

EVALUATION ET OPTIMISATION DES SYSTEMES REPARABLES EVALUATION AND OPTIMIZATION OF REPAIRABLE SYSTEMS

Auteurs J. Faure, et R. Laulheret
Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)
18 av. Edouard Belin – 31401 Toulouse
tél. 0561282689 / fax. 0561282231
julien.faure@cnes.fr
roland.laulheret@cnes.fr
andre.cabarbaye@cnes.fr

A. Cabarbaye
CAB INNOVATION
3 rue de la Coquille – 31500 Toulouse
tél. 0561546808 / fax. 0561543332
andre.cabarbaye@cabinnovation.fr

Résumé

Cette communication porte sur deux méthodes d'évaluation de la disponibilité de systèmes réparables pouvant directement se coupler à des techniques d'optimisation automatisées. Cherchant à couvrir l'ensemble des problématiques rencontrées, ces méthodes sont illustrées par un cas d'application représentatif des moyens utilisés au sol sur les systèmes spatiaux (stations de réception, centres de contrôle ou d'exploitation, etc.).

Summary

The purpose of this presentation is to present two methods for the availability evaluation of repairable systems. Those methods can be directly coupled to automated optimization techniques and will be illustrated by a case-study of ground installations used to control satellites.

Contexte

Dans tous les domaines d'ingénierie, l'optimisation des systèmes sous contraintes de tenue d'objectif de Sécurité de Fonctionnement est devenue une problématique majeure dans un contexte concurrentiel exacerbé. Menée généralement selon un critère de coût, cette optimisation, passe par une évaluation de la disponibilité de systèmes souvent complexes, constitués de multiples équipements agencés selon divers schémas de redondance. Ces systèmes font l'objet d'une maintenance corrective ou préventive pour limiter les phénomènes d'usure et risques de panne cachée. Des stocks de rechange d'équipements spécifiques ou banalisés en divers points de l'architecture sont constitués pour pallier les délais d'approvisionnement ou de réparation.

Outre l'aptitude à modéliser le comportement réel de tels systèmes, les méthodes d'évaluation choisies doivent conduire à des traitements rapides pour pouvoir directement se coupler à des méthodes d'optimisation stochastiques [1] particulièrement gourmandes en nombre d'évaluations à réaliser pour assurer la convergence et pouvoir interagir avec les concepteurs en comparant rapidement les différentes solutions techniques candidates pour répondre aux fonctionnalités attendues du produit.

Aussi deux types de modélisation sont privilégiés au CNES sur les différents programmes :

- 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 (stocks de rechange partagés...).

Modélisation 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 l'effort de modélisation, différents outils peuvent être utilisés. Un générateur de modèles markoviens [2] 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 [3], comme 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, chaudes ou froides ($\lambda_{OFF} \neq \lambda_{ON}$ avec $\lambda = 1/MTBF$), sont caractérisées par des durées de reconfiguration (Treconf) sur les équipements en redondance.

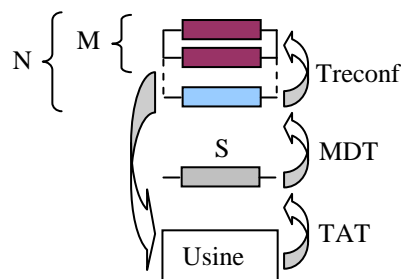


Figure 1. Formule paramétrique de redondance

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 :

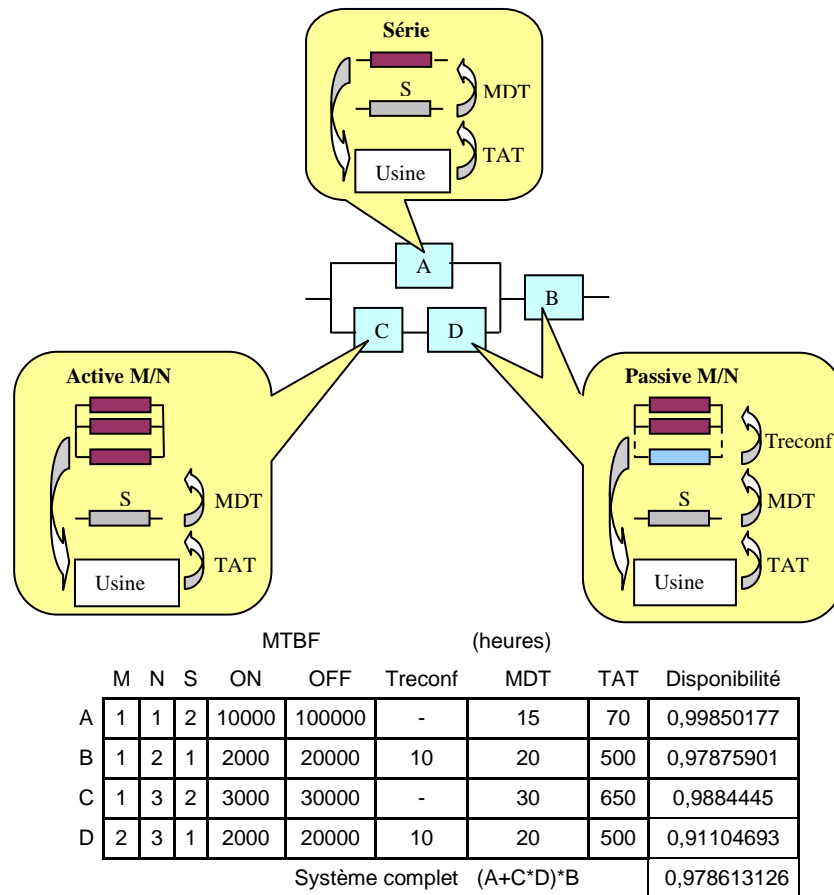


Figure 2. Exemple de modélisation hybride

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 [4], 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).

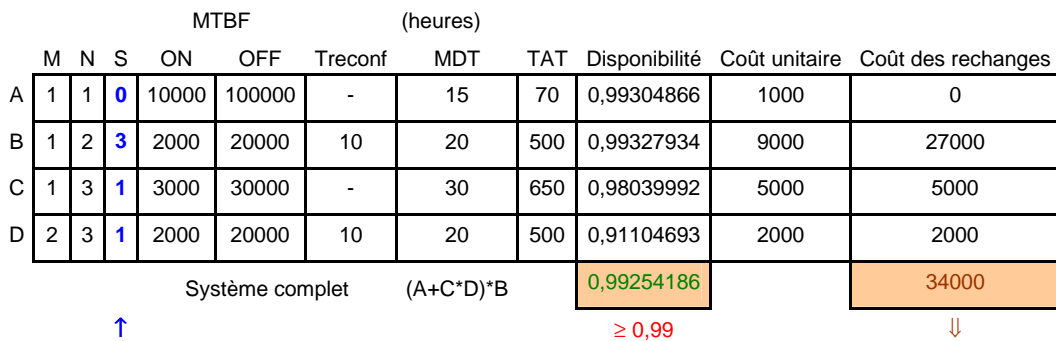


Figure 3. Optimisation des lots de rechange

L'optimisation peut également porter 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. L'exemple de la figure 4 concerne une station de contrôle de satellites constituée d'une station TTC (Telemetry / TeleCommand), d'un centre utilisateur et d'un centre secours (figure 4). Dans cet exemple, 24 paramètres (en caractères gras dans le tableau de la figure 5) ont été optimisés simultanément: MTBF ON, Type de redondance, Stock de rechange, TAT....

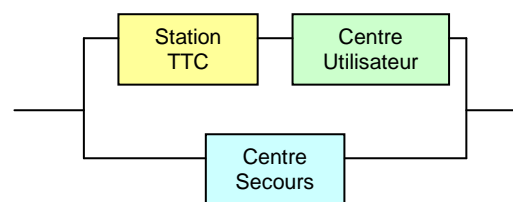


Figure 4. Architecture d'un centre de contrôle

Equipements	MTBF ON (heure)	Nb	Type de redondance	Stock de rechanges	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	4	1500	28	2400	0,9994	9000
Emetteur / récepteur	2477		Passive 1/2	1	22158	28	1000	0,9423	66474
Calculateur pilotage	2305		Passive 1/4	3	5220	25	800	0,9876	36540
A - STATION TTC								0,9274	125514
Serveur archive	33000	1	série	1	4500	29	121	0,9991	9439
Serveur de production	2075		Passive 2/2	1	1612	30	144	0,9854	5264
PC supervision	10000		Active 1/4	3	500	28	468	0,9972	3766
Disque miroir	50000	2	série	0	4000	28	432	0,9989	8284
B - CENTRE UTILISATEUR								0,9807	26753
Antenne	33000	1	série		4500		1000	0,9706	4500
Emetteur / récepteur	2000	1	série	2	5001	40	123	0,9802	15443
PC supervision	127000	1	série	1	500	40	121	0,9997	1440
C - CENTRE SECOURS								0,9511	21382
SYSTEME GLOBAL :							A*B+C	0,9956	173650

Disponibilité > Objectif : **0,995**



Figure 5. Optimisation multi paramètres

Dans l'exemple de la figure 2, si l'on suppose que les équipements B et D sont identiques et qu'il existe un stock de rechange partagé, la méthode hybride ne permet plus de calculer la disponibilité à cause de la dépendance entre sous-systèmes. Il est en revanche toujours possible de calculer la probabilité de rupture du stock, au moyen d'une formule markovienne telle que celle présentée en figure 1, en considérant que l'on adopte, pour chaque type d'équipement, une stratégie de cannibalisation dans toute l'architecture (prélèvement d'équipements identiques non actifs dans d'autres chaînes en redondance) :

- M : Nombre d'équipements nécessaires d'un certain type
- N-M : Nombre d'équipements du stock de rechange ou en redondance sur l'une quelconque des chaînes
- Treconf = 0
- MDT = 0
- TAT : Temps de retour et réparation en usine ou de réapprovisionnement

Une autre solution consiste à évaluer la disponibilité du système par une simulation de type Monte-Carlo.

Optimisation et simulation récursive

Quand le découpage entre sous-systèmes est impossible, du fait de leur interdépendance, ou que ces derniers s'avèrent trop complexes, la simulation devient incontournable.

Une technique originale couplant optimisation et simulation récursive peut alors être employée pour modéliser le comportement du système sans aboutir à des durées de traitement prohibitives.

Proposée par un outil de simulation fonctionnant sous Excel (SIMCAB), cette technique de modélisation de systèmes à états discrets [5][9] est illustrée par la figure 6.

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 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 , 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 [6] [7].

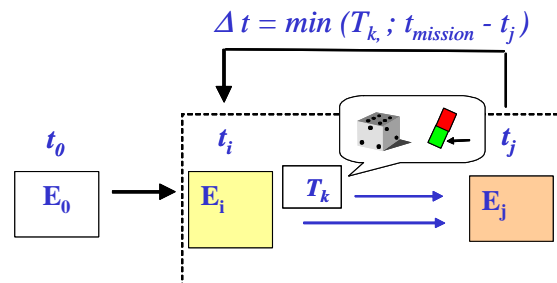


Figure 6. Modèle récursif

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 [8] 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 7. 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 .

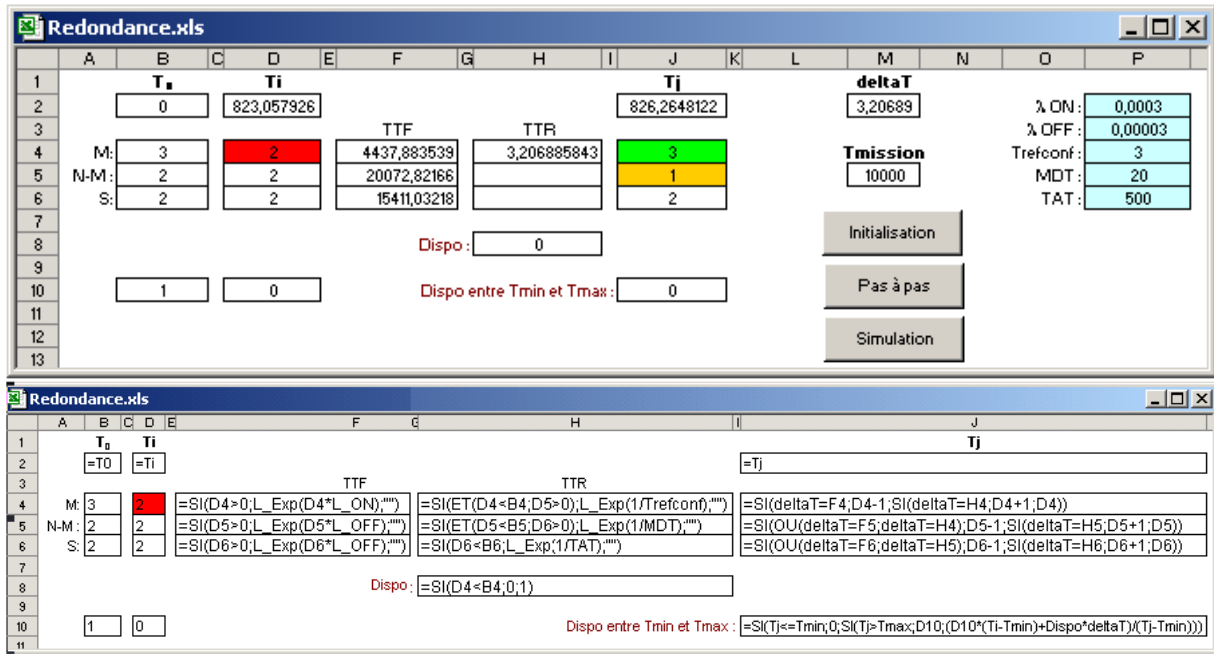


Figure 7. Modèle de redondance M parmi N avec stock de rechange de dimension S

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 8. 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.

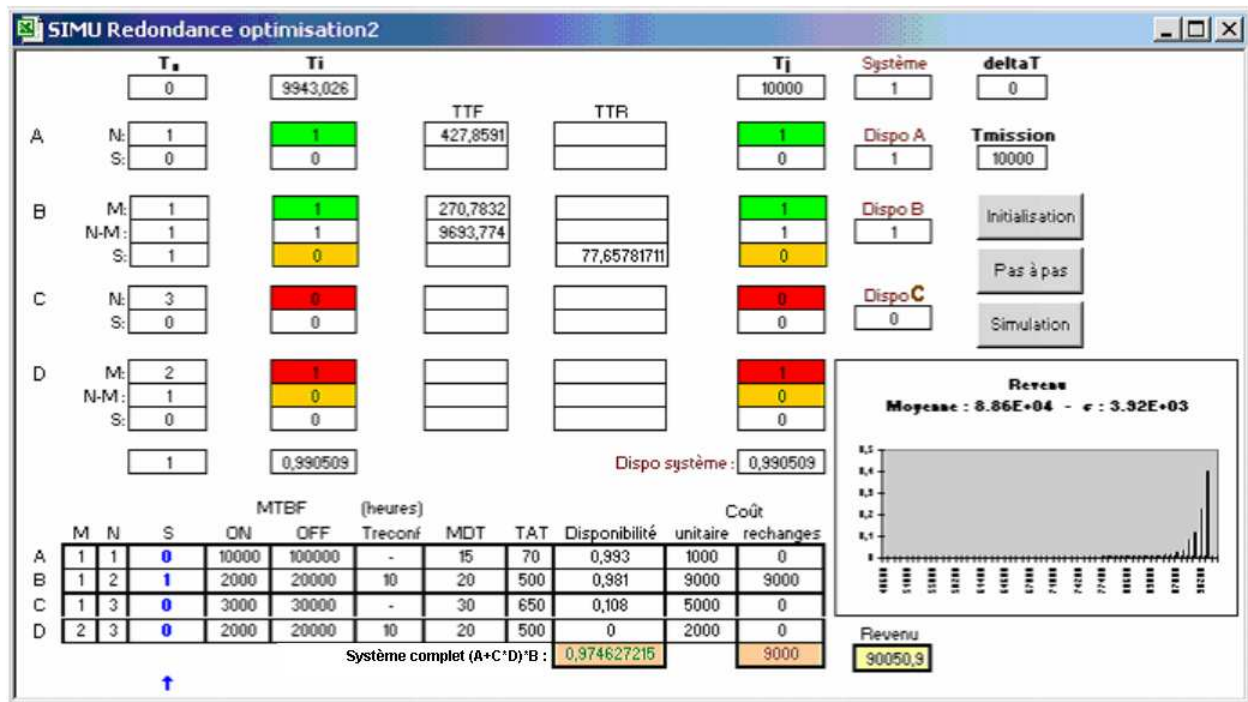


Figure 8. Optimisation de l'architecture

De la même manière, l'exemple de la figure 9 illustre un cas d'école relatif à l'optimisation de la périodicité d'actions de maintenance préventive d'un système constitué d'éléments

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

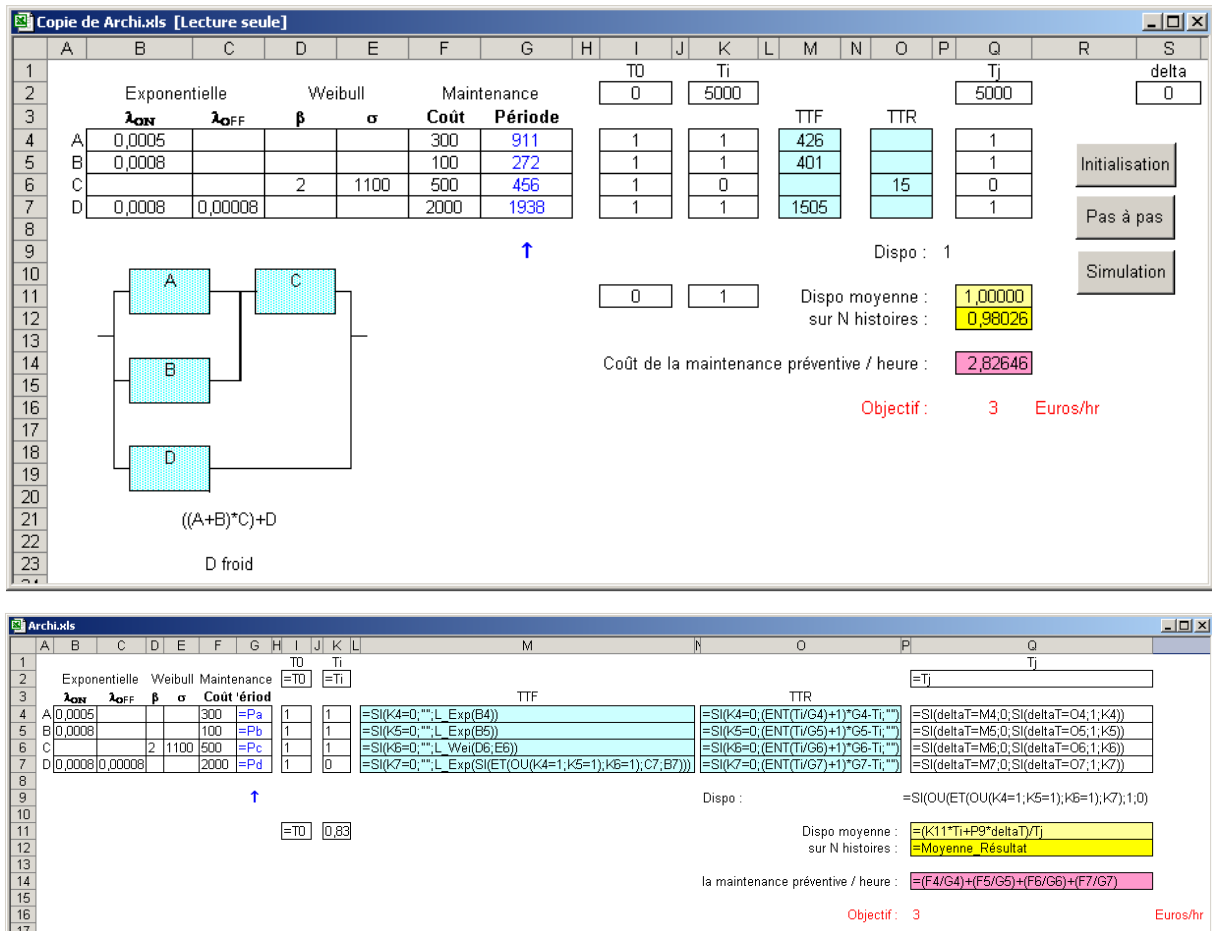


Figure 9. Optimisation de la maintenance préventive

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, des améliorations du couplage entre optimisation et simulation stochastique permettent de réduire très significativement les temps de calcul, ce qui ouvre de réelles perspectives à ce type de traitement sans attendre la mise sur le marché d'ordinateurs beaucoup plus performants.

Références

[1] David E. Goldberg, Algorithmes Génétiques, Exploration optimisation et apprentissage automatique, Addison-Wesley, 1994.
 [2] A. Cabarbaye, L. Ngom, Mise en œuvre de la méthode des états fictifs et génération automatique des matrices de Markov, Qualita 99, Paris, 1999.

[3] R. Laulheret, B. Lacosta, A. Cabarbaye, Modèles génériques de redondance M parmi N avec stock de rechanges S - MOSIM 03, TOULOUSE, 2003.

[4] A. Cabarbaye, Outil générique d'optimisation dans le domaine discret et/ou continu éventuellement stochastique - ROADEF'03 - Avignon, 2003.

[5] Cabarbaye A., Laulheret R., Traitement de la fiabilité dynamique et des systèmes hybrides par modélisation récursive, QUALITA 2005, Bordeaux, 2005.

[6] Pierre Etienne Labeau, Evolution de la modélisation en fiabilité dynamique, Journée Fiabilité dynamique et simulation hybride, ENSAM, PARIS, 2003.

[7] Pierre Castagna, Simulation des systèmes à événements discrets, extension aux systèmes hybrides, ENSAM, PARIS, 2003.

[8] A. Cabarbaye, J.Faure, R. Laulheret, Couplage entre optimisation et simulation stochastique, ROADEF'06, Lille, 2006.

[9] A. Cabarbaye, Julien Faure, R.Laulheret, Apport des modèles de simulation récursive à l'évaluation des systèmes, $\lambda\mu 15$, Lille, 2006.