



HAL
open science

Modèle pour la planification des stratégies de déconstruction des systèmes en fin de vie

Matthieu Godichaud, François Pérès, Ayeley Tchangani

► To cite this version:

Matthieu Godichaud, François Pérès, Ayeley Tchangani. Modèle pour la planification des stratégies de déconstruction des systèmes en fin de vie. *Journal of Decision Systems*, 2012, 19 (2), pp.141-174. 10.3166/jds.19.141-174 . hal-02625477

HAL Id: hal-02625477

<https://utt.hal.science/hal-02625477>

Submitted on 15 Apr 2022

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.



OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/28039>

Official URL:

<https://doi.org/10.3166/jds.19.141-174>

To cite this version:

Pérès, François  and Godichaud, Matthieu  and Tchangani, Ayeley  *Modèle pour la planification des stratégies de déconstruction des systèmes en fin de vie.* (2012) *Journal of Decision Systems*, 19 (2). 141-174. ISSN 1246-0125

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Modèle pour la planification des stratégies de déconstruction des systèmes en fin de vie

Matthieu Godichaud — François Pérès
Ayeley Tchangani

Laboratoire Génie de Production
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
47, av. d'Azereix
BP 1629, Tarbes Cedex, France
{matthieu.godichaud ; francois.peres ; ayeley.tchangani}@enit.fr

RÉSUMÉ. Dans un contexte de développement durable, les enjeux de la dernière phase du cycle de vie d'un système, la phase de retrait de service, se sont accrus ces dernières années. Les systèmes en fin de vie doivent être déconstruits afin d'être revalorisés pour répondre aux différentes exigences environnementales. Il s'agit notamment de sélectionner les constituants valorisables suivant des critères techniques, économiques et environnementaux puis de définir et optimiser le système de déconstruction permettant l'obtention de ces produits. La solution obtenue définit ce que nous avons appelé une trajectoire de déconstruction. Les travaux présentés dans ce papier portent sur la planification de ces trajectoires sur des horizons prenant en compte plusieurs systèmes à déconstruire. L'approche proposée permet de caractériser des incertitudes relatives à la déconstruction définies par rapport à une dimension temporelle (date, durée, etc.) dans la planification.

ABSTRACT. In a sustainable development context, stakes of the last stage of system life cycle, the end-of-life stage, have increased these last years. End-of-life systems have to be demanufactured in order to be valued answer so to some environmental requirements. The aim of disassembly strategies is to bring solutions to the whole decision problem risen during the end-of-life stage of systems. In particular, decision maker have to select valuable components according to technical, economical and environmental criteria and, then, design and optimise disassembly support system that will generate these products. The solution to this problem aim at determining what we call a disassembly trajectory. The work presented in this paper is about planning of these trajectories on different horizons that integrate several arrivals of end-of-life systems. The proposed approach allow to taking into account uncertainties defined on a temporal dimension.

MOTS-CLÉS : déconstruction, logistique inverse, modélisation, réseaux bayésiens, optimisation, incertitudes.

KEYWORDS: Disassembly, Reverse Logistic, Modeling, Bayesian Networks, Optimization, Uncertainties.

1. Introduction

Depuis plusieurs années, la phase de fin de vie des systèmes tient une place primordiale dans leur cycle de vie. Cela est dû d'une part, au renforcement des contraintes législatives en matière d'environnement et, d'autre part, à la prise de conscience des perspectives économiques offertes par la revalorisation des produits issus de la déconstruction. Ces enjeux forcent les constructeurs de systèmes à s'intéresser au développement et à la mise en place de processus de déconstruction permettant leur revalorisation. Les systèmes en fin de vie doivent en effet être déconstruits afin d'être revalorisés pour répondre aux nouvelles exigences environnementales. Cette responsabilité incombe au concepteur qui doit intégrer à la définition du système son processus de déconstruction. Les stratégies de valorisation doivent répondre à l'ensemble des problèmes de décision posés lors de la phase de retrait de service d'un système. Il s'agit notamment de sélectionner les produits valorisables suivant des critères techniques, économiques et environnementaux puis de définir et optimiser le système de déconstruction permettant l'obtention de ces produits.

La problématique abordée dans cet article porte plus particulièrement sur la planification des trajectoires de déconstruction des systèmes en fin de vie. Le modèle de planification présenté permet d'intégrer différentes composantes d'une chaîne logistique de démantèlement. En effet, une trajectoire de déconstruction fixe les produits d'un système en fin de vie à valoriser, leur filière de valorisation et la manière de les obtenir (opérations de démontage, de séparations, etc.). Elle caractérise ainsi la base sur laquelle seront définis le processus et le système de déconstruction. L'approche de planification proposée dans cet article permet notamment de prendre en compte des incertitudes d'origines diverses inhérentes au domaine de la déconstruction. L'objectif est de définir des trajectoires en fonction de ces incertitudes. La structure du modèle est définie de manière modulaire. Chaque étape de la trajectoire peut ainsi être évaluée séparément des autres.

Après cette introduction, nous présentons dans une deuxième partie le contexte et la planification de la déconstruction. La troisième partie est consacrée à la présentation d'un modèle de processus industriels prenant en compte différentes incertitudes notamment définies par rapport à une dimension temporelle. Ce modèle sert de support à la planification des trajectoires de déconstruction présentée dans la quatrième partie.

2. Cadre de travail

2.1. Contexte et problématique

L'ensemble des activités qui permettent de traiter les systèmes en fin de vie depuis sa mise hors service jusqu'à sa disparition forment le processus de

déconstruction. De manière générique, nous constatons qu'un processus de déconstruction est constitué de trois phases principales nécessitant la mise en œuvre d'activités diverses (figure 1).

La première phase regroupe des activités logistiques (inverses) qui suivent la mise hors service du système industriel. Il est alors conditionné et transporté vers le site de déconstruction. La deuxième phase concerne la déconstruction du système proprement dite. Différentes techniques de déconstruction (opérations de démontage, dislocations, etc.) 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. Traditionnellement, on distingue quatre catégories de filières de traitement des systèmes en fin de vie :

- le recyclage fonctionnel qui consiste à réutiliser un produit dans un autre système en exploitation ou en construction,
- le recyclage matière qui permet de réutiliser la matière d'un produit après transformation,
- le recyclage énergétique qui consiste à utiliser les constituants pour produire de l'énergie,
- le conditionnement pour la mise en décharge respectant un certain nombre de contraintes environnementales.

Le système de déconstruction permet la réalisation des activités liées à la deuxième phase du processus. Sa définition devient une tâche complexe dès lors qu'il existe de nombreuses actions de désassemblage (démontage, découpage, etc.) et de nombreuses options de revalorisation possibles pour chaque élément identifié du système en fin de vie. Le décideur doit alors déterminer la meilleure *trajectoire de déconstruction*. Une trajectoire de déconstruction caractérise les différents produits à générer avec leur mode d'obtention et de valorisation. Un système en fin de vie est composé d'un ensemble de constituants interconnectés. Chaque élément identifié du système en fin de vie peut faire l'objet d'une ou plusieurs *options de déconstruction*. De manière générale, on distingue deux principaux types d'options dans la définition d'une stratégie de déconstruction : les *opérations de déconstruction* qui consistent à générer plusieurs produits à partir d'un seul et les *actions de valorisation* qui concernent la prise en charge par une filière de valorisation d'un produit de la déconstruction. Un élément du système en fin de vie possédant des options appartenant aux deux types d'option est qualifié de *sous-ensemble*. Les opérations de déconstruction sur les sous-ensembles ne sont envisagées que pour récupérer et valoriser les constituants. Les éléments ne possédant pas d'option de type « opérations de déconstruction » sont qualifiés de *composants élémentaires*. Ils peuvent cependant disposer d'un ensemble d'options de type « actions de valorisation ».

Différents critères peuvent être utilisés pour évaluer les trajectoires de déconstruction. Nous distinguons notamment :

– *le profit économique* : critère le plus couramment utilisé dans le but de trouver un équilibre entre les revenus générés par les produits valorisables et les coûts nécessaires pour les obtenir. D’autres types de coûts peuvent aussi être intégrés dans ce critère tels que les coûts des options de valorisation (reconditionnement, réassemblage, etc.) ou les coûts logistiques (stockage, transport, etc.) ;

– *le taux de valorisation* : critère qui traduit un pourcentage de matière recyclée lors de la réalisation d’une action de valorisation sur un constituant du système en fin de vie. Il dépend de l’homogénéité des matières contenues dans le constituant ou encore du degré d’impureté (on associe généralement un taux de 100 % pour les options de recyclage fonctionnel des constituants) ;

– *le bilan écologique* : chaque option de fin de vie peut aussi faire l’objet d’une évaluation écologique selon les principes de l’analyse du cycle de vie qui, en faisant l’inventaire et l’évaluation des émissions sur l’environnement, permet d’associer un score écologique à chacune des options.

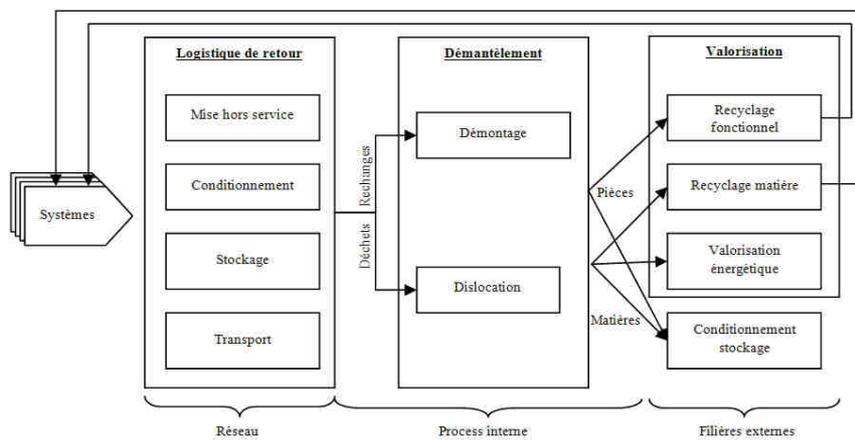


Figure 1. Représentation du processus de déconstruction

Les risques liés au développement d’un système de déconstruction s’apparentent à ceux induits par la construction de n’importe quelle nouvelle structure de production. La gestion des risques en phase d’exploitation du système de déconstruction concerne cependant des problématiques spécifiques situées à différents stades du processus présenté sur la figure 1 :

– avant le retrait du service du système: risques liés au prolongement de la durée de vie du système et détermination de la date d’arrêt d’exploitation sur la base de critères sécuritaires et économiques,

– en amont de la chaîne de déconstruction : risques de différents modes de collecte et de rapatriement des systèmes en fin de vie,

- sur la chaîne de déconstruction : risques liés au process de déconstruction pour la mise en œuvre d'une sûreté de fonctionnement performante face aux problèmes éventuels de contamination par matières dangereuses (plomb, amiante, gaz) ou d'accidents par occurrences concourantes d'événements incompatibles,

- en aval de la chaîne de déconstruction : risques inhérents à la réinjection des pièces remises en conditions opérationnelles de fonctionnement et à la certification garantissant à son nouveau propriétaire une fiabilité et une durée de vie acceptables.

Nous nous intéressons plus particulièrement à la maîtrise des risques induits par les incertitudes lors de la phase de déconstruction et à leurs conséquences économiques. Ces incertitudes sont caractérisées par des distributions de probabilité sur un certain nombre de paramètres couramment mis en jeu dans le *process* opérationnel de déconstruction. Pour améliorer l'aide à la décision, il paraît judicieux de considérer les incertitudes liées aux éléments suivants :

- l'état aléatoire des systèmes en fin de vie et de leurs constituants (plus ou moins dégradés),

- les demandes en produits issus de la déconstruction qui sont souvent incertaines en raison, notamment, de leur diversité et de leur nature (pièces de rechanges),

- les instants d'arrivée des systèmes sur le site de désassemblage qui ne peuvent pas toujours être planifiés de manière déterministe,

- la gestion des stocks de produits (valorisables ou intermédiaires) dans l'attente de demandes,

- les temps opératoires de déconstruction qui sont la plupart du temps incertains (en fonction notamment de l'état de l'ensemble à déconstruire),

- la disponibilité des ressources de désassemblage.

Les trajectoires de déconstruction intégrant ces différents paramètres s'appliquent sur des horizons temporels couvrant les arrivées de plusieurs systèmes en fin de vie. Le décideur se trouve alors dans une situation de planification du système de déconstruction en présence d'incertitudes dont les éléments principaux sont présentés dans la partie suivante.

Dans le contexte présenté précédemment, le plan de déconstruction fixe les quantités de produits valorisables et leur date d'obtention sur un horizon de planification donné et en fonction d'un certain nombre de critères. Pour cela, le décideur doit caractériser les éléments suivants :

- la structure du système en fin de vie afin d'en identifier les composants valorisables,

- les éléments caractérisant le système de déconstruction,

- les paramètres d'optimisation du plan.

2.2. Modèles de planification

Nous venons de voir les éléments à prendre à compte afin d'établir une planification des trajectoires de déconstruction sur des horizons couvrant plusieurs arrivées de systèmes en fin de vie. Nous présentons maintenant quelques modèles de la littérature utilisés pour planifier la déconstruction ou utilisés dans des domaines connexes.

La gestion du niveau des stocks est un élément essentiel dans l'optimisation d'un système de déconstruction (Addouche, 2003). Un des premiers modèles de planification du désassemblage des systèmes en fin de vie a été proposé dans Gupta *et al.* (1994). Les auteurs proposent des approches de type MRP (*Material Requirement Planning*) inversé c'est-à-dire prenant en compte l'aspect divergent de la déconstruction. Dans Barba-Gutierrez *et al.* (2008a), les auteurs développent cette approche afin de générer une solution de base au problème de planification à laquelle ils proposent ensuite d'appliquer différents modèles de lots économiques. Dans Barba-Gutierrez *et al.* (2008b), l'algorithme est modifié afin de prendre en compte l'incertitude et l'imprécision sur les demandes.

Une approche utilisant la logique floue permet de prendre en compte ces deux caractéristiques simultanément pour déterminer les besoins sur chaque période. En présence de ces incertitudes, les demandes peuvent ne pas être satisfaites sur une période et sont reportées sur la période suivante comme des demandes déterministes (sans incertitudes ni imprécisions). Une logique MRP est aussi utilisée dans Taleb *et al.* (1997a, 1997b) pour déterminer les quantités et les dates de produits à désassembler pour satisfaire les demandes au niveau des composants. Les auteurs proposent de prendre en compte les composants présents dans différents sous-ensembles d'un même système en fin de vie (Taleb *et al.*, 1997a) ou dans différents systèmes en fin de vie (Taleb *et al.*, 1997b). Le problème devient ainsi plus complexe et les auteurs proposent une heuristique pour le résoudre qui peut cependant générer des solutions infaisables.

D'autres auteurs proposent de formuler le problème de planification du désassemblage sous forme de programme linéaire afin d'optimiser différents coûts liés à la gestion des stocks. Dans Lee *et al.* (2002), les variables du modèle correspondent, pour chaque période de l'horizon de planification, aux quantités de produits désassemblés (variables associées à chaque sous-ensemble), aux quantités de produits stockés (variables associées à tous les produits identifiés dans la nomenclature) et aux quantités de systèmes en fin de vie traités. La fonction à minimiser correspond au coût total sur l'horizon de planification. Les contraintes du modèle correspondent aux équations de conservation des produits d'une période à une autre et à la satisfaction des demandes sur chaque période ainsi qu'à la capacité de désassemblage.

Dans Lee *et al.* (2004), les auteurs proposent une heuristique afin de résoudre les problèmes de grande taille. Ils introduisent, de plus, les coûts de préparation dans la fonction objectif. Une formulation similaire du problème est analysée dans

Kim (2005). L'objectif de l'optimisation est de trouver un équilibre entre les coûts de désassemblage, les coûts de préparation et les coûts de stockage. La résolution exacte du problème est d'abord abordée et une heuristique est ensuite proposée pour les cas plus généraux avec des structures à plusieurs niveaux, des composants communs à un ou plusieurs systèmes en fin de vie (Kim *et al.*, 2006) et la prise en compte des contraintes de capacité. Dans Langella (2007), l'auteur propose dans un premier temps une formulation sous forme de programme linéaire et met ainsi en avant les limites de ce type de modélisation pour des problèmes de grande taille. Une heuristique est alors proposée.

Dans Inderfurth *et al.* (2006), les auteurs proposent une approche de résolution prenant en compte les incertitudes liées au système en fin de vie relativement aux quantités de composants qui peuvent être obtenus à partir de chaque sous-ensemble.

Une approche mono-période est proposée dans Veerakamolmal *et al.* (1998a, 1998b) et Lambert *et al.* (2002). L'objectif est de déterminer quels systèmes en fin de vie, parmi différents types, doivent être désassemblés pour satisfaire les demandes pour leurs composants élémentaires (sachant que des composants se retrouvent dans plusieurs types de systèmes). La fonction à optimiser considère les revenus générés par la satisfaction des demandes, les coûts de désassemblage, les coûts d'acquisition des différents systèmes en fin de vie et les coûts de mise en décharge des produits en surplus (liés au caractère divergent du désassemblage).

Cette vue du problème de planification du désassemblage est développée dans Kongar *et al.* (2002a et 2002b) au travers d'approches multicritères. Les variables du problème correspondent aux quantités : de systèmes en fin de vie approvisionnés, de composants réutilisés, de composants recyclés, les composants stockés, de composants mis en décharge. Afin de déterminer ces variables, les auteurs proposent différents critères relatifs aux revenus générés par la réutilisation et le recyclage, aux coûts de désassemblage mais aussi aux différents coûts liés aux activités du processus de déconstruction (stockage, transport, etc.). Les méthodes de résolution proposées sont des méthodes multicritères : la programmation par buts et la programmation linéaire physique (« linear physical programming »). Le modèle est étendu dans Kongar *et al.* (2006) afin de prendre en compte les incertitudes à l'aide d'une approche utilisant la logique floue et la programmation par buts.

La prise en compte des incertitudes dans la planification du désassemblage n'est pas souvent abordée alors que c'est une caractéristique inhérente au domaine de la gestion des systèmes en fin de vie. Leur intégration aux modèles de planification pour obtenir des solutions robustes est nécessaire. La gestion de ces incertitudes pour la planification des systèmes se fait souvent à l'aide d'approches stochastiques dans l'objectif de déterminer des politiques de gestion des stocks. Elles sont notamment utilisées dans les modèles de planification pour les activités de « remanufacturing ». La réutilisation ou recyclage fonctionnel est souvent l'option de valorisation la plus avantageuse que ce soit d'un point de vue économique (revenus importants) ou environnemental (faibles rejets). Elle nécessite un certain

nombre d'activités qui se situent en aval du système de désassemblage et que l'on regroupe généralement sous le terme de « remanufacturing ».

Dans Inderfurth (1997), l'auteur propose un modèle de « remanufacturing » à temps discret avec une seule option de réutilisation en intégrant l'approvisionnement en composants neufs. L'objectif est de déterminer les paramètres d'une politique indiquant les quantités de produits à réutiliser, à mettre au rebut et à approvisionner en fonction du niveau des stocks (seuils de contrôle). L'existence de politiques optimales est ainsi démontrée. L'auteur propose aussi dans Inderfurth *et al.* (2001) une extension du modèle pour prendre en compte différentes options de remanufacturing.

La politique optimale devenant trop complexe pour être appliquée, l'auteur propose une politique approchée. L'avantage d'une approche à temps discret (périodes), par rapport à une approche à temps continu, est de pouvoir mettre en évidence les paramètres optimaux de la politique à l'aide des techniques de programmation dynamique. Dans Mahadevan *et al.* (2003), les auteurs proposent une heuristique pour déterminer une politique à flux poussé de produits refabriqués. Dans le cadre d'approches à temps continu, une analyse markovienne de l'évolution d'un stock de produit est proposée dans Fleischmann *et al.* (2002) où l'approvisionnement se fait par retour de produits issus de systèmes hors d'usage et par commande de nouveaux produits. Les auteurs déterminent les paramètres de la politique (seuils d'approvisionnement). Une analyse markovienne est aussi utilisée dans Inderfurth *et al.* (2001) pour déterminer une politique optimale de contrôle d'un système de remanufacturing avec deux stocks et avec commande de nouveaux composants. Les auteurs mettent alors en évidence une politique optimale à quatre paramètres (seuils et quantités pour chaque stock). Une approche markovienne est aussi proposée dans Takahashi *et al.* (2008) dans le but d'évaluer des politiques de contrôle. Le système analysé est constitué de trois types de stocks : composants (commandés ou issus des retours), produits semi-finis et produits finis.

Parmi les modèles de planification en désassemblage que nous avons rencontrés, peu traitent de la problématique de sélection des trajectoires de déconstruction. Dans la plupart des modèles, les produits à valoriser et leurs options de fin de vie sont en effet fixés avant la planification c'est-à-dire que la profondeur de désassemblage est fixe. Il semble toutefois intéressant d'envisager différentes trajectoires dans la planification de la déconstruction de systèmes en fin de vie dans l'objectif d'adapter les décisions aux différentes prévisions des demandes de recyclage de produit et des arrivées de systèmes d'un horizon de planification à un autre. Un autre aspect qui n'est pas considéré dans les modèles de planification proposés dans la littérature correspond à la limitation des systèmes en fin de vie qui peuvent être déconstruits sur un horizon de planification. Dans ces modèles, toutes les demandes peuvent ainsi être satisfaites à partir de systèmes en fin de vie disponibles. Lorsque les arrivées de système sont limitées sur l'horizon de planification comme c'est le cas dans certaines applications (dans l'aéronautique par exemple), le décideur doit sélectionner les demandes qui devront être satisfaites à partir de ces arrivées. On se

ramène alors à la problématique de détermination de trajectoires de déconstruction pour chaque arrivée prévue sur l'horizon.

2.3. Caractérisation de l'incertain

Les incertitudes sont inhérentes au domaine de la déconstruction. Nous avons montré dans (Godichaud, 2009) que les réseaux bayesiens pouvaient être un outil de modélisation privilégié pour représenter les trajectoires et les incertitudes qui leur sont associées. Nous allons les utiliser ici pour la détermination des stratégies optimales de déconstruction. Les incertitudes à prendre en compte dans la planification des trajectoires sont définies par rapport à une dimension temporelle. L'utilisation des réseaux bayesiens dynamiques permet de passer d'une représentation « statique » des trajectoires à une représentation dynamique (*i.e.* intégrant une dimension temporelle).

Un réseau bayésien est un modèle graphique dans lequel les connaissances sont représentées sous forme de variables et de relations entre ces variables (Naïm *et al.*, 1999). Il est entièrement défini par deux composantes principales : sa structure, qui est un graphe orienté acyclique caractérisant des relations (causalité, influence, etc.) entre les variables du domaine et ses paramètres, qui définissent des fonctions densité (pour des nœuds continus) de probabilité conditionnelle (ou tables pour des nœuds discrets) pour chaque nœud du graphe en fonction de ces parents (nœuds à l'origine d'un arc). Dans ce papier nous n'utilisons que des nœuds discrets ; les nœuds continus seront discrétisés. Le réseau bayésien sur la figure 2a montre, par exemple, que la distribution de probabilité du nœud *B* est conditionnée par celle du nœud *A*. Pour caractériser cette relation, il faut définir une table de probabilité conditionnelle (TPC) caractérisant la probabilité de *B* sachant *A* notée $Pr(B/A)$. Un réseau bayésien ainsi défini permet de déterminer les probabilités de différentes variables à l'aide de techniques d'inférence (Huang *et al.*, 1999 ; Naïm *et al.*, 1999).

Afin de modéliser des problèmes de décision, des nœuds de décision et d'utilité peuvent être introduits dans le modèle ce qui a conduit au développement des diagrammes d'influence, extension des réseaux bayesiens pour modéliser des problèmes de décision en milieu incertain (Jensen *et al.*, 2007). La vue graphique des diagrammes d'influence permet notamment de faciliter l'implication de tous les acteurs du problème de décision dans sa modélisation. Les nœuds chance (cercles sur la figure 2b) représentent les variables du problème, les nœuds de décision (rectangles) représentent les choix possibles pour le décideur et les nœuds d'utilité (losanges) permettent d'évaluer les différentes décisions. Les arcs connectant un nœud chance à un nœud de décision traduisent l'information disponible au moment de prendre la décision. Il existe différents algorithmes de résolution des problèmes de décision modélisés sous forme de diagramme d'influence (Jensen *et al.*, 2007 ; Lauritzen *et al.*, 2001).

Les réseaux bayesiens dynamiques (RBD) sont une extension des réseaux bayesiens permettant de représenter l'évolution temporelle des variables sur un horizon donné (Murphy, 2002). La dimension temporelle est divisée en pas de temps notés t . Les variables du réseau sont alors caractérisées à chaque pas de temps et une variable influence d'autres variables à l'instant (figure 3). La variable X_t représente la variable X à l'instant t et le RBD permet ici une représentation compacte entre deux instants t et $t+1$ avec un nombre de variables limité.



Figure 2. Exemples de réseaux bayesiens et de diagramme d'influence

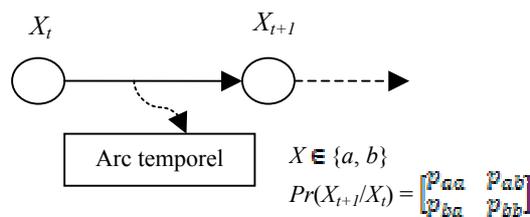


Figure 3. Modélisation de l'évolution temporelle d'une variable

Un RBD est défini par deux types d'éléments (Tchangani *et al.*, 2006) :

- sa *structure* : comme pour les réseaux bayesiens, elle est caractérisée par un graphe orienté acyclique représentant les relations entre les variables ; on distingue deux types de relation :

- relations intra-périodes : ce type de relation correspond aux arcs entre les variables définies à un même instant t (ces relations sont celles mises en jeu dans les réseaux bayesiens statiques). On représente ainsi des relations instantanées ;

- relations interpériodes : ces relations sont représentées par les arcs reliant deux variables du graphe à des instants différents ;

- ses *paramètres* : comme pour les réseaux bayesiens, les paramètres d'un RBD correspondent à des distributions de probabilités conditionnelles ou *a priori* qui peuvent être représentées sous forme de tables de probabilités conditionnelles (TPC) pour des variables de type discret ; les paramètres induits par les arcs interpériodes caractérisent ainsi la dynamique des variables.

Etant données les variables d'entrée à l'instant initial $t = 0$, l'évolution temporelle des variables peut ensuite être déterminée par inférence. Différentes

techniques d'inférence spécifiques au RBD sont possibles (Murphy, 2002). Dans le cadre de la simulation de systèmes complexes ou de processus industriels et pour des horizons importants, une autre approche consiste à réaliser des inférences itératives (Weber *et al.*, 2005). En effet, à partir de $t=0$ la distribution de probabilité sur les états de $X_{t=1,2, \dots}$ est calculée par inférences successives (figure 4).

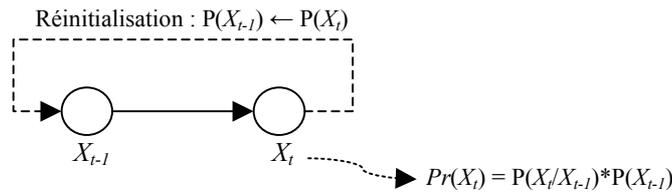


Figure 4. Principe d'inférence dans les RBD

Nous proposons de modéliser les trajectoires de déconstruction sur des horizons temporels suivant les principes de modélisation mis en évidence dans le paragraphe précédent et les concepts associés aux RBD. Notre objectif est de proposer un outil de modélisation des trajectoires permettant de les comparer en prenant en compte des incertitudes définies par rapport à une dimension temporelle (durée de réalisation des activités, dates des demandes et des arrivées, etc.).

3. Modélisation des processus industriels par réseaux bayésiens dynamiques

Les processus de déconstruction sont des processus industriels. Ils sont définis par un ensemble d'activités interactives coordonnées pour transformer progressivement des éléments d'entrée en éléments de sortie. Ces éléments peuvent être matériels ou immatériels (une information par exemple). Dans le cadre de la représentation des trajectoires de déconstruction que nous venons de présenter, nous avons considéré deux principaux types d'activités. Le premier concerne les opérations de déconstruction générant plusieurs produits (éléments de sortie) à partir d'un seul (élément d'entrée). Le deuxième concerne les actions de valorisation consistant à traiter un produit (élément d'entrée) pour en tirer une valeur (élément de sortie).

Nous avons établi un modèle de trajectoire de déconstruction qui représente la logique d'enchaînement des deux types d'activités en fonction des flux de produits déconstruits (Godichaud, 2009). Il fixe les activités à réaliser pour déconstruire un système en fin de vie. En ce sens, ce modèle est une représentation minimale du processus de déconstruction. Il caractérise en effet l'ossature des processus de déconstruction d'une part, en identifiant les activités de déconstruction et de valorisation et, d'autre part, en formalisant les relations logiques (précédence, parallélisme, etc.) entre celles-ci. Nous développons ce modèle à l'aide des réseaux bayésiens dynamiques pour caractériser la réalisation temporelle d'un processus et,

notamment, analyser sa durée de réalisation en présence d'incertitudes et de perturbations.

3.1. Représentation d'une activité

Un processus étant caractérisé par un ensemble d'activités interconnectées, sa caractérisation est faite à partir de la caractérisation de chacune de ses activités. Un modèle d'activité est ainsi présenté sur la figure 5. Suivant les principes de modélisation associés aux RBD, l'indice t associé à chaque variable indique qu'elle est caractérisée à l'instant t .

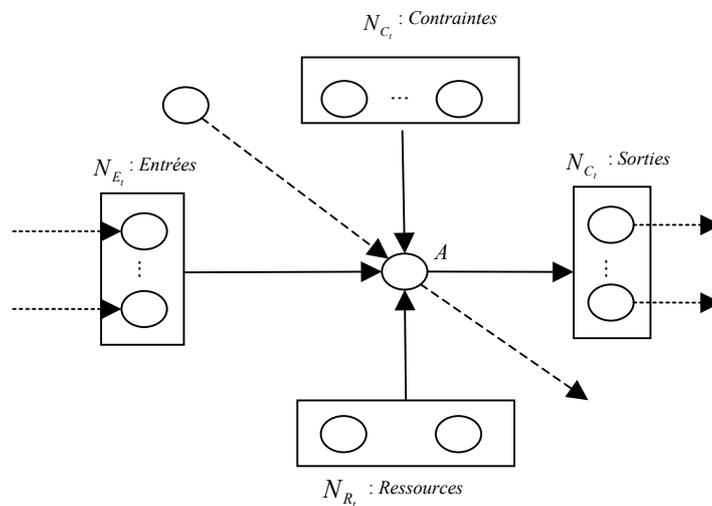


Figure 5. Représentation d'une activité par réseau bayésien dynamique

Inspiré d'un formalisme Statechart, les différents nœuds présentés sur la figure 5 et permettant de caractériser une activité à un instant t correspondent à :

- A_t : l'avancement de l'activité à un instant t ,
- N_{E_t} : nœuds représentant les éléments transformés par l'activité,
- N_{S_t} : nœuds représentant le résultat de la réalisation de l'activité (éléments de sortie),
- N_{C_t} : nœuds modélisant les contraintes, les contrôles ou les perturbations influençant la réalisation d'une activité,
- N_{R_t} : nœuds modélisant les ressources permettant la réalisation de l'activité.

Les différents nœuds utilisés pour modéliser une activité décrivent l'état des flux et la réalisation de l'activité. L'utilisateur (décideur, analyste, etc.) peut introduire autant de variables qu'il y a de flux à prendre en compte. Les arcs caractérisent les interactions entre les flux et les activités. Ce type de modèle permet la prise en compte et la gestion d'incertitudes d'origines diverses ainsi que la caractérisation des causes et des effets relatifs aux perturbations sur les activités d'un processus.

Après avoir établi la représentation graphique du modèle du processus, nous allons maintenant montrer que le paramétrage des nœuds permet de spécifier l'enchaînement logique des opérations.

3.2. Caractérisation des variables

L'ensemble des modalités d'un nœud « activité » A_t doit permettre de caractériser l'avancement de l'activité à un instant t . Pour cela, deux modalités au minimum sont nécessaires :

- « r » : l'activité est réalisée à l'instant t ,
- « nr » : l'activité n'est pas réalisée à l'instant t .

Une activité ne peut débuter que lorsque tous ces éléments d'entrée sont activés. Les éléments de sortie sont activés lorsqu'elle est terminée. Les modalités des nœuds décrivant les éléments d'entrée/sortie sont au minimum :

- « a » : l'élément est activé à l'instant t c'est-à-dire que la condition de début de réalisation de l'activité modélisée par la variable est réalisée,
- « na » : l'élément n'est pas activé à l'instant t .

D'autres conditions de réalisation d'une activité peuvent être prises en compte telles que la disponibilité d'une ressource (nœud appartenant à N_R), une politique de réalisation (décision de pilotage) ou encore des contraintes diverses (nœuds appartenant à N_R). Dans ces différentes situations, le décideur peut introduire de nouvelles variables.

3.3. Spécification de l'enchaînement des activités

L'enchaînement des activités est spécifié au travers du paramétrage des différents nœuds. Le mécanisme de base à modéliser est caractérisé par la répétition des phases suivantes : activation des éléments (obtention des produits, activation d'un flux) et réalisation des activités.

L'activation des éléments est modélisée au travers des arcs allant des nœuds représentant les activités vers des nœuds représentant les éléments de sortie de ces activités. Si on considère un nœud représentant une activité en relation avec un

nœud représentant un élément de type produit, le mécanisme à modéliser est le suivant :

- lorsque l’activité n’est pas réalisée (nœud prenant la modalité « nr »), le produit n’est pas généré (modalité « na » correspondant à la non activation),
- lorsque l’activité est réalisée (nœud prenant la modalité « r »), le produit est généré (modalité « a »).

La primitive de modélisation, déduite du modèle générique de la figure 5, permettant de caractériser ces mécanismes est représentée sur la figure 6. A partir de cette primitive, la réalisation d’une activité peut être spécifiée et connectée à d’autres activités. En effet, l’avancement de la réalisation d’une activité est caractérisé à l’aide des liaisons (arcs) entre les nœuds :

- $PE_t \rightarrow A_t$: PE_t représente le produit traité par l’activité A_t considérée, cette relation permet de modéliser les conditions de déclenchement de l’activité (présence du produit),
- $A_{t-1} \rightarrow A_t$: cette relation permet de caractériser la réalisation de l’activité à partir de l’instant t en fonction de l’historique de cette activité.

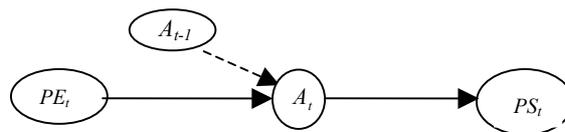


Figure 6. Primitive de modélisation pour la caractérisation d’une activité

Le paramétrage d’une variable de type A_t permet de caractériser les incertitudes relatives à la durée de réalisation de ces activités (paramètre α_t de la table de probabilité conditionnelle (TPC) présentée sur le tableau 1 avec $0 \leq \alpha_t \leq 1$). Le paramètre α_t caractérise la probabilité de réaliser l’activité sur la période $[t ; t+1]$.

		A_t	
		r	nr
r	PE_t	1	0
nr	PE_t	α_t	$1 - \alpha_t$
r	na	0	1
nr	na	0	1

Tableau 1. Paramétrage d’un nœud représentant une activité

Les nœuds de type PS_t caractérisent les éléments de sortie des activités. Les éléments étant générés lorsque l'activité amont est terminée, la TPC de ce type de variables est celle présentée sur le tableau 2. D'autres types d'éléments, notamment économiques, peuvent aussi être modélisés comme nous le verrons par la suite.

A_t	PS_t	
	a	na
r	1	0
nr	0	1

Tableau 2. Paramétrage d'un nœud représentant un élément de sortie

3.4. Exemple d'exploitation

Sur la base des principes de modélisation vus dans le paragraphe précédent, nous présentons maintenant un exemple général d'utilisation pour la comparaison de solutions de réalisation d'un processus. Ce dernier est représenté sur la figure 7. Le processus débute lors de l'activation d'un produit modélisé par le nœud $P1_t$. L'objectif du processus étant de réaliser un des produits modélisés par $P3_t$ et $P4_t$, il se termine à l'activation de ces éléments. Pour générer le produit P3, il faut réaliser les activités modélisées par les nœuds $A1_t$ et $A2_t$, en générant le produit intermédiaire P2. Pour générer le produit P4, il faut réaliser l'activité modélisée par le nœud $A3_t$. Le décideur doit ainsi sélectionner une de ces deux solutions de réalisation (variable de décision C_t). Le modèle lui permet de les évaluer et de les comparer en fonction de différents critères. Nous considérons par exemple comme objectif la satisfaction de demandes pour les produits P3 et P4 et plus particulièrement les risques d'attente des produits par le client caractérisé par des pénalités de retard.

On note T_D^{P3} (resp. T_D^{P4}) la date de demande pour le produit P3 (resp. P4) et on cherche à évaluer la probabilité d'obtenir P3 (resp. P4) par rapport à la date T_D^{P3} (resp. T_D^{P4}). Si le produit est obtenu après la date de demande, une pénalité, plus ou moins importante suivant le retard, est générée.

Les incertitudes relatives aux durées de réalisation des activités sont spécifiées au niveau des TPC des nœuds $A1_t$, $A2_t$ et $A3_t$ avec les valeurs numériques des paramètres α_t présentés dans le tableau 3. Les paramètres α_t étant identiques pour chaque instant t dans cet exemple.

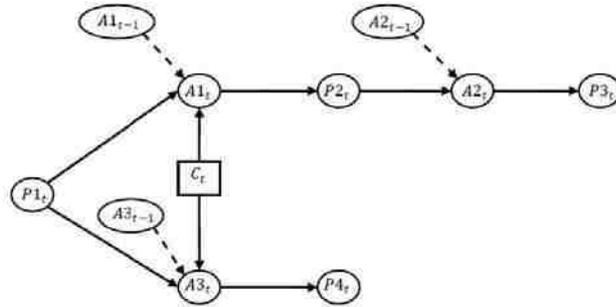


Figure 7. Exemple de représentation d'un processus avec deux solutions de réalisation

	A1	A2	A3
α_t	0.001	0.004	0.0009

Tableau 3. Incertitudes relatives à la durée des activités

Nous avons réalisé une simulation sur un horizon de 3000 unités de temps (ut) en considérant que la variable $P1_t$ était activée à partir de $t=0$ (i.e. le produit est disponible). Les résultats sont présentés sur la figure 8. Ils correspondent aux probabilités que les produits P3 ou P4 soient activés au cours du temps.

On peut alors comparer les probabilités de fin de réalisation des deux solutions à différents instants caractéristiques. Ces instants correspondent notamment aux dates de demandes pour les différents produits fixés à $T_D^{P3}=1500$ ut et $T_D^{P4}=1000$ ut ainsi qu'aux dates d'annulation des demandes : $T_{DF}^{P3}=2500$ ut et $T_{DF}^{P4}=2000$ ut.

A partir de la figure 8, on peut alors évaluer les probabilités d'obtenir les produits après les dates de demandes et d'annulation des demandes (tableau 4). Pour comparer les deux solutions de réalisation du processus, on introduit des valeurs de pénalité caractérisant les conséquences de l'obtention des produits après les différentes dates caractéristiques. Les solutions sont alors évaluées par le produit des probabilités par les pénalités pour chacune des dates et en faisant ensuite la somme des valeurs obtenues. Les résultats sont présentés dans le tableau 4. La solution retenue est celle qui minimisera les pénalités espérées en l'occurrence ici la solution 2 (réalisation de A3 et génération de P4).

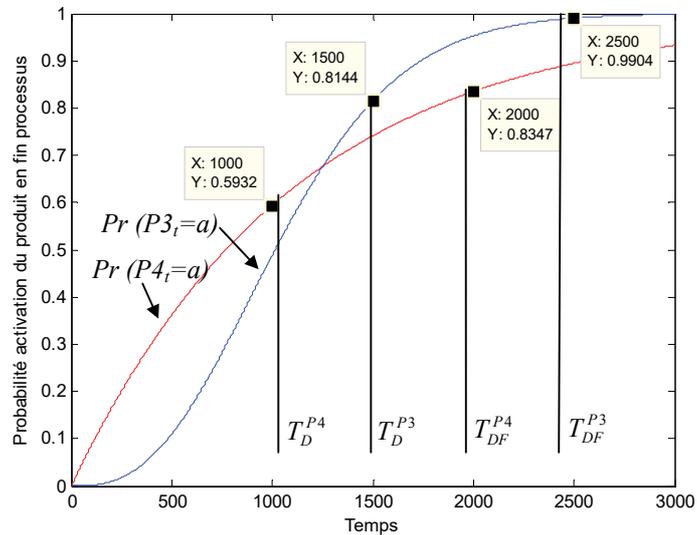


Figure 8. Simulation du processus

	P	Probabilité d'obtention des produits après la date de demande	Pénalités d'obtention des produits après la date de demande	Probabilité d'obtention des produits après la date d'annulation	Pénalités d'obtention des produits après la date d'annulation	Evaluation
Solution 1	P3	0.1856	4	0.0096	8	0.8192
Solution 2	P4	0.4068	1	0.1653	2	0.7366

Tableau 4. Exemple d'évaluation de deux solutions de réalisation d'un processus

Nous avons proposé un modèle générique d'activité permettant de prendre en compte différentes sources d'incertitudes. Les processus de déconstruction se déroulent dans un cadre incertain, ils sont susceptibles d'être représentés par cette représentation. Nous l'utilisons donc dans le paragraphe suivant dans l'objectif d'optimiser les plans de déconstruction sur des horizons couvrant les arrivées de plusieurs systèmes en fin de vie.

4. Application aux processus de déconstruction

4.1. Structuration du modèle

Dans un souci de généralité, le modèle présenté est structuré sous forme de modules. Il peut être ainsi adapté à différentes situations par modification des paramètres associés à chaque module. L'ensemble des modules que nous présentons représente la structure de base pour la simulation de différentes trajectoires. Il s'agit d'une primitive de modélisation sur laquelle peuvent venir se greffer d'autres éléments de modélisation caractérisant des contextes divers.

La structure générique du modèle de simulation est présentée sur la figure 9. Le modèle est structuré par rapport aux produits valorisables du système en fin de vie qui doit être déconstruit. Un module « arrivée » est associé au module « produit » caractérisant le système complet. Chaque produit peut éventuellement faire l'objet d'une arrivée suivant le contexte. Les produits identifiés font l'objet d'une ou plusieurs options de valorisation que nous caractérisons par des modules « option ». Chaque module option est ensuite décomposé en quatre modules pour la modélisation de la réalisation d'une activité, la demande, le mode de gestion de l'option et son évaluation économique.

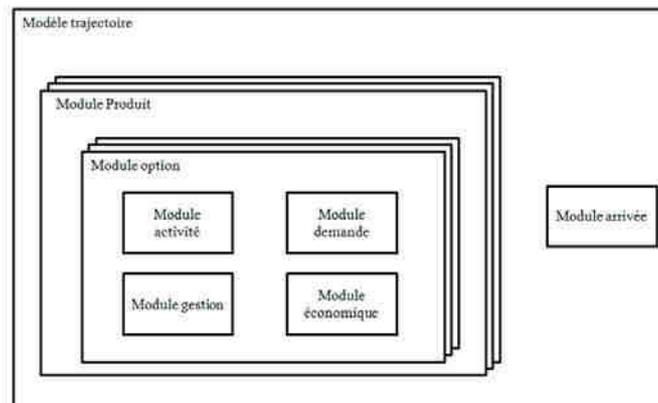


Figure 9. Structuration du modèle de représentation de processus de déconstruction

La démarche de modélisation s'articule autour des modules positionnés sur la figure 9. Avant d'arriver à la création des variables du modèle, l'utilisateur doit en effet déterminer, pour une trajectoire donnée, l'ensemble des produits à traiter au cours de celle-ci. Pour chaque produit, il identifiera alors l'ensemble des options de valorisation possibles sur celui-ci. Après cette première phase d'analyse, la spécification des variables du modèle peut être réalisée pour chaque module « option ». Nous détaillons à la suite les différents modules caractérisant une option

de valorisation d'un produit donné. Un récapitulatif de l'ensemble des variables et paramètres du modèle est présenté sur la figure 10.

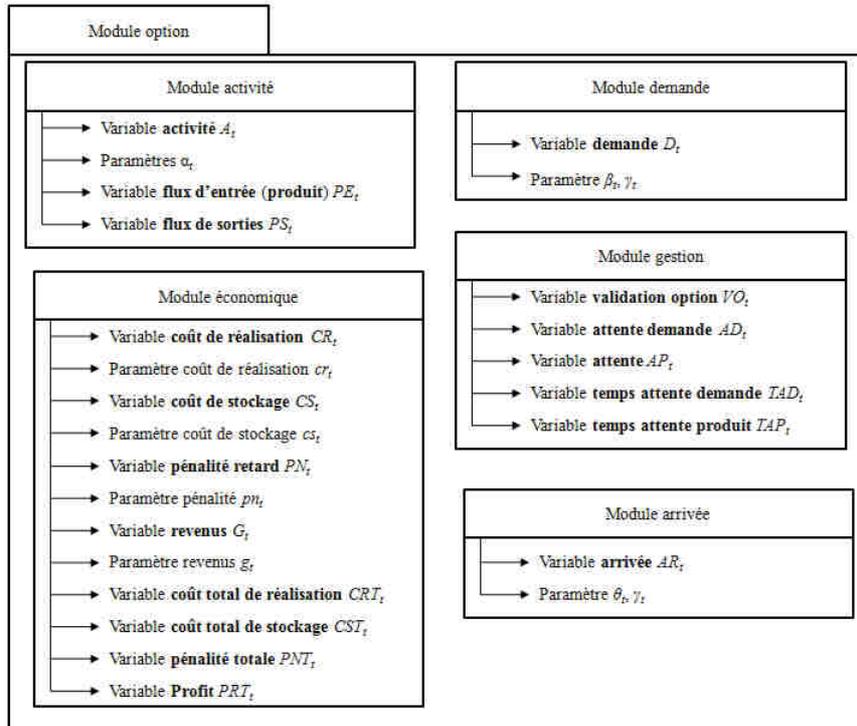


Figure 10. Récapitulatif des éléments des modules élémentaires

4.2. Présentation des modules

Nous présentons dans ce paragraphe les différents modules élémentaires permettant de caractériser chaque option de déconstruction dans le cadre de la détermination des trajectoires de déconstruction sur des horizons intégrant plusieurs arrivées de systèmes en fin de vie. Les incertitudes que nous caractérisons portent plus particulièrement sur :

- la durée de réalisation des différentes activités ;
- les dates des demandes en produits issus de la déconstruction ;
- les dates de fin de vie des systèmes.

En suivant les principes de modélisation que nous présentons, l'utilisateur pourra cependant introduire de nouveaux modules correspondant à l'application qu'il souhaite modéliser.

4.2.1. Module activité

Les modules « *activité* » permettent de caractériser les opérations de déconstruction et les actions de valorisation. Ils sont construits à partir de la primitive de modélisation présentée sur la figure 6. La définition des modules « *activité* » et de leurs interconnexions fixe l'ossature du modèle. Les autres modules s'articulent ensuite autour de celle-ci.

Plusieurs arrivées de systèmes en fin de vie et par conséquent plusieurs réalisations des activités doivent être modélisées. Les domaines de définition des nœuds sont modifiés ainsi :

- les nœuds A_t représentant les activités correspondent au nombre de produits réalisés à l'instant t et le domaine de définition de ces variables est $\{nr, r_1, \dots, r_{N_{MAX}^A}\}$ où N_{MAX}^A est le nombre maximal de réalisations prévues de l'activité,
- les nœuds représentant les éléments d'entrée et sortie des activités notés P_t (PE_t et PS_t) correspondent au nombre d'activations de l'élément à l'instant t et le domaine de définition de ces variables est $\{na, a_1, \dots, a_{N_{MAX}^P}\}$ où N_{MAX}^P est le nombre maximal d'activations prévues de l'élément.

PE_t	A_{t-1}	A_t		
		nr	r_1	r_2
na	nr	1	0	0
na	r_1	0	1	0
na	r_2	0	0	1
a_1	nr	$1-\alpha_t$	α_t	0
a_1	r_1	0	1	0
a_1	r_2	0	0	1
a_2	nr	$1-\alpha_t$	α_t	0
a_2	r_1	0	$1-\alpha_t$	α_t
a_2	r_2	0	0	1

Tableau 5. TPC d'un nœud représentant une activité avec deux réalisations

La TPC d'un nœud A_t permet de spécifier la probabilité $\Pr(A_t = r_u / A_{t-1} = r_v, PE_t = a_w)$ d'avoir réalisé u fois l'activité à l'instant t étant donné que w produits sont arrivés à l'instant t et que l'activité avait été réalisée v

fois à l'instant $t-1$. Le mécanisme de réalisation de l'activité à caractériser est le suivant :

- si le nombre de produits arrivés à l'instant t (P_t) est inférieur ou égal au nombre de réalisation de l'activité aval (A_t) alors tous les produits ont été traités,
- sinon l'activité est en cours de réalisation.

Si l'on considère par exemple que l'activité ne peut être réalisée au maximum qu'une seule fois au cours d'une période et que α_t correspond à la probabilité de réaliser l'activité au cours d'une période sachant qu'elle était en cours à la période précédente, on établit la TPC présentée sur le tableau 5 avec deux réalisations considérées. La flexibilité du modèle permet aussi de considérer d'autres situations comme par exemple la possibilité de réaliser plusieurs fois l'activité à chaque période.

4.2.2. Module demande

Les modules « demande » permettent de représenter les incertitudes relatives aux dates des demandes en produits de la déconstruction. La représentation graphique de ces modules est donnée sur la figure 11. Les nœuds D_t caractérisent la demande à l'instant t . Nous considérons deux modalités pour ces nœuds :

- « o » : indique que l'on a une demande enregistrée à l'instant t ,
- « n » : indique que l'on n'a pas de demande enregistrée à l'instant t .

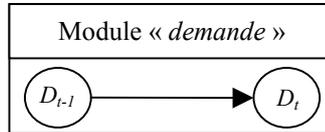


Figure 11. Représentation graphique d'une demande

La relation temporelle entre les variables D_{t-1} et D_t représentant les demandes aux instant $t-1$ et t permet de caractériser la loi de probabilité associée à la demande (tableau 6). Le paramètre β_t caractérise la probabilité d'enregistrement de la demande au cours de la période t .

D_{t-1}	D_t	
	o	n
o	1	0
n	β_t	$1-\beta_t$

Tableau 6. TPC pour la modélisation d'une demande

Le modèle permet aussi de caractériser d'autres profils de demande. On peut notamment prendre en compte la possibilité d'annulation d'une demande lorsque, par exemple, le temps d'attente du produit devient trop important. Nous ajoutons pour cela une modalité supplémentaire aux variables D_t : elle est notée « an » et indique que la demande est annulée à l'instant t . La TPC d'une variable D_t dans ce cas est présentée sur le tableau 7. Le paramètre γ_t correspond à la probabilité que la demande soit annulée à l'instant t sachant qu'elle était enregistrée à l'instant $t-1$.

D_{t-1}	D_t		
	n	o	an
n	$1 - \beta_t$	β_t	0
o	0	$1 - \gamma_t$	γ_t
an	0	0	1

Tableau 7. Exemple de modélisation d'une demande avec possibilité d'annulation

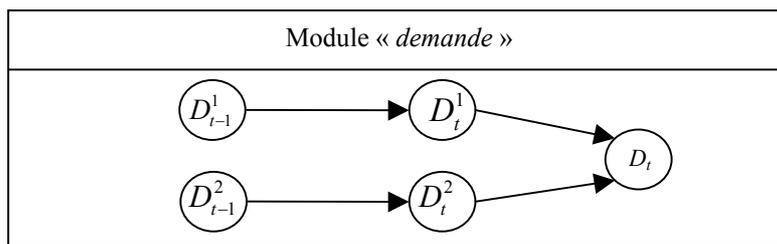


Figure 12. Caractérisation de plusieurs demandes

Dans le cadre de la caractérisation des trajectoires sur des horizons couvrant les arrivées de plusieurs systèmes en fin de vie, les nœuds représentant les demandes doivent permettre de prendre en compte plusieurs demandes. On utilise alors autant de modules « *demande* ». Chaque demande est notée D_t^i (i représentant la $i^{\text{ème}}$ demande). Un nœud D_t est introduit pour représenter le nombre de demandes enregistrées à l'instant t (figure 12). Chaque nœud D_t prend ses modalités dans $\{0, 1, \dots, N_{MAX}^D\}$ où N_{MAX}^D correspond au nombre maximal de demandes prévues sur l'horizon de planification. Un exemple de spécification d'une variable D_t est donné sur le tableau 8. Les paramètres β_t^1 et β_t^2 correspondent respectivement aux probabilités d'enregistrement d'une première et d'une deuxième demande.

D_{t-1}^1	D_t^1		D_{t-1}^2	D_t^2	
	0	1		0	1
0	$1-\beta_t^1$	β_t^1	0	$1-\beta_t^2$	β_t^2
1	0	1	1	0	1

	D_t^1	0	1	0	1
	D_t^2	0	0	1	1
D_t	0	1	0	0	0
	1	0	1	1	0
	2	0	0	0	1

Tableau 8. TPC pour la caractérisation de plusieurs demandes

4.2.3. Module gestion

Le module « *gestion* » regroupe l'ensemble des nœuds représentant des indicateurs relatifs à la réalisation du processus de déconstruction. La validation d'une action de valorisation est fonction de la demande et de la réalisation de l'activité associées à cette option : une demande doit être enregistrée et le produit doit être disponible. Les autres situations particulières correspondent à l'attente du produit (activité non réalisée et demande enregistrée) et à l'attente de la demande (activité réalisée et pas de demande enregistrée).

Le décideur peut être intéressé par la caractérisation de la validation des options, des stocks intermédiaires, des stocks de produits valorisables et des demandes en attente d'un produit disponible. Nous utilisons pour une option de déconstruction donnée les nœuds suivants :

– une variable VO_t représente le nombre de produits valorisés à l'instant t . Elle est dépendante du nombre de produits disponibles (nœud A_t) et du nombre de demandes enregistrées (nœud D_t) :

$$VO_t = \min (\text{Nbre produits disponibles} ; \text{Nbre de demandes enregistrées}) \quad [1]$$

– une variable S_t caractérise un stock de produits intermédiaires *i.e.* situé en amont d'une activité (opération de déconstruction ou action de valorisation) ;

- son domaine de définition $\{0,1, \dots, N_{MAX}^S\}$ correspond au nombre de produits pouvant être en stock à chaque instant t ;

- elle dépend du nombre de produits arrivés à l'instant t (PE_t) en amont de l'activité et du nombre de réalisations de l'activité à l'instant t (A_t) :

$$S_t = \max (0 ; \text{Nbre de produits arrivés} - \text{Nbre de réalisations de l'activité}) \quad [2]$$

– une variable AD_t caractérise un stock de produits valorisables c'est-à-dire des produits en attente d'une demande ;

- son domaine de définition $\{0,1, \dots, N_{MAX}^{AD}\}$ correspond au nombre de produits pouvant être en attente d'une demande à chaque instant t ;

- elle dépend du nombre de demandes à l'instant t (D_t) et du nombre de réalisations de l'activité à l'instant t (A_t) :

$$AD_t = \max(0 ; \text{Nbre de réalisation de l'activité} - \text{Nbre de demandes enregistrées}) \quad [3]$$

– une variable AP_t caractérise le nombre de demandes non satisfaites à l'instant t ;

- son domaine de définition $\{0,1, \dots, N_{MAX}^{AP}\}$ correspond au nombre de demandes pouvant être en attente d'un produit à chaque instant t ;

- elle dépend du nombre de demandes à l'instant t (D_t) et du nombre de réalisations de l'activité à l'instant t (A_t) :

$$AD_t = \max(0 ; \text{Nbre de demandes enregistrées} - \text{Nbre de réalisations de l'activité})$$

[4]

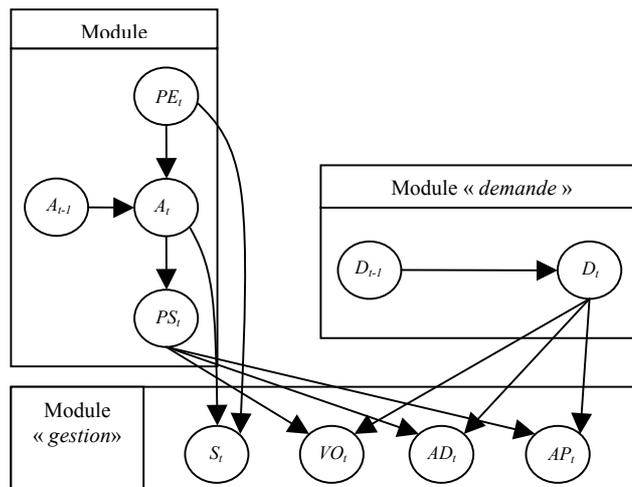


Figure 13. Représentation graphique d'un module « gestion »

La représentation graphique caractérisant ces différents indicateurs est donnée sur la figure 13. La gestion des stocks de produits valorisables est modélisée par les nœuds VO_t , AD_t et AP_t . Les arcs traduisent les relations de dépendance avec les autres modules que nous venons d'identifier : modules « activité » et « demande ». L'évolution des stocks intermédiaires est modélisée par le nœud S_t en relation avec

le nœud A_i et le nœud PE_i . Les TPC des nœuds représentés sur la figure 13 sont établies à partir des équations [1] à [4].

4.2.4. Module économique

Nous avons présenté les modules permettant d'élaborer de manière générale des indicateurs d'évaluation des activités d'une trajectoire en présence d'incertitudes temporelles relatives aux durées de ces activités et aux demandes. Nous nous intéressons maintenant plus particulièrement à l'évaluation et à la comparaison de trajectoires à partir d'un critère économique.

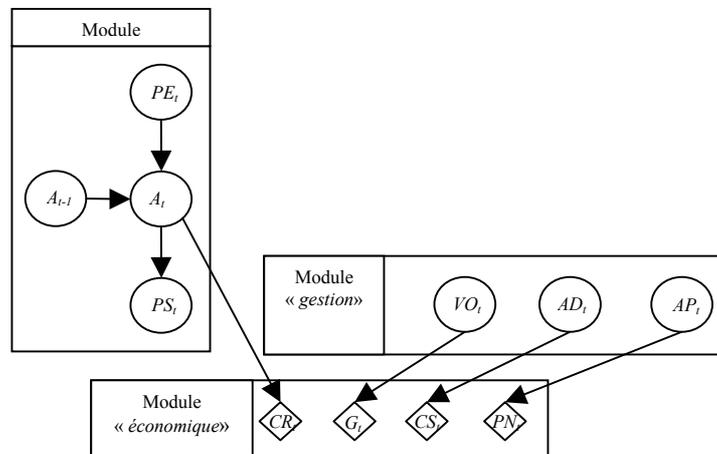


Figure 14. Représentation graphique d'un critère économique

Nous présentons la modélisation d'un critère économique avec quatre composantes. Il s'agit des coûts et des revenus les plus courants dans le cadre de la gestion de la déconstruction. D'autres types de coûts ou de revenus peuvent cependant être définis en suivant les mêmes principes. Pour évaluer chaque activité nous déterminons ainsi :

- *le coût de réalisation* : le modèle dynamique permet, en intégrant une dimension temporelle, d'évaluer le coût de réalisation par période et de déterminer ainsi le coût espéré en fonction de la probabilité d'allongement de la durée de réalisation de l'activité,

- *le coût de stockage ou d'immobilisation d'un produit* : à partir d'une variable de type AD_i , le modèle dynamique permet de spécifier ce type de coût en fonction de la durée séparant l'obtention du produit et l'enregistrement de la demande en intégrant les incertitudes relatives à ces deux événements,

– les pénalités de retard de satisfaction de la demande : à partir d’une variable de type AP_t , le modèle dynamique permet de spécifier une fonction relative aux pénalités de retard,

– les revenus : ils sont générés dès l’instant où le produit est disponible et la demande est enregistrée ; le modèle dynamique permet ainsi de définir une fonction « revenu » à partir d’une variable de type VO_t , présentée précédemment.

Une représentation générique d’un module économique pour l’évaluation d’une activité de valorisation intégrant ces différentes composantes est présentée sur la figure 14. Les paramètres économiques sont représentés par des nœuds d’utilité (losanges) : CR_t représente le coût de réalisation de l’activité à l’instant t , CS_t le coût de stockage, PN_t les pénalités et G_t le revenu généré par l’activité sur l’horizon de planification. En ce qui concerne les activités de type « opération de déconstruction », seul le coût de réalisation est pris en compte.

Tables d'utilité			
$CR_t = \begin{cases} cr \cdot x & \text{si } PE_t > A_t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$	$\begin{array}{cccc} AD_t & 0 & 1 & \dots & x & \dots \\ CS_t & 0 & cs & \dots & x \cdot cs & \dots \end{array}$	$\begin{array}{cccc} AP_t & 0 & 1 & \dots & x & \dots \\ PN_t & 0 & pn & \dots & x \cdot pn & \dots \end{array}$	$\begin{array}{cccc} VO_t & 0 & 1 & \dots & x & \dots \\ G_t & 0 & g & \dots & x \cdot g & \dots \end{array}$
	Coûts espérés à chaque instant t		
$CR_t = cr \cdot P(PE_t > A_t)$	$CS_t = \sum_x x \cdot cs \cdot P(AD_t = x)$	$PN_t = \sum_x x \cdot pn \cdot P(AP_t = x)$	$G_t = \sum_x x \cdot g \cdot P(VO_t = x)$
Coûts cumulés à chaque instant t			
$CRT_t = \sum_{i=1}^t CR_i$	$CST_t = \sum_{i=1}^t CS_i$	$PNT_t = \sum_{i=1}^t PN_i$	

Tableau 9. Spécification d’un modèle de coût

Les valeurs des indicateurs économiques sont déterminées à l’aide de modèles de coûts. Ils sont spécifiés au niveau des tables des nœuds d’utilités. Un exemple de modèles de coûts pour chaque type de nœud d’utilité est donné dans le tableau 9. Les modèles de coûts utilisés sont de type « proportionnel » *i.e.* les coûts et les revenus sur chaque période sont proportionnels au nombre de produits stockés. Ces modèles de coûts sont spécifiés au travers des tables d’utilité. Le critère utilisé pour évaluer économiquement les trajectoires correspond aux coûts cumulés à une période donnée. Ceux-ci sont fonction des coûts espérés par période, eux-mêmes déduits des tables d’utilité. Les paramètres cr , cs , pn et g indiqués sur le tableau 9 correspondent aux coûts unitaires par période et par produit. L’évaluation d’une trajectoire est donnée par la somme des coûts associés à chaque activité.

4.2.5. Module arrivée

Nous n'avons pas pris en compte jusqu'à présent les incertitudes relatives aux arrivées des systèmes en fin de vie. La gestion des incertitudes sur les arrivées représentant le flux d'entrée des systèmes de déconstruction est en effet un élément incontournable de la planification au regard de la nature et de la diversité des fins de vie possibles des systèmes à déconstruire. Notre objectif dans ce paragraphe est de prendre en compte ces incertitudes dans l'évaluation du profit espéré des trajectoires afin de comparer différentes trajectoires. Pour cela, les incertitudes relatives aux arrivées sont intégrées au modèle à l'aide de la spécification d'un module « arrivée ».

Un module « arrivée » est constitué de nœuds AR_t caractérisant le nombre de systèmes en fin de vie destinés à être déconstruits à l'instant t . Son domaine de définition est $\{0, 1, \dots, N_{MAX}^{AR}\}$ où chaque élément de cet ensemble est un nombre entier et N_{MAX}^{AR} caractérise le nombre maximal d'arrivées prévues sur l'horizon de planification.

La représentation graphique d'un module « arrivée » proposé sur la figure 15. A un instant t , un nœud AR_t est spécifié par rapport à un nœud AR_{t-1} . D'autres variables antérieures à AR_t peuvent éventuellement être prises en compte pour caractériser différents types de distributions de probabilités. Un module « arrivée » est intégré au modèle *via* la connexion avec une variable PE_t d'un module « activité ». Une arrivée entraîne en effet l'activation d'un flux d'entrée d'une activité (produit disponible).

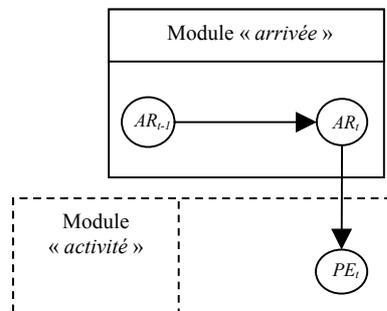


Figure 15. Représentation graphique d'un module « arrivée »

Un exemple de TPC pour les variables AR_t est présenté sur le tableau 10. La TPC d'une variable AR_t est définie dans le cas où deux arrivées sont prévues sur l'horizon de planification. Les paramètres θ_t^1 et θ_t^2 correspondent respectivement aux probabilités d'arrivées du premier et du deuxième système en fin de vie.

Nous venons de présenter les différents modules caractérisant les options de déconstruction de chaque constituant d'un système en fin de vie. Ils permettent de

représenter les différentes trajectoires de déconstruction en prenant en compte les incertitudes relatives aux dates des demandes, aux dates de fin de vie et aux durées de réalisation des activités. Nous appliquons maintenant le modèle à un système aéronautique.

	AR_t		
AR_{t-1}	0	1	2
0	$1 - \theta_t^1$	θ_t^1	0
1	0	$1 - \theta_t^2$	θ_t^2
2	0	0	1

Tableau 10. TPC d'un nœud arrivée

4.3. Exemple de détermination d'une politique de déconstruction

L'objectif de l'exemple proposé dans ce paragraphe est d'illustrer la construction du modèle pour évaluer des politiques de déconstruction d'un sous-ensemble donné d'un système donné. L'analyse des paramètres du modèle et de leurs interactions ainsi que l'analyse des résultats n'est donc pas développés ici. Ces analyses feraient en effet l'objet d'un travail à part entière sur un cas plus étendu. La structure modulaire est cependant mise en évidence dans cet objectif.

4.3.1. Présentation de l'exemple

L'exemple que nous considérons est un système aéronautique (figure 16). Nous nous intéressons plus particulièrement à la déconstruction du sous-ensemble noté $SA3$ constitué des composants élémentaires $P3$, $P5$ et $P6$. On considère deux options pour ce sous-ensemble. La première consiste à déconstruire $SA3$ (opération de déconstruction notée $DO4$) et à valoriser ses composants ($P3$, $P5$, $P6$) par recyclage matière (noté respectivement $RM1$, $RM2$, $RM3$). La deuxième option vise à valoriser $SA3$ par recyclage fonctionnel (noté RF). Le modèle dynamique des trajectoires de $SA3$ est structuré comme sur la représentation de la figure 17. Les créations des différentes variables et paramètres se font au niveau de chaque module « option » identifié.

Pour représenter l'action du décideur sur une trajectoire au niveau de chaque produit, nous utilisons des nœuds de décision représentant leur politique de déconstruction. Elles fixent les options à sélectionner pour chaque arrivée de système en fin de vie prévue sur l'horizon de planification. Pour le sous-ensemble $SA3$, la politique consiste à choisir entre :

- le recyclage fonctionnel pour les deux arrivées (politique $PL1$),
- le recyclage fonctionnel pour la première arrivée et la déconstruction pour la deuxième (politique $PL2$),

– la déconstruction pour les deux arrivées (politique *PL3*).

L'objectif de la modélisation est de déterminer la politique à sélectionner en fonction d'un critère économique caractérisant les profits espérés pour chaque politique prenant en compte les mêmes types de coûts et de revenus que ceux présentés dans les paragraphes précédents.

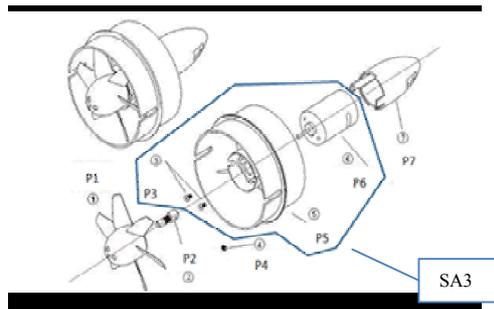


Figure 16. Représentation du système analysé

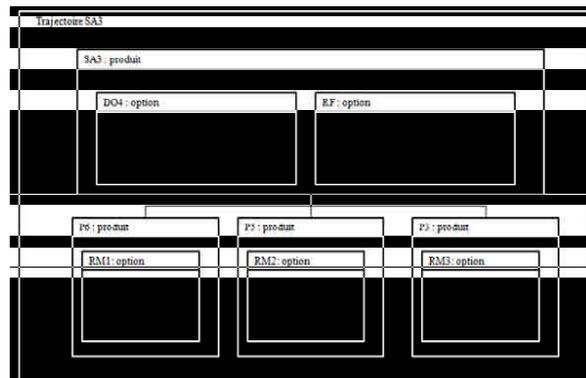


Figure 17. Structuration du modèle pour l'exemple

4.3.2. Déploiement du modèle

Le modèle des trajectoires de déconstruction du produit valorisable *SA3* dans le contexte présenté précédemment est donné sur la figure 18. On retrouve les différents modules utilisés jusqu'à présent. Le nœud de décision « *Politique* » caractérise la sélection d'une option de *SA3* par le décideur. Les modalités du nœud correspondent aux trois politiques possibles envisagées dans le paragraphe précédent (« *Politique* » prend ses valeurs dans $\{PL1, PL2, PL3\}$). Son instantiation est réalisée par le décideur lorsqu'il sélectionne une politique dans le but de l'évaluer. Dans le cadre d'une optimisation, le résultat de simulation (calcul des profits

espérés) est associé à chaque politique et le décideur peut choisir celle qui maximise les profits espérés.

Les TPC des nœuds $A_t(DO4)$ et $A_t(RF)$ diffèrent selon la politique choisie. Le nombre de réalisations possibles à un instant donné de ces deux activités varie en effet en fonction de la politique :

- pour la politique $PL1$: deux réalisations sont possibles pour $A_t(FR2)$ mais aucune n'est possible pour $A_t(DO4)$,
- pour la politique $PL2$: une réalisation pour chaque activité $A_t(FR2)$ et $A_t(DO4)$ est possible,
- pour la politique $PL3$: deux réalisations sont possibles pour $A_t(DO4)$ et aucune n'est possible pour $A_t(RF)$.

Nous avons simulé le modèle sur 3000 périodes en relevant pour chaque instant t les profits espérés en fonction des politiques notées $PRT(PL1)$, $PRT(PL2)$ et $PRT(PL3)$. Les valeurs numériques utilisées sont présentées dans le tableau 11 en considérant, pour le module « arrivée » une première arrivée à $t=0$ et une deuxième arrivée incertaine avec un paramètre $\theta_t^2 = 0.001$.

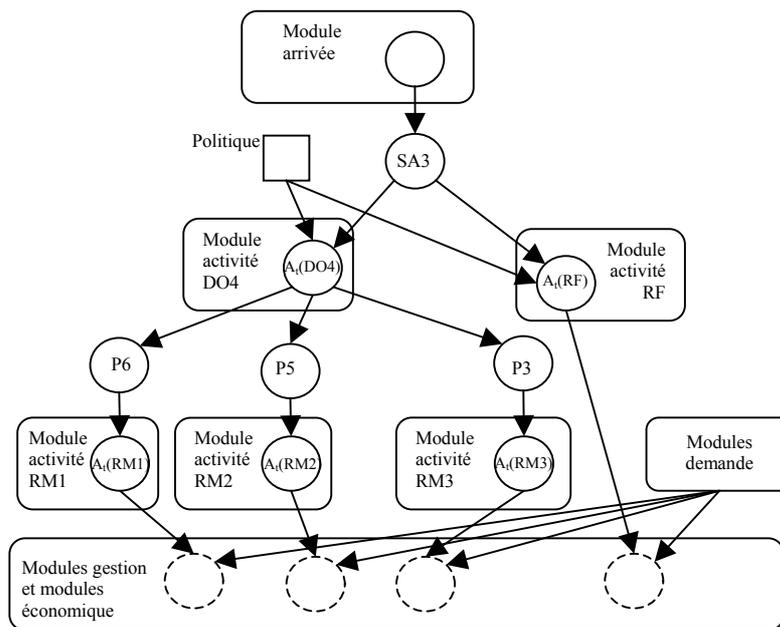


Figure 18. *Modèle d'une politique de déconstruction*

Nous obtenons les courbes présentées sur la figure 19. L'horizon de planification est compris entre $t=0$ et T_H . On constate tout d'abord que, quel que soit l'horizon de

planification considéré, la politique *PL3* génère des profits inférieurs aux politiques *PL1* et *PL2*. La comparaison de *PL1* et *PL2* dépend par contre de l'horizon. Trois types d'horizon de planification peuvent ainsi être identifiés :

- $T_H < 855$: les deux politiques *PL1* et *PL2* peuvent être considérées comme identiques (en termes de profits espérés),
- $855 < T_H < 2288$: la politique *PL1* est « meilleure » que la politique *PL2*,
- $T_H > 2288$: la politique *PL2* est « meilleure » que la politique *PL1*.

		Paramètres						
		α	β^1	β^2	cr	cs	pn	g
Option	<i>DO4</i>	0.001	--	--	0.2	--	--	--
	<i>RM1</i>	0.002	0.001	0.0005	0.01	0.01	0.01	100
	<i>RM2</i>	0.001	0.0005	0.00025	0.01	0.005	0	150
	<i>RM3</i>	0.004	0.00025	0.000125	0.05	0.01	0.01	150
	<i>RF</i>	0.002	0.002	0.001	0.1	0.05	0.1	300

Tableau 11. Paramètres de simulation

La politique *PL3* est générée moins de profit que les deux autres en raison notamment des demandes tardives pour les matières. Si on fait varier les paramètres de ces demandes de manière à ce qu'ils soient égaux à ceux de la demande pour le recyclage fonctionnel, on obtient la courbe correspondant à la politique 3.2 sur la figure 20. La politique 3.2 génère alors des profits supérieurs à $T_H = 2288$ mais reste inférieur à $T_H = 855$ en raison du temps de l'opération de désassemblage. La politique 2.2, correspondant à la politique *PL2* avec les nouveaux paramètres des demandes en matière, est elle aussi affectée par ces modifications (il y a un recyclage matière pour les deux arrivées). Elle devient alors meilleure que les deux autres quel que soit le T_H considéré.

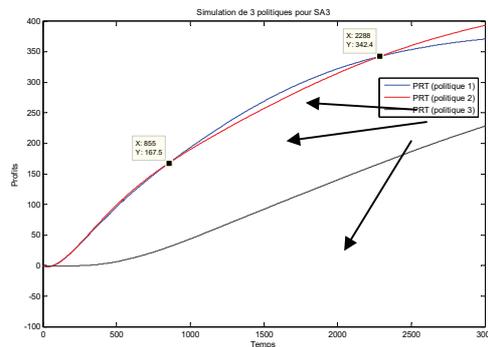


Figure 19. Simulation des profits espérés des trois politiques de déconstruction

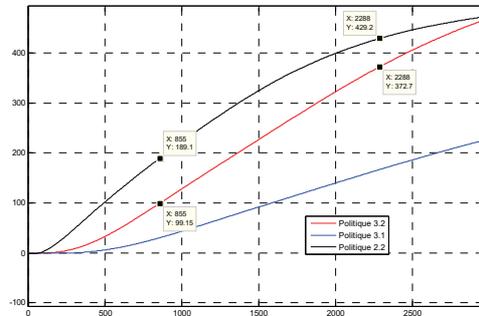


Figure 20. *Impact de la modification des paramètres des demandes sur les profits de des politiques*

5. Conclusion

Nous avons présenté dans cet article une modélisation pour la planification des trajectoires de déconstruction en présence d'incertitudes. En caractérisant la réalisation des trajectoires dans le temps, l'objectif est d'aider le décideur en déconstruction à évaluer et à comparer différentes trajectoires pour un système en fin de vie donné en prenant en compte plusieurs arrivées sur l'horizon de planification. Nous avons mis en évidence les événements à prendre en compte sur l'horizon de planification. Ils correspondent aux arrivées de systèmes en fin de vie devant être déconstruits, à l'obtention des produits valorisables à partir d'un système en fin de vie (réalisation des activités de la trajectoire) et aux demandes pour ces produits. Ces événements induisent pour le décideur différentes situations à gérer correspondant à la validation ou non des options de valorisation, à l'attente d'un produit par le demandeur et l'attente d'une demande pour un produit. L'utilisation des réseaux bayésiens dynamiques a permis de modéliser l'évolution temporelle des variables caractérisant une trajectoire et de spécifier leurs incertitudes définies par rapport à une dimension temporelle. Les perspectives à ces travaux portent notamment sur la prise en compte d'autres critères que le profit économique (taux de valorisation, bilan écologique) au moyen de techniques d'optimisation multicritère. Le modèle proposé dans cet article utilise un certain nombre de paramètres (probabilistes, économiques, etc.). Ils doivent être déterminés à l'issue d'une analyse préliminaire du problème. Nous n'avons abordé que partiellement le problème d'acquisition de ces paramètres. Il serait intéressant dans ce cadre de développer des systèmes de retour d'expérience et de gestion des connaissances. Le modèle peut être exploité dans le cadre de la modélisation d'autres processus industriels où la maîtrise des incertitudes tient une place essentielle.

6. Bibliographie

- Addouche S.A., Contribution à une démarche de conception optimisée des processus de désassemblage, Thèse de l'Université de Franche-Comte, 2003.
- Barba-Gutierrez Y., Adenso-Díaz B., Gupta S.M., "Lot sizing in reverse MRP for scheduling disassembly", *International Journal of Production Economics*, vol. 111, n° 2, 2008, p. 741-751.
- Barba-Gutiérrez Y., Adenso-Díaz B., "Reverse MRP under uncertain and imprecise demand", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 4, n° 3-4, 2008, p. 413-424.
- Fleischmann M., Kuik R., Dekker R., "Controlling inventories with stochastic items returns : A basic model", *European Journal of Operational Research*, vol. 138, n° 1, 2002, p. 63-75.
- Godichaud M., Outils d'aide à la décision pour la sélection des filières de valorisation des produits issus de la déconstruction des systèmes en fin de vie : application au domaine aéronautique, Thèse de l'Université de Toulouse, 2009.
- Gupta S.M., Taleb K.N., "Scheduling disassembly", *International Journal of Production Research*, vol. 32, n° 8, 1994, p. 1857-1866.
- Huang C., Darwiche A., "Inference in belief networks: A procedural guide", *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 15, 199, p. 225-2636.
- Inderfurth K., « Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with lead-times », *OR Spektrum*, vol. 19, 1997, p. 111-122.
- Inderfurth K., De Kok A.G, Flapper S.D.P., "Product recovery in stochastic remanufacturing systems with multiple reuse options", *European Journal of Operational Research*, vol. 133, n° 1, 2001, p. 130-152.
- Inderfurth K., Langella I.M., "Heuristics for solving disassemble-to-order problems with stochastic yields", *OR Spectrum*, vol. 28, n° 1, 2006, p. 73-99.
- Inderfurth K., Van Der Lann E., "Leadtime effects and policy improvement for stochastic inventory control with remanufacturing", *International Journal of Production Economics*, vol. 71, n° 1, 2001, p. 381-390.
- Jensen F.V., Nielsen T.D., *Bayesian Networks and Decision Graphs*, Springer, 2007.
- Kim H.J., Lee D.H., Xirouchakis P., "Two-phase heuristic for disassembly scheduling with multiple product types and parts commonality", *International Journal of Production Research*, vol. 44, n° 1, 2006, p. 295-212.
- Kim H.J., Disassembly scheduling: models and algorithms, Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- Kongar E., Gupta S.M., "Disassembly-to-order system using Linear Physical Programming", *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 2002, p. 312-3172.
- Kongar E., Gupta S.M., "A multi-criteria decision making approach for disassembly to order systems", *Journal of Electronics Manufacturing*, vol. 11, n° 2, 2002, p. 171-183.

- Kongar E., Gupta S.M., "Disassembly to order system under uncertainty", *Omega*, vol. 34, n° 6, 2006, p. 550-561.
- Lambert A.J.D., Gupta S.M., *Disassembly modelling for assembly, maintenance, reuse, and recycling*, CRC Press, 2005.
- Lambert A.J.D., Gupta S.M., "Demand-driven disassembly optimization for electronic consumer goods", *Journal of Electronics Manufacturing*, vol. 11, n° 2, 200, p. 121-1352.
- Langella I.M., "Heuristics for demand-driven disassembly planning", *Computers & Operations Research*, vol. 34, n° 2, 2007, p. 552-577.
- Lee D.-H., Xirouchakis P., "A two-stage heuristic for disassembly scheduling with assembly product structure", *Journal of the Operational Research Society*, vol. 55, p. 287-297, 2004.
- Lee D.-H., Xirouchakis P., Zust R., "Disassembly Scheduling with Capacity Constraints", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 51, n° 1, 2002, p. 387-390.
- Mahadevan, B., Pyke D. F., "Fleischmann M., Periodic review, push inventory policies for remanufacturing", *European Journal of Operational Research*, vol. 151, n° 3, 2003, p. 536-551.
- Murphy K.P., *Dynamic Bayesian Networks: Representation, Inference and learning*, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, 2002.
- Naïm P., Wuillemin P.-H., Leray P., Pourret O., Becker A., *Réseaux Bayésiens*, Eyrolles, 1999.
- Takahashi K., Morikawa K., Takeda D., Mizuno A., "Inventory control for a markovian remanufacturing system with stochastic decomposition process", *International Journal of Production Economics*, vol. 97, n° 2, 2008, p. 308-326.
- Taleb K.N., Gupta S.M., "Disassembly of multiple product structures", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 32, n° 4, 1997, p. 949-961.
- Taleb K.N., Gupta S.M., Brennan L., "Disassembly of complex product structures with parts and materials commonality", *Production Planning and Control*, vol. 8, n° 3, 1997, p. 255-269.
- Tang, C.S., "Perspectives in supply chain risk management", *International Journal of Production Economics*, vol. 103, n° 2, 200, p. 451-4886.
- Tchangani A., Noyes D., « Modeling Dynamic Reliability Using Bayesian Network », *Journal européen des systèmes automatisés RS série JESA*, vol. 40, n° 8, p. 911-935, 2006.
- Veerakamolmal P., Gupta S.M., "High-mix/low-volume batch of electronic equipment disassembly", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 35, n° 1-2, 1998, p. 65-68.
- Veerakamolmal P., Gupta S.M., "Optimal Analysis of Lot Size Balancing for Multi-Products Selective Disassembly", *International Journal of Flexible Automation and Integrated Manufacturing*, vol. 6, n° 3-4, 1998, p. 65-68.
- Weber P., Jouffe L., "Complex system reliability modelling with Dynamic Object Oriented Bayesian Networks (DOOBN)", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 91, n° 2, 2005, p. 149-162.