

L'utilisation et l'interaction entre différents modèles pour les analyses de disponibilité de systèmes de soutien complexes

The use and interaction of different models for availability analyses of complex support systems

CAHOREAU Paul

Thales

Limours

paul.cahoreau@thalesgroup.com

Résumé – Dans le cadre contrats en cours et à venir, Thales s'engage à contribuer au maintien voire à l'amélioration de la disponibilité globale du parc déployé ce qui représente plusieurs centaines de systèmes différents. Ce travail requiert une gestion efficace et optimisée de la chaîne logistique, englobant plusieurs facettes du processus, depuis la mise en place jusqu'à la maîtrise totale des opérations logistiques. Cet article vise à discuter de la complexité de cette tâche et propose une nouvelle méthode de modélisation plus performante et plus adaptable afin de renforcer l'analyse de la disponibilité de ces systèmes complexes. Cette méthode s'appuie sur l'utilisation de différents types de modèles interconnectés permettant une analyse plus complète et détaillée menant à l'atteinte des objectifs de disponibilité opérationnelle.

Mots clefs – *Disponibilité, Modélisation, Simulation, OPUS, Anylogic*

Abstract – As part of current and future support contracts, Thales is committed to maintaining and improving the overall availability of the deployed fleet, which represents several hundred different systems. This work requires efficient and optimized supply chain management, encompassing several facets of the process, from implementation to total control of logistics operations. This article aims to discuss the complexity of this task and suggest a new, more efficient and adaptable modeling method to improve the availability analysis of these complex systems. This method is based on the use of different types of interconnected models, enabling a more complete and detailed analysis leading to the achievement of availability objectives.

Keywords – *Availability, Modeling, Simulation, OPUS, Anylogic*

I. INTRODUCTION

Dans le domaine militaire, la disponibilité représente, au même titre que les autres performances, la plus-value opérationnelle des systèmes. Cette disponibilité des systèmes repose sur des exigences complexes qui intègrent une variété de facteurs, dont la disponibilité opérationnelle des sous-systèmes, le temps d'attente des pièces de rechange ou les coûts associés. La gestion de ces exigences complexes nécessite la capitalisation d'une quantité importante de données, avec des dizaines de sites de stockage, plusieurs centaines de systèmes différents, et des centaines de milliers d'articles à gérer. Les données dont il est question ont un niveau de maturité qui peut varier grandement en fonction du système et de sa position dans le cycle de vie. Ces défis exigent l'adoption d'une nouvelle méthode plus performante, plus flexible et moins limitante que les approches traditionnelles. Cette méthode doit être capable de gérer de manière optimale cette complexité, en combinant et en mettant plusieurs outils en interaction pour atteindre un niveau supérieur de performance et d'efficacité.

Avec l'utilisation de plusieurs types de modèles, l'objectif est de pouvoir représenter le comportement du système de soutien, définir le niveau de stock nécessaire à maintenir, évaluer la performance et simuler l'impact des changements sur le système. Cette méthode avancée offre plusieurs avantages, en particulier la possibilité d'obtenir des résultats en boucle courte grâce aux simulations qui nécessitent beaucoup moins de temps, évitant ainsi les boucles longues nécessaire à l'établissement d'un retour d'expérience prouvant ou non la conformité du système aux exigences de soutien.

Dans les sections suivantes, nous explorerons plus en profondeur ces éléments et analyserons comment les interactions entre les différents modèles permettent d'atteindre les objectifs de disponibilité de systèmes de soutien complexes.

33 Dans un premier temps, une approche classique à l'aide d'outils du commerce, tels que la suite OPUS, a été envisagée.
34 Cependant, cette méthode se heurte rapidement à certaines limites lorsque la complexité de l'ensemble augmente. Ces logiciels
35 ne sont pas conçus pour traiter des analyses de cette envergure et complexité. En effet, ils ne permettent pas de prendre en
36 compte des chaînes logistiques très complexes, impliquant plusieurs dizaines de lieux de stockage reliés par différents types de
37 transports. Par conséquent, il est nécessaire de répartir le calcul de disponibilité de l'ensemble du parc et sa chaîne logistique
38 sur plusieurs problèmes plus simples et donc plus facilement résolubles. Chaque système sera donc modélisé séparément puis
39 fera l'objet d'une consolidation globale.

40 De plus, une division en sous-ensembles de certains systèmes s'est avérée nécessaire, car un industriel est parfois
41 responsable d'un sous-ensemble spécifique alors que les exigences de disponibilité sont placées sur le système dans son
42 ensemble. Un objectif supplémentaire est donc de proposer des listes de pièces de rechange optimisées pour chaque sous-
43 ensemble de responsabilité Thales.

44 Une autre contrainte importante est liée à l'interaction avec d'autres fournisseurs auxquels des exigences sont déclinées. En
45 effet, Thales recueille des données d'entrée provenant de ses fournisseurs pour certains de ses sous-ensembles, et par
46 conséquent, n'a parfois pas de vision du système dans son ensemble. Il est donc essentiel de disposer d'un modèle pour chaque
47 sous-ensemble de responsabilité de Thales pour l'élaboration de listes de pièces de rechange et le calcul précis de la
48 disponibilité. Ensuite, l'utilisation d'un modèle par système permet de regrouper les sous-ensembles afin de vérifier le respect
49 de l'exigence de disponibilité du système complet. Enfin, un modèle global est nécessaire pour la gestion et l'analyse de la
50 chaîne logistique dans son ensemble.

51 En résumé, l'utilisation de trois modèles différents est nécessaire pour répondre aux contraintes imposées par la complexité
52 de la chaîne logistique et les interactions avec les fournisseurs. Ces modèles permettent de proposer des listes de pièces de
53 rechange optimisées, de calculer avec précision la disponibilité des sous-ensemble de responsabilité Thales, de garantir le
54 respect de la disponibilité globale des systèmes et de gérer efficacement l'ensemble de la chaîne logistique.

55 A. *Modèle sous-ensemble : une optimisation au plus proche du système*

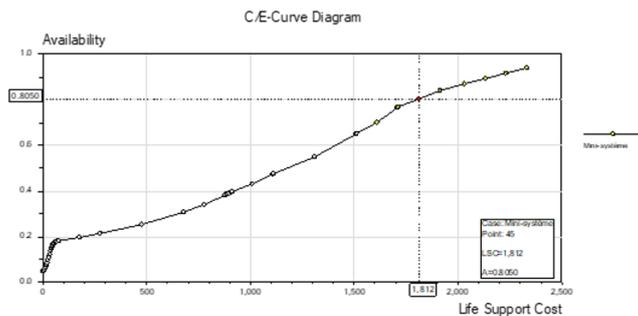
56 Lorsqu'un fournisseur est responsable d'un sous-ensemble, il détermine les niveaux de stocks requis en fonction des objectifs
57 assignés. Les modèles les plus détaillés sont créés à ce niveau, utilisant les logiciels OPUS10 et SIMLOX de la suite OPUS
58 pour préciser les niveaux de stock garantissant la disponibilité opérationnelle cible.
59 L'amélioration des performances au niveau des sous-ensembles implique d'adapter l'organisation tout en respectant les
60 contraintes de la chaîne logistique afin de répondre aux besoins opérationnels du client. Pour atteindre cet objectif, plusieurs
61 méthodes de modélisation peuvent être utilisées.

62 Dans un premier temps, l'utilisation de la suite OPUS offre une approche éprouvée pour évaluer les performances d'une
63 organisation logistique. Ces outils sont reconnus dans le domaine de la modélisation de disponibilité et peuvent aider à analyser
64 des sources d'indisponibilité pour proposer des solutions adaptées et améliorer les performances du système. Ils prennent en
65 compte des paramètres tels que la quantité de systèmes à soutenir, leur profil d'utilisation, l'arborescence logistique, la fiabilité
66 des composants, la stratégie de maintenance, et l'organisation du soutien avec les différents sites opérationnels, de stockage et
67 de réparation.

68 1) *OPUS10*

69 OPUS10 est le logiciel principal de la suite OPUS, où la majorité de la modélisation est réalisée. Son objectif est d'optimiser
70 l'équilibre entre le coût global de possession et les performances de disponibilité afin de proposer une liste de rechange la plus
71 adaptée au besoin. Cette analyse prend en compte l'architecture physique des systèmes, leur plan de maintenance et
72 l'organisation du soutien, qui inclut les différents niveaux de réparation ou encore les temps de transport. Les données
73 nécessaires à cette modélisation sont renseignées dans une base de données commune et pourront être réutilisées dans les autres
74 logiciels de la suite. Dans notre cas, l'organisation logistique renseignée dans OPUS10 est une version simplifiée de la réalité,
75 basée sur les données de sortie du modèle de la chaîne logistique.

76 Les résultats obtenus par OPUS10 se présentent sous la forme d'une courbe représentant un paramètre, généralement la
77 disponibilité, en fonction du coût total. Le coût inclut l'achat des articles à mettre en stock, ainsi que les coûts de transport et
78 de stockage par exemple. Chaque point de la courbe représente une liste optimisée des stocks permettant d'atteindre le meilleur
79 niveau de disponibilité au meilleur coût. En théorie, il n'est pas possible d'obtenir une disponibilité opérationnelle plus élevée
80 à un coût inférieur.
81



82 Afin d'illustrer les résultats donnés par OPUS10, prenons l'exemple de la courbe de résultats d'un système simple, affichée
 83 ci-dessus.

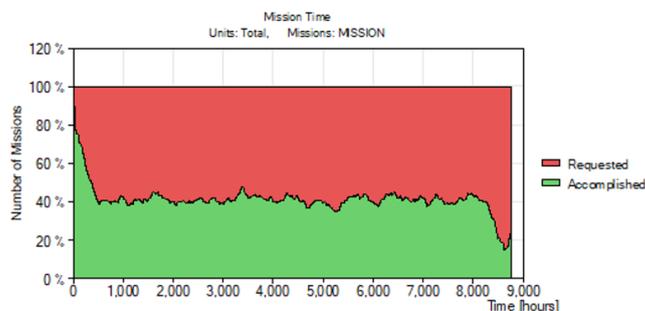
84 OPUS10 est un logiciel d'optimisation mathématique, ce qui signifie qu'il ne prend pas en compte les aspects dynamiques
 85 dans la résolution des problèmes. Il est le seul logiciel statique de la suite, ce qui signifie qu'il ne considère pas l'évolution des
 86 paramètres dans le temps. Par exemple, il ne prend pas en compte les temps de départ en mission ni les durées des missions
 87 individuelles, mais les moyennes sur une base annuelle. De même, il ne tient pas compte de l'aléatoire dans l'apparition des
 88 défaillances, mais considère des moyennes annuelles.

89 OPUS10 propose donc des listes optimisées de pièces de rechange mais, en raison de son caractère statique, peut manquer
 90 de précision dans le calcul de la disponibilité. C'est pourquoi il est recommandé de compléter cette première analyse avec un
 91 autre logiciel de la suite, SIMLOX, qui par son caractère dynamique permet de simuler et de mesurer de manière beaucoup
 92 plus fine la disponibilité opérationnelle.
 93

94 2) SIMLOX

95 SIMLOX est un outil permettant de simuler le fonctionnement d'un système au sein de son organisation logistique. Son objectif
 96 principal n'est pas de proposer des solutions, mais plutôt d'effectuer une analyse approfondie des solutions proposées par
 97 l'utilisateur ou générées par OPUS10. Ce logiciel utilise les données de la base de données commune, ce qui permet de créer
 98 une liste optimisée de pièces de rechange dans OPUS10 et de l'analyser plus en détail dans SIMLOX. Pour ce faire, il est
 99 nécessaire de compléter le modèle en renseignant des champs supplémentaires, tels que les profils d'utilisation et les temps de
 100 départ en mission, par exemple.

101 Une des particularités de SIMLOX réside dans sa capacité à prendre en compte l'aléa des défaillances ou des départs en
 102 missions. Il simule des milliers de scénarios différents et en extrait une moyenne de disponibilité, du nombre de ruptures de
 103 stocks, ou d'autres paramètres pertinents pour le projet. De plus, étant donné que SIMLOX simule la vie du système heure par
 104 heure ou jour par jour, il est possible de suivre l'évolution de la disponibilité opérationnelle au fil du temps.



105 Prenons comme exemple le graphique ci-dessus, qui représente en vert la proportion de missions effectivement réalisées par le
 106 système au fil du temps. Il est important de noter qu'il n'est pas possible de distinguer les temps de départ et de retour des
 107 missions sur ce graphique, car pour chaque scénario simulé, les missions sont réparties de manière aléatoire. Néanmoins, il est
 108 possible d'observer une disponibilité initialement élevée au début de la vie du système, suivie d'une dégradation significative
 109 vers la fin de la période analysée. Ces fluctuations sont dues à la variation des niveaux de stock au fil du temps. En début de
 110 vie, aucune pièce de rechange n'a encore été consommée, ce qui signifie qu'elles sont toutes disponibles. En revanche, vers la
 111 fin de la période analysée, les pièces les plus souvent utilisées ne sont plus disponibles car elles ont été consommées ou sont en
 112 cours de réparation, ce qui accroît le risque d'indisponibilité du système. Par conséquent, le taux de missions accomplies
 113 diminue fortement en fin de période.
 114

115 Les outils OPUS10 et SIMLOX permettent donc réaliser les modèles au niveau sous-ensemble pour optimiser les stocks en
 116 fonction des exigences du même niveau.
 117

118 B. Modèle système : une consolidation nécessaire de la disponibilité

119 La plupart des exigences de performance sont formulées au niveau des systèmes. Par conséquent, l'objectif de ces modèles
 120 est de consolider toutes les données des sous-systèmes et de la chaîne logistique afin de vérifier la conformité avec les exigences
 121 contractuelles. Ces modèles relativement simples, sont généralement créés sous Excel à l'aide de formules théoriques.

L'utilisation d'Excel est privilégiée par rapport à des outils plus spécialisés tels que OPUS10 et SIMLOX, car il est plus convivial, flexible et facile à utiliser en termes d'affichage des données. Il convient tout de même de noter quelques inconvénients de l'utilisation d'Excel par rapport à d'autres outils. Par exemple, il peut être plus difficile de prendre en compte certains paramètres tels que les redondances, et la création de listes de pièces de rechange peut prendre plus de temps. Cependant, ces aspects ne sont pas considérés comme problématiques dans ce contexte, car la précision des paramètres d'entrée ne permet pas une prise en compte approfondie des redondances ou d'autres paramètres. En effet, les données d'entrée de ces modèles proviennent soit des modèles sous-ensemble lorsque l'analyse à ce niveau est réalisée par Thales, soit directement des industriels qui fournissent les données nécessaires aux calculs. Dans ce cas, il arrive que certaines données concernant l'architecture du sous-ensemble notamment ses redondances soient manquantes. Ce modèle n'est donc pas créé dans l'objectif de proposer des listes de rechanges mais plutôt pour permettre de les évaluer et de les comparer aux exigences applicables au système.

Théoriquement, pour calculer la disponibilité opérationnelle asymptotique (A) d'un système, il convient d'utiliser la formule suivante qui s'appuie sur le MTBCF (Mean Time Between Critical Failures) et le MDT (Mean Down Time) :

$$A = \frac{MTBCF}{MTBCF + MDT} \quad (1)$$

Il est important de noter que la formule : $A = \prod_j a_j$ avec a_j la disponibilité opérationnelle du sous-ensemble j n'est vraie que si les sous-ensembles sont totalement indépendants. Elle ne sera pas utilisée dans ce contexte car cette hypothèse n'est pas vérifiée.

Le MTBCF de chaque sous-ensemble peut être récupéré par retour d'expérience sur les dernières années. Il peut aussi être fourni par l'industriel en fonction des analyses qu'il aura réalisées. Il est ensuite possible de calculer le MTBCF du système.

Le MDT de chaque sous-ensemble est calculé à partir de données provenant des fournisseurs et du modèle de chaîne logistique détaillé dans la partie C. Il est ensuite calculé à partir du MTTR (Mean Time To Repair) et du MIWT (Mean Item Waiting Time) comme suit :

$$MDT = MIWT + MTTR \quad (2)$$

Des temps supplémentaires peuvent être pris en compte tels que les temps administratifs ou les temps de déplacement des maintenanciers par exemple. Ces temps sont négligés ici par manque de données en entrée. Le MTTR est considéré comme une donnée d'entrée. Pour calculer le MIWT au niveau système, il faut calculer la moyenne des MIWT des sous-ensembles pondérée par leur λ_j (taux de défaillance du sous-ensemble j). Il est possible de calculer le MIWT d'un sous-ensemble avec la formule suivante qui dépend naturellement du temps de réapprovisionnement (TAT : Turn Around Time), du λ_j et du niveau de stock mis en place (S) :

$$MIWT_j = TAT \cdot \left(1 - \sum_{k=0}^{S-1} \frac{(\lambda \cdot TAT)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda_j \cdot TAT} \right) - \frac{S}{\lambda_j} \cdot \left(1 - \sum_{k=0}^S \frac{(\lambda \cdot TAT)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda_j \cdot TAT} \right) \quad (3)$$

Cette formulation peut être intégrée dans un fichier Excel avec la fonction suivante :

=TAT*(1-LOI.POISSON.N(S-1;λ*TAT;VRAI))-S*(1-LOI.POISSON.N(S;λ*TAT;VRAI))/λ

Une démonstration de cette formule est présente dans l'article [2].

Il peut aussi être utile de calculer la part d'indisponibilité liée à chaque sous-ensemble dans l'indisponibilité globale afin d'allouer plus précisément les exigences aux industriels sachant que l'indisponibilité liée au sous-ensemble j (I_j) dépend de la disponibilité du système global et des caractéristiques du sous-ensemble :

$$I_j = A \cdot \frac{MDT_j}{MTBCF_j} \quad (4)$$

Grace à ces formules, nous pouvons calculer la disponibilité d'un système et contribution de chaque sous ensemble à l'indisponibilité globale dans un simple fichier Excel à partir d'un nombre assez limité de données.

Le modèle système permet donc de consolider l'ensemble des résultats des sous-ensembles, qu'ils proviennent de la modélisation OPUS ou directement des données provenant des fournisseurs afin de valider la tenue des exigences de chaque système.

C. Modèle chaîne logistique : une visualisation globale pour une meilleure estimation des performances

En plus des modèles aux niveaux système et sous-ensemble permettant de valider les exigences de disponibilité locales, un modèle complexe est développé pour simuler l'ensemble de la chaîne logistique, prenant en compte tous les articles de ravitaillement. Ce modèle joue un rôle crucial en tant qu'outil d'aide à la décision, permettant d'évaluer les performances de la chaîne logistique et fournissant des indicateurs à différents niveaux, tels que les articles, les magasins et la chaîne logistique dans son ensemble. L'objectif principal, lors du déploiement de la chaîne logistique, est d'analyser les différentes logiques de fonctionnement. Cela permet de comparer quantitativement les différentes possibilités et de sélectionner les meilleurs

172 compromis entre coûts et performances. À plus long terme, l'objectif de ce type de modèle est de suivre l'impact des
173 changements sur les performances de la chaîne logistique et la conformité aux exigences contractuelles. Il sert d'outil d'aide à
174 la décision pour comparer des alternatives en termes de délais de transport, d'allocation des stocks, et bien d'autres aspects. De
175 plus, cet outil facilite l'analyse des risques en quantifiant les conséquences d'une pénurie de pièces de rechange pour certains
176 articles, d'une obsolescence ou d'un temps de réparation supérieur à celui prévu.

177 Pour la création de ce modèle, il est essentiel de choisir un outil de simulation hautement flexible capable de s'adapter aux
178 particularités de la chaîne logistique. C'est pourquoi le logiciel AnyLogic a été sélectionné pour la réalisation de ce modèle.
179 AnyLogic est un logiciel de modélisation spécialisé dans la simulation, combinant un langage de modélisation graphique, du
180 code Java et une interface à la fois conviviale pour l'utilisateur et le programmeur qui facilite le développement du modèle.
181 Chaque fonction et variable est visible dans l'interface et peut être directement modifiée via ses propriétés. Bien que AnyLogic
182 ne soit pas spécifiquement conçu pour la sûreté de fonctionnement ou les études de disponibilité, il se veut très polyvalent,
183 permettant de modéliser une multitude de systèmes différents, allant de la gestion de la logistique ferroviaire au marketing, en
184 passant par les services de santé. AnyLogic offre plusieurs méthodes de modélisation, telles que les diagrammes d'état, les
185 réseaux de Petri, les événements, les processus, ou une combinaison de ces méthodes, pour modéliser et simuler divers
186 systèmes. La flexibilité d'AnyLogic constitue sa principale force, permettant de modéliser pratiquement n'importe quel
187 système, mais elle présente également quelques faiblesses. En effet, le logiciel n'est pas spécifiquement orienté vers la
188 modélisation des calculs de disponibilité ou la gestion des chaînes logistiques. Par conséquent, la modélisation d'un système ou
189 d'une chaîne logistique complète, avec tous ses lieux, transports et règles spécifiques, peut être relativement longue et complexe.

190 Les données d'entrée du modèle jouent un rôle crucial et revêtent de multiples formes et natures. Parmi les données relatives
191 aux articles pris en compte, on retrouve, le magasin de rattachement, l'industriel réparateur ou fournisseur, le taux de défaillance,
192 le temps de réparation ou de réapprovisionnement, la réparabilité de l'article, ainsi que la quantité en stock. De plus, il est
193 essentiel de définir les différents lieux avec leur localisation et leur type, qui détermineront ensuite leur capacité de réparation,
194 par exemple. Les données concernant le transport sont également d'une grande importance. Il convient tout d'abord d'établir
195 une stratégie globale. Dans notre cas, cette stratégie consiste à prévoir des navettes hebdomadaires qui suivent un parcours
196 prédéfini à des jours et heures fixes. En cas d'urgence, des transports exceptionnels, plus coûteux, sont mis en place, capables
197 de relier directement un site à un autre. Ainsi, il est nécessaire de définir les trajectoires des navettes et les temps de trajet
198 associés aux transports exceptionnels. D'autres données d'entrée sont accrées plus profondément dans le modèle, notamment
199 certaines logiques de fonctionnement qui doivent être prises en compte dès les premières étapes de création du modèle.

200 Quant aux données de sortie, plusieurs éléments peuvent être attendus de ce type de modèle. Tout d'abord, il est pertinent
201 d'obtenir des indications sur les performances, telles que les temps d'attente des pièces de rechange aux magasins, par exemple.
202 Ensuite, il est primordial de pouvoir analyser les paramètres clés de la chaîne logistique comme la volumétrie des mouvements
203 ou des transports exceptionnels, ainsi que les flux de consommation et de réparation.

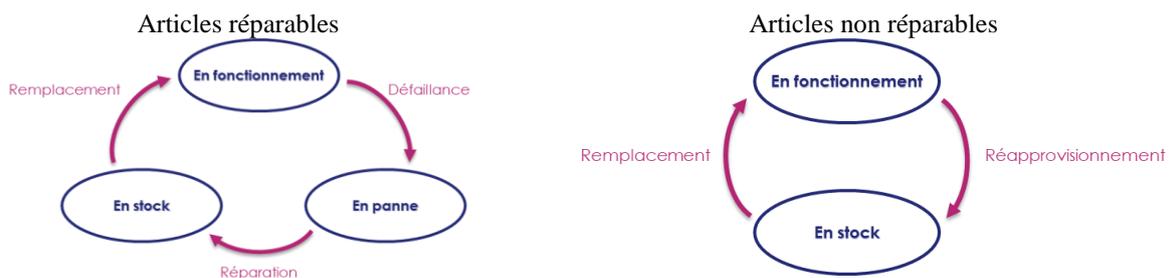
204 1) Les objets du modèle

205 Dans ce modèle, différents types d'objets, appelés agents, interagissent entre eux. Il est crucial de comprendre les différences
206 entre ces objets pour appréhender de manière globale le comportement du modèle. Les agents peuvent être regroupés en deux
207 catégories principales : les lieux et les articles. Un lieu est un site géographique où il est possible de stocker des articles. Chaque
208 lieu est représenté visuellement sur la carte de l'animation. En fonction de leur famille, les lieux peuvent avoir différentes
209 propriétés.

210 Parmi les lieux, on retrouve :

- 211 • Les magasins qui sont des lieux de stockage où les articles en fonctionnement sont rattachés. Les remplacements
212 d'articles ainsi que les demandes de pièces de rechange proviennent de ces magasins.
- 213 • Les centres de distribution sont des magasins particuliers. Ils ont les mêmes propriétés que les magasins, mais
214 aucun article n'y fonctionne. Par conséquent, ils ne génèrent pas de demandes directes. Les interactions des centres
215 de distribution avec les autres lieux sont également différentes de celles des magasins classiques, et ces interactions
216 sont détaillées dans la section suivante : "Les interactions entre les objets".
- 217 • Les industriels, quant à eux, sont des lieux où les articles peuvent être réparés. Ils jouent un rôle crucial dans le
218 processus de réparation des articles défectueux.

219 Les articles sont les atomes du modèle. Ils sont définis à partir des données renseignées dans les bases et ont des
220 comportements différents en fonction de leur réparabilité. De manière générale, les articles suivent l'un des diagrammes d'état
221 suivants :

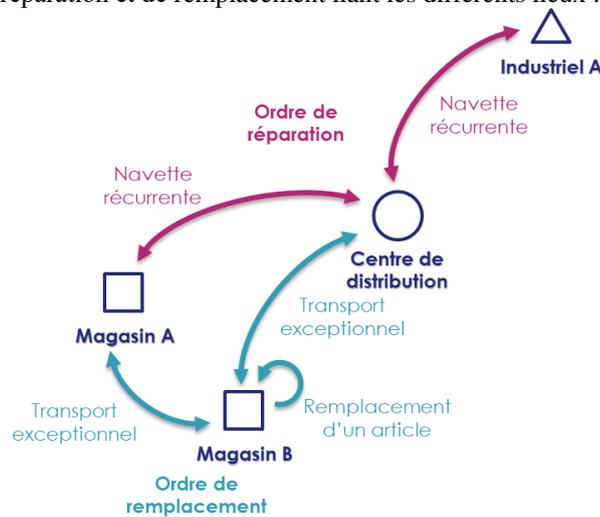


222 La criticité des articles pour la disponibilité du système n'est pas prise en compte dans ce modèle car elle n'impacte pas les
223 contraintes ou les flux appliqués à la chaîne logistique.

224 2) Les interactions entre les objets

225 Les interactions entre les agents sont régies par des ordres, qui représentent des demandes et permettent aux différents agents
226 de communiquer entre eux. Il est nécessaire de développer plusieurs types d'ordres pour transmettre différents messages, mais
227 il est également important de minimiser leur nombre afin de ne pas complexifier le modèle inutilement. Il a donc été décidé de
228 n'en garder que deux types : les ordres de réparation ou de réapprovisionnement et les ordres de remplacement. Ces deux types
229 d'ordres sont créés à chaque défaillance d'un article. Les ordres de remplacement servent à suivre le remplacement des articles
230 en fonctionnement sur les systèmes. Lorsqu'un article est défaillant, une demande de rechange est envoyée à travers un ordre
231 de remplacement. Il régit la recherche d'une pièce de rechange sur le réseau en suivant un algorithme prédéfini, le transport du
232 rechange jusqu'au magasin demandeur et le remplacement de la pièce sur le système concerné. Les ordres de réparation servent
233 à suivre la réparation d'un article dans le cas où celui-ci est réparable et son réapprovisionnement dans le cas contraire. Ce suivi
234 comprend le transport du magasin vers l'industriel en charge de la réparation et la réparation ou le réapprovisionnement lui-
235 même, le retour de l'article dans les stocks du centre de distribution et le réapprovisionnement des magasins. Tous les délais
236 considérés dans le cadre du traitement des ordres ont été définis à partir du retour d'expérience des opérationnels.

237 En résumé, les deux types d'ordres, à savoir les ordres de réparation et les ordres de remplacement, jouent un rôle essentiel
238 dans le suivi et la coordination des activités de réparation et de remplacement des articles défectueux dans le système. Ci-
239 dessous l'organisation des ordres de réparation et de remplacement liant les différents lieux :



240

241 3) Un modèle qui reste limité

242 Ce modèle, comme toute forme de modélisation, présente des limites. La première et la plus importante concerne
243 l'acquisition des données d'entrée. Comme nous l'avons vu précédemment, ce modèle nécessite une grande quantité de données,
244 en particulier concernant les articles. L'objectif de ce modèle est de prendre en compte un très grand nombre d'articles, ce qui
245 augmente proportionnellement le nombre de données nécessaires. La collecte de ces données et leur fiabilité est donc le défi le
246 plus difficile à relever pour obtenir des résultats cohérents et fiables.

247 La deuxième limite concerne la validation du modèle. Lors du déploiement d'une nouvelle chaîne logistique, il n'existe
248 aucune donnée de retour d'expérience disponible pour fiabiliser les résultats du modèle. La seule façon de valider ce type de
249 modèle est donc de le comparer à la véritable chaîne logistique et de corriger les divergences au fur et à mesure de sa mise en
250 place. Ces vérifications servent à la comparaison entre la chaîne logistique réelle et celle modélisée. En ce qui concerne la
251 qualification des fonctions présentes dans le modèle, des tests unitaires sont développés afin de vérifier leur bon
252 fonctionnement.

253 Il est important de noter que ces limites sont inhérentes à tout modèle de ce type et qu'elles nécessitent une attention
254 particulière lors de l'utilisation et de l'interprétation des résultats.

255 III. CAS D'ETUDE

256 Cette étude de cas se focalise sur un système très simple se composant de trois sous-ensembles. Les sous-ensembles A et B
257 sont de responsabilité respective des industriels A basé à Bourges, et B à Châtellerauld et le sous-ensemble C est de
258 responsabilité Thales basé à Limours. Le système est soumis à une exigence de disponibilité de 90% et la chaîne logistique doit
259 permettre de fournir des pièces de rechanges en moins de 1 jour ouvré dans 99% des cas. D'autre part, des exigences de PNRS
260 ont été déclinées aux industriels A et B. Dans ce cas d'étude, toutes les étapes de la modélisation vont être détaillées depuis la
261 récupération des données en entrée jusqu'à l'analyses des résultats des modèles.

262 A. *Modèle sous-ensemble*

263 1) *Données provenant des fournisseurs*

264 Les fournisseurs livrent des données concernant leurs sous-ensembles. Ils apportent au minimum, la liste des composants
 265 et certaines caractéristiques les concernant comme le temps de réparation dans le cas d'un article réparable ou le délai
 266 d'approvisionnement dans le cas contraire, le flux de pannes annuel, et une quantité de stock à mettre en place. Cette quantité
 267 est calculée par les fournisseurs en fonction des exigences qui leur ont été attribuées. Elles peuvent prendre la forme d'une
 268 probabilité de non rupture de stock (PNRS), d'un temps maximal de fourniture de rechanges ou directement d'une disponibilité
 269 opérationnelle. Ces exigences n'ont donc pas obligatoirement de lien avec l'exigence à l'échelle du système, souvent une
 270 disponibilité opérationnelle.

271 Des exigences de PNRS à 95% ont été transmises aux industriels A et B pour le dimensionnement de leurs stocks par
 272 système. Les données fournies par les industriels 1 et 2 sont les suivantes :

273 Données provenant de l'industriel A :

Article	Flux de pannes annuel	TAT	Stock mis en place	Temps de remise en état (h)
A1	1,5	3 mois	2	1
A2	1,0	3 mois	1	2
A3	0,1	1 an	1	10

274 Données provenant de l'industriel B :

Article	Flux de pannes annuel	TAT	Stock mis en place
B1	2,0	6 mois	3
B2	1,7	6 mois	3
B3	0,5	1 an	2
B4	0,8	6 mois	2

275 L'industriel B précise que le temps de remise en état de son sous-ensemble est de 3 heures et que ce temps ne varie que très
 276 peu en fonction de l'élément défaillant.

277 Les deux industriels indiquent que tous les articles mentionnés ci-dessus sont critiques pour la disponibilité, c'est-à-dire
 278 qu'une panne d'un d'eux entraîne instantanément une indisponibilité du système.

280 2) *Analyse de disponibilité d'un sous-ensemble*

281 Les exigences transmises aux fournisseurs étant des valeurs de PNRS cibles, elles ne sont pas homogènes de l'exigence système
 282 de disponibilité opérationnelle. Cependant, il a été estimé que la disponibilité opérationnelle cible du sous-ensemble C devait
 283 être supérieure à 92,5%.

284 Afin de définir une liste optimisée d'articles permettant au sous-ensemble C d'atteindre la cible de 92,5% un modèle numérique
 285 a été créé.

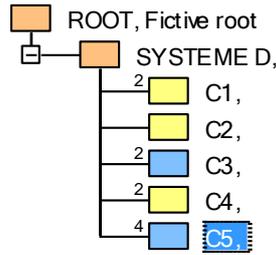
286 La création d'un modèle à l'aide de la suite OPUS se décompose en plusieurs parties. Tout d'abord, la création du système
 287 physique est nécessaire. Il faut définir les composants du système en précisant leurs attributs tels que l'identifiant, le coût, le
 288 taux de défaillance et la réparabilité. Ensuite, des liens hiérarchiques sont établis entre les composants pour former une
 289 arborescence du système physique.

Article	Coût	Taux de défaillance (h ⁻¹)	Réparabilité	Quantité / système	Temps de remise en état (h)
C1	1000	1×10 ⁻⁵	Oui	2	10
C2	750	4×10 ⁻⁵	Oui	1	3
C3	600	2×10 ⁻⁵	Non	2	3
C4	2000	5×10 ⁻⁶	Oui	2	24
C5	100	1,5×10 ⁻⁵	Non	4	1

290

291

Arborescence physique OPUS10 :



292

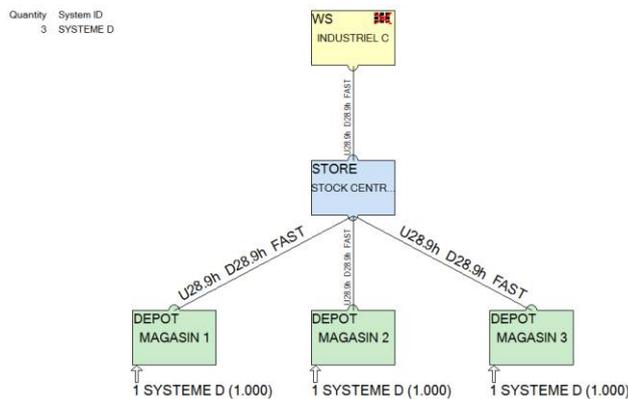
293 Ensuite, vient la création de l'organisation du soutien logistique. Cela implique la mise en place d'une infrastructure
 294 comprenant des lieux de maintenance et de stockage appelés stations. Chaque station est associée à une capacité de
 295 maintenance, de stockage et de réparation.

Nom	Lieu	Capacité de stockage	Capacité de maintenance	Capacité de réparation
<i>Stock central</i>	<i>Bourges</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>	<i>Non</i>
<i>Magasin 1</i>	<i>Laval</i>	<i>Oui</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>
<i>Magasin 2</i>	<i>Troyes</i>	<i>Oui</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>
<i>Magasin 3</i>	<i>Bordeaux</i>	<i>Oui</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>
<i>Industriel C (Thales)</i>	<i>Limours</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>	<i>Oui</i>

296 On définit également les délais d'acheminement depuis et vers chaque station de l'organisation. Une exigence client précise
 297 que le temps maximal de fourniture d'un rechange est fixé à 1 jour ouvré dans 99% des cas. Ce délai est alors considéré
 298 comme hypothèse initiale du modèle en attendant une analyse plus fine des plans de transport et des temps moyen
 299 d'acheminement des rechanges à travers le modèle de chaîne logistique.

300

Schéma logistique OPUS10 :



301

302 Dans cette organisation, les articles réparables sont réparés chez l'industriel en 6 mois et les articles non réparables sont
 303 approvisionnés directement au stock central en 1 an.

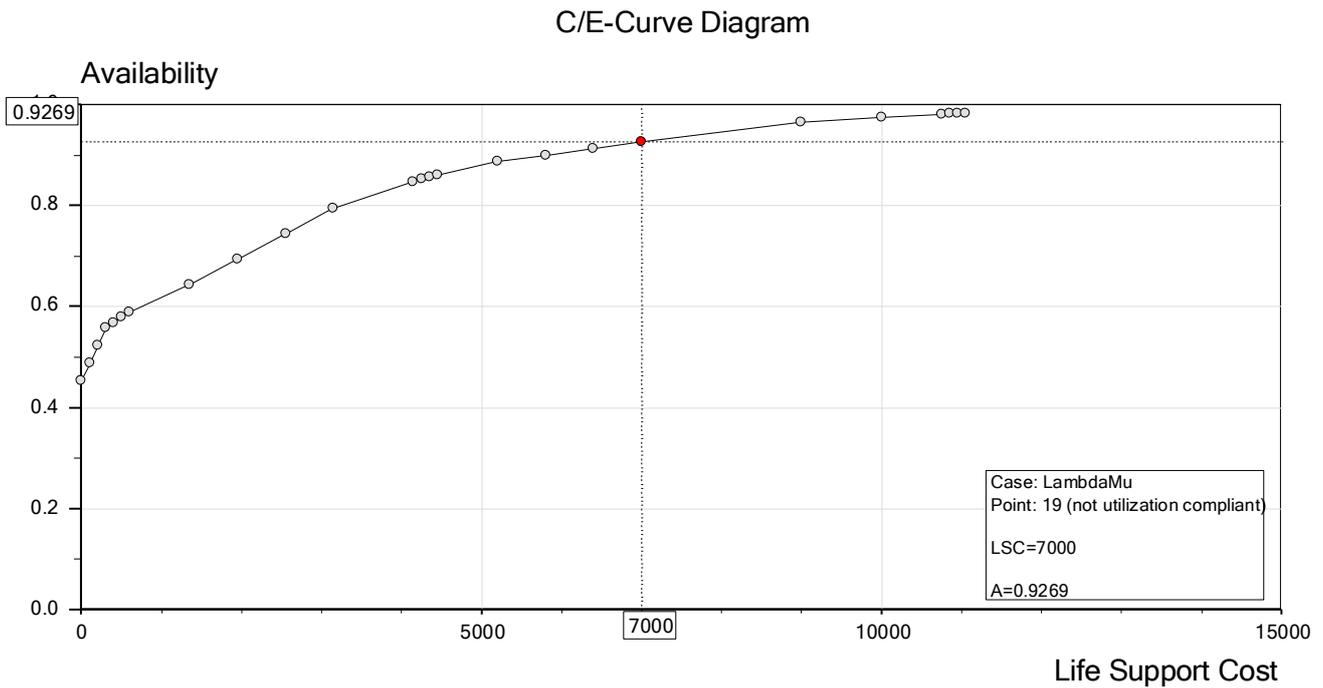
304 Une fois l'organisation du soutien logistique établie, les systèmes physiques créés peuvent être déployés dans cette
 305 infrastructure. Les temps de fonctionnement et les profils de mission des systèmes sont pris en compte pour assurer une
 306 intégration adéquate. Dans cet exemple un système est déployé à chaque magasin et est utilisé 24h/24, 7j/7.

Nom de station	Système	Temps de fonctionnement (h/an)
<i>Magasin 1</i>	<i>Système D</i>	<i>8 760</i>
<i>Magasin 2</i>	<i>Système D</i>	<i>8 760</i>
<i>Magasin 3</i>	<i>Système D</i>	<i>8 760</i>

307 Chaque étape du processus nécessite une certaine organisation des données, qui doivent être formatées de manière
 308 appropriée pour être utilisées par l'outil de modélisation. Cela permet de créer un modèle complet, précis et représentatif du
 309 système étudié.

310

311 Ce modèle complet permet la proposition de listes de rechanges optimisées en maximisant la disponibilité opérationnelle et
 312 en minimisant le prix. Ces listes sont représentées par le graphique ci-dessous dans l'outil.



313 Pour répondre à l'objectif de 92,5% de disponibilité, il est nécessaire de mettre en place la liste de rechanges suivante :
 314

Article	Prix unitaire	Liste de rechanges
<i>C1</i>	<i>1 000 €</i>	<i>1</i>
<i>C2</i>	<i>750 €</i>	<i>2</i>
<i>C3</i>	<i>600 €</i>	<i>6</i>
<i>C4</i>	<i>2 000 €</i>	<i>0</i>
<i>C5</i>	<i>100 €</i>	<i>9</i>
Disponibilité sous-ensemble		<i>92,69%</i>
Prix liste		<i>7 000 €</i>

315 D'autres données sont extraites de ce modèle pour une meilleure prise de décision et une intégration dans le modèle système :
 316 • Plusieurs listes de rechanges afin de pouvoir comparer les alternatives,
 317 • Le MDT associé à chaque liste,
 318 • Le MTBCF du système (dans cet exemple 5882 heures).

319 *B. Modèle système*

320 *1) Mise en place d'un modèle système*

321 Il est ensuite possible de mettre en place le modèle système à partir des données provenant des fournisseurs et du modèle
 322 sous-ensemble. Un code couleur a été mis en place pour améliorer la lisibilité du modèle : les écritures bleues concernent les
 323 données d'entrée du modèle servant aux calculs, les écritures rouges sont les données calculées automatiquement et les écritures
 324 noires sont des données à caractère informatif. Après l'intégration des données, le modèle prend donc cette forme :

Article	Pannes/an	Tps remise en état (h)	TAT (h)	Stock	Part pannes fournisseurs	PNRS	Indispo	GainDispo+1	Meilleur
A1	1,50	1,0	2 190	2	19,74%	99,33%	0,63%	0,48%	
A2	1,00	2,0	2 190	1	13,16%	97,35%	2,45%	1,93%	x
A3	0,10	10,0	8 760	1	1,32%	99,53%	0,42%	0,34%	
B1	2,00	3,0	4 380	3	26,32%	98,10%	2,03%	1,38%	
B2	1,70	3,0	4 380	3	22,37%	98,89%	1,17%	0,80%	
B3	0,50	3,0	8 760	2	6,58%	98,56%	1,39%	1,04%	
B4	0,80	3,0	4 380	2	10,53%	99,21%	0,76%	0,57%	

MDT fournisseurs
121 heures

MTBCF fournisseurs
1 153 heures

Nb de pannes par an
7,60

Sous-ens Thales
MTBCF (h) : 5882
MDT (h) : 464
Indispo : 6,66%

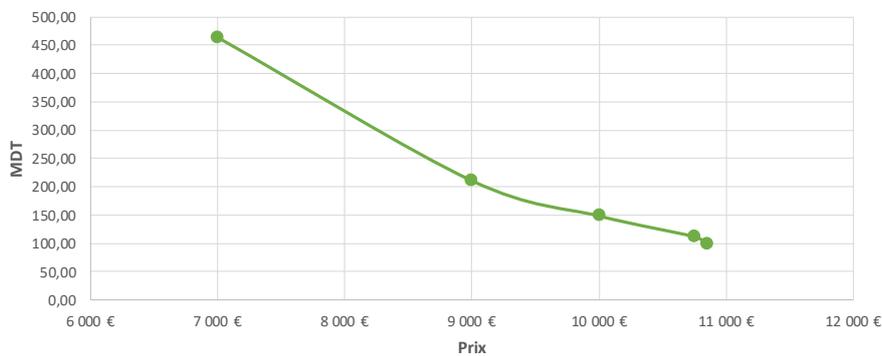
MDT système
177 heures

MTBCF système
964 heures

Dispo
84,48%

Données sous-ensemble Thales

Article	Prix unitaire	Liste 1	Liste 2	Liste 3	Liste 4	Liste 5
C1	1 000 €	1	1	2	2	2
C2	750 €	2	2	2	3	3
C3	600 €	6	6	6	6	6
C4	2 000 €	0	1	1	1	1
C5	100 €	9	9	9	9	10
Disponibilité sous-ens		92,69%	96,54%	97,53%	98,12%	98,33%
MDT (h)		463,66	211,12	148,95	112,49	100,15
Prix liste		7 000 €	9 000 €	10 000 €	10 750 €	10 850 €



Les données sur fond bleu sont récupérées des fournisseurs, les données sur fond jaune facilitent l'analyse des résultats et les données sur fond vert proviennent directement du modèle réalisé pour le sous-ensemble C.

Le résultat le plus important reste la disponibilité système atteinte (en bas à gauche dans le tableau « Dispo ») puisque l'exigence porte sur ce paramètre. Cependant, certains autres résultats sont aussi intéressants pour l'analyse tels que l'indisponibilité provoquée par chaque article des sous-ensembles fournisseurs (colonne « Indispo » du tableau regroupant les données fournisseurs) et par le sous-ensemble Thales (ligne « Indispo » du tableau de gauche « Sous-ens Thales »). Il est également possible de mesurer le gain de disponibilité opérationnelle sur le système complet lors de l'ajout d'un rechange du périmètre fournisseurs (colonne « GainDispo+1 » du tableau regroupant les données fournisseurs). Une colonne, appelée « Meilleur », dans le tableau regroupant les données fournisseurs, permet d'identifier facilement l'article pour lequel l'ajout d'une pièce de rechange augmenterait au maximum la disponibilité.

2) Analyse à l'échelle d'un système

Dans cet exemple, l'exigence de disponibilité opérationnelle du système n'est pas atteinte. Un arbitrage est donc nécessaire pour revoir l'allocation et les exigences qui ont été transmises aux fournisseurs. Il est important de noter que les industriels A et B ne fournissent pas les prix de leurs équipements, il est donc impossible de déterminer le meilleur article à ajouter pour le moindre coût. Un grand gain de disponibilité (environ 3% sur le système) est possible avec l'ajout de l'article C4 en rechange sur le périmètre Thales. Cependant, cela ne suffit pas à dépasser les 90% sur le système. Il peut donc aussi être intéressant d'ajouter l'article A2 pour un gain de 2% de disponibilité et l'article B1 pour 1,5% de gain afin de dépasser l'exigence système.

Ce modèle reste un outil d'aide à la décision. Des arbitrages seront donc toujours nécessaires dans ce genre de cas pour réévaluer les exigences à allouées aux fournisseurs ou modifier les quantités de stocks de certains articles. Grâce à ce modèle les arbitrages de ce type peuvent se faire en toute connaissance de causes.

347
348

Avec la prise en compte des modifications et décisions ci-dessus, on obtient 91,30% de disponibilité sur le système et le modèle devient le suivant :

Article	Pannes/an	Tps remise en état (h)	TAT (h)	Stock	Part pannes fournisseurs	PNRS	Indispo	GainDispo+1	Meilleur
A1	1,50	1,0	2 190	2	19,74%	99,33%	0,68%	0,56%	
A2	1,00	2,0	2 190	2	13,16%	99,78%	0,23%	0,18%	
A3	0,10	10,0	8 760	1	1,32%	99,53%	0,45%	0,39%	
B1	2,00	3,0	4 380	4	26,32%	99,63%	0,46%	0,31%	
B2	1,70	3,0	4 380	3	22,37%	98,89%	1,26%	0,94%	
B3	0,50	3,0	8 760	2	6,58%	98,56%	1,51%	1,22%	x
B4	0,80	3,0	4 380	2	10,53%	99,21%	0,83%	0,67%	

MDT fournisseurs
68 heures

MTBCF fournisseurs
1 153 heures

Nb de pannes par an
7,60

Sous-ens Thales
MTBCF (h) : 5882
MDT (h) : 211
Indispo : 3,28%

MDT système
92 heures

MTBCF système
964 heures

Dispo
91,30%

Données sous-ensemble Thales						
Article	Prix unitaire	Liste 1	Liste 2	Liste 3	Liste 4	Liste 5
C1	1 000 €	1	1	2	2	2
C2	750 €	2	2	2	3	3
C3	600 €	6	6	6	6	6
C4	2 000 €	0	1	1	1	1
C5	100 €	9	9	9	9	10
Disponibilité sous-ens		92,69%	96,54%	97,53%	98,12%	98,33%
MDT (h)		463,66	211,12	148,95	112,49	100,15
Prix liste		7 000 €	9 000 €	10 000 €	10 750 €	10 850 €

349

C. Modèle chaîne logistique

1) Mise en place d'un modèle de chaîne logistique

Enfin, le modèle chaîne logistique peut être déployé. Dans cet exemple, le plan de transport se compose de 3 navettes qui parcourent le circuit suivant une fois par semaine :

Navette 1 :

Lieu de départ	Lieu d'arrivée	Heure de départ	Heure d'arrivée
Bourges	Troyes	8h00	11h00
Troyes	Limours	13h00	15h00
Limours	Bourges	16h00	18h30

Navette 2 :

Lieu de départ	Lieu d'arrivée	Heure de départ	Heure d'arrivée
Bourges	Laval	7h00	10h30
Laval	Brest	11h00	14h30
Brest	Bourges	15h00	21h30

Navette 3 :

Lieu de départ	Lieu d'arrivée	Heure de départ	Heure d'arrivée
Bourges	Châtellerault	7h30	9h30
Châtellerault	Bordeaux	10h00	12h45
Bordeaux	Bourges	14h00	18h30

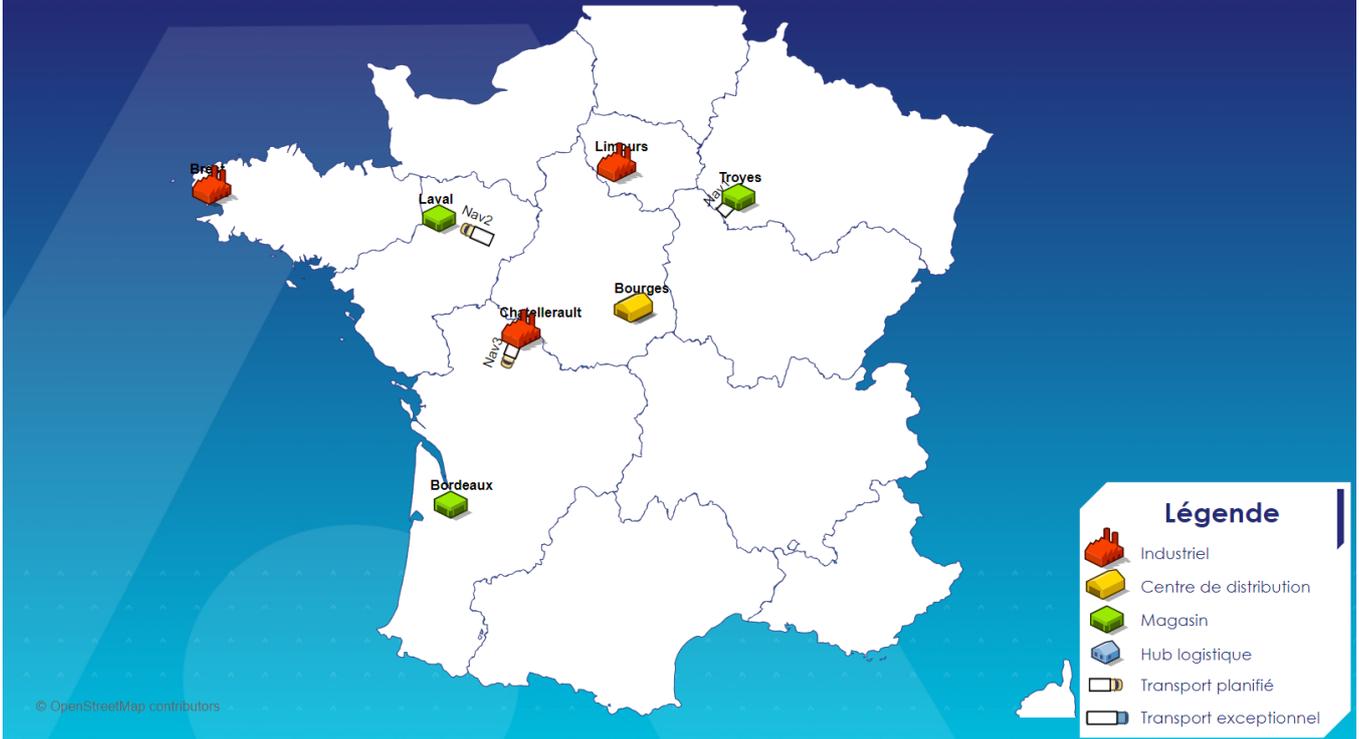
357

358

359

360

Tous les temps des transports exceptionnels sont estimés grâce aux temps de voyage entre les lieux. Le modèle finalisé est visible dans l'interface. Les industriels sont en rouge, le centre de distribution est en jaune et les magasins en vert dans cette vue.



361

Lors du lancement du modèle, l'utilisateur est amené à choisir le temps d'une simulation et le nombre de simulations qu'il souhaite réaliser. Dans cet exemple, il a été choisi de réaliser 1000 simulations de 10 ans. Il peut aussi choisir certaines références qu'il veut suivre avec plus de détails.

365

2) Analyse au niveau de la chaîne logistique

366

Des indicateurs sont remontés et agrégés à la fin de chaque simulation pour obtenir des résultats globaux. Ci-dessous une vue des résultats à la fin des 100 simulations. Cette fenêtre permet d'avoir une vision globale sur les performances de la chaîne logistique et de vérifier la bonne tenue de certaines exigences portant sur l'ensemble de la chaîne logistique. Cependant, elle ne permet pas d'avoir une vision fine concernant des articles en particulier.

367

368

369



370

371
372
373

Dans cet exemple l'exigence stipulant que les rechanges devaient être livrés en moins de 1 jour ouvré dans 99% des cas est tenue car 99,77% des demandes de rechanges sont traitées dans ce délai. Des résultats plus précis sur des articles particuliers sont disponibles dans la fenêtre ci-dessous :



374

375 Cela montre aussi que les hypothèses de temps de transport prises lors de la création des modèles précédents sont validées.
376 Il n'est pas nécessaire de reboucler pour corriger ces temps dans les autres modèles car le gain serait trop faible dans cet
377 exemple. Cependant, il peut être intéressant dans certains cas, notamment si l'exigence sur la chaîne logistique est moins
378 contraignante, de corriger ces temps afin d'optimiser au maximum les stocks. Il serait alors nécessaire de vérifier à nouveau la
379 bonne tenue de l'exigence portant sur la chaîne logistique à partir de ces nouveaux stocks optimisés.

380 Ces résultats permettent de vérifier le bon fonctionnement du modèle à partir d'indicateurs tels que le nombre de demandes
381 par an, d'analyser l'impact d'un article sur la chaîne logistique à travers le nombre de transports exceptionnels (ou transports
382 dédiés) et d'identifier les articles potentiellement à problème grâce aux données de stock et au nombre de ruptures. Cette vue
383 est donc primordiale pour une analyse fine de la chaîne logistique.

384

IV. CONCLUSION

385 En combinant les fonctionnalités avancées de la suite logicielle OPUS et particulièrement l'utilisation de la simulation avec
386 le logiciel SIMLOX, il est possible d'effectuer une analyse approfondie de la disponibilité et des principales sources
387 d'indisponibilité, afin de proposer des solutions d'amélioration adaptées. Cette approche permet de déterminer les sous-
388 ensembles nécessitant des améliorations en termes de fiabilité, de maintenance et de stockage, afin d'optimiser les performances
389 de chaque sous-ensemble.

390 Grâce aux consolidations réalisées dans les modèles système, il est possible de calculer la disponibilité d'un système et la
391 part d'indisponibilité liée à chaque sous-ensemble à partir d'un nombre relativement restreint de données et dans un simple
392 fichier Excel. Cela permet de vérifier la conformité du système aux exigences et de consolider les listes de rechanges calculés
393 dans les modèles des sous-ensembles et celles fournies par les industriels.

394 Ensuite, le modèle chaîne logistique s'appuie sur les listes proposées dans les modèles sous-ensembles et consolidées dans
395 les modèles système. Il offre la possibilité d'analyser la chaîne logistique à partir d'indicateurs permettant d'avoir une vision
396 détaillée de son fonctionnement. Les indicateurs de performance permettent de se situer par rapport aux exigences
397 contractuelles, qu'ils soient globaux ou spécifiques à certains articles. Ces indicateurs incluent notamment le temps d'attente de
398 pièces de rechange, le taux de service pour des délais de 0 heure, 1 jour ouvré et 2 jours ouvrés, ou encore la probabilité de
399 non-rupture de stock. Les indicateurs liés aux paramètres de dimensionnement de la chaîne logistique permettent de vérifier le
400 bon fonctionnement du modèle et d'analyser les améliorations potentielles à apporter pour optimiser les performances. Par
401 exemple, ces indicateurs se concentrent sur le nombre de mouvements, le nombre de transports dédiés, le nombre d'articles par
402 transport, ou encore le flux de réparations par article.

403 Enfin, il est possible de réinsérer les résultats provenant au modèle chaîne logistique dans les modèles précédents. Cette
404 boucle permet d'optimiser au maximum les rechanges tout en vérifiant la tenue de l'intégralité des exigences.

405 Ces indicateurs permettent d'identifier les facteurs clés du modèle, de réaliser une analyse de sensibilité aux paramètres et
406 d'identifier les optimisations potentielles. Les interactions entre les trois niveaux de modélisation contribuent à évaluer la
407 performance de l'ensemble. La modélisation joue un rôle crucial dans la prise de décision en anticipant les impacts des
408 changements sur les performances opérationnelles et les exigences contractuelles. Les données provenant du retour d'expérience
409 sont utilisées pour améliorer la fiabilité des modèles.

410 **REMERCIEMENTS**

411 L'auteur souhaite remercier Bryan Martin, Rémy Tarnaud et David Boullard pour leur aide ainsi que Gérard Hardy, responsable
412 de la cellule SdF, pour son support.

413 **REFERENCES**

- 414 [1] A. Villemeur, « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels », Edition Eyrolles, 1988
415 [2] Nicolas Le Berre, David Le Galliot, Thierry Thomas. Vers une meilleure intégration de la gestion des stocks de rechanges
416 dans les évaluations probabilistes de sûreté. Congrès Lambda Mu 22 "Les risques au cœur des transitions" (e-congrès) - 22^e
417 Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2020, Le Havre
418 (e-congrès), France.
419 [3] Bryan Martin, Rémy Tarnaud. La simulation au cœur des analyses de fiabilité et de disponibilité. Congrès Lambda Mu 22
420 "Les risques au cœur des transitions" (e-congrès) - 22^e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement,
421 Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2020, Le Havre (e-congrès), France.
422 423