle existe) les défaillances simultanées qui, se produisent en même temps, qui entraînent l'événement indésirable ;

#### Recherche de coupes minimales

La recherche de coupes minimales se réalise à partir d'une transformation de l'arbre de défaillances en une expression booléenne. Un arbre de défaillances peut être interprété comme une représentation de relations booléennes entre les événements qui entraînent l'événement indésirable. Pour cette recherche, l'algèbre de Boole est utilisée :

- à chaque événement de base est associée une variable booléenne ;
- on associe à l'événement de sortie d'une porte ET une variable booléenne égale au produit booléen des variables booléennes des événements d'entrée ;
- on associe à l'événement de sortie d'une porte OU une variable booléenne égale à la somme booléenne des variables booléennes des événements d'entrée.

En définitive une expression booléenne, en fonction des variables booléennes associées à chaque événement de base, est obtenue pour un événement indésirable.

L'utilisation des lois de l'algèbre de Boole permet de mettre l'expression booléenne de l'événement indésirable (F) sous la forme :

$$F = C_1 + C_2 + \dots + C_i + \dots + C_m$$

Où :  $C_i$  est le produit de  $m_i$  événement de base,

$$C_i = B_1^i \cdot B_2^i \cdot \dots \cdot B_{m_i}^i$$

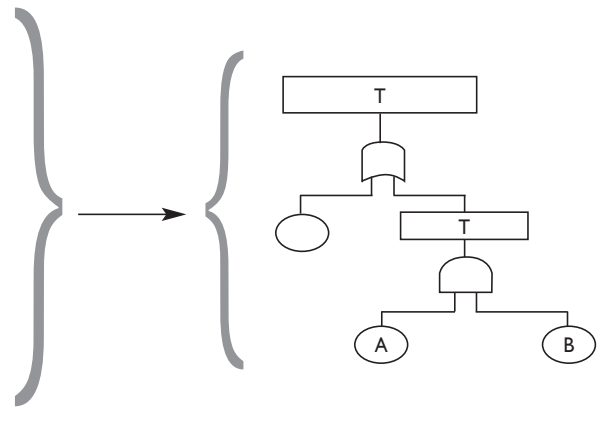


Figure 4b : Arbre de défaillances réduit

L'expression F est réduite et les événements  $C_i$  sont des coupes minimales. Il faut noter que la recherche de l'expression réduite peut se faire selon divers algorithmes classiques (tableau de Karnaugh, algorithmes de Mac Cluskey ou de Tison) [Limnios 1991].

À partir de l'arbre de défaillances de la figure 4a, nous obtenons l'expression de T suivante :

$$T = (A+B+C).C + (A+B+C).(A.B)$$

La réduction de cette expression permet d'obtenir :

$$T = A.C + B.C + C + A.B + A.B + C.A.B$$

$$T = (A.C + C) + B.C + (A.B + A.B) + C.A.B$$

$$T = (C+B.C) + (A.B + C.A.B)$$

Finalement nous obtenons :

$$T = C + A.B$$

L'arbre de défaillances (fig 4b) représente les événements C et A.B. Cet arbre est appelé « arbre réduit »

Les coupes minimales sont C et A.B.

Cette réduction permet de limiter le nombre de points d'observation et donc le nombre de capteurs à surveiller.

#### APPLICATION

Le système représenté sur la figure 5 permet à un opérateur de commander à distance le fonctionnement

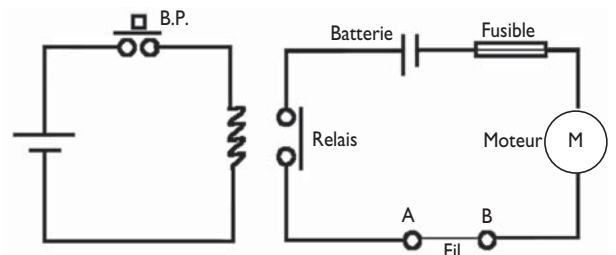


Figure 5 : Le système à étudier.



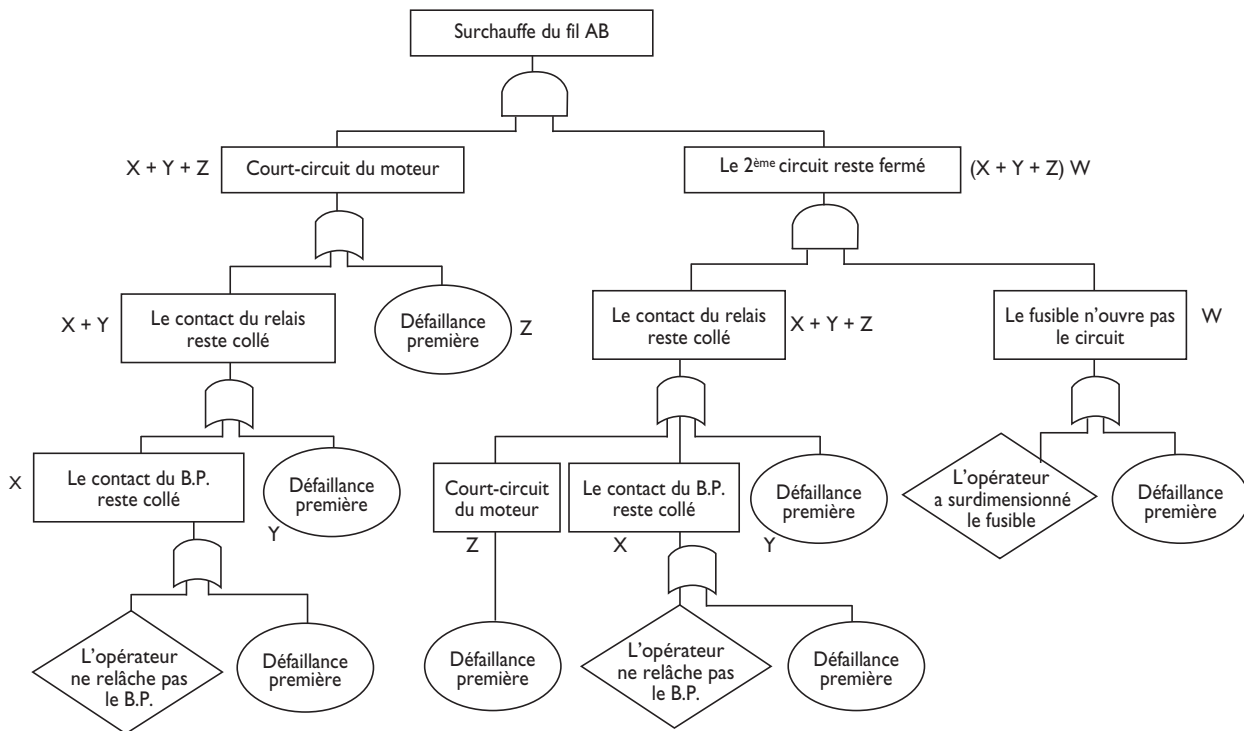


Figure 6 : L'arbre de défaillance.

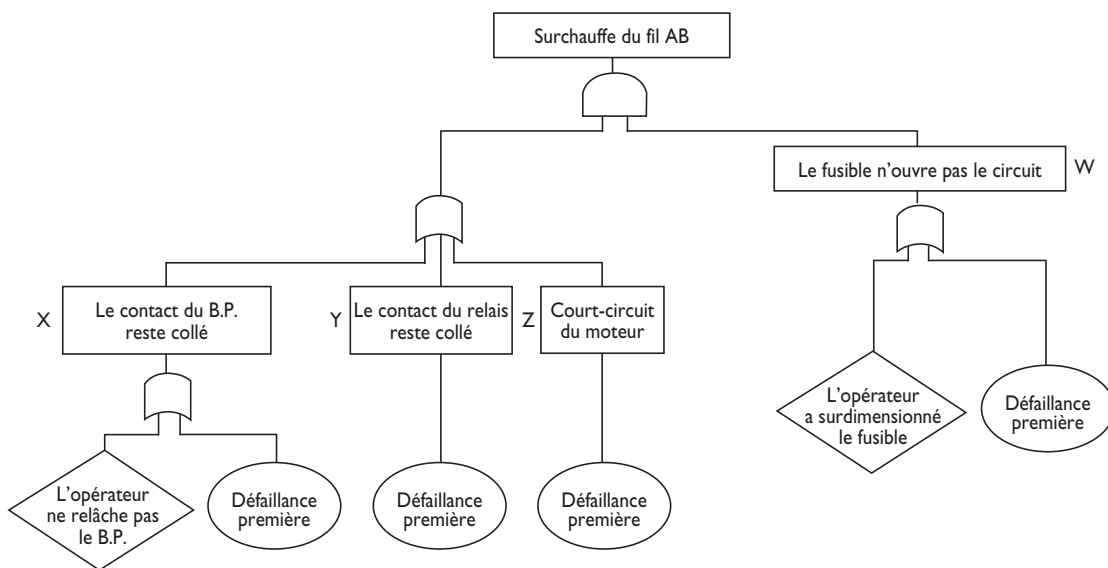


Figure 6 : Arbre de défaillances réduit.

du moteur à courant continu. Ce système est composé d'un bouton poussoir (B.P.), d'un relais, d'un moteur, d'un fusible et de deux batteries [Villemeur 88].

L'opérateur appuie sur le bouton poussoir (B.P.) provoquant ainsi l'excitation d'un relais, la fermeture du contact associé et l'alimentation électrique du moteur. Lorsque l'opérateur relâche le bouton-poussoir, le moteur s'arrête. Un fusible permet de protéger le circuit électrique contre tout court-circuit.

Supposons que le fil AB traverse une zone où se trouvent des vapeurs inflammables. L'événement indésirable à éviter est la surchauffe du fil AB. Le système est conçu pour faire fonctionner le moteur électrique pendant un temps très court. Ainsi un fonctionnement prolongé du moteur peut entraîner sa destruction par suite de son échauffement ou par un court-circuit. Ce dernier provoque un courant élevé et par conséquent le contact du relais reste collé, même après la désexcitation du relais.

Tableau 1 : Caractéristiques des capteurs

Variable de coupe minimale	Éléments à considérer	Type de capteurs à utiliser	Caractéristiques	Emplacement	Nombre
X	1. B.P.	1.1. Logique	1.1. Donne une information sur la position du B.P. (1 ou 0) ; son modèle est le contact fermé ou ouvert (B.P. enfoncé ou non enfoncé) [Hubin]	1.1. Sortie	1.1. un
		1.2. Horloge	1.2-Définit plus ou moins explicitement les valeurs maxi et mini de la grandeur observée ; dans notre cas, après le dépassement de l'intervalle de temps de tournage du moteur, une alarme est déclenchée [Hubin 2000]	1.2. Sortie	1.2. un
	2- Fusible	2- Virtuel	Dans le cas du fusible nous ne pouvons pas utiliser des capteurs classiques mais une information supplémentaire (combinaison des signaux venant des autres capteurs) peut être donnée par ces capteurs [Sampath 2000]	Entrée	un
Y	1- Relais	1.1- Logique	1.1- Donne une information sur la position du B.P.(1 ou 0) ; son modèle est le contact fermé ou ouvert (B.P. enfoncé ou non enfoncé) [Hubin] ;	1.1. Sortie	1.1. un
		1.2- Numérique	1.2. Fournit un signal fréquentiel (un certain nombre d'impulsions par unité de temps en fonction de la grandeur mesurée, dans notre cas le courant) ; faciles à employer, ils sont directement couplés à un compteur [Hubin] ;	1.2. Entrée	1.2. un
	2- Fusible	2- Virtuel	Dans le cas du fusible nous ne pouvons pas utiliser des capteurs classiques mais une information supplémentaire (combinaison des signaux venant des autres capteurs) peut être donnée par ces capteurs [Sampath]	Entrée	un
Z	1- Moteur	1.1- Logique	1.1. Donne une information sur la position du B.P. (1 ou 0) ; son modèle est le contact fermé ou ouvert (B.P. enfoncé ou non enfoncé) [Hubin 2000]	1.1- Sortie	1.1- un
		1.2- Génératrice tachymétrique	1.2. Sert à la mesure du régime du moteur (nombre de tours par unité de temps), à la vérification du bon fonctionnement du moteur, à la mesure de sous-vitesse, pour détecter une surcharge du moteur ; [www.metrix.fr]	1.2- Sortie	1.2- un
	2- Fusible	2- Virtuel	Dans le cas du fusible nous ne pouvons pas utiliser des capteurs classiques mais une information supplémentaire (combinaison des signaux venant des autres capteurs) peut être donnée par ces capteurs [Sampath 2000]	Entrée	un
W	Fusible	Virtuel	Dans le cas du fusible nous ne pouvons pas utiliser des capteurs classiques mais une information supplémentaire (combinaison des signaux venant des autres capteurs) peut être donnée par ces capteurs [Sampath 2000]	Entrée	un

Dans cette application l'analyse porte sur la défaillance : surchauffe du fil AB.

#### Démarche suivie :

Tout d'abord nous construisons l'arbre de défaillances en considérant la surchauffe du fil AB comme l'événement sommet (l'événement indésirable). Dans l'élaboration de cet arbre nous classifions les défaillances comme électriques, mécaniques, de conception. La figure 6 montre l'arbre de défaillances du système considéré.

Pour la détermination des coupes minimales, nous utilisons l'algèbre et les lois de Boole. Les quatre événements de base de l'arbre de défaillances obtenu sont notés de la manière suivante :

X « le contact du B.P. reste collé »

Y « le contact du relais reste collé – défaillance première »

Z « court-circuit du moteur – défaillance première »

W « le fusible n'ouvre pas le circuit »

F « surchauffe du fil AB » - événement sommet

Tous ces événements sont représentés sur l'arbre de défaillances de la figure 6.

Pour l'événement sommet F l'expression suivante est obtenue:

$$F = (X + Y + Z) \cdot (X + Y + Z) \cdot W,$$

et en appliquant la loi de l'idempotence ( $A \cdot A = A$ ) de l'algèbre de Boole, l'expression finale est :

$$F = (X + Y + Z) \cdot W = X \cdot W + Y \cdot W + Z \cdot W ;$$

L'arbre réduit pour l'exemple considéré est donné par la figure 7.

A partir de cet arbre, trois coupes minimales sont possibles X.W, Y.W et Z.W. Nous pouvons constater que



le fusible (W) est un élément redondant pour les trois éléments X,Y et Z.

A partir des coupes minimales nous déterminons le type, l'emplacement et le nombre de capteurs nécessaires pour la détection de la défaillance considérée (surchauffe du fil AB).

Le tableau I (page précédente), résume les caractéristiques des capteurs à utiliser, leur emplacement et leur nombre.

Dans ce tableau, nous avons introduit toutes les variables de la coupe minimale déjà obtenue, les éléments respectifs à considérer, le type de capteurs ainsi que leurs caractéristiques, leur emplacement et le nombre nécessaire.

Ainsi pour la détection d'une défaillance mécanique dans le B.P. (le contact du B.P. reste collé) nous avons besoin d'un capteur de type logique qui fournit une information sur l'état du bouton poussoir (le B.P. est enfoncé ou non enfoncé (1 ou 0)). L'emplacement de ce capteur se trouve à la sortie de ce dernier. Un seul capteur suffit pour ce type de défaillance.

L'intégration de cette solution (capteur de la position du B.P. - diode allumée) dans la reconception permet une détection rapide de ce type de défaillance mécanique.

## CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté la problématique d'«éco-conception pour faciliter l'évaluation des produits» en fin de vie. Nous avons présenté le système d'évaluation et montré les différentes difficultés rencontrées. Ceci, nous a conduit à nous intéresser à l'intégration du module d'auto diagnostic dès la conception des produits.

L'approche proposée est basée sur les arbres de défaillances. L'arbre de défaillances est une technique purement déductive, mais une technique qui nous a permis d'identifier les points faibles dans la conception du système. Elle constitue également un moyen de représentation de la logique des défaillances. Après avoir construit l'arbre de défaillances nous avons réalisé une analyse algébrique à travers les coupes minimales. L'essentiel dans cette analyse est la réduction de l'arbre de défaillances ou la recherche des coupes minimales afin d'obtenir un arbre de défaillances réduit. Parmi les méthodes de recherche de coupes minimales, nous avons utilisé la méthode la plus simple qui est la méthode directe.

Nous envisageons dans la suite, d'implémenter notre approche. Puis, nous allons nous intéresser à l'étude d'une méthodologie générale applicable à différents types de systèmes (produits). Enfin, nous construisons le système d'évaluation à intégrer dans le produit lors de sa conception.

## Zineb Simeu-Abazi, Amal Kobeissi

Laboratoire d'automatique de Grenoble  
BP 46, 38402 St-Martin-d'Hères Cedex, France  
Courriel : Zineb.Simeu-Abazi@lag.ensieg.inpg.fr

## Notes

1. Produits bruns: Produits électroniques de type télévision (N/B ou couleur), magnétoscope, chaîne HI-FI, micro ordinateur, périphériques (imprimantes, etc.)...
2. Produits blancs: Produits électroménagers de type lave-linge, sèche-linge, lave-vaisselle, cuisinière, plaque de cuisson, four encastrable, micro-

onde, réfrigérateur (simple ou combiné), congélateur, ...

3. Toute information concernant l'intégration du recyclage en conception dans l'industrie peut être consultée sur les pages web suivantes : [www.ipaq-recycling.com], [www.logistique.com], [www.dechetcom.com], [www.eia.org], [www.xerox.com]

## Bibliographie

[Apave Télémécanique] Apave Télémécanique Groupe Schneider *La sûreté des machines et installations automatisées*

[Bomstein 2000] D. Bomstein, *Déchets d'équipements électriques et électroniques : directives en vue*. Environnement Magazine, n° 1591, p. 90, octobre 2000

[Hubin 2000] Hubin M., *Les tendances technologiques—Microinformatique et capteurs. Propriétés générales des capteurs*. www.michelhubin.multimania.com. 2000

[Kobeissi 2000a] A. Kobeissi, Z. Simeu-Abazi and E. Zamaï, *Evaluation product for recycling*. Safeprocess'2000. Budapest, Hangrie, juin 2000

[Kobeissi 2000c] A. Kobeissi and Z. Simeu-Abazi, *Evaluation Methods and test product for recycling*. MCPL' 2000. Grenoble, France, juillet 2000

[Germer & Kobeissi 2000] S. Germer, A. Kobeissi et al. *Economic and Ecological Product Evaluation in Disassembly*. MCPL'2000. Grenoble, France, 2000.

[Ischii et al. 1995] : Ischii K., *Reverse Fishbone Diagram : A tool in aid of design for product retirement*, 1995

[Ischii et al. 1996] : Ischii K.; *Material Selection Issues in Design for Recyclability*, 1996

[Janin 2000] : Janin M., *Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus*, Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'art et métiers, Chambéry, 2000

[Kobeissi 2001a] A. Kobeissi and Z. Simeu-Abazi, *Test sequence generation to improve dependability of disassembly workshop for the end-of-life product*. Qualita 2001. Annecy, France, mars 2001

[Limnios 1991] : Limnios Nikolaos *Arbres de défaillance*, Hermès, Paris, 1991

[Sampath 2000] : Sampath M., Godambe A., Jackson E., Mallow E. ; Joseph C. Wilson center for research and technology, Xerox Corporation : Combining qualitative & quantitative reasoning – A hybrid approach to failure diagnosis of industrial systems », 4<sup>th</sup> IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for technical Processes, Budapest 14-16 June 2000

[Villemeur 1988] : Villemeur A., *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*, Eyrolles, Paris, 1988