

# THESE

présentée devant

L'UNIVERSITE DE RENNES I

U.F.R. - I.F.S.I.C.

pour obtenir

le titre de Docteur de l'Université de Rennes I

Mention : Informatique

par

René THORAVAL

## LES PRINCIPES ET MECANISMES FONDAMENTAUX DE L'EXCLUSION MUTUELLE EQUITABLE DANS LES SYSTEMES DISTRIBUES

Construction des algorithmes classiques et de quelques unes de leurs variantes

Soutenue le vendredi 4 mars 1988 devant la Commission d'Examen :

MM. D. HERMAN	Président
M. RAYNAL	Rapporteur
M. SINTZOFF	Rapporteur
Mme R. COUSOT	
MM. C. JARD	
J.P. VERJUS	

# TABLE DES MATIERES

---

## INTRODUCTION

### I. PRELIMINAIRES

#### I.1. HYPOTHESES SUR LES ALGORITHMES ET LEURS ENVIRONNEMENTS, EXPRESSION DES ALGORITHMES

I.1.1. Des algorithmes distribués

I.1.2. Des environnements fiables

I.1.3. Expression des algorithmes

I.1.3.1. Algorithmes basés sur des lectures distantes

I.1.3.2. Algorithmes basés sur des échanges de messages

I.1.4. Remarques sur l'influence du mode de communication

I.1.4.1. Conscience ou inconscience des sites

I.1.4.2. Contrôle du nombre de communication entre les sites

I.1.4.3. Interrogation ou observation

#### I.2. LES PROPRIETES CONSIDEREES

I.2.1. Exclusion mutuelle

I.2.2. Absence de risque d'interblocage

I.2.3. Equité et "quasi-équité"

#### I.3. UNE METHODE DE DERIVATION D'ALGORITHMES DISTRIBUES A PARTIR D'EXPRESSIONS ABSTRAITES ET REGULIERES DE SYNCHRONISATION

I.3.1. Compteurs instantanés de progression et expressions  
abstraites de synchronisation

I.3.1.1. Compteurs instantanés de progression

I.3.1.2. Expressions abstraites de synchronisation et comportement du  
contrôleur abstrait associé

I.3.2. Expressions abstraites et régulières de synchronisation et  
dérivation d'algorithmes distribués

I.3.2.1. Un exemple : la synchronisation d'un couple producteur-consommateur

I.3.2.2. Expressions régulières de synchronisation

#### I.4. COMMENT BORNER LA TAILLE DES VARIABLES ET MESSAGES LORS DE LA CONSTRUCTION D'UN ALGORITHME ?

I.4.1. Le problème posé

I.4.2. Une condition suffisante de dérivation modulo

I.4.2.1. Lemme

I.4.2.2. Théorème

#### I.5. SYMETRIE ET EXCLUSION MUTUELLE SANS RISQUE D'INTERBLOCAGE

I.5.1. Introduction

I.5.2. La symétrie forte de [Burns 81]

I.5.2.1. Fonction symétrique d'adressage

I.5.2.2. Algorithme fortement symétrique

I.5.3. Non-existence d'un algorithme fortement symétrique assurant l'exclusion mutuelle sans risque d'interblocage

I.5.3.1. Théorème

I.5.3.2. Démonstration du théorème

I.5.3.2.1. Première étape

I.5.3.2.2. Seconde étape

I.5.4. Les conséquences de cette non-existence

I.5.5. Symétrie forte et algorithmes probabilistes d'exclusion mutuelle

## II. EXCLUSION MUTUELLE PAR UTILISATION D'UN PRIVILEGE

### II.1. EXCLUSION MUTUELLE PAR UTILISATION D'UN PRIVILEGE

II.1.1 La notion de privilège

II.1.2. Exclusion mutuelle par utilisation d'un privilège

II.1.3. Le contrôle relatif à l'exclusion mutuelle dans une solution basée sur l'utilisation d'un privilège

### II.2. CONSTRUCTION D'ALGORITHMES EQUITABLES PAR CIRCULATION D'UN PRIVILEGE

II.2.1. Condition nécessaire et suffisante

II.2.2. Condition suffisante et algorithmes avec infinité de transmissions a priori

II.2.3. Algorithmes avec transmission sur requête

II.2.4. Variations à partir de ces deux cas limite

## II.3. CONSTRUCTION D'ALGORITHMES EQUITABLES PAR CIRCULATION D'UN PRIVILEGE AVEC INFINITE DE TRANSMISSIONS A PRIORI

II.3.1. Introduction

II.3.2. L'algorithme de [Dijkstra 74]

II.3.2.1. Dérivation de l'algorithme de [Dijkstra 74] à partir d'une expression abstraite et régulière de synchronisation

II.3.2.2. D'autres mises en oeuvre de cette expression abstraite

II.3.2.2.1. Les algorithmes de [Le Lann 77] et de [Martin 85](1)

II.3.2.2.2. L'algorithme de [Raynal 85b]

II.3.2.2.3. Un autre algorithme proposé dans [Raynal 85b]

II.3.3. Dérivation d'algorithmes avec infinité de transmissions a priori

II.3.4. Un algorithme probabiliste

## II.4. CONSTRUCTION D'ALGORITHMES EQUITABLES PAR CIRCULATION D'UN PRIVILEGE AVEC TRANSMISSION SUR REQUETE

II.4.1. Introduction : le problème de la représentation des demandes non satisfaites

II.4.1.1. Le problème de la représentation des demandes non satisfaites

II.4.1.2. L'obtention d'algorithmes équitables

II.4.2. Esquisse d'un algorithme équitable (communication par lectures distantes)

II.4.3. Construction d'algorithmes équitables fonctionnant sur un maillage complet (communication par échanges de messages)

II.4.3.1. Impossibilité d'une solution purement observationnelle lorsqu'il y a plus de deux sites

II.4.3.1.1. Principe d'une solution purement observationnelle

II.4.3.1.2. Cette solution peut induire des transmissions inutiles lorsqu'il y a plus de deux sites

II.4.3.1.3. Comportement de cette solution lorsqu'il n'y a que deux sites

II.4.3.2. L'algorithme [1<sub>II</sub>], une solution basée sur des accusés de réception

II.4.3.3. Une solution utilisant un mécanisme de transfert de connaissances par le privilège

- II.4.3.3.1. La solution
- II.4.3.3.2. L'algorithme de [Ricart 83]
- II.4.3.3.3. L'algorithme de [Suzuki 82]
- II.4.3.4. Dérivation d'algorithmes n'utilisant que des variables et des messages de taille bornée
  - II.4.3.4.1. Impossibilité d'un dérivation directe de l'algorithme [111] s'il peut y avoir déséquence de messages
  - II.4.3.4.2. Impossibilité d'un dérivation directe des algorithmes basés sur le transfert de connaissances par le privilège
  - II.4.3.4.3. Construction de mécanismes de renforcement du couplage entre les sites
- II.4.4. Construction d'un algorithme équitable fonctionnant sur un réseau fortement connexe quelconque (communication par échanges de messages)
  - II.4.4.1. Construction de mécanismes de routage
    - II.4.4.1.1. Routage des requêtes
    - II.4.4.1.2. Routage du privilège
  - II.4.4.2. Remarques
    - II.4.4.2.1. Algorithmes ne manipulant que des objets de taille bornée
    - II.4.4.2.2. Généralisation à un réseau fortement connexe quelconque des algorithmes basés sur le transfert de connaissances par le privilège
    - II.4.4.2.3. Un réseau fortement connexe particulier : l'anneau
    - II.4.4.2.4. L'algorithme de [Hélary 86]
- II.4.5. Algorithmes équitables dans lesquels toutes les requêtes ne sont pas fatalement connues de tous les contrôleurs

### III. EXCLUSION MUTUELLE PAR COMPETITION DIRECTE NON ORDONNEE

#### III.1. EXCLUSION MUTUELLE PAR COMPETITION ENTRE LES SITES

- III.1.1. Absence de privilège
- III.1.2. Exclusion mutuelle par compétition directe entre les sites
  - III.1.2.1. L'expression abstraite de l'exclusion mutuelle
    - III.1.2.1.1. L'expression
    - III.1.2.1.2. Cette expression n'est pas régulière
    - III.1.2.1.3. Non-existence d'une expression abstraite régulière de l'exclusion mutuelle
  - III.1.2.2. Renforcement des contraintes de synchronisation
    - III.1.2.2.1. Une expression abstraite plus contraignante

III.1.2.2.2. Une condition suffisante pour la mise en oeuvre correcte de cette expression

III.1.2.2.3. Une mise en oeuvre correcte dans un contexte de communication par lectures distantes

III.1.2.2.4. Une mise en oeuvre correcte dans un contexte de communication par échanges de messages

III.1.2.3. Algorithmes d'exclusion mutuelle par compétition entre les sites

III.1.2.3.1. Une condition  $C_{EM}$  suffisante pour qu'un algorithme assure l'exclusion mutuelle par compétition entre les sites

III.1.2.3.2. Une forme  $F_{EM}$  d'algorithmes d'exclusion mutuelle fonctionnant dans un contexte de communication par lectures distantes

III.1.3. Le contrôle relatif à l'exclusion mutuelle dans une solution basée sur la compétition directe entre les sites

III.1.4. Compétition directe non ordonnée et compétition directe ordonnée

## III.2. INTRODUCTION A LA CONSTRUCTION D'ALGORITHMES EQUITABLES

III.2.1. Construction d'algorithmes équitables avec retraits de la compétition

III.2.1.1. Prévention de tout risque d'interblocage par adjonction d'un mécanisme de contrôle de la participation à la compétition

III.2.1.2. Obtention d'algorithmes équitables

III.2.2. Construction d'algorithmes équitables sans retrait de la compétition

## III.3. CONSTRUCTION D'ALGORITHMES SANS RISQUE D'INTERBLOCAGE AVEC RETRAITS DE LA COMPETITION

III.3.1. Construction d'un algorithme sans risque d'interblocage

III.3.1.1. Première étape

III.3.1.2. Seconde étape

III.3.1.3. Variantes de l'algorithme obtenu

III.3.2. Une forme d'algorithmes d'exclusion mutuelle sans risque d'interblocage

III.3.2.1. Introduction

III.3.2.2. La forme  $F_{EM}^{ARI}$

III.3.3. Obtention d'algorithmes sans risque d'interblocage dans d'autres contextes

III.3.3.1. Prévention de l'interblocage à l'aide d'un mécanisme abstrait non "distribuable"

III.3.3.1.1. Les algorithmes de [Dijkstra 65], [Burns 81] et [Martin 86]

III.3.3.1.2. Symétrie et exclusion mutuelle sans risque d'interblocage (compléments)

III.3.3.2. En ne considérant que des calculs "extrêmement équitables", prévention de l'interblocage à l'aide d'un mécanisme de contrôle fortement symétrique

### III.4. CONSTRUCTION D'ALGORITHMES ÉQUITABLES AVEC RETRAITS DE LA COMPÉTITION

#### III.4.1. Introduction

III.4.1.1. Construction d'algorithmes équitables par définition de systèmes de priorité dynamique adéquats

III.4.1.2. Construction d'algorithmes équitables par contrôle de l'accès à un code inéquitable

#### III.4.2. Construction d'algorithmes équitables par définition de systèmes de priorité dynamique adéquats

III.4.2.1. Un système de priorité dynamique adéquat évoluant par translations d'une relation de priorité le long d'un anneau virtuel

III.4.2.1.1. La relation de priorité *Prioritaire sur<sub>2</sub>*

III.4.2.1.2. Construction d'algorithmes sans risque d'interblocage utilisant la relation *Prioritaire sur<sub>2</sub>*

III.4.2.1.3. Construction d'un algorithme équitable par translations d'un pas

III.4.2.1.4. Construction de variantes

III.4.2.1.5. Le contrôle dans les algorithmes précédents

III.4.2.2. Un système de priorité adéquat basé sur un système de  $(n(n-1)/2)$  droits binaires

III.4.2.2.1. Un système abstrait de priorité basé sur un système de  $(n(n-1)/2)$  droits binaires

III.4.2.2.2. Représentation de ce système de priorité

III.4.2.2.3. L'algorithme [11<sub>III</sub>]

III.4.2.2.4. Le contrôle dans l'algorithme [11<sub>III</sub>]

III.4.2.3. Des systèmes de priorité adéquats basés sur des horloges

III.4.2.3.1. La forme  $FEM^{EQ}$  d'algorithmes équitables d'exclusion mutuelle

III.4.2.3.2. Trois systèmes de priorité permettant de définir des algorithmes équitables de forme  $FEM^{EQ}$

III.4.2.3.3. Le contrôle dans les algorithmes précédents

### III.4.3. Construction d'algorithmes équitables par contrôle de l'accès à un code inéquitable

III.4.3.1. Une condition suffisante pour l'obtention d'algorithmes équitables par contrôle de l'accès à un code inéquitable

III.4.3.2. Construction d'un algorithme équitable par définition d'un mécanisme de contrôle dépendant de l'exclusion mutuelle

III.4.3.2.1. Première étape de la construction d'un mécanisme abstrait de contrôle

III.4.3.2.2. Seconde étape

III.4.3.2.3. Le mécanisme abstrait de contrôle est indépendant du germe considéré

III.4.3.2.4. Une représentation du mécanisme abstrait

III.4.3.2.5. Le code correspondant à cette représentation peut être réécrit sous une forme fortement symétrique

III.4.3.3. Construction d'algorithmes équitables par définition de capsules d'équité

III.4.3.3.1. La forme  $CAP_{EM}^{EQ}$  d'algorithmes équitables et la notion de "capsule d'équité"

III.4.3.3.2. Deux capsules d'équité "à la Katseff"

III.4.3.3.3. Des capsules d'équité "à la Peterson"

## III.5. CONSTRUCTION D'ALGORITHMES EQUITABLES SANS RETRAIT DE LA COMPETITION

III.5.1. Construction d'algorithmes équitables (communication par échanges de messages)

III.5.1.1. L'algorithme  $[3_{III}]$ , point de départ des transformations effectuées

III.5.1.2. Définition de relations entre requêtes émises au cours d'une exécution quelconque de l'algorithme  $[3_{III}]$

III.5.1.2.1. Relation de précedence bi-locale et requêtes bi-localement concurrentes

III.5.1.2.2. Relation de précedence globale et requêtes globalement concurrentes

III.5.1.2.3. Relation de  $\Sigma$ -précedence globale et requêtes  $\Sigma$ -globalement concurrentes

III.5.1.2.4. Relations entre précedence bi-locale, précedence globale,  $\Sigma$ -précedence globale et notion de  $x$ -précedence globale

III.5.1.2.5. Définition d'une relation d'ordre total sur les requêtes à partir d'une relation de  $x$ -précedence globale

III.5.1.3. Les exécutions interbloquées de l'algorithme  $[3_{III}]$

III.5.1.3.1. Graphe orienté  $G$  des attentes

- III.5.1.3.2. Exécution interbloquée de l'algorithme [3<sub>III</sub>] et graphe  $G^\infty$
  - III.5.1.4. Schéma de transformation de l'algorithme [3<sub>III</sub>] en un algorithme abstrait [3'<sub>III</sub>] : introduction des prédicats COND(i, j)
  - III.5.1.5. Condition suffisante portant sur les prédicats COND(i, j) pour obtenir une version équitable [3'<sub>III</sub><sup>EQ</sup>] de l'algorithme [3'<sub>III</sub>]
    - III.5.1.5.1. Préservation des propriétés de "quasi-équité" et d'exclusion mutuelle de l'algorithme [3<sub>III</sub>] par l'algorithme [3'<sub>III</sub>]
    - III.5.1.5.2. Suppression de tout risque d'interblocage dans l'algorithme [3'<sub>III</sub>] et préservation de la propriété d'exclusion mutuelle de l'algorithme [3<sub>III</sub>]
    - III.5.1.5.3. Condition suffisante portant sur les prédicats COND(i, j) pour obtenir une version équitable [3'<sub>III</sub><sup>EQ</sup>] de l'algorithme [3'<sub>III</sub>]
  - III.5.1.6. Représenter les prédicats COND(i, j) pour mettre correctement en oeuvre l'algorithme abstrait équitable [3'<sub>III</sub><sup>EQ</sup>]
  - III.5.1.7. Une première représentation correcte quelle que soit la valeur de n
    - III.5.1.7.1. Un mécanisme permettant un transfert suffisant de connaissances entre les sites
    - III.5.1.7.2. Expression des prédicats COND(i, j) en fonction de ce mécanisme
    - III.5.1.7.3. Une première mise en oeuvre de l'algorithme abstrait équitable [3'<sub>III</sub><sup>EQ</sup>] correcte quelle que soit la valeur de n
  - III.5.1.8. Une représentation correcte lorsque n vaut deux
  - III.5.1.9. Une seconde représentation correcte quelle que soit la valeur de n
    - III.5.1.9.1. Introduction : une autre manière de définir la relation de  $\Sigma$ -précédence globale
    - III.5.1.9.2. Généralisation de cette définition
    - III.5.1.9.3. Une nouvelle relation de x-précédence globale : la relation de H-précédence globale
    - III.5.1.9.4. Une représentation des prédicats COND(i, j) basée sur la relation de H-précédence globale et correcte quelle que soit la valeur de n
  - III.5.1.10. L'algorithme de [Lamport 78]
    - III.5.1.10.1. Relations de x-précédence globale sur l'ensemble des événements "significatifs" d'une exécution d'un algorithme
    - III.5.1.10.2. L'algorithme de [Lamport 78]
- III.5.2. Construction d'algorithmes équitables (communication par lectures distantes)
- III.5.2.1. L'algorithme [1<sub>III</sub>], point de départ des transformations effectuées

III.5.2.2. Schéma de transformation de l'algorithme [1<sub>III</sub>] en un algorithme abstrait [1'<sub>III</sub>]

III.5.2.3. Des algorithmes équitables

III.5.2.3.1. L'algorithme de [Lamport 79]

III.5.2.3.2. Un autre algorithme correct quelle que soit la valeur de  $n$

III.5.2.3.3. L'algorithme de [Kessels 82] <sub>$n=2$</sub>

## IV. AUTRES ALGORITHMES EQUITABLES D'EXCLUSION MUTUELLE

### IV.1. CONSTRUCTION D'ALGORITHMES EQUITABLES POUR $n$ SITES A PARTIR D'ALGORITHMES EQUITABLES POUR DEUX SITES

IV.1.1. Introduction

IV.1.2. Construction d'algorithmes d'exclusion mutuelle sans risque d'interblocage par ordonnancement adéquat de l'acquisition des ressources élémentaires

IV.1.2.1. Introduction

IV.1.2.2. Le principe des classes ordonnées de ressources

IV.1.2.3. Application de ce principe à l'ensemble des  $(n(n-1)/2)$  ressources élémentaires  $R((i, j))$

IV.1.2.3.1. Une partition linéairement ordonnée de l'ensemble des ressources élémentaires

IV.1.2.3.2. Une partition de l'ensemble des ressources élémentaires ordonnée de manière arborescente

IV.1.2.3.3. Remarque

IV.1.2.4. Application à la construction d'algorithmes sans risque d'interblocage pour  $n$  sites à partir d'algorithmes sans risque d'interblocage pour deux sites

IV.1.3. Construction d'algorithmes équitables d'exclusion mutuelle par ordonnancement adéquat de l'acquisition des ressources élémentaires

### IV.2. CONSTRUCTION D'ALGORITHMES EQUITABLES D'EXCLUSION MUTUELLE A PARTIR D'ALGORITHMES EQUITABLES D'ALLOCATION D'UNE RESSOURCE A $(n-1)$ POINTS D'ENTREE

IV.2.1. Rappel

IV.2.2. Esquisse d'une méthode de dérivation

IV.2.3. Un exemple de dérivation permettant d'obtenir une variante de l'algorithme de [Peterson 81]

IV.2.3.1. Un algorithme équitable d'allocation d'un ressource à  $(n-1)$  points d'entrée

IV.2.3.2. Un algorithme équitable d'exclusion mutuelle

### IV.3. UN ALGORITHME BASE SUR UN SYSTEME DE $(n(n-1)/2)$ PRIVILEGES ET UN SYSTEME DE $(n(n-1)/2)$ DROITS BINAIRES : L'ALGORITHME DE [Chandy 84]

IV.3.1. Une solution au problème de l'exclusion mutuelle basée sur l'utilisation d'un système de  $(n(n-1)/2)$  privilèges

IV.3.2. L'algorithme de [Chandy 84]

IV.3.2.1. Principe d'un algorithme équitable "à la Chandy et Misra"

IV.3.2.2. Expression abstraite du principe d'un tel algorithme

IV.3.2.2.1. Expression de la possession du privilège  $P((i, j))$  par le site  $S_i$

IV.3.2.2.2. Expression du fait que le site  $S_i$  dispose du droit  $D((i, j))$

IV.3.2.2.3. Condition abstraite d'accès du site  $S_k$  à la ressource critique

IV.3.2.2.4. Condition abstraite de demande par  $S_k$  du privilège  $P((k, h))$  à  $S_h$

IV.3.2.2.5. Condition abstraite de transmission par  $S_k$  du privilège  $P((k, h))$  à  $S_h$

IV.3.2.3. Mise en oeuvre de l'expression abstraite par dérivation immédiate

IV.3.2.4. L'algorithme de Chandy et Misra

IV.3.3. L'algorithme de [Carvalho 83]

### IV.4. LA SOLUTION DE MAEKAWA

IV.4.1. L'invariant caractéristique de la solution de Maekawa

IV.4.2. Le contrôle relatif à l'exclusion mutuelle dans la solution de Maekawa

IV.4.3. Vers l'algorithme de [Maekawa 85]

## CONCLUSION

## BIBLIOGRAPHIE

## INDEX DES ALGORITHMES PUBLIES

## ANNEXE : CONFIGURATION DES SITES DANS LES DIFFERENTS ALGORITHMES