



La Sûreté de Fonctionnement au service du New Space

Aurélie Strzepek, Thierry Amiot, Laurène Gillot, Cécile Cheymol

► To cite this version:

Aurélie Strzepek, Thierry Amiot, Laurène Gillot, Cécile Cheymol. La Sûreté de Fonctionnement au service du New Space. Congrès Lambda Mu 23 “ Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable ” - 23e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2022, Paris Saclay, France. <hal-03878352>

HAL Id: hal-03878352

<https://hal.science/hal-03878352v1>

Submitted on 29 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

La Sûreté de Fonctionnement au service du New Space – Dependability supporting New Space

STRZEPEK Aurélie

Centre National d'Etudes Spatiales
(CNES)

18 Avenue Edouard Belin,
31400 TOULOUSE
aurelie.strzepek@cnes.fr

AMIOT Thierry

Centre National d'Etudes Spatiales
(CNES)

18 Avenue Edouard Belin,
31400 TOULOUSE
thierry.amiot@cnes.fr

CHEYMOL Cécile

Centre National d'Etudes Spatiales
(CNES)

18 Avenue Edouard Belin,
31400 TOULOUSE
cecile.cheymol@cnes.fr

GILLOT Laurène

Centre National d'Etudes Spatiales
(CNES)

18 Avenue Edouard Belin,
31400 TOULOUSE
laurene.gillot@cnes.fr

Résumé — Présentant des particularités singulières, le domaine du spatial implique d'adapter constamment et au plus proche du besoin les exigences de sûreté de fonctionnement et leur prise en compte. L'arrivée massive des missions en constellation portées par une dynamique New Space oblige notamment à revoir les méthodologies et outils utilisés pour intégrer la sûreté de fonctionnement dans le processus de développement des systèmes spatiaux. La sûreté de fonctionnement doit ainsi adapter ses méthodes d'intervention pour s'intégrer dans les nouveaux schémas « faibles coûts » et « planning de développement réduit ». Cet article démontre comment la sûreté de fonctionnement, prise en compte dès les phases amont de conception sur ce type de projet, permet d'anticiper le cycle de vie des satellites et maîtriser les coûts associés. La méthodologie, basée sur une modélisation globale du système (lanceurs et satellites) intégrant les caractéristiques de sûreté de fonctionnement et utilisant les réseaux de Petri, permet de dimensionner la constellation au plus près du besoin mission.

Mots-clefs - New Space, MBSA, Réseaux de Petri, Constellation, Stratégie de Déploiement

Abstract— Presenting singular characteristics, the space field implies constantly and as close as possible from the needs, adapting the RAMS requirements and their implementation. The massive arrival of constellation missions driven by a New Space dynamic requires in particular a review of the methodologies and tools used to integrate operational safety into the development process of space systems. Dependability must therefore adapt its intervention methods to fit into the new “low cost” and “reduced development schedule” schemes. This article demonstrates how dependability, taken into account from the upstream design phases on this type of project, makes it possible to anticipate the life cycle of satellites and control the associated costs. The methodology, based on a global modeling of the system (launchers and satellites) integrating the characteristics of dependability and using the Petri nets, makes it possible to size the constellation as close as possible to the mission needs.

Keywords - New Space, MBSA, Petri Nets, Constellation, Deployment Strategy

I. INTRODUCTION

Le domaine spatial se démarque des autres domaines d'application de la sûreté de fonctionnement de par l'accessibilité des systèmes en opération. Dans la plupart des cas, toute maintenance préventive ou corrective est actuellement impossible sur des satellites en orbite. Néanmoins les exigences de durée de vie des systèmes ainsi que la fiabilité attendue restent très élevées. Dans ce contexte, pour s'assurer de la conformité aux exigences, on constate que les projets dits « classiques », qui basent leurs analyses sur des méthodologies conservatives (ex : MIL-HDBK-217F-Notice2), ont tendance à surdimensionner les architectures et les redondances. Bien entendu, ces choix de

conception ont un impact majeur sur les coûts à achèvement des projets.

Dans un contexte New Space où la dynamique projet vise à réduire les coûts et contracter les plannings, il est indispensable de revoir les méthodes d'intervention de la sûreté de fonctionnement pour concilier les différentes contraintes. L'émergence de projets en constellation impose de revisiter les chronologies d'intervention de l'ingénieur SdF en proposant des analyses très en amont des phases de conception pour anticiper le cycle de vie des satellites, le cycle de vie de la constellation elle-même et ainsi maîtriser les coûts.

Cet article vise à présenter la méthodologie basée sur des modèles de simulation mise en place sur le projet SMASH (« Small Altimetry Satellites for Hydrology ») dès la phase A de développement projet.

II. LA MISSION SMASH

A. Contexte

Les eaux continentales sont une composante essentielle des cycles de l'eau, de l'énergie et du carbone et leur observation est donc cruciale. En outre, les ressources en eau sur les continents sont et continueront à être particulièrement affectées par le changement climatique et l'impact anthropique. Les élévations de la surface des rivières et des lacs font partie des variables climatiques essentielles, telles que définies par le Global Climate Observing System (GCOS) qui recommande leur observation avec une périodicité journalière.

Sur le plan sociétal, les eaux de surface sont la source d'eau la plus utilisée pour les usages domestiques, agricoles et industriels. Enfin, les crues/sécheresses peuvent fortement impacter les sociétés humaines. La disponibilité de mesures journalières à l'échelle globale est la clé qui permettra l'émergence d'applications et de services de grande valeur sociétale en cette époque où la gestion de la ressource en eau à l'échelle mondiale représente d'ores et déjà un défi majeur qui prendra de plus en plus d'ampleur dans les décennies à venir.

C'est dans ce contexte que la mission SMASH propose de fournir ces mesures altimétriques journalières sur l'ensemble des lacs et rivières du globe. La combinaison de mesures à « haute fréquence temporelle / faible fréquence spatiale » provenant de la mission SMASH avec celles des missions d'altimétrie à fauchée (SWOT, etc.) qui offrent « haute fréquence spatiale / faible fréquence temporelle » ouvrira des champs d'investigations et d'applications encore inexplorés.

Néanmoins l'obtention de mesures à « haute fréquence temporelle » passe par le déploiement d'une constellation qui n'est envisageable que si l'altimètre est à bas coût, simple à opérer, compact et peu consommant et donc embarqué sur un nanosatellite.

B. Présentation de la Mission

Le principe de la mesure est le suivant : le radar embarqué émet des impulsions dans la direction du nadir satellite, impulsions qui sont rétrodiffusées notamment par les surfaces en eau survolées. Les échos captés par l'instrument sont alors échantillonnés, numérisés et enregistrés par l'instrument. Un traitement sol spécifique de ces échos (appelés « formes d'onde ») permet de remonter au paramètre R (Range) puis, par la localisation précise du satellite, au paramètre WSE (Water Surface Elevation) renseignant la hauteur des eaux sur la zone survolée.

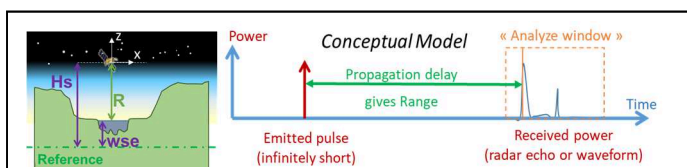


Fig. 1. Principe de la mesure

Ainsi l'altimètre peut mesurer la hauteur des eaux de n'importe quelle surface d'eau suffisamment étendue (typiquement des rivières de plus de 50m de largeur ou des lacs de plus de 100m de côté) dès lors qu'elle est présente sous la trace du satellite. L'utilisation d'une orbite cyclée et la distribution de satellites altimétriques le long de cette orbite permet de rendre l'information de hauteur d'eau accessible de manière périodique et fréquente sur les zones survolées. Les points de mesures qui sont les croisements entre les traces satellites et les corps en eau sont appelés des stations virtuelles (Virtual Station VS). Grâce à la constellation SMASH, il sera ainsi possible de suivre de manière journalière l'évolution de la hauteur d'eau de ces stations virtuelles.

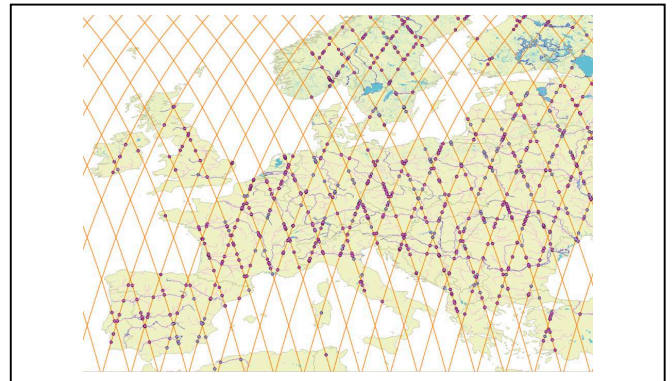


Fig. 2. Exemple de cartographie des Stations Virtuelles sur rivière

III. ANALYSE PAR MODELISATION

A. Objectifs

L'étude menée visait à définir et analyser des scénarii de déploiement de la constellation SMASH permettant d'évaluer les impacts des hypothèses de travail (nombre de satellites dans la constellation, options de déploiement des satellites en réserve, fiabilité, disponibilité, ...) sur les performances attendues du système. L'objectif était de donner au projet SMASH la visibilité sur les performances du système en fonction des choix de déploiements retenus et des hypothèses de sûreté de fonctionnement établies (taux de panne, fiabilité, durée de vie, ...).

La méthode consiste à définir des modèles qui rendent paramétrables les hypothèses de déploiement. Grâce à un outil de simulation, l'évolution de la constellation (vieillesse, renouvellement, disponibilité...) est analysée afin de déterminer un optimum de déploiement qui minimise les coûts du programme en maximisant les caractéristiques du système en terme de performances et de sûreté de fonctionnement.

B. L'outil de modélisation

Pour conduire ces analyses, l'outil de sûreté de fonctionnement GRIF (Graphiques Interactifs pour la Fiabilité [1]) a été retenu. GRIF est une plate-forme logicielle d'analyse des systèmes qui permet de déterminer les indicateurs fondamentaux de la sûreté de fonctionnement que sont la Fiabilité, la Disponibilité, la Performance et la Sécurité. GRIF laisse le choix à l'utilisateur d'opter pour la technique de modélisation la plus adéquate à la résolution du système étudié : blocs diagrammes, arbres de défaillance, graphes de Markov ou réseaux de Petri. Développé au sein de TotalEnergies, GRIF bénéficie de plus de 30 ans de Recherche et Développement. Cette plate-forme dispose ainsi de moteurs de calcul matures, très performants et aux capacités de

modélisation propres à répondre aux besoins de l'ensemble des études fiabilistes.

GRIF est structuré autour de 3 packages : le package Booléen, le package Markovien et le package Simulation dans lequel se trouve le module Petri qui a été utilisé au cours de cette phase de développement du projet. Le module Petri permet la modélisation des grands systèmes industriels complexes grâce aux « Réseaux de Petri stochastiques à Prédicats ». Ce module s'appuie sur Moca-RP (pour MONte-CARlo – Réseaux de Petri), propriété de TotalEnergies, un moteur de calcul ultra rapide basé comme son nom l'indique sur la simulation de Monte-Carlo, qui repousse les limites de la modélisation.

La saisie des réseaux de Petri (RdP) est très simple et s'appuie sur une interface graphique intuitive. Elle permet la création de places, transitions, arcs, jetons... et de tous types de variables mathématiques et opérateurs logiques (OR, AND, If-Then-Else, Min (), Max (...)). Ces variables matérialisent des indicateurs et permettent d'agir sur la validation (prédicats) des transitions, elles peuvent aussi être modifiées lors des tirs des transitions (affectations).

La grande force des réseaux de Petri stochastiques à prédicats et assertions réside autant dans leur puissance de modélisation que dans leur faculté à décrire à la fois la partie dysfonctionnelle d'une installation (les pannes de ses composants) et la partie fonctionnelle.

IV. MODELISATION DU SYSTEME

Dans un contexte, relativement nouveau pour le CNES, de dimensionnement et déploiement d'une constellation, l'utilisation d'une méthodologie basée sur de la modélisation du système constitue une volonté affichée d'ouvrir la voie à une méthode dynamique pour le développement des projets depuis la phase A de définition de la mission jusqu'à la phase F de retrait de service.

C'est ainsi que, dans le cadre du projet SMASH, un scénario de référence a été défini. Celui-ci s'articule autour de trois parties :

- Une partie « stratégie de lancement » qui traite des spécificités de mise en orbite et de gestion du stock,
- Une partie « satellite » qui adresse les spécificités d'un satellite de la constellation (i.e. fiabilité, état ON/OFF des équipements, usure, ...),
- Une partie « constellation » qui adresse les caractéristiques de la constellation en termes de disponibilité et de maintenance.

Ces modèles, dans un premier temps, basiques pour adresser les caractéristiques de haut niveau du système, ont été enrichis au fur et à mesure de l'étude. Les discussions avec les experts ainsi que la définition de nouveaux besoins d'analyse ont conduit à les affiner au cours des 18 mois d'étude. Chacun des incréments se sont basés sur les travaux antérieurs et ont apporté des compléments aux résultats produits. Les modèles présentés ici constituent les sorties de la phase A et pourront être directement injectés dans les études de phase B.

A. Définition du sous modèle « Stratégie de lancement »

Afin de modéliser les stratégies de lancement, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Une simulation commence par une demande de déploiement de la constellation en supposant que les satellites à déployer sont tous prêts à être lancés,
- Le choix du type de lanceur est défini dans le scénario. Il peut être monotype (ex : Electron) ou bi-type (ex : Vega/Electron) en fonction des configurations,
- Chaque lancement est soumis à un délai de lancement représentant le temps simulant les activités préparatoires au lancement (Mise en configuration du pas de tir, Qualification, Opérations préalables au lancement, ...),
- Chaque lancement répond à une loi de probabilité de succès du lancement dépendant du type de véhicule,
- En cas de succès, x satellites (x dépendant de la capacité d'emport du véhicule utilisé) sont placés en orbite,
- En cas d'échec, un nouveau déploiement est programmé et soumis à des délais de production de nouveaux satellites.
- Une fois en orbite, les satellites rejoignent un stock en orbite qui va alimenter la constellation :
 - Les 10 premiers permettront la mise en service nominal de la constellation,
 - Les suivants permettront de palier à des défaillances ou des fins de vie.
- Un réapprovisionnement de la constellation peut être forcé sans attendre l'atteinte des conditions de renouvellement automatique du stock.
- Pour les activités de réapprovisionnements, 2 chaînes de production de satellites sont simulées afin de paralléliser les activités si les conditions de simulation le nécessitent.

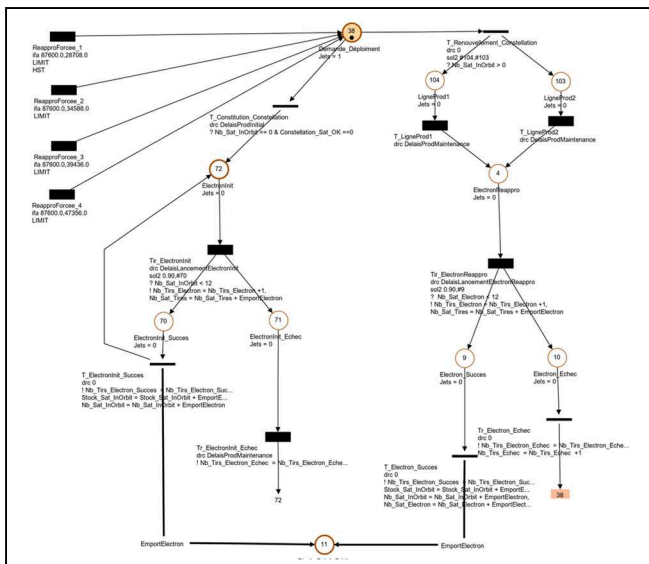


Fig. 3. Exemple de sous-modèle Stratégie de lancement dans le cas d'un lanceur mono-type (Electron)

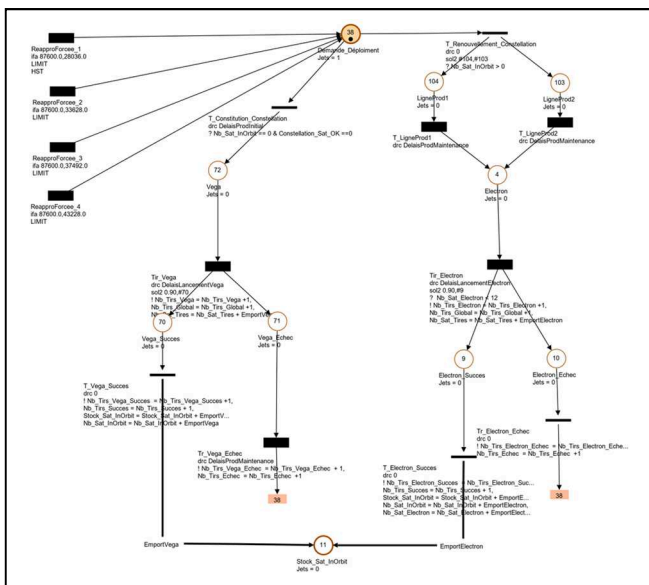


Fig. 4. Exemple de sous-modèle Stratégie de lancement dans le cas d'un lanceur bi-type (VEGA puis Electron)

B. Définition du sous modèle « Satellite »

- Chaque simulation des modèles de satellites commence avec un jeton dans l'état NOK, le satellite n'est pas opérationnel. La bascule vers l'état OK ne peut se faire qu'après un délai de reconfiguration paramétrable (représentant le délai de réaction du sol en cas de détection d'anomalies critiques pour effectuer un remplacement de satellite) et si un satellite est disponible dans le stock en orbite.
- Une fois dans l'état OK, à chaque pas de simulation, quatre tirages ont lieu :
 - Le premier pour déterminer l'état du satellite (opérationnel ou non-opérationnel). La bascule vers un état opérationnel se fait avec un délai paramétrable (DelaisRedeploiement) de X jours permettant de simuler les manœuvres nécessaires pour atteindre l'orbite mission et/ou les activités de mise ON des équipements si le

nombre de satellites opérationnels dans la constellation est inférieur à 10 satellites. Dans les cas contraires, le satellite reste dans l'état non-opérationnel faisant partie du Stock en orbite.

- Les deuxièmes et troisièmes transitions sont conditionnées par l'état du satellite et permettent de simuler l'impact de la fiabilité du satellite en tenant compte de l'état ON/OFF de celui-ci. Celle-ci est modélisée au travers d'un lambda équivalent représentant la fiabilité Plateforme et la fiabilité Charge Utile sous forme d'une loi exponentielle. La fiabilité dans le cas d'un équipement OFF est égale au Lambda équivalent divisé par 10. Ainsi, quel que soit l'état du satellite (dans la constellation opérationnelle ou dans le stock), il est possible de simuler les conséquences de la fiabilité, c'est à dire la probabilité de rencontrer une défaillance au cours de la mission.
- La quatrième transition pour simuler l'usure du satellite. Celle-ci est modélisée au travers d'une loi normale caractérisée par sa moyenne et son écart type. L'usure caractérise la durée de vie du satellite qui est conditionnée par des consommables (ex : ergols, ...) ou des quantités de doses cumulées.

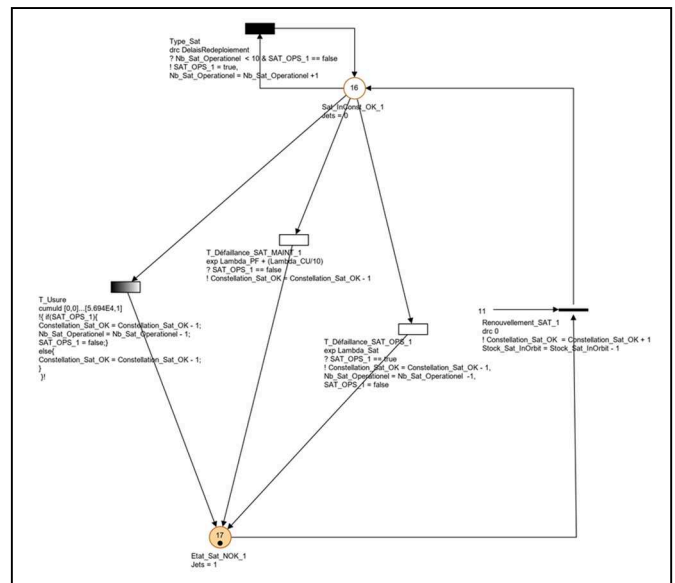


Fig. 5. Sous-modèle Satellite

C. Définition du sous modèle « Constellation »

Le modèle Constellation n'est qu'une instantiation de 24 sous-modèles « Satellite », chacun répondant aux caractéristiques du paragraphe précédent. 24 est la quantité maximale de satellites pouvant être mis en orbite simultanément en fonction des capacités des lanceurs retenus. Ce choix de modélisation permet de simuler l'impact du vieillissement en orbite de l'ensemble des satellites lancés. Grâce à ce modèle, il est possible de déterminer :

- La disponibilité préliminaire du système correspondant à 10 satellites fonctionnant de manière opérationnelle simultanément.

- La disponibilité préliminaire dégradée qui correspond à un service opérationnel constitué des 9, 8, 7, 6 ou 5 satellites.

Ce modèle est utilisé pour déterminer la disponibilité de la constellation en post-traitement à partir des résultats de simulation.

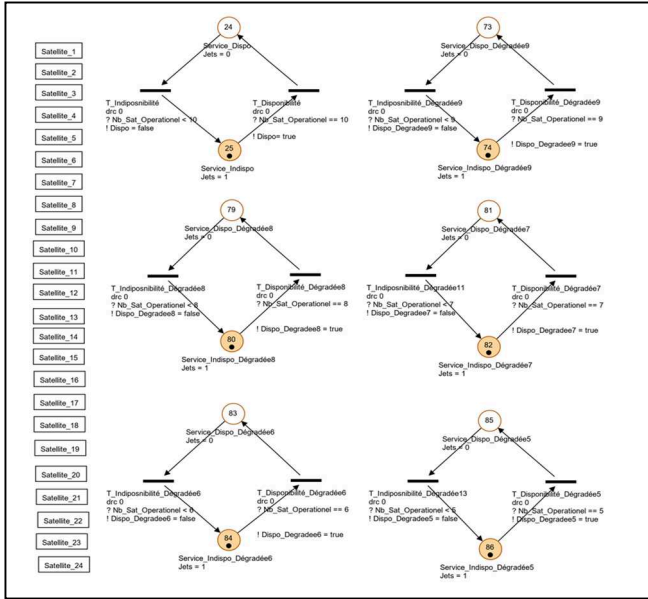


Fig. 6. Sous-modèle Constellation

V. PRESENTATION DES RESULTATS

Cette étude qui s'est déroulée sur 18 mois a permis d'analyser plusieurs dizaines de scénarii de déploiement de la constellation. Tous ces scénarii ont été exploités mais certains ne constituaient que des étapes intermédiaires vers les résultats finaux. Au fur et à mesure de l'avancée des travaux et en concertation avec l'équipe projet, il a été possible d'extraire des configurations jugées pertinentes dont les résultats constituent des hypothèses de travail sérieuses pour élaborer la stratégie de déploiement de la constellation et sa maintenance.

A. Paramétrage :

Avant d'exécuter un scénario, il est indispensable de définir une série de paramètres qui répondent aux spécificités des configurations en cours d'analyse. Les caractéristiques suivantes sont à paramétrer :

Liste des paramètres	
Nom	Description
Lambda_PF	Correspond à la fiabilité de la PlateForme (PF)
Lambda_CU	Correspond à la fiabilité de la Charge Utile (CU)
DelaisLancement Vega	Correspond aux délais entre le choix du type de lanceur et le lancement effectif du véhicule de type Vega
DelaisLancement Electron	Correspond aux délais entre le choix du type de lanceur et le lancement effectif du véhicule de type Electron
DelaisProdInitial	Correspond aux délais de production des satellites de la constellation lors de son déploiement
DelaisProdMaintenance	Correspond aux délais de production des satellites de la constellation lors de son renouvellement ou en cas d'échec au lancement
EmportVega	Correspond au nombre de satellites mis en orbite lors d'un lancement d'un Vega

Liste des paramètres	
Nom	Description
EmportElectron	Correspond au nombre de satellites mis en orbite lors d'un lancement d'un Electron
UsureSatellites	Correspond à la durée de vie du satellite (simulée sous la forme d'une loi normale)
DuréeMission	Correspond à la durée de la mission pour la constellation
DelaisRedeploiement	Correspond au temps nécessaire pour faire passer un satellite d'une configuration stand-by (en stock en orbite) à une configuration opérationnelle

TABLE I. LISTE DES PARAMETRES DU MODELE

B. Variables exploitables :

Chaque scénario produit les informations suivantes :

Liste des sorties exploitables	
Nom	Description
Nombre de Tirs	Correspond au nombre total de tirs nécessaires pour assurer l'exploitation de la mission sur toute sa durée. <i>Ce nombre n'est pas entier car il tient compte de la statistique d'échecs au lancement.</i>
Echec de Tirs	Correspond au nombre de tirs en échec sur l'ensemble de la mission. Ceci est une évaluation statistique à partir des probabilités de réussites des différents lanceurs candidats.
Nbre Lancement VEGA	Correspond au nombre de tirs VEGA nécessaires pour assurer l'exploitation de la mission sur toute sa durée (10 ans). <i>Ce nombre n'est pas entier car il tient compte de la statistique d'échecs au lancement.</i>
Nbre Lancement Electron	Correspond au nombre de tirs ELECTRON nécessaires pour assurer l'exploitation de la mission sur toute sa durée (10 ans). <i>Ce nombre n'est pas entier car il tient compte de la statistique d'échecs au lancement.</i>
Nbre de Satellites à produire	Correspond au nombre total de satellites à produire pour fournir un service sur toute la durée mission (10 ans). <i>Ce nombre n'est pas entier car il tient compte de la statistique d'échecs au lancement.</i>
Dispo(10Sats)@X ans	Correspond à la disponibilité du service, accessible quand 10 satellites sont opérationnels dans la constellation. Ce paramètre est défini comme étant le temps cumulé durant lequel 10 satellites sont opérationnels simultanément divisé par le temps mission considéré (ici X ans) moins le temps nécessaire à la mise à poste de la constellation.
Dispo Dégradée(9Sats) @ Y ans	Correspond à la disponibilité du service dégradé, accessible quand au moins 9 satellites sont opérationnels dans la constellation. Ce paramètre est défini comme étant le temps cumulé durant lequel 9 satellites sont opérationnels simultanément divisé par le temps mission considéré (ici Y ans) moins le temps nécessaire à la mise à poste de la constellation.
Dispo Dégradée(8Sats) @ Y ans	Correspond à la disponibilité du service dégradé, accessible quand au moins 8 satellites sont opérationnels dans la constellation. Ce paramètre est défini comme étant le temps cumulé durant lequel 8 satellites sont opérationnels simultanément divisé par le temps mission considéré (ici Y ans) moins le temps nécessaire à la mise à poste de la constellation.
Dispo Dégradée(7Sats) @ Y ans	Correspond à la disponibilité du service dégradé, accessible quand au moins 7 satellites sont opérationnels dans la constellation. Ce paramètre est défini comme étant le temps cumulé durant lequel 7 satellites sont opérationnels simultanément divisé par le temps mission considéré (ici Y ans) moins le temps nécessaire à la mise à poste de la constellation.

Liste des sorties exploitables	
Nom	Description
Dispo Degradée(6Sats) @Y ans	Correspond à la disponibilité du service dégradé, accessible quand au moins 6 satellites sont opérationnels dans la constellation. Ce paramètre est défini comme étant le temps cumulé durant lequel 6 satellites sont opérationnels simultanément divisé par le temps mission considéré (ici Y ans) moins le temps nécessaire à la mise à poste de la constellation.
Dispo Degradée(5Sats) @Y ans	Correspond à la disponibilité du service dégradé, accessible quand au moins 5 satellites sont opérationnels dans la constellation. Ce paramètre est défini comme étant le temps cumulé durant lequel 5 satellites sont opérationnels simultanément divisé par le temps mission considéré (ici Y ans) moins le temps nécessaire à la mise à poste de la constellation.
Constellation_Sat_OK	Correspond à l'instant t au nombre de satellites fonctionnels dans la constellation

TABLE II. LISTE DES SORTIES DU MODELE

C. Exemples de résultats :

Grâce à ces modèles, il a été possible de caractériser :

- Une exploitation de la constellation à partir d'un lanceur VEGA pour la mise en orbite initiale et des lanceurs Electron pour le renouvellement de la constellation,
- Une exploitation de la constellation en utilisant uniquement des lanceurs Electron,
- L'évolution de la constellation une fois la mise à poste faite à partir d'un lanceur VEGA sans considérer d'opérations de renouvellement de celle-ci,
- L'impact d'un renouvellement programmé pour déterminer la date permettant de réduire les consommables,
- Les impacts d'un renouvellement à fréquence prédéfinie,
- Une configuration opérationnelle analysant l'exploitation de la constellation à partir d'une mise à poste initiale faite avec un lanceur VEGA ou 4 lanceurs ELECTRON puis un renouvellement supervisé avec des lanceurs ELECTRON pour ne jamais disposer de moins de 9 satellites opérationnels.

A titre d'exemple et pour illustrer les informations disponibles en sortie d'analyse, les résultats partiels de cette dernière configuration sont présentés par la suite.

Pour rappel, ce scénario explore la disponibilité du service proposé par la constellation SMASH en considérant une mise à poste initiale de 12 satellites effectuée par un lanceur VEGA puis un renouvellement planifié afin de ne jamais disposer de moins de 9 satellites opérationnels dans la constellation. On explore ici les disponibilités de service en considérant 2, 3 ou 4 réapprovisionnements soit 6, 9 ou 12 satellites mis en orbite avec des lanceurs ELECTRON.

Les paramètres suivants ont été positionnés :

Paramétrage du modèle	
Nom	Description
Lambda_PF	5000 Fits
Lambda_CU	1951 Fits
DelaisLancementVega	3 mois
DelaisLancementElectron	2 mois
DelaisProdInitial	0 mois
DelaisProdMaintenance	12 mois
EmportVega	12 Satellites
EmportElectron	3 Satellites
UsureSatellites	5 ans
DuréeMission	10 ans
DelaisRedeploiement	20 jours

TABLE III. PARAMETRAGE D'UNE CONFIGURATION OPERATIONNELLE

L'ensemble des simulations est exécuté sur une période de 10 ans, 100 000 fois pour pouvoir extraire une tendance statistique. Les résultats suivants sont obtenus :

Variables	2 réappro	3 réappro	4 réappro
Nbre de satellites à produire	20,02	23,35	26,68
Nombre de Tirs (Lancements)	3,33	4,44	5,56
Dispo (10 sats) @3ans	81%	81%	81%
Dispo Degradée (9 sats) @3ans	90%	90%	90%
Dispo Degradée (8 sats) @3ans	93%	93%	93%
Dispo Degradée (7 sats) @3ans	93%	93%	93%
Dispo Degradée (6 sats) @3ans	93%	93%	93%
Dispo Degradée (5 sats) @3ans	93%	93%	93%
Dispo (10 sats) @5ans	71%	71%	71%
Dispo Degradée (9 sats) @5ans	86%	86%	86%
Dispo Degradée (8 sats) @5ans	92%	92%	92%
Dispo Degradée (7 sats) @5ans	95%	95%	95%
Dispo Degradée (6 sats) @5ans	96%	96%	96%
Dispo Degradée (5 sats) @5ans	96%	96%	96%
Dispo (10 sats) @8ans	48%	51%	66%
Dispo Degradée (9 sats) @8ans	60%	71%	83%
Dispo Degradée (8 sats) @8ans	66%	85%	91%
Dispo Degradée (7 sats) @8ans	70%	92%	95%
Dispo Degradée (6 sats) @8ans	83%	96%	96%
Dispo Degradée (5 sats) @8ans	92%	97%	97%
Dispo (10 sats) @10ans	38%	41%	60%
Dispo Degradée (9 sats) @10ans	47%	58%	78%
Dispo Degradée (8 sats) @10ans	52%	72%	87%

Variables	2 réappros	3 réappros	4 réappros
Dispo Dégradée (7 sats) @10ans	56%	83%	93%
Dispo Dégradée (6 sats) @10ans	68%	90%	96%
Dispo Dégradée (5 sats) @10ans	81%	94%	97%

TABLE IV. RESULTATS EN CONSIDERANT UNE DUREE DE VIE SATELLITE DE 5ANS

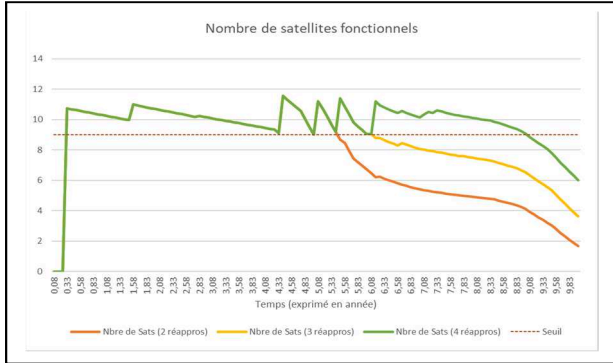


Fig. 7. Evolution du nombre de satellites fonctionnels dans la constellation

En modifiant la durée de vie des satellites (Usure des Satellites égale à 8 ans), les résultats tendent vers :

Variables	2 réappros	3 réappros	4 réappros
Nbre de satellites à produire	19,99	23,3	26,26
Nombre de Tirs (Lancements)	3,32	4,43	5,41
Dispo (10 sats) @3ans	82%	82%	82%
Dispo Dégradée (9 sats) @3ans	91%	91%	91%
Dispo Dégradée (8 sats) @3ans	93%	93%	93%
Dispo Dégradée (7 sats) @3ans	93%	93%	93%
Dispo Dégradée (6 sats) @3ans	93%	93%	93%
Dispo Dégradée (5 sats) @3ans	93%	93%	93%
Dispo (10 sats) @5ans	70%	70%	70%
Dispo Dégradée (9 sats) @5ans	85%	85%	85%
Dispo Dégradée (8 sats) @5ans	92%	92%	92%
Dispo Dégradée (7 sats) @5ans	95%	95%	95%
Dispo Dégradée (6 sats) @5ans	96%	96%	96%
Dispo Dégradée (5 sats) @5ans	96%	96%	96%
Dispo (10 sats) @8ans	70%	70%	70%
Dispo Dégradée (9 sats) @8ans	86%	86%	86%
Dispo Dégradée (8 sats) @8ans	93%	93%	93%
Dispo Dégradée (7 sats) @8ans	96%	96%	96%
Dispo Dégradée (6 sats) @8ans	97%	97%	97%
Dispo Dégradée (5 sats) @8ans	97%	97%	97%
Dispo (10 sats) @10ans	59%	61%	68%

Variables	2 réappros	3 réappros	4 réappros
Dispo Dégradée (9 sats) @10ans	73%	79%	84%
Dispo Dégradée (8 sats) @10ans	80%	89%	92%
Dispo Dégradée (7 sats) @10ans	85%	95%	96%
Dispo Dégradée (6 sats) @10ans	90%	97%	97%
Dispo Dégradée (5 sats) @10ans	95%	98%	98%

TABLE V. RESULTATS EN CONSIDERANT UNE DUREE DE VIE SATELLITE DE 8ANS

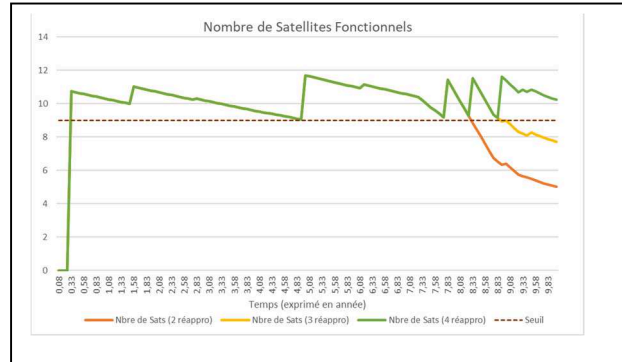


Fig. 8. Evolution du nombre de satellites fonctionnels dans la constellation

Des résultats partiels de l'analyse produite pour le projet SMASH sont présentés ici. Néanmoins, ceux-ci montrent que cette méthode permet de mettre à disposition des équipes techniques une quantité d'informations à forte valeur ajoutée, générées par les modèles et permettant :

- De caractériser les paramètres critiques du système,
- De produire des courbes de tendance,
- D'analyser rapidement de multiples configurations de déploiement en vue de sélectionner la plus optimisée.

D. Conclusion

Cette nouvelle méthode d'analyse aura permis de prédire et mettre en évidence l'évolution de la constellation SMASH au cours de la mission en tenant compte, entre autres choses, des caractéristiques de fiabilité et de vieillissement de ses satellites. Les scénarii successifs étudiés aux cours de la phase A ont permis d'affiner une stratégie de lancement réduisant considérablement le nombre de satellites à produire. Les conclusions de cette analyse permettent ainsi de justifier des stratégies de déploiement et de maintien en conditions opérationnelles grâce à une étude comparative exhaustive de l'ensemble des options possibles. Ainsi, la prise de décision se fait en ayant préalablement quantifier les performances de la constellation, les impacts de la fiabilité du système et le chiffrage des coûts à achèvement.

Enfin, même s'il s'agit de disponibilités préliminaires (seuls les aspects bord et lanceurs ont été considérés), les conclusions affichées constituent une base solide pour l'élaboration des études de fiabilité et de disponibilité qui seront établies en phase B. L'ensemble des scénarii d'analyse étant complètement paramétrables, ces résultats pourront

facilement être mis à jour lors de chacune des phases ultérieures du projet.

REFERENCES

- [1] TotalEnergies, « GRIF 2021 Réseaux à Petri à prédicats », Manuel utilisateur, version 7 mai 2021.