

## Optimisation des systèmes réparables

4<sup>ème</sup> Conférence Annuelle d'Ingénierie Système  
« Efficacité des entreprises et satisfaction des clients »  
Centre de Congrès Pierre Baudis, TOULOUSE, 2-4 mai 2006

A. Cabarbaye  
Centre National d'Etudes Spatiales  
(CNES)  
18, avenue Edouard Belin 31401  
Toulouse /  
CAB INNOVATION  
3, rue de la Coquille - 31500 Toulouse  
andre.cabarbaye@cabinnovation.fr

J. Faure  
Centre National d'Etudes  
Spatiales (CNES)  
18, avenue Edouard Belin  
31401 Toulouse  
julien.faure@cnes.fr

R. Laulheret  
Centre National d'Etudes  
Spatiales (CNES)  
18, avenue Edouard Belin  
31401 Toulouse  
roland.laulheret@cnes.fr

**Résumé.** Cette communication porte sur l'optimisation de systèmes réparables devant satisfaire des exigences de disponibilité. Cherchant à couvrir l'ensemble des problématiques rencontrées, elle propose deux méthodes d'évaluation de la disponibilité pouvant se coupler directement à des techniques d'optimisation automatisées. Elle est illustrée par des applications du domaine spatial (stations de réception, constellation de satellites, etc.).

### INTRODUCTION

L'optimisation des systèmes sous contraintes de tenue d'objectifs de disponibilité est devenue une problématique prégnante dans tous les domaines d'ingénierie. Des systèmes spatiaux (Galileo...) ou aéronautique (Airbus...) doivent ainsi répondre à des exigences contractuelles très contraignantes de disponibilité de service (ou de fiabilité opérationnelle) dans un contexte concurrentiel exacerbé.

Menée généralement selon un critère de coût (coût global de possession), cette optimisation passe par une évaluation de la disponibilité de systèmes souvent complexes, constitués de multiples équipements architecturés selon divers schémas de redondance. Ces équipements font l'objet d'une maintenance corrective ou préventive (pour limiter les phénomènes d'usure et risques de panne cachée), et des stocks de rechanges spécifiques ou banalisés sont à constituer en divers lieux pour pallier les délais d'approvisionnement ou de réparation. La configuration optimale recherchée peut porter sur un très grand nombre de paramètres interdépendants (une centaine par exemple), ce qui exclut toute approche pseudo manuelle de type analyse de sensibilité.

Outre l'aptitude à modéliser le comportement réel de tels systèmes et à le valider auprès des concepteurs, les méthodes d'évaluation choisies doivent conduire à des traitements

rapides pour pouvoir se coupler directement à des méthodes d'optimisation automatisées particulièrement gourmandes en nombre d'évaluations à réaliser pour assurer la convergence (Goldberg 1994).

En dépit de phénomènes de mode ou écoles de pensée, aucune méthode d'évaluation ne répond parfaitement à ce besoin :

- Les Blocs Diagrammes de Fiabilité et les arbres d'événements conduisent à des traitements analytiques rapides, mais présentent un caractère statique incompatible avec la prise en compte d'une certaine complexité.

- Les traitements markoviens sont également rapides et précis mais sont vite limités par l'explosion combinatoire.

- Les réseaux de PETRI stochastiques ont un grand pouvoir de représentation mais leur mise en œuvre est complexe et leur traitement particulièrement lent (la durée d'une simulation de type Monte-carlo étant environ 1000 fois supérieure à celle d'un traitement équivalent analytique ou markovien pour 2 à 3 décimales de précision).

C'est pourquoi deux techniques originales de modélisation sont proposées dans cet article, selon les problématiques rencontrées, qui apparaissent bien adaptées à ce contexte d'optimisation :

- Une modélisation hybride, associant arbre de fautes et traitements markoviens quand les systèmes sont constitués de sous-ensembles indépendants de complexité moyenne.

- Un modèle de simulation récursive quand ce découpage est impossible du fait notamment de la multiplication des dépendances entre les sous-systèmes.

### MODELISATION HYBRIDE

Une technique de modélisation hybride, associant arbre de fautes et traitements markoviens constitue une alternative pertinente quand les systèmes sont constitués de sous-ensembles indépendants. De taille

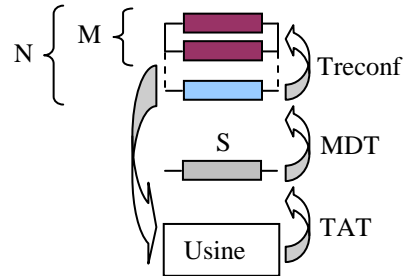
limitée, ces derniers peuvent alors faire l'objet d'une modélisation markovienne afin de prendre en compte leurs aspects dynamiques (reconfiguration, réparation, retour en usine) ainsi que certaines dépendances stochastiques entre leurs équipements (redondance froide, opérateurs ou réparateurs en nombre limité, etc.).

Afin de limiter significativement l'effort de modélisation, différents outils peuvent alors être utilisés. Un générateur de modèles markoviens (Cabarbaye 1999) permet ainsi de construire automatiquement la matrice de Markov d'un système à partir d'expressions logiques définissant ses états de bon fonctionnement et d'éventuelles dépendances stochastiques, tout en regroupant les états équivalents.

De même, des formules paramétriques de redondance (Laulheret 2003), telle que celle illustrée par la figure 1, permettent de générer automatiquement le modèle markovien correspondant puis de le traiter afin de renvoyer une valeur de fiabilité ou de disponibilité. Les redondances peuvent être actives ou passives de type M parmi N avec stock de rechange de dimension S. La maintenance est caractérisée par des durées de réparation par échange standard (MDT : Mean Down Time) et des délais de réparation

en usine ou de réapprovisionnement du stock (TAT : Turn Around Time).

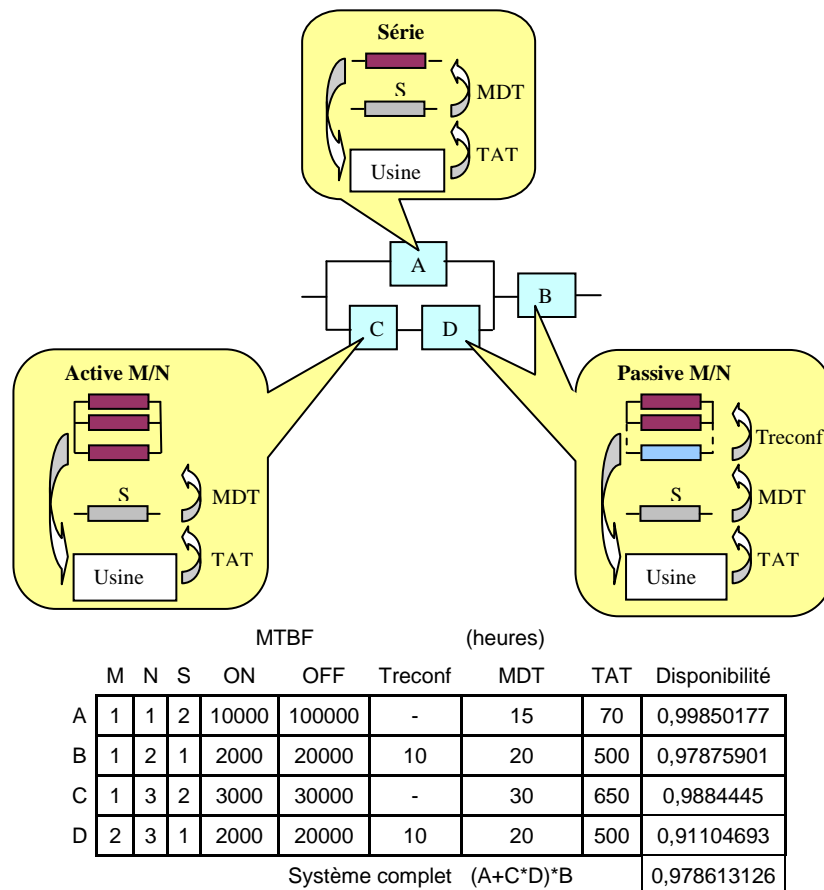
Les redondances passives, chaude ou froide ( $\lambda_{OFF} \neq \lambda_{ON}$ ), sont caractérisées par des durées de reconfiguration (Treconf) sur les équipements en redondance.



$$=Redondance(M;N;\lambda_{ON};\lambda_{OFF};T;Treconf;MDT;N b\_opérateurs;S;TAT;Nb\_réparateurs;Active/passive; Fiab/Dispo)$$

**Figure 1. Formule paramétrique de redondance**

A titre d'exemple de modélisation hybride, l'architecture présentée en figure 2 a été traitée par un outil (SUPERCAB) mettant en œuvre cette technique.



**Figure 2. Exemple de modélisation hybride**

Il est fait appel, dans cet exemple, à la formule de redondance présentée en figure 1, ainsi qu'à une formule de résolution logique du même type que celles utilisées pour traiter les arbres de défaillance mais limitée aux opérateurs logiques OU (+), ET (\*) et NON (~), soit  $(A+C*D)*B$  dans l'exemple. L'optimisation des lots de rechange (ou de tout autre paramètre) selon un critère de coût, en satisfaisant une contrainte de tenue d'un

objectif de disponibilité (disponibilité  $\geq 0,99$ ), peut alors être automatisée (figure 3), en couplant l'outil d'évaluation à un outil (GENCAB) d'optimisation (Cabarbaye 2003), basé sur une méthode hybride associant Algorithmes Génétiques, Evolution Différentielle et Simplexe non linéaire (algorithme de Nelder Mead). La durée de convergence est alors très rapide (quelques minutes avec un Pentium 4).

|                              |   | MTBF (heures) |   |       |        |         |     |     |               |               |                    |
|------------------------------|---|---------------|---|-------|--------|---------|-----|-----|---------------|---------------|--------------------|
|                              | M | N             | S | ON    | OFF    | Treconf | MDT | TAT | Disponibilité | Coût unitaire | Coût des rechanges |
| A                            | 1 | 1             | 0 | 10000 | 100000 | -       | 15  | 70  | 0,99304866    | 1000          | 0                  |
| B                            | 1 | 2             | 3 | 2000  | 20000  | 10      | 20  | 500 | 0,99327934    | 9000          | 27000              |
| C                            | 1 | 3             | 1 | 3000  | 30000  | -       | 30  | 650 | 0,98039992    | 5000          | 5000               |
| D                            | 2 | 3             | 1 | 2000  | 20000  | 10      | 20  | 500 | 0,91104693    | 2000          | 2000               |
| Système complet $(A+C*B)*B'$ |   |               |   |       |        |         |     |     | 0,99254186    |               | 34000              |
|                              |   |               |   |       |        |         |     |     | $\geq 0,99$   |               |                    |

Figure 3. Optimisation des lots de rechange

Comme l'illustre l'exemple de la figure 4, l'optimisation peut porter simultanément sur des paramètres très divers, tels que la fiabilité des composants (niveau de qualité), les niveaux de redondance, le dimensionnement des lots de rechange ou les durées de

réparation et d'approvisionnement, ayant chacun une influence sur les coûts d'acquisition ou d'exploitation du système (20 paramètres différents en gras dans cet exemple).

| Equipements                   | MTTF ON (heure) | Nb | Type de redondance | Stock de rechange | Coût unitaire (Euros) | MDT (heure) | TAT (heure) | Disponibilité Opérationnelle           | Coût (Euros)  |
|-------------------------------|-----------------|----|--------------------|-------------------|-----------------------|-------------|-------------|--|---------------|
| Moteur az/el                  | 100000          | 2  | série              | 1                 | 4500                  | 28          | 2400        | 0,9972                                 | 13500         |
| Codeurs                       | 100000          | 2  | série              | 1                 | 1500                  | 28          | 2400        | 0,9972                                 | 4500          |
| Emetteur / récepteur          | <b>2003</b>     |    | <b>Passive 1/2</b> | 1                 | 15039                 | 28          | 1000        | 0,9113                                 | 45116         |
| Calculateur pilotage          | <b>2059</b>     |    | <b>Passive 1/3</b> | 0                 | 4237                  | 25          | 800         | 0,9456                                 | 12711         |
| <b>A - STATION TTC</b>        |                 |    |                    |                   |                       |             |             | <b>0,8569</b>                          | <b>75827</b>  |
| Serveur archive               | 33000           | 1  | série              | 0                 | 4500                  | <b>35</b>   | 500         | 0,9851                                 | 4500          |
| Serveur de production         | <b>2183</b>     |    | <b>Passive 2/2</b> | 1                 | 1775                  | <b>35</b>   | 500         | 0,9736                                 | 5324          |
| PC supervision                | 10000           |    | <b>Active 1/3</b>  | 2                 | 500                   | <b>35</b>   | 300         | 0,9965                                 | 2500          |
| Disque miroir                 | 50000           | 2  | série              | 2                 | 4000                  | <b>35</b>   | 600         | 0,9986                                 | 24000         |
| <b>B - CENTRE UTILISATEUR</b> |                 |    |                    |                   |                       |             |             | <b>0,9544</b>                          | <b>38056</b>  |
| Antenne                       | 33000           | 1  | série              |                   | 4500                  |             | 1000        | 0,9706                                 | 4500          |
| Emetteur / récepteur          | <b>4811</b>     | 1  | série              | 2                 | 19053                 | <b>26</b>   | 2400        | 0,9177                                 | 57160         |
| PC supervision                | 127000          | 1  | série              | 3                 | 500                   | <b>26</b>   | 100         | 0,9998                                 | 2000          |
| <b>C - CENTRE SECOUR</b>      |                 |    |                    |                   |                       |             |             | <b>0,8905</b>                          | <b>68309</b>  |
| <b>SYSTEME GLOBAL : A*B+C</b> |                 |    |                    |                   |                       |             |             | <b>0,9800</b>                          | <b>182192</b> |
|                               |                 |    |                    |                   |                       |             |             | Disponibilité > Objectif : <b>0,98</b> |               |

Figure 4. Optimisation multi paramètres

## MODELE DE SIMULATION RECURSIVE

Quand le découpage en sous-ensembles indépendants est impossible ou que ces derniers sont trop complexes, la simulation devient incontournable. Une technique couplant optimisation et simulation récursive permet cependant de modéliser le comportement du système sans que la durée de traitement soit rédhibitoire. Proposée par un outil de simulation fonctionnant sous Excel (SIMCAB), cette technique de modélisation de systèmes à états discrets (Cabarbaye 2005) est illustrée par la figure 5.

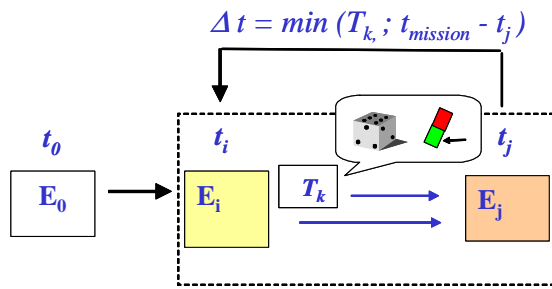


Figure 5. Modèle récursif

La simulation effectuée par l'outil consiste à recopier un certain nombre de fois l'état  $E_j$  (à  $t_j$ ) du système, défini dans une plage de cellules de tableur, dans l'état  $E_i$  (à  $t_i$ ), 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  $\Delta t$  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  $T_k$ , correspondant

à des changements aléatoires d'état du système ou au franchissement de seuils par des variables continues. 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, caractérisé par des dépendances entre variables continues et stochastiques (Labeau 2003) (Castagna 2003).

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.

Une technique originale de couplage entre optimisation et simulation (Cabarbaye 2006) a été introduite pour diminuer la durée globale des traitements. Cette technique, qui s'avère très efficace (division des temps de calcul par 30 environ sur différents cas tests), consiste à faire varier la précision de l'évaluation de chacune des solutions candidates, en fonction des résultats d'une évaluation grossière menée préalablement. L'évaluation grossière résultera par exemple de 50 simulations de la mission et celle de l'évaluation fine jusqu'à 2000 simulations en fonction de la qualité de la solution évaluée par rapport à l'optimum courant.

A titre d'exemple, un modèle de redondance similaire à celui traité précédemment au moyen d'une formule markovienne, est présenté en figure 6. Il 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  $T_j$ .

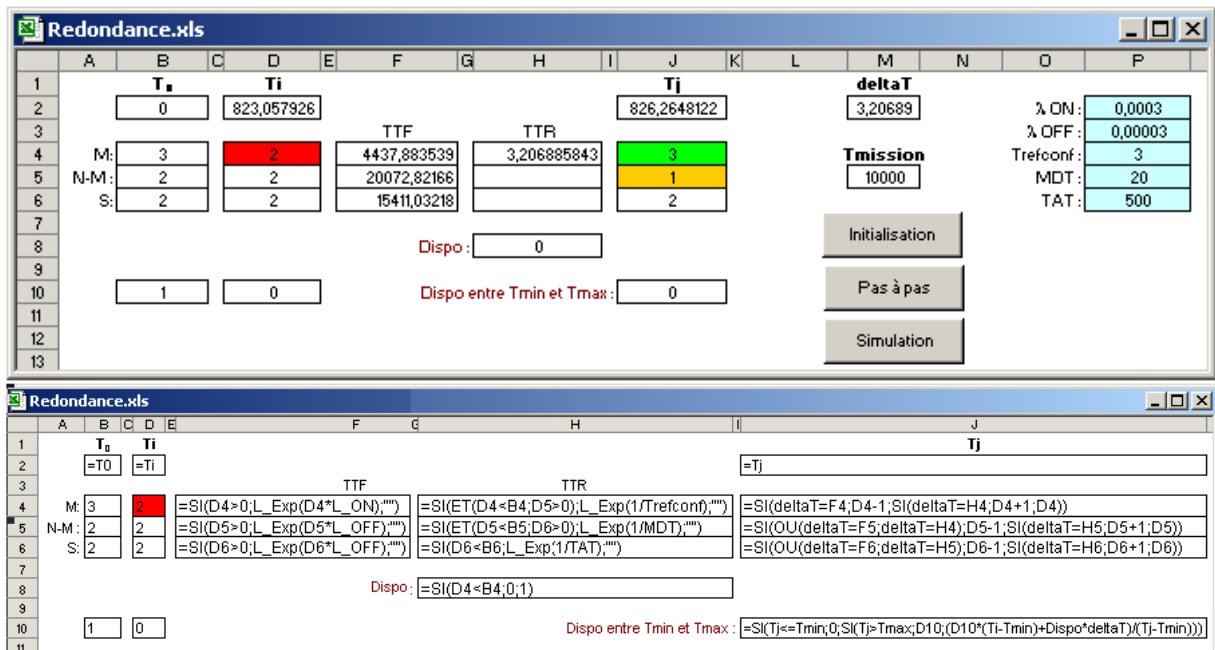


Figure 6. Modèle de redondance M parmi N avec stock de rechange de dimension S

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 (une vingtaine de lois sont proposées par l'outil). 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.

De même l'architecture de la figure 2, traitée précédemment par modélisation hybride, peut faire l'objet d'un modèle de simulation récursive et d'une optimisation comme l'illustre la figure 7.

Le couplage entre optimisation et simulation stochastique présente cependant une difficulté relative au traitement de la contrainte de

disponibilité. En effet le coût des rechanges et la disponibilité du système sont des performances antagonistes. L'optimum est donc situé en bordure de contrainte. Or en raison de la variance des résultats obtenus par simulation, plusieurs évaluations d'une même solution à proximité des bornes peuvent fortement varier et conduire à la perte inopinée d'un résultat jugé précédemment optimal. La pénalité associée à l'amplitude du dépassement de la contrainte devient alors un paramètre délicat à régler. C'est pourquoi l'optimisation a été menée cette fois ci sur une performance de revenu agrégeant le coût et la disponibilité de service (revenu = 100000 \* disponibilité - coût).

En revanche, ce modèle peut être complexifié par des dépendances entre les sous-ensembles telles que la mise en commun du stock de rechange des éléments B et D si ces derniers sont identiques.

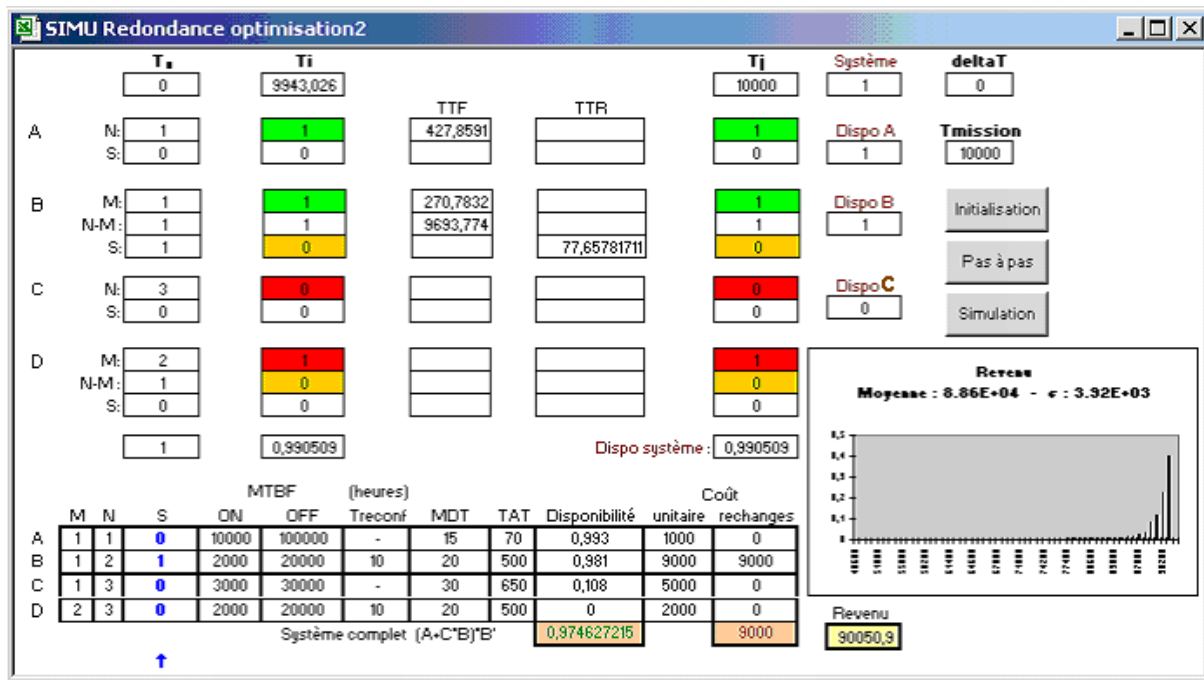


Figure 7. Optimisation de l'architecture

De la même manière, l'exemple de la figure 8 illustre un cas d'école relatif à l'optimisation de la périodicité d'actions de maintenance préventive d'un système constitué d'éléments

électroniques ou mécaniques (Weibull). La disponibilité du système est ici maximisée dans une enveloppe de coût (3 Euros/hr).

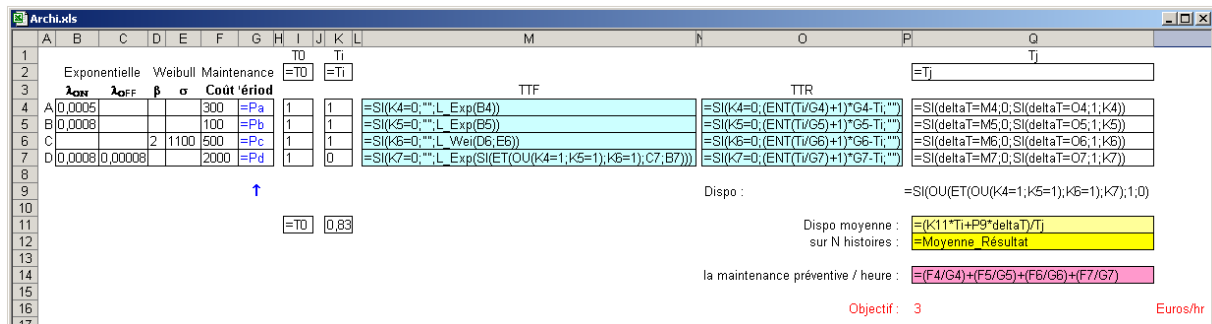
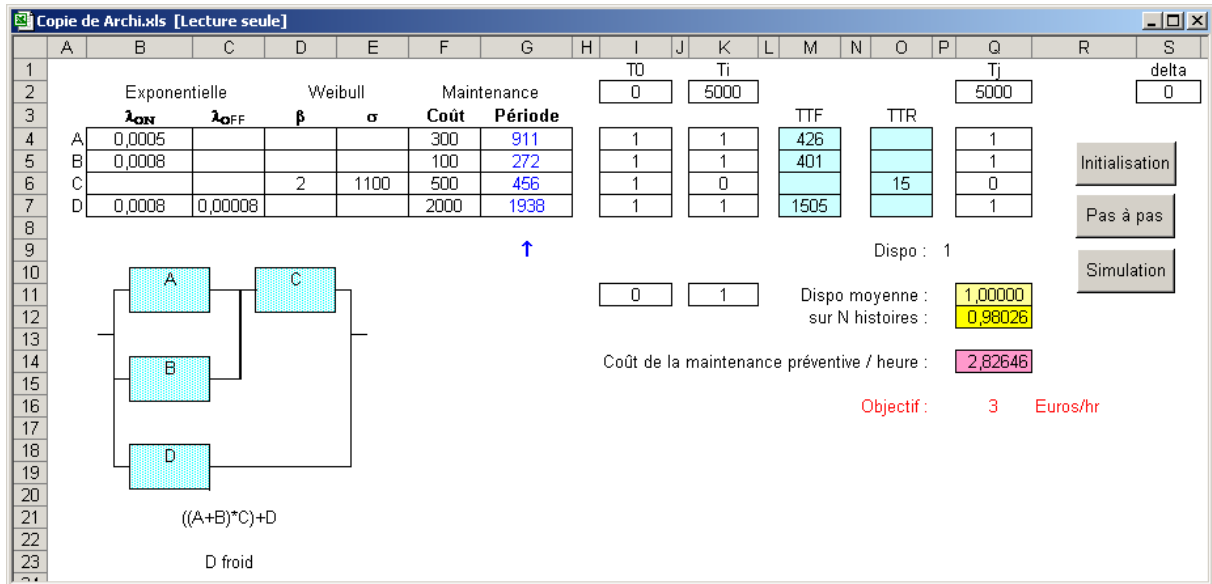


Figure 8. Optimisation de la maintenance préventive

Outre ces cas d'application relativement simples, des problématiques beaucoup plus complexes ont pu être traitées par ce type de modélisation, tel que l'exemple présenté en figure 9 relatif au déploiement et au renouvellement d'une constellation de satellites.

Ces derniers sont susceptibles de tomber en panne ( $OK \neq 1$ ) de manière aléatoire, selon une loi exponentielle dans cette application ( $\lambda$  constant), ou de manière déterministe au terme d'une durée de vie limitée par la capacité en ergol (DV). Constituée nominale d'un certain nombre (7) de satellites simultanément opérationnels ( $OP = 1$ ), la constellation est maintenue par des lancements simples ou multiples de satellites pouvant éventuellement séjourner un certain temps en orbite en tant que rechange. Leur activation est alors déclenchée par le sol mais n'est effective qu'après un délai de reconfiguration (1 mois). Un lancement est

décidé dès que le nombre de satellites fonctionnant en orbite est inférieur à un nombre minimum requis, en anticipant la fin de vie des satellites pour éviter des interruptions de service prévisibles. 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 le tir peut éventuellement conduire à l'échec ( $OK \neq \text{vrai}$ ). L'évaluation porte sur la disponibilité du service rendu par la constellation durant une mission opérationnelle de longue durée (30 ans), en terme de nombre moyen de satellites simultanément opérationnels, et sur les coûts associés ramenés à la date du premier lancement par un taux d'intérêt (3 %).

Dans ce cas précis, l'optimisation a porté sur une dizaine de paramètres relatifs aux caractéristiques des satellites (fiabilité, durée de vie..) et au mode d'exploitation de la constellation (critère de renouvellement, taille des lanceurs...).

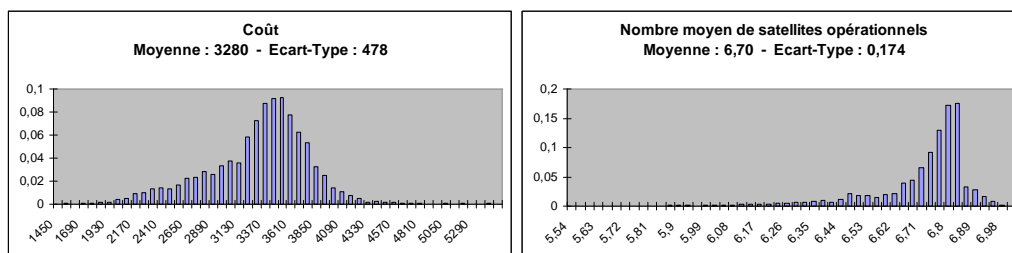
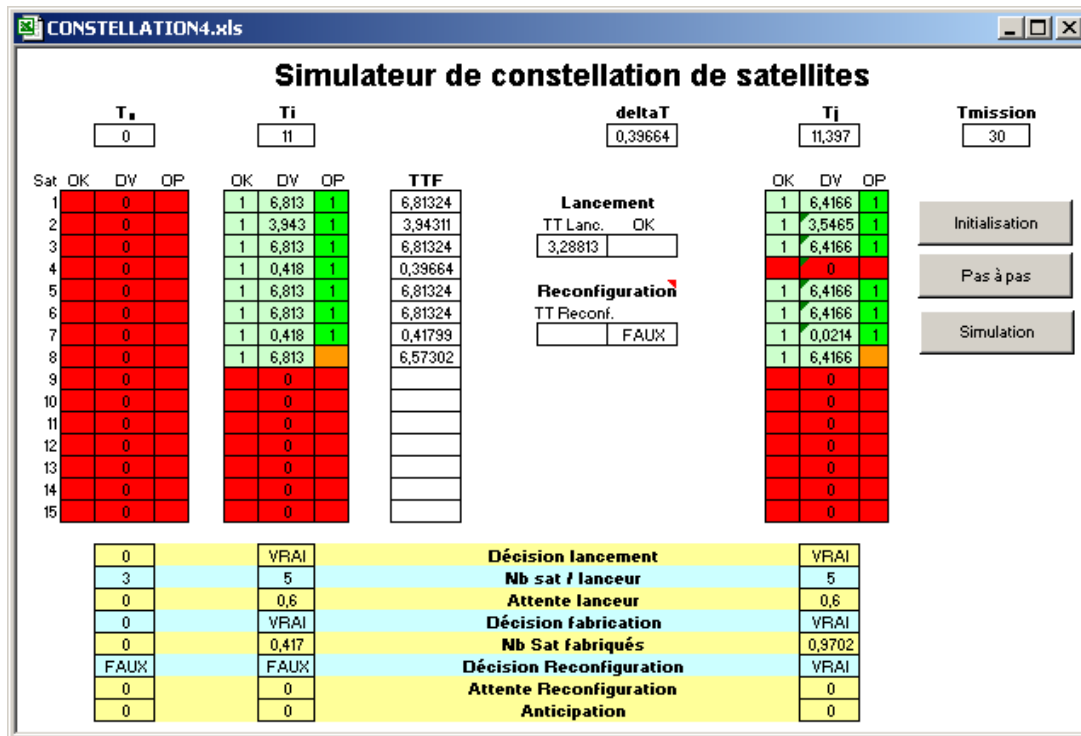


Figure 9. Modèle de constellation de satellites

## CONCLUSION

Quelle que soit leur complexité, les systèmes réparables peuvent aujourd'hui faire l'objet d'optimisation concernant des paramètres divers relatifs aux architectures, aux conditions d'exploitation, à la politique de maintenance et au Soutien Logistique Intégré (SLI), afin de proposer les meilleurs compromis entre la disponibilité de service et les coûts. Les techniques d'évaluation par simulation de Monte-Carlo sont sensiblement plus contraignantes que celles réalisées par calcul mais ne sont plus rédhibitoires. En effet, une amélioration du couplage entre optimisation et simulation stochastique permet de réduire très significativement les temps de calcul (divisés par 30 environ), ce qui ouvre de réelles perspectives à ce type de traitement sans attendre la mise sur le marché d'ordinateurs beaucoup plus performants.

En concurrence avec d'autres techniques telles que les réseaux de Petri stochastiques, la modélisation récursive a déjà permis de traiter des problématiques complexes du

domaine spatial pour le compte du CNES et de l'organisation internationale EUMETSAT.

S'appuyant sur les fonctionnalités d'un tableur très largement diffusé, elle permet de développer et de valider des modèles 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.

Couplée à l'optimisation, la modélisation récursive mériterait d'être confrontée à des problématiques particulièrement difficiles à résoudre telles que l'optimisation du déploiement et de la maintenance de la constellation GALILEO d'une trentaine de satellites ou l'amélioration de la fiabilité opérationnelle d'AIRBUS (Hugues 2002) (Hugues 2004) avec prise en compte de l'architecture avion et des stocks de rechange en escale....

## REFERENCES

A. Cabarbaye, L. Ngom (1999). Mise en œuvre de la méthode des états fictifs et génération automatique des matrices de Markov – QUALITA 99 – Paris

A. Cabarbaye (2003). Outil générique d'optimisation dans le domaine discret et/ou continu éventuellement stochastique - ROADEF'03 – Avignon

A. Cabarbaye, R.Laulheret (2005). Traitement de la fiabilité dynamique et des systèmes hybrides par modélisation récursive - QUALITA 2005 – Bordeaux

A. Cabarbaye, J.Faure, R. Laulheret (2006). Couplage entre optimisation et simulation stochastique - ROADEF'06 - Lille

P. Castagna (2003). Simulation des systèmes à événements discrets, extension aux systèmes hybrides - ENSAM - Paris

D. E. Goldberg (1994). Algorithmes Génétiques, Exploration optimisation et apprentissage automatique, Addison-Wesley.

E. Hugues, L. Saintis, A. Cabarbaye (2004) - ORA, model & tool for Operational Reliability Prediction within Airbus, ORA, l'outil Airbus de prédiction de la Fiabilité Opérationnelle - Lambdamu 14 – Bourges

E. Hugues, C. Gaiani, E. Charpentier, A. Cabarbaye (2002) – Application of Markov processes to predict aircraft Operational Reliability – INCOSE/ AFIS 2002 - Toulouse

P. E. Labeau (2003). Evolution de la modélisation en fiabilité dynamique - Journée Fiabilité dynamique et simulation hybride - ENSAM - Paris

R. Laulheret, B. Lacosta, A. Cabarbaye (2003). Modèles génériques de redondance M parmi N avec stock de rechanges S - MOSIM 03 - Toulouse

(ORA Tool) pour AIRBUS ainsi que des modèles de simulation de constellation de satellites pour l'organisation internationale EUMETSAT. Il a assuré la Présidence de l'Institut de Sûreté de Fonctionnement (ISDF) Midi-Pyrénées de 1999 à 2002.

### *Julien FAURE*

Ingénieur au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Julien Faure réalise des études de Sûreté De Fonctionnement sur différents projets de micro-satellites ainsi que pour des expériences destinées aux vols habités. Il a précédemment travaillé dans le milieu aéronautique sur les analyses de risque de plusieurs systèmes embarqués.

### *Roland LAULHERET*

Responsable du service Sûreté de Fonctionnement et Sécurité du Centre National d'Etudes Spatiales à Toulouse (CNES), Roland Laulheret a été en charge, à leur démarrage, de la SdF des filières mini et micro satellites.

## BIOGRAPHIES

### *André CABARBAYE*

Expert Senior au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), André Cabarbaye est responsable de la Sûreté de Fonctionnement de différents systèmes satellitaires (Pléiades, Hélios..). Parallèlement à cette activité, il a créé la société CAB INNOVATION dans les domaines de la Simulation, Optimisation et Maîtrise des Risques qui commercialise les différents outils évoqués dans cet article au sein de l'atelier logiciel SUPERCABPRO. Il a également développé l'outil de fiabilité opérationnel de l'A380 et de l'A400M