



Evaluation de la disponibilité d'une constellation de satellites avec une approche Model-Based Safety Assessment

JACQUET Thomas
Apsys

36 Rue Raymond Grimaud, 31700
BLAGNAC, France
thomas.jacquet@apsys-airbus.com

MAITRE Marc
Apsys

36 Rue Raymond Grimaud, 31700
BLAGNAC, France
marc.maitre@apsys-airbus.com

CASANOVAS Vincent
EUMETSAT

Eumetsat Allee 1, 64295 Darmstadt,
Allemagne
Vincent.Casanovas@eumetsat.int

DE BOSSOREILLE Xavier
Apsys

36 Rue Raymond Grimaud, 31700
BLAGNAC, France
Xavier.Debossoreille@apsys-airbus.com

BERNARD Christophe
Apsys

36 Rue Raymond Grimaud, 31700
BLAGNAC, France
christophe.bernard@apsys-airbus.com

Résumé — La réduction des coûts de production et de lancement apporte avec elle de nouvelles façons d'envisager les opérations en orbite. La possibilité de pouvoir multiplier les satellites permet notamment de transférer une partie des exigences de disponibilité sous la forme de constellation de satellite en lieu et place d'un unique satellite. Afin d'évaluer la disponibilité d'une constellation, Apsys a développé une méthodologie de modélisation pour les constellations de satellite basé sur le principe de Model-Based Safety Assessment. Ce modèle prend en compte la fiabilité des satellites mais également le plan de production ou les contraintes de lancement. Cette méthode a été mise en place afin d'évaluer l'impact du plan de mission sur la disponibilité d'une constellation de satellite météorologique pour EUMETSAT.

Mots-clés — Satellite, Constellation, New Space, Disponibilité, MBSA

Abstract— reduction of launch and manufacturing cost of satellites opens new opportunities to operate satellite in orbit. The possibility to have numerous numbers of satellite in orbit in the same time, transfers the availability criteria of mission from one unique satellite to many satellites in constellation configuration. To evaluate availability of satellite constellation, Apsys has developed a new methodology based on Model-Based Safety Assessment approach. This model takes into account the reliability of satellite but also manufacturing pace and launch constraints. This methodology has been used to evaluate mission plan impact on availability of meteorology satellite constellation for EUMETSAT.

Keywords — Satellite, Constellation, New Space, Availability, MBSA

I. INTRODUCTION

La nouvelle course à l'espace se traduit par la participation de nouveaux acteurs privés et non plus seulement étatiques. Cette privatisation des missions spatiales a eu pour effet de développer de nouveaux concepts, avec des approches de type constellation, à la place de satellite unitaire pour la

réalisation de mission de type navigation, observation ou télécommunication [1].

Cette approche de constellation est rendue possible par deux facteurs : l'augmentation de l'accessibilité à l'espace et la production de masse de satellites.

Le besoin est passé de satellite unitaire pouvant réaliser une mission pendant 15 ans à plusieurs satellites, plus simples, avec une durée de vie souvent plus limitée mais facile à produire en quantité (plusieurs dizaines, centaines voire plusieurs milliers d'exemplaires pour les constellations les plus importantes).

Ce changement d'approche dans la conception de satellites vers des constellations a eu pour effet de diminuer les contraintes de conception et de fiabilité. En effet, la disponibilité d'une mission n'est plus conditionnée par un unique satellite mais par un nombre important de satellites assurant une redondance dans la réalisation de la mission.

Une constellation de satellites est constituée de différents plans orbitaux pour lesquels un nombre minimal de satellites doit être opérationnel afin d'assurer la réussite de la mission. Ce nombre minimal de satellites est conditionné par les contraintes opérationnelles. Souvent, afin de s'assurer d'une certaine robustesse de la constellation à une panne, un nombre plus important de satellites est mis en orbite.

Certains événements propres à la vie d'un satellite peuvent impacter la disponibilité de celui-ci et donc la disponibilité de la constellation. Ces événements incluent des événements déterministes comme la durée de vie ou le besoin de remise à poste et des événements aléatoires comme une défaillance sur un élément du satellite.

En plus de la fiabilité intrinsèque du satellite, un certain nombre de contraintes de production peuvent influencer la disponibilité de la constellation [2]. Un facteur important est

le plan de mission qui correspond à la stratégie de lancement de nouveaux satellites pour la régénération de la constellation mais aussi en cas d'échec de lancement ou de perte d'un satellite.

En plus du plan de mission, d'autres facteurs peuvent impacter la capacité à pallier une perte de satellite : le plan de production, représentant la capacité de production des satellites ou bien le taux de succès au lancement.

Tous ces paramètres doivent être pris en compte afin d'évaluer la disponibilité de la mission de la façon la plus réaliste possible.

Les méthodes traditionnelles d'analyse combinatoire telles que le bloc diagramme de fiabilité ou les arbres de défaillance ne permettent pas une modélisation de façon convenable pour ce type de système avec des événements communs. L'utilisation d'une chaîne de Markov pour la modélisation de ce système est possible [3]. Cependant, la modélisation peut être complexe en fonction du nombre de satellites et de plans orbitaux. L'adaptation du modèle peut aussi s'avérer longue et complexe.

Le principe de Model-Based Safety Assessment (MBSA) à travers le langage AltaRica [4] est un bon moyen de satisfaire à toutes ces contraintes. En effet, AltaRica permet la modélisation de systèmes complexes comme peut l'être une constellation de satellites [5], [6]. La possibilité de modéliser chaque élément de la constellation de façon distincte permet de s'assurer de la modularité du modèle.

Ce papier présente une méthode utilisée pour la modélisation de la disponibilité de mission d'une constellation de satellites se basant sur la méthode MBSA. Après une courte présentation de la modélisation MBSA avec AltaRica, une description du modèle imaginé pour des constellations de satellites ainsi que les paramètres utilisés sont présentés. Dans la seconde partie, est détaillé le fonctionnement de chaque élément constituant le modèle. Enfin, une application de la méthodologie sur plusieurs scénarios sera présentée avant de proposer une conclusion et des perspectives.

II. MODELISATION MBSA AVEC ALTARICA

La modélisation proposée dans le cadre de ce papier se base sur le principe de modélisation MBSA. La modélisation MBSA propose l'utilisation d'un langage haut niveau pour la réalisation d'études de sûreté de fonctionnement. Ces langages permettent de reproduire la dynamique du système et de décrire la façon dont les pannes se propagent à l'intérieur de ce système. Parmi les langages possibles, le langage AltaRica a été choisi et plus précisément la version DataFlow.

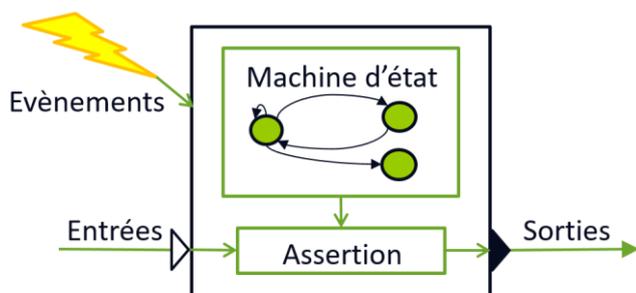


Figure 1: Représentation d'une brique élémentaire en AltaRica

En AltaRica, chaque élément est représenté par une brique possédant une machine d'état, Figure 1. Les sorties de la brique sont conditionnées par l'état de la machine d'état et les valeurs en entrée. La machine d'état est, quant à elle, conditionnée par les événements qui peuvent impacter la brique. Le langage AltaRica permet de définir un événement selon une loi de probabilité comme dans le cas d'une panne aléatoire ou d'un événement déterministe.

Il est possible de relier différentes briques entre elles afin de constituer une représentation complète du système étudié, Figure 2. Cela permet de reproduire l'architecture du système, comme représenté par les équipes de conception, avec un comportement propre aux études de sûreté de fonctionnement.

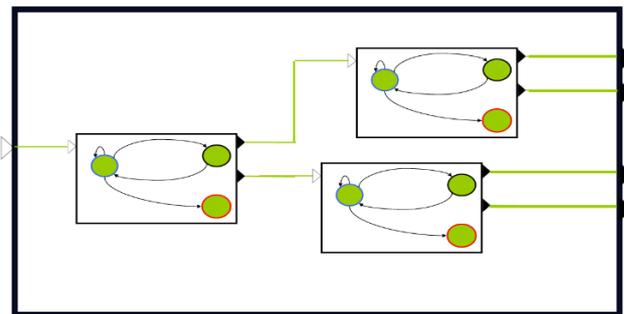


Figure 2: Représentation d'un système complet composé de différentes briques élémentaires reliées entre elles comme décrit dans l'architecture fonctionnelle.

III. PRESENTATION DU MODELE

Dans cette section, sont présentés les différents éléments constituant une constellation de satellites et la façon dont ils sont représentés dans le modèle proposé.

Une constellation de satellites peut être divisée en deux éléments différents :

- Le support sol représentant toutes les capacités de production, stockage et lancement des satellites.
- Un segment spatial correspondant au satellite en vol.

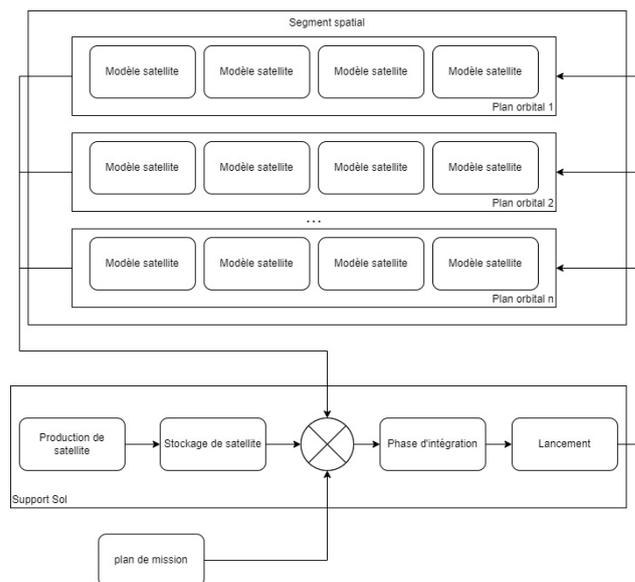


Figure 3: Représentation du modèle développé pour une constellation de satellites.

Le support sol est en charge de la gestion du renouvellement des satellites en orbite. La demande de nouveaux satellites se fait en fonction du plan de mission ou des besoins de la constellation en cas de perte d'un satellite en orbite.

Le support sol correspond à toutes les activités qui sont réalisées pour la préparation et le lancement de satellites. Cela inclut la capacité de production de satellites mais également de lancement. La majorité des paramètres, Tableau 1, de ce segment sont déterministes comme le temps de préparation du satellite et du lanceur, T_{int} et la capacité de production des satellites, T_{prod} . Un temps minimum entre deux lancements peut également être pris en compte, $T_{lancement}$. La probabilité de réussite de lancement, $P_{lancement}$, fait également partie des éléments implémentés dans ce segment. Tous ces paramètres peuvent être désactivés ou de nouveaux peuvent être ajoutés pour correspondre à toutes les spécificités d'une constellation.

Paramètres	Description
<i>Support sol</i>	
T_{prod}	Temps de production d'un satellite.
T_{int}	Temps nécessaire pour la préparation du satellite et du lanceur.
$T_{lancement}$	Temps minimum entre deux lancements de satellite.
$P_{lancement}$	Probabilité de réussite d'un lancement.
<i>Segment spatial</i>	
$\lambda_{allumé}$	Taux de panne pour un satellite allumé.
$\lambda_{éteint}$	Taux de panne d'un satellite éteint.
T_{orbite}	Temps de mise en orbite et de test.
T_{vie}	Durée de vie d'un satellite.
$T_{reorbite}$	Temps nécessaire à la remise en orbite du satellite.

Tableau 1: Liste des paramètres du modèle avec leur description.

Le segment spatial est constitué des plans orbitaux avec le nombre de satellites associés. Le nombre de satellites par plan orbital peut être adapté en fonction du projet. En entrée ce segment reçoit la confirmation de réussite du lancement d'un nouveau satellite par le sol. En cas de panne d'un des satellites en orbite, le segment spatial envoie une demande de nouveau satellite au sol.

Un satellite peut avoir plusieurs états afin de décrire toutes ces phases de vie au cours du temps. Les états retenus pour la modélisation sont les suivants : Ground, Orbiting, Operating, Backup, Failed.

L'état Ground correspond aux phases de vie du satellite lors des activités au sol incluant, la fabrication, la préparation et le lancement du satellite. Les phases de vie pendant lequel un satellite fait des opérations de mise en orbite, de test ou de ré-orbitation correspondent à l'état Orbiting. L'état Operating est utilisé lorsque le satellite est en réalisation de mission. Lorsqu'un satellite est en redondance en orbite, l'état Backup doit être utilisé. Pour chaque phase de vie du satellite, le comportement du modèle de satellite peut être adapté.

IV. DETAIL DU MODELE DE CONSTELLATION

A. Modèle support sol

Le support sol est composé de trois éléments : un module pour la gestion du plan de mission, un module de gestion de production et un module pour la gestion du lancement. La gestion du plan mission étant uniquement dépendante du temps, la demande de lancement d'un nouveau satellite est modélisée par le déclenchement régulier d'un événement. La seconde façon de faire une demande de nouveau satellite est

une demande du segment spatial suite à une défaillance d'un des satellites.

Le déclenchement de cet événement peut être conditionné par d'autres paramètres comme la disponibilité d'un satellite, la disponibilité de la chaîne de préparation des satellites, le temps depuis le dernier lancement.

Suite au déclenchement de cet événement, le module « lancement » prépare le lancement d'un satellite et s'assure de la réussite ou non du lancement. La préparation du lancement se traduit par un temps de préparation entre la demande et le lancement. Après ce temps de préparation, un tirage est effectué correspondant à la probabilité de réussite du lancement. En cas d'échec, un nouveau lancement peut être déclenché ou non. La Figure 4 représente la machine d'état en charge du lancement avec les paramètres associés à chaque état. Plusieurs types de lanceurs peuvent être intégrés dans le modèle avec différents taux de réussite. Le choix du lanceur est ensuite conditionné par le nombre de satellites à relancer ou le plan orbital visé.

Le dernier module, le module « production », permet de s'assurer de la production et de la disponibilité d'un satellite pour le lancement. Il représente le temps nécessaire pour la production d'un satellite et la capacité de stockage des satellites avant la préparation. Le processus de ce module est représenté Figure 6. Avant tout lancement de satellite, il est nécessaire d'avoir un stock de satellites suffisant.

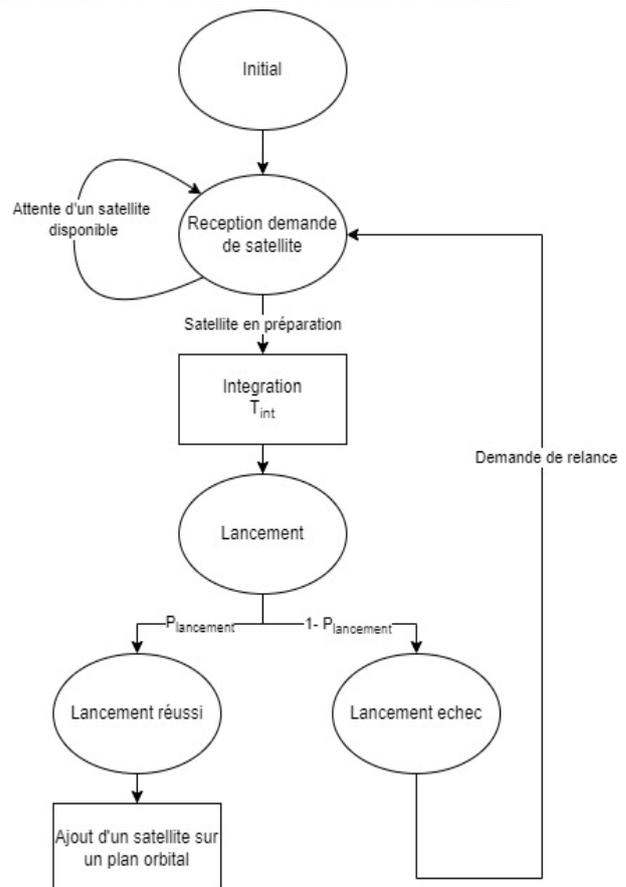


Figure 4: Représentation de la machine d'état de la brique gestion de lancement du support sol

B. Modèle segment spatial

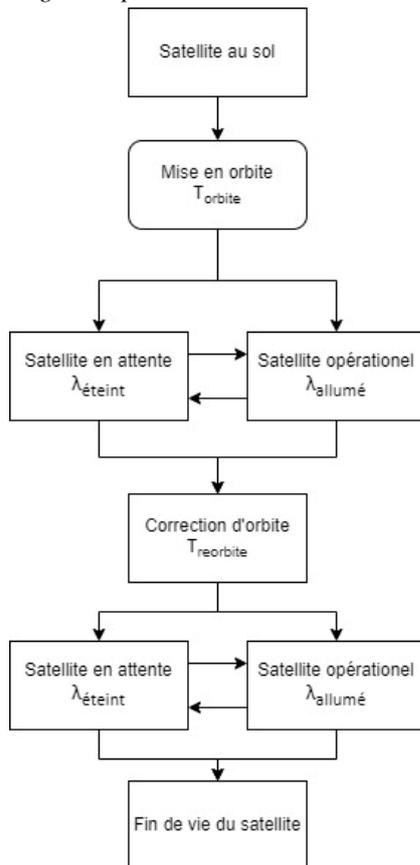


Figure 5: Représentation de la machine d'état d'un satellite générique

Le segment spatial correspond à toute la partie spatiale du modèle. Le segment spatial est divisé en différents plans orbitaux considérés comme indépendants les uns des autres. Pour chaque plan orbital, un nombre maximum de satellites est fixé en accord avec l'équipe projet. En plus des satellites, un plan orbital comprend un module de gestion.

Grâce à la modélisation MBSA, il est possible de reproduire le plus précisément possible l'architecture du satellite. L'impact de chaque élément du satellite sur la disponibilité peut être pris en compte dans le modèle. Eventuellement, en fonction du besoin, une approche plus simple peut être utilisée à l'aide d'un modèle satellite simplifié composé de quelques blocs représentatifs de la structure du satellite. La modélisation de plusieurs instruments embarqués par un satellite peut être prise en compte.

Les modes de fonctionnement d'un satellite sont représentés Figure 5. Le satellite est considéré au sol par défaut. Aucune panne n'est considérée dans ce mode. Après le lancement réussi du satellite, une phase de mise en orbite est réalisée. A l'issue de celle-ci, le satellite est mis en opération ou en attente (backup). En opération, tout le satellite est considéré comme allumé.

En backup, seule la plateforme est allumée et les équipements éteints. L'état des éléments d'un satellite en fonction de la phase est répertorié dans le Tableau 2.

En plus, une phase de ré-orbitation du satellite peut s'intercaler entre deux phases d'opération après un certain temps de vol.

Afin de s'assurer de la bonne communication entre le support sol et chaque modèle de satellite, un module de contrôle par plan orbital est ajouté entre les deux.

Son rôle est d'adapter la mission de chaque satellite du plan orbital en fonction des lancements, mises en orbite d'un nouveau satellite. Il est également en charge de la reconfiguration des satellites d'un plan orbital en cas de panne d'un satellite. Dans ce cas, il peut demander le lancement d'un nouveau satellite sur le plan orbital dont il est en charge.

Phase	Plateforme	Equipement
Ground	Pas de panne	Pas de panne
Mise en orbite/test	Allumé	Allumé
En backup	Allumé	Eteint
Opérationnel	Allumé	Allumé

Tableau 2: Liste des phases de fonctionnement d'un satellite par défaut et l'état de chaque élément en fonction de la phase.

Afin de rapidement adapter le modèle à toutes les configurations de constellations de satellites, les informations échangées entre les deux éléments sont limitées aux demandes de satellites, du segment spatial vers le support sol, et de l'envoi d'un satellite sur un plan orbital du support sol vers le segment spatial. Cela permet d'ajouter ou de supprimer les plans orbitaux facilement.

L'avantage de la modélisation MBSA est de pouvoir rapidement adapter le modèle aux spécifications de la constellation que l'on souhaite étudier. Il est ainsi possible de complètement adapté le nombre de plan orbitaux mais aussi la réaction de chaque élément du modèle au besoin de l'équipe projet sans modifier totalement le modèle.

V. APPLICATION POUR UNE CONSTELLATION METEOROLOGIQUE

Cette méthode de modélisation de constellation de satellites a été mise en application dans le cadre d'une étude amont pour une constellation d'observation météorologique développée par EUMETSAT [7]. Le but est d'analyser l'impact de paramètres, tels que le nombre de plans orbitaux, le nombre de satellites par plan orbital ou le plan de mission sur la disponibilité de la constellation.

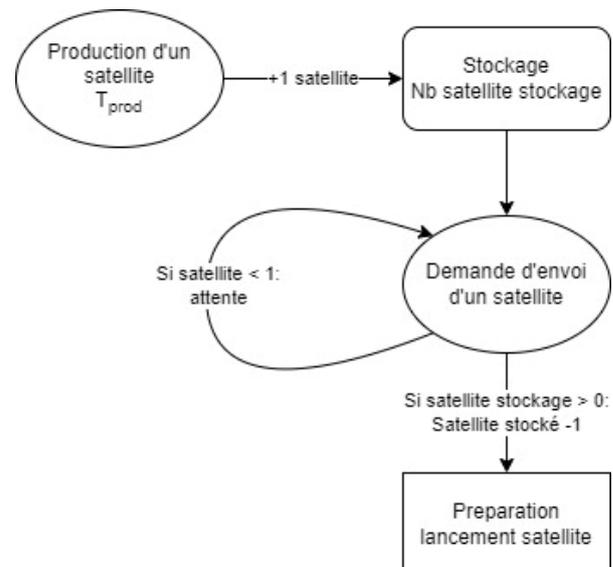


Figure 6: Représentation de la machine d'état de la brique gestion de production du support sol

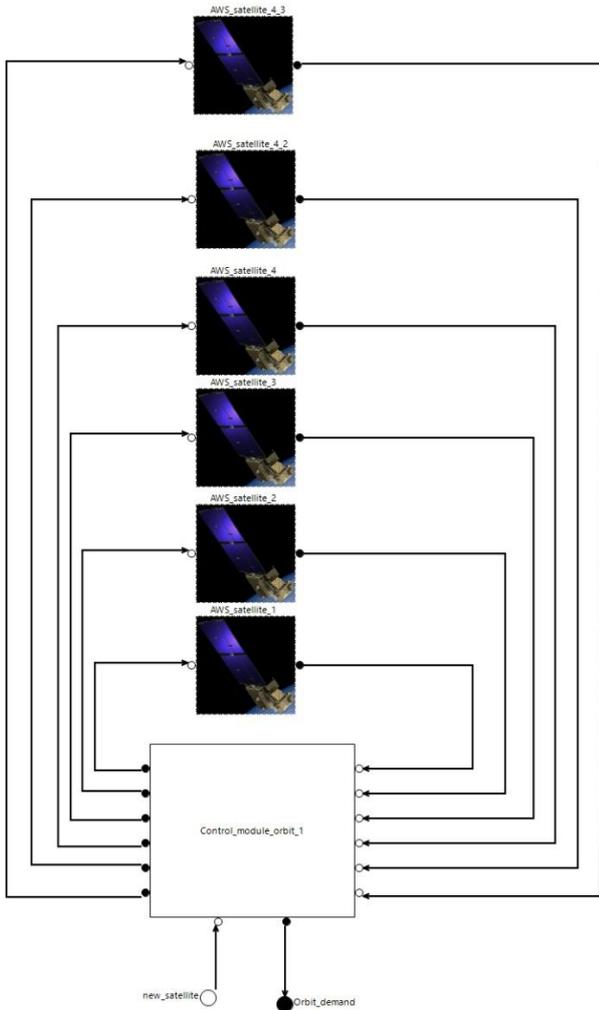


Figure 7: Représentation d'un plan de mission dans le cadre de la constellation EUMETSAT avec le module de contrôle et les modèles de satellite. Capture de SimfiaNeo.

La modularité de la méthode a permis d'adapter notre modèle pour une étude préliminaire d'impact de ces paramètres sur la disponibilité de la constellation. Le modèle a été réalisé à l'aide du logiciel SimfiaNeo développé par APSYS [8].

Le but de cette étude étant de comparer l'impact des différents plans de mission sur la disponibilité de la constellation, aucune reconfiguration n'est prévue avec ce modèle suite à la défaillance d'un satellite. De même, le stock de satellites est considéré infini.

Les conditions de réussite de la mission sont définies avec l'équipe projet. Le critère retenu pour cette analyse est d'avoir au moins un plan orbital avec deux satellites et au moins un satellite sur les autres plans orbitaux.

Pour la modélisation, la configuration de mission la plus contraignante est prise en considération. Cela se traduit par un segment spatial avec quatre plans orbitaux composés de six satellites chacun.

Le modèle d'un plan orbital est constitué d'un module de contrôle et de 6 satellites, Figure 7. En fonction du plan de mission étudié certains satellites ou plans de mission peuvent ne pas être utilisés. Chaque plan orbital reçoit la confirmation d'un nouveau lancement sur un plan orbital.

Cette information est traitée par les manageurs de satellite qui décident ou non de mettre en « changé » l'état d'un ou de plusieurs modèles de satellites qui lui est associé. En cas de panne d'un ou plusieurs satellites, le contrôleur envoie une

nouvelle mission à chaque satellite afin de compenser la panne si possible et le besoin d'un nouveau satellite.

Les réactions du contrôleur de satellite doivent être configurées avant d'évaluer la disponibilité de la constellation. Un modèle simplifié de satellite, représenté Figure 8 est utilisé pour cette modélisation. Ce modèle est composé d'un élément en série et de deux éléments en parallèle modélisant la plateforme du satellite. Un élément en série est ajouté pour représenter l'instrument du satellite.

Chaque satellite de la constellation est identique. Le taux de défaillance de chaque élément est déterminé en accord avec l'équipe projet pour correspondre aux données de fiabilité prévisionnelles du satellite.

Les dates de lancement et nombres de satellites par lancement sont dépendants du plan de mission que l'on étudie. Grâce au logiciel SimfiaNeo, la modification du plan de mission et du

Plan de mission n°1	
Nombre de plan orbital	2
Nombre de satellite initial par plan orbital	2
Nombre de satellite par lancement	1
Durée entre deux lancements	2,5 ans
Plan de mission n°2	
Nombre de plan orbital	3
Nombre de satellite initial par plan orbital	2
Nombre de satellite par lancement	2
Durée entre deux lancements	2,5 ans
Plan de mission n°3	
Nombre de plan orbital	4
Nombre de satellite initial par plan orbital	3
Nombre de satellite par lancement	2
Durée entre deux lancements	5 ans

Tableau 3: Exemple de plans de mission utilisés dans le cadre de l'analyse de disponibilité

segment spatial peuvent facilement être mises en place par le biais d'un fichier de configuration.

Afin de valider le modèle, il est possible, grâce à SimfiaNeo, de faire une simulation pas à pas permettant de s'assurer du bon comportement du modèle et du respect des contraintes projets.

L'estimation de la disponibilité de la constellation en fonction du temps est obtenue grâce à une simulation de Monte-Carlo. Le logiciel SimfiaNeo permet de sauvegarder des points intermédiaires afin d'observer l'évolution de la disponibilité de la mission au cours du temps.

A titre d'exemple, trois plans de mission sont considérés, Tableau 3. Le modèle a été paramétré à l'aide d'un fichier de configuration permettant à SimfiaNeo d'implémenter le plan de mission choisi.

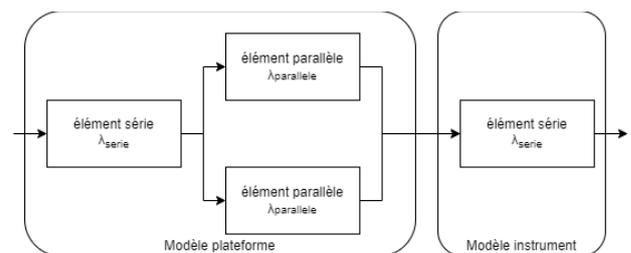
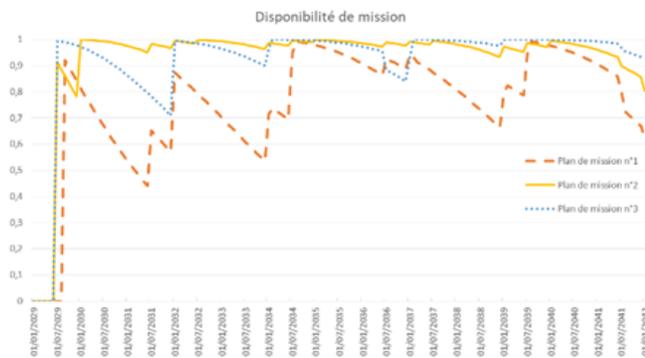


Figure 8: Représentation de l'architecture d'un satellite EUMETSAT composé d'une partie plateforme et instrument



Une simulation de Monte-Carlo a pu être réalisée avec 500 000 scénarios pour chaque évaluation. Il est possible de tracer la disponibilité de la mission en fonction du temps pour chaque plan de mission. La courbe obtenue, Figure 9, représente la réussite de la mission correspondant à deux satellites sur au moins un plan orbital et au moins un satellite sur les autres plans orbitaux.

Ces résultats de simulations permettent de comparer la disponibilité de la constellation avec différents plans de mission afin de permettre aux équipes de conceptions de faire un choix de plan de mission prenant en compte la disponibilité mais aussi d'autres critères comme le coût de la mission. La facilité de configuration du modèle a permis de rapidement réévaluer la disponibilité de la constellation afin de répondre rapidement aux équipes projets.

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Afin d'estimer au mieux la disponibilité de futures constellations de satellites, une modélisation basée sur le principe du MBSA a été présentée dans ce papier. La modélisation MBSA permet d'avoir un modèle facilement compréhensible et modulable afin de s'adapter à un grand nombre de besoins projet.

Ce modèle prend en compte : la disponibilité du satellite, la configuration de la constellation, le nombre de plans orbitaux et le nombre de satellites par plan orbital. Les contraintes opérationnelles sont également prises en compte, comme le temps de production d'un satellite ou le taux de réussite au lancement.

En plus de la disponibilité, il est possible d'extraire le nombre de satellite en réserve en fonction du temps ou le nombre de lancement nécessaire. Ces paramètres peuvent permettre d'estimer le coût total d'une constellation pour différente configuration.

Ce modèle a été utilisé pour estimer la disponibilité d'une constellation pour l'observation météorologique, en fonction de différents plans de mission. Cette étude n'utilise pas toutes les fonctionnalités du modèle telles que les contraintes opérationnelles. Cependant, le nombre important de plans de mission à étudier a montré la pertinence de la modélisation MBSA et de l'utilisation de SimfiaNeo.

La facilité de configuration du modèle lui permet d'être rapidement adapté aux exigences des équipes projets dans une phase préliminaire mais également de simuler des constellations de satellites à un niveau de maturité plus avancé grâce aux nombreux paramètres disponibles dans le modèle.

- [1] ZHANG, Yulin, FAN, Li, ZHANG, Yan, et al. Theory and design of satellite constellations. Beijing: Press of Science, 2008, vol. 9.
- [2] PENG, Zong et KOHANI, Saeid. The performance of the constellations satellites based on reliability. Journal of space safety engineering, 2017, vol. 4, no 2, p. 112-116.
- [3] ZHENG, Heng et REN, Liming. Availability analysis of satellite constellation. In : 2009 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. IEEE, 2009. p. 245-248.
- [4] The AltaRica formalism for describing concurrent systems. A. Arnold, G. Point, A. Griffault, A. Rauzy. 1999, Fundamenta Informaticae, Volume 40 - Issue 2.
- [5] Handling reconvergent paths using conditional probabilities in combinatorial logic netlists reliability estimation. J. Torras Flaquer, JM. Daveau, L. Naviner, and P. Roche. 2010, Proceedings of IEEE International Conference of Electronics, Circuits and Systems.
- [6] Torras-Flaquer, J. Méthodes probabilistes pour l'estimation de la fiabilité dans la logique combinatoire. Paris : Thèse de Doctorat de l'école doctorale TELECOM Paristech, 2011.
- [7] LAGAUNE, Bastiaan, BERGE, Sten, et EMRICH, Anders. Arctic Weather Satellite: A Microsatellite Constellation for Improved Weather Forecasting in the Arctic and Globally. 2021.
- [8] MACHIN, Mathilde, SAGASPE, Laurent, et DE BOSSOREILLE, Xavier. SimfiaNeo, Complex Systems, yet Simple Safety.