

Qualité de service d'un système d'imagerie satellitaire

André CABARBAYE

CAB INNOVATION, 3 rue de la Coquille,
31500, Toulouse, France
andre.cabarbaye@cabinnovation.fr
Centre National d'Etudes Spatiales (CNES),
18 av. Edouard Belin, 31401, Toulouse, France
andre.cabarbaye@cnes.fr

Roland LAULHERET

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

Résumé - Cherchant à dimensionner un système d'imagerie satellitaire, cet article propose une méthodologie d'allocation de disponibilité des ressources et d'évaluation de la qualité de service allant de la requête d'un utilisateur jusqu'à la fourniture d'images prises par un satellite défilant en orbite basse. Elle présente également une technique de modélisation des systèmes hybrides (à variables aléatoires et continues) à états discrets ainsi qu'un outil de génération automatique de simulateur d'architecture de systèmes.

Mots clés : Disponibilité – Modèles de simulation récursive - Dimensionnement probabiliste

Abstract - Trying to size of imaging satellite system, this paper proposes a methodology for allocating resources and evaluating the quality of service from a user's demand to the delivery of images taken by a low earth orbit satellite. It also presents a technique for modelling hybrid systems (included random and continuous variables) with discrete states and a tool for automatically generating systems architecture simulator.

Keywords : Availability - Recursive simulation models - Design from simulation

I. INTRODUCTION

Outre les satellites, un système d'imagerie satellitaire comprend différents moyens au sol comme l'illustre la figure 1. Les centres de mission reçoivent les demandes des utilisateurs et exploitent les données acquises par les satellites. Les centres de contrôle surveillent la bonne santé des satellites et en assurent la programmation. Les stations d'émission / réception dialoguent au moyen d'antennes avec les satellites lors de leur passage en visibilité (à l'exception des satellites géostationnaires toujours visibles).

Ces moyens regroupent de nombreux constituants susceptibles de tomber en panne et d'être réparés ou remplacés par des éléments de rechange.

La disponibilité du service offert implique que l'ensemble de la chaîne fonctionnelle allant de la demande d'un utilisateur jusqu'à la fourniture de l'objet de sa requête soit opérationnel de bout en bout.

L'impact des dysfonctionnements dépend de la position des satellites à ces instants et la perte d'un ou plusieurs passages en visibilité de la station, en émission ou réception, a des effets plus ou moins graves selon les possibilités de reprise du système (simple retard, dégradation ou perte d'observations).

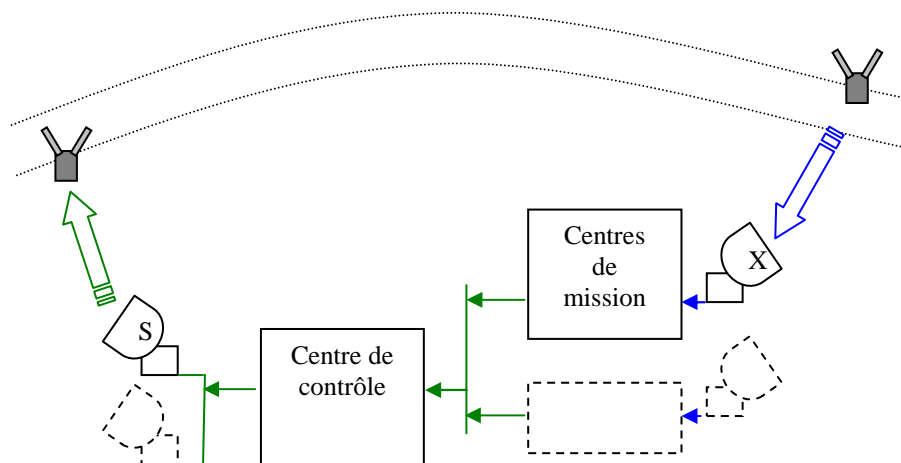


Figure 1. Système d'imagerie satellitaire

Ainsi, les messages de programmation portent-ils sur une durée suffisamment longue de la vie orbitale pour permettre leur recouvrement partiel et tolérer, par là-même, la perte de certains passages en visibilité des stations (le traitement des nouvelles requêtes sera cependant décalé). De même, la télémesure image est sauvegardée dans le satellite en cas d'indisponibilité passagère du lien bord/sol et son vidage peut être reprogrammé ultérieurement.

La modélisation conjointe de l'architecture du système associé à son soutien logistique et de la chronologie des échanges bord/sol est nécessaire pour évaluer la qualité du service attendu. Aussi, cette communication porte-t-elle sur une technique de modélisation des systèmes hybrides (à variables aléatoires et continues) à états discrets ainsi que sur un outil de génération automatique de simulateur d'architecture de systèmes qui sont utilisés au CNES pour résoudre ce type de problématique.

Par ailleurs elle propose une méthodologie d'allocation de disponibilités des ressources qui a été développée dans le cadre d'un tel projet.

II. METHODOLOGIE D'ALLOCATION DE DISPONIBILITES DES RESSOURCES

Une durée moyenne d'interruption de service peut recouvrir des délais relativement courts, résultant de reconfigurations sur des éléments en redondance ou des réparations par simple échange standard, et des délais beaucoup plus longs consécutifs à d'éventuels épuisements de stocks de rechange.

Or l'impact de l'indisponibilité d'un matériel sur le service offert dépend de la durée de celle-ci, notamment en raison des possibilités de reprises du système. Aussi, paraît-il judicieux de ne pas limiter les allocations de disponibilité des divers constituants à de simples valeurs moyennes, mais de différencier celles-ci selon la durée des interruptions générées par rapport aux seuils des possibilités de reprise du système :

Dispo 1 avec interruption \leq seuil
et Dispo 2 avec interruption $>$ seuil

Ces allocations de disponibilité doivent permettre d'offrir à l'utilisateur une qualité satisfaisante du service au meilleur coût, soit dans un mode de fonctionnement totalement nominal, soit dans des modes plus ou moins dégradés en termes de retard dans la délivrance des produits demandés ou d'images programmées avant la dernière requête dans le cas d'un système d'imagerie.

Ces allocations peuvent s'appuyer sur des analogies par rapport à des matériels existants pour en assurer la faisabilité.

En phase de conception préliminaire, la qualité du service offert doit pouvoir être évaluée à partir de telles allocations.

Devant répondre à une double exigence de disponibilité selon des interruptions en-deçà ou au-delà d'un seuil, chacun des constituants du système peut se modéliser par 2 blocs en série comme le montre la figure 2.



$Dispo1$ pour interruptions $\leq S$ et $Dispo2$ pour interruptions $> S$

Figure 2. Modélisation d'un constituant

Le premier bloc correspond aux interruptions de courte durée comprises entre 0 et S et de moyenne $MDT1 = S/2$, en considérant une répartition uniforme.

Le temps moyen de fonctionnement correspondant $MUT1$ se calcule alors à partir de la formule suivante :

$$MUT1 = S/2 * Dispo1 / (1-Dispo1) \text{ résultant de l'expression :}$$

$$Dispo = MUT / (MUT + MDT)$$

Le second bloc correspond aux interruptions de durée supérieure à S . En considérant qu'une seule interruption de ce type ne survienne durant toute la mission, sa durée doit être inférieure à $(1-Dispo2) * T_{mission}$, pour rester conforme à l'exigence.

En considérant une répartition uniforme, la durée moyenne des interruptions est alors :

$$MDT2 = ([1-Dispo2] * T_{mission} + S) / 2$$

et celle de fonctionnement :

$$MUT2 = (Dispo2 * T_{mission} + Dispo2 * S / [1-Dispo2]) / 2$$

III. MODÈLES DE SIMULATION RÉCURSIVE

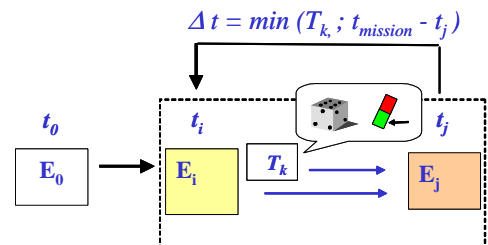


Figure 3. Modèles de simulation récursive

Mise en œuvre sous Excel par le logiciel SIMCAB de la société CAB INNOVATION, la modélisation récursive [1] & [2] est une technique de simulation des systèmes hybrides à états discrets. Illustrée par la figure 3, elle consiste à décrire une transition générique entre deux instants courants t et $t+\Delta t$ correspondant à l'occurrence de changements aléatoires d'états (défaillance, remise en service...) ou au franchissement de certains seuils par des variables continues (position, alarme...).

En partant d'un état initial $E0$, l'outil recopie l'état Ej de sortie du modèle (défini dans une plage de cellules) dans l'état Ei en entrée du modèle (dans une plage similaire), pendant toute la durée de la mission, en prenant comme incrément de temps ($\Delta t = \min T_k$) la plus petite valeur parmi les différentes

durées de transition possibles tirées aléatoirement ou calculées dans une autre plage de cellules. L'état E_j est défini à partir de l'état E_i et de la transition correspondant à la valeur Δt .

Les durées T_k sont recalculées à chaque transition dans le cas markovien ou calculées une seule fois puis décrémentées jusqu'à l'occurrence de l'événement correspondant dans le cas contraire.

IV. GÉNÉRATION AUTOMATIQUE DE MODÈLES DE SIMULATION D'ARCHITECTURE

Afin de simplifier l'évaluation d'architectures parfois complexes, un outil de génération automatique de modèles de

simulation récursive a été développé et a notamment été utilisé pour dimensionner le segment sol de l'ATV (Automated Transfer Vehicle of the International Space Station). A partir d'une table renseignée par l'utilisateur, cet outil permet de générer automatiquement le modèle de simulation d'un système à partir des caractéristiques de défaillance (à l'état ON, OFF ou à la sollicitation), de réparation, de reconfiguration et de logistique opérationnelle de ses constituants (avec des rechanges éventuellement partagés), ainsi qu'une description logique de ses modes de fonctionnement nominaux ou dégradés.

Un exemple succinct relatif à un centre de mission est présenté en figure 4.

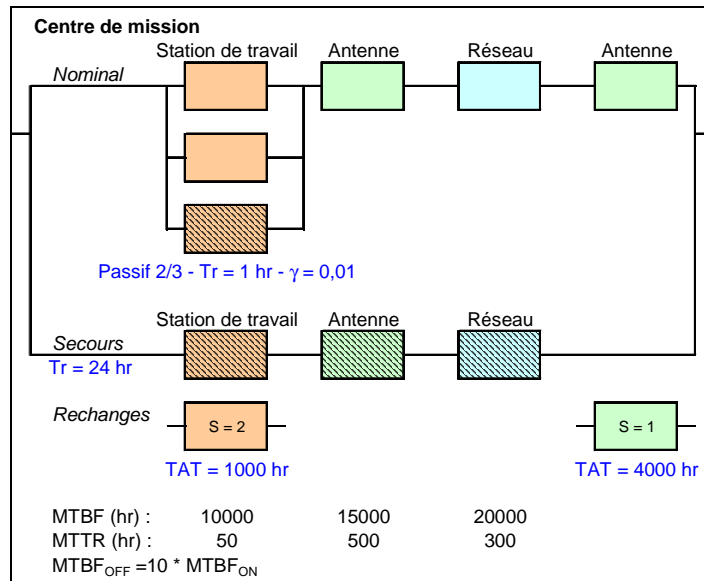


Figure 4. Bloc Diagramme de Fiabilité (BDF) d'un centre de mission

Celui-ci est constitué de stations de travail, d'antennes et d'un réseau de télécommunication. Deux stations de travail sont utilisées nominalement parmi trois. La perte de l'une d'entre elles entraîne une diminution de 40 % de la production (nombre d'images traitées par exemple pour un système d'observation de la Terre). Une heure est nécessaire pour activer la redondance avec un risque de 1% de non-fonctionnement à la sollicitation. Un centre de secours est utilisé en cas de perte du nominal. Celui-ci est deux fois moins productif et nécessite 24 heures pour sa mise en route. Un stock de rechanges constitué de deux stations de travail et d'une antenne permet de pallier des délais de retour et de réparation en usine conséquents (TAT). La table correspondant à cet exemple est présentée en figure 5.

Chaque équipement du système est renseigné dans une ligne de la table. Les conditions de mise à l'état OFF des équipements en redondance passive sont définies au moyen des opérateurs ET (*), OU (+), NON (~) ou combinaison M/N(i+...+k) à partir de l'état de bon fonctionnement d'autres équipements identifiés par leur numéro.

Ainsi, la station de travail 3, en redondance, n'est pas utilisée tant que les 2 premières fonctionnent. Son taux de défaillance λ_{OFF} est alors considéré égal au dixième de celui à l'état ON. Elle n'est opérationnelle qu'après une durée d'une heure (Treconf) avec un risque de 1% de panne à la sollicitation (γ). Cette même station de travail utilise le même stock de rechange que l'équipement 1 (station de travail n°1), constitué de 2 unités ; le délai de réapprovisionnement de ce stock (TAT) étant de 1000 heures.

Il est à noter que l'ordre de saisie dans la table des équipements qui utilisent un même stock de rechange définit également l'ordre d'attribution des rechanges et que le stock est décrément à la fin de chaque réparation.

Les fonctionnements nominaux ou dégradés du système ou de ses sous-ensembles sont également définis au moyen des opérateurs ET (*), OU (+), NON (~) et combinaison M/N(i+...+k) mais, cette fois-ci, à partir de l'état d'activation (état ON) d'autres équipements identifiés par leur numéro précédé de la lettre E, ou d'autre états de fonctionnement identifiés par leur numéro précédé de la lettre F.

Centre de mission															
Equipement		Panne		Réparation		Passif					Stock rechange				
N°	Nom	Loi	λ	Loi	μ	Condition OFF	Panne OFF		T _{Reconf}		γ	N°	S	TAT	
							Loi	λ_{OFF}	Loi	T _{reconf}				Loi	TAT
1	Station de travail 1	EXP	0,0001	EXP	0,02		EXP		EXP				2	EXP	1000
2	Station de travail 2	EXP	0,0001	EXP	0,02		EXP		EXP			1		EXP	
3	Station de travail 3	EXP	0,0001	EXP	0,02	1*2	EXP	1E-05	EXP	1	0,01	1		EXP	
4	Antenne 1	EXP	7E-05	EXP	0,002		EXP		EXP				1	EXP	4000
5	Réseau 1	EXP	5E-05	EXP	0,00333		EXP		EXP					EXP	
6	Antenne 2	EXP	7E-05	EXP	0,002		EXP		EXP			4		EXP	
7	Station de travail 4	EXP	0,0001	EXP	0,02	1/3(1+2+3)*4*5*6	EXP	1E-06	EXP	24		1		EXP	
8	Antenne 3	EXP	7E-05	EXP	0,002	1/3(1+2+3)*4*5*6	EXP	7E-07	EXP	24		4		EXP	
9	Réseau 2	EXP	5E-05	EXP	0,00333	1/3(1+2+3)*4*5*6	EXP	5E-07	EXP	24				EXP	

Fonctionnement	
N°	Nom
1	Nominal
2	Dégradé 1
3	Secours
4	Dégradé 2
5	
6	

Figure 5. Table renseignée du centre de mission

Le modèle de simulation présenté en figure 6 est généré automatiquement à partir de la table. L'état des équipements, des stocks de rechanges et des fonctions apparaît dans 3 colonnes correspondant aux instants T₀, T_i et T_j. L'état actif se caractérise par la valeur 1 (vert), l'état en panne par la valeur 0 (rouge), et l'état passif par l'absence de caractère (gris). Les cellules centrales (bleu) correspondent aux durées T_k tirées

aléatoirement, soit les durées avant défaillance (TTF), avant réparation (TTR), avant passage à l'état actif ou passif (TTS) ou avant réapprovisionnement des stocks de rechanges (TAT). Des cellules supplémentaires sont également utilisées pour calculer la disponibilité moyenne des différentes fonctions au cours de la mission.

	T ₀	T _i		T _j	DeltaT
	0	0		0	0
Equipements			TTF	TTR	TTS
E1 :	1	1	7435,74		1
E2 :	1	1	14613,35		1
E3 :	1	1	386,57		0,00
E4 :	1	1	3252,46		1
E5 :	1	1	5273,66		1
E6 :	1	1	2105,34		1
E7 :	1	1	19793,75		0,00
E8 :	1	1	49654,76		0,00
E9 :	1	1	6491,24		0,00
Stocks			TAT		
S1 :	2	2			2
S4 :	1	1			1
Fonctions					
F1 :	1				1
F2 :	1				1
F3 :	1				0
F4 :	1				1
Moyenne/mission					
F1 :					1
F2 :					1
F3 :					0
F4 :					1

Figure 6. Simulateur du centre de mission

Ayant été initialisé (troisième station de travail et centre de secours à l'état OFF), le modèle permet de simuler le centre de mission en pas à pas ou durant toute sa vie utile. Cette dernière peut être rejouée un grand nombre de fois afin d'obtenir des

estimations statistiques éventuellement encadrées par un intervalle de confiance.

Outre l'exponentielle, des lois de probabilité diverses peuvent être considérées en faisant l'hypothèse markovienne ou pas (une loi de Weibull pour la durée de bon fonctionnement des antennes ou une loi lognormale pour le temps de réparation par exemple). Dans le cas non markovien, des lignes supplémentaires sont ajoutées dans le simulateur afin de mémoriser les durées correspondantes qui sont décrétementées à l'occurrence de chaque événement jusqu'à leur prise en compte effective. L'outil permet également de générer des Blocs Diagramme de Fiabilité (BDF) animés par la simulation au pas à pas ou sous forme d'images.

L'utilisateur peut compléter le modèle de simulation d'architecture qui a été généré, soit pour obtenir un résultat particulier tel que le niveau de production d'images dans notre exemple, soit pour le coupler avec un autre modèle tel qu'un modèle d'orbitographie afin de considérer l'effet réel des dysfonctionnements selon la position des satellites.

V. EVALUATION DU SYSTÈME D'IMAGERIE À PARTIR D'ALLOCATIONS

La disponibilité du service a été estimée au moyen d'un simulateur comportemental semblable à celui de la figure 7 (les véritables données ont été modifiées pour des raisons de confidentialité). Celui-ci modélise l'architecture du système, qui comprend ici 4 antennes et dont chaque constituant est dissocié en deux blocs a et b relatifs à un seuil de durée d'interruption, et la chronologie des échanges. Traitée à droite du simulateur qui a été automatiquement généré par l'outil et en partie masqué sur la figure, celle-ci n'est considérée qu'en cas de dysfonctionnement afin d'accélérer la durée des simulations qui peut porter sur plusieurs dizaines d'années de mission. Un événement fictif survenant alors durant la nuit (à minuit) permet d'évaluer la qualité du service offert durant la journée précédente et de mettre à jour les indisponibilités moyennes tout au long de la mission dans 4 modes de fonctionnement (nominal, avec programmation antérieure éventuelle, avec retard, avec perte de capacité).

Architecture

N°	Nom	Panne		Réparation	
		Loi	λ	Loi	μ
1	Pré programmation a	EXP	2,51E-03	EXP	5,00E-01
2	Pré programmation b	EXP	2,19E-05	EXP	2,18E-02
3	Programmation a	EXP	2,51E-03	EXP	5,00E-01
4	Programmation b	EXP	2,19E-05	EXP	2,18E-02
5	Centre de contrôle a	EXP	2,51E-03	EXP	5,00E-01
6	Centre de contrôle b	EXP	2,19E-05	EXP	2,18E-02
7	Station 1 a	EXP	8,38E-04	EXP	1,67E-01
8	Station 1 b	EXP	2,30E-05	EXP	1,51E-03
9	Station 2 a	EXP	8,38E-04	EXP	1,67E-01
10	Station 2 b	EXP	2,30E-05	EXP	1,51E-03
11	Station 3 a	EXP	8,38E-04	EXP	1,67E-01
12	Station 3 b	EXP	2,30E-05	EXP	1,51E-03
13	Station 4 a	EXP	8,38E-04	EXP	1,67E-01
14	Station 4 b	EXP	2,30E-05	EXP	1,51E-03
15	Traitement image a	EXP	8,38E-04	EXP	1,67E-01
16	Traitement image b	EXP	2,01E-05	EXP	2,01E-02

Fonctionnement		
N°	Nom	Condition
1	Programmation	E1*E2*E3*E4
2	Centre de contrôle	E5*E6
3	Station 1	E7*E8
4	Station 2	E9*E10
5	Station 3	E11*E12
6	Station 4	E13*E14
7	Traitement image	E15*E16
8	Segment sol	F1*F2*F3*F4*F5*F6*F7
9		

Equipements	T0		Ti		Tj		DeltaT
	0	150,39			150,5043703		0,112
E1	1	1	197,28		1		
E2	1	1	5157,31		1		
E3	1	1		0,11	1		
E4	1	1	20444,60		1		
E5	1	1	31,29		1		
E6	1	1	16369,16		1		
E7	1	1	33,56		1		
E8	1	1	59262,70		1		
E9	1	1	1222,68		1		
E10	1	1	10084,83		1		
E11	1	1	233,29		1		
E12	1	1	79442,37		1		
E13	1	1	3889,48		1		
E14	1	1	41158,26		1		
E15	1	1	265,86		1		
E16	1	1	8928,26		1		

Fonctions		Programmation		Centre de contrôle	
F1	0		1		1
Début	150,39		150,3925269		150,5043703
Fin					
F2	1		1		1
F3	1		1		1
F4	1		1		1
F5	1		1		1
Début	128,23		128,2319843		138,2653452
Fin	138,27				
F6	1		1		1
F7	1		1		1
F8	0		1		1
	17,607	17,61			17,4956297
Dispo nominal	0,8404		0,840536192		0,840536192
Dispo dégradé 1	0,8404		0,840536192		1
Dispo dégradé 2	1		1		1
Dispo dégradé 3	1		1		1
Dispo moyenne	0,9333		0,932591962		

Figure 7. Simulateur du système d'imagerie

Après un grand nombre de simulations de la mission, des résultats sous forme de distributions statistiques telles que

celles présentées en figure 8 permettent au client de connaître précisément la qualité du service qui lui sera délivré

ultérieurement et de juger de son acceptabilité éventuelle. Il permet également d'identifier très tôt des pistes d'amélioration telle que la mutualisation des stocks de rechange de l'élément des stations qui constituent dans cet exemple le point faible du système. Ce même simulateur sera utilisé ultérieurement en phase de conception détaillée en y intégrant l'architecture et les caractéristiques de tous les constituants du système.

fait que celle-ci a été intentionnellement calée sur la journée de travail des opérateurs. Aussi le caractère hybride du système impliquant des variables aléatoires (temps de fonctionnement et de réparation...) et continues (position des satellites dans l'espace) disparaît ici quelque peu avec des périodes de visibilité quasiment déterministes. Il n'en est pas de même sur d'autres systèmes qui nécessitent l'intégration d'un modèle complet d'orbitographie [3].

VI. CONCLUSION

Les exigences de disponibilité sont souvent formulées de manière ambiguë dans les spécifications techniques des systèmes et de leurs constituants et ne répondent pas toujours à un véritable besoin du client. Aussi la méthodologie d'allocation proposée dans cette communication peut-elle intéresser des concepteurs dans des champs d'applications divers.

Se présentant comme une alternative à d'autres techniques de modélisation, les modèles de simulation récursive permettent d'évaluer des systèmes à états discrets hybrides, impliquant des phénomènes aléatoires et continus, représentatifs d'une grande partie des systèmes réels observés sur le terrain, tels que les satellites dans l'espace ou les trains sur leurs voies.

Bénéficiant d'un outil de génération automatique à partir d'une définition des caractéristiques de l'architecture du système, ces modèles sont régulièrement utilisés au CNES pour résoudre des problématiques complexes du domaine spatial.

REFERENCES

- [1] CABARBAYE, A., LAULHERET, R., Evaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes dynamiques par modélisation récursive, Qualita, Bordeaux, 2005.
- [2] CABARBAYE, A., LAULHERET, R., Modèle de simulation récursive et optimisation, 41èmes Journées de Statistique, Bordeaux, 2009.
- [3] CABARBAYE A., Etienne K., Dimensionnement probabiliste et optimisation des systèmes par des modèles de simulation hybrides, lambda mu 17, 5-7/10/2010, La Rochelle

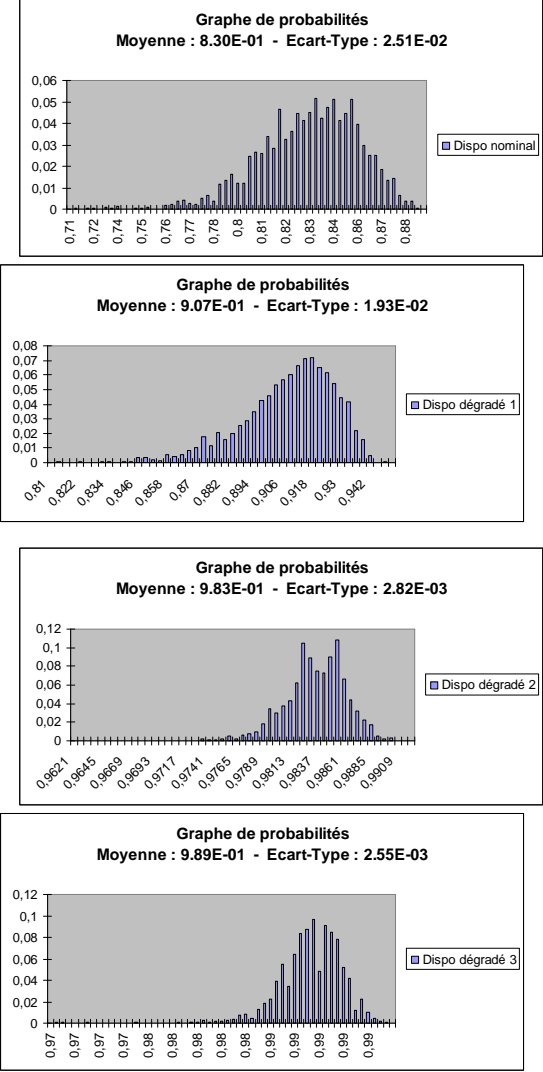


Figure 8. Qualité du service correspondant (2000 simulations)

Il est à noter que la prise en compte de la chronologie des échanges a été grandement facilitée dans cet exemple par le