

## *Projet REFLECS*

*Génie système et informatique distribuée temps réel tolérant les  
fautes*

*Rocquencourt*

THÈME 1B



*R*apport  
*d'Activité*

1999



---

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Présentation et objectifs généraux</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Fondements scientifiques</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Domaines d'applications</b>	<b>5</b>
4.1	Panorama . . . . .	5
4.2	Avionique modulaire . . . . .	5
4.3	Spatial . . . . .	5
4.4	Contrôle de trafic aérien . . . . .	5
4.5	Télécommunications à qualités-de-service garanties . . . . .	5
4.6	Réseaux locaux à qualités-de-service garanties . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Résultats nouveaux</b>	<b>6</b>
5.1	Génie système prouvable et méthode TRDF . . . . .	6
5.2	Ordonnancement monoprocesseur de tâches arbitraires unimodales . . . . .	6
<b>6</b>	<b>Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)</b>	<b>7</b>
6.1	Projet ATR . . . . .	7
6.2	Projet avec France Télécom-CNET . . . . .	8
<b>7</b>	<b>Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>8</b>
7.1	Actions nationales . . . . .	8
7.2	Action internationale . . . . .	8
<b>8</b>	<b>Diffusion de résultats</b>	<b>9</b>
8.1	Participation à comités de programme . . . . .	9
8.2	Enseignement universitaire . . . . .	9
8.3	Activités extérieures . . . . .	9
8.4	Participation à des colloques, séminaires, invitations . . . . .	9
<b>9</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>10</b>

## 1 Composition de l'équipe

### Responsable scientifique

Gérard Le Lann [DR INRIA]

### Responsable permanent

Pascale Minet (jusqu'en mars 1999) [CR INRIA]

### Ingénieur expert

Jean-François Hermant

### Assistante de projet

Dominique Poulicet (jusqu'en avril 1999) [AI INRIA]

Corine Lorentz (à compter de novembre 1999)

### Doctorants

Patrice Carrère [Bourse INRIA, Université Paris VI]

Soumaya Kamoun (jusqu'en mars 1999) [Bourse INRIA, Université Versailles-St-Quentin]

## 2 Présentation et objectifs généraux

**Mots clés** : génie système, méthode, algorithme, preuve, application complexe, application critique, système distribué, temps réel, tolérance aux fautes, évaluation de performance, faisabilité.

Les travaux du projet REFLECS<sup>1</sup> concernent les applications et les systèmes informatiques complexes ou critiques. La complexité des applications et des technologies entraîne l'obligation de prouver, avant développement ou mise en service, qu'un système informatique est correct. L'obligation de preuves s'impose également pour les applications critiques, celles dont les défaillances sont inacceptables ou catastrophiques.

Le but du projet REFLECS est donc de spécifier les architectures, les algorithmes/protocoles des systèmes informatiques, et leurs conditions de faisabilité, de telle sorte que ces systèmes (1) répondent aux besoins des applications et de leurs utilisateurs, (2) fonctionnent correctement, (3) soient de coûts aussi réduits que possible. Les spécifications sont exprimées en langages naturels, en formalismes classiques et en notations mathématiques. REFLECS ne traite pas de l'implantation (en modules matériels ou logiciels) de ces spécifications.

---

1. En février 1999, G. Le Lann a annoncé qu'il arrêterait le projet REFLECS en fin d'année.

Ces travaux se répartissent en deux catégories, l'une méthodologique, l'autre algorithmique. Les travaux de la première catégorie portent sur les méthodes de Génie Système prouvable, pour des problèmes applicatifs de type déterministe. *L'intérêt d'une méthode de Génie Système prouvable est de bien poser les bons problèmes.* L'obtention des propriétés applicatives exigées par les donneurs d'ordre ou les utilisateurs impose de résoudre des problèmes algorithmiques de type traitement distribué (TD) ou/et temps réel (TR), ou/et tolérance aux fautes (TF). Les travaux de la deuxième catégorie ont pour but de résoudre de façon prouvable de tels problèmes. *L'intérêt des travaux algorithmiques en informatique TR/TD/TF est de bien résoudre les bons problèmes.*

Le but général de nos travaux est de pouvoir élaborer une spécification modulaire de système informatique de type TR/TD/TF (une solution) qui, de façon prouvable, satisfait une spécification de propriétés exigées et d'hypothèses (un problème informatique), cette dernière étant dérivée d'une description initiale éventuellement incomplète et/ou ambiguë fournie par un donneur d'ordre ou un utilisateur. Par "spécification", il faut comprendre l'expression (en langage naturel, en notations formalisées) complète et non ambiguë d'un problème, d'une solution.

Le travail de conception qui conduit à spécifier les modules d'une solution est terminé lorsque les dits modules sont jugés réalisables (via des produits "sur étagère", via des développements matériels ou logiciels).

Nos travaux ont donc des justifications d'ordre pratique. Par exemple, ils servent à déterminer de façon rigoureuse si un produit "sur étagère" peut convenir à un système TR/TD/TF destiné à résoudre un problème informatique donné. Ou encore, ils contribuent à résoudre la "crise du logiciel", en éliminant les problèmes algorithmiques qui sont des entraves à la mise en œuvre des méthodes formelles actuellement employées en Génie Logiciel. Plus généralement, nos objectifs sont de contribuer à introduire l'emploi de sciences exactes dans les méthodes de Génie Système, leur absence actuelle étant vraisemblablement l'une des causes majeures des échecs subis par l'industrie informatique.

Nos travaux ont des justifications d'ordre scientifique. La plupart des problèmes d'informatique TR/TD/TF sont ouverts. La nature des relations qui existent entre problèmes et solutions de chacun des trois domaines TR, TD et TF est mal connue. Il existe très peu de solutions assorties de preuves pour des problèmes combinés TR/TD/TF posés par les applications complexes et/ou critiques.

### 3 Fondements scientifiques

**Mots clés :** modélisation, analyse déterministe, algorithme distribué, système, protocole, réseau, parallélisme asynchrone, ordonnancement en-ligne, défaillance partielle, redondance, consensus, atomicité, complexité, analyse pire-cas.

Pouvoir bien poser les bons problèmes implique de disposer des modèles et des propriétés génériques permettant de représenter fidèlement un problème applicatif, donc une réalité opérationnelle. L'élaboration de nouveaux modèles ou propriétés dans chacune des classes connues est une activité de recherche continue, ainsi que l'identification de hiérarchies strictes ou d'ordres partiels à l'intérieur de chaque classe. Par exemple, le modèle événementiel de

type arbitraire multimodal domine le modèle périodique. Le modèle de défaillance byzantin domine tous les modèles de défaillances connus. Ou bien, la propriété de linéarisabilité n'est pas comparable à la propriété de sérialisabilité. Ou bien encore, la propriété de diffusion atomique causale domine la propriété de diffusion fiable.

C'est sur l'existence d'ordres hiérarchiques stricts ou partiels que repose le concept d'obligation de preuve de conception correcte de systèmes informatiques.

Pouvoir bien résoudre les bons problèmes repose sur des connaissances qui relèvent des disciplines et domaines tels que les architectures des systèmes, la théorie de la sérialisabilité, la théorie de l'ordonnancement, le calcul matriciel en algèbre ( $\max, +$ ), l'algorithmique distribuée, l'algorithmique de détection ou de masquage de défaillances, l'algorithmique d'ordonnancement temps réel.

Les problèmes, les solutions, sont de type "déterministe". En effet, l'évolution des besoins applicatifs (appels d'offre, cahiers des charges, normes industrielles) impose de plus en plus souvent de résoudre des problèmes informatiques de ce type. Les propriétés exigées (sûreté, vivacité, ponctualité, confiance) le sont pour des scénarios pires cas – qu'il s'agit d'identifier et de prouver – jouables par des environnements modélisés selon des "adversaires" déterministes, par opposition aux "adversaires" stochastiques considérés en modélisation analytique (ex : théorie des réseaux de files d'attente) ou en analyse statistique (ex : simulation événementielle). L'incertitude découlant de l'impossibilité de prédire le futur de façon certaine est exprimée par des taux de couverture des hypothèses (les modèles). Pour des hypothèses données, on exige des preuves de propriétés obtenues de façon certaine, grâce à des conceptions reposant sur des solutions algorithmiques déterministes.

Les domaines couverts sont définis comme suit :

- Traitement Distribué (TD) : un système est dit distribué s'il offre la possibilité d'exécutions concomitantes, par plusieurs processeurs, sans connaissance de l'état global du système (propriétés de sûreté et vivacité). La complexité des problèmes algorithmiques va croissant, en allant du modèle (de calcul) synchrone aux modèles partiellement synchrones, puis au modèle asynchrone.
- Temps Réel (TR) : un système est dit temps réel si ses spécifications comportent des références directes ou indirectes au temps physique et si son comportement est déterminé par des algorithmes d'ordonnancement utilisant directement ou indirectement des attributs temporels dérivés d'une spécification de problème (propriétés de ponctualité). La complexité des problèmes algorithmiques et des conditions de faisabilité va croissant, en allant du modèle (de contrainte temporelle) à échéances de terminaison au plus tard constantes au modèle à giges de terminaison bornées et à dates de démarrage au plus tôt non constantes (il existe des modèles intermédiaires), et du modèle (événementiel) périodique au modèle arbitraire (il existe des modèles intermédiaires).
- Tolérance aux Fautes (TF) : un système est dit tolérant aux fautes si son comportement reste conforme à sa spécification malgré la présence d'états erronés (logiciel, matériel, données) et malgré l'occurrence de défaillances partielles d'origine interne ou dues à l'environnement (propriétés de confiance). La complexité des problèmes algorithmiques

va croissant en allant du modèle (de défaillance) de type arrêt immédiat au modèle de type byzantin (il existe des modèles intermédiaires).

## 4 Domaines d'applications

### 4.1 Panorama

Les travaux du projet concernent les domaines d'applications de type complexe et/ou critique. Il s'agit d'applications pour lesquelles il est obligatoire ou très important (car source d'économies très significatives) de pouvoir prédire les comportements d'un système avant de le construire ou de le mettre en service, ainsi que d'applications soumises à certification.

### 4.2 Avionique modulaire

En avionique modulaire, l'un des buts poursuivis est de pouvoir construire les systèmes informatiques embarqués à partir de produits COTS ("commercial off-the-shelf"). Un autre but est de pouvoir combiner à loisir les modules logiciels applicatifs, et de pouvoir prédire à la fois le comportement logique et le comportement physique d'un ensemble quelconque de tels modules, pour tous les placements possibles de ces modules sur une architecture physique.

### 4.3 Spatial

Comme pour l'avionique modulaire, l'un des buts poursuivis est de pouvoir utiliser des produits COTS dans les systèmes embarqués (véhicules, lanceurs, satellites, stations orbitales, etc.). Un autre but est également de pouvoir prédire les comportements logiques et physiques de ces systèmes, notamment pour ce qui concerne leur fiabilité et leur disponibilité.

### 4.4 Contrôle de trafic aérien

La FAA aux USA et la DGAC en France demandent la mise en service de systèmes qui ont des taux d'indisponibilité maximum extrêmement faibles ( $10^{-7}$  pour la FAA, pour ce qui concerne les services dits critiques). La problématique COTS est également présente dans les projets de nouveaux systèmes de contrôle de trafic aérien. Peu de produits assurent effectivement la propriété de très haute disponibilité. Il n'existe actuellement aucun produit COTS qui assure à la fois les propriétés de très haute disponibilité et de temps réel.

### 4.5 Télécommunications à qualités-de-service garanties

Des normes (IEEE, IETF, etc.) définissent des QoS ("quality-of-service"). Ces services sont des propriétés qui doivent être assurées de bout-en-bout par les réseaux ou les systèmes de télécommunications (Internet, Intranets, etc.). De telles propriétés s'expriment par exemple en termes de garanties de débit et de temps de réponse. Il s'agit de contrats passés entre les utilisateurs et les fournisseurs de service, lesquels contrats ne peuvent être tenus que pour des conditions d'emploi précises. Le respect des conditions d'emploi est effectué en-ligne, par le biais de contrôles d'admission.

## 4.6 Réseaux locaux à qualités-de-service garanties

Tout comme pour les réseaux de télécommunications, les exigences de QoS, s'appliquent aux réseaux locaux. Le problème majeur est de pouvoir garantir des délais bornés supérieurement pour les transmissions de messages et des débits bornés inférieurement lorsqu'un nombre quelconque (mais fini) de sources de messages partagent un même support de communication physique. Les technologies les plus concernées sont l'ATM ("asynchronous transfer mode") et les Ethernets (notamment les Ethernets à 1 Gigabit/s).

## 5 Résultats nouveaux

### 5.1 Génie système prouvable et méthode TRDF

**Participants :** Jean-François Hermant, Gérard Le Lann.

**Mots clés :** génie système, méthode, capture, conception, dimensionnement, preuve, solution générique.

Les travaux sur la méthode TRDF [8] ont été poursuivis selon deux axes.

Pour l'axe plutôt théorique, on a étudié l'implication de la possibilité - offerte par la méthode TRDF - de considérer des modèles différents pour la phase de conception et la phase de dimensionnement d'un système [7] dans le cas du problème générique du consensus temps réel. Le modèle de système considéré pour la phase de dimensionnement est le modèle synchrone (délais variables, mais bornés supérieurement, bornes connues), ce qui permet de quantifier les variables entrant dans l'expression des conditions de faisabilité (temps réel). Par contre, et de façon a priori contre-intuitive, en phase de conception, il n'est pas inévitable d'avoir à considérer un modèle de calcul synchrone. De plus, parmi les modèles de calcul partiellement synchrones envisageables, le modèle "asynchrone + détecteurs de défaillances parfaits" (de classe  $\mathcal{P}$  [3]), le plus "proche" du modèle synchrone, n'est pas celui qui conduit aux meilleures conditions de faisabilité. Ce travail repose sur une intégration des résultats connus à propos du problème du consensus asynchrone et des résultats que nous avons établis par le passé en ordonnancement temps réel, notamment à propos du problème HRTDM (communications temps réel).

Pour l'axe plutôt applicatif, on a mis en œuvre la méthode TRDF pour conduire la phase de capture de problèmes posés par des partenaires du projet. Avec France Télécom/CNET, il s'agit d'applications assorties de garanties de service (QoS temps réel, tolérance aux fautes) sur des réseaux de plusieurs centaines ou milliers de processeurs. Avec Thomson/ISR, il s'agit de réseaux comprenant des mobiles, avec exigences de QoS (temps réel, tolérance aux fautes) pour les transferts de voix et données sur IP.

Enfin, un effort de vulgarisation de la méthode a conduit à la publication [12], qui a reçu le Best Paper Award du Symposium 1999 de l'INCOSE, catégorie "Modelling and Tools".

### 5.2 Ordonnancement monoprocesseur de tâches arbitraires unimodales

**Participant :** Patrice Carrère.



**Mots clés :** temps réel, ordonnancement monoprocesseur, tâches arbitraires unimodales, EDF, conditions de faisabilité, optimalité.

Nous avons poursuivi nos travaux précédents sur l’ordonnancement temps réel monoprocesseur. Bien que ce domaine ait été largement étudié depuis une trentaine d’années, les principaux résultats issus de la théorie de l’ordonnancement s’appliquent à des tâches périodiques (ou sporadiques). Notre étude porte sur le problème d’ordonnancement d’un jeu de  $n \in \mathbb{N}^*$  tâches arbitraires unimodales  $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$ . Chaque tâche est soumise à une contrainte de type échéance de terminaison au plus tard. Le modèle arbitraire unimodal définit une borne supérieure sur la densité d’arrivée des demandes d’exécution des tâches. Soit  $\tau_i$  une tâche arbitraire unimodale. Le modèle spécifie qu’il ne peut y avoir plus de  $n_i$  demandes d’exécution de  $\tau_i$  sur un intervalle de temps  $w_i \in \mathbb{N}^*$  (fenêtre temporelle glissante), sachant que deux demandes d’exécution successives sont séparées d’au moins  $s_i \in \mathbb{N}$  unités de temps (intervalle de sporadicité). Ce modèle est plus général que les modèles périodique et sporadique.

Dans un premier temps nous nous sommes attachés à identifier une solution algorithmique optimale dans la classe des algorithmes d’ordonnancement déterministes, en-ligne, non-oisifs et non clairvoyants. Parmi les algorithmes connus dans cette classe (Highest Priority First / Deadline Monotonic (HPF/DM), Earliest Deadline First (EDF), Least Laxity First (LLF), etc.), on montre que EDF est optimal pour le problème posé, ce qui généralise le résultat d’optimalité connu pour les modèles périodiques et sporadiques.

Par conséquent, dans un second temps, nous nous sommes intéressés à la faisabilité du problème avec l’algorithme EDF. Nous démontrons qu’il est possible de généraliser les raisonnements qui s’appliquent au modèle périodique (et sporadique). Il est ainsi possible d’établir une condition de faisabilité nécessaire et suffisante (CNS) basée sur la demande processeur ainsi qu’une CNS basée sur les pires temps de réponse des tâches de  $\tau$ . Comme dans notre étude précédente, nous montrons qu’il est possible de baser une CNS sur le temps de réponse de la tâche de plus petite échéance relative. Nous généralisons également la condition de faisabilité nécessaire basée sur le facteur d’utilisation du processeur et la condition de faisabilité suffisante basée sur un majorant de la demande processeur. Tout en considérant un modèle plus général, nous obtenons des conditions de faisabilité de même complexité que celles établies avec le modèle périodique.

Enfin, nous montrons comment exprimer sous forme paramétrique le pire temps de réponse de la tâche de plus petite échéance relative, ainsi qu’un majorant sur le pire temps de réponse des autres tâches de  $\tau$ . Pour ce faire, nous utilisons la méthode du simplexe (forme revisitée) pour éliminer un ensemble de contraintes linéaires redondantes.

## 6 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

### 6.1 Projet ATR

**Mots clés :** diffusion atomique uniforme temps réel, algorithme synchrone, algorithme asynchrone, condition de faisabilité, avionique modulaire, contrôle de trafic aérien.

Le projet ATR est l’un des projets de l’action conjointe de la DGA/DSP, du MENRT et du CNRS sur le thème “Maîtrise des systèmes complexes réactifs et sûrs”. Axlog Ingénierie et

l'INRIA (projet REFLECS) sont co-responsables de ce projet, qui réunit quatre industriels (Axlog Ingénierie, Dassault Aviation, Thomson Airsys, Thomson TM) et quatre équipes de recherche (LIX, LIAFA, INRIA (projet REFLECS) et l'Université Joseph Fourier de Grenoble). Les domaines applicatifs concernés sont l'Avionique Modulaire et le Contrôle de Trafic Aérien. Le problème générique informatique commun à ces deux applications, et retenu pour le projet, est le problème de la Diffusion atomique uniforme temps réel. L'implantation et l'évaluation expérimentale de la solution algorithmique conçue en modèle partiellement synchrone s'est poursuivie et terminée en 1999.

## 6.2 Projet avec France Télécom-CNET

**Mots clés** : grands réseaux, qualités de service, tolérance aux fautes, temps réel, consensus.

Une collaboration scientifique avec l'équipe de Jean-Bernard Stéfani du CNET (Issy-Les-Moulineaux et Grenoble) a démarré en 1999 pour 18 mois, dans le cadre du projet CTI 99 1B 405. Le problème étudié est celui du consensus temps réel dans les grands systèmes distribués et les grands réseaux. Dans de tels systèmes et réseaux, composés de  $n$  modules (processeurs, noeuds, équipés de liaisons de transmission), en présence de défaillances partielles des modules, de délais de calcul et de communication variables, de charges variables et de décentralisation du contrôle, le but est de permettre à tous les modules non défaillants de :

- prendre une décision unique, à partir de plusieurs (jusqu'à  $n$ ) propositions différentes ;
- décider en un délai borné supérieurement, calculable, qui soit "court", c'est-à-dire obtenu en temps sous-linéaire en  $n$ .

## 7 Actions régionales, nationales et internationales

### 7.1 Actions nationales

Les collaborations scientifiques et échanges se sont poursuivis en 1999 avec le LIX et les Universités de Paris VI et Paris VII (LIP6, LIAFA).

### 7.2 Action internationale

Une collaboration scientifique avec l'équipe du Pr. Farouk Kamoun de l'ENSI de Tunis (Tunisie) a démarré en 1999, dans le cadre du projet STIC 9905. Le problème étudié est l'évaluation stochastique et déterministe (pires cas) d'algorithmes de consensus temps réel pour les grands systèmes distribués.

## 8 Diffusion de résultats

### 8.1 Participation à comités de programme

SRDS'99, 18th IEEE Intl. Symp. on Reliable Distributed Systems, Lausanne, Suisse, octobre 1999 (G. Le Lann).

RTS 2000, Salon Real-Time Systems, Paris, mars 2000 (G. Le Lann).

IWAN 2000, 2nd Intl. Working Conference on Active Networks, Tokyo, octobre 2000 (G. Le Lann).

### 8.2 Enseignement universitaire

ISTM, Noisy le Grand, 2<sup>e</sup> année, "Systèmes Temps Réel" (J.-F. Hermant).

Université Paris 7, DESS Logiciels Fondamentaux, "Génie Système Prouvable" (G. Le Lann).

École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, Computer Science Postgraduate Course, "Real-Time Computing" (G. Le Lann).

### 8.3 Activités extérieures

Lecteur pour le journal "Systems Engineering" (John Wiley & Sons Pub.) (G. Le Lann).

Expert auprès de l'University of Pittsburgh (USA), pour examen de promotion à poste de professeur (G. Le Lann).

### 8.4 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Membre du jury de la thèse d'habilitation de Bernadette Charron-Bost "Quelques questions d'algorithmique distribuée", février 1999, Université Paris VII (G. Le Lann).

Tutoriel Informatique Temps Réel et Génie Système, salon RTS'99, Paris, février 1999 (G. Le Lann).

Membre du jury de la thèse de doctorat de Sonia Mettali Gammar "Évaluation des performances des algorithmes d'ordonnancement pour les systèmes transactionnels répartis temps réel", février 1999, Université des Sciences de Tunis (G. Le Lann).

ISORC'99, 2nd IEEE Intl. Symp. on Object-oriented Real-Time distributed Computing, Saint-Malo, mai 1999 ; présentation de [10] (J.-F. Hermant) ; organisation et présidence de la table ronde "Which models and architectures of distributed real-time computing systems suit which application areas?" (G. Le Lann).

Tutoriel "Génie Système et Informatique Transactionnelle", Symposium MFPE (Universités de Paris-Sorbonne et de Tunis), Tunis, mai 1999 (G. Le Lann).

Symposium INCOSE'99, Brighton, GB, juin 1999, présentation de [12] et participation à la table-ronde "Systems Engineering: Theory and Formal Methods" (G. Le Lann).

GDR Ordonnancement Paris VI, Paris, septembre 1999 (J.-F. Hermant).

Membre du jury de la thèse de doctorat de Jean-François Hermant “Quelques problèmes et solutions en ordonnancement temps réel pour systèmes répartis”, septembre 1999, Université Paris VI (G. Le Lann).

Président de session “Mobile Computing”, SRDS'99, Lausanne, octobre 1999 (G. Le Lann).

Symposium MET-NTIC (rencontres entreprises-laboratoires de recherche), Angers, octobre 1999 (G. Le Lann).

Séminaire à l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse : “Tout ce que vous voulez/devez savoir sur l'informatique temps réel”, novembre 1999 (G. Le Lann).

## 9 Bibliographie

### Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] E. ANCEAUME, B. CHARRON-BOST, P. MINET, S. TOUEG, «On the formal specification of group membership services», *rapport de recherche n° 2695*, INRIA, novembre 1995, également research report TR95-1534, Dept. of Computer Science, Cornell University, août 1995.
- [2] E. ANCEAUME, L. GEORGE, J.-F. HERMANT, G. LE LANN, P. MINET, N. RIVIERRE, «Algorithmique TR/TD/TF ORECA : spécifications des algorithmes et de l'oracle de faisabilité», Rapport du contrat DRET 94.34.395, janvier 1996, Diffusion restreinte.
- [3] T. D. CHANDRA, S. TOUEG, «Unreliable Failure Detectors for Reliable Distributed Systems», Journal of the ACM, mars 1996.
- [4] J.-F. HERMANT, L. LÉBOUCHER (CNET), N. RIVIERRE, «Real-time fixed and dynamic priority driven scheduling algorithms», *rapport de recherche n° 3081*, INRIA, décembre 1996.
- [5] J.-F. HERMANT, E. LEDINOT (DASSAULT AVIATION), G. LE LANN, P. MINET, E. NASSOR (DASSAULT AVIATION), N. RIVIERRE, «Conception modulaire de systèmes temps réel distribués tolérant les fautes», rapport de synthèse finale (Dassault Aviation, INRIA), contrat DRET 94.34.395, février 1997, Diffusion restreinte.
- [6] G. LE LANN, P. ROLIN, «Procédé et dispositif pour la transmission de messages entre différentes stations à travers un réseau local à diffusion», Brevet INPI 84 16957, novembre 1984.
- [7] G. LE LANN, «On Real-Time and Non Real-Time Distributed Computing», *in: Lecture Notes in Computer Science 972, papier invité, 9th Intl. Workshop on Distributed Algorithms*, J.M. Hélarý, M. Raynal (éd.), Springer-Verlag Pub., p. 51–70, septembre 1995.
- [8] G. LE LANN, «Proof-Based System Engineering and Embedded Systems», *in: Lecture Notes in Computer Science 1494, papier invité, actes de European School on Embedded Systems*, G. Rozenberg, F. Vaandrager (éd.), Springer-Verlag Pub., p. 208–248, octobre 1998.

### Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [9] J.-F. HERMANT, *Quelques problèmes et solutions en ordonnancement temps réel pour systèmes répartis*, thèse de doctorat, Université Paris-VI - Pierre-et-Marie-Curie, septembre 1999.

---

**Communications à des congrès, colloques, etc.**

- [10] P. CARRÈRE, J.-F. HERMANT, G. LE LANN, « In Pursuit of Correct Paradigms for Object-Oriented Real-Time Distributed Systems », *in: Proc. of the 2nd IEEE International Symposium on Object-oriented Real-Time distributed Computing, ISORC'99*, p. 271–279, Saint-Malo, France, mai 1999.
- [11] C. GUETTIER, J.-F. HERMANT, « A Constraint-Based Model for High-Performance Real-Time Computing », *in: Proc. of the 12th ISCA International Conference on Parallel and Distributed Computing Systems, PDCS'99*, p. 447–454, Fort Lauderdale, FL, USA, août 1999.
- [12] G. LE LANN, « Models, Proofs and the Engineering of Computer-Based Systems: A Reality Check », *in: Proc. of the 9th Annual Intl. Symposium of the InterNational Council On Systems Engineering*, p. 495–502, Vol. 1, Brighton, GB, juin 1999.

**Divers**

- [13] P. CARRÈRE, « Ordonnancement temps réel dans les systèmes critiques », Université Paris-VI - Pierre-et-Marie-Curie, Thèse de doctorat, soutenue début 2000.