

Rapport INRIA 1994 — Programme 1
Modélisation des systèmes aléatoires

Projet MODEL

3 mai 1995

Projet MODEL

Modélisation des systèmes aléatoires

Localisation : *Rennes*

Mots-clés : agrégation d'états (1, 5), approximation (1, 6), disponibilité (1, 3), évaluation de performance (7), fiabilité du logiciel (1, 5), file d'attente (1, 7), MODEL (1), modèle de stock (1, 9), modèle markovien (1, 3–5), modèle structurel (1, 5), performabilité (1, 4), réduction de la variance (8), régime transitoire (1), réseau à haut débit (1, 7), réseau de file d'attente (1), réseau maillé (1, 8), simulation Monte Carlo (1, 6, 8), sûreté de fonctionnement (1), système réparable (1, 3, 4).

Model est un projet commun Inria/CNRS (URA 227).

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Raymond Marie, professeur, université de Rennes 1, en année sabbatique à partir du 26 septembre 1994

Secrétaire

Evelyne Livache, SAR Inria

Personnel Inria

Gerardo Rubino, CR
Bruno Sericola, CR

Personnel Ura 227

Louis-Marie Le Ny, maître de conférences, université de
Rennes 1

Miklós Molnár, maître de conférences, Insa

Visiteur étranger

Alessandro Merlo, chercheur doctorant, université de Pavie,
de juin 1994 à janvier 1995

Chercheurs doctorants

Stéphane Bulteau, bourse Inria Région, à partir du 1^{er} oc-
tobre 1994

Hector Cancela, bourse du gouvernement uruguayen

Stéphanie Mahévas, bourse Inria, à partir du 1^{er} octobre 1994

Hédi Nabli, bourse CNRS Région

Bruno Tuffin, bourse MESR, à partir du 1^{er} octobre 1994

Collaborateurs extérieurs

Haïscam Abdallah, maître de conférences, université de Rennes 2

Mohamed El Khadiri, maître de conférences, IUT de Saint-
Nazaïre

James Ledoux, maître de conférences, Insa

Patrice Leguesdron, maître de conférences, Insa

Jean Pellaumail, professeur, Insa

2 Présentation générale et objectifs

L'objectif central du projet Model est le développement de techniques de résolution de modèles pour l'évaluation de la performance et/ou de la fiabilité des systèmes, en particulier en informatique, communication et productique.

Note activité s'articule autour des principaux axes suivants :

- **Processus de Markov** : ce thème regroupe la plus grande partie de notre travail de recherche. Nous nous intéressons en particulier au calcul de mesures associées au régime transitoire pour les applications en fiabilité, en sûreté de fonctionnement et plus généralement en performabilité, et au régime stationnaire pour les problèmes d'évaluation de performances.

- **Files d'attente** : ce domaine regroupe les études, en régime stationnaire et en régime transitoire, de files d'attente isolées et de réseaux de files d'attente.
- **Réseaux maillés** : des études d'analyse et de conception de réseaux de communication sont menées pour cerner l'impact des éventuelles défaillances des composants (aspect probabiliste) et pour évaluer la vulnérabilité du système en milieu hostile (aspect déterministe).

3 Actions de recherche

Les principales innovations du projet se caractérisent d'une part par le développement de nouveaux algorithmes dédiés à l'évaluation des mesures de la sûreté de fonctionnement de systèmes informatiques ou de communication et d'autre part par l'étude et la résolution de modèles intervenant dans les réseaux de communication pour évaluer des temps d'attente aux noeuds d'un réseau ainsi que d'autres mesures de la qualité de service.

3.1 Mesures de la sûreté de fonctionnement

3.1.1 Disponibilité sur un intervalle

Participants : Haïscam Abdallah, Raymond Marie, Gerardo Rubino, Bruno Sericola

Dans les domaines de la fiabilité et de la disponibilité, on cherche à obtenir des distributions de temps de séjour dans des sous-ensembles d'états de processus markoviens ou semi-markoviens. En pratique, ces sous-ensembles d'états correspondent aux états opérationnels ou non opérationnels du système modélisé. Cette subdivision de l'espace d'état permet de prendre en compte les éventuelles pannes et réparations du système.

La technique dites des *puissances uniformisées*, développée récemment au sein de l'équipe, peut constituer une alternative à la technique de l'uniformisation standard lorsque la complexité temporelle de cette dernière la rend caduque C'est le cas notamment des systèmes à haute fiabilité/disponibilité, dits aussi *raides*. Cette notion de raideur s'exprime par le fait que le rapport entre les taux de défaillance et ceux

de réparation est très faible. Cette méthode a été étendue au calcul de l'espérance de la disponibilité sur un intervalle de temps $(0, t)$ fixé. Les algorithmes construits ont été comparés aux algorithmes utilisant la technique de l'uniformisation standard. Cette comparaison a montré que les algorithmes développés sont plus rapides que les précédents dans le cas des chaînes raides, dans une limite qui dépend de la raideur et de la cardinalité de l'espace d'état de la chaîne de Markov. De plus, l'approche des *puissances uniformisées* permet de détecter à faible coût la proximité du régime stationnaire du système.

Le calcul de la distribution de la disponibilité d'un système sur un intervalle de temps fixé nécessite, en général, un nombre important de produits matriciels. L'étude de cette distribution a abouti à deux nouveaux algorithmes de calcul pour des processus de Markov à espace d'états fini. Le premier de ces deux algorithmes est une amélioration d'un algorithme existant et les résultats obtenus montrent un gain en temps de calcul appréciable pour une même complexité spatiale. Le deuxième algorithme développé a une complexité spatiale inférieure et son principal intérêt est que sa durée d'exécution peut être évaluée *a priori*, ce qui n'est pas le cas pour le premier algorithme. En ce qui concerne les systèmes dont l'espace d'état du modèle est infini dénombrable, un algorithme spécifique a été développé lorsque la structure du modèle est tridiagonale par blocs [3]. Ce travail a permis, dans le cadre du projet Esprit II Fasst, d'évaluer la disponibilité d'une architecture multiprocesseurs tolérante aux fautes. Des extensions de ce travail sont en cours pour des systèmes plus généraux.

3.1.2 Performabilité

Participants : Hédi Nabli, Bruno Sericola

Une autre subdivision des états d'un système concernant les états opérationnels permet, en plus de les distinguer, de tenir compte des dégradations de performance ; elle consiste à associer à chaque état opérationnel un niveau de performance, ou taux de récompense, qui permet de classer les états en fonction du service rendu à l'utilisateur. La performabilité est définie comme la performance cumulée du système sur un temps de mission fini $(0, t)$. L'étude de la distribution de cette variable aléatoire a abouti à un nouvel algorithme de calcul en ce qui concerne les processus markoviens homogènes [11]. La contribution majeure de ce

travail est la stabilité numérique de l'algorithme et sa plus faible complexité, par rapport aux algorithmes existants. Ce travail se poursuit actuellement dans le cadre des systèmes non réparables.

3.1.3 Agrégation d'états des processus markoviens

Participants : James Ledoux, Gerardo Rubino, Bruno Sericola

À partir d'un modèle markovien, les informations recherchées sont souvent associées à la présence du processus dans des classes d'états. Ceci conduit à s'intéresser à un nouveau processus, appelé processus agrégé, dont l'espace d'état est l'ensemble de ces classes, et qui n'est pas, en général, un processus markovien. Nous avons étudié les conditions pour que ce processus agrégé soit un processus de Markov. Nous avons caractérisé cette propriété dite d'agrégation faible, d'abord pour les processus finis irréductibles, puis récemment pour les processus absorbants finis [2]. Nous avons ensuite étendu ces résultats aux modèles à espace d'état dénombrable [10]. Les caractérisations sont constructives et, dans le cas fini, sont implantées dans un logiciel développé à partir du langage de calcul formel MAPLE. Nous travaillons actuellement sur des approches géométriques suggérées par les divers résultats obtenus. Elles devraient faciliter l'étude de l'agrégation faible pour des classes particulières de modèles.

3.1.4 Fiabilité du logiciel

Participants : James Ledoux, Gerardo Rubino

Il est admis qu'avec l'émergence des calculateurs tolérant les fautes physiques, l'influence des fautes dues au logiciel sur le processus de défaillance d'un système informatique devient de plus en plus forte. Dans ce cadre, une voie de recherche actuelle considère des modèles du logiciel en phase de développement ou en opération, pour réaliser des prédictions du point de vue de la fiabilité. On constate que la plupart de ces modèles ne prennent pas en compte la structure du logiciel mais considèrent ce dernier comme une boîte noire. Il s'agit de modèles paramétriques relativement simples et qui se sont avérés précis dans certains cas.

Nous avons développé une approche markovienne, basée sur une représentation structurelle des systèmes, dans le but d'explorer le gain possible en précision pour la prédiction et en utilisant nos compétences sur les processus de Markov. Elle généralise des modèles précédemment publiés, en prenant en compte plusieurs caractéristiques supplémentaires des systèmes. Nous construisons un modèle de défaillance distinguant celles ayant une influence sur l'évolution du processus d'exécution (par exemple, les défaillances nécessitant un redémarrage du système) de celles dont l'action sur le service requis peut être négligée (par exemple, certaines anomalies transitoires) mais qu'on souhaite tout de même comptabiliser. On tient également compte des fins correctes d'exécution (services délivrés) pour permettre une évaluation de la disponibilité. Le modèle peut inclure des délais de reprise d'exécution. Enfin, nous avons développé des outils analytiques et algorithmiques pour le calcul efficace de plusieurs mesures de sûreté de fonctionnement.

3.1.5 Systèmes à grand espace d'états

Participants: Stéphanie Mahévas, Bruno Tuffin, Hector Cancela, Gerardo Rubino

En informatique ou en communications, on est souvent confrontés à traiter des modèles de grande taille et/ou présentant des problèmes de raideur. Pour évaluer de tels modèles, la simulation de type Monte Carlo est devenue un outil incontournable. Toutefois, une simulation naïve serait complètement inefficace car la raideur se traduit par la présence d'événements rares. Par contre, certaines méthodes classées dans la famille des techniques de réduction de la variance donnent de bons résultats pour ces modèles. Nous démarrons une activité de recherche dans cette direction dans le but de développer des algorithmes pour l'évaluation de plusieurs types de mesures et dans des cadres plus généraux que ceux des processus markoviens. Une autre approche sur laquelle des travaux récents ont été publiés consiste à calculer des bornes des mesures d'intérêt en régime stationnaire, en travaillant sur une petite partie de l'espace d'état. Cette voie va aussi être explorée, en particulier pour essayer d'obtenir de telles bornes en régime transitoire.

En relation avec ce problème des grands espaces d'état, nous commençons à travailler sur la construction efficace de ces modèles. Nous étudions actuellement un formalisme de description dit de boules et urnes, si-

miltaire à celui utilisé par le solveur markovien de Qnap. Il s'agit d'un formalisme de plus bas niveau que les réseaux de Petri stochastiques. Nous analysons en particulier son adéquation à jouer un rôle de langage intermédiaire entre les descriptions de haut niveau des systèmes et les processus stochastiques sur lesquels les évaluations seront faites. La réalisation d'un noyau mettant en œuvre ce formalisme est en cours.

3.2 Files d'attente et réseaux à haut débit

Participants : Louis-Marie Le Ny, Raymond Marie, Gerardo Rubino, Bruno Sericola, Patrice Leguesdron, Jean Pellaumail

Des travaux sont menés en collaboration avec le CNET sur l'étude du régime transitoire de files d'attente. Ces travaux ont pour but d'évaluer la qualité de service offerte à certaines applications dans le cadre des réseaux de télécommunications [9].

Une source de trafic raccordée à un réseau fondé sur la technique ATM a la possibilité d'émettre à son rythme propre sans être assujettie aux horloges du réseau : on dit que ces sources sont asynchrones. Le fait que plusieurs sources soient autorisées à émettre en même temps donne naissance à des conflits entre cellules à chaque nœud de communication : l'une d'entre elles est émise et les autres attendent leur tour dans une mémoire rapide. Les algorithmes mis en jeu dans la résolution de ces conflits figurent parmi les choix fondamentaux que doit effectuer le concepteur de l'équipement.

L'attente d'une cellule dans un nœud de communication comporte un aléa qui dépend du nombre de connexions, de leurs débits respectifs et de l'état des autres nœuds du réseau. Pour une même communication donnée, elle est variable d'une cellule à l'autre, même si l'émission est périodique à l'origine.

Une première étude a été faite sur les retards pris par les cellules d'une communication de référence dans les éléments actifs du réseau en fonction du trafic accepté. D'une part, ces retards dépendent de l'algorithme de choix de la cellule à émettre lors d'un conflit ; notamment, nous avons associé un Échéancier Virtuel d'Émission à chaque connexion et fait l'étude de diverses disciplines de service qui s'y rapportent. D'autre part, la connaissance de la loi de ces retards permet au concepteur de

choisir la taille des mémoires rapides en fonction d'un taux de perte de cellule toléré.

L'élément essentiel de notre démarche consiste à mettre en évidence certaines variables aléatoires associées aux retards des cellules d'une connexion donnée dont la loi conjointe peut être étudiée (presque) indépendamment de l'ensemble du réseau. Le modèle mathématique sous-jacent est un processus markovien homogène qui évolue en temps discret et dont on considère essentiellement le régime stationnaire [1].

Dans le cadre du projet Esprit II Fasst, (*Fault-Tolerant Architecture with Stable Storage Technology*), des modèles d'une architecture multi-processeurs tolérante aux fautes ont été développés. Ces modèles, basés sur les réseaux de files d'attente, ont permis d'évaluer d'une part le comportement du protocole de cohérence de cache Berkeley et d'autre part le coût du mécanisme de tolérance aux fautes en l'absence de fautes.

3.3 Réseaux maillés

Participants : Mohamed El Khadiri, Gerardo Rubino, Hector Cancela, Stéphane Bulteau

Nous considérons des modèles de réseaux de communication en termes de graphes stochastiques. Nous nous intéressons à l'évaluation de divers indices de fiabilité de ces systèmes par des méthodes analytiques et par des techniques d'estimation statistique (algorithmes de type Monte Carlo). Nous travaillons essentiellement sur la fiabilité dite K -terminal qui concerne les communications entre les nœuds d'un sous-ensemble K [6] [7].

L'évaluation exacte de la fiabilité K -terminal est un problème NP-difficile. Une alternative est de réaliser des estimations par des simulations de Monte Carlo. Dans le cas de systèmes hautement fiables la simulation standard est également prohibitive en temps de calcul et les techniques dites de réduction de la variance doivent être utilisées. Dans ce cadre, nous avons proposé un nouvel algorithme de réduction de la variance [8]. Pour montrer son intérêt nous l'avons comparé aux plus connues des méthodes traitant ce problème. L'algorithme que nous avons développé s'est avéré très performant, le produit du temps d'exécution par la variance de l'estimateur étant très faible.

Nous continuons à nous intéresser à la notion purement déterministe (et complémentaire de la précédente) de vulnérabilité. Dans ce cadre, des travaux sont menés dans le même sens que pour la fiabilité, à savoir, l'extension des mesures pour tenir compte des communications entre les nœuds d'un sous-ensemble quelconque.

3.4 Gestion des stocks

Participants : Patrice Leguesdron, Raymond Marie, Miklós Molnár

Ce travail concerne l'étude de modèles stochastiques adaptatifs de stockage, en vue d'optimiser leurs paramètres par apprentissage dans un environnement aléatoire. Dernièrement, nous nous sommes tourné vers l'amélioration des modèles adaptatifs existants. Selon les analyses préalables, les modèles adaptatifs de stockage peuvent s'intégrer dans les systèmes de contrôle de stock opérationnels pour affiner les paramètres de contrôle et/ou pour suivre les changements. Cette intégration nécessite une interface aisée pour dialoguer avec l'utilisateur ainsi qu'une autre interface pour exploiter les systèmes de gestion. Par ailleurs, on étudie l'applicabilité des réseaux neuronaux dans le domaine du contrôle de stock.

4 Actions industrielles

Contrat CNET (S. Mahévas, G. Rubino et B. Sericola) : une convention de recherche a été acceptée avec le CNET sur l'étude du régime transitoire de files d'attente et sur l'évaluation de modèles à grand espace d'état.

Contrat Celar (G. Rubino et S. Bulteau) : les travaux sur l'étude de la fiabilité des réseaux maillés continuent de donner lieu à une collaboration étroite avec des personnels scientifiques du Celar. Une nouvelle convention de recherche a été acceptée pour des travaux sur ce sujet.

Projet Esprit II R & D Fasst (L.-M. Le Ny, R. Marie, G. Rubino et B. Sericola) : l'équipe Model a terminé son travail en collaboration avec l'équipe Solidor de l'Irisa sur le projet Esprit II Fasst (*Fault-Tolerant Architecture with Stable Storage Technology*). Il s'est agi pour notre équipe d'élaborer des modèles permettant d'évaluer les

performances des architectures envisagées, ainsi que des mesures de performabilité et de sûreté de fonctionnement.

5 Actions nationales et internationales

5.1 Actions nationales

R. Marie est l'un des deux responsables du groupe de travail GT1 Modélisation et évaluation de performances des systèmes à événements discrets du pôle Systèmes à événements discrets du groupement de recherche en automatique du CNRS.

5.2 Actions internationales

G. Rubino a été invité à présenter une communication par le IFIP Working Group 10.4 on Dependable Computing and Fault Tolerance pour leur 25ème Workshop, San Diego, USA, Janvier 1994.

R. Marie est co-éditeur de la revue *Performance Evaluation*.

G. Rubino est co-éditeur de la revue *Naval Research Logistics*.

6 Diffusion des résultats

6.1 Enseignement

Les membres de l'équipe participent à plusieurs activités de formation et d'enseignement de 3^e cycle dans l'environnement universitaire de l'Irisa (Ifsic, Insa, ENST Bretagne, Faculté des Sciences de Brest). Les thèmes privilégiés de ces formations sont la modélisation, l'utilisation des modèles markoviens, les files d'attente et les réseaux de files d'attente, l'évaluation de la sûreté de fonctionnement, la simulation et le langage de modélisation Qnap. Divers stages de fin d'étude (DESS Isa, DEA informatique, DESS mathématiques appliquées, DEA probabilités) ont eu lieu au sein de l'équipe.

6.2 Organisation de colloques et de cours

R. Marie a été membre du comité de programme (*tutorial chair*) de la conférence *Modelling Techniques and Tools for Computer Performance*

Evaluation, Vienne, Autriche, mai 1994 et du comité de programme du congrès ITC'14 (*14th International Teletraffic Congress*), Antibes Juan les Pins, France, juin 1994. Il est aussi membre du comité de programme de la conférence *Modelling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation* qui aura lieu à Heidelberg, Allemagne, Septembre 1995.

G. Rubino a été membre du comité de programme de la conférence DCCA-4 (Dependable Computing for Critical Applications), San Diego, USA, Janvier 1994 et de la conférence MASCOTS'94 (International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems), Durham, USA, Janvier 1994. Il est aussi membre du comité de programme de la conférence MASCOTS'95 (International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems), qui aura lieu à Durham, USA, en Janvier 1995.

L.-M. Le Ny et G. Rubino ont organisé le 4 ième atelier sur l'évaluation des performances qui s'est tenu du 13 au 15 décembre 1993 au centre de la Briantais à Saint Malo.

7 Publications

Livres et monographies

- [1] J. PELLAUMAIL, P. BOYER, P. LEGUESDRON, *Réseaux ATM et P-simulation*, Hermès, 1994, 160 pages.

Articles et chapitres de livre

- [2] J. LEDOUX, G. RUBINO, B. SERICOLA, «Exact aggregation of absorbing Markov processes using quasi-stationary distribution», *Journal of Applied Probability* 31, 1994.
- [3] G. RUBINO, B. SERICOLA, «Interval Availability Analysis Using Denumerable Markov Processes. Application to Multiprocessor Systems Subject to Breakdowns and Repair», *IEEE Transactions on Computers* (à paraître), 1994, Special Issues on Fault-Tolerant Computing.
- [4] B. SERICOLA, «Interval availability distribution of 2-state systems with exponential failures and phase-type repairs», *IEEE Transactions on Reliability* 43, 2, juin 1994.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [5] H. CANCELA, G. RUBINO, «Construction de modèles pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement», *in* : *VIIème Congrès latino-ibéro-américain de recherche opérationnelle*, Santiago, Chili, juillet 1994.
- [6] G. RUBINO, «Efficient Evaluation of Network Reliability», *in* : *7th International Conference on Modelling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation*, Vienne, Autriche, mai 1994. tutorial.
- [7] G. RUBINO, «Sensitivity Analysis in Network Reliability Problems», *in* : *ORSA/TIMS Joint Meeting*, Boston, USA, mai 1994.

Rapports de recherche et publications internes

- [8] H. CANCELA, M. E. KHADIRI, «A recursive variance reduction algorithm for estimating communication network reliability», *publication interne n°860*, Irisa, octobre 1994.
- [9] F. GUILLEMIN, G. RUBINO, B. SERICOLA, A. SIMONIAN, «Transient Characteristics of an $M/M/\infty$ System Applied to Statical Multiplexing of an ATM Link», *Rapport de recherche n°2386*, Inria, novembre 1994, paru aussi comme publication interne Irisa n°874, octobre 1994.
- [10] J. LEDOUX, «On weak lumpability of denumerable Markov chains», *rapport de recherche n°2221*, Inria, février 1994, paru aussi comme publication interne Irisa n°802, février 1994.
- [11] H. NABLI, B. SERICOLA, «Performability analysis of fault-tolerant computer systems», *rapport de recherche n°2254*, Inria, mai 1994, paru aussi comme publication interne Irisa n°805, mars 1994.

Divers

- [12] L.-M. LE NY, R. MARIE, «Analytical models for the performance of cache consistency protocols MOSI and MOESI», 1994, Rapport du projet Esprit II Fasst.
- [13] L.-M. LE NY, R. MARIE, «A comparative performance study of the two cache consistency protocols MOSI and MOESI», 1994, Rapport du projet Esprit II Fasst.
- [14] H. NABLI, B. SERICOLA, «Performability analysis of fault-tolerant computer systems», 1994, Rapport du projet Esprit II Fasst.
- [15] G. RUBINO, B. SERICOLA, «Performance and dependability analysis of a fault-tolerant shared memory multiprocessor», 1994, Rapport du projet Esprit II Fasst.

8 Abstract

The aim of the Model project is to develop modeling techniques for aspects of systems performance and/or reliability. Two specific fields concerned by this research are communication and production engineering. The team's work is directed towards research for solutions that are machine-implementable.

Our main activities in 1994 include the study of dependability and performability measures of fault-tolerant computing systems. The model involved here are either Markov processes or stochastic graphs and the methods used to compute these measures are analytical methods, approximation methods, or simulation methods depending on the parameters of the models and the objectives of the analysis. We also start the study of the transient behavior of queues with applications in telecommunication networks.

Scientific Context:

- Markovian processes
- Queues
- Stochastics graphs
- Communication networks
- Computer-assisted manufacturing systems
- Reliability, availability, dependability, performability

Application examples:

- Component dimensioning in a computer architecture
- Dimensioning of flexible manufacturing systems
- Comparison of communication network topologies
- Quality of service evaluation in telecommunication networks.

Table des matières

1	Composition de l'équipe	1
2	Présentation générale et objectifs	2
3	Actions de recherche	3
3.1	Mesures de la sûreté de fonctionnement	3
3.1.1	Disponibilité sur un intervalle	3
3.1.2	Performabilité	4
3.1.3	Agrégation d'états des processus markoviens	5
3.1.4	Fiabilité du logiciel	5
3.1.5	Systèmes à grand espace d'états	6
3.2	Files d'attente et réseaux à haut débit	7
3.3	Réseaux maillés	8
3.4	Gestion des stocks	9
4	Actions industrielles	9
5	Actions nationales et internationales	10
5.1	Actions nationales	10
5.2	Actions internationales	10
6	Diffusion des résultats	10
6.1	Enseignement	10
6.2	Organisation de colloques et de cours	10
7	Publications	11
8	Abstract	13