

MODELISATION DES STRATEGIES DE DECONSTRUCTION DES SYSTEMES INDUSTRIELS

M. GODICHAUD, F. PERES, A. TCHANGANI

Laboratoire Génie de Production
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
47, avenue d'Azereix – BP 1629
65016 TARBES CEDEX
matthieu.godichaud@enit.fr

RESUME : *Les perspectives de profits économiques sur les produits de la déconstruction rendent la phase de retrait de service du cycle de vie des systèmes industriels de plus en plus importante. Pour cela, les systèmes en fin de vie doivent être déconstruits et subir un certain nombre de traitements afin d'être revalorisés. Notre travail porte sur l'évaluation des différentes filières de valorisation des produits démantelés. Nous proposons dans ce cadre l'utilisation des réseaux bayésiens afin de structurer l'analyse des systèmes et de proposer une aide à la détermination de solutions de déconstruction.*

MOTS-CLES : *Cycle de vie, systèmes industriels, déconstruction, réseaux bayésiens.*

1 INTRODUCTION

La prise de conscience des possibilités de profits économiques offertes par le désassemblage des systèmes en fin de vie est relativement nouvelle. L'importance du retrait de service des systèmes industriels, dernière phase de leur cycle de vie, s'est d'abord accrue avec le renforcement des exigences en termes de respect de l'environnement et se développe aujourd'hui par la mise en place de filières de revalorisation des produits issus de la déconstruction. Cela est notamment le cas dans le secteur automobile où l'on peut trouver des cas de réintégration de composants permettant aux fournisseurs de proposer des pièces largement moins chères que des pièces neuves.

Après avoir décidé de l'arrêt de l'exploitation du système, l'utilisateur, le constructeur et les différentes parties prenantes du processus de déconstruction ont à identifier ses différents constituants ainsi que leurs modes de revalorisation. A partir de ces informations, ils peuvent alors déterminer quelles actions peuvent être entreprises afin d'assurer leur obtention dans des conditions respectant l'environnement et permettant de générer un profit économique. Pour atteindre ces objectifs, les responsables du retrait de service doivent mettre en place des stratégies de déconstruction afin de prévoir les ressources nécessaires, d'anticiper les aléas propres au traitement des systèmes hors d'usage ou encore de planifier les différentes actions. Pour des systèmes relativement complexes, de nombreuses options peuvent apparaître au décideur qui doit alors déterminer quelle est la meilleure en fonction d'un ou plusieurs critères définis par la stratégie.

Nos travaux visent à établir une démarche permettant d'aider le décideur à déterminer des stratégies de revalorisation des systèmes industriels en fin de vie. Dans cette communication, nous caractérisons dans une première partie le processus de retrait de service et les problématiques associées à celui-ci. Après avoir présenté un certain nombre de travaux traitant de la thématique du désassemblage, nous montrons comment les réseaux bayésiens permettent d'avoir une approche globale de résolution du problème de déconstruction. Nous présentons enfin une application de notre approche.

2 LES STRATEGIES DE DECONSTRUCTION

2.1 Présentation

Les stratégies de déconstruction portent sur le processus regroupant toutes les activités qui permettent de traiter le système en fin de vie depuis sa mise hors service jusqu'à sa disparition. De manière générique, nous constatons qu'un processus de déconstruction est constitué de trois phases principales nécessitant la mise en œuvre d'activités diverses comme nous le montrons sur la figure 1. La première phase regroupe toutes les activités logistiques qui suivent la mise hors service du système industriel. Il est alors conditionné et transporté vers le site de déconstruction. Le champ d'activité associé à cette phase est celui de la logistique inverse (Fleischmann, 1997). La deuxième phase concerne la déconstruction du système proprement dite. Différentes techniques de déconstruction peuvent être mises en œuvre suivant les objectifs envisagés en sortie du processus. Les produits obtenus par déconstruction sont alors traités au cours d'une troisième phase caractérisant les sorties possibles du processus. Généralement,

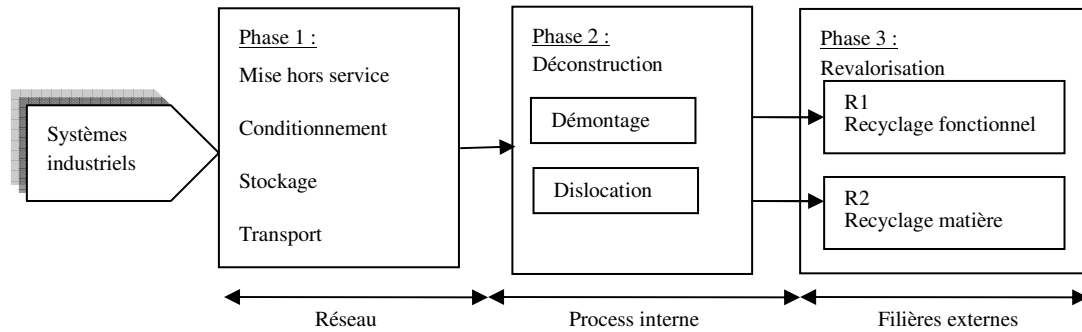


Figure 1: Le processus de déconstruction

on distingue quatre grands types de traitements de ces produits (Touzanne, 2002) qui sont par ordre décroissant d'intérêt (suivant un critère économique ou écologique) :

- la réutilisation,
- la valorisation matière,
- la valorisation énergétique,
- la mise au rebut.

De manière plus générique, nous avons choisi de considérer deux grandes catégories de recyclage pour la revalorisation des systèmes hors d'usage : le recyclage fonctionnel et le recyclage matière.

Le recyclage fonctionnel consiste à réintégrer des éléments du système en fin de vie dans le cycle de production de nouveaux systèmes, ou encore à fournir des pièces détachées aux utilisateurs. Ces composants sont identifiés de manière globale pour le système suivant les données relatives à leur durée de vie et sont vérifiés à chaque arrivée d'un système sur le site de traitement. Le profit généré est fonction de la demande et de l'état du composant (coûts de rénovation ou de reconditionnement). Tous ces facteurs sont à prendre en compte dans le cadre d'une évaluation d'une politique de réutilisation d'un composant.

Le recyclage matière a pour objectif de réutiliser non pas la fonction du composant mais la matière qui le constitue. Il est alors réintroduit dans le cycle de production d'un nouveau système. Les facteurs à prendre en compte pour l'évaluation de l'aptitude au recyclage matière d'un composant peuvent être le type de matière et son homogénéité dans le composant, le poids du composant ou encore son degré d'impureté.

Les stratégies de déconstruction portent plus particulièrement sur la deuxième phase de ce processus. Ce sont en effet les décisions prises à ce niveau qui peuvent avoir le plus d'impact en termes de profit économique pour l'acteur en charge du démantèlement. Il doit alors caractériser tous les composants valorisables sur le système hors d'usage et sélectionner ensuite les meilleures options de traitements. Les actions de déconstruction sont ensuite mises en œuvre. On distingue plusieurs types d'actions et différents modes de réalisa-

tion. Dans tous les cas, ces actions sont génératrices de coûts qu'il faut mettre en balance avec les revenus issus du recyclage des produits obtenus.

Si l'objectif final est toujours de faire disparaître le système, les trajectoires de valorisation suivies par ces composants sont multiples. Dans ce cadre, notre approche vise à aider à la définition des stratégies de déconstruction.

2.2 Problématique

La définition d'une stratégie de déconstruction passe par différentes phases indispensables dans le cadre d'une approche globale. Elle commence par l'analyse du système en fin de vie qui permet la définition de toutes les options de traitements techniquement possibles selon les points de vue des différents acteurs du processus. L'enregistrement des informations issues de ces analyses peut se faire suivant une approche multipoint de vue. Dans le cadre d'une étude de la recyclabilité d'un produit, la vue centrale représente la structure du système (Houe, 2006) à laquelle viennent s'ajouter les vues « recyclage fonctionnel » et « recyclage matière ».

C'est à partir de ces données que le décideur peut optimiser la stratégie suivant différents critères en même temps qu'il spécifie et conçoit son système de démantèlement. Il doit notamment répondre aux questions suivantes (Godichaud, 2007) :

- pour un composant donné, quelle est la meilleure filière de valorisation ?
- doit-on récupérer un sous-ensemble ou obtenir les composants qu'il contient ?
- si on souhaite déconstruire, quel est le meilleur type d'action (destructive ou non, ...) à mettre en œuvre ?

Ces questions constituent le problème central en déconstruction. Sa résolution est un passage obligé dans la définition de la stratégie. Une solution à ce problème peut prendre la forme d'un ensemble de produits respectant les contraintes liées à la structure du système c'est-à-dire les relations de type « composé-

composant ». La profondeur de déconstruction et la trajectoire de revalorisation sont ainsi fixées. Le nombre de solutions de déconstruction d'un système augmente en même temps que sa complexité et il devient alors difficile pour le décideur d'identifier la solution optimale même pour des critères simples. Le principal critère est de type économique, il traduit les revenus que l'on peut obtenir sur les produits et les coûts d'obtention de ceux-ci (actions de déconstruction). La solution optimale est alors celle qui va générer le profit maximum (revenus – coûts).

Cette première approche ne tient cependant pas compte d'un ensemble de paramètres représentant la réalité du processus de déconstruction. Afin d'améliorer l'aide à la décision, il nous paraît judicieux d'intégrer les paramètres suivants :

- les différentes demandes en produits : les revenus ne sont obtenus que s'il y a une demande pour le produit,
- l'état aléatoire des systèmes hors d'usage et de leurs constituants ainsi que leur aptitude au recyclage,
- les instants d'arrivée des systèmes sur le site de déconstruction : ils ne peuvent pas toujours être planifiés et sont fonction de la capacité d'accueil du site,
- l'évolution des stocks de produits : les produits obtenus par déconstruction sont stockés jusqu'à ce qu'une demande pour ceux-ci soit enregistrée. Cette période de stockage va générer un certain coût dont il faut évaluer l'utilité,
- la disponibilité des ressources de déconstruction : une solution de déconstruction peut ne pas être admissible si les ressources nécessaires à sa réalisation ne sont pas disponibles.

Notre objectif est non seulement de proposer un outil d'optimisation de la stratégie de déconstruction mais aussi d'aider le décideur à exploiter toutes les données nécessaires à la maîtrise du processus de déconstruction. Si la phase centrale de la démarche reste la sélection des produits et de leur mode de valorisation, elle doit être adaptée à une phase amont d'analyse des systèmes en fin de vie et à une phase aval de prise en compte des contraintes du système de désassemblage.

3 ETAT DE L'ART

La première étape dans la mise en place d'une stratégie de déconstruction concerne la définition des séquences de désassemblage puis la recherche de la séquence optimale suivant un critère temporel et, par conséquent, économique et sous des contraintes géométriques du produit analysé. Il existe de nombreuses références traitant de cette problématique et Touzanne (Touzanne, 2002) propose une bibliographie intéressante de cette thématique. L'utilisation des réseaux de Petri pour modéliser les résultats de cette première étape présente un

certain nombre d'avantages (Zussman and Zhou, 1999). Le modèle peut tout d'abord être généré automatiquement à partir des données CAO du système (Moore, 2001) et il peut être exploité par la suite pour les étapes suivantes de la définition de la stratégie de déconstruction (Addouche, 2003).

La deuxième étape consiste à sélectionner les différentes options de revalorisation des composants du système suivant des critères qui sont généralement de type économique intégrant les revenus générés par les produits de la déconstruction et les coûts générés par les actions de déconstruction. Dans (Johnson, 1998), l'auteur introduit les arbres de désassemblages comme support d'optimisation et attribue à chaque composant récupérable une valeur économique fonction du poids du composant, de son état et du type de matière. Ces résultats sont synthétisés sous forme matricielle pour la recherche de la stratégie optimale. Dans (Gonzalez and Adenso-Diaz, 2005), les auteurs proposent de construire une nomenclature de désassemblage et d'affecter à chaque composant puis à chaque sous-ensemble la meilleure option entre : le rebut, le recyclage, la réutilisation et le démontage. Des formules de calcul sont proposées afin de déterminer les profits de chacune de ces options suivant les caractéristiques du produit. Les réseaux de Petri peuvent être utilisés à ce niveau pour représenter toutes les options possibles de traitement de chaque composant du système (Tiwari, Niraj et al., 2002).

Le système de désassemblage doit ensuite être conçu et optimisé. Différents types d'actions réalisables par ce système peuvent être considérées (Sanchoy and Sandeep, 2002). Dans cet article, les auteurs présentent trois types de d'actions réalisables : les actions non destructives, les actions destructives et les actions de mise en containers. Des exemples d'équipements pour la réalisation de ces actions sont présentés. Addouche (Addouche, 2003) propose une modélisation sous forme de programme linéaire directement obtenu à partir d'un réseau de Petri dans le but d'évaluer différentes configurations du système de désassemblage.

La gestion des stocks en déconstruction est une problématique primordiale (Addouche, 2003). Dans (Gupta et Taleb, 1994), les auteurs proposent d'adapter les techniques MRP au désassemblage avec des demandes déterministes. Kim (Kim, 2005) propose plusieurs algorithmes de planification à moyen terme du désassemblage afin d'optimiser des critères de gestion des stocks. Le caractère stochastique du processus de désassemblage est pris en compte dans (Takahashi *et al.*, 2007) où les auteurs proposent une évaluation markovienne des performances des politiques de stockage.

Ces travaux ne prennent pas en compte tous les paramètres influençant les performances du processus de déconstruction. Il s'agit notamment de la demande en composants réutilisables et en matière, l'étendue et les

capacités des ressources de déconstruction ou encore l'état variable des systèmes en fin de vie. Il nous semble, de plus, important d'intégrer le caractère aléatoire de ces paramètres dans le modèle de décision.

4 AIDE A LA DECISION EN DECONSTRUCTION

4.1 Analyse des systèmes en fin de vie

La détermination d'une stratégie de déconstruction commence par l'analyse des systèmes à traiter en vue de la définition d'un modèle d'aide à la décision. Un metamodel du problème permettrait de faciliter les échanges entre les différents experts et parties prenantes du processus de décision. Dans ce contexte, le metamodel fournit un cadre fixant les objectifs du processus de déconstruction, les interdépendances entre ces objectifs permettant de structurer les analyses ou les points de vue des acteurs en explicitant leurs besoins. La définition de la structure du modèle dédié au système à analyser va permettre ensuite d'intégrer tous les résultats dans un modèle unique qui sera exploité pour la détermination de la solution optimale de déconstruction.

L'analyse du système en fin de vie en vue de la définition de sa stratégie de déconstruction a deux objectifs principaux : l'identification des composants valorisables et l'évaluation de leur aptitude au recyclage et à la déconstruction. L'identification des composants peut se faire notamment à partir des données de conception du système comme par exemple sa nomenclature. Dans ce cas, chaque expert va extraire les éléments de cette dernière afin de mener des analyses composant par composant. La nomenclature est la représentation du système minimal mais d'autres peuvent être utilisées suivant le contexte (modèles CAO, ...). Pour chaque composant qu'ils ont identifié, les experts doivent ensuite déterminer son aptitude à être valorisé par différents traitements.

Le cas de figure de base est la confrontation de trois points de vue : le recyclage fonctionnel d'un composant, le recyclage matière d'un composant et le désassemblage d'un composant.

Les candidats au recyclage fonctionnel peuvent être identifiés à partir de la nomenclature d'assemblage étant donné qu'ils doivent être réassemblés sur d'autres systèmes. Il faut ensuite vérifier l'aptitude de l'élément analysé à réaliser la fonction pour laquelle il a été initialement conçu et évaluer ses performances par rapport aux exigences du futur utilisateur dans le cas de sous-systèmes plus complexes. L'aspect économique du recyclage fonctionnel doit aussi être évalué. L'objectif principal du recyclage fonctionnel d'un composant est de générer un revenu à l'acteur qui prend en charge la déconstruction. L'obtention de ce

revenu peut cependant être perturbée par un certain nombre de paramètres comme par exemple une demande aléatoire ou des coûts de stockage et de conditionnement. Ces paramètres font partie de l'aptitude au recyclage fonctionnel des composants.

L'identification des candidats au recyclage matière peut être plus complexe si cette stratégie n'a pas été envisagée dès la conception du système. C'est en effet durant cette phase que sont établies les informations concernant les matières utilisées pour la fabrication des composants, données d'entrée pour ce type d'analyses. De plus, l'homogénéité des matières dans le système permet d'améliorer son aptitude au recyclage matière. Celle-ci est évaluée en premier lieu par rapport aux revenus qui peuvent être obtenus à partir des différentes matières. Ces revenus sont fonction d'un certain nombre de paramètres mis en évidence au cours de l'analyse et qui sont à intégrer au modèle de décision.

Le point de vue « désassemblage » peut se construire suivant deux cas de figure. Dans le premier, on cherche à déterminer si les opérations de déconstruction sont possibles sur un composant en plus de son recyclage. On identifie ainsi de nouveaux composants à analyser. L'autre cas de figure consiste à voir le composant comme un composant cible et à déterminer qu'elle est la séquence de désassemblage à réaliser pour l'obtenir. L'objectif est donc ici d'évaluer les opérations et définir une liste de composants de chaque sous-ensemble fonctionnel analysé.

La définition de la stratégie de déconstruction d'un système industriel nécessite l'échange de différents points de vue d'experts. Le résultat est alors une représentation du système au moment de son passage dans la phase de fin de vie mettant en évidence les constituants ayant une valeur potentielle. L'analyse peut être structurée suivant un modèle générique qui sera utilisé dans la phase suivante de décision. En effet, le décideur doit, après cette première phase, déterminer la solution de déconstruction. Un modèle d'aide à la décision facilite cette phase en recherchant une solution optimale suivant un critère donné. Les diagrammes d'influence sont des outils intéressants dans ce contexte.

4.2 Metamodel pour l'analyse de la déconstruction

Nous présentons un metamodel de réseau bayésien pour l'aide à la décision en déconstruction sur la figure 2. Il permet de cadrer l'analyse du système à revaloriser en structurant les variables nécessaires à l'optimisation de la déconstruction. L'analyse a alors comme premier objectif d'instancier ces variables suivant les avis des différents experts.

Nous proposons d'appliquer ce modèle à chaque composant candidat aux recyclages ou à la déconstruction. Dans un premier temps, les variables « valorisation » correspondant aux trois types de points de vue sont

posées. Chaque expert mène alors ses analyses autour d'une de ces variables. Il évalue notamment le contexte influençant ces objectifs de valorisation ainsi que les différentes conséquences possibles. Un type de conséquence correspond à l'évaluation de la performance de la variable revalorisation considérée. Une seule option pour le composant peut être sélectionnée, ses variables valorisation sont alors reliées à une variable de décision. L'ensemble d'états que peuvent prendre les variables valorisation représente le caractère aléatoire du processus de déconstruction. Un de ces états correspond en effet à la réussite de cet objectif alors que les autres traduisent une alternative d'échec.

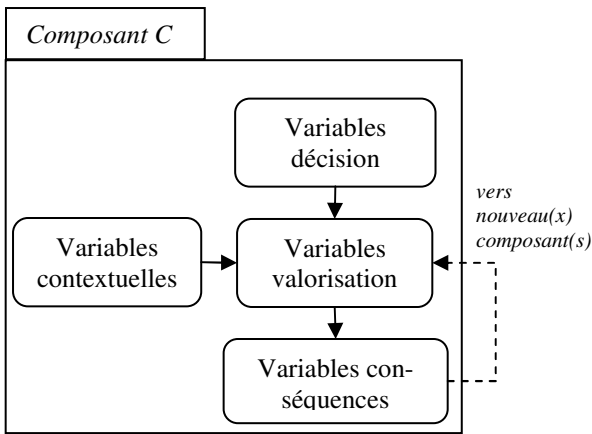


Figure 2: Metamodel

A chaque variable nous attachons ensuite une table de probabilité conditionnelle caractérisant d'un point de vue quantitatif les relations entre les variables. Dans notre application, elles permettent d'enregistrer les informations obtenues lors des analyses et notamment de quantifier l'impact du contexte sur les objectifs de déconstruction.

Si l'analyse du contexte se fait au moyen de réseaux bayésiens, il devra être composé d'une variable de sortie en relation avec la variable objectif. Un certain nombre d'analyses pourra ainsi être mené puis intégré au modèle de décision sans modifier sa structure de base et donc son traitement.

Nous caractérisons les liens entre les composants par le point de vue « déconstruction ». En effet, une des conséquences de la variable valorisation « déconstruction » correspond à l'obtention de nouveaux composants pour lesquels il faudra établir de nouvelles variables valorisation. Ces variables des composants obtenus sont ainsi reliées à la variable objectif du composé.

Afin de résoudre le problème de décision tel que nous l'avons posé, nous avons choisi d'utiliser les réseaux

bayésiens et plus particulièrement une extension de ceux-ci : les diagrammes d'influence. Un réseau bayésien est un modèle graphique dans lequel les connaissances sont représentées sous forme de variables. Chaque variable est un nœud du graphe et prend ses valeurs dans un ensemble discret ou continu. Le graphe est toujours dirigé et acyclique. Les arcs dirigés représentent un lien de dépendance direct traduisant une causalité. Dans le cadre de notre travail, les diagrammes d'influence ont comme premier avantage de permettre une visualisation sous forme de graphe du problème. Ils facilitent ainsi sa compréhension par tous les acteurs du processus de décision et favorisent les échanges entre ceux-ci lors de la construction du modèle. Cela permet, de plus, d'intégrer dans un modèle unique les résultats d'un ensemble d'analyses de nature diverses. Les diagrammes d'influence permettent ensuite d'intégrer des facteurs aléatoires dans le modèle de décision tout en facilitant leur gestion. L'utilisateur peut en effet tester différentes valeurs de paramètres suivant l'état de ses connaissances.

4.3 Evaluation des solutions

Nous avons vu qu'un réseau bayésien est constitué d'un ensemble N de nœuds représentant les variables du problème. Mathématiquement un réseau bayésien est défini comme un triplet {N, S, P} où N est l'ensemble des variables, S est un ensemble des distributions de probabilités conditionnelles et P de probabilités marginales. Le calcul des probabilités associées à chaque variables est déduit du théorème de Bayes.

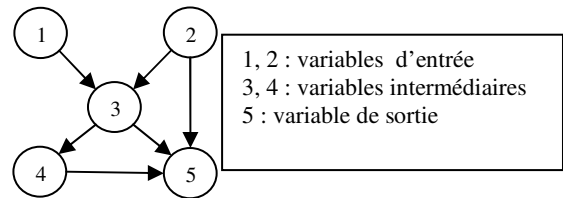


Figure 3: Exemple de réseau bayésien

Les réseaux bayésiens permettent pour des systèmes simples ou complexes : de modéliser et de capitaliser les connaissances, d'aider à la prise de décision, d'étudier la dépendance entre les variables, d'établir des diagnostics, de mener des études prospectives. La démarche de modélisation passe par 3 étapes :

- étape descriptive : définition des variables intéressantes ;
- étape structurelle : mise au point du graphe de dépendances conditionnelles ;
- étape relationnelle : détermination des tables de probabilités conditionnelles pour chaque nœud du graphe.

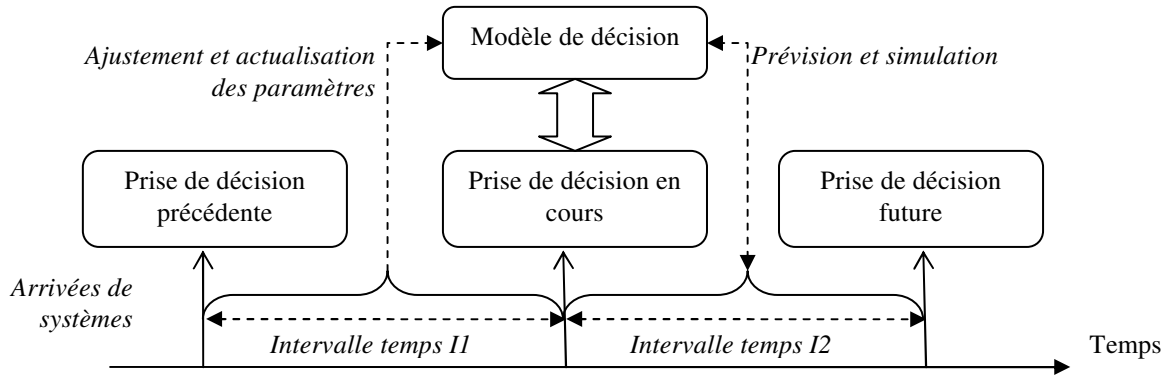


Figure 4: Utilisation du modèle de décision

Une fois la construction du réseau terminée, on peut déterminer les probabilités a posteriori des différentes variables aléatoires, évaluer les différentes options possibles, quantifier les risques liés au processus de déconstruction.

Les notations suivantes sont tirées et adaptées de (Weber, 2004). Dans notre application, on considère quelques sous-ensembles particuliers de N : N_d représente l'ensemble des nœuds de décision, N_{val} l'ensemble des nœuds valorisation, N_{cons} l'ensemble des nœuds conséquences. Chaque nœud est noté $n_i \in N$ et est caractérisé par un espace d'états discret $S_{n_i} = \{s_1^{n_i}, \dots, s_k^{n_i}, \dots, s_{K_{n_i}}^{n_i}\}$. Par exemple, les nœuds $n_i \in N_{val}$ pourront prendre au minimum trois modalités tel que $S_{n_i \in N_{val}} = \{O, N, NA\}$ correspondant successivement à la réussite de l'action de valorisation, l'échec de celle-ci et à la non sélection de cette variable. L'espace d'état caractérisant un nœud de décision comprendra l'ensemble des options de fin de vie pour le composant auquel il est associé.

Une fois la phase d'analyse terminée, de nombreuses options de revalorisation sont possibles et le décideur doit alors déterminer quelle est la meilleure. Dans le modèle que nous proposons, une solution au problème de déconstruction prend la forme d'un ensemble d'états correspondants à l'instanciation des nœuds de décision que l'on pourra noter : $Dx = \{d_1 = s_j^{d_1}, \dots, d_m = s_j^{d_m}, \dots, d_M = s_j^{d_M}\}$. Les états $s_j^{d_m}$ correspondant à une option de valorisation d'un composant.

Les conséquences économiques d'une configuration de décision sont évaluées aux travers des nœuds d'utilité. Ils sont notamment en relation avec les nœuds valorisation quantifiant ainsi les états pris par ces variables. A chaque état $s_k^{n_i} \in S_{n_i}$ d'un nœud $n_i \in N_{val}$ correspond une valeur $u(s_k^{n_i})$ fixée dans la table du nœud d'utilité associé.

Les différents scénarii de déconstruction caractérisés lors de la phase d'analyse peuvent être ainsi évalués suivant la fonction d'utilité :

$$EU(D_x) = \sum_{n_i \in N_{obj}} \sum_{s \in S_{n_i}} \Pr(n_i = s | Dx) \cdot u(s)$$

Si le décideur souhaite prendre en compte d'autres conséquences de la sélection d'un mode de revalorisation, il pourra le faire en intégrant d'autres nœuds de type conséquences avec leur nœud d'utilité associé dans cette fonction.

Les probabilités $\Pr(n_i = s | Dx)$ sont évaluées par inférence dans le réseau bayésien. Elles correspondent à la probabilité qu'un nœud objectif soit dans l'état s lorsque l'on a choisi la solution de déconstruction Dx .

4.4 Utilisation du modèle

Le modèle de décision peut être utilisé à chaque nouvelle arrivée d'un système en fin de vie. Si le système à traiter est identique alors la structure du modèle reste la même. Les paramètres du modèle peuvent cependant changer en fonction des événements apparus au cours de l'intervalle de temps séparant les instants de prise de décision. L'utilisation des réseaux bayésien permet de réexploiter plusieurs fois le modèle en actualisant ces paramètres comme le montre la figure 4. Sur cette dernière, l'intervalle de temps $I1$ séparant deux arrivées permet d'acquérir certains paramètres du modèle en fonction des événements apparus au cours de celui-ci et les décisions prises sur le système en cours de déconstruction s'appliquent sur l'intervalle $I2$.

5 APPLICATION

5.1 Décision en déconstruction avec demandes incertaines

Traditionnellement, les modèles de décision en déconstruction ne tiennent pas compte du risque de ne pas avoir de demande pour le composant obtenu par désassemblage. Si le composant peut générer un certain revenu, il peut être avantageux de le stocker en attendant l'arrivée d'une demande pour celui-ci. Dans ce cas,

l'utilisateur ne connaît pas avec certitude l'instant d'arrivée de la demande et prend un risque en choisissant ce produit comme cible de la déconstruction. Le modèle de décision doit ainsi intégrer cette notion afin de proposer la meilleure solution à l'utilisateur.

5.2 Description d'un produit

On considère un produit P1 en fin de vie à valoriser. Après analyse, l'option recyclage matière de ce produit n'est pas envisageable d'un point de vue technique. Le recyclage fonctionnel est par contre possible. Il consiste en la réintégration du produit sur des systèmes en cours d'exploitation lors de la défaillance de composants identiques au produit. La demande pour ce produit recyclé est donc aléatoire. L'analyse de la déconstruction de ce produit montre que l'on peut obtenir deux produits P2 et P3 à partir de P1, on ne considère pas ici les différents types d'actions de désassemblage réalisables. Les différentes options de traitement sont analysées pour ces produits et montrent que la déconstruction n'est pas possible pour ces produits. Leur matière respective leur permette d'être recyclables. On fait l'hypothèse que la demande pour ces matières est continue c'est-à-dire que l'obtention des revenus si l'on choisit cette options de revalorisation est certaine. Le composant P2 est aussi recyclable fonctionnellement de manière semblable au produit P1.

5.3 Construction du modèle et évaluation des solutions

Le modèle obtenu à partir du metamodel et de l'analyse du produit à traiter est présenté sur la figure 5. Nous avons utilisé le logiciel NETICA (<http://www.norsys.com>) afin de construire et exploiter notre modélisation. Nous décrivons ici plus spécifiquement sa construction pour le produit P1 à partir du metamodel. Les deux options de traitement sont le recyclage fonctionnel (RF_P1) et la déconstruction (Dec_P1). Conformément au metamodel présenté avant, deux variables valorisation sont alors posées correspondant aux options possibles pour ce produit. Dans cet exemple, les modalités prises par la variable objectif RF_P1 sont :

- « O » : lorsque RF_P1 = O alors le recyclage fonctionnel du produit est réussi c'est-à-dire, du point de vue de l'acteur responsable de la déconstruction, que le produit a été vendu ;
- « N » : lorsque RF_P1 = N alors recyclage fonctionnel du produit a échoué c'est-à-dire que le composant n'est pas vendu et qu'il faut envisager des traitements alternatifs (stockage, ...);
- « NA » : la variable objectif considérée n'est pas sélectionnée par le décideur.

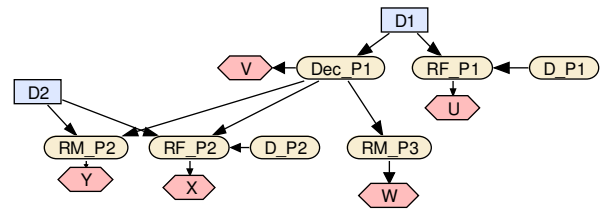


Figure 5: Modèle de décision pour la revalorisation d'un produit P1

La seule variable contextuelle pour le produit P1 que nous considérons dans cet exemple concerne la demande pour ce produit. Dans le cas du produit P1, cette variable « demande » a deux modalités :

- D_P1 = O si il y a une demande pour le produit P1,
- D_P1 = N dans le cas contraire.

Après analyse de la fiabilité des composants en cours d'exploitation, l'expert en recyclage fonctionnel évalue la probabilité d'avoir une demande pour le produit comme sur le tableau 1 représentant la table de probabilité de la variable considérée.

D_P1		D_P2	
O	0.6	O	0.9
N	0.4	N	0.1

Tableau 1. TPC des nœuds D_P1 et D_P2

La variable de décision D1 caractérise la sélection de l'une des deux options de revalorisation du produit P1. Elle prend donc deux modalités : Dec_P1 si le décideur choisit la déconstruction de P1 ou RF_P1 s'il choisit le recyclage fonctionnel de P1. Les tables de probabilités conditionnelles (TPC) des variables valorisation peuvent alors être construire comme sur le tableau 2. Les autres nœuds pour ce composant correspondent à des nœuds d'utilité permettant d'évaluer d'un point de vue économique les valorisations possibles de traitement de ce produit. Les autres conséquences pour la variable Dec_P1 correspondent à l'obtention de nouveaux composants pour lesquels une analyse similaire sera menée.

RF_P1				
D1	D_P1	O	N	NA
RF_P1	O	100	0	0
RF_P1	N	0	100	0
Dec_P1	O	0	0	100
Dec_P1	N	0	0	100

Tableau 2. TPC du nœud RF_P1

Nous venons de montrer comment construire le modèle de décision à partir de l'analyse du produit. Les différents scénarii de déconstruction peuvent ensuite être

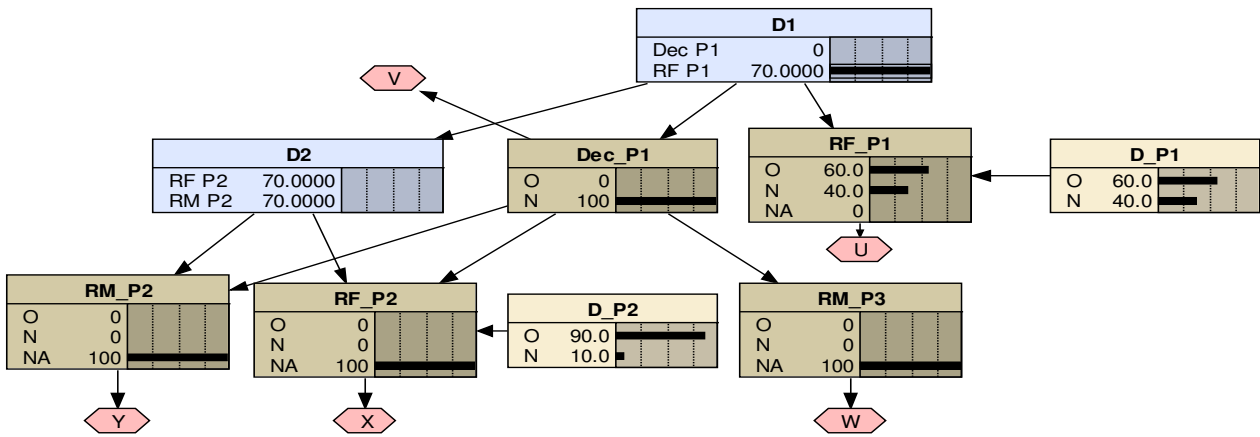


Figure 6: Détermination de la solution optimale

évalués par inférence dans le réseau présenté (nous avons pour cela utilisé le logiciel NETICA).

U	RF_P1 = O	150
	RF_P1 = N	-50
V	Dec_P1 = O	-40
X	RF_P2 = O	50
	RF_P2 = N	-30
Y	RM_P2 = O	30
	RM_P2 = N	-10
W	RM_P3 = O	30
	RM_P3 = N	-10

Tableau 3. Exemple de valeurs numériques

Les probabilités d'état des variables de valorisation sont calculées par inférence. Le problème de décision est alors transformé en un arbre de jonction. Cette structure permet d'utiliser des opérateurs de multiplication et de marginalisation sur les distributions de probabilité et les fonctions d'utilité données en entrée. Les différentes configurations de décision sont ainsi appliquées et le modèle propose en sortie une évaluation de la fonction d'utilité espérée globale de chacune de ces configurations (voir par exemple (Lauritzen, 2004)).

Le modèle permet de mettre en évidence la solution optimale qui maximise l'espérance de profit de l'utilisateur suivant les valeurs économiques assignées aux différents nœuds d'utilité du réseau. Comme nous le montrons sur la figure 6, pour chaque nœud de décision (ici D1 et D2) les valeurs d'utilité sont affichées pour chacune des modalités possibles. L'utilisateur peut alors instancier les différentes variables de décision. Par exemple, pour les valeurs économiques présentées dans le tableau 4 (les valeurs non inscrites correspondent à une utilité égale à 0), la solution de déconstruction optimale est $D_1 = \{D1 = RF_P1\}$ avec un profit $EU(D_x) = +70$. Les autres solutions possibles sont présentées dans le tableau 4.

D_x	Variables de décision	$EU(D_x)$
D_1	$D1 = RF_P1$	+70
D_2	$D1 = Dec_P1$ $D2 = RF_P2$	+32
D_3	$D1 = Dec_P1$ $D2 = RM_P2$	+20

Tableau 4. Solutions de l'exemple

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cette communication, nous avons présenté notre approche pour intégrer des facteurs variables et/ou incertains dans la prise de décision en déconstruction. Dans ce but, nous avons montré comment utiliser les réseaux bayésiens à la fois pour structurer l'analyse de chaque système arrivant en phase de fin de vie mais aussi pour évaluer les solutions de déconstruction tout en tenant compte du contexte au moment de la prise de décision. Nous avons ensuite appliqué cette démarche pour la détermination d'une politique de revalorisation avec des demandes en produits issus de la déconstruction incertaines.

La suite des travaux vise à intégrer d'autres paramètres au modèle de décision tels que l'état variable des systèmes en fin de vie ou encore la gestion des différents stocks de produits désassemblés. Différents points de vue d'experts et différents critères devront ainsi être insérés dans le modèle afin d'améliorer l'aide à la décision proposée.

REFERENCES

Addouche S. 2003. *Contribution à une démarche de conception optimisée des processus de désassemblage*. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, France.

- Johnson M. R. 1998. Economical evaluation of disassembly operations for recycling, remanufacturing and reuse. *International Journal of Production Research* **36**(12): 3227-3252.
- Fleischmann, M., J. M. Bloemhof-Ruwaard, et al. 1997. Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research* **103**(1): 1-17.
- Godichaud M., Pérès F. 2007. Optimisation économique des dates de fin de vie des systèmes industriels et détermination des stratégies de revalorisation des produits issus de leur déconstruction. *Congrès EDSYS 2007*, Albi, France, 10 mai 2007.
- Gonzalez, B. and B. Adenso-Diaz 2005. A bill of materials-based approach for end-of-life decision making in design for the environment. *International Journal of Production Research* **43**(10): 2071.
- Gupta, S.M. and Taleb K.N. 1994. Scheduling disassembly. *International Journal of Production Research* **32**(8): 1857-1866.
- Houe R. 2006. *Modélisation des connaissances normatives en vue de l'évaluation de la recyclabilité d'un produit en conception : des normes aux contraintes*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.
- Kim H-J. 2005. *Disassembly scheduling : models and algorithms*. Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Lauritzen S.L and Nilsson D. 2001. Represented and solving Decision Problems with Limited Information *Management Science* **47**(9): 1235-1251.
- Moore, K. E., A. Gungor, et al. 2001. Petri net approach to disassembly process planning for products with complex AND/OR precedence relationships *European Journal of Operational Research* **135**(2): 428-449.
- Sanchoy, K. D. and N. Sandeep 2002. Process planning for product disassembly. *International Journal of Production Research* **40**(6): 1335-1355.
- Takahashi, K., K. Morikawa, et al. 2007 "Inventory control for a MARKOVIAN remanufacturing system with stochastic decomposition process." *International Journal of Production Economics* In Press, Corrected Proof.
- Touzanne F. 2002. *Contribution à une méthode de conception des systèmes de désassemblage des produits en fin de vie*. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, France.
- Tiwari, M. K., S. Niraj, et al. 2002. "A Petri Net based approach to determine the disassembly strategy of a product." *International Journal of Production Research* **40**(5): 1113-1129.
- Weber P. 2004. Modélisation de processus industriels par réseaux bayésiens orientés objet (RBOO). *Revue d'Intelligence artificielle* **18** :299-326.
- Zussman, E. and M. Zhou 1999. A methodology for modeling and adaptive planning of disassembly processes. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* **15**(1): 190-194.