

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE & POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
*UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE*

*HOUARI BOUMEDIENE*

**INSTITUT D'INFORMATIQUE**

**THESE**

Présentée à L'USTHB pour l'obtention du grade de  
**MAGISTER EN INFORMATIQUE**

Par

**Mr DJOUDI MOHAMMED**

**TOLERANCE AUX FAUTES DANS LES SYSTEMES REPARTIS:**  
**CAS DE L'ELECTION**  
**SUR UN ANNEAU UNIDIRECTIONNEL**

Thèse soutenue devant le jury composé de:

|                |                             |               |
|----------------|-----------------------------|---------------|
| Mr Z. BELMESK  | Maître de Conférences USTHB | Président.    |
| Mme H. DRIAS   | Maître de Conférences USTHB | Examinatrice. |
| Mme F. CHERIEF | Maître de Conférences USTHB | Examinatrice. |
| Mr H. KHELALFA | Chargé de Recherche CERIST  | Examineur.    |
| Mr N. BADACHE  | Chargé de cours USTHB       | Rapporteur.   |

---

---

## Résumé de thèse

---

L'exigence de tolérance aux fautes est incontournable dans les systèmes répartis.

En effet, l'incertitude introduite par l'existence de délais de communication variables, et par la non sûreté de fonctionnement des processeurs et des moyens de communication montrent que la tolérance aux fautes est un souci inhérent aux systèmes répartis.

Les travaux présentés dans cette thèse portent sur la tolérance aux fautes dans les systèmes répartis et ont conduit à la conception d'un algorithme d'élection sur un anneau unidirectionnel; algorithme tolérant à la perte du message d'élection.

L'algorithme conçu a été formellement spécifié en Estelle et validé par simulation en l'absence et en présence de fautes.

Enfin, nous présentons et appliquons une méthode éprouvée de vérification des propriétés générales et spécifiques d'une application répartie pour vérifier la propriété particulière de notre algorithme: « en cas de perte du message d'élection, sa régénération a toujours lieu ». Cette technique dite de projection procède d'une réduction du graphe d'accessibilité de l'application considérée et est basée sur des principes d'équivalence observationnelle de systèmes de transitions.

---

**Mots clés:** Sûreté de fonctionnement, Tolérance aux fautes, Systèmes répartis, Election, Spécification, Validation, Vérification, Equivalence Observationnelle.

---

## REMERCIEMENTS

---

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur N.Badache, chargé de cours à l'USTHB, qui a accepté la lourde charge de diriger mes travaux. Je le remercie profondément pour les conseils, l'enthousiasme et l'amitié qu'il m'a apportés tout au long de ces années de thèse.

Je remercie vivement Monsieur Z.Belmesk, maître de conférences à l'institut d'informatique USTHB, pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury de thèse, ainsi que:

Madame H.Drias, maître de conférences institut d'informatique, USTHB

Madame F.Chrief, maître de conférences institut d'informatique, USTHB

Monsieur A.Khelalfa, chargé de recherche, CERIST

pour l'honneur qu'ils me font en participant à ce jury.

J'adresse un remerciement tout particulier à Monsieur D.Saidouni, chercheur algérien au LAAS/CNRS, pour son soutien constant et pour la grande disponibilité dont il a fait preuve durant mon séjour à Toulouse.

Mes remerciements s'étendent à l'ensemble des membres du groupe TSF du LAAS/CNRS et à leur tête Monsieur J.C.Laprie pour l'accueil si chaleureux qu'ils m'ont réservé durant mon séjour à Toulouse; ainsi qu'aux membres du groupe OLC particulièrement Monsieur K.Drira.

Enfin, c'est plus qu'un devoir, de remercier sincèrement tous les enseignants qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

---

# **TABLE DES MATIERES**

## ***CHAPITRE 1 : CONCEPTS DE BASE ET TERMINOLOGIE***

|   |    |
|---|----|
| 1 Introduction .....                            | 1  |
| 2 Définitions de base.....                      | 1  |
| 3 Modèles de système .....                      | 3  |
| 4 Spécification d'un système .....              | 4  |
| 5 Entraves à la sûreté de fonctionnement .....  | 5  |
| 5.1 Les défaillances .....                      | 5  |
| 5.2 Les erreurs.....                            | 7  |
| 5.3 Les fautes .....                            | 8  |
| 5.4 Pathologie des fautes .....                 | 10 |
| 6 Moyens pour la sûreté de fonctionnement ..... | 11 |
| 6.1 Tolérance aux fautes .....                  | 11 |
| 6.2 Elimination des fautes.....                 | 13 |
| 6.3 Prévision des fautes .....                  | 14 |
| 7 Conclusion.....                               | 15 |

## ***CHAPITRE 2 : TOLERANCE AUX FAUTES ET REPARTITION***

|  |    |
|--|----|
| 1 Introduction .....   | 16 |
| 2 Les algorithmes répartis.....  | 17 |
| 2.1 Définition .....   | 17 |
| 2.2 Propriétés des algorithmes répartis.....                           | 17 |
| 2.3 La synchronisation entre processus .....                           | 20 |
| 2.3.1 Synchronisation due à la compétition.....                        | 21 |
| 2.3.2 Synchronisation due a la coordination.....                       | 21 |
| 2.4 Classes d'algorithmes repartis .....                               | 22 |
| 2.4.1 Calcul de fonction.....  | 22 |
| 2.4.2 Réalisation de service .....                                     | 22 |
| 2.4.3 Réalisation d'une observation.....                               | 23 |
| 3 Tolérance aux fautes et répartition .....                            | 23 |
| 3.1 Entraves à la sûreté de fonctionnement .....                       | 24 |
| 3.2 Hypothèses et abstractions .....                                   | 26 |
| 4 Schémas de traitement réparti .....                                  | 28 |
| 4.1 Les processus communicants .....                                   | 28 |
| 4.1.1 Tolérance aux fautes à base de mémoire stable .....              | 29 |
| 4.1.2 Tolérance aux fautes basée sur la réplication de processus ..... | 30 |
| 5 Conclusion.....  | 31 |

**CHAPITRE 3: LA TECHNIQUE DE DESCRIPTION FORMELLE ESTELLE**

|   |    |
|---|----|
| 1 Introduction .....                                    | 32 |
| 2 La technique de description Estelle .....             | 33 |
| 2.1 Principaux concepts Estelle.....                    | 33 |
| 2.1.1 La structuration .....                            | 33 |
| 2.1.2 Interconnexion et typage des interfaces.....      | 34 |
| 2.1.3 Comportement et configuration .....               | 35 |
| 2.1.4 Communication et expression du parallélisme ..... | 37 |
| 3 Les outils autour d'Estelle .....                     | 38 |
| 3.1 Le simulateur Veda.....                             | 38 |
| 3.1.1 Présentation .....                                | 38 |
| 3.1.2 Fonctionnalités .....                             | 39 |
| 3.2 Environnement Estim .....                           | 40 |
| 4 Conclusion.....                                       | 41 |

**CHAPITRE 4 : TECHNIQUE DE VERIFICATION PAR PROJECTIONS**

|  |    |
|--|----|
| 1 Introduction .....   | 42 |
| 2 La vérification par projections .....                          | 44 |
| 3 Equivalence observationnelle des systèmes de transitions ..... | 45 |
| 3.1 Définitions et notations.....                                | 45 |
| 3.2 Concept de bisimulation .....                                | 47 |
| 3.3 Equivalence observationnelle.....                            | 48 |
| 4 Conclusion.....  | 51 |

**CHAPITRE 5 : EXPERIMENTATION**

|  |    |
|--|----|
| 1 Introduction .....                                     | 52 |
| 2 Contexte de notre étude.....                           | 52 |
| 2.1 Présentation générale .....                          | 52 |
| 2.2 Classe de fautes considérée .....                    | 53 |
| 2.3 Les problèmes à résoudre :.....                      | 53 |
| 3 Présentation de l'algorithme de Chang et Roberts ..... | 54 |
| 4 Présentation de l'algorithme de Raynal .....           | 55 |
| 5 Validation et vérification de l'algorithme conçu.....  | 56 |
| 5.1 Méthodologie adoptée.....                            | 56 |

|   |    |
|---|----|
| 5.2 Phase sans injection de fautes .....                  | 57 |
| 5.2.1 Description de l'algorithme .....                   | 58 |
| 5.2.2 Validation par veda.....                            | 59 |
| 5.2.3 Application de l'équivalence observationnelle ..... | 60 |
| 5.3 Campagne d'injection de fautes .....                  | 62 |
| 5.3.1 Description de la détection et régénération.....    | 64 |
| 5.3.2 Validation par veda.....                            | 64 |
| 5.3.3 Application de l'équivalence observationnelle ..... | 67 |
| 5.3.3.1 Interprétation des graphes quotients.....         | 68 |
| 5.3.3.1.1 Graphe de la première approche .....            | 68 |
| 5.3.3.1.2 Graphe de la deuxième approche.....             | 70 |
| 5.3.3.2 Interprétation des transitions $\tau$ : .....     | 72 |
| 6 Conclusion.....   | 74 |
| Annexe 1 .....  | 77 |
| Annexe 2 .....  | 82 |
| Annexe 3 .....  | 83 |