

# OPTIMISATION DES SYSTEMES VIS-A-VIS DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT UNE REALITE DANS LE DOMAINE SPATIAL

ROLAND LAULHERET

Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)  
18 avenue Edouard Belin  
31401 Toulouse Cedex 4  
Tél. 05 61 27 47 19 / 05 61 27 30 68  
Mél : Roland.Laulheret@cnes.fr

André CABARBAYE

CAB INNOVATION  
3, rue de la Coquille  
31500 Toulouse  
Tél. 05 61 54 68 08  
Mél : Andre.Cabarbaye@cabinnovation.fr  
Web : www.cabinnovation.fr

## Résumé

Cet article présente des techniques d'optimisation de systèmes contraints par des objectifs de Sécurité de Fonctionnement ainsi que différentes problématiques du domaine spatial traitées aujourd'hui de manière récurrente par des méthodes et outils opérationnels. Il souligne l'intérêt des méthodes d'optimisation paramétrique de type stochastique (Algorithmes Génétiques, Recuit simulé, méthode Tabout...) qui peuvent aisément se coupler à des méthodes d'évaluation. Parmi ces dernières, la simulation de Monte-Carlo est très pénalisante en temps de calcul mais apparaît incontournable pour traiter certaines problématiques. Elle peut toutefois être employée de manière judicieuse dans ce type de couplage afin de limiter les durées de traitement.

## Summary

This article presents optimisation techniques of systems constrained by Reliability objectives like various problems of the space field treated today in a recurring way by operational methods and tools. It underlines the interest of the parametric optimisation methods of stochastic type (Genetic Algorithms, Tabout method...) which can be easily coupled with evaluation methods. Among these last, the simulation of Monte-Carlo is very penalising in computing times but appears impossible to circumvent to treat certain problems. It can however be employed in a judicious way in this type of coupling, in order to limit the duration of treatment.

## 1. INTRODUCTION

Facilitées par une amélioration continue des performances d'ordinateur, des évaluations de Sécurité de Fonctionnement sont couramment menées, dans tous les domaines d'ingénierie, pour dimensionner l'architecture et la mise en œuvre des systèmes. Ayant au départ pour objet la simple vérification de la conformité à des demandes réglementaires ou contractuelles, celles-ci sont de plus en plus souvent réalisées à des fins d'optimisation pour diminuer le coût global de possession des produits (acquisition, exploitation, maintenance, mise hors service...).

Les problématiques rencontrées sont variées, telles que la définition d'un système à moindre coût contraint par un objectif de Sécurité de Fonctionnement ou celui offrant la meilleure disponibilité dans une enveloppe de coût donnée... et les enjeux parfois considérables.

Cette optimisation peut s'opérer par des analyses de sensibilité menées individuellement sur chacun des paramètres (architecture, stock de rechanges, durées de maintenance, opérations...). Mais celles-ci montrent vite leurs limites quand les variables sont nombreuses et les optima multiples.

C'est pourquoi depuis une dizaine d'années, le CNES mène une action de Recherche & Développement sur l'Optimisation des systèmes vis-à-vis de la Sécurité de Fonctionnement, dont le spectre est relativement large compte tenu de la diversité des problèmes rencontrés dans le domaine spatial.

Cette communication a pour objet de présenter une synthèse des résultats obtenus à ce jour, tant en ce qui concerne les problématiques traitées aujourd'hui de manière récurrente par des méthodes et outils opérationnels, que les difficultés qui restent à surmonter. Elle est illustrée par diverses applications traitées par les outils de la société CAB INNOVATION.

## 2. LES METHODES

En regard des méthodes d'optimisation existantes, l'analyse du besoin a permis de dégager deux grandes familles de problématiques : la recherche optimale d'une configuration de paramètres et celle d'une séquence de décisions. La première recouvre la majorité des problèmes rencontrés en conception de systèmes spatiaux et notamment ceux relatifs à la définition des architectures. La seconde recouvre surtout des problèmes d'opérabilité de systèmes complexes concernant leur installation, leur exploitation ou leur maintenance ; cette dernière se ramenant à un problème de décisions prises pour répondre à des aléas

(maintenance curative) ou pour limiter leur occurrence (maintenance préventive).

Des travaux [6] menés en collaboration avec des laboratoires et universités de la région toulousaine (INRA, ENSEEIHT, ONERA), portant sur un cas d'application particulièrement complexe relatif au déploiement et au renouvellement d'une constellation de 32 satellites simultanément opérationnels (lancés par grappes au moyen de différents types de lanceurs, avec satellites de rechange au sol ou en orbite...), ont montré les limites des méthodes de recherche optimale de décisions, telles que la Programmation Dynamique améliorées par les techniques d'Apprentissage par Renforcement, pour traiter les problèmes réels de cette catégorie.

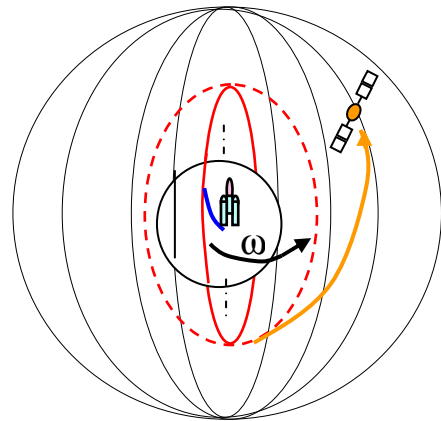


Figure 1. Constellation de satellites

La résolution de ce cas-test a toutefois été sensiblement améliorée par le choix d'une politique décisionnelle paramétrique (figure 2) et l'exploitation aux mieux de l'information « en ligne », issue de l'observation du système au jour le jour, sans plus rechercher a priori de politique optimale en toute situation.

En élaborant une politique de décisions paramétriques (occurrence de la prise de décision, type de décision, durée des actions...), les problématiques de cette nature peuvent ainsi entrer dans la première catégorie, même si cette politique, définie a priori à partir de l'expérience de l'analyste, n'est alors pas forcément optimale.

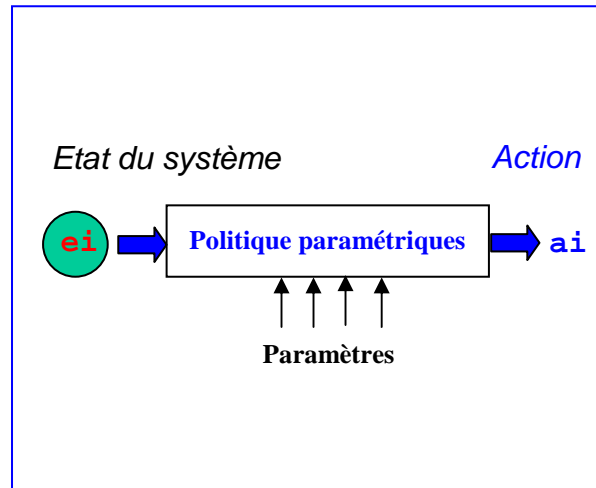
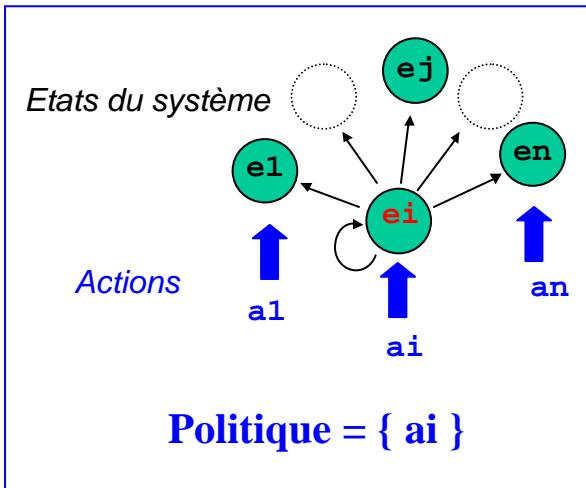


Figure 2. Politiques décisionnelles

Parmi les méthodes d'optimisation paramétrique, les techniques de type stochastique (Algorithmes Génétiques, Recuit simulé, méthode Tabout...) aboutissent à des résultats souvent intéressants même si leur optimalité ne peut être démontrée. Leur efficacité peut être sensiblement améliorée en les couplant à des techniques de recherche locale tels que le simplexe non linéaire (algorithme de Nelder Mead). Ne se fondant pas sur une expression mathématique de la fonction à traiter mais seulement sur son résultat, ces méthodes d'optimisation sont faciles à mettre en œuvre et peuvent directement se coupler à des méthodes d'évaluation comme l'illustre la figure 3. Elles se révèlent cependant gourmandes en nombre d'évaluations à réaliser pour

obtenir un résultat, ce qui conduit à privilégier des méthodes d'évaluation rapides à des techniques plus lentes, telles que la simulation de Monte-Carlo.

Ainsi, la technique de modélisation hybride, décrite dans le paragraphe suivant, associant traitements markoviens et de type arbre de fautes, est-elle préférentiellement employée au CNES pour évaluer la fiabilité et la disponibilité des architectures de systèmes spatiaux (satellites ou stations au sol) ; la durée de calcul étant inférieure à celle d'une simulation de Monte-Carlo équivalente dans un rapport 1000 environ (pour 2 à 3 décimales de précision).

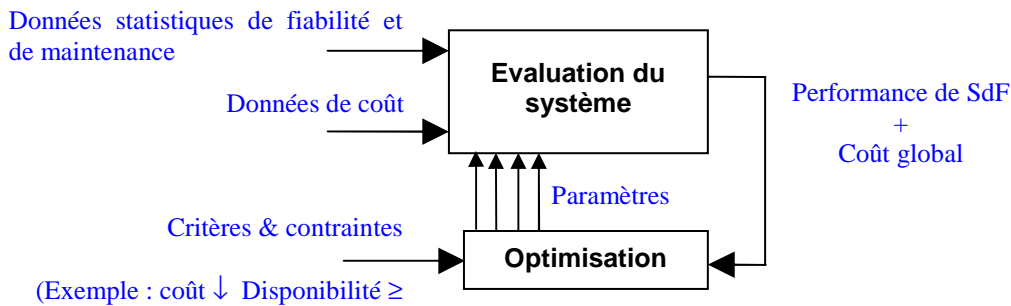


Figure 3. Couplage entre méthodes d'évaluation et d'optimisation

### 3. UNE MODELISATION EFFICACE D'ARCHITECTURE DE SYSTEME

Dans un contexte industriel, les évaluations de Sûreté de Fonctionnement sont fortement contraintes en termes de durée d'analyse (notamment dans le cadre de réponse à appel d'offres...) et de justesse des résultats attendus (l'entreprise étant de plus en plus liée par des mécanismes contractuels d'intéressement et de pénalité).

Aussi, la méthode d'évaluation choisie doit-elle permettre de décrire précisément le fonctionnement de systèmes souvent complexes, tout en étant accessible à des concepteurs non-spécialisés pour assurer la validation des modèles considérés. Il n'existe pas, cependant, de méthode idéale, applicable à toutes les situations, car chacune présente des avantages et des inconvénients :

. La modélisation par Bloc Diagramme Fiabilité est particulièrement simple à l'image des fonctionnements qu'elle permet de décrire (boîtes en série ou parallèle).

. La modélisation par arbre d'événements est également simple et conduit à des traitements analytiques rapides, mais elle présente un caractère statique incompatible avec la prise en compte d'une certaine complexité (notamment les dépendances stochastiques entre éléments, et les processus de réparation).

. Le graphe de Markov est une technique de modélisation dynamique qui est relativement complexe et ne peut être réellement mise en œuvre que par des spécialistes. Les traitements markoviens présentent des avantages par rapport aux techniques de simulation de Monte-Carlo, en termes de temps de calcul et de précision des résultats, mais sont limités par l'explosion combinatoire.

. Le réseau de PETRI stochastique est également complexe et est traité par simulation de Monte-Carlo.

Un compromis entre ces différentes techniques a été recherché pour traiter efficacement des systèmes non réparables (un satellite complet par exemple) ou réparables (un centre de contrôle ou d'exploitation de satellites).

Celui-ci a conduit à la méthode suivante, supportée par l'outil SUPERCAB :

. Des blocs plus ou moins complexes sont modélisés par graphe de Markov afin de considérer leurs aspects dynamiques (redondance M parmi N active/passive, chaude/froide, avec temps de reconfiguration, temps de réparation, durée de retour en usine, stock de rechange, panne à la sollicitation, nombre de réparateurs, etc.). A partir d'une expression textuelle telle que "Redondance(M, N,  $\lambda_{ON}$ ,  $\lambda_{OFF}$ ,  $\gamma$ , MDT, TAT, T...)", un générateur automatique de modèles markoviens a été développé afin de rendre cette modélisation accessible aux néophytes.

. Ces blocs sont utilisés à un niveau supérieur comme composants élémentaires d'architecture définie par une expression logique (de type  $A+B*(\sim A*(C+D*F))$ ), avec + = OU, \* = ET,  $\sim$  = NON), de manière similaire à celle d'un arbre de fautes.

Les dépendances stochastiques éventuelles entre les différents blocs ne peuvent pas être considérées dans un arbre mais se révèlent relativement rares sur le terrain.

. A partir de cette description textuelle, une représentation du système complet est générée automatiquement sous forme de Bloc Diagramme Fiabilité (dont la symbologie a été enrichie), afin d'en faciliter la validation (figure 4).

Les traitements mis en œuvre étant rapides, l'évaluation peut alors être aisément couplée à des techniques d'optimisation, pour automatiser la recherche d'une configuration optimale d'architecture, ou de simulation (Monte-Carlo), pour appréhender la dispersion des résultats obtenus en fonction de celle des variables d'entrée.

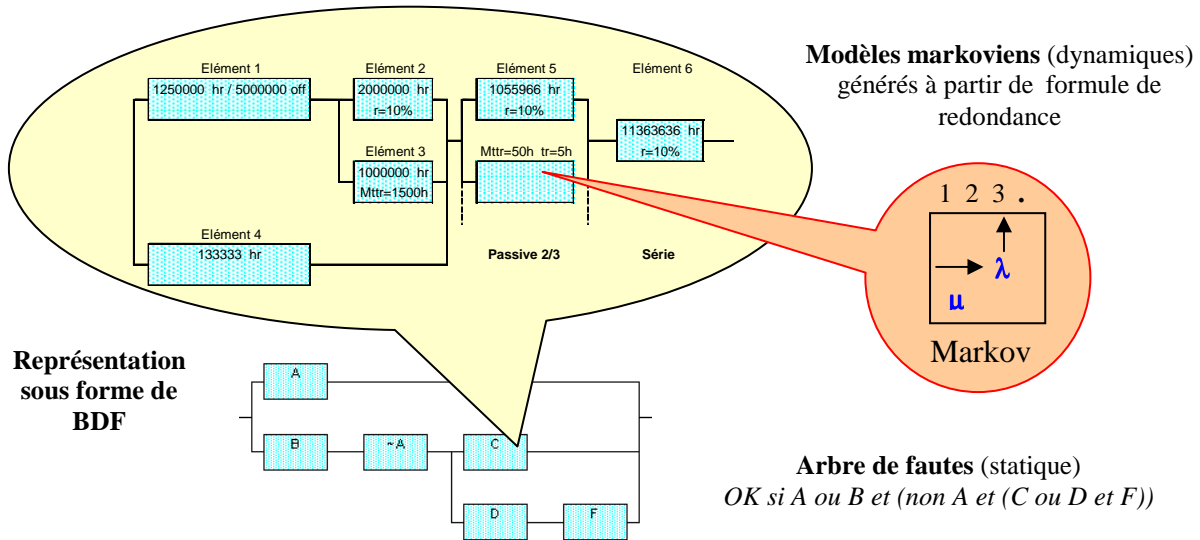


Figure 4. Couplage entre modélisations markoviennes et de type arbre de fautes représenté sous forme de BDF

#### 4. COUPLAGE ENTRE EVALUATION ET OPTIMISATION

Les figures 6 et 7 présentent des exemples d'application (avec des données fictives) traités au moyen d'un tel couplage entre la méthode d'évaluation décrite précédemment et l'outil d'optimisation GEN CAB, basé sur une méthode hybride associant Algorithmes Génétiques et Simplexe non linéaire (algorithme de Nelder Mead).

Le premier concerne une station de réception pour laquelle une configuration optimale du stock de rechange (16 paramètres discrets) est recherchée selon un critère de coût en satisfaisant une contrainte de disponibilité (objectif de 0,96).

Le second concerne une architecture intégrant des blocs de nature différente (mécanique et électronique) pour laquelle l'optimisation porte sur des paramètres continus (MTBF, MDT, TAT) et discrets (nombre total d'éléments : N et nombre d'éléments en stock : S).

De par les méthodes d'optimisation employées, ce type de traitement est limité à une cinquantaine de paramètres différents et sa durée, en ce qui concerne les exemples présentés, est de quelques minutes avec un Pentium 4.

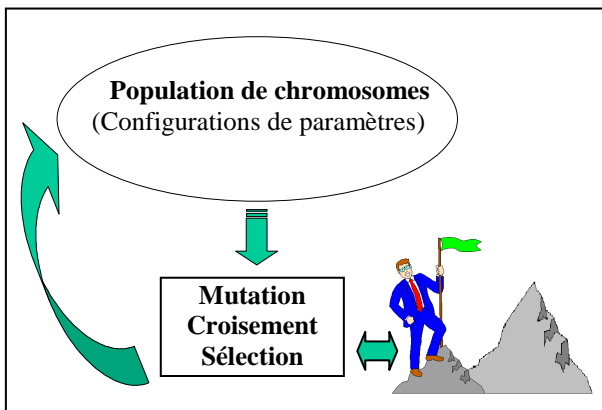


Figure 5. Algorithmes génétiques + Simplexe

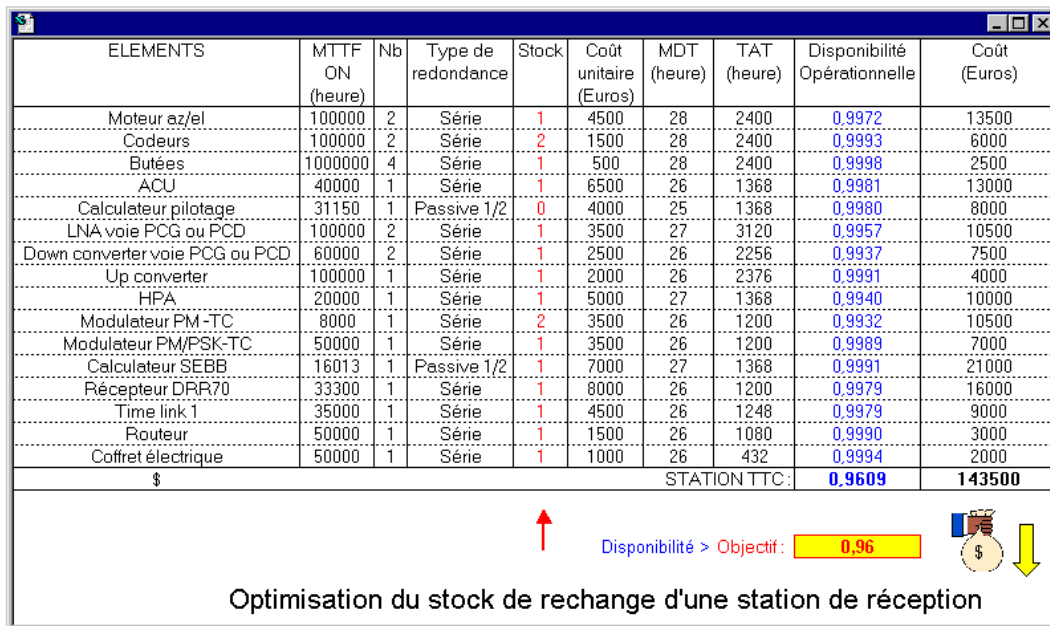


Figure 6. Exemple de couplage entre évaluation et optimisation (paramètres discrets)

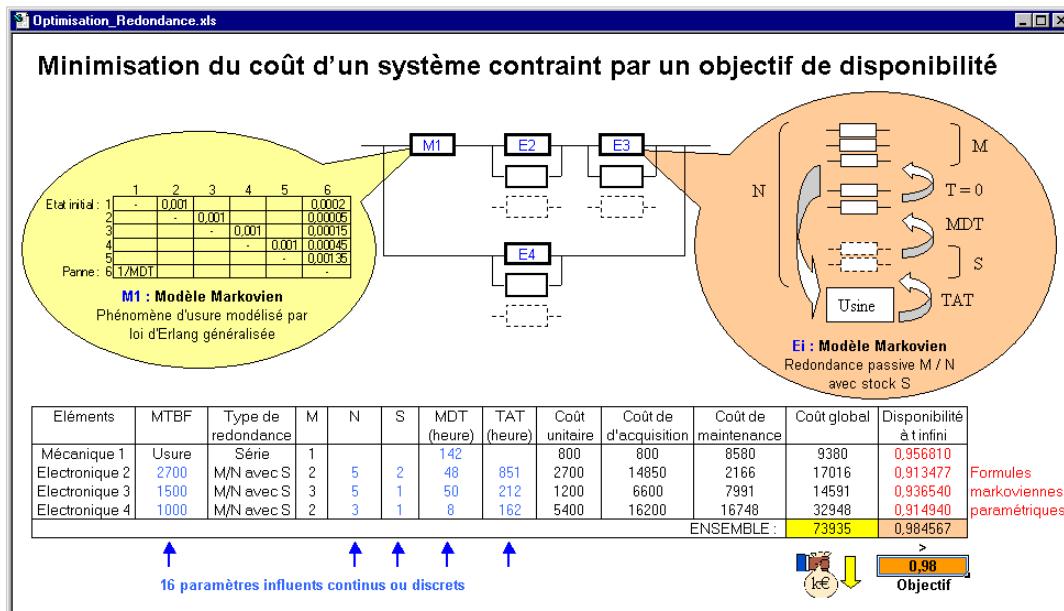


Figure 7. Exemple de couplage entre évaluation et optimisation (paramètres discrets et continus)

## 5. COUPLAGE ENTRE SIMULATION ET OPTIMISATION

La simulation reste incontournable pour traiter certaines problématiques telles que celle illustrée par la figure 8, qui concerne la définition d'un nouveau système de satellites d'observation de la terre basé sur un ensemble de mini ou micro satellites (acquisition d'images de type SPOT). L'évaluation porte sur la performance globale obtenue par cette constellation tout au long d'une mission opérationnelle (de 15 ans), en termes de nombre moyen journalier de prises de vues ou de taux de réalisation du carnet de commande, et sur les coûts associés ramenés à la date du début de développement du premier satellite (avec un taux d'intérêt d'environ 5 %). En jouant sur un certain nombre de paramètres influents, tels que le nombre de satellites utilisés simultanément, leur performance propre, leur durée de vie, leur fiabilité, leur durée de fabrication, la stratégie de lancement et de renouvellement..., ayant chacun un impact sur les coûts,

l'optimisation consiste alors à rechercher la configuration optimale de la constellation et de son exploitation selon différents critères comme, par exemple, le coût minimum en respectant un objectif de performance donné, ou celui de la performance maximale dans une enveloppe de coût.

Le couplage entre optimisation et simulation stochastique, qui consiste à rechercher une configuration optimale des paramètres d'un système à partir des résultats d'une fonction d'évaluation traitée par simulation de Monte-Carlo, apparaît très pénalisant en terme 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 multiplié par le nombre de cas de simulation requise par la précision recherchée.

A titre d'exemple, la problématique présentée en figure 8 est traitée par l'outil SIMCAB en 3 minutes pour 5000 cas de simulation avec un Pentium 4, et la recherche d'une configuration optimale nécessite un minimum de 2000 évaluations soit une durée globale de traitement d'une centaine d'heures environ.

C'est pourquoi une réflexion a été menée pour optimiser le couplage entre optimisation et évaluation stochastiques et rendre les durées de traitement non rédhibitoires. Celle-ci a abouti à une méthode originale consistant à faire varier judicieusement, au cours du traitement, le nombre de simulations de chaque évaluation, en exploitant la moyenne et la variance des résultats

obtenus sur un premier jeu de simulations limité en nombre à une dizaine de cas.

Apportant un gain significatif en temps de calcul (facteur 5 environ), selon les cas traités et la précision recherchée, cette méthode fera l'objet d'une communication spécifique.

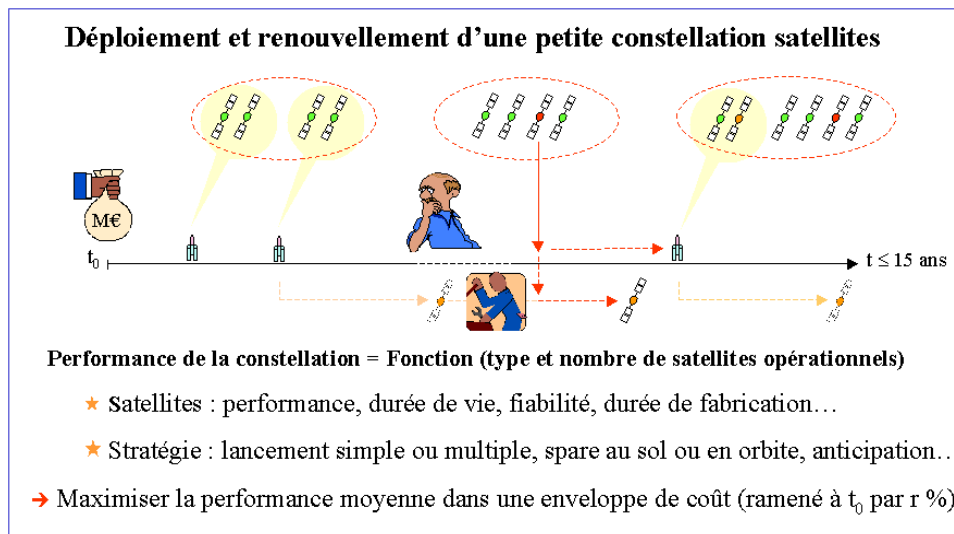


Figure 8. Exemple de problématique traité par simulation de Monte-Carlo

## CONCLUSION

L'optimisation des systèmes vis-à-vis de la Sûreté de Fonctionnement est aujourd'hui devenue une réalité dans le domaine spatial où le concept traditionnel d'allocation/vérification laisse progressivement la place à celui de conception de systèmes à moindre coût contraints par des objectifs de Sûreté de Fonctionnement.

Le couplage entre techniques d'évaluation et d'optimisation permet notamment d'automatiser la recherche de configurations optimales d'architecture de système en termes de redondances, lots de rechanges et politiques de maintenance.

Les techniques d'évaluation performantes en temps de calcul sont privilégiées par rapport à celles de simulation afin de pouvoir être aisément couplées à des méthodes d'optimisation stochastiques.

## REFERENCES :

- [1] A. Pages & M. Gondran - Fiabilité des systèmes - Edition Eyrolles, Paris 1980
- [2] A. Villemeur - Sûreté de Fonctionnement des systèmes industriels - Edition Eyrolles, Paris 1987
- [3] David E. Goldberg, Algorithmes Génétiques, Exploration optimisation et apprentissage automatique, Addison-Wesley, 1994.
- [4] J-M. Renders, Algorithmes génétiques et réseaux de neurone, Hermes, 1995
- [5] A. Cabarbaye – Outil générique d'optimisation par Algorithmes Génétiques et Simplexe - 8èmes Journées Nationales du groupe Mode (Mathématique de l'Optimisation et de la Décision) de la SMAI, Toulouse 23 - 25 mars 2000.
- [6] Frédéric Garcia, Linda Tomasini, Julien Séroi, André Cabarbaye - Optimisation de la maintenance d'une constellation de satellites - 12e Colloque National de Sûreté de Fonctionnement (Lambdamu 12), Montpellier 28 - 30 mars 2000.

La simulation de Monte-Carlo étant parfois nécessaire à la résolution de certaines problématiques, une amélioration du couplage entre optimisation et simulation stochastiques, combinée avec l'augmentation continue des performances d'ordinateurs (loi de Moore), facilite l'optimisation de systèmes de plus en plus complexes.

Du point de vue méthodologique, les problématiques du domaine spatial apparaissent similaires à celles rencontrées dans d'autres secteurs d'activités (aéronautique, nucléaire, transport, armement...). Aussi une mutualisation des efforts de Recherche & Développement sur l'Optimisation des systèmes vis-à-vis de la Sûreté de Fonctionnement pourrait être bénéfique à tous.

- [7] A. Cabarbaye - SIMCAB : Un outil générique de Simulation sous Microsoft Excel® - 3e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'01), Troyes 25 au 27 avril 2001.
- [8] A. Cabarbaye - SUPERCAB PRO : Un atelier d'Ingénierie Système sous Microsoft Excel® - 2ème Conférence Annuelle d'Ingénierie Système, organisée par l'AFIS, TOULOUSE, 26-28 juin 2001.
- [9] Roland Lulheret, Bruno Lacosta (CNES) / André Cabarbaye (CAB INNOVATION) – Modèles génériques de redondance M parmi N avec stock de rechanges S - MOSIM 03, TOULOUSE, 23-25 Avril 2003
- [10] Roland Lulheret, Bruno Lacosta (CNES) / André Cabarbaye (CAB INNOVATION) – Minimisation du coût d'un système contraint par un objectif de disponibilité - QUALITA 2003 - Nancy 18-20 Mars 2003.