

EVALUATION ET OPTIMISATION DE SYSTEMES PAR LES MODELES DE SIMULATION RECURSIVE

A. Cabarbaye, J. Faure, R. Lulheret
Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)
18, avenue Edouard Belin 31401 Toulouse
prenom.nom@cnes.fr

A. Cabarbaye
CAB INNOVATION
3, rue de la Coquille - 31500 Toulouse
andre.cabarbaye@cabinnovation.fr

Résumé

Cette communication porte sur une méthode de simulation des systèmes à états discrets basée sur la récursivité. Illustrée par quelques applications représentatives du domaine spatial, cette technique originale de modélisation et d'évaluation a un pouvoir de représentation comportementale similaire à celui des réseaux de Petri stochastiques. Elle peut être couplée à des outils d'optimisation sans conduire à des durées de traitement rédhibitoires, afin de rechercher automatiquement des configurations optimales des systèmes étudiés.

Summary

This communication relates to a method of simulation of the discrete states systems based on the recursivity. Illustrated by some applications representative of the space field, this original technique of modelling and evaluation has a capacity of behavioural representation similar to that of the stochastic Petri nets. It can be coupled with tools for optimization without leading to crippling processing durations, in order to automatically seek optimal configurations of the studied systems.

Introduction

Si diverses méthodes d'évaluation de la sûreté de Fonctionnement existent, aucune ne présente un caractère générique lui permettant de répondre de manière satisfaisante à tout les types de problématique rencontrés. Chacune de ces méthodes recouvre une technique de modélisation (Bloc Diagramme de Fiabilité, arbre de fautes, graphe de Markov, Réseaux de Petri..) associée à une l'une des trois méthodes de traitement que sont le calcul analytique, la résolution d'équation différentielles ou la simulation de Monte-Carlo.

Outre les phénomènes de mode ou intérêt partisan, un choix s'impose donc à l'analyste pour résoudre efficacement son problème sans risquer de se retrouver dans une impasse.

Nous rappellerons ici que la simulation de Monte-Carlo possède le domaine d'application le plus étendu mais est la moins précise et la moins rapide des trois méthodes de traitement (même si les techniques de réduction de variance sont parfois bénéfiques), ce qui restreint son usage dans le domaine de la sécurité et limite les possibilités de couplage avec des outils d'optimisation.

De mêmes il apparaît nécessaire de rappeler que la technique de modélisation doit avoir la capacité de représenter le comportement du système au niveau d'abstraction pertinent pour l'analyse (sans détail inutile), mais être la plus simple possible pour éviter les erreurs de représentation qui sont malheureusement fréquentes quand les systèmes se complexifient. Il apparaît donc inopportun, par exemple, de traiter par réseau de Petri une redondance que l'on peut représenter simplement par un Bloc Diagramme de Fiabilité, notamment si le modèle comportemental doit être validé par un concepteur non spécialisé.

Utilisée dans certains modèles de prévision économique [4] ou environnementale [1], la récursivité permet de simplifier les modèles comportementaux de systèmes à états discrets mais semble curieusement peu exploitée dans le domaine de la fiabilité. Ces modèles se contentent de décrire une transition générique entre deux instants courants t et $t + \Delta t$, correspondant à une incrémentation temporelle (simulation-temps) ou à l'occurrence d'événements particuliers (simulation-événement). Ces événements peuvent correspondre à des changements déterministes ou aléatoires d'état du système (panne, réparation...) ou au franchissement de seuils par des variables continues dans le cas des systèmes hybrides, caractérisés par des dépendances entre variables continues et stochastiques [2][3][5]. Le traitement du modèle de simulation récursive consiste à réinjecter en entrée, l'état du système en sortie, à partir d'un état initial, autant de fois qu'il est nécessaire pour couvrir la période d'observation choisie.

Au travers d'applications du domaine spatial, cette communication a pour objet de montrer l'apport de la récursivité à l'évaluation et à l'optimisation de systèmes divers, notamment vis-à-vis de la Sûreté de Fonctionnement. Elle constitue une alternative à l'utilisation d'autres techniques de modélisation et d'évaluation,

telles que les réseaux de Petri, qui utilisent un formalisme particulier et ne permet pas toujours de résoudre les problèmes rencontrés de manière satisfaisante.

Modèle de simulation récursive

Cette technique de modélisation des systèmes à états discrets est supportée par un outil générique de simulation (SIMCAB) de la société CAB INNOVATION.

Mise en oeuvre

Fonctionnant sous Excel, le principe de l'outil SIMCAB est illustré en figure 1.

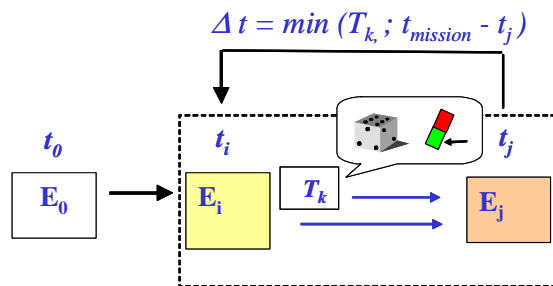


Figure 1. Modèle de simulation récursive

Le modèle de simulation récursive décrit une transition générique entre les états E_i (à t_i) et E_j (à t_j). La simulation effectuée par l'outil consiste alors à recopier un certain nombre de fois l'état E_j , défini dans une plage de cellules de tableau, dans l'état E_i , défini dans une plage similaire, pendant toute la mission, en partant d'un état initial E_0 (à t_0), défini par ailleurs. L'incrément de temps considéré Δt entre t_i et t_j , correspondant à la durée séparant l'occurrence de deux événements successifs, est la plus petite valeur calculée, à l'instant courant, parmi divers incréments de temps T_k , définis dans une autre plage de cellules. Ces durées avant changement d'état sont définies au moyen d'expressions logiques, de calcul ou de fonctions de simulation de variable aléatoire (une vingtaine de lois de probabilité, pouvant être ajustées à partir de données expérimentales, sont proposées par l'outil). L'état E_j est également défini au moyen des fonctions du tableau à partir de l'état E_i en considérant les différentes transitions possibles selon la valeur Δt .

La simulation peut être réalisée en mode pas à pas pour valider les modèles, ou durant une mission complète qui est rejouée un grand nombre de fois selon la précision attendue des résultats conformément au théorème central-limite. Les systèmes considérés peuvent être markoviens ou non-markoviens (avec ou sans conservation de la mémoire des changements d'états successifs) et éventuellement de type hybride.

A titre d'exemple, un modèle de redondance passive M parmi N avec stock de rechange de dimension S est présenté en figure 2. Ce modèle est constitué de 3 cellules de tableur correspondant au nombre d'éléments actifs (M), passifs (N-M) et en stock (S), aux instants T_0 , T_i et T_j .

Les durées avant défaillance (TTF : Time To Failure) ou de remise en état (TTR : Time To Repair) sont définies par des expressions dans lesquelles la fonction $L_Exp()$ exécute un tirage aléatoire de la loi exponentielle. L'état de la redondance à T_j dépend de son état à T_i et de l'événement survenu à $T_i + \Delta T$ (plus petite valeur de TTF ou TTR). Les reconfigurations et échanges standard ne sont autorisés que si des équipements en redondance ou en rechange sont présents. Le système est disponible tant que le nombre nécessaire d'éléments actifs est maintenu, et la disponibilité moyenne est calculée sur toute la durée de la mission.

Ce système étant markovien, son modèle est simplifié par le fait qu'il peut perdre la mémoire de tous les événements survenus avant l'instant T_i .

Pour en faciliter la validation, l'ergonomie du modèle peut être améliorée en utilisant les fonctionnalités du tableur. Ainsi les formats conditionnels permettent de colorer les cellules en fonction de leur contenu (couleur dépendant de l'état de composants par exemple) et de véritables représentations animées du système peuvent être éventuellement couplées au modèle sous forme de synoptique. L'exemple de la figure 3 représente ainsi un système hybride, proposé comme cas test par l'IMDR-ESRA [3], relatif au risque de débordement d'une cuve. L'états des constituants (pompes et vannes) et le niveau de liquide sont directement liés aux paramètres du modèle correspondant afin de pouvoir en suivre l'évolution au pas à pas.

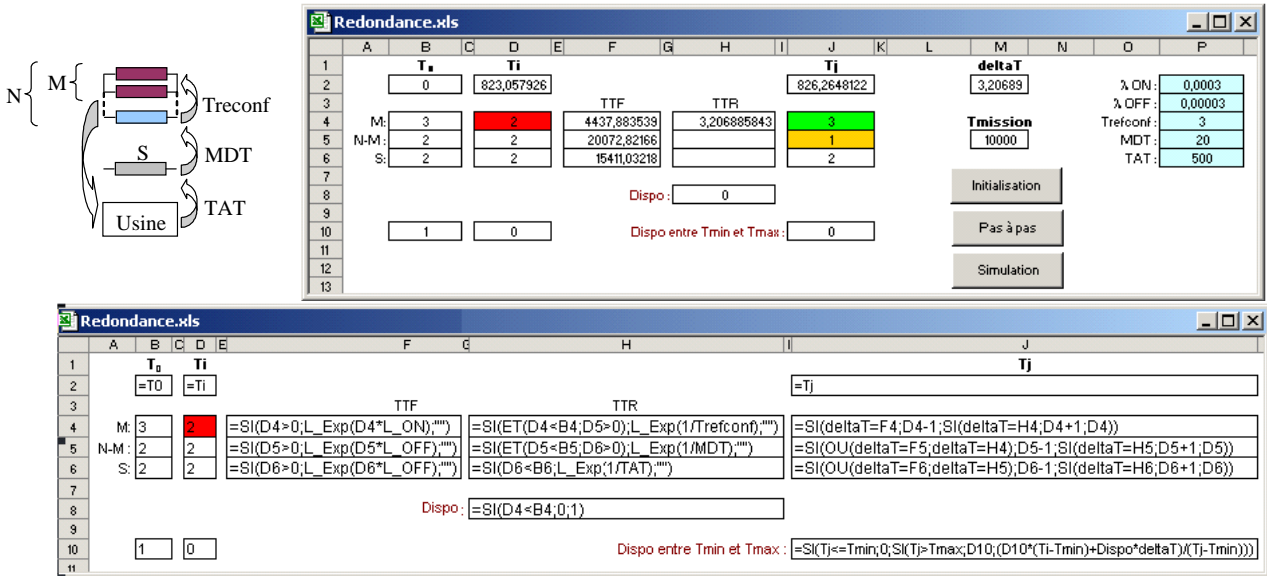


Figure 2. Modèle de redondance M parmi N avec stock de recharge de dimension S

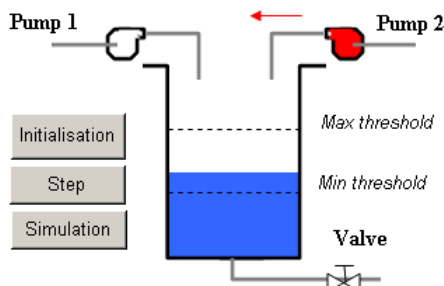


Figure 3. Animation couplée à un modèle

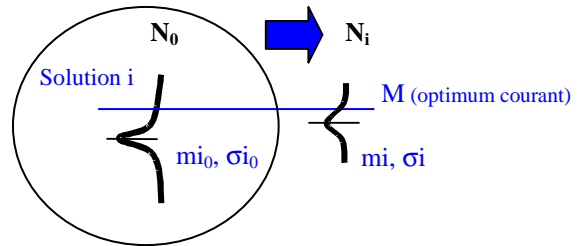


Figure 4. Principe de couplage

Cette amélioration du couplage se révèle très efficace et permet, par exemple, de diminuer les temps de calcul dans un rapport 30 environ dans le cas de 2000 simulations par évaluation.

De l'évaluation à l'optimisation

L'outil de simulation (SIMCAB) peut se coupler directement à un outil d'optimisation (GENCAB) basé sur une méthode hybride associant Algorithmes Génétiques, Evolution Différentielle et Simplexe non linéaire (algorithme de Nelder Mead). Cependant, le couplage entre optimisation et simulation stochastique, qui consiste à rechercher une configuration optimale de paramètres à partir des résultats d'une évaluation traitée par simulation de Monte-Carlo, s'avère particulièrement difficile voire rédhibitoire, car très pénalisant en termes de durée de traitement. En première approximation, le nombre de cas de simulation à réaliser est égal au nombre d'évaluations nécessaires à l'optimisation pour assurer la convergence, multiplié par le nombre de cas de simulation requis par la précision recherchée pour chacune des évaluations (soit environ $2000 * 2000 = 4$ millions pour une application typique). C'est pourquoi une technique originale de couplage a été introduite pour diminuer la durée globale des traitements [6]. Illustrée par la figure 4, le principe de base de ce couplage consiste à faire varier la précision de l'évaluation de chacune des solutions candidates (de 50 à 2000 simulations de la mission par exemple), en fonction des résultats d'une évaluation grossière menée préalablement (à 50 simulations par exemple).

Exemples d'applications

Des modèles de simulation récursive ont déjà permis de résoudre des problématiques variées du domaine spatial. A titre d'illustration, nous présenterons trois modèles représentatifs de la diversité des applications traitées.

- Un système électrique représentatif de moyens au sol (station de contrôle, etc),
- Un modèle de constellation de satellites d'observation de la terre utilisée pour la gestion de crises (séisme, tsunami, incendie...), représentatif d'un système complexe,
- Un modèle de mission de satellite scientifique utilisé pour évaluer l'impact d'événements aléatoires (pannes fugitives liées aux radiations) ou déterministes (éclipses ; occultations de senseurs...), représentatif de problématique de moyenne complexité à résoudre dans un court laps de temps.

Système électrique

Présenté en figure 5, ce système électrique est constitué de deux alimentations en redondance secourues par une batterie d'accumulateurs, d'un commutateur automatique et de deux moteurs en redondance.

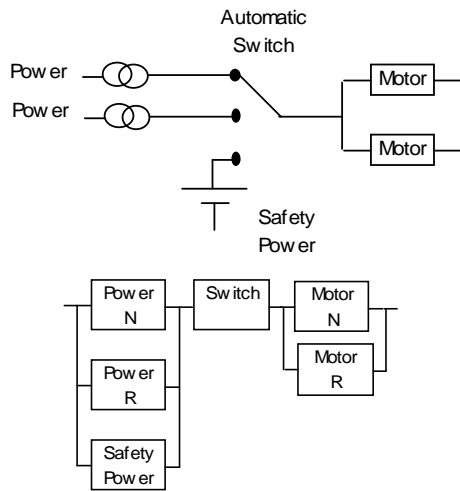


Figure 5. Système électrique

Le modèle correspondant, présenté en figure 6, permet de rechercher la configuration de 5 paramètres μ_1 (taux de réparation power), μ_2 (taux de réparation switch), τ (durée d'autonomie batterie), T (période de maintenance batterie) et m (logarithme du MTTR moteur) qui maximise la disponibilité du système pendant une durée de 10000 heures, en satisfaisant une contrainte de coût horaire ($\leq 3,6$ €/heure).

Pour les deux alimentations, les durées avant défaillance par rapport à l'instant courant T_i (TTF) et celles avant réparation (TTR) sont obtenues respectivement par tirage de lois exponentielles (fonction $L_EXP()$) de taux λ_1 et μ_1 avec absence de valeur dans les états non concernés soit «''»». L'état à T_j ne change alors que si l'une de ces deux valeurs correspond au plus petit incrément à l'instant courant (ΔT). Si la durée avant défaillance de la batterie est obtenue de la même manière, sa durée avant la prochaine réparation périodique est obtenue par l'expression « $ENT((T_i/T)+1)*T-T_i$ ». Par ailleurs, lorsque le commutateur bascule sur la batterie (position 3) et à condition que celle-ci ne soit pas en panne, un délai correspondant à la durée d'autonomie restante est initialisé à la valeur τ puis est décrémenté de ΔT à chaque transition d'état. Si l'élément sélectionné par le commutateur tombe en panne, l'état de ce dernier est défini par le tirage d'une loi binomiale ($L_BIN()$) de taux Gamma représentatif des pannes à la sollicitation. La réparation est alors régie par une loi exponentielle de taux μ_2 . Si le commutateur fonctionne et que celui-ci sélectionne la batterie ou que l'élément sélectionné tombe en panne, le commutateur bascule sur l'une des alimentations ou à défaut sur la batterie. Les durées de bon fonctionnement et de réparation des moteurs sont régies respectivement par des lois de Weibull ($L_WEI()$) et Lognormale ($L_LOG()$). Ces lois n'étant pas markoviennes, les durées ne sont tirées qu'une seule fois et initialisent un délai qui est décrémenté de ΔT à chaque transition d'état.

L'état de disponibilité du système correspond à la condition définie par le Bloc Diagramme de Fiabilité. La disponibilité moyenne durant la mission est mise à jour à chaque transition d'état.

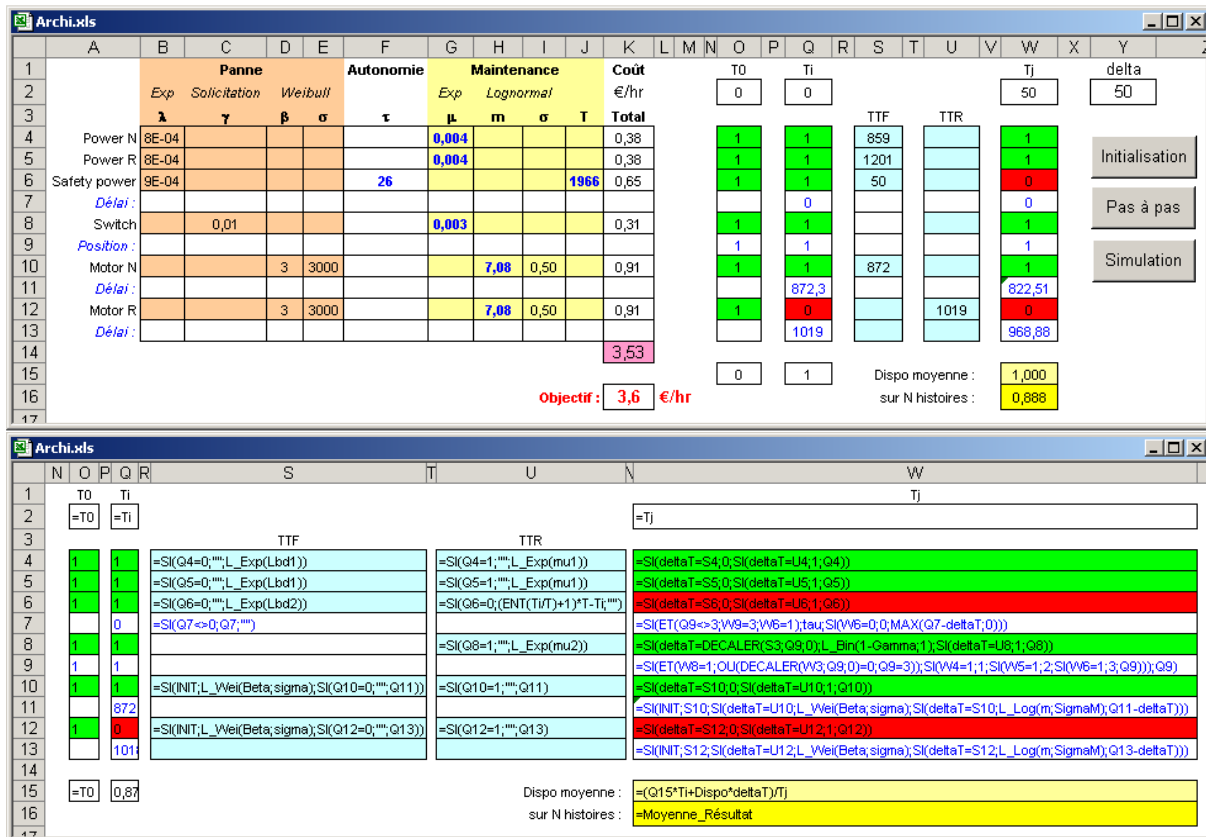


Figure 6. Modèle du système électrique

Constellation de satellites

Le modèle de déploiement et de renouvellement d'une constellation de satellites, présenté en figure 7, a été récemment utilisé pour rechercher les meilleurs compromis de conception et d'exploitation d'un nouveau système d'observation et de gestion de crises (séisme, tsunami, incendie...) pouvant survenir en n'importe quel point de la surface de la terre.

Ce modèle a permis d'évaluer la disponibilité de service (en termes de taux de réussite d'observation) et les coûts associés sur une très longue durée (30 ans).

Les satellites sont susceptibles de tomber en panne (OK ≠ 1) de manière aléatoire ou de manière déterministe au terme d'une durée de vie limitée par la capacité en ergol (DV). La constellation est maintenue par des lancements simples ou multiples de satellites pouvant être placés sur différentes orbites. Les lancements sont décidés selon différents critères relatifs à l'état courant de la constellation, en anticipant les fins de vie des satellites en orbite. Le lancement effectif n'a lieu qu'après une durée de réservation du lanceur et de fabrication des satellites, si des rechanges ne sont pas disponibles au sol, et peut éventuellement conduire à l'échec (OK ≠ vrai).

L'occurrence et la position des zones d'observation à la surface du globe sont tirées aléatoirement.

Réalisé en phase préliminaire de conception, un tel modèle comportemental permet d'effectuer des optimisations globales du système dont les résultats sont généralement fort éloignés de la juxtaposition des optima locaux réalisés au sein des différents métiers.

Ainsi dans cette application, des compromis ont pu être recherchés entre des caractéristiques très différentes du système mais ayant chacun une influence sur la disponibilité de service et sur les coûts, telle que :

- la fiabilité et la durée de vie des satellites,
- la taille des réservoirs offrant aux satellites une certaine capacité de manœuvre pour se repositionner en orbite et permettant ainsi de diminuer le nombre de satellites de la constellation
- le dimensionnement et la fiabilité des lanceurs
- les critères de décision et les conditions de renouvellement de la constellation,
- les choix d'orbite lors de chaque lancement
- les critères de décision et les conditions de fabrication des satellites au sol,
- etc.

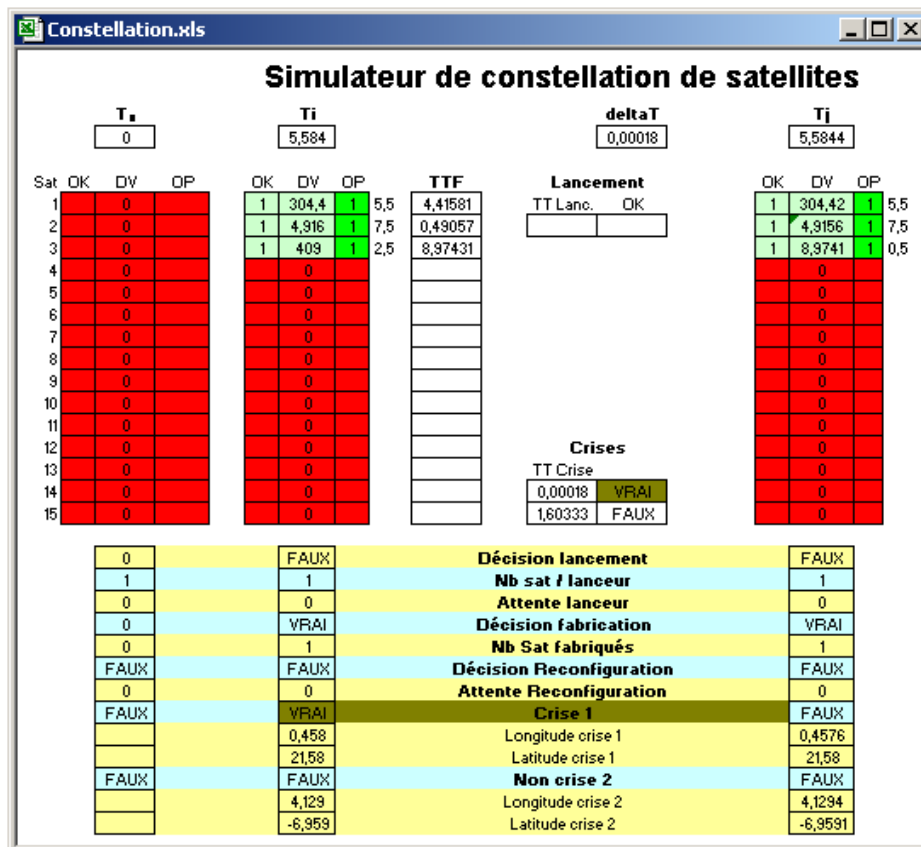


Figure 7. Constellation de satellite

Satellite scientifique

Le modèle présenté en figure 8 a été récemment développé pour évaluer l'impact d'événements aléatoires ou déterministes sur la mission d'un satellite scientifique. La problématique rencontrée se présentait de la manière suivante :

Sachant que plusieurs expériences et calibrations devaient être réalisées sur un satellite de durée de vie limitée (12 mois) en respectant certaines règles chronologiques,

la faisabilité de la mission n'était-elle pas compromise par l'occurrence d'événements aléatoires (pannes fugitives liées aux radiations et aux interruptions solaires conduisant à des passages en mode survie puis reconfiguration par le sol) ou déterministes (éclipses ; occultations de senseurs...). Développé en quelques heures, ce modèle a permis de dérouler les différentes expériences embarquées en simulant les diverses interruptions et processus de reprise afin d'évaluer le taux de réussite de la mission complète.

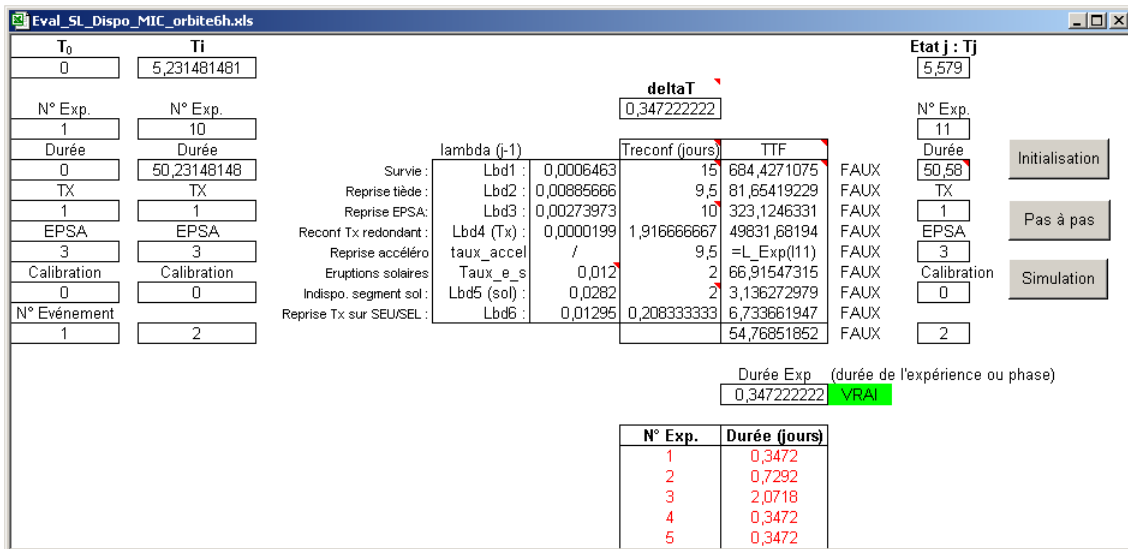


Figure 8. Satellite scientifique

Conclusion

En concurrence avec d'autres techniques de modélisation telles que les réseaux de Petri stochastiques, les modèles de simulation récursive ont déjà permis de résoudre des problématiques diverses du domaine spatial pour le compte du CNES et de l'organisation internationale EUMETSAT. De tels modèles comportementaux ont notamment été développés pour comparer des architectures complexes de constellation de satellites et identifier des solutions originales de déploiement et de renouvellement. Ils ont également permis d'évaluer l'impact d'événements aléatoires ou déterministes sur la disponibilité de satellites. Ils servent enfin à optimiser les architectures et les conditions d'exploitation de moyens au sol (stations de réception, centres de contrôle ou d'exploitation, etc.), quand la complexité de ces derniers dépasse les capacités d'autres méthodes d'évaluation de disponibilité d'emploi moins général mais beaucoup plus rapides en temps de calcul (Markov, arbre de fautes). S'appuyant sur les fonctionnalités d'un tableur très largement diffusé, cette méthode de modélisation s'avère particulièrement souple et permet de développer et de valider des modèles éventuellement complexes dans un délai et à un coût extrêmement compétitif. De tels simulateurs peuvent être développés dans d'autres domaines d'ingénierie (transports aériens, réseaux ferroviaires, centres routiers, télécommunications,

énergie...), afin de tester la capacité opérationnelle des systèmes et d'optimiser leurs caractéristiques et conditions d'exploitation et de maintenance, dès les phases préliminaires de conception.

Références

- [1] Rapport ARES pour le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement français, dans le cadre du programme Gestion et Impact du Changement Climatique, 2002
- [2] Pierre Etienne Labeau, Evolution de la modélisation en fiabilité dynamique, Journée « Fiabilité dynamique et simulation hybride », ENSAM, PARIS, 2003.
- [3] Yves Dutuit – Deux approches de la fiabilité dynamique : les processus déterministes par morceaux et les réseaux de Petri, ENSAM, PARIS, 2003.
- [4] H. Thiriez, La modélisation du risque - Simulation de Monte Carlo, ECONOMICA, 2004.
- [5] Cabarbaye A., Laulheret R., Traitement de la fiabilité dynamique et des systèmes hybrides par modélisation récursive, QUALITA 2005, Bordeaux, 2005.
- [6] A. Cabarbaye, J.Faure, R. Laulheret, Couplage entre optimisation et simulation stochastique, ROADEF'06, Lille, 2006.