



Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

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/28038>

Official URL: <https://doi.org/10.3166/JESA.40.397-417>

To cite this version:

Grenouilleau, Jean-Christophe and Pérès, François  *Gestion de l'approvisionnement initial en éléments de rechange d'un système orbital*. (2006) *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 40 (4/5). 397-417. ISSN 1269-6935

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

Gestion de l’approvisionnement initial en éléments de rechange d’un système orbital

Jean-Christophe Grenouilleau* — François Pérès**

** European Space Agency
Operations Planning
DNMSM-EOI
Delft Netherland
Jean-Christophe.Grenouilleau@esa.int*

*** Ecole Nationale d’Ingénieurs de Tarbes
47, avenue d’Azereix
F-65016 Tarbes cedex
francois.peres@enit.fr*

RÉSUMÉ. Cet article présente une méthode de gestion de l’approvisionnement initial en pièces de rechange. Cette problématique générique revêt un intérêt particulier dans certains systèmes dont la difficulté d’accessibilité ou la durée de vie constitue des risques liés à des ruptures possibles de stock d’éléments de rechange. Nous considérons dans ce papier le cadre spatial. Après avoir commenté les particularités de la gestion des approvisionnements en éléments de rechange d’une station orbitale, nous proposons une méthode basée sur la minimisation du risque de report d’une opération de maintenance. Une application au laboratoire Columbus de la Station Spatiale Internationale est finalement présentée.

ABSTRACT. This article presents a method of management of the initial supply spare parts. This generic problem is of a particular interest in certain systems whose difficulty of accessibility or lifespan constitutes risks related to possible stock of spare elements running out. We consider in this paper the space framework. After having commented on the characteristics of the management of the supplies elements of replacement of an orbiting station, we propose a method based on minimization of the risk of carry out of a maintenance action. An application to the Columbus laboratory of the International Space Station is finally presented.

MOTS-CLÉS : gestion des approvisionnements, éléments de rechange, minimisation du risque, laboratoire Columbus, Station Spatiale Internationale.

KEYWORDS: supply management, spare parts, risk minimization, Columbus Laboratory, International Space Station.

1. Introduction

Parmi les ressources nécessaires à la réalisation des tâches de maintenance par remplacement ou par réparation, les éléments de rechange occupent une place de choix du fait de l'impact potentiel de leur indisponibilité. La gestion de leurs approvisionnements bénéficie ainsi d'une attention particulière de la part des équipes concernées par la préparation de la phase d'exploitation.

Définie en cohérence avec la politique de maintenance, la politique d'approvisionnement détermine principalement l'étendue des éléments de rechange, leur mode d'approvisionnement ainsi que leur répartition géographique. Un tel problème est délicat à aborder en pratique en raison de l'interaction de nombreux domaines dans l'élaboration d'une solution. Ce papier est la première partie d'une étude à deux volets.

Avant de développer un modèle d'approvisionnement en pièces de rechange prenant en compte l'ensemble de la chaîne logistique, étude qui sera l'objet d'un travail futur, nous introduisons ici une méthode d'aide à la maîtrise des risques liés aux approvisionnements destinés à couvrir les besoins de la phase d'exploitation initiale. L'événement redouté par l'exploitant concerne le report d'une tâche de maintenance en raison de l'indisponibilité d'un élément de rechange correspondant.

Nous proposons par conséquent de quantifier le risque associé au choix d'un approvisionnement donné. Lors de l'approvisionnement initial, la variable-clé est la quantité approvisionnée, et la question essentielle concerne donc la validité du choix de cette quantité. Le problème général étant ainsi simplifié, nous proposons d'employer une technique d'optimisation classique pour minimiser les risques liés à un approvisionnement. Les résultats peuvent alors servir de référence et être utilisés comme support lors de négociations. Ce travail est divisé en trois sections.

Nous commençons par présenter l'approvisionnement en pièces de rechange dans le contexte spatial. Après avoir décrit succinctement les composantes d'un système orbital, nous caractérisons les particularités d'un tel système, susceptibles d'influencer la gestion des approvisionnements. Un état de l'art synthétique du domaine est proposé. Nous développons ensuite une méthode d'évaluation de l'approvisionnement initial. Nous introduisons pour cela la notion de risque de report d'une tâche de maintenance que nous cherchons à minimiser par l'identification de la probabilité de report et de la gravité des conséquences liées à la réalisation de l'événement redouté. Finalement, nous proposons une application de la méthode au dimensionnement de l'approvisionnement initial en pièces de rechange du laboratoire Columbus.

2. Gestion des approvisionnements en pièces de rechange d'une station orbitale

2.1. Composantes d'un système spatial

Un système de station spatiale est défini généralement par plusieurs blocs en interaction, appelés « segments » (figure 1). Le segment Vol (A) est constitué de l'infrastructure orbitale, de l'équipage et des moyens de communication. Le segment Sol (B) comprend l'ensemble des installations autorisant le suivi du segment A (centres de contrôle et de communication), les ressources de soutien logistique (structure industrielle) et les infrastructures des utilisateurs (installation de préparation des éléments au lancement et aux opérations). Finalement le segment Transport englobe tous les moyens (lanceurs, véhicules cargo, infrastructures de préparation de lancement et de retour) permettant l'acheminement depuis le segment B vers le segment A des résultats d'expériences et les ressources de soutien mais aussi le rapatriement dans l'autre sens des entités devenues inutilisées à bord.

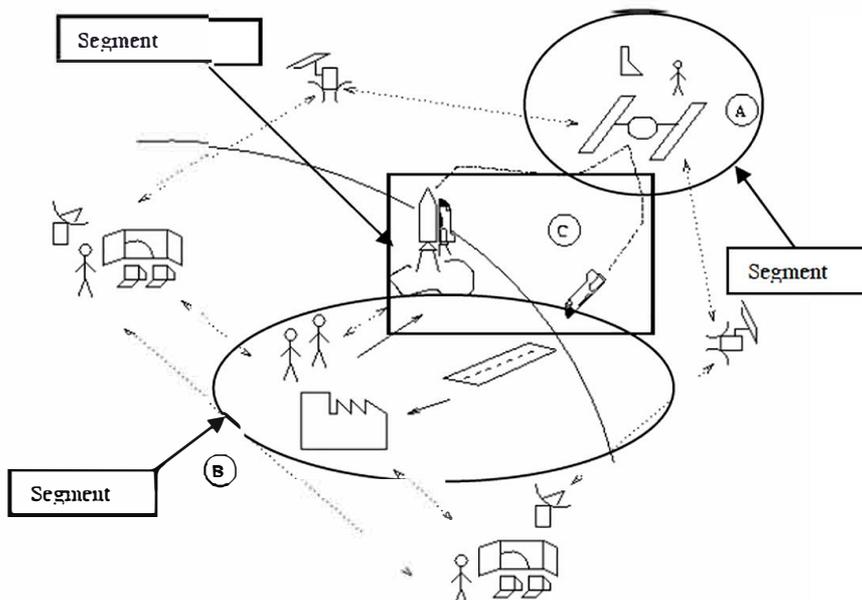


Figure 1. Composantes d'un système spatial

2.2. Spécificités du contexte spatial

Le contexte spatial se caractérise par certaines particularités rendant les systèmes complexes à développer mais aussi à gérer (Péres, 2002). Ces particularités concernent :

– *la demande de pièces de rechange*. On ne dispose que de peu d'informations sur la maintenance des systèmes spatiaux. Cela est dû principalement au caractère unique des systèmes développés. On procède alors à des analogies avec des systèmes similaires mais l'exercice est souvent délicat (Leath, 1993) ;

– *les stocks*. Le faible volume disponible à bord et les effets des radiations sur les matériels contraignent fortement le stockage en orbite. Au sol, les matériels peuvent être physiquement stockés chez l'exploitant, conservés chez les fabricants dans un dépôt centralisé, ou ventilés entre les deux ;

– *les éléments à approvisionner*. La nature et la quantité d'éléments à approvisionner sont influencées, d'une part, par les temps de développement et de fabrication souvent longs nécessitant des approvisionnements initiaux conséquents et, d'autre part, par le risque d'obsolescence induit par le faible volume et le coût élevé de production combinés avec la durée importante d'exploitation conduisant à des fermetures de ligne de la part des fournisseurs ;

– *les réparations*. A bord de la station, on préférera le remplacement à la réparation. Celle-ci pourra intervenir au sol et conduira le plus souvent à une remise à neuf du module défaillant. Selon (Kline, 1993), les coûts d'un élément réparé dans le cas du laboratoire SpaceLab se situent entre 70 et 75 % du coût d'un élément neuf, soit un gain de 25 à 30 % par rapport à l'achat d'un élément neuf ;

– *les transports*. La fréquence du transport est influencée par les besoins de la station et la capacité de chargement de la navette spatiale. Une contrainte forte réside dans l'impossibilité de modification du chargement de la navette 45 jours avant le départ ce qui nécessite de mettre en place des mécanismes de priorités (Leuttgens, 1998) ;

– *les tests*. Les dispositifs de télémessure combinés aux informations fournies par le personnel embarqué permettent de connaître à chaque instant l'état des systèmes de bord. Les défaillances des éléments actifs sont ainsi détectées très rapidement. Une incertitude demeure toutefois sur les redondances passives et les éléments en stock. On rajoutera également que l'intervention consistant à tester le système peut elle-même être à l'origine de défaillances. Il s'agit donc de trouver l'intervalle optimal d'inspection permettant de minimiser le risque de posséder un élément potentiellement défectueux.

2.3. Gestion des approvisionnements : état de l'art

2.3.1. Cas général

Un nombre relativement important de travaux a concerné directement la gestion des pièces de rechange. On trouvera un état de l'art assez complet dans (Kennedy, 2002). Les objectifs poursuivis sont souvent comparables et s'appliquent indifféremment à l'objet de la réparation ou à l'ensemble des ressources nécessaires pour effectuer cette opération. Les développements visent en particulier à optimiser le niveau de stock de pièces de rechange (Sleptchenko, 2005 ; Smidt-Destombes,

2005 ; Marseguerra, 2005 ; Vaughan, 2005 ; Kostas-Platon, 2004 ; Smidt-Destombes, 2004), augmenter la disponibilité du système maintenu (Sleptchenko, 2005 ; Smidt-Destombes, 2005 ; Smidt-Destombes, 2004 ; Wong, 2005 ; Rustenburg, 2001), minimiser les coûts de gestion ou de réapprovisionnement engendrés, maximiser le bénéfice sur le cycle de vie du système et de la structure qui le produit (Marseguerra, 2005 ; Rustenburg, 2001). Dans ce contexte particulier il est par exemple montré dans (Smidt-Destombes, 2005 ; Vaughan, 2005 ; Smidt-Destombes, 2004 ; Rustenburg, 2001 ; Sarker, 2000) l'importance de gérer simultanément les stratégies de maintenance et d'approvisionnement en pièces de rechange ; la prise en compte simultanée des contraintes imposées par les deux domaines donnant des résultats bien meilleurs que la considération séparée des paramètres induits par ces stratégies.

Les travaux présentés s'appuient sur des hypothèses diverses en fonction des systèmes modélisés. Certains développements considèrent par exemple des systèmes logistiques multiéchelons (Kalchschmidt, 2003), avec un ou plusieurs magasins de stockage (Wong, 2005), basés sur des réseaux possédant plusieurs structures possibles en termes de nombre de fournisseurs ou d'implantations géographiques (Huiskonen, 2001).

Les hypothèses faites sur l'élément de rechange lui-même sont également nombreuses. On prendra en compte sa criticité (par exemple dans le cas d'un problème possible d'obsolescence) (Kennedy, 2002), sa spécificité, sa valeur (Huiskonen, 2001), le temps nécessaire à son acheminement (Sarker, 2000), la distribution de la demande (Kostas-Platon, 2004 ; Kalchschmidt, 2003 ; Ghobbar, 2002 ; Huiskonen, 2001). La pièce de rechange pourra être réparable (Wong, 2005 ; Smidt-Destombes, 2004) ou bien être consommée (Rustenburg, 2001). Elle pourra aussi être affectée d'une priorité de réparation (Sleptchenko, 2005 ; Smidt-Destombes, 2005).

Les systèmes potentiellement défaillants sont souvent multicomposants (Marseguerra, 2005), endommagés par des phénomènes d'usure (Smidt-Destombes, 2005), remplacés après casse, en fonction de l'âge (Kennedy, 2002) ou périodiquement (Chelbi, 2001). On suppose le plus souvent connue la distribution de leur durée de vie (Chelbi, 2001) et le temps de réparation requis en cas de problème (Sarker, 2000).

Les actions entreprises pour reconstituer un stock de pièces de rechange dépendent du budget alloué aux éléments de rechange (Rustenburg, 2001). Ce sont soit des actions de rechargement de stock soit des approvisionnements périodiques basés sur des modes de gestion type MRP (Ghobbar, 2004 ; Ghobbar 2002).

Les développements scientifiques présentés mettent en jeu différents outils pour modéliser les systèmes, évaluer leurs caractéristiques et optimiser leurs performances. On trouve indifféremment des travaux basés sur des modèles analytiques (Sleptchenko, 2005 ; Smidt-Destombes, 2005 ; Marseguerra, 2005)

utilisant des heuristiques de calcul, des algorithmes génétiques, des modèles probabilistes (Wong, 2005 ; Kostas-Platon, 2004) supportés par des outils comme les chaînes de Markov ou l'approche bayésienne, des modèles basés sur la simulation (Marseguerra, 2005 ; Sarker, 2000) assistés par la méthode de Monte-Carlo et les réseaux de Petri.

2.3.2. *Application au domaine spatial*

Les domaines concernés par ces investigations impliquent le plus souvent des systèmes complexes dans des industries diverses comme par exemple l'aéronautique (Ghobbar, 2004 ; Ghobbar 2002), la défense navale (Rustenburger, 2001), l'électronique (Kostas-Platon, 2004) ou les industries manufacturières au sens large du terme (Kalchschmidt, 2003). Ces nombreux travaux traitant de la gestion des approvisionnements en éléments de rechange, dans des cadres industriels très variés, attestent de l'actualité du sujet (Guide, 1997). Nous proposons à la suite une revue des modèles ayant été proposés pour sélectionner et gérer les modes d'approvisionnement des éléments de rechange dans le cadre des vols spatiaux habités.

La demande de remplacement devant être considérée dans les modèles provient de défaillances, d'échéances de maintenance préventive et de mises au rebut. La plupart des modèles ne considèrent toutefois que les défaillances comme source de la demande d'éléments de rechange (Bartsev, 2000). La défaillance est toujours de type cataleptique et la dérive de performance n'est pas prise en compte. L'hypothèse généralement employée est que le taux d'occurrence des défaillances est constant, ce qui simplifie la résolution analytique du problème, le nombre de demandes suivant alors un processus de Poisson. Dans le cas général, le processus de renouvellement est cependant plus compliqué à établir (Pérès, 1996). Sephery-Fard ainsi que Knezevic discutent des problèmes liés à l'applicabilité de ce choix (Sephery-Fard, 1995b ; 1995a ; 1995c ; Knezevic 1995b). On observe alors que c'est la loi de Weibull qui est préférée bien que, paradoxalement, l'absence de données nécessaires à l'utilisation de cette loi conduise souvent à revenir à une loi exponentielle. La demande moyenne pour un élément peut également varier sur l'horizon considéré. On lui attribue généralement un taux d'utilisation (en anglais : *duty-cycle*) (Bream, 1993). La reconnaissance des demandes préventives est généralement absente des modèles analytiques. En conséquence, ces demandes doivent être parfois prises en compte en dehors du modèle (Erno, 1979). On peut effectuer le même constat concernant les mises au rebut. Alors que l'on peut observer que le traitement analytique de ces demandes est délicat, les modèles basés sur la simulation emploient non seulement la maintenance préventive, mais permettent également le report de remplacements préventifs pour le cas où une défaillance serait survenue avant l'échéance (Nyen, 1991). Plusieurs modèles considèrent un taux de mise au rebut pour cause de mauvaise maintenance (Bream, 1993 ; DeJulio, 1988b ; McCauley, 1997). Les défaillances d'éléments en attente ne semblent toutefois pas abordées.

Le stockage des éléments de rechange est, dans le cas le plus simple, considéré uniquement sur un échelon. Souvent, il s'agit implicitement du stock en orbite. Bien que la plupart des auteurs discutent des contraintes de stockage, peu de modèles les mettent en œuvre. (Schwaab, 1991 ; Knezevic, 1995a) s'intéressent au calcul de l'étendue et de la quantité des éléments devant être stockés en orbite. Tous deux proposent une formulation mathématique de type sac à dos sous contraintes diverses (volume, masse). Le modèle de Schwaab est un cas particulier du modèle plus général de Kline et Sherbrooke (Kline, 1991). Dans leur modèle, les auteurs prennent en compte une structure multiéchelon (sol, orbite) et tiennent compte de la nomenclature du stock. La plupart des modèles considèrent que l'élément en stock est du même niveau de nomenclature que l'élément défaillant. La résolution est cependant nettement plus difficile lorsque sont considérés les divers échelons et niveaux de nomenclature. On observe donc sans surprise la prédominance des modèles basés sur la simulation.

L'approvisionnement le plus simple consiste à considérer que les éléments ne sont pas réparables. Dans ce cas, les éléments sont remplacés à la prochaine opportunité et on dispose des éléments défaillants. Ce remplacement s'effectue à l'identique dans la majorité des cas. Citons le modèle de (Bream, 1993) qui tiendrait compte d'améliorations du système par les éléments de rechange mais ne semble pas l'utiliser explicitement. La durée de remplacement de l'élément défaillant en orbite est souvent négligée (Kline, 1993 ; Sherbrooke, 1992 ; Erno, 1979). Dans quelques modèles, ce remplacement s'effectue à durée constante ou selon une distribution exponentielle. La prise en compte des retours en réparation est plus délicate. Sherbrooke et Kline proposent dans (Kline, 1991) et (Sherbrooke, 1992) une formulation analytique basée sur le modèle METRIC qu'ils proposèrent initialement en 1968. On constate que les modèles basés sur la simulation prennent généralement en compte la chaîne de réparation. Les éléments défaillants sont considérés toujours réparables ou soumis à des mises au rebut, celles-ci étant alors représentées par une probabilité. Notons que la demande de remplacement est toujours différée. Le traitement des demandes peut être d'égale importance (le cas le plus courant), ou soumis à une discipline de file d'attente. DeJulio (1988a) et Knezevic (1995a) considèrent des classes de criticité. Le modèle de simulation logistique (LSM, pour logistics simulation model) actuellement employé par l'Agence Spatiale Européenne, introduit une notion similaire basée sur une valeur de priorité au chargement (Nyen, 1991). Le chargement est révisable si la situation le permet. La capacité de réparation est le plus souvent jugée illimitée dans la plupart des modèles. Par conséquent, les disciplines classiques des problèmes de files d'attente ne sont pas explicitement considérées. On peut citer les travaux de (Bullington *et al.*, 1995) qui visent à déterminer des priorités de réparation pour les éléments de la navette spatiale. Lorsque l'approvisionnement ne permet pas de répondre immédiatement à la demande, on considère parfois la cannibalisation d'éléments en service pour servir d'éléments de remplacement dans un système dont la mission est plus importante. Sherbrooke (1992) et Shishko (1990) prennent en compte cette possibilité. Les cannibalisations donnent de bons résultats en termes de performance si elles ne sont

pas envisagées au départ comme politique. En revanche, si elles sont prévues mais pas mises en œuvre, la performance du système est dégradée. Dans un même esprit, il est possible d'utiliser des éléments non initialement destinés à l'élément considéré. Le partage d'éléments de rechange est également pris en compte par (Sherbrooke, 1992 ; Kline, 1993).

Le transport est particulier dans le cas d'une station orbitale puisqu'il n'est pas continu et s'effectue à des instants précis, périodiques. Quelques auteurs, notamment (Knezevic 1995b ; Schwaab 1991) simplifient le problème en ne considérant que l'évolution en orbite. Tous deux passent l'intervalle entre ravitaillements comme variable du problème. Dans les autres cas, le schéma d'approvisionnement prend toujours en compte la périodicité du transport. Cette périodicité peut être déterministe ou sujette à des fluctuations statistiques. Les modèles actuellement utilisés par l'ESA (Agence Spatiale Européenne) (Nyen, 1991 ; Passaro, 1999) et la NASA (Constanzi, 1996) permettent tous deux de prendre en compte des limites de chargement à la fois temporelles et de capacités. Les modèles considèrent le plus souvent que les éléments de rechange transportés ne sont pas dégradés par le transport.

Le modèle utilisé par l'ESA tient cependant compte d'un nombre de cycles maximum avant mise au rebut. La durée de vol peut être considérée comme un événement ponctuel ou être représentée par une durée constante. Les éléments approvisionnés servent généralement immédiatement ou complètent le stock orbite.

2.3.3. *Synthèse bibliographique*

La gestion des approvisionnements des éléments de rechange dans un contexte spatial a conduit à l'établissement d'un certain nombre de modèles. Beaucoup d'entre eux sont basés sur la simulation. L'aspect ponctuel des programmes spatiaux associé au paradigme classique dans le secteur industriel spatial qui privilégie une politique statique donc une logique de stock font que l'évaluation de différentes politiques est relativement limitée. Une inadéquation entre la demande et l'offre en termes d'aide au choix de politiques d'approvisionnement en éléments de rechange apparaît.

Plusieurs raisons peuvent expliquer cette insuffisance des méthodes censées aider la prise de décisions d'investissements en éléments de rechange dans les systèmes spatiaux. Nous les décrivons dans (Grenouilleau, 1999) et montrons que les décideurs optent pour des modèles très simplifiés ou développent de nouveaux modèles jugeant l'état de l'art insuffisamment représentatif de leurs problématiques.

Le travail présenté ici suit cette logique. Il vise le développement d'une démarche aux objectifs plus larges que ceux suivis par les modèles que nous avons cités. La restructuration du problème d'aide à la décision fait apparaître un problème de maîtrise des risques technico-économiques liés aux approvisionnements. Ce papier décrit la première étape d'un travail conduisant de l'établissement d'un

modèle de recommandation d'approvisionnement initial à une évaluation de la politique d'approvisionnement en phase d'exploitation.

3. Evaluation de l'approvisionnement initial

3.1. Risques liés à l'approvisionnement initial

L'approvisionnement initial concerne la détermination et la mise en place des éléments de rechange en quantité suffisante pour couvrir les besoins de la période d'exploitation initiale du système.

Plusieurs raisons conduisent à acheter les éléments de rechange en même temps que le démarrage de la phase de production du système principal. Citons en particulier :

- les durées de fabrication de certains éléments pouvant nécessiter de démarrer la fabrication des éléments de rechange suffisamment à l'avance ;
- l'indisponibilité commerciale de certains éléments avant même la mise en service du système ;
- l'indisponibilité de la compétence de l'industriel et de son appareil de production dans le cas de très petites séries ;
- les économies d'échelles permises par la fabrication simultanée des éléments du système et des éléments de rechange.

Face à ces excellentes raisons d'acquérir les éléments de rechange en amont de l'exploitation, de grandes incertitudes subsistent quant au nombre de défaillances ainsi qu'à leur instant d'occurrence. La présence de ces incertitudes rend le dimensionnement difficile. On conçoit donc qu'un risque existe dont la conséquence majeure soit le report de tâches de maintenance. Nous retenons ceci comme Événement Non Souhaité. Lors des approvisionnements initiaux, le choix porte également sur l'étendue des éléments (lesquels choisir ?) au travers de la quantité approvisionnée. Dans le cadre de ce travail, l'approvisionnement en lui-même est considéré non défaillant : les éléments commandés sont livrés avec certitude, sans défaut et en temps voulu.

Selon Desroches (1995) : « Le risque est la concrétisation d'un événement ε , associé à la perception d'une situation dangereuse, défini par le couple (p, g) où p est la probabilité ou la vraisemblance de l'occurrence de l'événement ε et g est la gravité des conséquences ou dommages consécutifs à la réalisation de l'événement ε . »

Considérons un système comportant n éléments remplaçables. Soit X_i , une variable entière représentant la quantité approvisionnée pour un élément E_i de ce système et prenant ses valeurs dans $[0, 1, \dots, S_{\max}]$ où S_{\max} est la quantité maximale raisonnablement envisagée. Notons \mathbb{X}_i l'événement non souhaité, et correspondant donc à une quantité approvisionnée insuffisante. Nous considérons la période

d'approvisionnement initial et nous proposons d'écrire le risque lié au report d'une tâche de maintenance lorsqu'un approvisionnement X_i a été réalisé par :

$$R(\mathbf{X}_i) = \Pr(\mathbf{X}_i) \cdot \text{Gr}(\mathbf{X}_i) \quad [1]$$

où $R(\mathbf{X}_i)$ est le niveau de risque moyen associé à l'approvisionnement d'une quantité (insuffisante) X_i d'éléments de rechange pour l'élément i ; $\Pr(\mathbf{X}_i)$ représente la probabilité d'occurrence de l'événement non souhaité et dépend de X_i , $\text{Gr}(\mathbf{X}_i)$ représente la gravité des conséquences de la réalisation de l'événement non souhaité. La métrique retenue qui consiste à multiplier probabilité et gravité est la plus souvent retenue dans les travaux scientifiques et sur le terrain industriel. D'autres métriques basées sur des logiques additives, de pondération ou selon des schémas hybrides auraient pu être retenues. Nous renvoyons pour cela le lecteur vers (Gouriveau, 2003) mais nous ne considérons pas ces autres formes d'association dans ce travail.

Si nous considérons maintenant un approvisionnement initial possible k concernant l'ensemble des n éléments remplaçables du système, on obtient un vecteur d'état, qui s'écrit $X_k = [X_{k,1}, X_{k,2}, \dots, X_{k,n}]$ où $X_{k,i}$ représente la quantité approvisionnée pour l'élément i dans la recommandation k .

Nous considérons que le niveau de risque associé à l'approvisionnement des n éléments est la somme des risques individuels d'approvisionnement de chaque élément, hypothèse simplificatrice induisant la non-possibilité de non approvisionnement simultané de 2 éléments.

Cette hypothèse forte a pour conséquence de donner la borne supérieure du risque de non approvisionnement et permet donc de mieux se protéger face à cette éventualité.

$$R(\mathbf{X}_k) = \sum_{i=1}^n R(\mathbf{X}_{k_i}) \quad [2]$$

3.2. Probabilités de report d'une tâche de maintenance

S'agissant d'un approvisionnement initial nous n'intégrons pas la notion d'approvisionnement. La probabilité que l'élément soit en état de panne ne dépend alors que du stock disponible au sol. Sous les hypothèses précédentes, le processus de renouvellement forme un processus de Poisson de paramètre $\lambda_i \cdot T_i$. La probabilité que le report d'une tâche de maintenance survienne est alors simplement donnée par :

$$\Pr(\mathbf{X}_i) = \sum_{j=X_{i+1}}^{\infty} \exp^{-\lambda_i \cdot T_i} \cdot \frac{(\lambda_i \cdot T_i)^j}{j!} \quad [3]$$

où X_i est la quantité approvisionnée en stock pour l'élément E_i , λ_i est le taux de défaillance de l'élément E_i et T_i est l'horizon d'approvisionnement. Nous considérons que celui-ci est identique pour chaque élément. L'approximation de Poisson fournit une borne inférieure sur $\Pr(X_i)$. En effet, en tenant compte des délais d'approvisionnement, on observe logiquement :

- un nombre de renouvellements plus faible, l'élément devant attendre pour être remis de l'état de panne vers celui de marche ;
- une probabilité de séjour dans l'état de panne par conséquent plus importante.

3.3. Evaluation des conséquences d'un report

Considérons maintenant l'ensemble des fonctions $\{F_1, F_2, \dots, F_j\}$ assurées par le système précédent. La défaillance d'un élément affectant cet ensemble à divers degrés, on conçoit que la gravité du report de son remplacement soit directement liée à l'importance occupée par l'élément au sein du système.

Nous devons donc déterminer d'une part, une échelle indiquant l'impact des défaillances sur le système, puis, attribuer à chaque élément le niveau de gravité correspondant à l'impact qu'il induit sur le fonctionnement.

De manière générale, la gravité peut être définie comme étant la mesure de l'impact relatif des conséquences sur le système. Dans le cadre de ce travail, le critère retenu avec le décideur pour représenter cet impact est le niveau de dégradation de l'exploitation du système. Pour permettre de hiérarchiser les reports de tâches, nous faisons appel à une répartition par classes de gravité (cf. tableau 1). Cette répartition couvre une plage de conséquence allant de l'absence d'effet notable à l'incapacité de poursuite des opérations. Nous considérons que les conséquences économiques sont implicitement prises en compte dans le classement.

Classe	Intitulé	Description
1	Sans Effet	Absence d'effet notable
2	Mineure	Dégradation mineure des opérations
3	Majeure	Dégradation modérée des opérations
4	Critique	Dégradation importante des opérations
5	Catastrophique	Incapacité à poursuivre les opérations

Tableau 1. Classes de gravité

Nous considérons ici que les niveaux de gravité restent constants dans le temps. Il faut cependant remarquer que cette mesure des conséquences possède également

une dynamique : la conséquence d'une défaillance d'un élément, considérée comme catastrophique en début de mission, peut s'avérer mineure par la suite.

La seconde étape d'estimation de la gravité du report d'une tâche de maintenance nécessite de pouvoir associer la conséquence d'une défaillance à l'une des classes précédemment identifiées. Cela revient à déterminer la place occupée par l'élément au sein d'un système. Nous avons envisagé une approche qualitative, réalisée en groupe de travail, et qui part de la défaillance d'un élément du système pour attribuer l'un des niveaux de gravité prédéfinis. Nous avons développé à cet effet un arbre d'allocation d'un niveau de gravité (cf. figure 2).

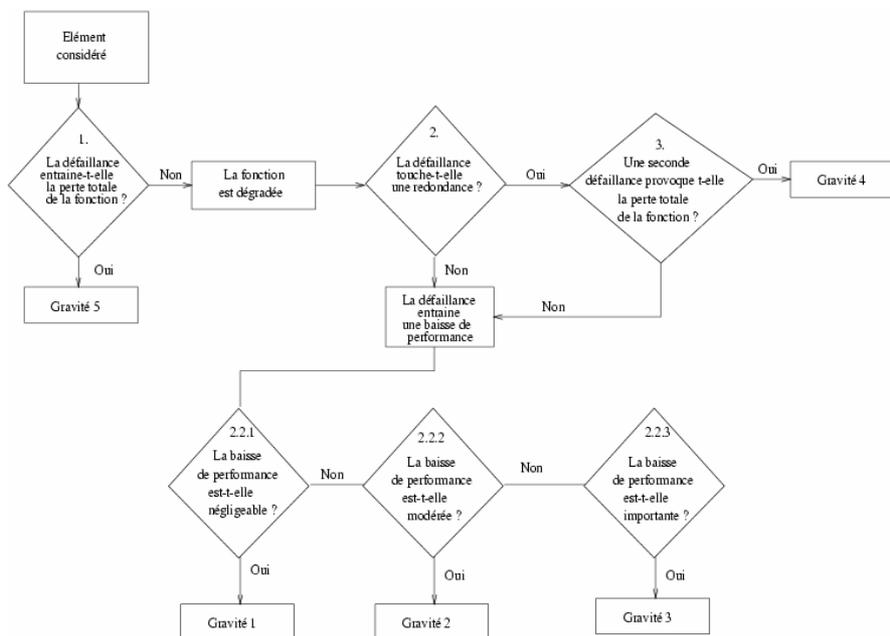


Figure 2. Arbre d'allocation d'un niveau de gravité

3.4. Traitement mathématique

3.4.1. Formulation du problème

Dès lors que probabilité et gravité associées au report d'une tâche de maintenance ont été évaluées, il est possible de quantifier le niveau de risque associé à une recommandation d'approvisionnement. Rappelons que nous jugeons raisonnable de considérer le risque associé à une recommandation portant sur n éléments comme la somme des risques individuels de chacun des éléments. On peut alors donner une formulation mathématique du problème de répartition du

budget disponible. Il s'agit d'un problème classique d'optimisation combinatoire, appartenant à la famille des problèmes dits du « Sac à dos » (Minoux, 1983 ; Kedad-Sidhoum, 1997). Nous notons P le problème à résoudre et écrivons :

$$(P) \begin{cases} \min. \sum_i R(x_i) \\ \sum_i C_i \cdot X_i \leq B \end{cases} \quad [4]$$

Nous avons détaillé au long de cette section la fonction de risque $R(x_i)$ où la seule variable prise en compte est la quantité approvisionnée X_i . La seule contrainte que nous prenons en compte est budgétaire, notée B. On peut bien sûr envisager ultérieurement des contraintes additionnelles telles que le volume ou la masse. C_i représente le coût de l'élément de rechange i et est supposé entier positif. Nous reprenons à notre compte la description du problème sous forme de graphe présentée dans (Minoux, 1983). On considère le graphe $G=[U,X]$ (cf. figure 3), dont l'ensemble des arcs U et des sommets X sont construits tels que :

- X est constitué d'un sommet initial I, d'un sommet final F et de $\sum_{i=1}^n i \cdot q_i$ sommets où n est le nombre d'éléments et q est la quantité maximale d'éléments de rechange pour X_i , notée $S_{i,max}$. A chaque sommet correspond un couple (K, i) où K est le budget nécessaire :
- U est constitué par l'ensemble des arcs entre les sommets et dont la longueur est donnée par $R(x_i)$.

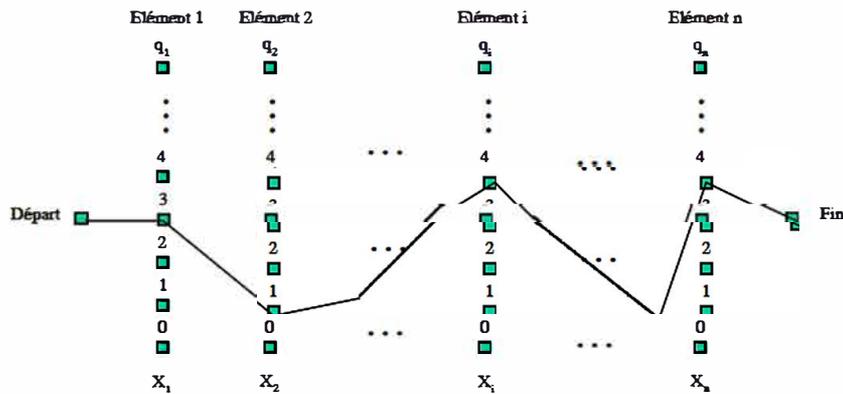


Figure 3. Graphe du risque associé à un approvisionnement

On observe que tout chemin entre le sommet initial et le sommet terminal forme une solution. On définit alors le vecteur suivant concernant une recommandation d'approvisionnement : $X_k = [X_{k1}, \dots, X_{ki}, \dots, X_{kn}]$. La longueur du chemin associé à cette solution est :

Le problème (P) consiste donc à identifier le plus court chemin dans le graphe G tout en respectant la contrainte B.

$$R(\mathbf{X}_k) = \sum_{i=1}^n R(\mathbf{X}_{k_i})$$

3.4.2. Résolution

La fonction objectif retenue, la fonction de risque $R(\mathbf{X}_k)$, est décomposable (elle est séparable et monotone décroissante) ce qui nous permet d'utiliser la programmation dynamique. Le théorème de Bellman indique en effet que dans de tels cas, chaque solution partielle faisant partie de la solution complète est une solution optimale du problème partiel.

L'idée générale est donc de réduire le problème précédent, possédant n variables, à une suite de problèmes plus simples. L'optimisation est ensuite menée de façon récurrente. Nous sommes capables de calculer la réduction de risque maximale que l'on peut espérer obtenir en allouant un budget K uniquement sur le premier élément considéré, noté $b_1(K)$:

$$b_1(K) = R(X_1) \quad \text{avec} \quad X_1 = \frac{K}{C_1} \quad [5]$$

Supposons que la réduction maximale de risque en considérant les i premiers éléments est connue. Posons que S_{\max} représente le stock maximal préalablement envisagé. Nous savons alors calculer, à partir de la relation de récurrence de la programmation dynamique, la réduction de risque maximale que l'on peut espérer en répartissant K sur les i+1 éléments :

$$b_{i+1}(K) = \min_{0 \leq X_{i+1} \leq \min\left(S, \frac{K}{C_{i+1}}\right)} \left(R(\mathbf{X}_{i+1}) + b_i(K - C_{i+1} \cdot X_{i+1}) \right) \quad [6]$$

Nous pouvons donc calculer $b_n(K)$ pour tout $K, 0 \leq K \leq B$ et donc connaître en particulier la recommandation optimale pour $K=B$. La méthode utilisée nécessite le stockage des valeurs intermédiaires lors de la détermination de la solution d'approvisionnement optimale. L'espace d'états du problème étant donné par les valeurs possibles du budget, on conçoit que la complexité du calcul et l'encombrement en mémoire soient directement fonction de la cardinalité de cet espace. En pratique, le nombre d'états possibles pour K dépend des valeurs de coûts C_i .

Pour le problème que nous traitons dans ce travail (approvisionnement d'environ 70 éléments dont les coûts s'étendent de quelques milliers à quelques millions d'euros, pouvant accepter jusqu'à 5 éléments de rechange) nous avons limité artificiellement ce nombre de classes pour que les temps de résolution restent raisonnables et que nous puissions obtenir une solution optimale servant de base aux discussions. Il est nécessaire d'être vigilant et d'établir un compromis entre le nombre de classes de coûts nécessaires et la durée des calculs.

4. Application au laboratoire Columbus

4.1. Description de Columbus

La station spatiale, située à 400 km de la terre et financée par 15 pays, est considérée comme le plus ambitieux projet technologique jamais entrepris par l'homme. EADS SPACE Transportation est responsable, pour le compte de l'ESA (Agence spatiale européenne), du développement et de l'intégration du système complet Columbus.

A la pointe de la technologie, ce laboratoire européen permettra de mener pendant 10 ans les recherches les plus sophistiquées. Ce conteneur cylindrique de la taille d'un petit autobus doit être amarré à la station à partir de 2006.

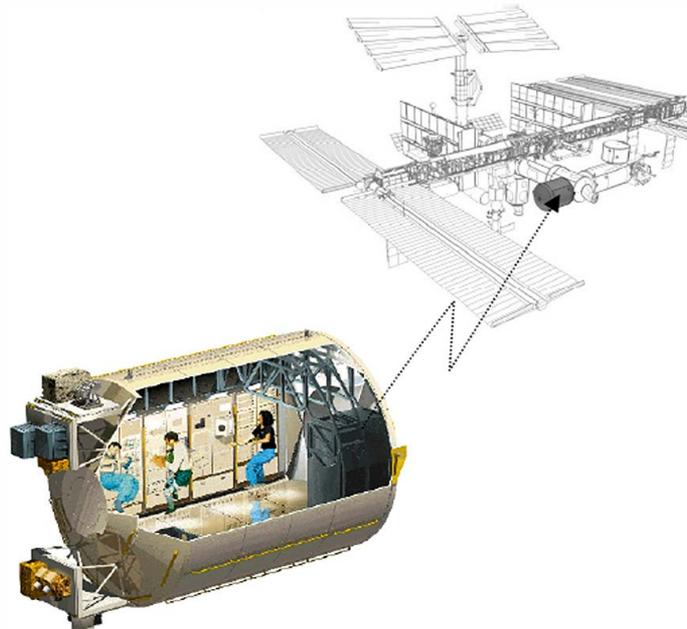


Figure 4. La station spatiale internationale et le laboratoire Columbus

L'intérieur est équipé de 10 bâtis (*racks*) interchangeables et totalement indépendants, pouvant abriter chacun 700 kg de matériel et d'équipement scientifique. Sa configuration est modulable et s'adapte aux différents utilisateurs. Environ 500 expériences par an pourront ainsi être effectuées à bord de ce laboratoire polyvalent dans des domaines tels que les sciences des matériaux, la médecine ou la biologie.

L'objectif de disponibilité moyenne des fonctions du laboratoire est différent selon qu'il s'agisse de fonctions assurant la sécurité (99,9 % de 90 jours pendant 10 ans) ou l'exploitation (94 % de 90 jours pendant 10 ans). La tenue de cet objectif s'appuie sur des activités de maintenance et le laboratoire comporte à cet effet près de 300 éléments remplaçables, formant 65 types différents. Seuls 15 % de ces éléments sont soumis à de la maintenance préventive, mettant en avant le rôle du système de soutien logistique. Le budget disponible pour réaliser l'approvisionnement est très limité : environ 20 MEuros sont disponibles pour l'approvisionnement initial et 45 MEuros supplémentaires doivent permettre de couvrir les besoins sur l'ensemble de la phase d'exploitation.

4.2. Mise en œuvre du modèle

4.2.1. Constitution du jeu de données

De façon à mettre en œuvre le modèle, nous devons tout d'abord déterminer les données de base pour chaque élément E_i du laboratoire. Nous avons retenu l'approximation de ravitaillements immédiats et nous utilisons l'équation [3] comme base de calcul de la probabilité d'indisponibilité d'un élément. L'analyse s'effectuant durant la phase de conception préliminaire, la disponibilité et la fiabilité des données ne sont pas encore assurées.

La disponibilité des données est un problème récurrent lors de la réalisation des Analyses de Soutien Logistique. Cependant, la méthode que nous proposons s'appuie sur une comparaison entre la proposition industrielle et les préférences exprimées par l'exploitant. Cette comparaison s'effectue sur des bases communes : l'optimisation indique, à budget égal et pour les mêmes éléments, la répartition minimisant les risques liés aux demandes différées. De plus, la méthode proposée n'a pas l'ambition de proposer directement une recommandation applicable mais identifie les divergences par rapport aux préférences de l'exploitant qui doivent être approfondies. Malgré ces limitations quant aux données, la méthode fournit donc une perspective intéressante sur la préparation des négociations.

4.2.2. Résolution

Les données de base étant disponibles, le modèle peut être mis en œuvre dans le but de définir, sous contrainte budgétaire, la nature et la quantité d'éléments de rechange nécessaires permettant de réduire le risque de report d'une tâche de maintenance.

Prenons un exemple volontairement limité permettant de bien comprendre le fonctionnement de la répartition optimale du budget disponible. Nous considérons pour cela les deux premiers éléments de la base de données et un budget disponible de 300 kEuros. La résolution de 1 permet de calculer le risque associé à chaque niveau de stock (cf. tableau 2). Le coût de chaque élément indique que le stock maximum ne peut excéder la valeur 2.

X_i	Elément 1	Elément 2
0	$2,64.10^{-2}$	$4,34.10^{-2}$
1	$3,51.10^{-4}$	$9,58.10^{-4}$
2	$3,12.10^{-6}$	$1,41.10^{-5}$

Tableau 2. Valeurs de X_i

Nous pouvons ensuite déterminer le risque minimum si nous ne considérons l'achat que d'élément du premier type. Il est évident que cela correspond à l'achat du maximum d'éléments permis par le budget, soit $X_1 = 2$:

$$b_1(300) = \min \begin{cases} R(X_1) = 0 \\ R(X_1) = 1 \\ R(X_1) = 2 \end{cases}$$

Si nous considérons maintenant le risque minimum en permettant également l'achat d'élément du second type, nous pouvons écrire :

$$b_2(300) = \min \begin{cases} R(X_2) = 0 + b_1(300) \\ R(X_2) = 1 + b_1(300 - C_2) \\ R(X_2) = 2 + b_1(300 - 2.C_2) \end{cases}$$

La répartition donnant le risque minimum est donc choisie en comparant les résultats (cf. tableau 3). Dans ce cas, on choisit d'acheter 1 élément de chaque type pour un budget de 269 kEuros. La résolution du cas complet, où nous considérons tous les éléments de la base de données, se fait selon les mêmes principes. Nous prenons comme contrainte le budget proposé dans la recommandation des industriels. Le niveau de risque est obtenu de la façon indiquée plus haut, le coût est calculé simplement en multipliant la quantité recommandée par son coût d'achat unitaire. Le calcul des valeurs de risques a mis en évidence une nette réduction de risque ($12 \Rightarrow 7$) pour une même enveloppe budgétaire initiale (approximativement 13 MEuros) en adoptant la recommandation optimisée. La comparaison entre les propositions permet de diriger les négociations vers les zones de divergences. Certains éléments se voient attribuer un élément de rechange supplémentaire dans la recommandation optimisée. Nous pouvons vraisemblablement expliquer cette différence par le fait que les industriels considèrent les éléments réparables au sol, à la différence de l'approximation faite par notre modèle. Notons également que la recommandation optimisée considère l'approvisionnement de quelques éléments de

plus que les industriels, les rendant visiblement importants et indiquant une divergence très nette. Ces éléments de réponse conduisent à vérifier les niveaux de gravité utilisés et à discuter avec les industriels pour comprendre pourquoi des divergences existent. Ceci conduira à une augmentation de la cohérence des préférences du décideur.

K	b1 (K)	x1	b2 (K)	x2
0	R(X1=0)	0	R(X1=0)+ R(X2=0)	0
.
132	.	.	R(X1=0)+ R(X2=0)	1
137	R(X1=0)	1	R(X1=0)+ R(X2=0)	.
.
264	.	.	R(X1=0)+ R(X2=0)	2
269	.	.	R(X1=0)+ R(X2=0)	1
274	R(X1=0)	2	R(X1=0)+ R(X2=0)	0
.
300

Tableau 3. Identification de la répartition optimale sur un exemple

5. Conclusion

Il est clair que de nombreuses analyses restent encore à réaliser en support de l'approvisionnement initial afin de construire la compétence désirée. En particulier, nous pouvons voir qu'il y a eu une réduction effective du niveau de risque. Cependant, le niveau de risque résiduel n'est pas forcément acceptable pour autant. La démarche de réduction des risques que nous avons utilisée, « Aussi Bas que Possible » (pour *As Low As Reasonably Possible, ALARP*), contient les éléments d'une réponse : sous une contrainte de budget, le risque minimum est proche de celui indiqué par notre recommandation. Réduire le niveau de risques résiduels nécessite, à notre niveau, une augmentation du budget. La méthode que nous avons proposée a eu plusieurs mérites pratiques : mise en exergue des problèmes de disponibilité, de validité et de cohérence des données, apprentissage, obtention d'une référence raisonnable. L'amélioration de ces résultats encourageants passe selon nous par l'obtention de l'ensemble des

données, l'intégration du ravitaillement périodique et des réparations, ainsi que par une meilleure appréciation de la gravité. Ce sont des développements que nous envisageons comme suite logique de ce travail.

6. Bibliographie

- Bartsev S. I., Mezhevikin V. V., Okhonin V. A., "Evaluation of optimal configuration of hybrid Life Support System for space", *Advances in Space Research*, vol. 26, issue 2, 2000, p. 323-326.
- Bream B., Renew v3.2 user's manual, maintenance estimation simulation for space station freedom program, Technical report NASA Lewis Research Center, 1993.
- Bullington J., VWinkler J., CLinton D., GKhajenoori S., "A probabilistic tool that aids logistics engineers in the establishment of high confidence repair need- dates at the NASA shuttle logistics depot", *6th Space logistics Symposium*, 1995, p. 46-53.
- Chelbi A., Daoud A.-K., "Spare provisioning strategy for preventively replaced systems subjected to random failure", *International Journal of Production Economics*, vol. 74, issues 1-3, 2001, p. 183-189.
- Constanzi B., SLAM II method for spares modelling, Technical report, NASA, 1996.
- Dejulio E., Furlong K., "A simulation program for the analysis of on-orbit space station maintenance and logistics operations", *2nd Space Logistics Symposium*, 1988.
- Dejulio E., Leet J., "Space station synergetic RAM-logistics analysis", *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1988.
- Desroches A., *Concepts et Méthodes Probabilistes de Base de la sécurité*, Tec & Doc Lavoisier, 1995.
- Erno, Spacelab supply support plan, Technical report, ERNO, 1979.
- Ghobbar Adel A., Friend Chris H., "The material requirements planning system for aircraft maintenance and inventory control: a note", *Journal of Air Transport Management*, vol. 10, issue 3, 2004, p. 217-221.
- Ghobbar A. A., Friend C. H., "Sources of intermittent demand for aircraft spare parts within airline operations", *Journal of Air Transport Management*, vol. 8, issue 4, 2002, p. 221-231.
- Gouriveau R., Analyse des risques – Formalisation des connaissances et structuration des données pour l'intégration des outils d'étude et de décision, PhD Thesis, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 2003.
- Grenouilleau J.-C., Modélisation de Politiques d'Approvisionnement en Eléments de Rechange pour le Laboratoire Orbital Columbus, PhD Thesis, Ecole Centrale Paris, 1999.
- Guide V., Srivastava R., "Repairable inventory theory: Models and applications", *European Journal of Operational Research*, vol. 102, 1997, p. 1-20.
- Huiskonen J., "Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices", *International Journal of Production Economics*, vol. 71, issues 1-3, 6, 2001, p. 125-133

- Kalchschmidt M., Zotteri G., and Verganti R., "Inventory management in a multi-echelon spare parts supply chain", *International Journal of Production Economics*, vol. 81-82, 2003, p. 397-413.
- Kedad-Sidhoum S., Résolution de problèmes de partitionnement généralisé par des méthodes d'optimisation globale à base de déplacements stochastiques: application à l'ordonnancement de machines parallèles, PhD Thesis, Laboratoire Productique Logistique, Ecole Centrale Paris, 1997.
- Kennedy W. J., Wayne Patterson J., Fredendall Lawrence D., "An overview of recent literature on spare parts inventories", *International Journal of Production Economics*, vol. 76, issue 2, 21, 2002, p. 201-215.
- Kline R., Sherbrooke C., "Inventory based upon system availability: For the space station freedom", *4th Space Logistics symposium*, 1991, p. 353-361.
- Kline R., Sherbrooke C., Estimating spares requirements for space station freedom, using the m-spare model, Technical report, Logistics Management Institute, 1993.
- Knezevic J., "Mission success driven space system sparing analysis", *6th Space Logistics Symposium*, January 22-24, 1995.
- Knezevic J., Reliability-driven space logistics demand analysis, *6th Space Logistics Symposium*, January 22-24, 1995.
- Kostas-Platon A., Magou I., Dekker R., Tagaras G., "Inventory control of spare parts using a Bayesian approach: A case study", *European Journal of Operational Research*, vol. 154, issue 3, 1, 2004, p. 730-739.
- Leath K., "A comparison of space station utilization and operations planning to historical experience", *IAF'93. International Astronautics Federation*, 1993.
- Leuttgens R., Volp J., Operations planning for the international space station, *ESA Bulletin*, vol. 94, 1998, p. 57-63.
- Marseguerra Marzio, Zio E., Podofilini L., "Multiobjective spare part allocation by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 87, issue 3, 2005, p 325-335.
- McCauley A., Ressource and maintenance analysis tool RMAAT overview, Technical report, NASA, 1997.
- Minoux M., *Programmation Mathématique, Théorie et Algorithmes*, Tomes 1 et 2, Dunod, 1983.
- Nyen P., Digernes T., "Colombus logistics simulation model", *4th Space Logistics Symposium*, 1991, p. 362-369.
- Passaro R. *et al.*, Columbus spares and support equipment provisioning documentation, Technical report, Alenia Aerospazio, Divisione Spazio, 1999.
- Pérès F., Outils d'analyse de performance pour stratégies de maintenance dans les systèmes de production, PhD Thesis, Université Bordeaux I, 1996.
- Pérès F., Grenouilleau J.-C., Perron S., « Modélisation du soutien logistique, Application à la gestion des pièces de rechange d'un système spatial », *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Hermès, vol. 36, n° 2, 2002, p. 299-325.

- Rustenburg W. D., van Houtum G. J., Zijm W. H. M., "Spare parts management at complex technology-based organizations: An agenda for research", *International Journal of Production Economics*, vol. 71, issues 1-3, 6, 2001, p. 177-193.
- Sarker Ruhul and Amanul Haque, "Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation", *Applied Mathematical Modelling*, vol. 24, issue 10, 2000, p. 751-760.
- Schwaab D., "Optimal selection of orbital replacement unit on-orbit spares: A space station system availability model", *4th Space Logistics Symposium*, 1991, p. 494-500.
- Sepehry-Fard M., Coulthard M., "ILS analysis of the ISSA, background and summary of the mathematical modelling & failure density distributions pertaining to maintenance time-dependent parameters", *6th Space Logistics Symposium*, 1995.
- Sepehry-Fard M., Coulthard M., "Application of different statistical techniques in ILS of the ISS alpha", *6th Space Logistics Symposium*, January 22-24, 1995.
- Sepehry-Fard M., Coulthard M., "ILS analysis of the ISSA, an overview of the maintenance time-dependent parameters prediction methods enhancements", *6th Space Logistics Symposium*, January 22-24, 1995.
- Sherbrooke C., *Optimal Inventory Modeling of Systems, Multi-Echelon Techniques*, John Wiley & Sons, Inc via UMI Books on Demand, 1992.
- Sleptchenko A., van der Heijden M. C. and van Harten A., "Using repair priorities to reduce stock investment in spare part networks", *European Journal of Operational Research*, vol. 163, issue 3, 16, 2005, p. 733-750.
- Smidt-Destombes, Karin S., Matthieu C. van der Heijden and Aart van Harten, "On the interaction between maintenance, spare part inventories and repair capacity for a k-out-of-N system with wear-out", *European Journal of Operational Research*, 2005.
- Smidt-Destombes, Karin S., Matthieu C. van der Heijden and Aart van Harten, "On the availability of a k-out-of-N system given limited spares and repair capacity under a condition based maintenance strategy", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 83, issue 3, 1, 2004, p. 287-300.
- Vaughan Timothy S., "Failure replacement and preventive maintenance spare parts ordering policy", *European Journal of Operational Research*, vol. 161, issue 1, 16, 2005, p. 183-190.
- Wong H., van Houtum G.J., Cattrysse D. and Van Oudheusden D., "Multi-item spare parts systems with lateral transshipments and waiting time constraints", *European Journal of Operational Research*, 2005.