

# THESE

Présentée à  
L'Université des Sciences et Technologies de LILLE

En vue de l'obtention du grade de

## DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Spécialité  
Productique : Automatique et Informatique Industrielle

Par

**THIERRY CARPENTIER**  
Ingénieur HEI



## PLACEMENT DE CAPTEURS POUR LA SURVEILLANCE DES PROCESSUS COMPLEXES

Soutenue le 11 mai 1999 devant le jury d'examen

**Président :** E. CRAYE, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille.

**Rapporteurs :** S. GENTIL, Professeur à l'INPG, Grenoble.  
J. RAGOT, Professeur à l'INPL, Nancy.

**Examineurs :** M. STAROSVIECKI, Professeur à l'USTL, Lille.  
J.P. CASSAR, Professeur à l'USTL, Lille.  
Co-directeur de thèse.  
R. LITWAK, Maître de conférences à l'USTL, Lille.  
Co-directeur de thèse.

## REMERCIEMENTS

L'accomplissement d'un Doctorat et le travail conduisant à la rédaction de la thèse ne se font jamais seul. Il est toujours nécessaire de s'imprégner des conseils de ses aînés et à ce titre je leur dois de sincères et chaleureux remerciements.

Je tiens tout d'abord à remercier vivement Monsieur Marcel Staroswiecki pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe Analyse et Surveillance des Processus Industriels Complexes (ASPIC) du Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL CNRS UPRESA 8021).

Toute ma reconnaissance va aussi aux deux piliers de ce travail Messieurs Jean-Philippe Cassar et Robert Litwak qui ont accepté de co-diriger mon travail de thèse. Je tiens tout particulièrement à les remercier pour leur aide et leurs conseils précieux ainsi que pour l'attention, la disponibilité et le suivi de tous les instants dont ils ont fait preuve malgré un emploi du temps chargé.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à la Direction de l'école des Hautes Etudes Industrielles et à la Fondation Norbert Segard pour leur soutien et leur confiance sans lesquels ce travail de recherche n'aurait pu se dérouler dans d'aussi bonnes conditions.

Je remercie également l'ensemble des membres du jury qui m'ont fait l'honneur de participer à l'examen de ce travail. En particulier Monsieur José Ragot et Madame Sylviane Gentil qui ont accepté d'en être les rapporteurs et pour les conseils ainsi que les remarques qu'ils ont pu effectuer dans la mise au point de ce mémoire. Monsieur Etienne Craye, président du jury, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Enfin, et sans chercher à citer toutes les personnes, mes remerciements s'adressent à tous ceux qui ont contribué à la réussite de ces travaux : mes parents, le personnel scientifique et technique du LAIL, du laboratoire d'automatique d'HEI et de l'Equipe de Recherche en Automatique et Systèmes de Mesure (ERASM).

# **SOMMAIRE**

<b>SOMMAIRE</b>	<b>3</b>
<b>CHAPITRE I : INTRODUCTION</b>	<b>6</b>
1 INTRODUCTION.	7
2 LA SURETE DE FONCTIONNEMENT.	7
2.1 Définition du système et de ses modes de fonctionnement.	8
2.2 La sûreté de fonctionnement.	8
2.2.1 La disponibilité.	9
2.2.2 La crédibilité.	10
3 LA SURVEILLANCE.	10
3.1 Les défaillances.	10
3.2 Classification des défaillances selon leur origine.	11
3.3 Le cahier des charges de surveillance.	11
3.4 Les fonctions de la surveillance.	11
3.4.1 L'observation.	12
3.4.2 La redondance d'information.	13
3.4.3 Les résidus.	15
3.4.4 La décision.	15
3.5 Conclusion.	17
4 LE POSITIONNEMENT DE CAPTEURS.	19
4.1 Placement de capteurs pour l'observabilité et l'estimation.	20
4.1.1 Placement de capteurs et observabilité.	21
4.1.2 Placement de capteurs et estimation.	22
4.2 Placement de capteurs et surveillance.	23
4.2.1 Estimation de l'état par observateur.	23
4.2.2 La détection.	24
4.2.3 Détectabilité et localisabilité.	24
4.3 Critères d'optimisation du placement de capteurs.	25
4.3.1 Le coût.	25
4.3.2 La fiabilité et la disponibilité.	26
4.3.3 La sensibilité du système de surveillance.	27
4.3.4 Optimisation multicritères.	28
5 PRESENTATION DE LA THESE.	29
<b>CHAPITRE II : ANALYSE STRUCTURELLE ET SURVEILLANCE</b>	<b>31</b>
1 INTRODUCTION.	32
2 L'APPROCHE STRUCTURELLE.	32
2.1 La modélisation.	34
2.1.1 Le modèle fonctionnel.	35
2.1.2 Le modèle topologique.	35
2.1.3 Le modèle de comportement.	35
2.2 La structure d'un modèle.	36
2.2.1 Structure d'un modèle et graphe biparti.	38
3 LES RELATIONS DE REDONDANCE ANALYTIQUE.	41
3.1 Définition.	41
3.2 Analyse structurelle et relation de redondance analytique.	41
3.2.1 Couplages sur une structure.	42
3.2.2 Calculabilité.	44
3.2.3 Relations de redondance.	45
3.3 Génération des relations de redondance analytique.	45
4 LE SYSTEME DE SURVEILLANCE.	47
4.1 Structure d'un système de surveillance et signature de panne.	47
4.2 Procédure de décision.	49
4.3 Evaluation structurelle d'un système de surveillance.	50

4.4	Amélioration des systèmes de surveillance.	51
<b>5</b>	<b>CONCLUSION.</b>	<b>52</b>
<b>CHAPITRE III : CONCEPTS POUR LE PLACEMENT DE CAPTEURS</b>		<b>53</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.</b>	<b>54</b>
<b>2</b>	<b>LA GENERATION DES RESIDUS.</b>	<b>54</b>
2.1	Représentation de la structure par un graphe biparti orienté.	55
2.1.1	Inversibilité d'une relation par rapport à une variable.	56
2.1.2	Graphe biparti orienté.	56
2.2	Génération des résidus par les arbres de résolution.	58
<b>3</b>	<b>LA STRUCTURATION DES RESIDUS.</b>	<b>62</b>
3.1	Définition généralisée des défaillances.	63
3.2	Les structures de résidus.	64
3.2.1	Représentation vectorielle de la structure d'un résidu.	64
3.2.2	Représentation graphique de la structure d'un résidu.	65
3.3	Classification des résidus en fonction de leur structure.	66
3.4	Signature d'une défaillance.	69
3.5	Capacité de détection et de localisation.	70
3.5.1	Capacité de détection des défaillances.	70
3.5.2	Capacité de localisation des défaillances.	71
<b>4</b>	<b>CONCLUSION.</b>	<b>72</b>
<b>CHAPITRE IV : PLACEMENT DE CAPTEURS POUR LA SURVEILLANCE</b>		<b>74</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>75</b>
<b>2</b>	<b>LE CAHIER DES CHARGES DE SURVEILLANCE.</b>	<b>75</b>
<b>3</b>	<b>METHODE DE PLACEMENT DE CAPTEURS.</b>	<b>76</b>
3.1	Phase 1 : définition de la structure de base du système.	79
3.2	Phase 2 : construction des sous-ensembles de résidus $R_{di}$ .	79
3.2.1	L'algorithme exhaustif.	80
3.2.2	L'algorithme amélioré.	85
3.2.3	Comparaison des solutions des deux algorithmes.	90
3.3	Phase 3 : détermination des différentes configurations de placement de capteurs.	90
3.4	Phase 4 : choix de la meilleure configuration de placement de capteurs.	91
3.4.1	Le critère de coût.	92
3.4.2	Le critère de sensibilité structurelle ou services additionnels de surveillance.	93
3.4.3	Procédure de décision multicritères.	94
<b>4</b>	<b>CONCLUSION.</b>	<b>96</b>
<b>CHAPITRE V : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b>		<b>97</b>
<b>1</b>	<b>CONCLUSIONS.</b>	<b>98</b>
<b>2</b>	<b>PERSPECTIVES.</b>	<b>100</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>		<b>101</b>
<b>RESUME</b>		<b>110</b>

# ***CHAPITRE I : INTRODUCTION***

## 1 INTRODUCTION.

L'objectif de ce chapitre est de présenter et d'illustrer les principes de base de la surveillance. La première partie replacera la surveillance des processus industriels dans le contexte plus général de la sûreté de fonctionnement des systèmes. Cette intégration permettra de définir, dans une seconde partie, les fonctions que doit remplir la surveillance. La troisième partie sera consacrée aux principes de base généralement mis en jeu pour que la surveillance puisse remplir ces fonctions. Une quatrième partie évoquera le problème du positionnement de capteurs en vue de la surveillance et reprendra les différents travaux liés à la conception d'architecture d'instrumentation dans ce but. Enfin une présentation plus détaillée de ce mémoire et de nos travaux constituera la cinquième et dernière partie de ce chapitre.

## 2 LA SURETE DE FONCTIONNEMENT.

Ces vingt dernières années des impératifs techniques (automatisation et complexité croissantes des processus), économiques (augmentation de la productivité, réduction des coûts de conception, d'exploitation, de maintenance...) et de sécurité (maîtrise des risques pour le matériel, les hommes et l'environnement...) ont incité le développement de systèmes permettant l'analyse de la sûreté de fonctionnement des processus industriels. Ces systèmes sont en général des logiciels fonctionnant en temps réel et qui s'intègrent au niveau 2 (supervision) de l'architecture C.I.M. (Computers Integrated Manufacturing) décrivant les processus industriels modernes (figure 1.1).

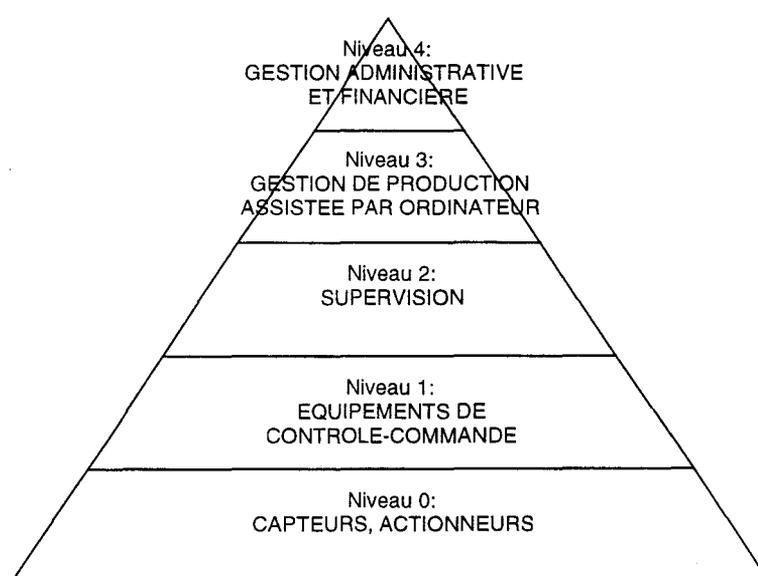


Figure 1.1. Architecture C.I.M.

Nos travaux porteront donc sur la surveillance des processus industriels. Dans un premier temps nous définirons ce que nous entendons par système industriel ainsi que ses différents modes de fonctionnement. Puis nous aborderons plus en détail la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels en introduisant les notions de disponibilité et de crédibilité. Ces notions permettront d'évaluer a priori le niveau de satisfaction que l'on peut obtenir d'un équipement en matière de productivité et de sécurité. Ensuite, nous consacrerons une partie de ce chapitre à la surveillance des systèmes industriels. Nous montrerons notamment que les fonctions principales de la surveillance sont la détection et la localisation des défaillances des composants du système. Puis, nous conclurons sur les apports d'un système de surveillance en matière de sûreté de fonctionnement.

## **2.1 Définition du système et de ses modes de fonctionnement.**

Un processus industriel peut être vu comme un système. Un système est défini comme un ensemble composé d'éléments qui peuvent interagir entre eux ou avec l'extérieur. Un processus industriel peut avoir pour mission, par exemple, la fabrication, la transformation, le contrôle ou le transport d'un produit. Il peut donc être considéré comme un dispositif apportant une valeur ajoutée à un produit. Un système possède généralement plusieurs modes de fonctionnement. Ces modes de fonctionnement correspondent au fait que la mission, pour laquelle le système a été conçu, est totalement, partiellement ou pas du tout remplie. Ceci permet de classer les modes de fonctionnement de la façon suivante [DUBUISSON 90] :

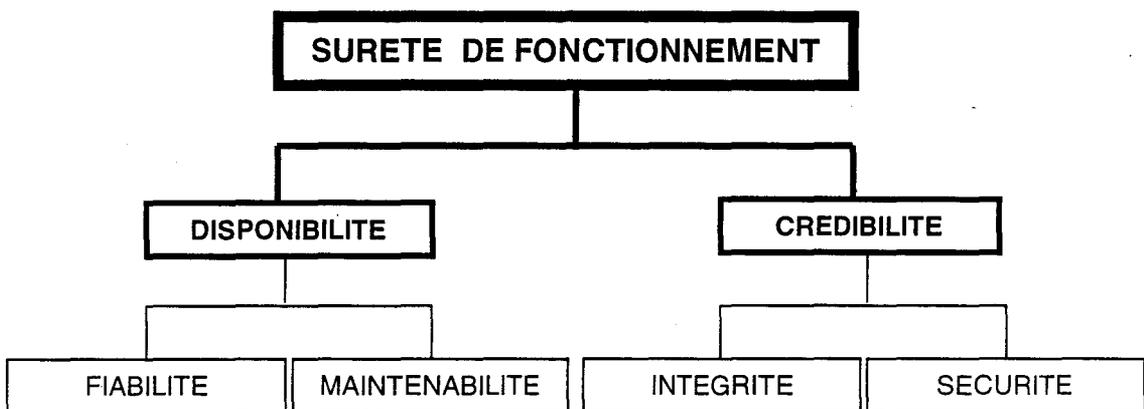
- **Modes de fonctionnement normaux** : la mission est accomplie. Plusieurs modes de fonctionnements nominaux permettent d'obtenir l'adéquation avec l'objectif de la mission. Un mode de fonctionnement peut s'écarter du fonctionnement nominal tout en restant normal.
- **Modes de fonctionnement anormaux** : la mission n'est que partiellement ou pas du tout remplie. Le service n'est pas satisfaisant voire critique. Ces modes peuvent correspondre aux **modes interdits** (le système ne doit absolument pas fonctionner dans ces modes pour des raisons de sécurité), aux **modes défaillants** (mauvais fonctionnement du système), aux **modes dégradés** (la mission est partiellement remplie ou elle est remplie avec des performances moindres), aux **modes critiques** (les caractéristiques de fonctionnement sont particulières et généralement non souhaitées).
- On peut aussi définir des **modes de fonctionnement d'exception** (ils sont normaux ou anormaux mais aussi peu tolérés ou fréquents, **d'indisponibilité** (le système ne peut accomplir sa mission) ou **évolutifs** (mode transitoire de passage d'un mode de fonctionnement à un autre).

## **2.2 La sûreté de fonctionnement.**

Un système sûr est un système conçu pour réaliser une mission sans accident ou incident mettant en jeu la sécurité ou la rentabilité. La sûreté de

fonctionnement a deux objectifs principaux. Le premier consiste à indiquer l'aptitude d'un système à remplir la mission pour laquelle il a été conçu. Le second consiste à évaluer les risques mettant en cause la sécurité et la production du système.

Pour atteindre ces deux objectifs, la sûreté de fonctionnement doit analyser les performances du système pour déterminer son mode de fonctionnement. Cette analyse s'effectue selon deux axes principaux. Le premier axe consiste à évaluer la **disponibilité** du système, c'est à dire son aptitude à remplir sa mission. Le second axe consiste à évaluer sa **crédibilité** et par conséquent les risques liés à son utilisation. La figure 1.2 montre ces deux axes qui permettent l'évaluation de la sûreté de fonctionnement d'un système ainsi que les notions qu'ils sous-tendent, à savoir, la **fiabilité**, la **maintenabilité**, l'**intégrité** et la **sécurité** qui feront l'objet des paragraphes suivants [VILLEMEUR 88].



*Figure 1.2. La sûreté de fonctionnement.*

### 2.2.1 La disponibilité.

La disponibilité est l'aptitude d'un système à être en état d'accomplir une mission dans des conditions données, à un instant donné et, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée. Elle caractérise les risques de dysfonctionnement d'un système et sa capacité à y faire face. La disponibilité regroupe les notions de fiabilité et de maintenabilité.

- La **fiabilité** est l'aptitude d'un système à accomplir une fonction requise dans des conditions données et ce pendant une durée donnée [AFNOR 88]. Elle peut être caractérisée par le temps moyen de bon fonctionnement entre défaillances (M.T.B.F. : Mean Time Between Failures).
- La **maintenabilité** est l'aptitude d'un système à être maintenu ou rétabli dans un mode de fonctionnement normal, lui permettant de fournir un service, lorsque la maintenance est effectuée dans des conditions données et avec des moyens prescrits [AFNOR 84].

La disponibilité d'un équipement est une donnée économique très importante car elle conditionne directement le chiffre d'affaires qu'il pourra générer et son amortissement. Son amélioration peut être obtenue en agissant tant sur la conception (choix des composants, solutions technologiques) que sur l'exploitation (politique de maintenance, surveillance) du système.

### 2.2.2 La crédibilité.

La crédibilité précise le comportement en cas d'anomalies du système. Elle repose sur les notions d'intégrité et de sécurité.

- L'**intégrité** représente l'assurance du système à accomplir correctement la mission pour laquelle il a été conçu. Cette assurance implique bien entendu sa capacité à reconnaître le mode de fonctionnement dans lequel se trouve le système (normal ou anormal) et à signaler ce mode de fonctionnement.
- La **sécurité** est l'aptitude du système à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements catastrophiques ou critiques [AFNOR 88]. Elle représente donc l'assurance du système à résister à des entrées non autorisées ou incorrectes et à pouvoir les signaler.

## 3 LA SURVEILLANCE.

L'introduction de la sûreté de fonctionnement a permis de définir les attentes de l'exploitant d'un système. Cette partie développe les fonctions de la surveillance, les objectifs qui lui sont assignés et les moyens mis en œuvre pour les atteindre. Elle est introduite par la définition des défaillances qui précisent l'objet de la surveillance. En conclusion l'apport de la surveillance à la sûreté de fonctionnement est abordé.

### 3.1 Les défaillances.

Nous allons dans la suite utiliser le terme de défaillance. Il importera donc de donner une définition précise de celle-ci et de la distinguer d'autres notions avec lesquelles elle est souvent confondue [ISERMAN 96], [CASSAR 96a].

- Une **défaillance** est définie comme la cessation de l'aptitude d'un système à accomplir la mission pour laquelle il a été conçu. La défaillance est donc une modification suffisante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant pour que sa mission ne soit plus assurée dans les conditions prévues. Cette définition montre bien le lien entre la disponibilité du système et défaillances. En cas de défaillance l'intégrité du système n'est plus assurée.
- Un **défaut** est considéré comme tout écart entre la caractéristique d'une entité et sa caractéristique normale. Le défaut est en général une

imperfection liée à la conception ou à la mise en œuvre d'un dispositif. Un défaut peut rester caché un certain temps avant de provoquer une défaillance. Il ne met en jeu que l'intégrité du système.

- Une **panne** est l'inaptitude d'un système à accomplir la mission pour laquelle il a été conçu. La panne résulte toujours d'une défaillance et elle introduit en plus la notion d'arrêt accidentel du fonctionnement du système.

### **3.2 Classification des défaillances selon leur origine.**

Une classification en fonction du type du composant du système qui est à l'origine d'une défaillance a été proposée [VERGE 91], [SPROSSER 92]. Elle considère qu'un système possède trois types de composants ayant des fonctionnalités différentes : les capteurs (pour la mesure), les actionneurs (pour la mise en œuvre de la commande) et le système à proprement parler. Une défaillance peut provenir soit d'un capteur, soit d'un actionneur ou soit du système.

Une défaillance de capteur se traduit par le fait que la mesure fournie par ce capteur ne correspond pas à la réalité car elle est entachée d'une erreur. Une défaillance d'actionneur se traduit, quant à elle, par le fait que l'actionneur ne réagit pas correctement à la commande qui lui est imposée. Enfin les défaillances du système correspondent à une modification permanente et suffisante de ses caractéristiques physiques. Cela peut correspondre par exemple à une fuite dans une cuve, à l'encrassement d'une tuyauterie ou à une usure.

### **3.3 Le cahier des charges de surveillance.**

Le cahier des charges de surveillance doit préciser les composants et les défaillances associées qui doivent être détectées et/ou localisées. Le cahier des charges de surveillance peut aussi contenir les performances attendues en terme de détection du système de surveillance. Pour cela, on peut déterminer trois indices permettant de caractériser ces performances : la probabilité de fausse alarme (détection d'une anomalie en fonctionnement normal), la probabilité de non-détection (défaillance non détectée) et le délai de détection. Enfin il est possible de définir dans le cahier des charges de surveillance la capacité de localisation qui indique la possibilité de déterminer l'origine de la défaillance, c'est à dire d'identifier la cause de la panne parmi les causes prises en compte par le système de surveillance. Dans le cas idéal, il serait souhaitable de pouvoir localiser toutes les causes de défaillance.

### **3.4 Les fonctions de la surveillance.**

Après avoir précisé ce que sont les défaillances et les avoir classées en fonction de leur origine, nous allons évoquer les fonctions que doit remplir la surveillance. L'objectif de l'implantation d'un système de surveillance est l'amélioration à la fois de l'intégrité du procédé surveillé et de sa disponibilité. Ce système doit être capable de décider dans quel mode de fonctionnement se trouve le procédé, normal

ou défaillant (intégrité) et de fournir des informations les plus précises possibles sur celui-ci [CASSAR 96a].

Les décisions que doit prendre le système de surveillance s'articulent autour de deux axes qui définissent ses deux objectifs principaux : la **détection** et la **localisation** des défaillances.

La détection d'une défaillance consiste, pour le système de surveillance, à décider si le système présente une défaillance ou non. Cette prise de décision consiste en un choix entre deux hypothèses  $H_0$  et  $H_1$ . L'hypothèse  $H_0$  correspond au fonctionnement normal du système et l'hypothèse  $H_1$  à la présence d'une défaillance.

Lorsqu'une défaillance a été détectée, le système de surveillance doit identifier le composant ou le sous-système qui est à l'origine de celle-ci. La localisation d'une défaillance constitue donc un second niveau de décision pour la surveillance. Ainsi, lorsque les défaillances à détecter sont définies, elles sont associées à autant d'hypothèses  $H_{1i}$  et la fonction du système de surveillance consiste à décider entre ces hypothèses.

Les non-détections correspondent à des défaillances qui surviennent et qui ne sont pas détectées par le système de surveillance. Elles peuvent affecter directement la sécurité du système. Les fausses alarmes correspondent à des arrêts provoqués par des alarmes injustifiées. Elles diminuent non seulement la disponibilité du système mais aussi la crédibilité de la surveillance. Les procédures de décision doivent donc minimiser les taux de fausses alarmes et de non-détections et s'effectuer en un temps le plus faible possible.

Enfin lorsqu'une défaillance est détectée et localisée, le système de surveillance a pour troisième fonction de fournir des informations dans le but de la caractériser : il s'agit de l'**estimation** de la défaillance. Ces informations peuvent être relatives à l'instant d'apparition ou à la quantification de la défaillance. Enfin le **diagnostic** a pour but de déterminer la cause de la défaillance.

Pour résumer, on peut affirmer que le rôle principal de la surveillance est de participer au contrôle de l'intégrité du système. Pour cela elle s'appuie sur la cohérence entre les informations obtenues par l'observation du système et les connaissances disponibles sur celui-ci [CASSAR 96a].

### 3.4.1 L'observation.

La première étape de la surveillance consiste à observer un certain nombre de grandeurs physiques mises en jeu pour le système. Elles définissent l'ensemble des variables connues. L'observation a pour but de déterminer la valeur de grandeurs physiques en utilisant un moyen d'observation appelé mesure.

La fonction de mesure utilise un support physique appelé **capteur**, qui associe une valeur (la **mesure**) à la valeur de la variable physique (le **mesurande**). Il est à noter que l'on peut considérer que l'ajout d'un capteur ne modifie pas l'évolution de la grandeur physique à laquelle il est associé car il n'utilise qu'une énergie négligeable par rapport à l'énergie mise en œuvre dans le système. La nature de la

mesure est définie par l'ensemble des modalités auquel appartiennent les valeurs de la mesure. De cette façon, les mesures peuvent être de nature logique, quantitative ou qualitative.

L'observation que l'on fait d'un système influence de façon importante les possibilités de surveillance de ce système. En effet cette surveillance dépend du choix des grandeurs physiques mesurées (et par conséquent du placement de capteurs) ainsi que de la nature de ces mesures.

### 3.4.2 La redondance d'information.

C'est à partir de la vérification de la cohérence des informations issues de l'observation que l'on peut détecter les défaillances. Généralement, on dit qu'il y a redondance sur la valeur d'une grandeur physique lorsque plusieurs informations d'origines différentes sont disponibles sur cette grandeur. Une partie de ces informations provient de l'observation du système mais elles ne sont généralement pas suffisantes et doivent être complétées par des connaissances sur le système. Ces connaissances supplémentaires seront réparties dans trois classes différentes en fonction de la nature de la redondance qu'elles permettent d'établir : la redondance physique, la redondance basée sur une connaissance du système et la redondance basée sur une connaissance de l'historique du système [CASSAR 96a]. Seuls les deux premiers cas seront abordés ici, car le troisième est hors du champ de cette thèse.

La redondance d'information sur la valeur d'une grandeur physique est le principe de base permettant la surveillance d'un système. En effet, l'évaluation multiple des grandeurs physiques en utilisant des informations d'origines différentes permet de générer des indicateurs de défauts appelés **résidus**.

#### 3.4.2.1 La redondance physique.

La redondance physique est le moyen le plus simple d'obtenir plusieurs informations relatives à une grandeur physique. En effet, plusieurs capteurs mesurent une même grandeur physique et ainsi on dispose d'autant d'informations sur la valeur de cette grandeur qu'il y a de capteurs mesurant sa valeur [BRUNET 90]. Il suffit ensuite de vérifier la cohérence de l'ensemble des valeurs issues des différents capteurs pour surveiller leur bon fonctionnement. La figure 1.3 montre à l'aide d'un exemple le principe de la redondance physique.

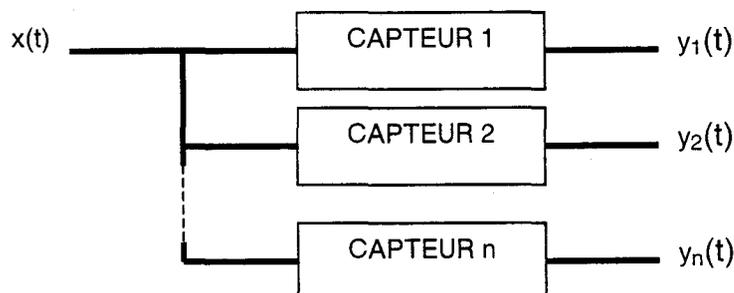


Figure 1.3. Principe de la redondance physique de capteurs.

Les valeurs  $y_1, y_2, \dots, y_n$  sont  $n$  estimations de la variable  $x(t)$  qui peuvent être mises en cohérence.

### 3.4.2.2 Redondance basée sur une connaissance comportementale du système.

Dans ce cas de figure, la connaissance sur le système correspond aux contraintes d'évolution des grandeurs physiques qui constituent le modèle du système à surveiller. Il s'avère que plusieurs types de modèles de connaissance peuvent être utilisés en surveillance :

- **Le modèle de surface** est utilisé lorsque l'on connaît la plage d'évolution d'une grandeur physique ou que l'on contraint, pour des raisons de sécurité, une grandeur physique à évoluer dans une plage d'évolution restreinte. Dans ces conditions le test de cohérence consiste simplement à vérifier si la mesure de cette grandeur physique appartient à l'intervalle correspondant à la plage définie pour cette grandeur physique [ZWINGELSTEIN 95]. Il est à noter que les capteurs et les actionneurs intelligents permettent de réaliser localement ce genre de tests de cohérence en mesurant des caractéristiques du processus qui ne sont pas initialement utiles pour le fonctionnement ou en utilisant un seuillage adapté sur les mesures et les commandes [STAROSWIECKI 94].
- **Le modèle analytique** d'un système est constitué des lois d'évolution des grandeurs physiques du système décrivant son comportement attendu en fonctionnement normal. Cet ensemble de lois d'évolution est noté  $f$  et contraint les valeurs du vecteur des entrées du système  $\underline{u}(t)$ , du vecteur des paramètres du système  $\underline{\theta}$  et des dérivées successives des variables physiques  $\underline{x}(t)$  et de  $u(t)$  pour prendre en compte la dynamique du système :

$$f(\underline{x}(t), \underline{x}^{(1)}(t), \underline{x}^{(2)}(t), \dots, \underline{u}(t), \underline{u}^{(1)}(t), \underline{u}^{(2)}(t), \dots, \underline{\theta}) = 0 \quad (1.1)$$

Les relations de mesure décrivent quant à elles les liens entre les variables physiques et leurs mesures :

$$\underline{h}(\underline{y}(t), \underline{x}(t), \underline{\theta}) = 0 \quad (1.2)$$

L'élimination des variables physiques du modèle analytique en utilisant les relations de mesures permet l'écriture d'un ensemble de relations ne faisant intervenir que des mesures et des entrées connues appelées relations de redondance analytique :

$$\underline{g}(\underline{y}(t), \underline{y}^{(1)}(t), \underline{y}^{(2)}(t), \dots, \underline{u}(t), \underline{u}^{(1)}(t), \underline{u}^{(2)}(t), \dots, \underline{\theta}) = 0 \quad (1.3)$$

La vérification des relations de redondance analytique établit alors la cohérence entre les observations et le modèle analytique.

Trois approches différentes permettent d'obtenir la relation 1.3. Elles constituent les trois grandes familles de la surveillance avec modèle [CASSAR 96a] :

1. **L'estimation d'état** [FRANK 93].
2. **L'estimation de paramètres** [ISERMAN 84].
3. **L'élimination directe des variables.**

Nous ne détaillerons pas les deux premières familles qui sont bien connues et ne seront pas abordées par la suite.

L'élimination directe des variables internes et inconnues de  $x$  s'effectue grâce à une **projection** dans le cas linéaire [STAROSWIECKI 91] ou à la **théorie de l'élimination** et aux bases de Groebner dans le cas de systèmes polynomiaux [GUERNEZ 96]. L'approche par élimination n'impose pas que de conditions liées soit à l'observabilité des variables inconnues soit l'estimation des paramètres. Ceci constitue l'un de ses avantages. Le chapitre II présentera une approche fondée sur la structure du modèle qui permet de guider l'élimination des variables tant dans le cas linéaire que non linéaire.

### 3.4.3 Les résidus.

Dans les méthodes fondées sur un modèle de fonctionnement normal, les résidus expriment la comparaison entre le mode de fonctionnement réel d'un système et son mode de fonctionnement normal. Les résidus sont des indicateurs de cohérence d'un ensemble d'informations qui permettent non seulement la **détection** et la **localisation** des défaillances mais aussi leur **estimation** et leur **diagnostic** dans le but de déterminer leur amplitude et leur origine. Les méthodes de surveillance présentées dans la partie précédente permettent de générer un ensemble de résidus [CASSAR 96a].

Les résidus sont obtenus directement à partir d'une relation du type 1.3 et ils s'écrivent :

$$\underline{r}(t) = \underline{g} ( \underline{y}(t), \underline{y}^{(1)}(t), \underline{y}^{(2)}(t), \dots, \underline{u}(t), \underline{u}^{(1)}(t), \underline{u}^{(2)}(t), \dots, \underline{\theta} ) \quad (1.4)$$

En l'absence d'incertitudes sur le modèle, les résidus sont égaux à zéro en fonctionnement normal car toutes les relations de  $\underline{g}$  sont vérifiées et non nuls lorsqu'une défaillance apparaît. Les valeurs des résidus obtenus constituent les données d'entrée des procédures de décision.

### 3.4.4 La décision.

Quelle que soit la nature des variables utilisées dans les tests de décision, leur élaboration se décompose en trois phases qui vont dépendre de la nature de la modélisation des incertitudes (déterministe, floue, probabiliste...).

- **La modélisation des incertitudes** a pour objectif de tenir compte de l'incertitude qui entache l'estimation de la valeur d'une variable ou d'un paramètre.
- La seconde phase de la décision est la **définition d'un indicateur de cohérence**, déjà introduit sous la notion de résidu. Une fonction des résidus peut également être utilisée si elle s'annule lorsque les résidus sont nuls et qu'elle prend une valeur différente de zéro dans les autres cas. La valeur de cet indicateur sera entachée d'erreurs dues aux incertitudes sur les informations permettant de le générer (mesure et modèle). Cette incertitude doit être prise en compte dans la procédure de décision. Lorsque la décision est binaire ( $H_0/H_1$ ), cela conduit à un seuillage.
- **L'élaboration d'un seuillage sur l'indicateur** pour prendre une décision finale est la dernière phase de l'élaboration d'un test de décision. L'objectif est de fixer un seuil au-dessous duquel on considère qu'il y a cohérence et au-dessus duquel il n'y a plus cohérence entre les différentes informations. Plusieurs fonctions de seuillage peuvent être utilisées. La plus simple demeure la fonction de seuillage de Heavyside de seuil  $S$ . Il est à noter que l'un des intérêts de l'approche probabiliste est de pouvoir lier ce seuil avec un niveau de risque à prendre dans la décision, en fixant par exemple une probabilité de fausse alarme maximale.

Pour la détection des défaillances, le test de décision consiste à vérifier la cohérence ou la crédibilité de l'hypothèse de fonctionnement normal  $H_0$ , en tenant compte du modèle des incertitudes et de l'absence d'information sur la ou les défaillances présentes. Dans ce cas de figure, la fonction de détection s'appuie sur un seuil  $S$ , appliqué sur un indicateur de cohérence, calculé à partir des résidus.

Lorsque l'on souhaite en plus localiser les défaillances, le test de décision doit vérifier la cohérence où la crédibilité non plus du seul mode de fonctionnement normal, mais aussi de tous les modes de fonctionnement correspondants aux différentes défaillances possibles qui constituent autant d'hypothèses de défaillance  $H_{1j}$ . Pour y parvenir il est nécessaire d'ajouter des connaissances relatives aux défaillances et la procédure de localisation a pour objectif de vérifier la cohérence entre ces informations.

C'est la modélisation des défaillances qui permet d'apporter des connaissances supplémentaires à leur sujet. Elles reposent toujours sur l'hypothèse selon laquelle la présence d'une défaillance modifie le modèle de fonctionnement normal du système. La modélisation des défaillances dépend de la nature de la modélisation du système à proprement parler. Ainsi dans le cas d'un système décrit par un modèle d'influence, les connaissances sur les défaillances doivent préciser la façon dont elles agissent sur le système.

Si le système repose sur un modèle comportemental, les connaissances sur les défaillances doivent préciser leurs caractéristiques temporelles ou harmoniques. On peut utiliser alors un modèle déterministe. Les défaillances sont représentées par un polynôme en  $(t-\tau)$  où  $\tau$  est l'instant d'apparition de la défaillance, dont le degré définit la nature de la défaillance : biais, dérive, ... Le modèle de rupture

utilisé dans les approches statistiques est un cas particulier de cette définition [BASSEVILLE 87].

La procédure de localisation qui doit permettre le choix entre plusieurs hypothèses  $H_{1j}$  se décompose en deux phases :

1. la construction d'un discriminateur entre deux hypothèses  $H_{1j}$  et  $H_{1i}$ ,
2. le choix de l'hypothèse la plus crédible,

En matière de localisation et de diagnostic de défaillances une hypothèse forte que l'on applique aux défaillances est leur unicité. Ainsi les tests logiques font souvent cette hypothèse alors que les approches statistiques permettent de traiter des hypothèses de défaillances multiples. Dans le cas où les amplitudes des défaillances seraient inconnues, le nombre de défaillances simultanées est limité par le fait que les amplitudes des défaillances doivent être estimables.

### 3.5 Conclusion.

Les différents principes mis en jeu dans la surveillance ainsi que les différentes fonctions qu'elle doit accomplir peuvent être résumés grâce au schéma de la figure 1.4.

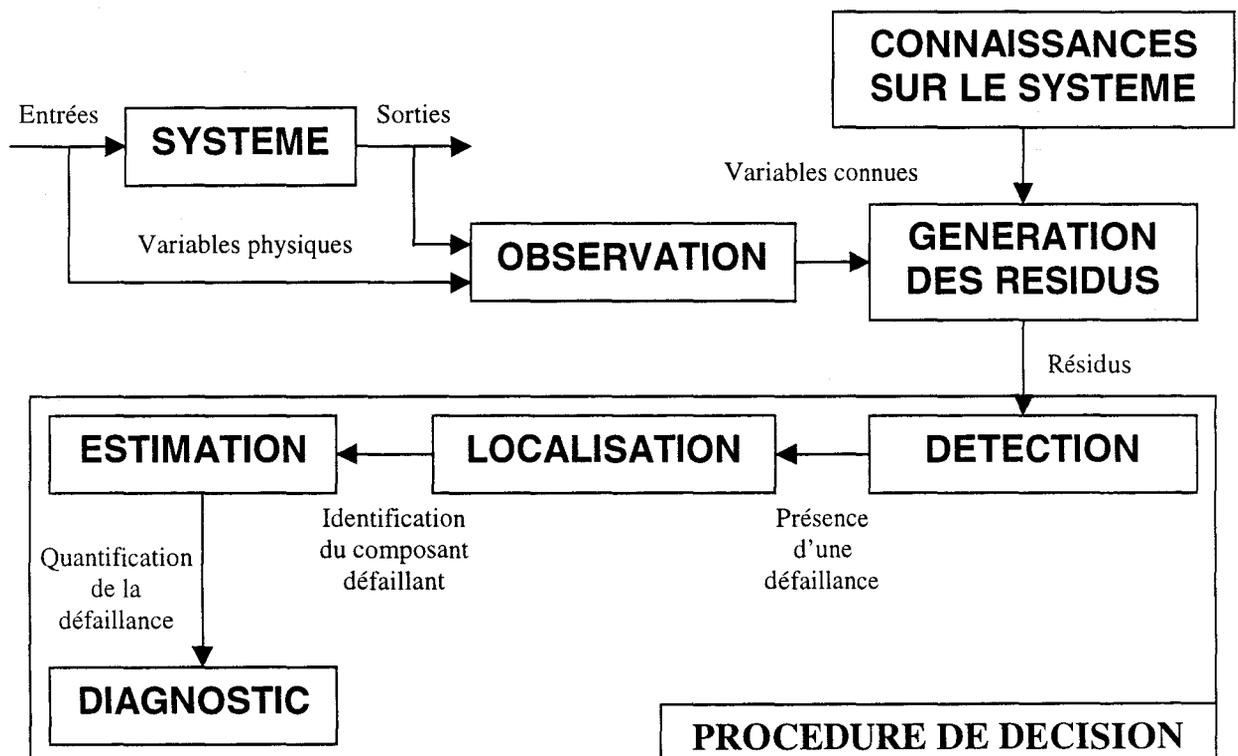
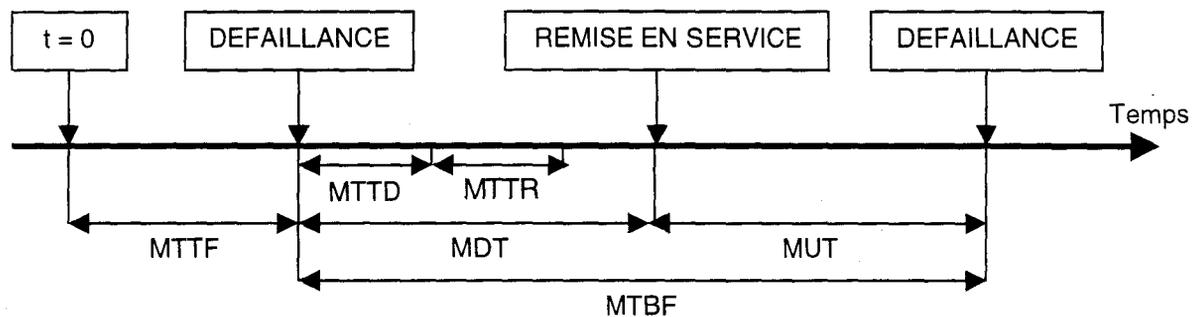


Figure 1.4. Schéma de principe de la surveillance.

La présentation des fonctions de la surveillance a permis de mettre en évidence son apport à la sûreté de fonctionnement. En effet, elle participe directement

au maintien de l'assurance de l'intégrité du système par sa tâche de détection et de localisation des défaillances [CASSAR 96a]. De plus en fournissant des informations sur les composants défaillants, elle permet une action plus efficace de la maintenance et contribue ainsi à la diminution des MTTD, MDT et MTBF (figure 1.5). Enfin, la surveillance peut aider à la reconfiguration du système. Dans le cas d'un défaut d'instrumentation, l'estimation de la valeur de la variable physique, qui n'est plus mesurée correctement, pourra venir se substituer à la mesure et permettre de poursuivre la conduite du système. Dans le cas d'une défaillance du procédé, la reconfiguration assure le passage d'un mode de fonctionnement à un autre dans le but de continuer à assurer la mission, même sous forme partielle. Dans ce cas de figure la surveillance participe directement à la sécurité du système [ZWINGELSTEIN 95].



<b>MTTF</b>	(Mean Time To Failure)	Durée moyenne de fonctionnement d'un système qui aurait été complètement réparé avant sa remise en service.
<b>MTTR</b>	(Mean Time To Repair)	Durée moyenne de réparation.
<b>MTTD</b>	(Mean Time To Detect)	Durée moyenne pour la détection de la défaillance.
<b>MUT</b>	(Mean Up Time)	Durée moyenne de fonctionnement d'un système remis en service après réparation mais dont tous les composants défaillants n'ont pas nécessairement été réparés.
<b>MDT</b>	(Mean Down Time)	Durée moyenne d'indisponibilité. Cette durée correspond aux phases de détection de la défaillance, de réparation de la panne et de remise en service du système.
<b>MTBF</b>	(Mean Time Between Failure)	Durée moyenne de fonctionnement entre deux défaillances consécutives d'un système réparé.

Figure 1.5. Définition des MTTF, MTTR, MTTD, MDT, MUT, MTBF.

Après avoir évoqué les principes et les différentes techniques utilisées en surveillance, nous allons nous pencher sur le problème de l'instrumentation du système et de son influence sur la surveillance. Cette interrogation provient du constat suivant : la majorité des travaux dans le domaine de la surveillance utilisent un système possédant une instrumentation définie et ils cherchent à déterminer quels sont les composants du système pouvant être surveillés.

Il s'avère que la préoccupation des industriels est différente : ils connaissent par expérience les composants du système qu'il faut surveiller et ils souhaitent élaborer un système de surveillance permettant de répondre à ce cahier des charges. Pour y parvenir il est généralement nécessaire de modifier l'instrumentation existante soit en ajoutant des capteurs si elle n'est pas suffisante, soit en déplaçant certains capteurs. La dernière partie de ce chapitre va donc être plus particulièrement consacrée au problème du positionnement de capteurs en vue de la surveillance.

## 4 LE POSITIONNEMENT DE CAPTEURS.

Le sous-chapitre précédent nous a permis de montrer que la surveillance s'appuie sur les trois principes de base : l'observation, la redondance et la décision en vue de la détection, de la localisation et du diagnostic des défaillances. La description des différentes méthodes proposées pour appliquer ces principes de base montre qu'elles dépendent fortement de la connaissance de certaines variables physiques du système. La connaissance de la valeur de ces variables provient soit de leur mesure directe, soit du fait que ce sont des commandes.

Dans la pratique le positionnement de capteurs est souvent réalisé dans une optique de contrôle et de commande et non pas de surveillance. Ainsi les travaux dans le domaine de la surveillance, se contentent souvent d'analyser le système à surveiller afin de déterminer les composants dont il est possible de détecter ou de localiser les défaillances puisque toutes ces approches nécessitent de figer l'ensemble de mesure  $y = h(x, \theta)$ .

La démarche inverse consistant à imposer un cahier des charges de surveillance et à étudier le positionnement de capteurs permettant de le respecter est moins fréquente. Cette démarche est l'objet de ce mémoire qui s'appuie sur le fait que la conception d'un système de surveillance dépend non seulement du nombre de capteurs [**GERTLER 88**] mais aussi du choix des mesures. Plusieurs travaux couvrant des domaines d'application variés ont déjà été menés dans ce sens et notamment ceux relatant un lien entre le positionnement de capteurs et la surveillance des processus chimiques [**VACLAVEK 76**]. D'autres domaines d'applications tels que le spatial [**VANDER VERLDE 84**], les vibrations mécaniques [**BASSEVILLE 87**] ou la production pétrolière [**TURBATTE 92**] ont été aussi abordés.

Le problème du positionnement de capteurs en vue de la surveillance est généralement formulé par la recherche d'une matrice de sélection de mesures  $H$ . Ainsi en présence de système linéaire la relation  $y=h(x,\theta)$  se réécrit :

$$y = H.x \tag{1.5}$$

Par exemple  $H$  pourra correspondre à une matrice binaire dont la dimension correspond au nombre de variables du système et  $H_i = 1$  si la mesure de la variable  $x_i$  est retenue et  $H_i = 0$  dans le cas contraire.

De nombreux travaux relatifs au positionnement de capteurs sont réalisés directement dans une optique de commande mais ils peuvent être adaptés en vue de la surveillance. En effet ces travaux coïncident avec les différents principes de la surveillance et peuvent être classés selon les thèmes suivants : l'observabilité et l'estimation de grandeurs, la décision pour la détection et la localisation des défaillances.

#### 4.1 Placement de capteurs pour l'observabilité et l'estimation.

Généralement on appelle une variable observable, une variable dont la valeur peut être estimée de plusieurs manières différentes, soit par mesure directe, soit par déduction à partir des valeurs d'autres mesures. Une variable est observable de façon redondante si la suppression de son capteur ne nuit pas à son observation [KRETISOVALIS 88]. On parlera par simplification de variable redondante. La combinaison des notions de mesure, d'estimation et de redondance permet de construire le schéma de la figure 1.6 (dérivé de [DAROUACH 86]) qui résume les différents cas possibles.

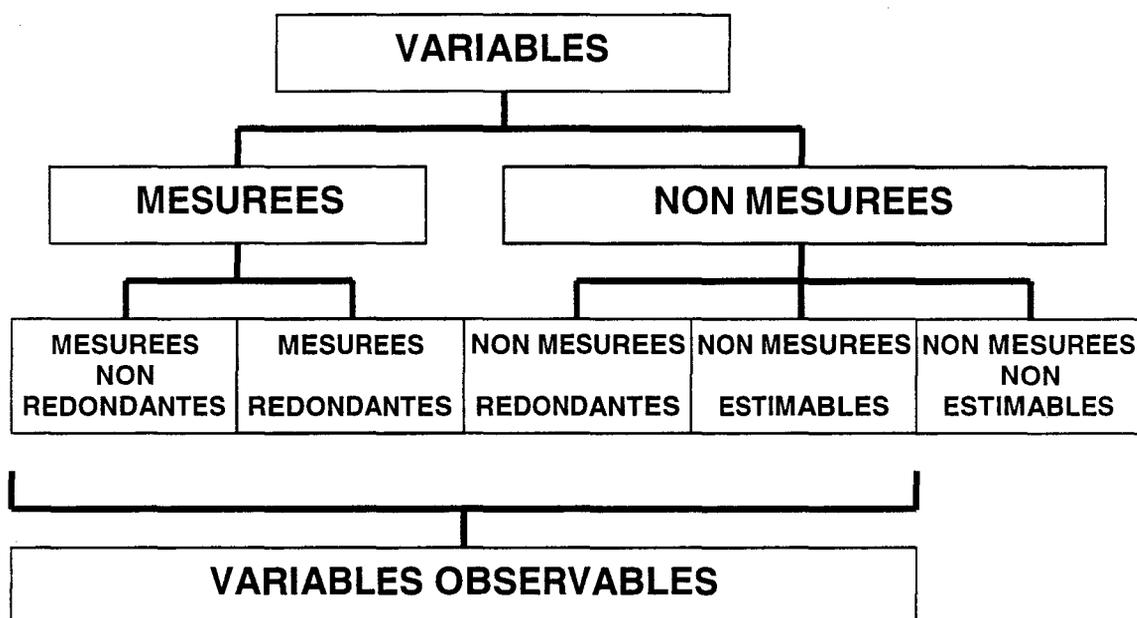


Figure 1.6. Classification des variables.

De nombreux travaux relatifs à l'étude de l'observabilité et à la décomposition des systèmes en parties observables, redondantes et non observables ont été entrepris en utilisant des outils variés tels que la théorie des graphes [MAH 76], les matrices d'incidences [MAQUIN 87], les matrices de projection [CROWE 83] ou l'analyse structurelle [DECLERCK 91a].

Pour quantifier la redondance d'une variable, deux notions peuvent être utilisées : le degré de redondance [LUONG 97] et le degré de calculabilité [IMMONEN 94]. Une variable redondante de degré  $k$  est une variable observable dont la valeur

reste déductible en cas de suppression simultanée de  $k$  capteurs quelconques parmi l'ensemble des capteurs. Le degré de calculabilité d'une variable, noté  $\alpha$ , correspond quant à lui au nombre minimal de capteurs à supprimer pour rendre une variable inobservable. Il est à noter que ces deux notions sont très proches puisqu'elles sont liées par la relation :

$$\alpha - 1 = k \quad (1.6)$$

Ces notions d'observabilité et de redondance sont importantes en surveillance car elles conditionnent la génération des résidus et les capacités de détection et de localisation des défaillances.

#### 4.1.1 Placement de capteurs et observabilité.

La majorité des travaux traitant du problème du positionnement de capteurs en vue de la surveillance font référence à la notion d'observabilité ou de redondance des variables du système. Ainsi l'observabilité ou le degré de redondance apparaissent comme une contrainte ou un critère de placement de capteurs. Il est à noter que ces travaux ont surtout été développés dans le cadre des systèmes à transport de matière ou d'énergie, car ils ont la propriété d'être multilinéaires et statiques.

Ces travaux utilisant l'observabilité comme contrainte de placement de capteurs visent à déterminer la liste des variables du système qu'il faut mesurer pour respecter un cahier des charges indiquant la liste des variables devant être observables. La théorie des graphes a été l'un des premiers outils utilisés pour résoudre ce problème [KRETISOVALIS 88]. D'autres études s'appuient sur une approche matricielle [MAQUIN 89] [RAGOT 91], sur l'analyse de la matrice d'incidence associée au graphe du système [MADRON 92], sur une modélisation par Bond-Graph permettant de définir la nature et la position des capteurs [VERGE 94], sur la rupture des cycles élémentaires du graphe [MEYER 93] ou sur l'analyse du graphe orienté représentant le processus dans le cadre du CASL (Computer Aided Sensor Location) pour optimiser le placement de débitmètres dans les systèmes à transport de matière [MEYER 94a] [MEYER 94b].

Une première technique s'appuie sur une décomposition de la structure du système en cycles fondamentaux et sur la règle selon laquelle une variable est redondante de degré  $k$  si elle n'intervient que dans des cycles où au moins  $k + 1$  variables sont mesurées. Ainsi la solution du placement de capteurs consiste à mesurer un nombre de variables fixé pour chaque cycle contenant les variables de ce cycle. On impose un degré de redondance. De cette façon, pour un cycle donné, si le degré de redondance maximal des variables intervenant dans ce cycle est  $k_{\max}$ , il faut mesurer  $k_{\max} + 1$  variables dans ce cycle. Ceci permet de formuler le problème de placement de capteurs par la contrainte [LUONG 94] (avec  $A$  la matrice des cycles,  $B$  est le vecteur indiquant le nombre de variables à mesurer par cycle,  $U$  est le vecteur de position des mesures) :

$$A \cdot U \geq B$$

Dans le même esprit, un algorithme de positionnement de capteurs imposant un degré de calculabilité à chaque variable d'un système linéaire statique a été élaboré grâce à une formulation du problème en termes de programmation linéaire ou non linéaire en nombres entiers [IMMONEN 94]. Le principe repose sur la détermination de l'impact de l'ajout d'un nouveau capteur, sur le degré de calculabilité des variables du système et permet de déterminer ainsi le positionnement de capteurs adéquats.

#### 4.1.2 Placement de capteurs et estimation.

L'estimation est une notion importante en surveillance qui peut intervenir à plusieurs niveaux. En effet le principe de base des systèmes de surveillance repose sur une comparaison entre différentes estimations de la grandeur. Ces grandeurs peuvent être de natures différentes suivant la technique utilisée (Cf. Chapitre I-3.2.2). Elles peuvent correspondre à des variables du système, à ses paramètres ou à son état. Des travaux relatifs au placement de capteurs se sont intéressés à ces différentes estimations, en étudiant la capacité d'estimation des grandeurs et l'incertitude sur les valeurs estimées. Indirectement l'amélioration des estimations des grandeurs contribue à l'augmentation des performances du système de surveillance, notamment au niveau de sa sensibilité aux défaillances.

- Des travaux ont permis de montrer l'influence de la précision des capteurs sur l'estimation des variables d'un système [RAGOT 90]. L'erreur d'estimation a donc naturellement constitué un critère de placement de capteurs. Une première méthode de placement de capteurs s'appuyant sur l'utilisation d'arbres et visant à minimiser l'erreur d'estimation a été mise au point [KRETISOVALIS 87]. On peut aussi citer une méthodologie de placement de capteurs sous contrainte de variance de l'estimation [MAQUIN 94]. Enfin une méthode permettant de définir la précision des capteurs dans le but de fixer la matrice de variance des mesures a été mise au point pour les systèmes linéaires à transport d'énergie ou de matière [ABDOLLAHZADEH 96].
- Des études ont été menées dans le but de déterminer un placement de capteurs permettant d'améliorer l'estimation ou la reconstruction de l'état d'un système. Le problème consiste à trouver une matrice de sélection de capteurs  $H$  qui permet l'optimisation d'un critère reflétant les performances de l'estimateur ou du reconstruteur d'état pour un système linéaire dynamique donné. Des critères très variés ont été proposés. Un premier critère utilisé, est l'analyse de la sensibilité de la matrice de covariance de l'estimation  $P$  en fonction de la position des capteurs. Grâce à la programmation non linéaire on cherche à minimiser la trace du produit pondéré de la matrice de covariance de l'estimation [ARBEL 82] ( $W$  représente la matrice de pondération) :

$$\min_H \text{tr}(WP)$$

D'autres travaux font appel à des mesures indirectes de la performance en utilisant une matrice  $\Gamma$ . Suivant les études menées, cette matrice

correspond à la matrice d'observabilité (pour le placement de capteurs) ou de contrôlabilité (pour le placement des actionneurs) dans le cas des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires [MULLER 72], à la matrice d'information de Fisher des paramètres inconnus à estimer [KOSUT 82] ou à la matrice représentant l'entropie des paramètres à estimer [PHUA 77]. De plus, différents indices de performance portant sur  $\Gamma$  ont été étudiés. La forme générale de ces indices est :

$$m_s = \left( \frac{1}{n} \text{tr} (\Gamma^s) \right) \text{ où } s \leq 0 \text{ et } n \text{ est la dimension du vecteur d'état} \quad (1.8)$$

Cette forme générale peut se réduire à la norme du déterminant quand  $s$  tend vers 0, ou à la norme de la trace quand  $s = 1$ , ou enfin aux valeurs propres extrêmes quand  $s$  tend vers  $+\infty$ . Enfin la fiabilité de l'estimation en cas de pannes de capteurs à été aussi utilisée comme critère de positionnement de capteurs [ARIATTI 75].

- Nous avons vu au chapitre I-2.2 qu'il existait une méthode de surveillance qui s'appuyait sur l'identification des paramètres du système. Des travaux ont été réalisés dans le but de rechercher le placement de capteurs donnant la meilleure estimation des paramètres du modèle. Ces travaux reposent sur une recherche exhaustive de la matrice de sélection de capteurs  $H$  (ayant des coefficients égaux à 0 ou 1) en optimisant la norme de la trace de la matrice d'information de Fisher [UDWADIA 94]. Il est à noter que ces travaux sont plutôt réalisés dans un but de contrôle que de surveillance.

## 4.2 Placement de capteurs et surveillance.

Les études menées dans le domaine du positionnement de capteurs pour la détection et la localisation des défaillances concernent essentiellement les méthodes de surveillance utilisant une modélisation analytique du système : l'estimation de l'état par observateur et la redondance analytique. Certains se sont aussi posé le problème de l'élaboration d'une méthode de positionnement de capteurs dans le but d'améliorer les tests de détection de défaillance utilisant un modèle de rupture (approche statistique).

### 4.2.1 Estimation de l'état par observateur.

Une méthode de placement de capteurs a été proposée pour détecter, localiser et diagnostiquer les défaillances des systèmes non linéaires en utilisant un observateur linéaire pour estimer l'état du système. Le principe repose sur l'examen des grandeurs estimées et/ou de plusieurs résidus de l'observateur sans utiliser de tests statistiques. Le positionnement de capteurs est obtenu en minimisant le coût d'observation associé à chaque liste de capteurs utilisés pour détecter les défaillances par une recherche exhaustive [WATANABE 85].

### 4.2.2 La détection.

Dans le domaine du placement de capteurs pour la surveillance, deux approches particulières peuvent être citées. La première s'appuie sur la détection des changements dans le comportement d'un système dynamique. Ces changements peuvent, par exemple, être dus à la présence d'une défaillance et permettent donc de la détecter voire de la localiser. L'idée de base s'appuie sur la recherche de la meilleure matrice de sélection de capteurs  $H$  permettant de maximiser les performances du test de détection et de localisation lorsque l'on utilise une approche statistique ou probabiliste. Le critère de performance utilisé est le taux de fausses alarmes que l'on cherche à minimiser [BASSEVILLE 87].

La seconde approche a été appliquée dans le cas des systèmes chimiques. Elles reposent sur l'étude des propagations de variations plus ou moins importantes des grandeurs physiques dans un graphe orienté et signé indiquant les relations de cause à effet des variations d'une variable sur les variations des autres variables. Ainsi, en calculant les variations des différentes variables en temps réel et en établissant les relations de cause à effet vérifiées et non-vérifiées, il est possible de détecter et de localiser les défaillances du système. Un algorithme de placement de capteurs a donc été élaboré grâce à l'analyse de ce graphe et en s'appuyant sur une liste de capteurs existants et sur une liste de capteurs pouvant être ajoutés [TATENO 94].

### 4.2.3 Déteçtabilité et localisabilité.

Les capacités de détection et de localisation des défaillances ont aussi été prises en compte dans certaines études pour déterminer un placement de capteurs en vue de la surveillance. Les premiers travaux ont montré que les fonctions de déteçtabilité et de localisabilité des défaillances de capteurs sont liées à la structure du système et par conséquent à leurs positions [GERTLER 89]. Il apparaît que la condition pour qu'un capteur défaillant soit déteçtable est qu'il intervienne dans au moins une relation de redondance [HAMAD 86]. De plus on considère qu'un capteur défaillant délivrant la mesure  $x_i$  est localisable si et seulement si quelle que soit une autre mesure  $x_j$  différente de  $x_i$ , il existe au moins une relation de redondance faisant intervenir  $x_i$  et pas  $x_j$  [EVANS 70].

Par la suite, ces notions de déteçtabilité et de localisabilité ont été exprimées en termes de degré de redondance ou de degré de calculabilité des variables. Ceci a permis de réutiliser les méthodologies de placement de capteurs sous contrainte de degré de redondance [LUONG 94] ou de calculabilité [IMMONEN 94] et de les formuler en terme de capacité de détection et de localisation des défaillances des capteurs. Pour cela, on exprime les conditions nécessaires et suffisantes de déteçtabilité et de localisabilité des défaillances d'un capteur, en fonction du degré de redondance de la variable qui lui est associée. La variable associée à un capteur doit être redondante de degré 1 pour la déteçtabilité, et de degré 2 pour la localisabilité.

Une dernière approche, utilisant l'analyse structurelle du système, a permis d'élaborer un algorithme de positionnement de capteurs ayant pour objectif de générer des résidus permettant de détecter ou de localiser les défaillances de composants du

système définis dans un cahier des charges [CARPENTIER 96a]. L'intérêt de cette approche est qu'elle peut s'appliquer à tous types de systèmes (linéaire ou non linéaire, statique, dynamique,...) et que les notions de détectabilité et de localisabilité des défaillances ne se limitent pas aux capteurs mais ont été étendues à tous les types de composants du système (capteurs, actionneurs, système) et des défaillances quelconques. Cette approche fera l'objet des troisième et quatrième chapitres de ce mémoire.

### 4.3 Critères d'optimisation du placement de capteurs.

Les conditions de surveillance n'imposent généralement pas suffisamment de contraintes pour aboutir à une solution unique au problème de placement de capteurs. Les degrés de liberté restant dans la conception de l'instrumentation permettent la prise en compte de critères supplémentaires permettant d'optimiser la configuration de capteurs solution des algorithmes, ou d'effectuer un choix parmi les différentes solutions obtenues. Les critères ainsi introduits couvrent des domaines très variés tel que le coût, la fiabilité, la disponibilité de l'instrumentation et du système, ou visent à optimiser l'évaluation du système de surveillance en terme de sensibilité structurelle du système de surveillance aux défaillances.

#### 4.3.1 Le coût.

Le coût est le critère de placement de capteurs complémentaires qui vient naturellement à l'esprit. En effet la surveillance d'un système impose généralement que l'on ajoute des capteurs par rapport à l'instrumentation nécessaire à la commande, ce qui engendre un surcoût dû à l'acquisition des capteurs, à leur maintenance ou à leur exploitation. Sur des systèmes linéaires ou bilinéaires à transport de matière ou d'énergie, ce critère a été introduit en le formulant sous forme d'une contrainte. Le problème de placement de capteurs consiste à définir alors le nombre et la position des capteurs, de façon à assurer un degré de redondance donné aux variables nécessaires à la conduite et à la sécurité (Cf. chapitre I-3.1.2) et un coût ne dépassant pas une valeur fixée  $C_{max}$ . Ce problème de placement de capteurs peut alors être formulé par les contraintes suivantes ( $T_c$ : vecteur représentant les coûts des capteurs associés aux variables mesurées) [MAQUIN 95] :

$$A.U \geq B \text{ et } T_c.U \leq C_{max} \quad (1.9)$$

L'autre façon de tenir compte du coût est d'affecter un poids à chaque capteur mesurant une variable du système et de calculer le coût total de la configuration de capteurs en faisant la somme des coûts de chaque capteur. L'objectif est bien entendu de retenir la configuration de capteurs la moins chère lorsque plusieurs solutions de placement de capteurs sont obtenues en utilisant les différents algorithmes. Pour cela on peut utiliser une programmation linéaire ou non linéaire en nombres entiers [IMMONEN 94], [BAGAJEWICZ 95] ou une procédure de décision multicritères [CARPENTIER 96b].

Enfin dans le domaine du placement de capteurs en vue de l'amélioration de l'estimation, on peut citer des travaux présentant une méthode de placement de

capteurs minimisant l'erreur d'estimation et le coût de l'instrumentation. Cette approche permet d'obtenir une solution optimale de placement de capteurs grâce à une formulation du problème en terme de programmation non linéaire [PHUA 77].

### 4.3.2 La fiabilité et la disponibilité.

La surveillance, faisant partie intégrante de la sûreté de fonctionnement, a un rôle important à jouer en termes de fiabilité et de disponibilité du système et en particulier de fiabilité et de disponibilité de son instrumentation. C'est pourquoi certains ont eu l'idée d'optimiser le placement de capteurs en vue de la surveillance des systèmes, en introduisant comme critère complémentaire la fiabilité [TURBATTE 91] ou la disponibilité [LUONG 97] de l'instrumentation que l'on cherche à maximiser.

Un premier travail a permis d'établir une méthode de maximisation de la fiabilité locale en analysant la fiabilité de chaque variable d'un système linéaire [ALI 93]. D'autres travaux utilisent le critère de la fiabilité de l'instrumentation dans le but d'optimiser le placement de capteurs sous contrainte d'observabilité de variables d'un système à transport de matière ou d'énergie [TURBATTE 92]. Ces travaux visent à résoudre les deux problèmes suivants :

1. Le positionnement de capteurs à fiabilité imposée : on définit le nombre et la position des capteurs pour obtenir une fiabilité désirée de l'instrumentation.
2. Le positionnement de capteurs à coût imposé : on définit la position d'un nombre de capteurs imposés dans le but de maximiser la fiabilité du système d'instrumentation.

Deux approches ont été proposées pour résoudre ces problèmes. La première est une méthode combinatoire consistant à évaluer la fiabilité de toutes les configurations possibles et de retenir celle présentant la meilleure fiabilité et respectant la contrainte sur le nombre de capteurs. La seconde s'appuie sur l'évaluation de la fiabilité de chaque cycle de la matrice de tous les cycles du sous-graphe redondant du système. Ainsi en fixant la fiabilité du cycle le moins fiable on peut en déduire le nombre de capteurs minimum à placer par cycle.

Une autre façon d'aborder le problème de l'optimisation du placement de capteurs, en utilisant la contrainte de fiabilité de l'instrumentation d'un système linéaire ou bilinéaire à transport de matière ou d'énergie, est d'exprimer cette fiabilité en fonction du degré de redondance des variables en partant du principe que plus les variables nécessaires à la conduite ou à la sécurité ont un degré de redondance élevé, plus la fiabilité de l'instrumentation est importante [LUONG 95]. Cette relation entre la fiabilité et le degré de redondance est obtenue en affirmant que la fiabilité  $R(t)$  du système d'instrumentation est toujours supérieure ou égale à une fiabilité minimale  $R_{\min}(t)$ , avec :

$$R_{\min}(t) = \sum_{n=0}^{k_{\min}} C_m^n e^{-(m-n)\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^n \quad (1.10)$$

$$MTTF_{\min} = \frac{1}{\lambda} \sum_{n=0}^{k_{\min}} C_m^n \sum_{i=0}^n \frac{C_n^i (-1)^i}{(i+m+n)} \quad (1.11)$$

avec :

- $k_{\min}$  : degrés de redondance minimum des variables nécessaires à la conduite ou à la sécurité.
- $m$  : nombre de capteurs.
- $n$  : nombre de capteurs défaillants.
- $\lambda$  : taux de défaillance de chaque capteur.

Cette approche permet de poser le problème du placement de capteurs et de la fiabilité en termes de contraintes de redondance sur les variables. L'algorithme proposé consiste alors à déterminer le nombre et l'emplacement des capteurs pour assurer un degré de redondance donné pour les variables nécessaires à la conduite et à la sécurité et une fiabilité au moins égale à un seuil  $F$  fixé. La formulation de ce problème en termes de contraintes devient :

$$A.U \geq B \text{ et } F \leq \sum_{n=0}^{k_{\min}} C_m^n \sum_{i=0}^n \frac{C_n^i (-1)^i}{\lambda(i+m-n)} \quad (1.12)$$

Dans une optique similaire à la précédente, la disponibilité du système d'instrumentation est aussi un critère pouvant être pris en compte dans le but d'optimiser un placement de capteurs. Des travaux visant à définir le placement de capteurs dans le but d'assurer une disponibilité  $A_f$  du système d'instrumentation à un instant donné ont été entrepris dans le cadre des systèmes linéaires à bilan de matière ou d'énergie. Pour cela on considère que le taux de défaillance  $\lambda$  et le taux de réparation  $\mu$  des capteurs sont connus. Sachant que  $\alpha_n$  représente le nombre de défaillances admissibles de  $n$  capteurs et  $m$  le nombre de capteurs, on peut établir que la disponibilité du système d'instrumentation est : [LUONG 97]

$$A(t) = \sum_{n=0}^m \alpha_n \left( \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right)^{m-n} \left( 1 - \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right)^n \quad (1.13)$$

De cette façon, il est possible une nouvelle fois de poser le problème de placement de capteurs en termes de contraintes de redondance. La méthode de placement de capteurs consiste à déterminer le nombre et la position des capteurs de manière à assurer un degré de redondance aux variables nécessaires à la conduite et à la sécurité et une disponibilité supérieure à un seuil  $A_f$  fixé. La formulation de ce problème en termes de contraintes devient alors :

$$A.U = B \text{ et } A_f \leq \sum_{n=0}^m \alpha_n \left( \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right)^{m-n} \left( 1 - \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right)^n \quad (1.14)$$

### 4.3.3 La sensibilité du système de surveillance.

Les notions de sensibilité et de robustesse ont dans un premier temps été définies par rapport aux résidus. En effet, nous avons pu voir précédemment que dans

le cas idéal un résidu a la propriété d'être nul en l'absence de défaillance et non nul dans le cas contraire. Ceci peut se traduire par les deux relations suivantes ( $d(t)$  matérialise la défaillance et  $r(t)$  le résidu) :

$$d(t) = 0 \Rightarrow r(t) = 0 \text{ cette relation exprime la robustesse du résidu} \quad (1.15)$$

$$d(t) \neq 0 \Rightarrow r(t) \neq 0 \text{ cette relation exprime la sensibilité du résidu} \quad (1.16)$$

La relation (1.15) exprime la propriété de robustesse à savoir que le résidu doit être indépendant de l'état du système et d'éventuelles perturbations pour que le résidu ne puisse pas varier en l'absence de défaut. La relation (1.16) exprime quant à elle la propriété de sensibilité correspondant à la capacité du résidu à détecter le défaut : le résidu s'éloigne de zéro dès qu'un défaut apparaît.

Ces notions de sensibilité ou de robustesse peuvent être appliquées au système de surveillance d'une façon plus générale car celui-ci utilise des résidus. Il est à noter que dans le cas de système de surveillance, la sensibilité peut dépendre de facteurs différents tels que : l'amplitude de la défaillance, l'amplitude de l'écart de fermeture des modèles partiels dans lesquels elle intervient, la facilité de détection de cet écart par les procédures de décision... Dans le cadre de l'analyse structurelle on parle généralement de sensibilité structurelle de la procédure de surveillance : si on considère  $E_m$  comme étant l'ensemble des événements que l'on souhaite détecter et localiser par la procédure de surveillance, on peut dire que cette dernière est structurellement sensible à tout événement détectable [STAROSWIECKI 96].

Dans l'approche du placement de capteurs basée sur l'analyse structurelle et qui consiste à détecter et à localiser les défaillances d'un certain nombre de composants du système (ces défaillances constituent les événements), il s'avère que le système de surveillance construit à partir de ce schéma d'instrumentation est également structurellement sensible aux défaillances d'un certain nombre de composants supplémentaires. Ainsi l'évaluation de ces services additionnels de surveillance peut constituer un critère d'optimisation de placement de capteurs [CARPENTIER 97].

#### 4.3.4 Optimisation multicritères.

Dans le but d'optimiser le placement de capteurs quelques travaux utilisent plusieurs critères simultanément. Deux manières de procéder se dégagent de ces travaux. La première consiste à poser le problème de placement de capteurs en termes de contraintes comme cela a déjà été présenté dans les chapitres I-4.3.1 et I-4.3.2. pour les systèmes à transport de matière et d'énergie. Ainsi on peut citer les méthodes de placement de capteurs sous contrainte de degré de redondance, de coût et de fiabilité [LUONG 97]. Ces méthodes visent à résoudre des problèmes tels que la minimisation du coût à fiabilité imposée ou la maximisation de la fiabilité à coût imposé.

L'autre méthode consiste à évaluer des critères, pour chaque système de surveillance, calculés à partir des différents placements de capteurs. Ceux-ci sont le résultat d'un algorithme visant à détecter et localiser les défaillances de composants définis dans un cahier des charges. Les critères retenus sont le coût et la sensibilité

structurelle du système de surveillance. Une procédure de décision multicritères est alors utilisée afin de choisir une configuration de capteurs étant donné l'antagonisme des critères utilisés [CARPENTIER 97].

## **5 PRESENTATION DE LA THESE.**

Le sujet de ce travail de recherche est le placement de capteurs en vue de la surveillance des procédés industriels. L'idée de cette étude est venue de la constatation que la majorité des travaux réalisés dans le domaine de la surveillance se limitent à l'analyse des composants du système susceptibles d'être surveillés à partir d'une instrumentation donnée. De plus il s'avère que pour chaque type de composants à surveiller (capteurs, actionneurs ou système à proprement parler) il convient d'utiliser une méthode appropriée de surveillance. La démarche proposée dans ce travail est à l'opposé de ces travaux puisque les composants du système à surveiller peuvent être de tous types et sont spécifiés dans un cahier des charges de surveillance. Cette approche permet de répondre à l'attente des industriels qui, ayant une bonne connaissance a priori de leur système de production, peuvent déterminer quels sont les éléments importants à surveiller. L'intérêt de la surveillance de ces composants peut s'expliquer par leur rôle primordial dans le processus, leur fiabilité moins importante, leur fragilité plus grande, leur nécessité à la sécurité et au bon fonctionnement du processus.

En raison de la multiplicité des types de défaillances à détecter et localiser, le grand nombre de modélisations possibles des modes de fonctionnement des différents composants du système (linéaire, non linéaire, statique, dynamique...), une approche structurelle du problème s'est vite imposée. En effet l'analyse structurelle et la représentation des systèmes sous forme de graphes bipartis permettent de s'affranchir des problèmes liés à la modélisation. Elle repose sur l'analyse binaire des liens existant entre les différentes relations et variables du système. Le second chapitre de ce mémoire sera donc particulièrement consacré aux principes de la surveillance des systèmes industriels par l'analyse structurelle.

Nous présenterons dans le troisième chapitre les résultats de nos travaux concernant les différents concepts qu'il a fallu définir pour résoudre le problème posé, à savoir : l'optimisation du placement de capteurs dans le but de créer un système de surveillance permettant de détecter et de localiser les défaillances de composants d'un système industriel défini dans un cahier des charges. Le premier concept est la représentation de la structure d'un système sous forme de graphe biparti afin de matérialiser les relations existantes entre les différentes variables du système. Puis nous montrerons comment il est possible de générer l'ensemble des résidus de ce système en construisant des arbres de résolution en ET/OU à partir des variables connues. Dans un troisième temps le problème de la structuration des résidus en fonction des relations et non plus des variables dont ils dépendent, comme cela a été fait dans la plupart des travaux relatifs à la surveillance, sera abordé. Cette structuration particulière des résidus est justifiée par l'introduction d'une définition généralisée de la notion de défaillance. En effet, nous montrerons que surveiller un composant d'un système revient à surveiller la relation modélisant un mode de comportement de ce système. Cette définition généralisée des défaillances permet de

mettre en place une démarche globale de surveillance dans le but de surveiller tous types de composants. La structuration des résidus en fonction des relations mène à l'introduction d'une nouvelle définition des signatures de pannes dont l'objectif est de définir les critères de capacité de détection et de localisation des défaillances.

Le quatrième chapitre est plus particulièrement consacré à l'optimisation du placement de capteurs. Les critères de détectabilité et de localisabilité serviront de base à l'élaboration d'un algorithme exhaustif et d'un algorithme amélioré qui focalisent la génération des résidus sur les composants à surveiller. Ces algorithmes permettront d'obtenir toutes les solutions de placement de capteurs permettant de respecter le cahier des charges de surveillance. L'optimisation du placement de capteurs consiste enfin à choisir la meilleure configuration de capteurs résultat des algorithmes. Pour y parvenir nous allons introduire deux critères supplémentaires permettant d'évaluer les systèmes de surveillance construits à partir des différentes solutions des algorithmes en termes de coût et de sensibilité structurelle aux défaillances. Le choix du placement de capteurs optimal est alors obtenu en appliquant une procédure de décision multicritères.

Les conclusions générales et les perspectives seront présentées dans la dernière partie de ce mémoire.

**CHAPITRE II :**  
**ANALYSE**  
**STRUCTURELLE**  
**ET**  
**SURVEILLANCE**

## **1 INTRODUCTION.**

L'objectif de ce chapitre est de décrire les différentes étapes de la conception et de la réalisation d'un système de surveillance d'un processus industriel complexe. Dans notre approche, la conception du système de surveillance repose sur l'analyse structurelle du modèle du procédé. L'élaboration du système de surveillance peut être décomposée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, en s'appuyant sur un modèle de comportement du système, nous allons construire son modèle structurel. Dans une seconde étape, nous verrons comment ce modèle structurel permet d'isoler des sous-systèmes permettant l'écriture ou la génération de relations de redondance analytique. Dans une troisième partie, nous aborderons la façon d'utiliser ces relations de redondance analytique dans le but de réaliser un système de surveillance. Enfin, nous évaluerons les performances du système de surveillance ainsi réalisé. En nous appuyant sur un cahier des charges définissant les performances globales de détection et de localisation souhaitées, nous introduirons une mesure structurelle de ces performances.

## **2 L'APPROCHE STRUCTURELLE.**

L'approche structurelle appartient à la famille des méthodes de surveillance utilisant un modèle du processus. Les systèmes de surveillance conçus à partir de ces méthodes reposent sur une étape de génération des résidus dont les valeurs sont déterminées en fonction des variables connues du système (les informations issues de capteurs ou des entrées connues du système). Nous rappelons que les valeurs des résidus reflètent l'effet des défaillances car ils expriment la comparaison entre le fonctionnement réel du procédé et celui d'un modèle décrivant son fonctionnement normal. Ainsi les résidus obtenus doivent être proches de zéro en fonctionnement normal et différents de zéro en cas de défaillance et permettent donc sa détection.

L'approche structurelle appartient à la grande famille de méthodes de surveillance basée sur la recherche de relations exprimant une redondance dans les connaissances disponibles sur le système : les relations de redondance analytique (RRA). Ces relations peuvent être obtenues à partir d'un modèle statique (espace de parité [POTTER 77]) ou dynamique (espace de parité généralisé). Dans ce dernier cas et sous l'hypothèse de linéarité, le système peut être modélisé soit par ses équations d'état et de mesure [CHOW 84], soit par l'interconnexion de fonctions de transfert [COCQUEMPOT 93].

L'approche structurelle présente deux avantages par rapport aux autres méthodes de cette famille. En effet, l'analyse de la structure du modèle permet la génération des résidus et l'analyse des structures des résidus permet de localiser les défaillances.

Souvent, les méthodes de surveillance basées sur la recherche de relations de redondance analytique s'appuient sur un modèle linéaire et sur une représentation dans l'espace d'état qui s'avère ne pas être la mieux adaptée aux systèmes industriels complexes. En effet, c'est généralement à partir des modèles des différents composants du système, que l'on réalise sa modélisation globale. Dans cette modélisation, doivent figurer les connexions entre les différents modèles des composants. Ceci a pour conséquence d'accroître le nombre de variables de représentation.

De plus, les modèles de comportement des composants du système peuvent avoir des représentations variées. Ces modèles peuvent être linéaires, non linéaires, statiques, dynamiques, qualitatifs, à base de règles d'évolution ou de tables numériques. Le besoin d'un formalisme unifié pour déterminer les éléments communs des différents modèles des composants justifie l'approche structurelle. Celle-ci permet d'établir les contraintes qui existent entre les différentes variables et relations du système. De cette façon, elle permet de traiter des modèles très variés, pouvant cohabiter dans un même système et ne nécessite pas de définition complète du modèle. L'approche structurelle peut donc être appliquée dès les phases initiales de l'étude d'un système.

Un autre intérêt de l'approche structurelle est la possibilité de changer un composant, pour assurer une fonctionnalité donnée ou la valeur d'un paramètre du modèle de comportement, sans remettre en cause les résultats de l'étude structurelle. Enfin l'approche structurelle permet aussi d'analyser les performances du système de surveillance ainsi obtenu.

Pour illustrer notre démarche, nous allons appliquer l'analyse structurelle sur le système décrit à la figure 2.1. Ce système est représenté sous forme de schéma blocs et il est composé de :

- 14 variables internes (ou inconnues) :  $x_1, x_2, \dots, x_{14}$ .
- 7 relations entrée-sortie :  $G_1, G_2, \dots, G_7$ .
- 4 comparateurs (soustracteur ou additionneur) :  $S_1, S_2, S_3, S_4$ .
- 3 capteurs :  $M_1, M_2, M_3$  matérialisant les mesures des variables  $x_{14}, x_{12}$  et  $x_5$ .
- 2 commandes  $CO_1$  et  $CO_2$  agissant sur les variables d'entrée  $x_1$  et  $x_9$ .
- 5 variables connues :  $c_1, c_2, c_3, c_4$  et  $c_5$  correspondant dans l'ordre à la commande des variables d'entrée  $x_1$  et  $x_9$  et à la mesure des variables de sortie  $x_{14}, x_{12}$  et  $x_5$ .
- 1 entrée inconnue matérialisant une perturbation :  $x_6$ .

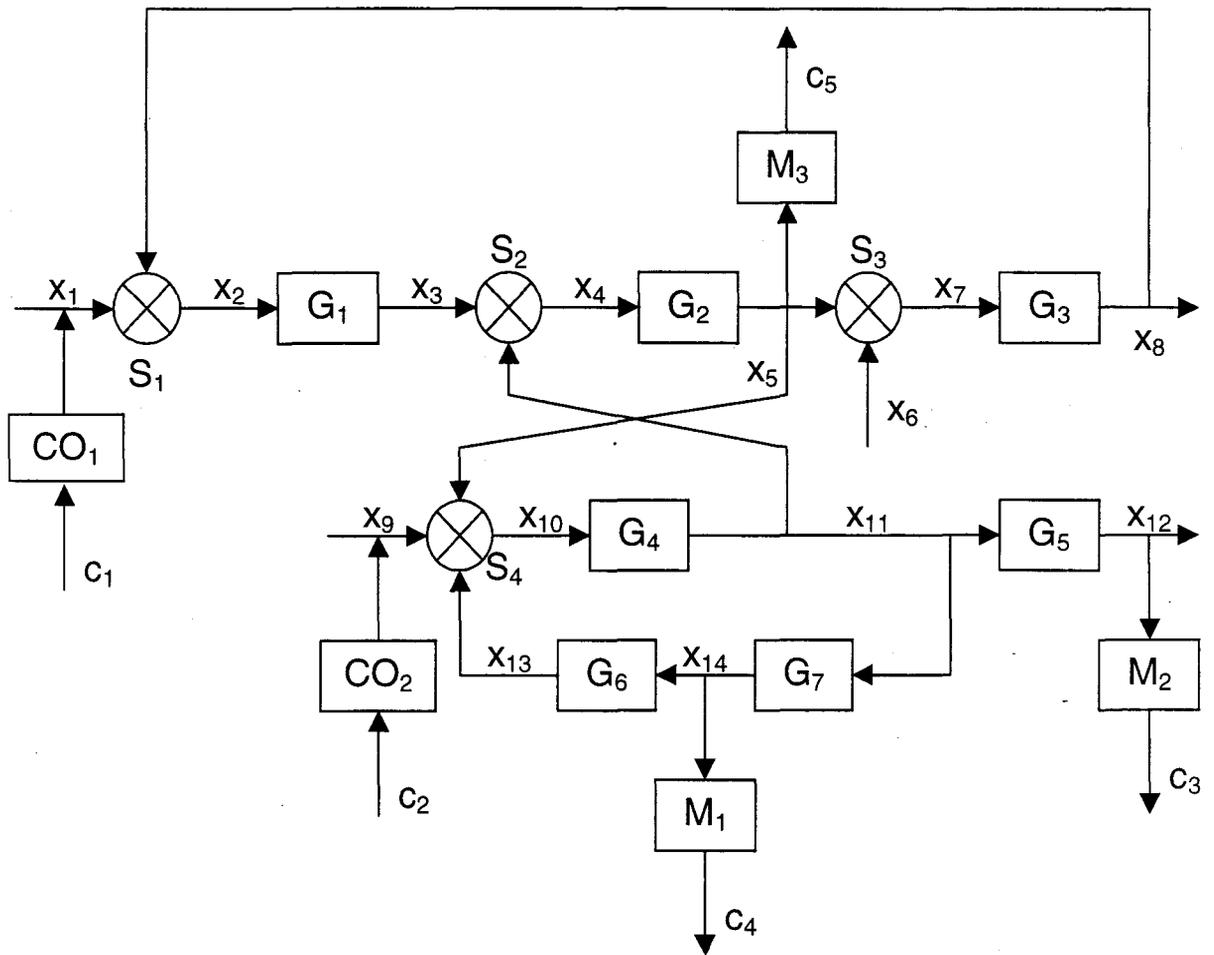


Figure 2.1. Schéma de principe du système.

## 2.1 La modélisation.

Dans le cadre de la surveillance, la modélisation a deux objectifs principaux :

- Prédire le comportement du système afin de pouvoir comparer les comportements réel et attendu (une divergence entre ces deux comportements permet de détecter une anomalie dans le fonctionnement du système).
- Présenter les résultats de la surveillance et faciliter leur interprétation par les opérateurs.

Le modèle structurel du système peut être obtenu essentiellement à partir de trois types de modèles différents : fonctionnel, topologique et comportemental (qui sera utilisé dans notre exemple pour illustrer nos propos).

### 2.1.1 Le modèle fonctionnel.

Tout système a été conçu dans le but de réaliser un objectif principal (par exemple répondre à la demande en énergie électrique pour une centrale). Cet objectif principal peut généralement être décomposé en objectifs intermédiaires, associés à des activités de plus bas niveau (par exemple produire de la vapeur), assurées par un support matériel. Il existe plusieurs méthodes d'analyse fonctionnelle qui permettent de réaliser une telle décomposition du système dont SADT [IGL 89]. Cette méthode conduit à la représentation du système par un arbre dont la racine matérialise l'activité globale du système et dont les feuilles représentant les activités élémentaires. Dans le cadre de la surveillance, le niveau de décomposition à prendre en compte dans ce type de modélisation dépend directement de la finesse de la détection recherchée. En effet, seules les défaillances des activités définies dans la décomposition peuvent être détectées et interprétées comme telles.

### 2.1.2 Le modèle topologique.

Le modèle topologique décrit, à un niveau de décomposition donné, les liens entre les différents supports matériels. Ces liens matérialisent les transferts de matière, d'énergie ou d'information entre les composants du système et sont associés à des variables de description du système. La topologie du système correspond donc à l'architecture du système au niveau de décomposition donné et elle décrit les liens entre les composants élémentaires du système. Ces liens peuvent être représentés sous la forme d'un réseau de connexions [MAH 76].

### 2.1.3 Le modèle de comportement.

Le comportement global d'un système se déduit de sa topologie et du comportement de chaque composant [ZADEH 69]. Le modèle de comportement de chaque composant exprime les contraintes qu'impose ce composant aux variables de description qui lui sont liées. On peut ainsi associer à chaque composant un ensemble de relations dont l'expression dépend du type de connaissance dont on dispose sur l'activité du composant à modéliser. Ces relations peuvent être analytiques (statiques ou dynamiques), qualitatives (équation de confluence [DE KLEER 84]), se présenter sous forme de règles de production (base de connaissance) ou de tables numériques.

Dans notre exemple, les relations de contraintes analytiques reliant les variables de description sont indiquées ci-dessous. Il est à noter que pour des raisons de commodité l'écriture de ces différentes relations est déjà simplifiée puisqu'elle ne fait apparaître que les variables de connexion ou d'entrée et de sortie des différents composants.

- Les sommateurs :

$$S_1 : f_1(X_1, X_2, X_8) = X_1 - X_2 - X_8 = 0$$

$$S_2 : f_3(X_3, X_4, X_{11}) = X_3 - X_{11} - X_4 = 0$$

$$S_3 : f_5(X_5, X_6, X_7) = X_5 + X_6 - X_7 = 0$$

$$S_4 : f_7(X_5, X_9, X_{10}, X_{13}) = X_5 + X_9 - X_{13} - X_{10} = 0$$

- Les relations entrées-sorties :

$$G_1: f_2(x_2, x_3) = x_3 - G_1(x_2) = 0$$

$$G_2: f_4(x_4, x_5) = x_5 - G_2(x_4) = 0$$

$$G_3: f_6(x_7, x_8) = x_8 - G_3(x_7) = 0$$

$$G_4: f_8(x_{10}, x_{11}) = x_{11} - G_4(x_{10}) = 0$$

$$G_5: f_9(x_{11}, x_{12}) = x_{12} - G_5(x_{11}) = 0$$

$$G_6: f_{10}(x_{13}, x_{14}) = x_{13} - G_6(x_{14}) = 0$$

$$G_7: f_{11}(x_{11}, x_{14}) = x_{14} - G_7(x_{11}) = 0$$

Etant donné que les valeurs des variables de description sont inconnues a priori, elles constitueront l'ensemble des variables inconnues. Certaines variables de description sont soit mesurées, soit connues grâce au système de commande qui les a générées (consignes ou commandes). On appelle relation de connaissance une relation exprimant le lien existant entre une variable inconnue et sa valeur disponible que l'on appelle alors variable connue. La décomposition de l'ensemble des relations en un sous-ensemble de relations de contraintes liées au système et en un sous-ensemble de relations de connaissance permet de modifier l'instrumentation (ajout, suppression, déplacement de capteur) sans toucher au modèle de description du procédé. Par contre, elle augmente le nombre de variables à traiter.

Les relations de connaissance de notre système sont :

- Les mesures :

$$M_1: f_{15}(x_{14}, c_4) = x_{14} - c_4 = 0$$

$$M_2: f_{14}(x_{12}, c_3) = x_{12} - c_3 = 0$$

$$M_3: f_{16}(x_5, c_5) = x_5 - c_5 = 0$$

- Les commandes :

$$CO_1: f_{12}(x_1, c_1) = x_1 - c_1 = 0$$

$$CO_2: f_{13}(x_9, c_2) = x_9 - c_2 = 0$$

## 2.2 La structure d'un modèle.

L'objectif de l'analyse structurelle est de dégager les propriétés structurelles du système qui serviront de guide pour une mise en œuvre plus complète du système de surveillance utilisant pour sa part le modèle de comportement. La structure du modèle est donc obtenue à partir du modèle de comportement, en ne gardant que les informations qui expriment l'existence de relations entre les variables, sans prendre en compte leur forme particulière.

Pour tout système nous pouvons définir les ensembles suivants : F l'ensemble des relations, X l'ensemble des variables inconnues, C l'ensemble des variables connues et Z l'ensemble des variables du système :  $Z = X \cup C$ .

Dans notre exemple nous obtenons les ensembles suivants :

- $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}\}$
- $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\}$
- $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9, f_{10}, f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{14}, f_{15}, f_{16}\}$

Le modèle structurel est défini par une application binaire  $s$  :

$$F \times Z \rightarrow \{0,1\}$$

$(f, z) \alpha s(f, z)$  où  $s(f, z) = 1$  si et seulement si  $z$  apparaît dans la relation  $f$

L'ensemble des couples  $(f, z)$  tels que  $s(f, z) = 1$  est appelé structure du système et elle peut donc se représenter sous la forme d'une matrice booléenne, appelée matrice d'incidence (figure 2.2) ou par un graphe biparti (figure 2.3 et 2.4).

A partir de cette modélisation, la structure d'un sous-ensemble de relations ou d'un sous-système est définie par  $Q$  :

$$P(F) \rightarrow P(Z)$$

$$F_i \alpha Q(F_i) = \{z \in Z / \exists f \in F_i / s(f, z) = 1\}$$

$P(F)$ ,  $P(Z)$  sont les ensembles des parties de  $F$  et de  $Z$ . ( $F_i \subset P(F)$ ) et  $Q(F_i)$  est l'ensemble des variables qui apparaissent dans les relations de  $F_i$ . Un sous-système  $S_i$ , associé à un sous-ensemble de relations  $F_i$  est défini par le couple  $(F_i, Q(F_i))$ .

Pour notre exemple  $Q(\{f_3, f_4\}) = \{x_3, x_4, x_5, x_{11}\}$

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	C1	C2	C3	C4	C5
f <sub>1</sub>	1	1						1											
f <sub>2</sub>		1	1																
f <sub>3</sub>			1	1							1								
f <sub>4</sub>				1	1														
f <sub>5</sub>					1	1	1												
f <sub>6</sub>							1	1											
f <sub>7</sub>					1				1	1			1						
f <sub>8</sub>										1	1								
f <sub>9</sub>											1	1							
f <sub>10</sub>													1	1					
f <sub>11</sub>											1			1					
f <sub>12</sub>	1														1				
f <sub>13</sub>									1							1			
f <sub>14</sub>													1				1		
f <sub>15</sub>														1				1	
f <sub>16</sub>					1														1

Figure 2.2. Matrice d'incidence de la structure du système.

## 2.2.1 Structure d'un modèle et graphe biparti.

L'objectif de cette partie n'est pas de faire une présentation complète de la théorie des graphes [BERGE 70], [GONDRAN 85], mais de rappeler les quelques définitions et propriétés de base qui seront utilisées par la suite dans ce mémoire. En effet la théorie des graphes est la base de l'analyse structurelle des systèmes industriels car elle permet une représentation efficace de la structure des systèmes complexes et de nombreux travaux effectués dans ce domaine des mathématiques trouvent ainsi une application.

### 2.2.1.1 Rappels sur la théorie des graphes.

Un graphe noté  $G = [X, U]$  est un schéma constitué de deux ensembles d'éléments : les sommets et les liens entre ces sommets.

- L'ensemble des **sommets** ou **nœuds** est appelé  $X$ . On appelle  $N = \text{card}(X)$ , le nombre de nœuds ou de sommets du graphe, on dit alors que le graphe est **d'ordre  $N$** .
- L'ensemble des arcs est noté  $U$ . C'est l'ensemble des liens entre deux sommets distincts ou non. Chaque lien  $u \in U$  est associé à un couple de sommets et noté  $(x_i, x_j)$ . Cette ligne porte le nom d'**arc** si elle est orientée et dans ce cas le couple  $(x_i, x_j)$  est ordonné de telle sorte que  $x_i$  soit l'**extrémité initiale** et  $x_j$  l'**extrémité terminale** de l'arc  $u$ . Un arc dont les extrémités initiale et terminale coïncident est appelé une **boucle**.
- Un **graphe non-orienté** est un graphe dont chaque lien de l'ensemble  $U$  ne possède pas d'orientation. Dans ce cas ces liens portent alors le nom d'**arêtes**, le couple  $(x_i, x_j)$  les matérialisant n'est pas ordonné et ils sont représentés par un simple segment et non plus par une flèche.
- Un **graphe biparti** est un graphe pour lequel il existe une partition de  $X = \{Y, Y'\}$  telle que chaque lien de  $U$  possède une extrémité dans  $Y$  et l'autre dans  $Y'$ . Il est noté  $G = \{Y, Y', U\}$ .
- Etant donné  $A \subset X$ , le **sous-graphe** engendré par le sous-ensemble de sommets  $A$  est le graphe  $G_A$  dont les sommets sont les éléments de  $A$  et dont les arcs sont les arcs de  $G$  ayant leurs deux extrémités dans  $A$ . Il est noté  $G_A = [A, U_A]$ .
- Etant donné un graphe  $G = [X, U]$  et  $V \subset U$ , le **graphe partiel** engendré par le sous-ensemble d'arcs  $V$  est le graphe ayant le même ensemble  $X$  de sommets que  $G$  et dont les arcs sont les arcs de  $V$  (on élimine de  $G$  les arcs de  $U - V$ ).
- Etant donné un graphe  $G = [X, U]$ ,  $A \subset X$  et  $V \subset U$ , le **sous-graphe partiel** engendré par  $A$  et  $V$  est le graphe partiel de  $G_A$  engendré par  $V$ .
- Etant donné un graphe  $G = [X, U]$ , le **graphe complémentaire**  $G = [X, \bar{U}]$  à le même ensemble de sommets que  $G$  et comme arcs les arcs

complémentaires à  $U$  : si  $(x_i, x_j) \in U$  alors  $(x_i, x_j) \notin \bar{U}$  et si  $(x_i, x_j) \notin U$  alors  $(x_i, x_j) \in \bar{U}$ .

### 2.2.1.2 Graphes et relations ou applications.

Un graphe  $G = [X, U]$  peut être considéré comme la représentation graphique d'une relation binaire  $R$  définie sur  $X$  définie par :

$$x_i R x_j \text{ si et seulement si } (x_i, x_j) \in U \quad (2.1)$$

Réciproquement, à partir de toute relation binaire définie sur  $X$ , on peut définir le graphe  $G$  de la façon suivante :

$$(x_i, x_j) \in U \text{ si et seulement si } x_i R x_j \quad (2.2)$$

On dit que  $x_j$  est un **successeur** de  $x_i$ , s'il existe un arc ayant  $x_i$  comme extrémité initiale et  $x_j$  comme extrémité terminale. L'ensemble des successeurs d'un sommet  $x_i \in X$  est noté  $\Gamma_{x_i}$ . L'application  $\Gamma$  qui, à tout élément de  $X$ , fait correspondre une partie de  $X$  (un élément de  $\mathcal{P}(X)$ ) est appelée une **application multivoque**.

On dit que  $x_i$  est un **prédécesseur** de  $x_j$ , s'il existe un arc ayant  $x_i$  comme extrémité initiale et  $x_j$  comme extrémité terminale. L'ensemble des prédécesseurs d'un sommet  $x_j \in X$  est noté  $\Gamma^{-1}_{x_j}$  et  $\Gamma^{-1}$  est l'**application multivoque réciproque** de  $\Gamma$ .

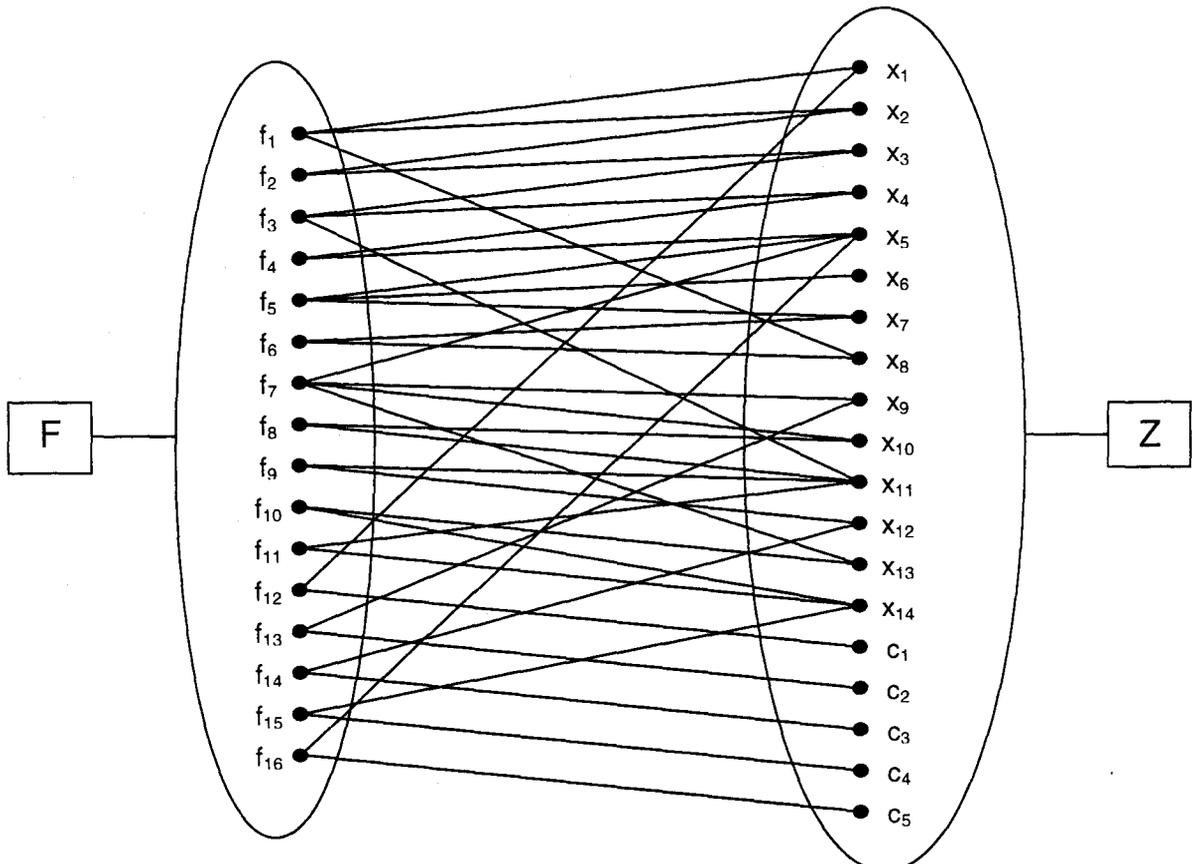


Figure 2.3. Graphe biparti de la structure du système.

Un graphe biparti est la représentation graphique d'une relation binaire définie sur  $Y \times Y'$ . Nous avons vu précédemment qu'une première façon de représenter la structure d'un système est d'utiliser sa matrice d'incidence. Le graphe biparti est une représentation équivalente de cette structure. En effet l'application  $s$  définit aussi un graphe biparti  $G = [F, Z, U]$ .  $F$  correspond à l'ensemble des relations  $F$  du système,  $Z$  à l'ensemble des variables du système. Ainsi l'ensemble des sommets du graphe est  $F \cup Z$  et l'ensemble des liens du graphe est l'ensemble  $U$ .

On dira qu'un arc  $u_{ij} = (f_i, z_j)$  existe si  $s(f_i, z_j) = 1$  c'est à dire que la relation  $f_i$  contraint l'évolution de la variable  $z_j$ . Nous sommes bien en présence d'un graphe biparti car chaque arc du graphe possède par construction une extrémité dans  $F$  et l'autre dans  $Z$ .

La figure 2.3 représente le graphe biparti de la structure du système servant d'exemple. Il permet de visualiser parfaitement le bipartisme du graphe mais pour des raisons de lisibilité, nous préférons utiliser la représentation graphique de la figure 2.4 qui est beaucoup plus proche de la représentation du système de la figure 2.1 bien que les deux ensembles  $F$  et  $Z$  n'apparaissent pas aussi clairement.

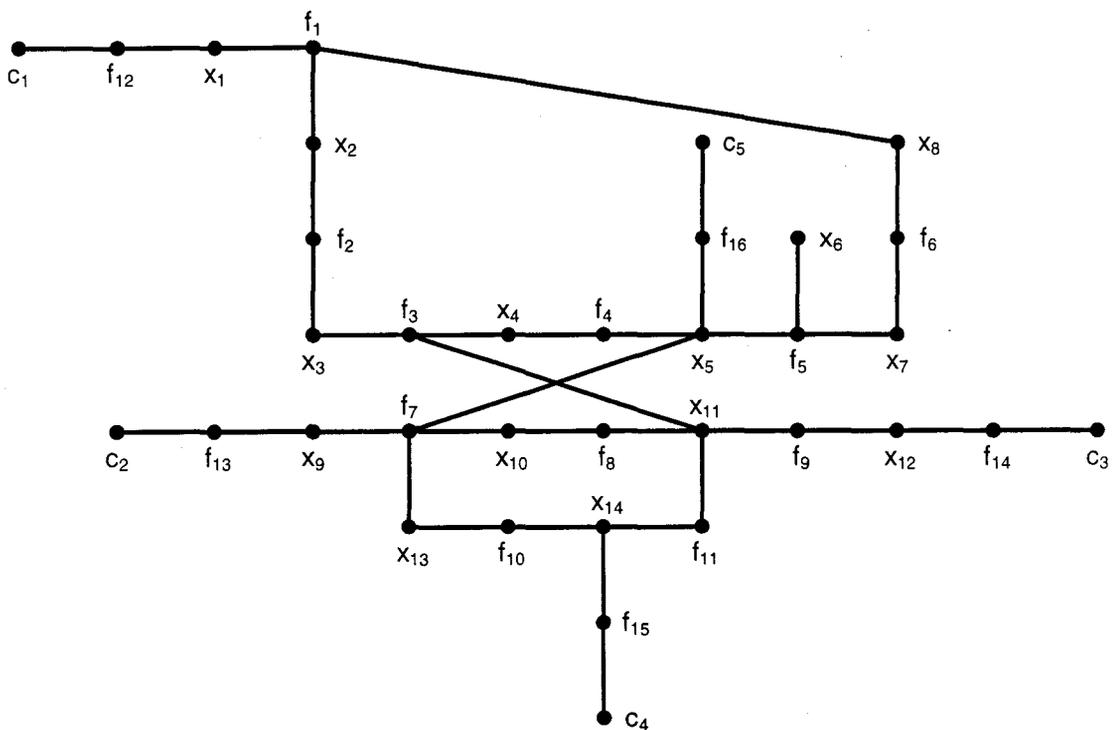


Figure 2.4. Graphe biparti de la structure du système.

### 2.2.1.3 Chaînes, cycles et chemins dans un graphe.

- Une **chaîne** de longueur  $q$  est une séquence de  $q$  arcs :  $L = \{u_1, u_2, \dots, u_q\}$  telle que chaque arc  $u_r$  de la séquence ( $1 < r < q$ ) ait une extrémité commune avec l'arc  $u_{r-1}$  ( $u_{r-1} \neq u_r$ ) et l'autre extrémité commune avec l'arc  $u_{r+1}$  ( $u_{r+1} \neq u_r$ ). L'extrémité  $x_i$  du  $u_1$  non adjacente à  $u_2$  et l'extrémité  $x_j$  du  $u_q$

non adjacente à  $u_q$  sont appelées les extrémités de la chaîne L : la chaîne L joint les sommets  $x_i$  et  $x_j$ .

- On appelle **chaîne élémentaire** une chaîne telle qu'en la parcourant, on ne rencontre pas deux fois le même sommet.
- Un **cycle** est une chaîne dont les sommets coïncident.
- Un **cycle élémentaire** est un cycle minimal (pour l'inclusion) c'est à dire ne contenant strictement aucun autre cycle. En parcourant un cycle élémentaire on ne rencontre pas deux fois le même sommet (sauf le sommet choisi comme origine du parcours).
- Un **chemin** de longueur  $q$  est une séquence de  $q$  arcs :  $P = \{u_1, u_2, \dots, u_q\}$  telle que  $u_1 = (x_0, x_1)$ ,  $u_2 = (x_1, x_2)$ , ...,  $u_q = (x_{q-1}, x_q)$ , autrement dit un chemin est une chaîne dont tous les arcs sont orientés dans le même sens et le sommet  $x_0$  est l'extrémité initiale du chemin P et  $x_q$  l'extrémité terminale du chemin P.
- Un **chemin élémentaire** est un chemin tel qu'en le parcourant, on ne rencontre pas deux fois le même sommet.
- Un **circuit** est un chemin dont les extrémités coïncident.

### 3 LES RELATIONS DE REDONDANCE ANALYTIQUE.

#### 3.1 Définition.

Comme cela a été défini dans le chapitre I, une relation de redondance analytique est une relation dont la structure ne contient que des variables et des paramètres connus. Elle peut donc être directement calculée. Une relation de redondance analytique permet de vérifier la cohérence entre les valeurs des variables et ne peut être vérifiée que lorsque le comportement du système correspond au comportement issu du modèle. Une défaillance sur la mesure d'une variable ou un changement de la valeur d'un paramètre de la relation de redondance entraînera la non-vérification de celle-ci [CASSAR 94].

#### 3.2 Analyse structurelle et relation de redondance analytique.

L'analyse structurelle du système permet de définir quelles sont les relations de redondance analytique qui peuvent être mises en œuvre pour surveiller le système. Pour les obtenir, il faut pouvoir éliminer les variables inconnues du modèle.

Dans ce cas de figure, on ne prend alors en compte que la structure des relations par rapport aux variables inconnues. Pour cela on définit la structure en variables inconnues d'un ensemble de relations de contrainte  $F_i$  inclus dans  $F$  par :

$$Q_x(F_i) = Q(F_i) \cap X \quad (2.3)$$

et par conséquent :

$$Q_x(F) = X \quad (2.4)$$

### 3.2.1 Couplages sur une structure.

Soient  $p_x$  et  $p_f$  les projections dans  $X$  et  $F$  d'un couple appartenant à la structure. Elles sont définies par :

$$\begin{aligned} p_x \quad F \times X &\rightarrow X \\ (f, x) &\alpha \quad p_x(f, x) = x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_f \quad F \times X &\rightarrow F \\ (f, x) &\alpha \quad p_f(f, x) = f \end{aligned}$$

Un couplage  $K$  sur une structure en variables inconnues est un ensemble de couples (relation, variable inconnue) appartenant à la structure et tel que les projections de  $K$  dans  $F$  et dans  $X$  soient toutes deux injectives [ROY 70].

On appellera  $p_x(K_i)$  (respectivement  $p_f(K_i)$ ) la projection du couplage  $K_i$  dans  $X$  (respectivement dans  $F$ ).

On appelle couplage complet  $K_i$  sur un sous-système  $(F_i, Q(F_i))$  un couplage dans lequel l'ensemble des variables inconnues de  $Q_x(F_i)$  sont couplées, ce qui se traduit par :

$$K_i \text{ couplage complet} \Leftrightarrow p_x(K_i) = Q_x(F_i) \quad (2.5)$$

Si un couplage complet  $K_i$  couvre aussi l'ensemble  $F_i$  des relations du sous-système, le sous-système est dit **juste déterminé**. Cette propriété impose que  $\text{card}(F_i) = \text{card}(Q_x(F_i))$  : le système possède autant de fonctions que de variables inconnues.

$$\exists K_i / p_x(K_i) = Q_x(F_i) \text{ et } p_f(K_i) = F_i \Leftrightarrow (F_i, Q_x(F_i)) \text{ est juste déterminé.} \quad (2.6)$$

On définira un sous-système **surdéterminé** comme un sous-système sur lequel un couplage complet ne couvre qu'une partie de  $F_i$ . Cette propriété impose que  $\text{card}(F_i) > \text{card}(Q_x(F_i))$  : le système possède plus de relations que de variables inconnues.

$$\exists K_i / p_x(K_i) = Q_x(F_i) \text{ et } p_f(K_i) \subset F_i \Leftrightarrow (F_i, Q_x(F_i)) \text{ est surdéterminé.} \quad (2.7)$$

Sur un système **sous-déterminé** il n'est pas possible de trouver un couplage complet car le système possède plus de variables inconnues que de relations.

$$\exists K_i / p_x(K_i) \subset Q_x(F_i) \text{ et } p_r(K_i) = F_i \Leftrightarrow (F_i, Q_x(F_i)) \text{ est sous-déterminé.} \quad (2.8)$$

	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>7</sub>	x <sub>8</sub>	x <sub>9</sub>	x <sub>10</sub>	x <sub>11</sub>	x <sub>12</sub>	x <sub>13</sub>	x <sub>14</sub>
f <sub>1</sub>	1	1						1						
f <sub>2</sub>		1	1											
f <sub>3</sub>			1	1							1			
f <sub>4</sub>				1	1									
f <sub>5</sub>					1	1	1							
f <sub>6</sub>							1	1						
f <sub>7</sub>					1				1	1			1	
f <sub>8</sub>										1	1			
f <sub>9</sub>											1	1		
f <sub>10</sub>													1	1
f <sub>11</sub>											1			1
f <sub>12</sub>	1													
f <sub>13</sub>									1					
f <sub>14</sub>												1		
f <sub>15</sub>														1
f <sub>16</sub>					1									

Figure 2.5. Exemple de couplage sur la structure du système.

Le couplage K proposé en exemple sur la figure 2.5 est un couplage complet sur (F, X) qui ne couvre qu'une partie des relations :  $p_x(K) = Q_x(F) = X$  et  $p_r(K) = F / \{f_9, f_{16}\}$ . Le système est donc surdéterminé.

Dans le cadre de la théorie des graphes appliquée à la décomposition de système d'équations toutes les définitions et propriétés des couplages évoquées précédemment ont été introduites [RICHETIN 75]. Ainsi on appelle **couplage** d'un graphe biparti  $G = [Y, Y', U]$  un ensemble d'arcs  $W \subset U$  tel que deux arcs quelconques de  $W$  n'ont aucun sommet en commun. Le couplage est dit **maximal** lorsque l'ensemble d'arcs  $W \subset U$  est de cardinalité maximale. De plus ce couplage est **complet** si chaque variable du système est l'extrémité d'un arc du couplage maximal  $W$ .

Des travaux ont montré que la décomposition canonique d'un graphe biparti en trois composantes surdéterminée, juste déterminée et sous-déterminée, obtenue à partir d'un couplage maximal sur la structure du système est unique [DULMAGE 59] [DECLERCK 91b].

La décomposition canonique du système utilisé pour illustrer nos propos présente un sous-système surdéterminé et un sous-système juste déterminé qui permettent de déterminer les valeurs de toutes les variables inconnues du système. Par conséquent, il ne contient pas de composante sous-déterminée.

	X <sub>1</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>6</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
f <sub>12</sub>	1														1				
f <sub>13</sub>		1														1			
f <sub>14</sub>			1														1		
f <sub>9</sub>			1	1															
f <sub>8</sub>				1	1														
f <sub>11</sub>				1		1													
f <sub>10</sub>						1	1												
f <sub>7</sub>		1			1		1	1											
f <sub>4</sub>								1	1										
f <sub>3</sub>				1					1	1									
f <sub>2</sub>										1	1								
f <sub>1</sub>	1										1	1							
f <sub>6</sub>												1	1						
f <sub>5</sub>								1					1	1					
f <sub>15</sub>						1												1	
f <sub>16</sub>								1											1

Figure 2.6. Décomposition canonique de l'exemple.

### 3.2.2 Calculabilité.

Un système juste déterminé (F<sub>i</sub>, Q(F<sub>i</sub>)) permet d'exprimer les variables inconnues Q<sub>x</sub>(F<sub>i</sub>) uniquement en fonction des variables connues Q(F<sub>i</sub>) ⊂ C, sous l'hypothèse de calculabilité du système, [STAROSWIECKI 89]. Une variable x est calculable à partir d'une relation f, si la variable x peut s'exprimer sous la forme d'une fonction des autres variables apparaissant dans la structure de f.

L'ensemble des variables de la structure de f, x étant exclue est noté :

$$Z'_x = Q(\{f\}) - \{x\} \tag{2.9}$$

La propriété de calculabilité d'une variable x ∈ Q({f}) à partir de la relation f est donnée par :

$$x \in Q(\{f\}) \text{ est calculable à partir de } f \Leftrightarrow \exists \varphi'_x / x = \varphi'_x(\{Z'_x\})$$

Le modèle structural de calculabilité est défini par une application r :

$$r : F \times Z \rightarrow \{0, 1\}$$

(f, z) α r(f, z) où r(f, z) = 1 si et seulement si z est calculable par la relation f

On appelle une r\_structure du système l'ensemble des couples (f, x) tels que r(f, x) = 1. Il est à noter qu'une r\_structure est incluse dans la structure et que l'ensemble des couples (f, x) dans lesquels f est une relation de connaissance est

inclus dans la  $r\_structure$ . Ainsi l'hypothèse de calculabilité est vérifiée à la condition nécessaire que le couplage complet soit strictement inclus dans la  $r\_structure$ .

La notion de calculabilité est très importante en analyse structurelle car elle permet de tenir compte de la non-inversibilité de relations par rapport à certaines variables. En effet, certains composants du système sont modélisés par des équations non linéaires, sous forme de tables ou d'équations de confluence, ou par des équations différentielles qui ne permettent pas de déterminer les valeurs de toutes les variables dont elles dépendent. Si on traite le cas très fréquent des équations différentielles, il s'avère que leur résolution dépend des conditions initiales. Ainsi si celles-ci sont inconnues, les variables associées sont non calculables. Il est à noter que la structure des relations différentielles fait apparaître des dérivées de variables inconnues matérialisant les relations de contrainte entre ces variables et leurs dérivées.

### 3.2.3 Relations de redondance.

Lorsqu'on couvre un système surdéterminé par un couplage  $K$ , il existe un sous-ensemble de relations  $F_i^K$  qui n'est pas couvert par  $K$ . Dans notre exemple les relations  $f_{15}$  et  $f_{16}$  ne sont pas couvertes par le couplage défini ainsi :  $F_i^K = F_i - p_i(K) = \{f_{15}, f_{16}\}$ . D'autre part le système juste déterminé associé au couplage  $K$  permet d'exprimer les variables inconnues en fonction de variables connues. Ainsi dans chaque relation de  $F_i^K$ , il est possible de remplacer les variables inconnues par leur expression en fonction de variables connues. Cette substitution permet la construction d'une relation ne faisant intervenir que des variables connues : c'est une relation de redondance analytique.

## 3.3 Génération des relations de redondance analytique.

La génération des relations de redondance analytique consiste à rechercher des sous-systèmes surdéterminés inclus dans le système. Un algorithme a été proposé [STAROSWIECKI 89] pour générer les couplages sur le graphe biparti. Etant donné qu'un système surdéterminé peut induire plusieurs couplages complets, ces différents couplages sont équivalents et correspondent à un même ensemble de relations de redondance analytique. De plus, l'opération de couplage oriente les liens relations - variables et impose donc dans le graphe des chemins orientés et plus exactement des chaînes alternées car nous sommes en présence de graphes bipartis [BERGE 70].

Ces chaînes alternées permettent de construire les séquences de calcul pour obtenir la valeur des résidus (calcul numérique) ou la forme analytique de la relation de redondance analytique (résolution formelle).

Dans notre exemple, le couplage de la figure 2.6. conduit aux séquences de calcul suivantes pour la génération de 2 RRA (sous hypothèse d'inversibilité des fonctions  $G_i$ ) :

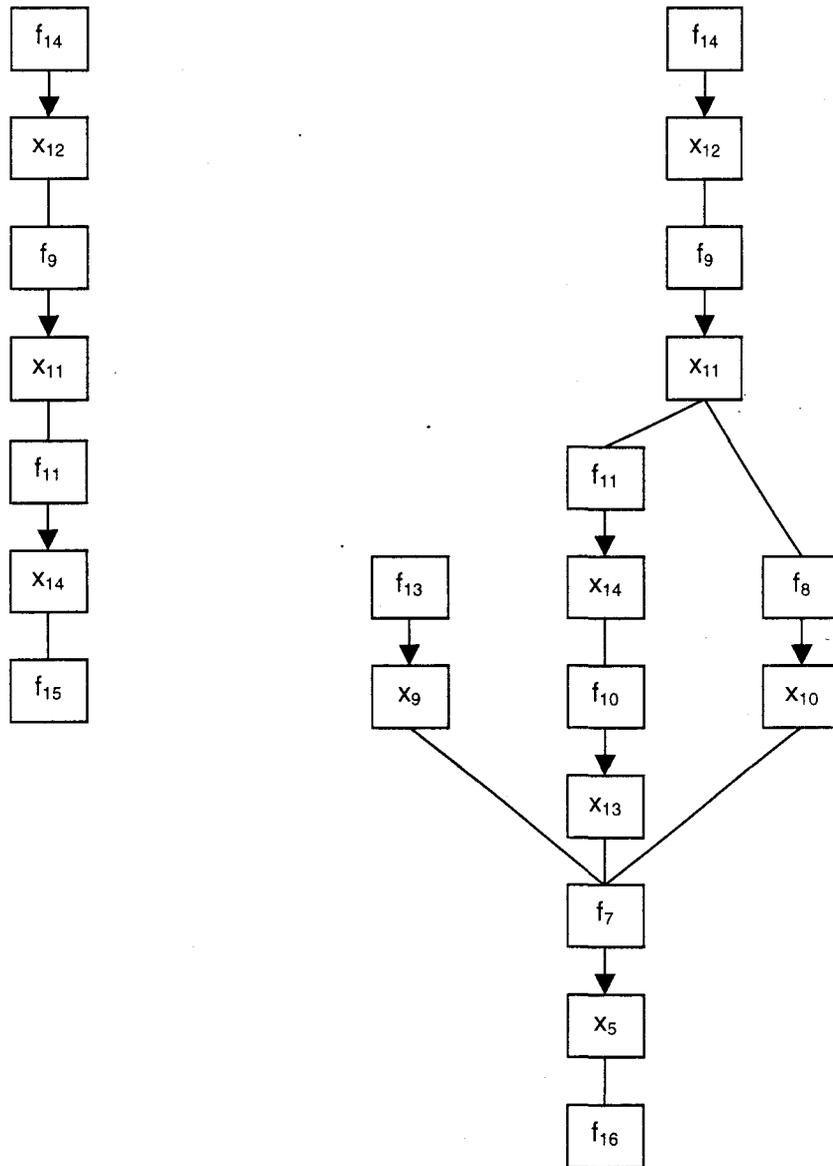


Figure 2.7. Chaînes alternées permettant le calcul des 2 RRA.

$$\begin{cases}
 f_{14} : x_{12} = c_3 \\
 f_9 : x_{12} = G_5(x_{11}) \\
 f_{11} : x_{14} = G_7(x_{11}) \\
 f_{10} : x_{13} = G_6(x_{14}) \\
 f_7 : x_5 = x_{10} - x_9 + x_{13} \\
 f_{16} : x_5 = c_5 \\
 f_{13} : x_9 = c_2 \\
 f_8 : x_{11} = G_4(x_{10})
 \end{cases}
 \Rightarrow
 \begin{cases}
 c_3 = G_5(x_{11}) \\
 x_{14} = G_7(x_{11}) \\
 x_{13} = G_6(x_{14}) \\
 c_5 = x_{10} - c_2 + x_{13} \\
 x_{11} = G_4(x_{10})
 \end{cases}
 \Rightarrow
 \begin{cases}
 x_{13} = G_6(G_7(G_5^{-1}(c_3))) \\
 x_{10} = G_4^{-1}(G_5^{-1}(c_3)) \\
 c_5 = x_{10} - c_2 + x_{13}
 \end{cases}$$

$$\Rightarrow G_4^{-1}(G_5^{-1}(c_3)) + G_6(G_7(G_5^{-1}(c_3))) - c_2 - c_5 = 0 \quad (\text{RRA2})$$

$$\begin{cases} f_{14} : x_{12} = c_3 \\ f_9 : x_{12} = G_5(x_{11}) \\ f_{11} : x_{14} = G_7(x_{11}) \\ f_{15} : x_{14} = c_4 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_3 = G_5(x_{11}) \\ c_4 = G_7(x_{11}) \end{cases} \Rightarrow G_5(G_7^{-1}(c_4)) - c_3 = 0 \quad (\text{RRA 1})$$

Dans notre exemple, nous obtenons 2 relations de redondance analytique indépendantes.

L'existence d'une chaîne alternée reliant chaque relation de connaissance à une autre relation de connaissance est une condition nécessaire et suffisante à l'existence d'une relation de redondance analytique dans un sous-système [DECLERCK 91b]. Pour que les chaînes alternées puissent donner les séquences de calcul des relations de redondance analytique, il faut que le graphe soit acyclique. L'existence de cycles dans le graphe oblige à réduire d'abord ceux-ci localement ou à chercher un autre couplage conduisant à des chemins acycliques.

## 4 LE SYSTEME DE SURVEILLANCE.

L'objectif d'un système de surveillance est de fournir une information sur la présence ou l'absence de défaillance et la cause de cette défaillance éventuelle. Pour ce faire, on utilise une procédure de décision qui s'appuie sur les valeurs des variables connues et sur un ensemble de relations de redondance. Avant de présenter plus complètement la procédure de décision, nous allons nous attarder sur la définition du cahier des charges de surveillance, ainsi que sur les notions qui y sont mises en œuvre.

Avec le système utilisé pour illustrer notre exemple, on pourrait donner comme cahier des charges du système de surveillance, de détecter les défaillances des capteurs et des relations d'entrée-sortie  $G_1$ ,  $G_2$  et  $G_3$  et de localiser les défaillances de l'une des deux commandes.

### 4.1 Structure d'un système de surveillance et signature de panne.

Pour déterminer les performances structurelles d'un système de surveillance conçu sur la base d'un ensemble de relations de redondance  $R$ , on associe à l'ensemble des causes de défaillances à surveiller (fixé par le cahier des charges), un sous-ensemble de l'ensemble des variables connues  $C$ . De cette façon il est possible de définir le modèle structurel  $sr$  du système de surveillance par :

$$sr : R \times C \rightarrow \{0, 1\}$$

$(r, c) \alpha sr(r, c)$  où  $sr(r, c) = 1$  si et seulement si  $c$  apparaît dans la relation de redondance  $r$ .

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
RRA1			1	1	
RRA2		1	1		1

**Figure 2.8.** Ensemble initial des relations de redondance analytique.

Il est possible d'obtenir de nouvelles relations de redondance analytique en combinant les relations de l'ensemble de départ. Ceci revient à substituer dans une des relations, une variable par son expression déduite d'une autre relation. Ces nouvelles relations de redondance peuvent être aussi obtenues à partir d'autres couplages sur la  $r\_structure$  ne faisant intervenir qu'une partie des relations de connaissance.

Dans notre exemple à partir de la RRA2 : on peut exprimer  $c_3$  en fonction de  $c_2$  et  $c_5$ . En remplaçant  $c_3$  dans la RRA1, on obtient une nouvelle relation de redondance analytique la RRA3 dans la figure 2.9.

Pour obtenir l'ensemble de toutes les relations de redondance analytique, il faut effectuer toutes les décompositions canoniques possibles de la structure. A chaque décomposition canonique, on obtient un sous-ensemble de deux relations de redondance. Au chapitre III nous proposerons une méthode exhaustive de génération des résidus s'appuyant sur la construction d'arbres de résolution en ET/OU [CARPENTIER 96a]

Le tableau de la figure 2.9 donne l'ensemble de toutes les structures des relations de redondance analytique du système.

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
RRA1			1	1	
RRA2		1	1		1
RRA3		1		1	1

**Figure 2.9.** Ensemble complet des relations de redondance analytique.

On appelle signature binaire d'une défaillance  $d_j$  relative à l'ensemble R, le vecteur binaire  $s_j = [a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{ij}, \dots, a_{nj}]^t$  indiquant pour chaque relation de redondance de R si elle réagit à la défaillance (la RRA n'est plus vérifiée et  $a_{ij} = 1$ ) ou pas (la RRA est toujours vérifiée et  $a_{ij} = 0$ ) [GERTLER 88]. Par conséquent le vecteur binaire nul correspond au fonctionnement normal du système. On peut donc définir le vecteur signature de panne  $s_j$  d'une défaillance  $d_j$  par :

$$s_j = [a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{ij}, \dots, a_{nj}]^t \text{ avec } n = \text{card}(R) \text{ et } a_{ij} = sr(r_i, c_j) \quad (2.10)$$

A titre d'exemple, si le vecteur signature de défaillance  $d_3$  correspond à  $c_3$ , on obtient  $s_3 = (1 \ 1 \ 0)^t$  et ce vecteur correspond à la signature de panne de  $c_3$ .

## 4.2 Procédure de décision.

On rappelle qu'une relation de redondance analytique ne dépend que de variables connues et son résultat, le résidu de la relation, doit être nul. Lorsque le comportement du système suit exactement son modèle, le résidu est alors strictement nul. Il s'avère que le modèle ne représente pas exactement la réalité et le résidu est, en général, différent de zéro. Deux hypothèses se présentent alors pour déterminer les raisons de la non-nullité d'un résidu :

- $H_0$  : le résidu est différent de zéro à cause des bruits de mesure (modèle imparfait des relations de connaissance) ou des erreurs de modélisation du système mais le fonctionnement du système est normal.
- $H_1$  : le résidu est différent de zéro parce que l'un des éléments (capteur, actionneur ou paramètre) ne suit plus le modèle donné par sa relation de connaissance. Le système est alors en présence d'une défaillance.

Le rôle de la procédure de décision est alors double puisqu'elle doit non seulement détecter la présence ou l'absence d'une défaillance (ceci revient à déterminer parmi  $H_0$  et  $H_1$  quelle est l'hypothèse la plus probable), mais aussi de localiser la défaillance lorsque l'hypothèse  $H_1$  a été retenue. La procédure de décision peut être décomposée en deux étapes :

- La première étape consiste à traiter individuellement chaque résidu pour détecter un changement de valeur moyenne en prenant en compte les aspects statistiques de celui-ci. Les méthodes sont celles de la théorie de la décision [**SAPORTA** 78] ou du traitement de signal appliqué à la détection de rupture [**BASSEVILLE** 87]. En appliquant ce traitement à l'ensemble des résidus, on obtient un vecteur binaire de cohérence  $V_{bc}$  dont les composantes à 1 sont les relations de redondance analytique pour lesquelles une défaillance a été détectée.
- La seconde étape consiste à comparer le vecteur binaire de cohérence  $V_{bc}$  avec les différentes signatures de pannes et la signature de fonctionnement normal (vecteur nul) pour obtenir une conclusion sur l'état du système : fonctionnement normal, défaillance identifiée et cause de la défaillance, ou défaillance non identifiée. Pour effectuer cette comparaison, on peut prendre comme mesure, la distance de Hamming.

$$D_j = |V_{bc} - s_j| \quad (2.11)$$

Dans notre exemple, considérons le vecteur de cohérence binaire  $V_{bc} = (1 \ 0 \ 1 \ 0)^t$ . On mesure les distances entre ce vecteur et ceux donnés dans le tableau 2.9. La signature de panne la plus proche du vecteur de cohérence binaire est celle de  $c_4$  qui est donc la cause la plus probable de défaillance.

Variable connue	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>4</sub>	c <sub>5</sub>
Distance	2	3	3	1	3

Figure 2.10. Distance avec le vecteur de cohérence  $(1\ 0\ 1)^t$ .

### 4.3 Evaluation structurelle d'un système de surveillance.

Dans la seconde étape de la procédure de décision, on compare le vecteur cohérence à l'ensemble des signatures binaires de cause de défaillances et de fonctionnement normal. Il est évident que cette étape est d'autant plus performante que les signatures binaires de défaillances sont différentes c'est à dire que les points représentant les signatures binaires dans l'espace  $\{0,1\}^n$  ( $n$  est le nombre de relations de redondance) sont plus éloignés. On peut évaluer cette performance en utilisant des indices de séparation entre signatures binaires tels que ceux définis en classification [LERMAN 81].

Pour cela on peut utiliser la distance de Hamming entre les signatures car elle représente alors le nombre de sommets qui séparent deux sommets dans l'hypercube  $\{0,1\}^n$  qui lui-même correspond au nombre d'erreurs de décision préservant la validité de la conclusion. Ainsi pour assurer une localisation correcte en présence de  $k$  erreurs de décision sur le vecteur de cohérence, il faut une distance entre les signatures au moins égale à  $2k+1$ . De façon similaire, la possibilité de détection se traduit par les indices de séparation entre les vecteurs signatures de défaillances et la signature de bon fonctionnement (vecteur nul). De plus il est possible de caractériser le risque de fausse alarme ou de non-détection en considérant le minimum de ces indices.

Pour notre exemple, les valeurs de ce critère pour les 4 structures de résidus sont dans le tableau de la figure 2.9.

Variable connue	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>4</sub>	c <sub>5</sub>
Distance au vecteur nul	0	3	3	3	3

Figure 2.11. Distances à la signature de bon fonctionnement.

Dans notre exemple on peut remarquer que la distance de défaillance de  $c_1$  et le vecteur nul est égale à 0 ce qui signifie que la surveillance ne peut pas détecter les défaillances de  $c_1$ .

Les distances entre les signatures de pannes donnent la capacité de localisation entre les différentes causes de défaillances et permettent de classer les causes de défaillances par ordre de difficulté de détection. Il est particulièrement intéressant de mettre en évidence celles qui sont peu susceptibles de nécessiter une modification de l'instrumentation. D'un point de

pc  
redon  
tenir con  
surveillance

nombre de relations de redondance analytique est élevé, plus le risque de fausse alarme est faible et meilleure sera la localisation.

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
C <sub>1</sub>		3	3	3	3
C <sub>2</sub>			2	2	0
C <sub>3</sub>				2	2
C <sub>4</sub>					2
C <sub>5</sub>					

**Figure 2.12.** Distances entre signatures de pannes.

Dans cet exemple on peut remarquer que la distance entre les signatures de défaillances de  $c_2$  et  $c_5$  est nulle : le système de surveillance ne peut donc pas faire de différence entre ces défaillances. Les signatures de défaillances de  $c_2$ ,  $c_3$  et  $c_4$  ne sont séparées au minimum que de 2 bits ce qui n'autorise aucune erreur dans la procédure de détection pour pouvoir localiser ces défaillances (pour tolérer une erreur dans la procédure de détection il aurait fallu au moins une distance de 3).

#### 4.4 Amélioration des systèmes de surveillance.

La limite principale de l'approche structurelle du système de surveillance est que les résultats obtenus constituent un idéal qui peut ne pas être atteint dans la pratique. En effet, il est tout à fait imaginable qu'une cause de défaillance ne puisse agir suffisamment pour influencer de manière significative un résidu. De plus les actions des différentes défaillances peuvent être fortement corrélées. Pour se rapprocher des signatures de défaillance désirées, la génération de résidus spécialisés maximise la sensibilité aux défaillances présentes dans la structure du résidu et minimise l'influence de celles qui n'y apparaissent pas [STAROSWIECKI 93]

Les résultats issus du système de surveillance doivent être mis en relation avec leur interprétation fonctionnelle pour les présenter aux opérateurs. Ainsi on relie chaque relation de redondance analytique à un sous-système surdéterminé qui a permis son élaboration, pour rattacher la détection d'une défaillance au dysfonctionnement d'une partie du système. Lorsque la défaillance est parfaitement localisée, il est possible de l'interpréter directement en termes de capteur, d'actionneur ou d'élément défaillant. Lorsque cette localisation est impossible, on peut donner une interprétation fonctionnelle de la défaillance, en l'associant à une fonction d'un niveau hiérarchique supérieur qui englobe les relations du système mises en jeu dans les relations de redondance analytique réagissant à cette défaillance.

Dans le cas où plusieurs défaillances sont pas ou peu localisables, il est possible de repenser l'instrumentation afin d'augmenter les possibilités de redondance, ou de regrouper les composants du système en sous-systèmes et de tenir compte de ces regroupements dans la stratégie d'utilisation des résultats de la

## 5 CONCLUSION.

Ce chapitre a permis d'introduire les notions et les traitements nécessaires pour la mise en œuvre d'une méthodologie d'étude complète de la surveillance des systèmes industriels complexes. La conception d'un système de surveillance commence par l'étude de la structure du système, puis se poursuit par la définition de l'ensemble des relations de redondance analytique permettant de mettre en œuvre le système de surveillance, d'analyser ses performances en termes de détection et de localisation, et de définir les modifications de l'instrumentation pour les améliorer. Il est à noter que cette étude peut être faite même si un modèle précis de comportement de chaque composant n'est pas disponible ce qui permet de tenir compte de l'intégration de la surveillance d'un système dès sa phase de conception.

La méthodologie introduite dans ce chapitre a été appliquée dans quatre cas concrets : un site de production d'électricité [**DECLERCK** 91], un site de déshydratation de gaz naturel [**CASSAR** 91], une unité de traitement de pétrole brut [**CASSAR** 92a] et un système de serrage hydraulique [**VILAIN** 98]. Sur cette dernière installation, des tests ont été réalisés sur un simulateur, avant une implantation sur site. Les résultats obtenus dans ces trois dernières applications ont montré qu'un ensemble de résidus, générés et évalués par une approche structurelle, permet de surveiller efficacement une installation.

# ***CHAPITRE III : CONCEPTS POUR LE PLACEMENT DE CAPTEURS***

## **1 INTRODUCTION.**

Le second chapitre a montré qu'il était possible d'élaborer un système de surveillance en s'appuyant sur l'analyse structurelle d'un système. De plus nous avons mis en évidence que les performances du système de surveillance, en termes de détection et de localisation des défaillances, dépendent directement de l'instrumentation du système à surveiller. Nous allons donc présenter dans ce chapitre les travaux que nous avons effectués pour définir une méthode de placement de capteurs. Elle permettra la construction d'un système de surveillance détectant et localisant les défaillances de composants d'un système industriel définis dans un cahier des charges de surveillance. Notre approche repose sur un certain nombre de concepts qui seront abordés dans la seconde partie de ce chapitre en justifiant leur utilisation.

Dans un premier temps, nous nous attarderons sur le problème de la représentation de la structure du système à l'aide d'un graphe biparti orienté. L'orientation du graphe permet de prendre en compte la non-inversibilité des relations par rapport à certaines variables et d'en tenir compte lors de la phase de génération des résidus. De cette façon, nous apporterons une solution aux problèmes de calculabilité des variables et de possibilité d'estimation multiple de celles-ci. Cette nouvelle méthode de génération des résidus s'appuie sur le graphe biparti orienté de la structure du système et sur la construction d'arbres de résolution en ET/OU. Dans un second temps, nous donnerons une définition généralisée de la notion de défaillance. Cette définition nous permettra de présenter une méthode unique de placement de capteurs conduisant à l'élaboration d'un système de surveillance détectant et localisant les défaillances de tous types de composants (capteurs, actionneurs, système). Nous proposerons ensuite une nouvelle définition de la structure des résidus. A partir de celle-ci, nous introduirons une nouvelle définition des vecteurs signatures de défaillances ainsi que les critères de capacité de détection (détectabilité) et de localisation (localisabilité) des défaillances. Les critères de détectabilité et de localisabilité vont servir de base à l'élaboration de deux algorithmes de placement de capteurs qui seront présentés dans le quatrième chapitre de ce mémoire.

Pour illustrer les différents propos de ce chapitre, nous utiliserons l'exemple présenté au chapitre II (figure 2.1).

## **2 LA GENERATION DES RESIDUS.**

Le premier chapitre a montré que la surveillance des systèmes industriels pouvait s'effectuer grâce à l'utilisation d'indicateurs appelés résidus. L'approche par analyse structurelle utilise une méthode de génération de résidus qui s'appuie sur la décomposition canonique de la matrice d'incidence du système. Cette décomposition permet l'écriture d'un ensemble initial de résidus. L'écriture de l'ensemble des résidus du système peut être obtenue en effectuant des combinaisons linéaires des structures

des résidus de l'ensemble initial obtenu après la décomposition canonique (Cf. chapitre II-3.2).

Il s'avère que cette méthode de génération des résidus est mal adaptée dans le cas de systèmes où certaines relations ne présentent pas d'inversibilité par rapport à toutes les variables dont elles dépendent (Cf. chapitre II-3.2.2). En effet, il n'est pas possible de visualiser les inversibilités des relations en écrivant les structures de résidus telles qu'elles ont été définies. D'autre part, il peut arriver que cette méthode de génération des résidus ne soit pas exhaustive. En effet en effectuant les combinaisons linéaires des structures de résidus, on ne tient pas compte des possibilités d'évaluation multiple d'une même variable lorsque celle-ci intervient plusieurs fois dans l'expression du résidu.

Pour illustrer ce phénomène réécrivons l'expression simplifiée des deux résidus obtenus après la décomposition canonique du système :

$$\begin{aligned} r_1 : G_5(G_7^{-1}(c_4)) - c_3 &= 0 \\ r_2 : G_4^{-1}(G_5^{-1}(c_3)) + G_6(G_7(G_5^{-1}(c_3))) - c_2 - c_5 &= 0 \end{aligned}$$

Une combinaison de ces deux résidus consiste à exprimer  $c_3$  en fonction de  $c_4$  à partir de  $r_1$  et de remplacer  $c_3$  dans  $r_2$  par cette expression. De cette façon on obtient un troisième résidu  $r_3$  :

$$\begin{aligned} r_3 : G_4^{-1}(G_5^{-1}(G_5(G_7^{-1}(c_4)))) + G_6(G_7(G_5^{-1}(G_5(G_7^{-1}(c_4)))))) - c_2 - c_5 &= 0 \\ r_3 : G_4^{-1}((G_7^{-1}(c_4))) + G_6(G_7((G_7^{-1}(c_4)))) - c_2 - c_5 &= 0 \end{aligned}$$

Etant donné que  $c_3$  apparaît deux fois dans l'expression de  $r_2$ , on peut noter qu'il existe un quatrième résidu qui peut être obtenu en ne remplaçant qu'une fois  $c_3$  par son expression en fonction de  $c_4$  :

$$r_4 : G_4^{-1}(G_5^{-1}(G_5(G_7^{-1}(c_4)))) + G_6(G_7(G_5^{-1}(c_3))) - c_2 - c_5 = 0$$

La structure du résidu  $r_4$  ainsi obtenu s'écrit :  $[0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^t$ . On a donc montré que l'on pouvait générer tous les résidus sans devoir effectuer toutes les décompositions canoniques du système.

Le problème de la prise en compte des non-inversibilités des relations et des possibilités d'estimation multiple des variables nous a conduit à introduire une nouvelle méthode de génération des résidus. Elle s'appuie sur le graphe biparti orienté représentant la structure du système et sur la construction d'arbres de résolution en ET/OU.

## 2.1 Représentation de la structure par un graphe biparti orienté.

Dans le second chapitre nous avons vu que nous pouvions représenter la structure d'un système grâce à un graphe biparti. Cette représentation possède l'avantage de pouvoir figurer indirectement les problèmes liés à la calculabilité des variables inconnues et à la non-inversibilité des relations. Pour y parvenir il suffit d'orienter judicieusement des arcs du graphe biparti.

### 2.1.1 Inversibilité d'une relation par rapport à une variable.

Considérons une relation  $f_i \in F$ , dépendant d'un sous-ensemble de  $n$  variables  $Z_{f_i} \subset Z$  ( $Z_{f_i} = \{z_1, \dots, z_j, \dots, z_n\}$ ) (Ceci correspond à notre cas de figure car toutes les relations s'écrivent toujours sous la forme :  $f_i(z_1, \dots, z_j, \dots, z_n) = 0$ ). La propriété d'inversibilité de la relation  $f_i$  par rapport à la variable  $z_j$  s'écrit :

$$f_i(z_1, \dots, z_j, \dots, z_n) \text{ est inversible par rapport à } z_j \Leftrightarrow \exists \text{ une application } \varphi_{ij} / z_j = \varphi_{ij}(Z_{f_i} - \{z_j\})$$

Pour des raisons de commodité, l'application  $\varphi_{ij}(Z_{f_i} - \{z_j\})$ , sera désormais notée  $f_i^{-1}(Z_{f_i} - \{z_j\})$ .

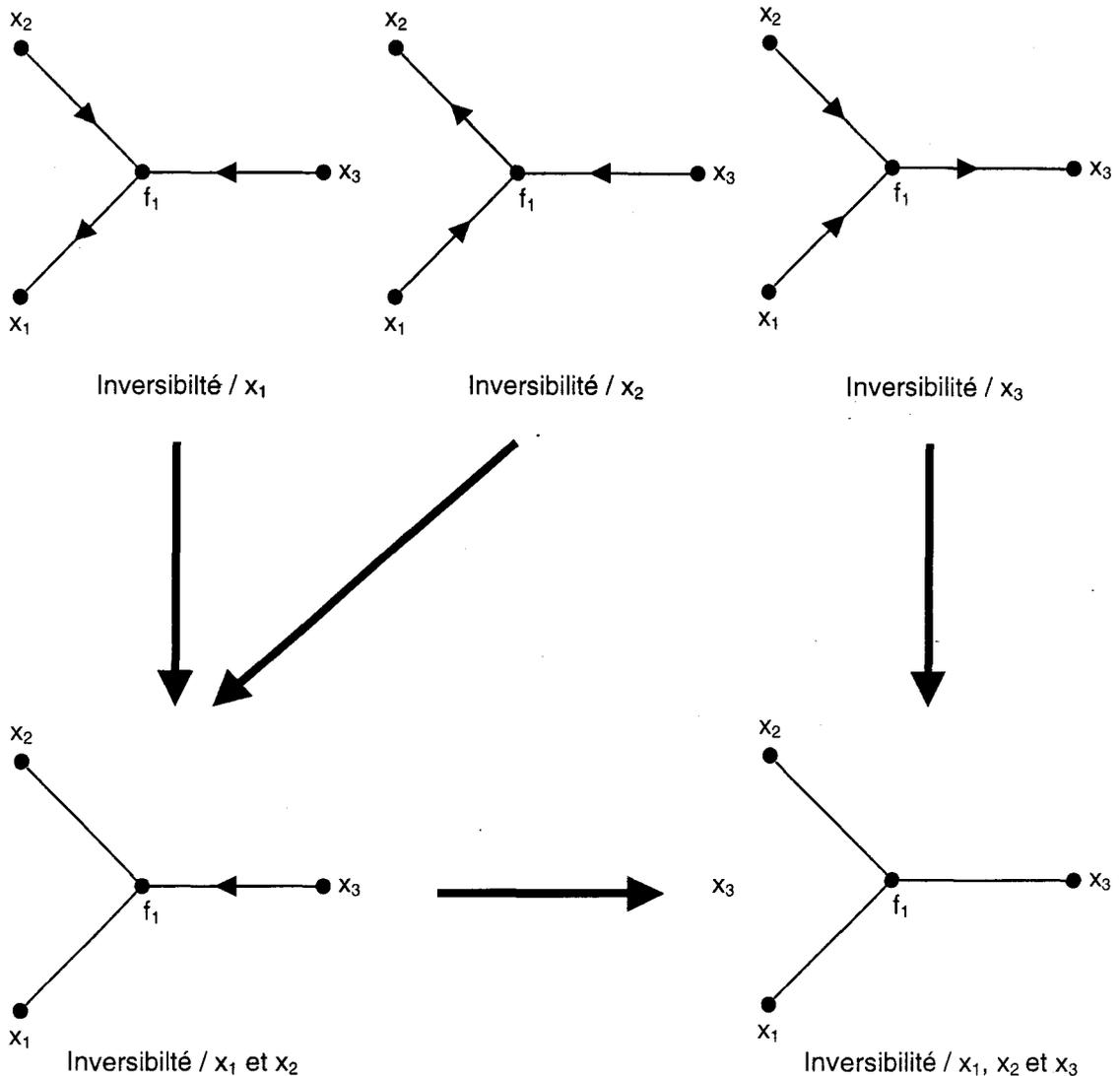
La notion d'inversibilité d'une relation par rapport à une variable est équivalente à la notion de calculabilité de cette variable à partir de cette relation. Le calcul nécessite l'estimation de toutes les autres variables dont l'évolution est contrainte par cette relation. L'estimation d'une variable est possible soit parce qu'elle appartient à l'ensemble des variables connues, soit parce qu'elle peut être évaluée à partir d'autres variables connues et d'un certain nombre de relations. Par conséquent, la calculabilité d'une variable  $z_j$  à partir d'une relation  $f_i$  et des valeurs des variables du sous-ensemble  $Z_{f_i} - \{z_j\}$  sous-entend l'existence d'une relation  $\varphi_{ij}$  telle que  $z_j = \varphi_{ij}(Z_{f_i} - \{z_j\})$ , et réciproquement si la relation  $\varphi_{ij}$  existe, alors par définition la relation  $f_i$  est inversible par rapport à la variable  $z_j$ .

### 2.1.2 Graphe biparti orienté.

Cette notion de calculabilité d'une variable à partir d'une relation ou d'inversibilité d'une relation par rapport à une variable peut figurer sur le graphe biparti de la structure du système en orientant correctement les arcs du graphe. Pour des raisons pratiques nous avons décidé d'utiliser la convention suivante :

Considérons  $f_i$  une relation mettant en jeu un sous-ensemble de  $n$  variables  $Z_{f_i} \subset Z$  ( $Z_{f_i} = \{z_1, \dots, z_j, \dots, z_n\}$ ). Pour montrer que la variable  $z_j$  est calculable par la relation  $f_i$ , lorsque l'on peut estimer les variables du sous-ensemble  $Z_{f_i} - \{z_j\}$ , ou que  $f_i$  est inversible par rapport à  $z_j$ , il suffit d'orienter l'arc  $(f_i, z_j)$  de  $f_i$  vers  $z_j$  et tous les arcs  $(z_k, f_i)$  ( $z_k \in Z_{f_i} - \{z_j\}$ ) de  $z_k$  vers  $f_i$ . La représentation de toutes les inversibilités possibles de  $f_i$  est obtenue en répétant cette procédure pour toutes les variables du sous-ensemble  $Z_{f_i}$ . Lorsque au cours de cette procédure on est amené à orienter les arcs  $(z_j, f_i)$  et  $(f_i, z_j)$ , on représente alors simplement l'arête  $(f_i, z_j)$  sans orientation. Cela signifie que  $z_j$  peut être estimée à partir de  $f_i$  et que  $z_j$  doit être estimée par un autre chemin pour pouvoir estimer par  $f_i$  les autres variables dont elle contraint l'évolution.

La figure 3.1 détaille la construction du graphe biparti indiquant les différentes possibilités d'inversibilité d'une relation  $f_1$  dépendant de trois variables  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$ . Pour construire ce graphe, il suffit de superposer les graphes bipartis orientés de base matérialisant l'inversibilité de la relation  $f_1$  par rapport à chaque variable dont elle dépend. Si au cours de cette superposition, un lien s'avère être orienté dans les deux sens, on représente alors l'arrête correspondante.



**Figure 3.1.** Graphes matérialisant les inversibilités possibles d'une relation  $f_1$ .

Lorsque aucun arc d'un graphe biparti n'est orienté cela signifie que toutes les relations du système sont inversibles par rapport à toutes les variables dont elles contraignent l'évolution. C'est le cas du graphe biparti de la figure 2.4 qui matérialise la structure du système présenté en exemple. En réalité ce cas de figure ne se présente que dans quelques cas de systèmes particuliers.

La plupart des systèmes industriels possèdent des composants dont la modélisation comportementale est représentée par un système différentiel ou par des équations non linéaires (Cf. chapitre II-3.2.2). Dans ce cas de figure il arrive fréquemment que les relations ne soit pas inversibles par rapport à toutes les variables dont elles contraignent l'évolution.

Pour refléter cette réalité et à titre d'exemple nous allons reprendre le système défini au second chapitre (figure 2.1), en considérant que les relations

d'entrée-sortie  $G_4$ ,  $G_5$  et  $G_7$  représentent uniquement des gains statiques. Dans ces conditions les relations  $f_8$ ,  $f_9$  et  $f_{11}$  sont inversibles par rapport à leurs variables d'entrée et de sortie.

A l'inverse nous allons considérer que les relations d'entrée-sortie  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  et  $G_4$  modélisent des systèmes différentiels et non inversibles ou non linéaires. Dans ce cas, les relations  $f_2$ ,  $f_4$ ,  $f_6$  et  $f_{10}$  ne sont inversibles que par rapport à leur variable de sortie. Sous ces conditions, nous obtenons alors le graphe biparti orienté présenté dans la figure 3.2.

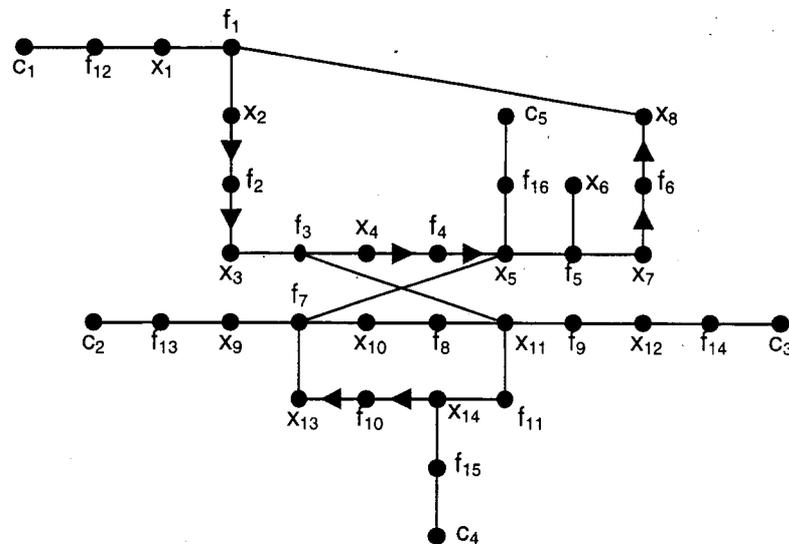


Figure 3.2. Graphe biparti orienté de la structure du système.

## 2.2 Génération des résidus par les arbres de résolution.

Le graphe biparti orienté peut servir de base à l'élaboration d'une nouvelle méthode de génération des résidus exhaustive qui tient alors compte des problèmes de calculabilité des variables ainsi que de leur estimation multiple (Cf. chapitre III-2). Cette méthode consiste à construire un arbre de résolution en ET/OU pour chaque variable connue du système. Les différentes solutions de cet arbre correspondent alors aux différents résidus qu'il est possible d'écrire et dans lesquels apparaît la variable connue, ayant servi de base à la construction de l'arbre [CARPENTIER 96a]. La construction de l'arbre de résolution en ET/OU s'effectue à partir d'un algorithme récursif obéissant aux règles suivantes :

- On parcourt le graphe biparti orienté représentant la structure du système en partant de la variable connue servant de base à la construction de l'arbre.
- Les arcs orientés sont suivis dans le sens inverse de leur orientation. Ceci s'explique par le fait que l'arbre doit indiquer les différents chemins permettant d'évaluer une variable à partir d'une relation.

- Lorsque l'on atteint un nœud correspondant à la relation  $f_i$  en venant d'un nœud correspondant à la variable  $z_j$ , on doit vérifier que toutes les variables inconnues de  $Z_{f_i-\{z_j\}}$  peuvent être évaluées. Pour y parvenir on poursuit l'algorithme dans le but de déterminer un ensemble de chemins permettant d'évaluer les variables inconnues de l'ensemble  $Z_{f_i-\{z_j\}}$  à partir des valeurs de variables connues. Lorsque l'on a déterminé cet ensemble de chemins, on place dans l'arbre la relation  $f_i$  et les variables de l'ensemble  $Z_{f_i-\{z_j\}}$  en matérialisant les liens entre cette relation et ces variables par des branches en ET. En effet, il faut pouvoir évaluer chaque variable inconnue de  $Z_{f_i-\{z_j\}}$  pour pouvoir évaluer la variable  $z_j$  par la relation  $f_i$ .

S'il existe au moins une variable inconnue de  $Z_{f_i-\{z_j\}}$  ne pouvant pas être évaluée de cette façon, la branche de l'arbre en cours de traitement est alors supprimée car il est alors impossible d'évaluer la variable  $z_j$  en utilisant la relation  $f_i$ .

- Lorsque l'on atteint un nœud correspondant à la variable inconnue  $z_j$  en venant d'un nœud correspondant à la relation  $f_i$ , il faut rechercher parmi l'ensemble des relations contraignant l'évolution de  $z_j$  différentes de  $f_i$  notées  $F_{z_j-\{f_i\}}$  le sous-ensemble de relations qui permet d'évaluer  $z_j$ . Pour y parvenir on poursuit l'algorithme. Dans le cas où une ou plusieurs relations de  $F_{z_j-\{f_i\}}$  permettent l'évaluation de la variable  $z_j$ , elles sont placées dans l'arbre et les liens entre  $z_j$  et ces relations sont matérialisés par des branches en OU. En effet ces différentes branches indiquent les différents chemins permettant d'évaluer  $z_j$ .

Si aucune relation de  $F_{z_j-\{f_i\}}$  ne permet l'évaluation de  $z_j$ , la branche de l'arbre en cours de traitement est alors supprimée car il est alors impossible d'évaluer  $z_j$  par une autre relation que  $f_i$ .

- La construction d'une branche de l'arbre s'interrompt lorsque l'on atteint une variable connue  $c_i \in C$ . La branche ainsi construite représente une manière d'évaluer les différentes variables apparaissant dans celle-ci à partir de la variable connue  $c_i$ .
- La dernière règle à respecter consiste à éviter d'effectuer des résolutions implicites de relations. Pour y parvenir on coupera toutes les branches présentant une boucle. Une boucle se caractérise par le fait que lorsqu'on étudie la possibilité d'évaluer une variable par une relation, la poursuite de l'algorithme nous amène à nouveau à évaluer cette même variable par cette même relation.

Les figures 3.3 et 3.4 montrent les arbres de résolution en ET/OU construits à partir des variables connues  $c_2, c_3, c_4$  et  $c_5$  et du graphe biparti orienté du système de la figure 3.2.

Il n'est pas possible de construire d'arbre à partir de la variable connue  $c_1$  car les chaînes de calcul utilisant  $c_1$  utilisent aussi la variable inconnue  $x_6$  qui ne peut être évaluée puisqu'il s'agit d'une entrée inconnue.

Dans une seconde phase, on extrait de l'arbre ainsi construit les différentes solutions. La recherche des différentes solutions d'un arbre de résolution en ET/OU constitue un problème classique de l'intelligence artificielle [FARRENY 86]. A chaque solution d'un arbre correspond un couplage complet sur la structure du système. Il permet d'écrire une relation ne faisant intervenir que des variables connues et des relations du système : nous sommes par définition en présence d'une relation de redondance analytique à partir de laquelle nous allons pouvoir calculer un résidu.

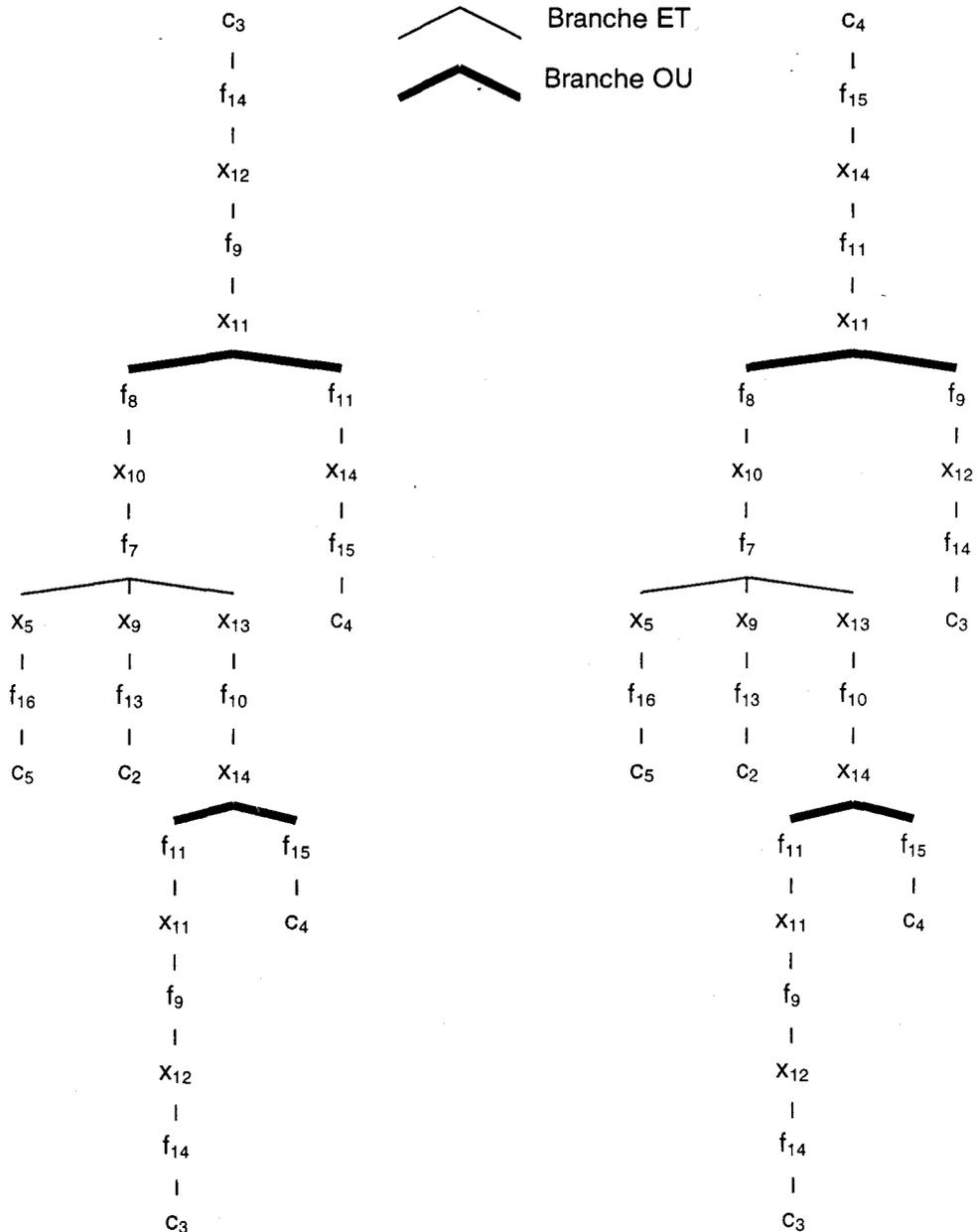


Figure 3.3. Arbres de résolution en ET/OU construits à partir de  $c_3$  et  $c_4$

Pour obtenir les différentes solutions d'un arbre, il suffit de le parcourir en partant de la variable connue ayant servi de base à sa construction et en évaluant les différentes variables inconnues que l'on rencontre sur le parcours. Les divergences en OU, toujours situées après une variable inconnue, indiquent les différents chemins de calcul possibles permettant l'évaluation de cette variable (le premier arbre de la figure 3.3 montre que l'on peut par exemple évaluer la variable  $x_{11}$  en utilisant soit la relation  $f_8$ , soit la relation  $f_{11}$ ).

Les divergences en ET, toujours situées après une relation, désignent les différentes variables inconnues qu'il faut évaluer pour pouvoir obtenir une valeur de la variable inconnue située avant cette relation (le premier arbre de la figure 3.3 montre que pour évaluer la variable inconnue  $x_{10}$  en utilisant la relation  $f_7$ , il faut pouvoir évaluer les variables inconnues  $x_5$ ,  $x_9$  et  $x_{13}$ ).

Il est à noter que pour un arbre donné nous obtenons l'ensemble des résidus qu'il est possible d'écrire à partir de la variable connue servant de base à la construction de l'arbre. En recherchant toutes les solutions des arbres construits à partir de chaque variable connue du système, il est donc possible de générer l'ensemble R des résidus du système.

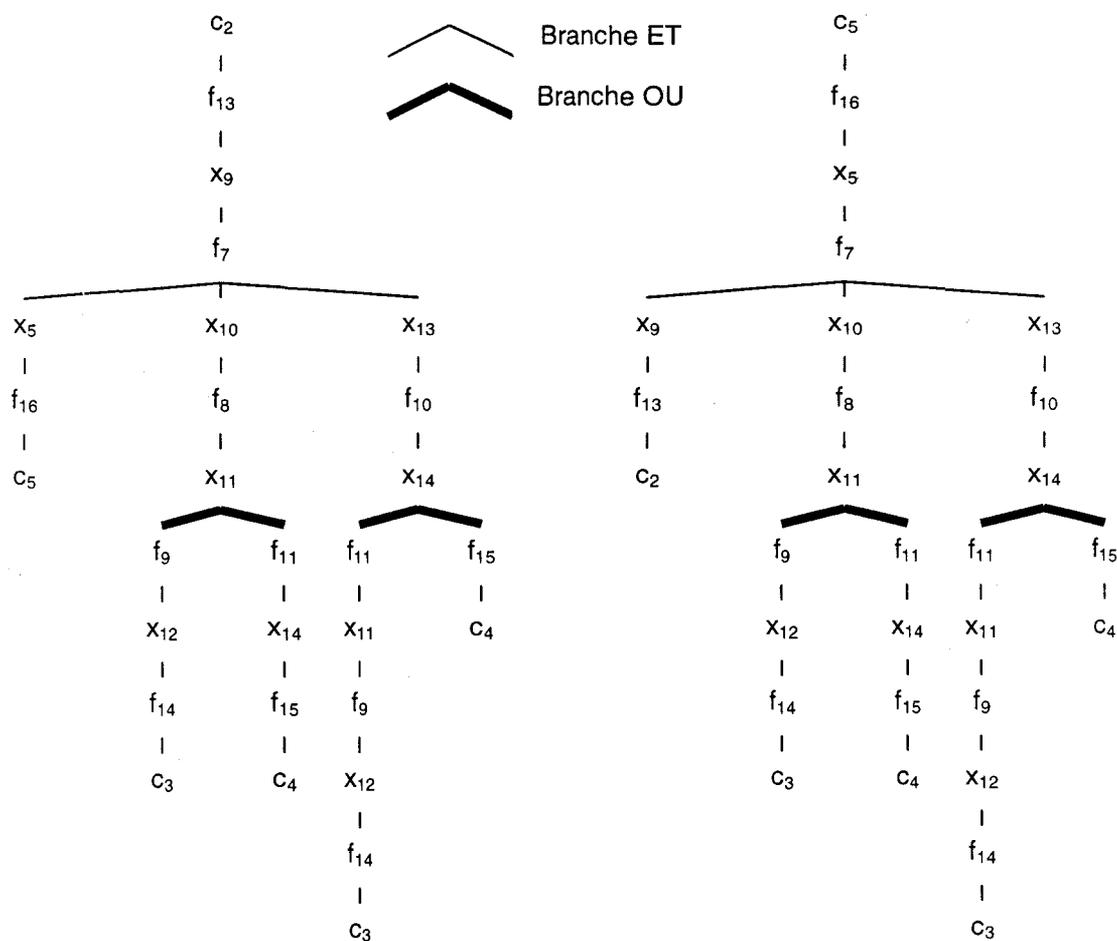


Figure 3.4. Arbres de résolution en ET/OU construits à partir de  $c_2$  et  $c_5$ .

Dans notre exemple, les arbres construits à partir des variables connues  $c_2$  et  $c_5$  (figure 3.4) possèdent 2 divergences en OU n'appartenant pas à la même branche : ces deux arbres possèdent donc 4 solutions différentes permettant l'écriture de 4 résidus. En ce qui concerne les arbres construits à partir des variables connues  $c_3$  et  $c_4$  (figure 3.2) les deux divergences en OU appartiennent à une même branche ce qui permet d'obtenir 3 solutions différentes par arbre et donc l'écriture de 3 résidus. L'ensemble R des résidus pouvant être générés à partir de la structure du système contient au total  $4 + 4 + 3 + 3 = 14$  résidus différents. Ces résidus sont indiqués dans le tableau de la figure 3.5.

Par construction, nous avons tenu compte de toutes les inversibilités possibles des relations pour obtenir ces 14 résidus. Ceci explique que parmi l'ensemble des résidus ainsi générés, il existe des résidus qui ne diffèrent que par l'inversion de certaines relations : c'est le cas des résidus  $r_{11}$  et  $r_{12}$ . Les expressions analytiques de ces résidus sont différentes mais ils possèdent la même structure car ils font intervenir les mêmes relations et les mêmes variables connues. On peut donc dire qu'ils sont structurellement équivalents.

Résidu N°	Arbre construit à partir de :	Expression du résidu
$r_1$	$C_2$	$f_{13}(C_2, f_7^{-1}(f_{16}^{-1}(C_5), f_8^{-1}(f_9^{-1}(f_{14}^{-1}(C_3))))), f_{10}^{-1}(f_{15}^{-1}(C_4))) = 0$
$r_2$	$C_2$	$f_{13}(C_2, f_7^{-1}(f_{16}^{-1}(C_5), f_8^{-1}(f_9^{-1}(f_{14}^{-1}(C_3))))), f_{10}^{-1}(f_{11}^{-1}(f_9^{-1}(f_{14}^{-1}(C_3)))))) = 0$
$r_3$	$C_2$	$f_{13}(C_2, f_7^{-1}(f_{16}^{-1}(C_5), f_8^{-1}(f_{11}^{-1}(f_{15}^{-1}(C_4))))), f_{10}^{-1}(f_{15}^{-1}(C_4))) = 0$
$r_4$	$C_2$	$f_{13}(C_2, f_7^{-1}(f_{16}^{-1}(C_5), f_8^{-1}(f_{11}^{-1}(f_{15}^{-1}(C_4))))), f_{10}^{-1}(f_{11}^{-1}(f_9^{-1}(f_{14}^{-1}(C_3)))))) = 0$
$r_5$	$C_5$	$f_{16}(C_5, f_7^{-1}(f_{13}^{-1}(C_2), f_{10}^{-1}(f_{15}^{-1}(C_4))), f_8^{-1}(f_9^{-1}(f_{14}^{-1}(C_3)))))) = 0$
$r_6$	$C_5$	$f_{16}(C_5, f_7^{-1}(f_{13}^{-1}(C_2), f_{10}^{-1}(f_{15}^{-1}(C_4))), f_8^{-1}(f_{11}^{-1}(f_{15}^{-1}(C_4)))))) = 0$
$r_7$	$C_5$	$f_{16}(C_5, f_7^{-1}(f_{13}^{-1}(C_2), f_{10}^{-1}(f_{11}^{-1}(f_9^{-1}(f_{14}^{-1}(C_3))))), f_8^{-1}(f_9^{-1}(f_{14}^{-1}(C_3)))))) = 0$
$r_8$	$C_5$	$f_{16}(C_5, f_7^{-1}(f_{13}^{-1}(C_2), f_{10}^{-1}(f_{11}^{-1}(f_9^{-1}(f_{14}^{-1}(C_3))))), f_8^{-1}(f_{11}^{-1}(f_{15}^{-1}(C_4)))))) = 0$
$r_9$	$C_3$	$f_{14}(C_3, f_9^{-1}(f_8^{-1}(f_7^{-1}(f_{16}^{-1}(C_5), f_{13}^{-1}(C_2), f_{10}^{-1}(f_{15}^{-1}(C_4)))))) = 0$
$r_{10}$	$C_3$	$f_{14}(C_3, f_9^{-1}(f_8^{-1}(f_7^{-1}(f_{16}^{-1}(C_5), f_{13}^{-1}(C_2), f_{10}^{-1}(f_{11}^{-1}(f_9^{-1}(f_{14}^{-1}(C_3)))))) = 0$
$r_{11}$	$C_3$	$f_{14}(C_3, f_9^{-1}(f_{11}^{-1}(f_{15}^{-1}(C_4)))) = 0$
$r_{12}$	$C_4$	$f_{15}(C_4, f_{11}^{-1}(f_9^{-1}(f_{14}^{-1}(C_3)))) = 0$
$r_{13}$	$C_4$	$f_{15}(C_4, f_{11}^{-1}(f_8^{-1}(f_7^{-1}(f_{13}^{-1}(C_2), f_{10}^{-1}(f_{15}^{-1}(C_4))), f_{16}^{-1}(C_5)))))) = 0$
$r_{14}$	$C_4$	$f_{15}(C_4, f_{11}^{-1}(f_8^{-1}(f_7^{-1}(f_{13}^{-1}(C_2), f_{10}^{-1}(f_{11}^{-1}(f_9^{-1}(f_{14}^{-1}(C_3))))), f_{16}^{-1}(C_5)))))) = 0$

Figure 3.5. Les 14 résidus pouvant être générés à partir du système.

### 3 LA STRUCTURATION DES RESIDUS.

Notre objectif étant de concevoir un système de surveillance permettant de traiter la surveillance de n'importe quel type de composant de la même manière, nous proposons dans un premier temps, une définition généralisée de la notion de défaillance. Cette nouvelle définition des défaillances nous conduit dans un second temps à une structuration originale des résidus.

### 3.1 Définition généralisée des défaillances.

L'analyse des différents travaux effectués dans le domaine de la surveillance montre que les méthodes utilisées ont souvent été conçues pour détecter les défaillances d'un type particulier de composants. A titre d'exemple on peut citer le cas des systèmes à transport de matière ou d'énergie où la surveillance ne s'applique généralement qu'aux capteurs ou encore les méthodes basées sur la construction de graphes orientés signés de cause à effet, qui ne visent qu'à surveiller les composants internes du système (Cf. chapitre I).

Pour remédier à ces limitations et pour obtenir une méthode de surveillance permettant de détecter et de localiser les défaillances de tous types de composants (aussi bien les capteurs que les actionneurs, ou tout autre élément du système), nous proposons une définition généralisée de la notion de défaillance. Cette définition repose sur la constatation que surveiller un composant d'un système correspond en réalité à surveiller la relation qui matérialise le mode de comportement normal.

Nous pouvons justifier l'utilisation de cette définition par l'explication même de la défaillance. En effet, la défaillance d'un composant se traduit par une modification de la relation matérialisant son mode de comportement. Cette modification peut se caractériser par la variation d'un ou plusieurs de ses paramètres ou par l'apparition d'un nouveau terme. De cette façon, la relation qui matérialise son mode de fonctionnement normal n'est plus vérifiée et il est alors possible de déduire la présence d'une défaillance de ce composant.

Ceci implique que les résidus qui utilisent cette relation pour l'évaluation de variables inconnues ne sont plus égaux à zéro. Il devient donc possible de détecter les défaillances de ce composant car tous les résidus utilisant la relation exprimant son fonctionnement normal vont réagir à ces défaillances. Nous n'entrerons cependant pas dans le détail des travaux concernant la sensibilité des résidus qui sortent du cadre de cette thèse.

Cette approche permet de surveiller tous types de composants. En effet la surveillance d'un capteur ou d'un actionneur revient à surveiller la relation de connaissance matérialisant la mesure ou la commande de la variable correspondante. Pour surveiller un composant interne du système on procède de la même manière en surveillant la relation modélisant son comportement lors d'un mode de fonctionnement normal [**CARPENTIER 96a**].

A titre d'exemple, la surveillance du capteur mesurant la variable  $x_{14}$ , revient en réalité à surveiller la relation  $f_{15}$  traduisant le fonctionnement correct de ce capteur matérialisé par l'expression :  $x_{14} - c_4 = 0$ . Si une défaillance, telle qu'un biais de mesure  $\alpha$ , apparaît sur ce capteur cette expression n'est plus valable car la relation exprimant le mode de fonctionnement défaillant du capteur serait :  $x_{14} - c_4 + \alpha = 0$ . Dans ces conditions les résidus utilisant cette relation ne sont plus vérifiés et deviennent différents de zéro.

De façon similaire la surveillance de la commande de la variable  $x_1$  consiste en réalité à surveiller la relation de connaissance  $f_{12}$  et la surveillance de la

relation d'entrée-sortie  $G_1$  revient à surveiller la relation  $f_2$  qui utilise son expression analytique.

### 3.2 Les structures de résidus.

Dans le chapitre III-2, nous avons présenté une méthode donnant l'expression analytique de l'ensemble des résidus pouvant être générés à partir du modèle structurel d'un système et des modèles comportementaux de ses composants. Il s'avère que pour étudier les performances d'un système de surveillance en terme de capacité de détection ou de localisation des défaillances, il n'est pas nécessaire d'écrire l'expression analytique de chaque résidu. En effet l'information utile pour cette étude se limite en fait à l'utilisation ou non d'une relation dans le calcul d'un résidu. Pour signifier cette information nous allons procéder à une structuration originale des relations de redondance analytique en fonction des relations qu'elles utilisent et non plus des variables connues.

La structuration des résidus en fonction des relations présente l'avantage de lier directement chaque cause de défaillance à la relation matérialisant le mode de comportement normal du composant incriminé, alors que dans le cas d'une structuration des résidus en fonction des variables connues, il faut associer un sous-ensemble de variables connues à chaque cause de défaillance en étudiant finement la structure du système. Afin de signifier ce lien direct, on parlera dorénavant de défaillance d'une relation ce qui sous-entendra bien entendu la défaillance du composant dont le mode de fonctionnement normal est régi par cette relation [CARPENTIER 96b].

En partant de ce principe, on peut affirmer que la structuration des résidus a pour objectif d'exprimer leur sensibilité structurelle aux défaillances des relations utilisées dans leur calcul. La sensibilité structurelle d'un résidu  $r_k \in R$  aux défaillances d'une relation  $f_i \in F$  du système peut être exprimée mathématiquement grâce à l'application binaire  $sr$  définie par :

$$sr: R \times F \rightarrow \{0,1\}$$

$$(r_k, f_i) \alpha sr(r_k, f_i) \text{ avec } \begin{cases} sr(r_k, f_i) = 1 \text{ si le résidu } r_k \text{ utilise la relation } f_i \text{ dans son calcul} \\ sr(r_k, f_i) = 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

#### 3.2.1 Représentation vectorielle de la structure d'un résidu.

La structure d'un résidu permet d'indiquer sa sensibilité ou sa robustesse aux défaillances des différentes relations du système. Ainsi la structure d'un résidu  $r_k \in R$  peut être matérialisée grâce à un vecteur binaire  $s_k$  défini par :

$$s_k = [sr(r_k, f_1), sr(r_k, f_2), \dots, sr(r_k, f_i), \dots, sr(r_k, f_n)] \text{ avec } n = \text{card}(F) \quad (3.1)$$

A titre d'exemple le tableau de la figure 3.6 indique la structure des 14 résidus générés à partir du système défini par le graphe biparti orienté de la figure 3.2. Cet exemple permet de mettre en évidence deux propriétés des structures de résidus.

Les structures de résidus indiquent de façon directe le sous-ensemble des relations du système nécessaires à leur calcul mais n'apportent aucune information quant au nombre de fois où cette relation intervient dans leur calcul (c'est par exemple le cas du résidu  $r_3$  qui utilise deux fois la relation  $f_{15}$  dans son calcul mais cela n'apparaît pas dans sa structure  $s_3$ ).

On peut aussi remarquer que plusieurs résidus peuvent avoir une même structure (représentée par le même vecteur binaire) mais leurs écritures analytiques diffèrent. Il s'agit de résidus qui utilisent le même sous-ensemble de relations pour leur calcul, mais qui n'utilisent pas les mêmes inversibilités des relations par rapport aux variables ou qui n'utilisent pas le même nombre de fois certaines relations (par exemple les résidus  $r_{11}$  et  $r_{12}$  de notre exemple possèdent la même structure de résidu mais ils diffèrent par l'utilisation d'inversibilités différentes des relations  $f_9$ ,  $f_{11}$ ,  $f_{14}$  et  $f_{15}$ ).

Résidu	Structure du résidu
$r_1$	$s_1 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1]^t$
$r_2$	$s_2 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1]^t$
$r_3$	$s_3 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1]^t$
$r_4$	$s_4 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1]^t$
$r_5$	$s_5 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1]^t$
$r_6$	$s_6 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1]^t$
$r_7$	$s_7 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1]^t$
$r_8$	$s_8 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1]^t$
$r_9$	$s_9 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1]^t$
$r_{10}$	$s_{10} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1]^t$
$r_{11}$	$s_{11} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0]^t$
$r_{12}$	$s_{12} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0]^t$
$r_{13}$	$s_{13} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1]^t$
$r_{14}$	$s_{14} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1]^t$

Figure 3.6. Structure des 14 résidus pouvant être générés à partir du système.

### 3.2.2 Représentation graphique de la structure d'un résidu.

Une autre façon de représenter la structure d'un résidu est d'utiliser un graphe biparti. Ce graphe correspond en fait à un sous-graphe biparti partiel. L'ensemble de ses sommets correspond aux variables inconnues qu'il faut évaluer, aux variables connues et aux relations nécessaires à son calcul. L'ensemble des arcs correspondant quant à lui aux chemins utilisés pour estimer les différentes variables inconnues nécessaires au calcul du résidu. Cette représentation est plus riche que la représentation vectorielle car elle figure non seulement les relations nécessaires au calcul du résidu mais aussi les inversibilités des relations et les variables connues prises en compte pour ce calcul [CARPENTIER 96a]. Il est à noter que cette représentation graphique est équivalente à celle sous forme de chaînes alternées présentée dans le chapitre II-3.3.

La figure 3.8 donne une représentation sous forme de graphe biparti orienté de la structure du résidu  $r_5$  généré à partir du système servant d'exemple. Le graphe de la figure 3.7 permet de localiser le sous-graphe biparti partiel correspondant à la structure du résidu  $r_5$  au sein du graphe biparti représentant la structure complète du système.

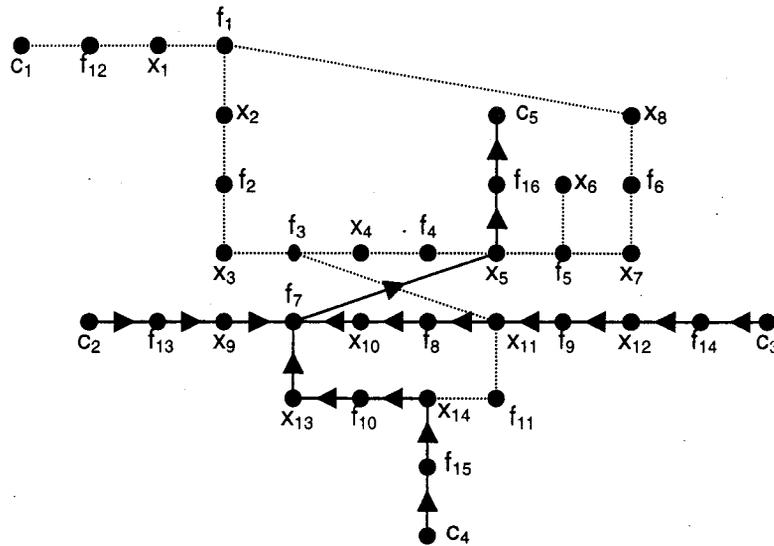


Figure 3.7 Représentation de la structure du résidu  $r_5$  par un sous-graphe partiel.

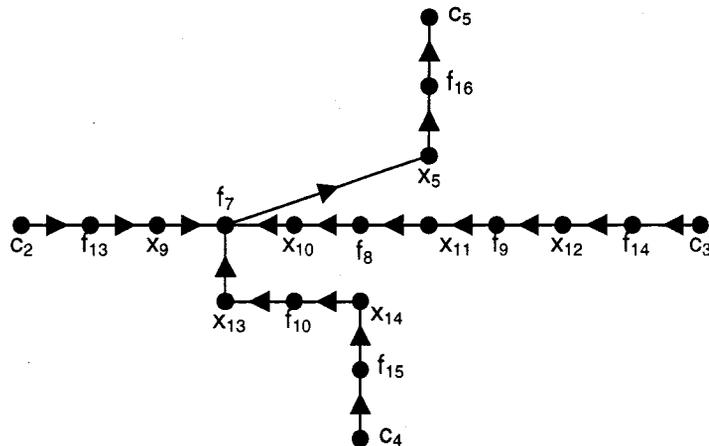


Figure 3.8. Représentation de la structure du résidu  $r_5$  par un graphe biparti orienté.

### 3.3 Classification des résidus en fonction de leur structure.

Il est possible de classer les résidus en fonction de leur structure. Cette classification consiste à partitionner l'ensemble  $R$  des résidus du système en sous-ensembles de résidus possédant la même structure. On dira que les résidus appartenant à une même classe sont structurellement équivalents. Pour comparer les structures des résidus, on utilise leur représentation vectorielle et on mesure la

distance de Hamming entre ces vecteurs. Ainsi on peut dire que deux résidus appartiennent à une même classe d'équivalence si et seulement si la distance de Hamming entre les vecteurs représentant leurs structures est nulle. Par analogie, on dira que deux résidus ne sont pas structurellement équivalents si et seulement si la distance de Hamming entre les vecteurs représentant leurs structures est non nulle [CARPENTIER 96b]

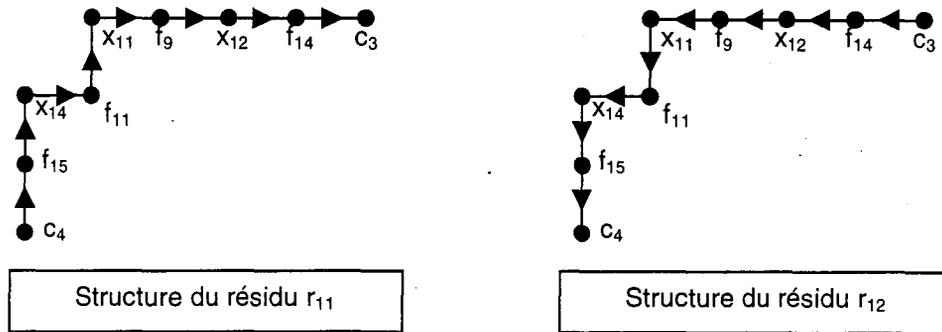


Figure 3.9. Représentation graphique des résidus  $r_{11}$  et  $r_{12}$ .

La représentation des structures de résidus sous forme de sous-graphe partiel biparti permet d'aboutir à la même classification des résidus. En effet, on peut dire que deux résidus sont structurellement équivalents si et seulement si leur représentation graphique est constituée des mêmes sous-ensembles de sommets et d'arêtes. On peut remarquer que ces structures de résidus ne diffèrent que par les orientations des arcs. En effet, les résidus d'une même classe utilisent les mêmes relations et les mêmes variables pour leur calcul mais font appel à des inversibilités de relations différentes (la figure 3.9 montre les similarités et les différences des représentations graphiques des résidus  $r_{11}$  et  $r_{12}$  qui appartiennent à une même classe).

Dans notre exemple, on peut répartir les 14 résidus dans 5 classes différentes en fonction du vecteur représentant la structure de ces résidus (figure 3.10).

Classe	Résidus appartenant à la classe	Structure des résidus de la classe
$C_1$	$\{r_1, r_5, r_9\}$	$[0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1]^t$
$C_2$	$\{r_2, r_7, r_{10}\}$	$[0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1]^t$
$C_3$	$\{r_3, r_6, r_{13}\}$	$[0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1]^t$
$C_4$	$\{r_4, r_8, r_{14}\}$	$[0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1]^t$
$C_5$	$\{r_{11}, r_{12}\}$	$[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0]^t$

Figure 3.10. Classification des résidus en fonction de leur structure.

Pour la suite de nos travaux, nous allons introduire l'ensemble  $R_d$  qui correspond à un sous-ensemble de résidus permettant d'obtenir de façon unique toutes les structures de résidus possibles. Par définition  $R_d \subset R$  et la cardinalité de  $R_d$  est égale au nombre total de classes permettant de classifier toutes les structures de

résidus. Pour construire  $R_d$  il suffit de retenir un seul résidu par classe. Le choix du résidu retenu pour chaque classe n'a pas d'importance car seule l'information indiquant les relations utilisées pour le calcul des résidus de cette classe nous intéresse pour une analyse structurale. Il est donc possible de se passer des informations relatives aux inversibilités des relations utilisées.

A chaque résidu de  $R_d$ , on associe le vecteur correspondant à la structure des résidus appartenant à la même classe que lui, ou un sous-graphe partiel engendré par la structure des résidus de sa classe (Cf. le tableau de la figure 3.10). Ce sous-graphe partiel se construit de façon similaire à celui élaboré dans le chapitre III-2.2.2 mais contrairement à ce qui a été présenté, on ne tient pas compte de l'orientation des arcs, car on se contente de matérialiser l'existence des liens entre les relations et les variables, qui sont utilisées pour calculer l'ensemble des résidus appartenant à cette classe.

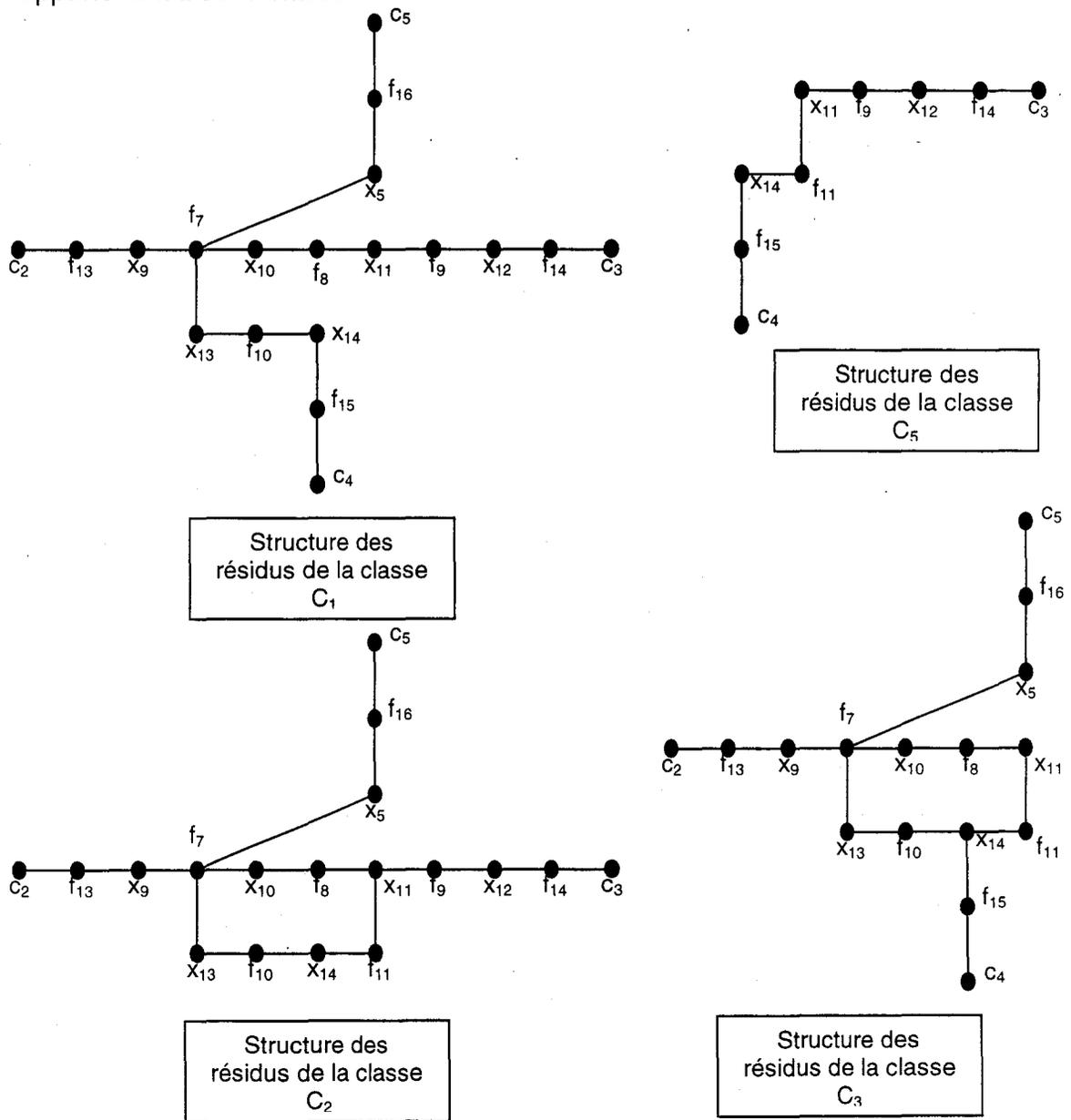


Figure 3.11a. Représentation des structures des 5 classes de résidus.

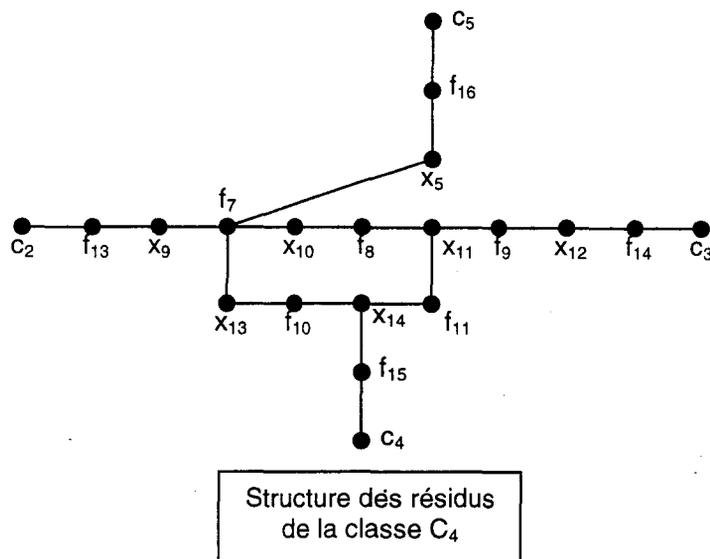


Figure 3.11b. Représentation des structures des 5 classes de résidus.

Avec le système servant d'exemple nous obtenons 5 structures de résidus différents, ainsi  $\text{card}(R_d) = 5$ . On pourra définir l'ensemble  $R_d$  par :  $R_d = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_{11}\}$  en ne retenant qu'un résidu pour chaque classe. La figure 3.11 donne une représentation sous forme de graphe biparti non orienté des 5 structures de résidus.

### 3.4 Signature d'une défaillance.

Pour chaque relation  $f_i \in F$ , il est possible de définir le sous-ensemble de résidus  $R_d$  sensibles à ses défaillances : il s'agit par définition du sous-ensemble de résidus de  $R_d$  utilisant  $f_i$  pour leur calcul. Pour ce faire, on associe à chaque relation  $f_i \in F$  le vecteur de défaillance binaire  $\underline{sd}_i$ , construit à partir de l'application binaire  $sr$  de la façon suivante : [CARPENTIER 96b]

$$\underline{sd}_i = [sr(r_1, f_i), sr(r_2, f_i), \dots, sr(r_k, f_i), \dots, sr(r_m, f_i)]^t \text{ avec } m = \text{card}(R_d) \quad (3.2)$$

Les vecteurs signatures de défaillances de chaque relation du système présenté à titre d'exemple sont répertoriés dans le tableau de la figure 3.12.

Relation	Signature de défaillance	Relation	Signature de défaillance
$f_1$	$\underline{sd}_1 = [0, 0, 0, 0, 0]^t$	$f_9$	$\underline{sd}_9 = [1, 1, 0, 1, 1]^t$
$f_2$	$\underline{sd}_2 = [0, 0, 0, 0, 0]^t$	$f_{10}$	$\underline{sd}_{10} = [1, 1, 1, 1, 0]^t$
$f_3$	$\underline{sd}_3 = [0, 0, 0, 0, 0]^t$	$f_{11}$	$\underline{sd}_{11} = [0, 1, 1, 1, 1]^t$
$f_4$	$\underline{sd}_4 = [0, 0, 0, 0, 0]^t$	$f_{12}$	$\underline{sd}_{12} = [0, 0, 0, 0, 0]^t$
$f_5$	$\underline{sd}_5 = [0, 0, 0, 0, 0]^t$	$f_{13}$	$\underline{sd}_{13} = [1, 1, 1, 1, 0]^t$
$f_6$	$\underline{sd}_6 = [0, 0, 0, 0, 0]^t$	$f_{14}$	$\underline{sd}_{14} = [1, 1, 0, 1, 1]^t$
$f_7$	$\underline{sd}_7 = [1, 1, 1, 1, 0]^t$	$f_{15}$	$\underline{sd}_{15} = [1, 0, 1, 1, 1]^t$
$f_8$	$\underline{sd}_8 = [1, 1, 1, 1, 0]^t$	$f_{16}$	$\underline{sd}_{16} = [1, 1, 1, 1, 0]^t$

Figure 3.12. Signatures de défaillances des relations.

Il est possible de classer les relations en fonction de leur vecteur signature de défaillance de façon analogue aux structures de résidus. Le résultat de ce classement est une partition de l'ensemble  $F$  des relations du système en sous-ensembles de relations possédant le même vecteur signature de défaillance. La comparaison des vecteurs de signatures de défaillances peut s'effectuer en utilisant la distance de Hamming. Ainsi deux relations appartiennent à la même classe ou au même sous-ensemble de relations si et seulement si la distance de Hamming entre leur vecteur signature de défaillance est nulle.

Du point de vue de la surveillance, on peut dire que les relations d'un même sous-ensemble ou d'une même classe sont structurellement équivalentes : leurs défaillances font réagir le même sous-ensemble de résidus et elles ne sont alors pas localisables sans connaissance complémentaire sur l'influence des défaillances.

Dans notre exemple il est possible de répartir les relations dans 5 classes différentes en fonction de leur vecteur signature de panne. Le tableau de la figure 3.13 indique ces différents sous-ensembles de relations, ainsi que le vecteur signature de panne qui leur est associé.

Sous-ensemble de relations	Signature de défaillance
$\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_{12}\}$	$[0, 0, 0, 0, 0]^t$
$\{f_7, f_8, f_{10}, f_{13}, f_{16}\}$	$[1, 1, 1, 1, 0]^t$
$\{f_9, f_{14}\}$	$[1, 1, 0, 1, 1]^t$
$\{f_{11}\}$	$[0, 1, 1, 1, 1]^t$
$\{f_{15}\}$	$[1, 0, 1, 1, 1]^t$

Figure 3.13. Répartition des relations en fonction de leur signature de défaillance.

### 3.5 Capacité de détection et de localisation.

Pour élaborer des algorithmes de placement de capteurs, il est nécessaire de définir des critères qu'il faut respecter ou optimiser. Nous avons établi les critères de capacité de détection et de capacité de localisation des défaillances d'un système de surveillance. Ils reposent sur la définition des vecteurs signatures de défaillances, vue dans la partie précédente, et serviront de base à la construction de deux algorithmes de placement de capteurs, qui seront évoqués dans le chapitre suivant.

#### 3.5.1 Capacité de détection des défaillances.

Pour exprimer le fait qu'un système de surveillance est capable de détecter les défaillances d'un composant du système, il faut et il suffit qu'il existe au moins un résidu  $r_k \in R$  qui soit sensible aux défaillances de la relation  $f_i \in F$  matérialisant un mode de comportement normal de ce composant. Ceci est équivalent à la propriété suivante : les défaillances d'une relation  $f_i \in F$  sont détectables si et seulement si le vecteur signature de défaillance  $sd_i$  de la relation  $f_i$  est différent du vecteur nul. Cette condition est bien nécessaire et suffisante. En effet s'il existe au moins un résidu  $r_k \in R$  utilisant la relation  $f_i$  alors les défaillances associées à  $f_i$  sont détectables et le

vecteur signature de défaillance  $sd_i$  est différent du vecteur nul puisque  $sr(r_k, f_i) = 1$  [CARPENTIER 96a].

Pour alléger les écritures, lorsque les défaillances associées à une relation  $f_i$  seront détectables, on dira que la relation  $f_i$  est détectable. Il est possible d'écrire la condition nécessaire et suffisante de détectabilité d'une relation  $f_i$  de deux façons équivalentes :

$$f_i \text{ est détectable} \Leftrightarrow \underline{sd}_i \neq \underline{0}$$

ou

$$f_i \text{ est détectable} \Leftrightarrow \exists r_k \in R_d / sr(r_k, f_i) = 1$$

Pour notre exemple, le tableau de la figure 3.13 nous montre que les relations  $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_{12}$  ne sont pas détectables car elles ont un vecteur signature de défaillance égal au vecteur nul, par contre les relations  $f_7, f_8, f_9, f_{10}, f_{11}, f_{13}, f_{14}, f_{15}$  et  $f_{16}$  sont détectables car leur vecteur signature de défaillance est différent du vecteur nul.

### 3.5.2 Capacité de localisation des défaillances.

Un système de surveillance est capable de localiser les défaillances d'une relation  $f_i \in F$  si et seulement si, il est capable non seulement, de détecter ces défaillances, mais aussi si le sous-ensemble des relations ayant  $\underline{sd}_i$  comme vecteur signature de défaillance est constitué d'un seul élément, à savoir  $f_i$  lui-même. En effet lorsque plusieurs relations possèdent le même vecteur signature de défaillance, c'est-à-dire qu'elles appartiennent à la même classe, il n'est pas possible de déterminer la relation appartenant à ce sous-ensemble, qui est à l'origine de la défaillance.

La condition d'unicité du vecteur signature de défaillance  $\underline{sd}_i$  de la relation  $f_i$  est nécessaire et suffisante pour pouvoir localiser ses défaillances. En effet, si les défaillances de la relation  $f_i$  sont localisables, alors non seulement  $f_i$  est détectable ( $\underline{sd}_i \neq 0$ ) mais de plus la cardinalité du sous-ensemble de relations ayant pour vecteur signature de défaillance  $\underline{sd}_i$  est égal à 1 puisque  $f_i$  est le seul élément de cette classe. Réciproquement, si une relation  $f_i$  est le seul élément d'une classe et que son vecteur signature de défaillance est non nul, cela signifie que pour toute autre relation du système  $f_j$ , il existe au moins un résidu  $r_k \in R_d$  qui soit sensible aux défaillances de  $f_i$  et insensible à celles de  $f_j$  ou qui soit insensible à celles de  $f_i$  et sensible à celles de  $f_j$ . Sous ces conditions les défaillances de la relation  $f_i$  sont localisables.

Pour alléger les écritures, lorsque les défaillances d'une relation  $f_i$  seront localisables, on dira que la relation  $f_i$  est localisable. D'un point de vue mathématique il est possible d'écrire la condition nécessaire et suffisante de localisabilité d'une relation  $f_i$  de deux façons équivalentes : [CARPENTIER 96a]

$$f_i \text{ localisable} \Leftrightarrow f_i \text{ détectable et } \text{card}(C\underline{sd}_i) = 1$$

ou

$$f_i \text{ localisable} \Leftrightarrow f_i \text{ détectable et } \forall f_j \in F / i \neq j, \exists r_k \in R_d / sr(r_k, f_i) \oplus sr(r_k, f_j) = 1$$

**Note** :  $C_{sd_i}$  représente le sous-ensemble des relations ayant  $sd_i$  comme vecteur signature de défaillance.

Pour notre exemple, la figure 3.13 montre que seules les relations  $f_{11}$  et  $f_{15}$  sont localisables, car ce sont les seules à être l'unique élément de leur classe.

Etant donné qu'il existe une hiérarchie entre les propriétés de détectabilité et de localisabilité des relations, il est possible d'effectuer une classification des relations du système en fonction de ces propriétés. Ainsi les relations vont être classées selon trois classes, à savoir les relations non détectables, les relations uniquement détectables et enfin les relations localisables.

Pour notre exemple, la classification des relations en fonction de leur propriété est présentée dans le tableau de la figure 3.14.

Sous-ensemble de relations	Propriété des relations
$\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_{12}\}$	Non détectable
$\{f_7, f_8, f_{10}, f_{13}, f_{16}, f_9, f_{14}\}$	Détectable
$\{f_{11}, f_{15}\}$	Localisable

**Figure 3.14.** Répartition des relations selon leur propriété.

## 4 CONCLUSION.

L'objectif principal de ce chapitre a été d'introduire un certain nombre de concepts et de définitions, dans le but d'élaborer une méthode de placement de capteurs, permettant de construire un système de surveillance capable de détecter ou de localiser les défaillances de tous types de composants d'un système industriel, définis dans un cahier des charges. Notre approche s'appuie sur l'analyse structurelle du système et sur la représentation de sa structure sous forme de graphe biparti. Nous avons introduit une nouvelle méthode de génération des résidus effectuée à partir d'arbres de résolutions en ET/OU afin de tenir compte des inversibilités possibles des différentes relations du système et des possibilités d'estimations multiples des variables.

Une définition généralisée de la notion de défaillance, une nouvelle structuration des résidus et une nouvelle définition des signatures de défaillances (en fonction des relations et non plus des variables) ont permis d'établir les critères de capacité de détection et de localisation des défaillances. La notion de défaillance généralisée repose sur le fait que la surveillance d'un composant d'un système consiste en réalité à surveiller la relation qui modélise un mode de comportement de ce composant. Ce formalisme permet de ne plus faire de distinction entre les différents types de défaillance (capteurs, actionneurs, système) et donc d'obtenir une méthode de placement de capteurs générale.

La structuration des résidus en fonction des relations et non pas des variables connues permet non seulement d'exprimer leur sensibilité structurelle aux

différentes défaillances en introduisant une nouvelle définition des vecteurs signatures de défaillances mais aussi d'introduire les critères de capacité de détection et de localisation des défaillances qui seront à la base de l'élaboration des deux algorithmes de placement de capteurs présentés dans le quatrième chapitre.

***CHAPITRE IV :  
PLACEMENT DE  
CAPTEURS  
POUR LA  
SURVEILLANCE***

## **1 INTRODUCTION**

Dans ce chapitre, nous présentons une méthode de placement de capteurs qui permet d'élaborer un système de surveillance détectant ou localisant les défaillances de composants d'un processus industriel complexe. Les composants à surveiller seront définis dans un cahier des charges de surveillance. Notre méthode repose sur l'analyse structurelle du système et s'appuie sur les concepts présentés dans le chapitre III. Les critères de détectabilité et de localisabilité des défaillances servent de base à la réalisation des deux algorithmes de placement de capteurs présentés dans ce chapitre. Le premier algorithme est qualifié d'exhaustif et s'applique très bien aux systèmes simples. Le second est optimisé et convient plus particulièrement aux grands systèmes. En effet, il focalise la génération des résidus sur les relations à surveiller et limite ainsi l'explosion combinatoire.

Etant donné que ces deux algorithmes donnent toutes les solutions de configuration de l'instrumentation permettant de respecter le cahier des charges de surveillance, nous introduisons, dans une seconde partie, deux critères complémentaires visant à évaluer le système de surveillance en terme de coût ou de service additionnel de surveillance. Nous appliquons une procédure de décision multicritères dans le but de dégager la solution de placement de capteurs offrant le meilleur compromis entre ces deux critères.

Pour illustrer les différents propos de ce chapitre nous utilisons à titre d'exemple le système décrit dans la figure 2.1.

## **2 LE CAHIER DES CHARGES DE SURVEILLANCE.**

Le cahier des charges de surveillance doit être rédigé en collaboration avec l'industriel qui peut être considéré comme l'expert du processus. L'élément principal du cahier des charges est la définition du sous-ensemble des composants du système que l'on souhaite surveiller pour des raisons de sécurité, de qualité de production, de maintenance, etc. On rappelle que la surveillance d'un composant implique que l'on désire détecter et localiser ses défaillances.

La définition généralisée de la notion de défaillance proposée dans le chapitre III-3.1 amène à associer à chaque composant à surveiller, la relation du système qui matérialise son mode de comportement normal. Ainsi le cahier des charges de surveillance doit permettre de définir le sous-ensemble des relations du système  $F_S \subset F$ . Autrement dit, il définit le sous-ensemble des relations à localiser au sens défini dans le chapitre III-3.5. [CARPENTIER 96a].

Le cahier des charges de surveillance doit aussi définir le sous-ensemble de variables ou grandeurs physiques devant impérativement être connues pour des raisons de contrôle et de commande. Ces informations permettent d'établir l'ensemble

de base des relations de connaissance nécessaires à la conduite du système. Il est évident que l'élaboration du système de surveillance ne doit pas aboutir à la suppression de ces relations de connaissance mais, au contraire, il doit les utiliser au maximum afin de limiter l'ajout de capteurs.

Le cahier des charges doit aussi stipuler le sous-ensemble des variables inconnues qui ne sont pas mesurables physiquement. De cette manière, les algorithmes de placement de capteurs ne sont pas amenés à ajouter des capteurs sur des variables que l'on ne peut pas mesurer.

Pour terminer, le cahier des charges doit fournir les poids qu'il convient d'associer à chaque relation du système. Ces poids permettront l'évaluation des critères de coût et de sensibilité structurelle des différents systèmes de surveillance pouvant être construits à partir des différentes configurations de capteurs solutions des algorithmes. Nous reviendrons plus en détail sur ces critères et leur évaluation dans la partie de ce chapitre qui leur est consacrée.

Le cahier des charges de surveillance que nous allons utiliser pour l'exemple choisi est le suivant :

- Nous souhaitons détecter et localiser les défaillances des composants du système régis par les relations entrées-sorties  $G_6$  et  $G_2$ . En termes de relations, cela revient à surveiller  $f_4$  et  $f_{10}$  (voir définitions page 36).
- Les variables  $x_1$ ,  $x_5$ ,  $x_9$ ,  $x_{12}$  et  $x_{14}$  doivent impérativement être connues car elles correspondent aux entrées et aux sorties du système nécessaires pour son contrôle et sa commande. De cette façon nous partons sur la base d'un système possédant cinq relations de connaissance imposées par le cahier des charges à savoir :  $f_{12}$ ,  $f_{13}$ ,  $f_{14}$ ,  $f_{15}$  et  $f_{16}$ .
- Enfin, il est précisé dans le cahier des charges que les variables  $x_6$  et  $x_7$  ne sont pas mesurables physiquement.

Nous allons appliquer notre méthode de placement de capteurs sur ce système et sous ces conditions afin de l'illustrer.

### **3 METHODE DE PLACEMENT DE CAPTEURS.**

L'objectif principal de la méthode de placement de capteurs que nous allons présenter dans ce chapitre est de concevoir un système de surveillance permettant de localiser les défaillances des relations du sous-ensemble  $F_S$  défini grâce au cahier des charges de surveillance. On rappelle que l'ajout de capteurs entraîne un accroissement du nombre de relations de connaissance et par conséquent de la surdétermination du système. Il est ainsi possible de générer plus de résidus et d'améliorer les performances du système de surveillance en terme de détectabilité et de localisabilité.

Nous pouvons établir que si toutes les relations de  $F_S$  contraignent l'évolution de variables physiquement mesurables, il est toujours possible de concevoir au moins un système de surveillance permettant de détecter et de localiser leurs défaillances. En effet, la condition suffisante de localisation des défaillances d'une relation est de placer deux capteurs sur chaque variable inconnue dont l'évolution est contrainte par celle-ci.

Considérons une relation  $f$  contraignant l'évolution de  $n$  variables  $x_1, x_2, \dots, x_n$  physiquement mesurables. En plaçant un capteur sur chacune de ces variables on introduit alors  $n$  relations de connaissance supplémentaires. Cette opération permet de générer un résidu assurant la détection des défaillances de  $f$  et des  $n$  relations de connaissance ainsi ajoutées : ce résidu ne suffit donc pas pour localiser les défaillances de  $f$ .

En plaçant deux capteurs sur chaque variable, on ajoute  $2n$  relations de connaissance. Il est alors possible de générer au moins un ensemble de  $n+1$  résidus. Cet ensemble est constitué d'un résidu sensible aux défaillances de  $f$  et de  $n$  relations de connaissance (une par variable), et de  $n$  résidus indépendants de  $f$  et sensibles, pour chacun d'entre eux, aux relations de connaissance des variables. Il permet de localiser les défaillances de  $f$  car il isole cette relation des relations de connaissance des variables dont elle contraint l'évolution. La figure 4.1 montre à titre d'exemple ces propriétés dans le cas d'une relation  $f$  contraignant l'évolution de 3 variables  $x_1, x_2$  et  $x_3$ . L'ensemble de résidus retenu est composé de quatre éléments  $\{R_0, R_1, R_2, R_3\}$  dont les structures sont représentées par les graphes bipartis de la figure 4.1. Le tableau de la figure 4.2 montre que la relation  $f$  est détectable car son vecteur signature de défaillance ainsi obtenu est différent de celui de toutes les relations de connaissance.

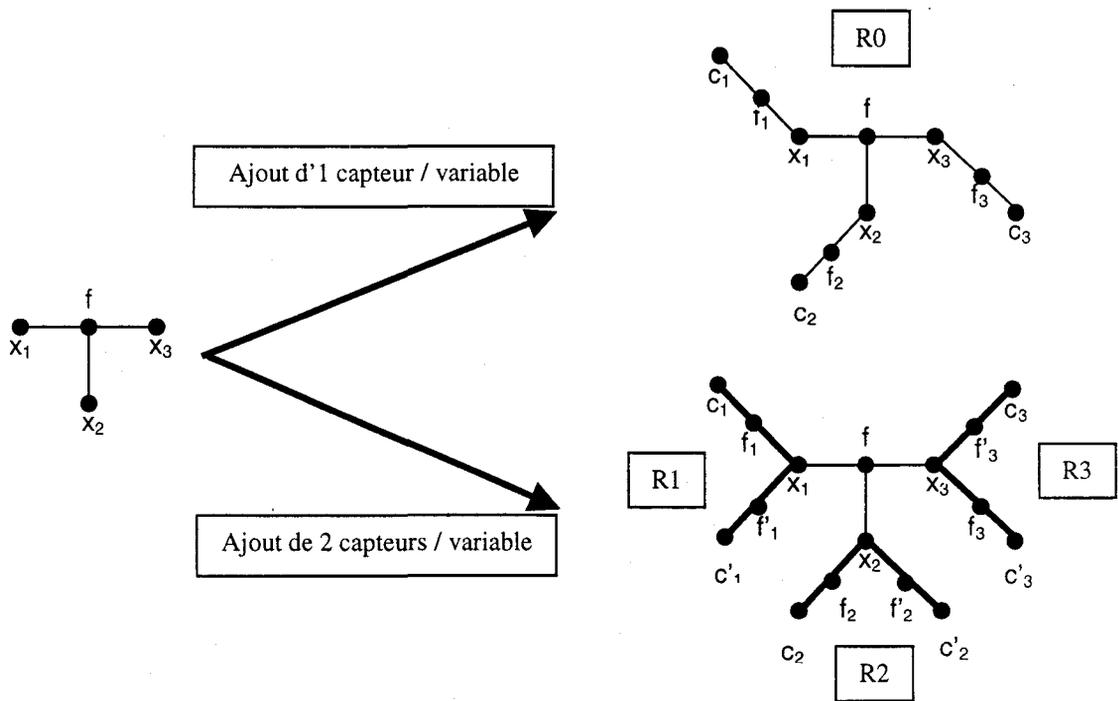


Figure 4.1. Cas d'une relation dépendant de 3 variables

	f	f <sub>1</sub>	f' <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f' <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f' <sub>3</sub>
R0	1	1	0	1	0	1	0
R1	0	1	1	0	0	0	0
R2	0	0	0	1	1	0	0
R3	0	0	0	0	0	1	1

Figure 4.2. Signature de défaillance des 7 relations du système.

La surveillance d'un composant, dont la relation matérialisant son mode de comportement normal contraint l'évolution d'au moins une variable non physiquement mesurable, est impossible. Lorsque cette variable ne correspond pas à une entrée ou une sortie du système, il est possible de réunir dans un composant global tous les composants dont les relations associées contraignent l'évolution de cette variable. Dans ce cas de figure, on peut alors détecter et localiser une défaillance de ce composant global sans pouvoir déterminer exactement le composant qui en est à l'origine.

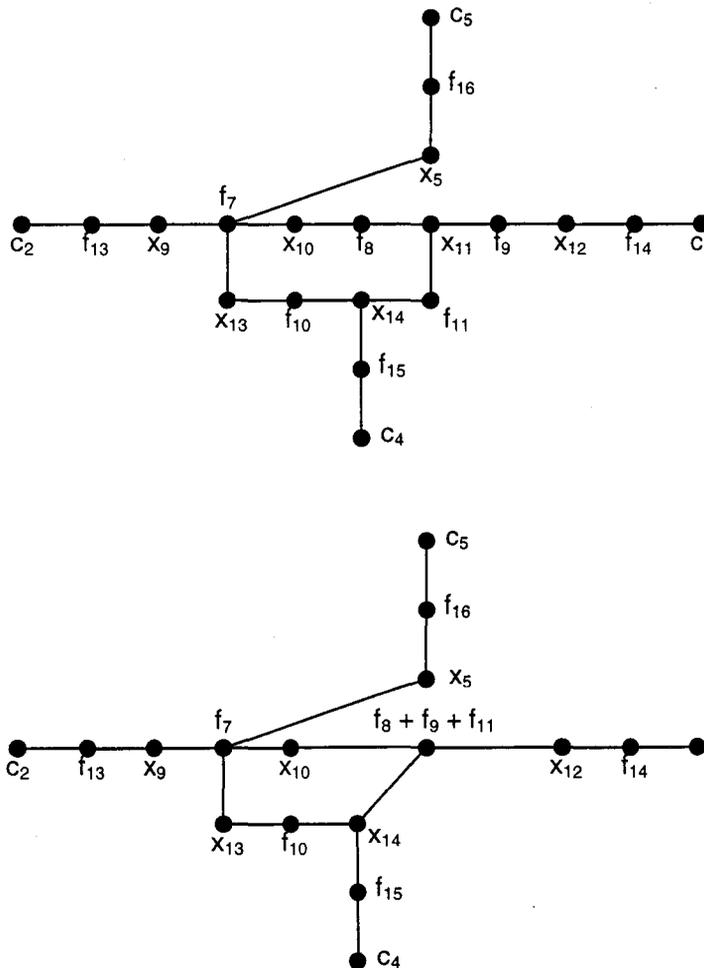


Figure 4.3. Agrégation de plusieurs composants.

La figure 4.3 présente un exemple d'agrégation de composants. Si on considère que la variable  $x_{11}$  n'est pas physiquement mesurable il est alors impossible

de surveiller les relations  $f_8$ ,  $f_9$  et  $f_{11}$ . En effet les défaillances de ces trois relations ne peuvent pas être localisables car il n'est pas possible de les isoler les unes des autres. Par contre il est possible de surveiller le composant global  $f_8 + f_9 + f_{11}$ .

Les capteurs que l'on ajoute au système peuvent eux aussi connaître des défaillances. Notre méthode de placement de capteurs prend en compte cette possibilité en isolant les relations à surveiller de toutes les autres relations du système y compris des relations de connaissance liées aux capteurs ajoutés.

Notre méthode de placement de capteurs se déroule en quatre phases principales.

### **3.1 Phase 1 : définition de la structure de base du système.**

La première phase consiste à définir la structure de base du système. Grâce à l'analyse structurelle des modèles comportementaux des différents composants du système, il est possible de déterminer l'ensemble  $X$  des variables inconnues, et l'ensemble des relations matérialisant un mode de comportement normal des composants. L'étude analytique de ces relations permet aussi de déterminer leurs inversibilités possibles par rapport aux variables dont elles contraignent l'évolution.

Dans un second temps, on complète l'ensemble des relations avec les relations de connaissance imposées par le cahier des charges pour des raisons de contrôle et de commande. On définit ainsi les ensembles  $F$  des relations et  $C$  des variables connues. Cette première phase permet la construction de la structure de base du système qui peut alors être matérialisée par un graphe biparti orienté.

Pour notre exemple cette première phase aboutit à la structure représentée par le graphe biparti orienté de la figure 3.2. et à la définition des ensembles :

- $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}\}$ .
- $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\}$ .
- $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9, f_{10}, f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{14}, f_{15}, f_{16}\}$ .

### **3.2 Phase 2 : construction des sous-ensembles de résidus $R_{di}$ .**

La seconde phase de notre méthode a pour objectif de construire tous les sous-ensembles de résidus de cardinalité minimale  $R_{di} \subset R_d$  permettant de rendre localisables les relations de  $F_s$ . On rappelle que  $R_d$  est un sous-ensemble de résidus de structures différentes. A ce titre, il est construit en ne retenant qu'un seul résidu par type de structure (Cf. chapitre III-3.3 page 67). Chaque sous-ensemble  $R_{di}$  est

composé du nombre minimal de résidus permettant d'écrire un vecteur signature de défaillance unique pour chaque relation de  $F_S$ .

En général, l'instrumentation de base d'un système n'étant pas suffisante pour la surveillance des relations de  $F_S$ , il est souvent nécessaire d'ajouter des capteurs pour pouvoir construire les sous-ensembles  $R_{di}$ . Pour déterminer les sous-ensembles  $R_{di}$  et les capteurs qu'il est nécessaire d'ajouter pour les générer, nous proposerons dans la suite de ce chapitre deux algorithmes qui reposent sur une même stratégie. En effet les sous-ensembles de résidus  $R_{di}$  sont composés de deux types de résidus répartis en deux sous-ensembles  $R_{dF_S}$  et  $R_{di}'$  :

$$R_{di} = R_{dF_S} \cup R_{di}' \quad (4.1)$$

Le sous-ensemble de résidus  $R_{dF_S}$  est construit dans le but de détecter les défaillances des relations de  $F_S$ . Pour chacune de ces relations, on génère donc un résidu qui n'est sensible qu'à ses défaillances et aux défaillances des relations de connaissance des variables inconnues dont elles contraignent l'évolution. Ce résidu permet d'isoler ces relations des autres relations du système. Etant donné que l'on génère un résidu par relation à surveiller, on a donc :

$$\text{card}(R_{dF_S}) = \text{card}(F_S) \quad (4.2)$$

Le sous-ensemble de résidus  $R_{di}'$  est construit quant à lui, dans le but de localiser les défaillances des relations de  $F_S$ . Pour y parvenir il est nécessaire d'isoler les relations de  $F_S$  des relations de connaissance des variables inconnues dont elles contraignent l'évolution. On appelle ce sous-ensemble de variables inconnues  $X' \subset X$ . Le sous-ensemble de résidus  $R_{di}'$  est donc constitué d'un nombre minimal de résidus permettant de détecter les défaillances de toutes des relations de connaissance des variables de  $X'$  et insensibles aux défaillances des relations de  $F_S$ . Il est difficile de définir a priori la cardinalité de  $R_{di}'$  mais il est tout à fait possible de la borner. Au minimum le sous-ensemble  $R_{di}'$  sera constitué d'un unique résidu sensible aux défaillances de toutes les relations de connaissance des variables inconnues de  $X'$ . A contrario lorsqu'il est nécessaire de générer un résidu pour chaque variable inconnue de  $X'$ , le sous-ensemble de résidu  $R_{di}'$  comporte alors le même nombre d'éléments que  $X'$ . On obtient donc :

$$1 \leq \text{card}(R_{di}') \leq \text{card}(X') \quad (4.3)$$

A partir des relations (4.1), (4.2) et (4.3) nous pouvons établir que :

$$\text{card}(F_S) + 1 \leq \text{card}(R_{di}) \leq \text{card}(F_S) + \text{card}(X') \quad (4.4)$$

Dans notre exemple  $F_S = \{f_4, f_{10}\}$  et  $X' = \{x_4, x_5, x_{13}, x_{14}\}$ , par conséquent on a  $\text{card}(R_{dF_S}) = 2$ ,  $1 \leq \text{card}(R_{di}') \leq 4$  et  $3 \leq \text{card}(R_{di}) \leq 6$ .

### 3.2.1 L'algorithme exhaustif.

Le premier algorithme que nous proposons pour déterminer les différents sous-ensembles de résidus  $R_{di}$  est qualifié d'exhaustif. Cet algorithme repose sur un principe simple, mais il demande beaucoup de traitements à cause de l'explosion

combinatoire qu'il engendre. Il faut préciser que ce temps de traitement important n'est pas forcément un handicap, car la conception du système de surveillance et la définition des capteurs nécessaires est une opération qui doit être prise en compte dès la définition de l'instrumentation complète du système. De ce point de vue il n'est donc pas pénalisant de consacrer du temps à la définition de l'instrumentation du système [CARPENTIER 96b].

L'algorithme exhaustif est plus simple à traduire dans un langage informatique quelconque. Il a été programmé à l'aide du logiciel MATLAB sur un ordinateur de type PC. En contrepartie il nécessite la génération de tous les résidus de structures différentes  $R_d$  [CARPENTIER 96b].

### 3.2.1.1 L'étape de préparation.

Dans un premier temps nous allons compléter le graphe biparti orienté obtenu à la suite de la première phase. Afin de tenir compte de toutes les possibilités d'ajouts de capteurs nous considérerons dans un premier temps que nous mesurons virtuellement toutes les variables inconnues du système physiquement mesurables. Cette considération implique de compléter la structure de base du système en ajoutant une relation de connaissance sur chaque variable inconnue qui n'en possède pas déjà une à l'issue de la première phase de la méthode.

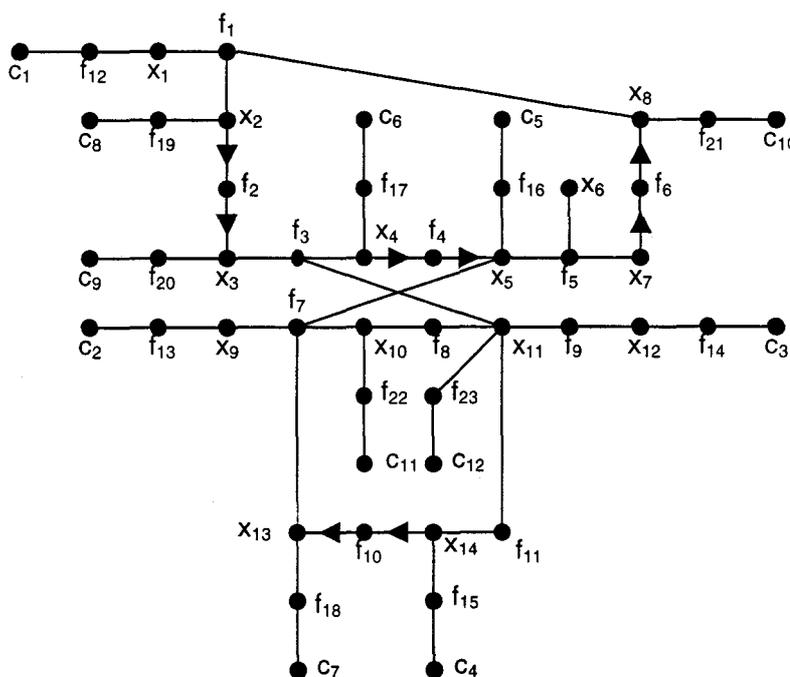


Figure 4.4. Représentation de la structure complète du système.

Dans notre exemple, cette procédure amène à ajouter des relations de connaissance correspondant à la mesure des sept variables  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ ,  $X_8$ ,  $X_{10}$ ,  $X_{11}$  et  $X_{13}$  (on rappelle que le cahier des charges stipule que les variables  $X_6$  et  $X_7$  ne sont pas physiquement mesurables). Les sept relations de connaissance supplémentaires sont définies par :

$$\begin{aligned}
 f_{17}(X_4, C_6) &= X_4 - C_6 = 0 \\
 f_{18}(X_{13}, C_7) &= X_{13} - C_7 = 0 \\
 f_{19}(X_2, C_8) &= X_2 - C_8 = 0 \\
 f_{20}(X_3, C_9) &= X_3 - C_9 = 0 \\
 f_{21}(X_8, C_{10}) &= X_8 - C_{10} = 0 \\
 f_{22}(X_{10}, C_{11}) &= X_{10} - C_{11} = 0 \\
 f_{23}(X_{11}, C_{12}) &= X_{11} - C_{12} = 0
 \end{aligned}$$

La structure du système ainsi complétée est représentée par le graphe biparti partiellement orienté de la figure 4.4.

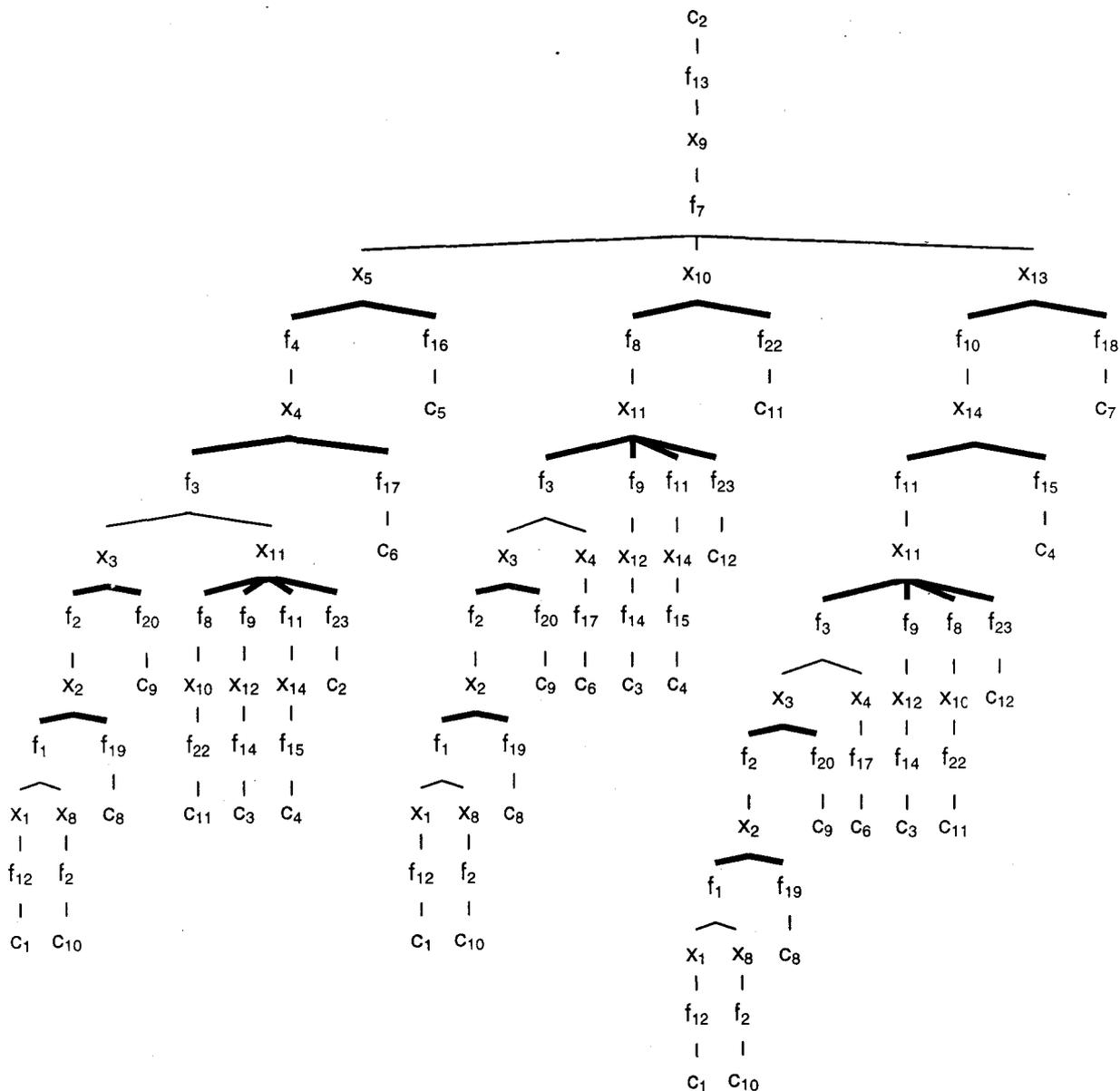


Figure 4.5. Arbre de résolution en ET/OU construit à partir de  $c_2$ .

Dans un second temps, on s'appuie sur la structure complète du système pour générer l'ensemble de résidus  $R_d$  correspondant à l'ensemble de tous les résidus

de structures différentes qu'il est possible d'obtenir à partir du système, en utilisant la méthode basée sur la construction des arbres en ET/OU présentée dans le chapitre III-2.2.

Il est à noter que l'accroissement de la surdétermination du système, dû à l'ajout des relations de connaissance, augmente considérablement la complexité des arbres de résolution en ET/OU. Ceci implique une augmentation importante du nombre de résidus pouvant être générés. Afin d'illustrer ce phénomène, la figure 4.5 montre l'arbre de résolution en ET/OU construit à partir de la structure complète du système et de la variable  $c_2$ .

Dans notre exemple, cette phase préparatoire aboutit à la génération de 9408 résidus ( $\text{card}(R) = 9408$ ) pouvant être classés en 830 familles différentes en fonction de leur structure ( $\text{card}(R_d)=830$ ). Pour des raisons de commodité nous n'allons pas représenter toutes les structures ainsi obtenues, mais les cardinalités des différents ensembles, qui montrent bien le phénomène d'explosion combinatoire que peut engendrer l'augmentation du nombre de relations de connaissance.

La dernière phase de l'étape de préparation consiste à extraire le sous-ensemble de résidus  $R_d' \subset R_d$ . Ce sous-ensemble  $R_d'$  est construit en ne retenant que les résidus sensibles aux défaillances d'au moins une relation de  $F_S$  ou d'au moins une relation de connaissance des variables de  $X'$ . En effet les autres résidus ne présentent pas d'intérêt pour l'élaboration du système de surveillance car ils ne sont sensibles qu'aux défaillances de relations n'appartenant pas au cahier des charges de surveillance. La réduction de l'ensemble des résidus sur lequel va porter l'algorithme exhaustif permet de limiter considérablement son temps de traitement.

### 3.2.1.2 Description de l'algorithme exhaustif.

L'algorithme exhaustif consiste à déterminer tous les sous-ensembles de résidus  $R_{di} \subset R_d'$  de cardinalité minimale dont les structures permettent l'écriture d'un vecteur signature de défaillance non nul et unique pour chaque relation de  $F_S$  (ces relations possèdent alors la propriété d'être localisables : Cf. Chapitre III-4.1.2).

Etant donné que nous avons montré qu'il est possible de borner la cardinalité des sous-ensembles  $R_{di}$ , l'algorithme commence par analyser tous les sous-ensembles contenant  $\text{card}(F_S)+1$  résidus inclus dans  $R_d'$ . Si aucun sous-ensemble ne permet de localiser les défaillances de  $F_S$ , on augmente de un le nombre de résidus par sous-ensemble puis on réitère le processus d'analyse sur tous les sous-ensembles de résidus ainsi constitués. L'algorithme exhaustif peut donc être traduit en pseudo langage de la façon suivante :

```

N=card( $F_S$ )
Solution=0
Tant que Solution = 0
    N=N+1
    Pour tous les sous-ensembles de N résidus  $R_{dk} \subset R_d'$ 
        Pour toutes les relations  $f_i \in F_S$ 
            Si  $\underline{s}_i \neq 0$  alors ( $f_i$  est détectable)
                Flag = 1
    
```

```

    Pour toutes les relations  $f_j \in F_s - \{f_i\}$ 
      Si  $d_H(\underline{sd}_i, \underline{sd}_j) = 0$  alors
        Flag = 0
      Fin si
    Fin pour
    Si Flag = 1 alors
      Solution = Solution + 1
      (Le sous-ensemble de résidus  $R_{dk}$  traité
      permet de répondre au cahier des charges de
      surveillance)
    Fin si
  Fin si
Fin pour
Fin pour
Fin tant que
  
```

On rappelle que  $\underline{sd}_i$  correspond au vecteur signature de défaillance de la relation  $i$ , et que  $d_H(\underline{sd}_i, \underline{sd}_j)$  correspond à la distance de Hamming entre les vecteurs  $\underline{sd}_i$  et  $\underline{sd}_j$ .

L'application de cet algorithme sur notre exemple permet d'obtenir trois sous-ensembles de résidus  $R_{d1}$ ,  $R_{d2}$  et  $R_{d3}$ . A partir de chacun de ces sous-ensembles de résidus il est possible de construire un système de surveillance capable de détecter et de localiser les défaillances des relations  $f_4$  et  $f_{10}$ . Chaque sous-ensemble  $R_{di}$  compte quatre résidus. Ces sous-ensembles présentent trois éléments communs  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  et ne diffèrent que par le quatrième  $r_4$ ,  $r_5$  ou  $r_6$  (figure 4.6). Les structures de ces six résidus sont représentées à la figure 4.7.

Sous-ensemble	Résidus	Structures de résidus
$R_{d1}$	$\{r_1, r_2, r_3, r_4\}$	$s_1 = [00000 \ 00001 \ 00001 \ 00100 \ 000]^t$ $s_2 = [00010 \ 00000 \ 00000 \ 11000 \ 000]^t$ $s_3 = [00000 \ 01100 \ 10101 \ 10100 \ 000]^t$ $s_4 = [00100 \ 00000 \ 00000 \ 01001 \ 000]^t$
$R_{d2}$	$\{r_1, r_2, r_3, r_5\}$	$s_1 = [00000 \ 00001 \ 00001 \ 00100 \ 000]^t$ $s_2 = [00010 \ 00000 \ 00000 \ 11000 \ 000]^t$ $s_3 = [00000 \ 01100 \ 10101 \ 10100 \ 000]^t$ $s_5 = [01100 \ 00000 \ 00000 \ 01010 \ 000]^t$
$R_{d3}$	$\{r_1, r_2, r_3, r_6\}$	$s_1 = [00000 \ 00001 \ 00001 \ 00100 \ 000]^t$ $s_2 = [00010 \ 00000 \ 00000 \ 11000 \ 000]^t$ $s_3 = [00000 \ 01100 \ 10101 \ 10100 \ 000]^t$ $s_6 = [11100 \ 00000 \ 01000 \ 01000 \ 100]^t$

Figure 4.6. Les 3 sous-ensembles  $R_{di}$  obtenus grâce à l'algorithme exhaustif.

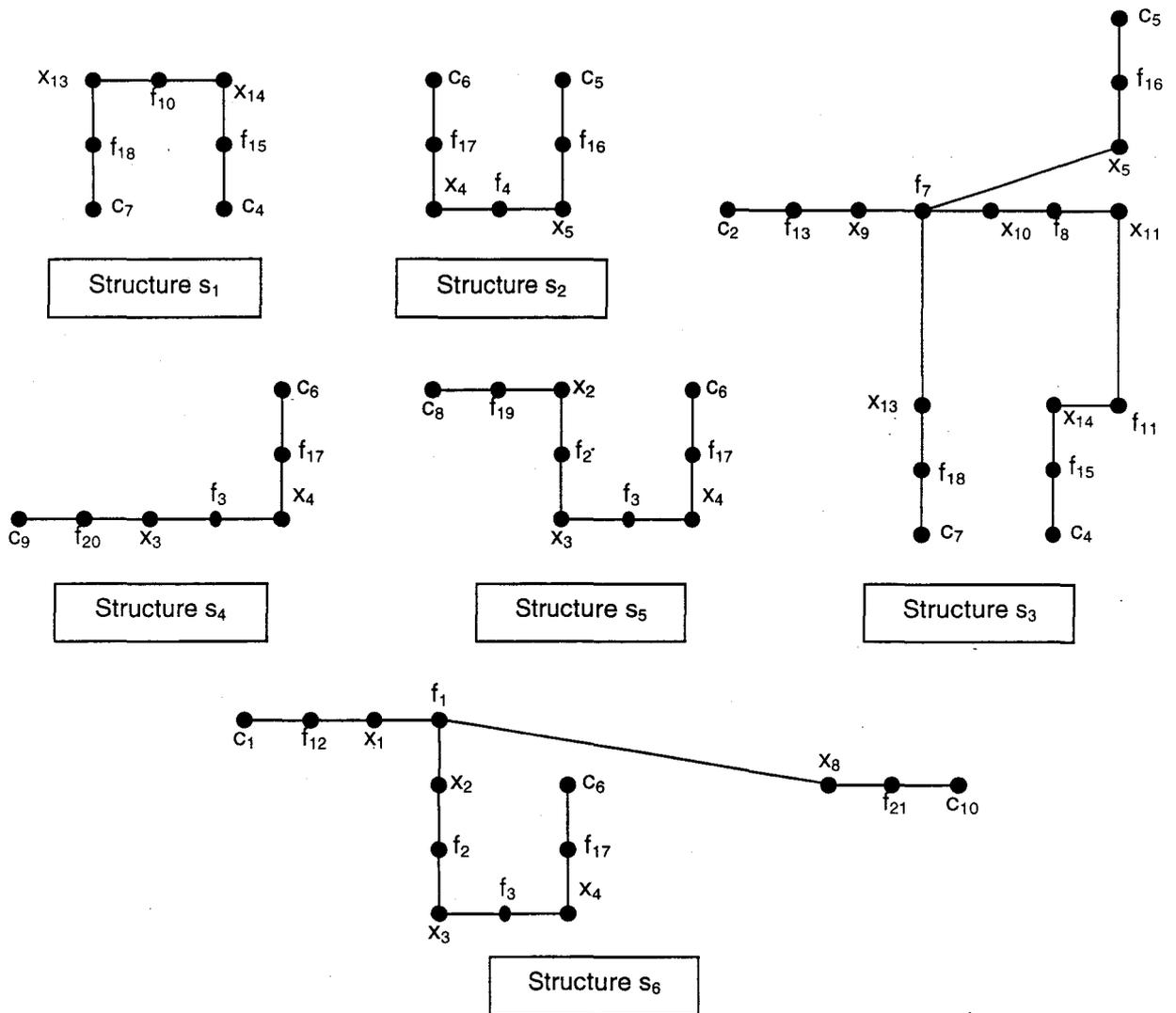


Figure 4.7. Les 6 structures utilisées pour la construction des 3 ensembles  $R_{di}$ .

### 3.2.2 L'algorithme amélioré.

L'algorithme amélioré se distingue de l'algorithme exhaustif par le fait qu'il ne nécessite pas une génération systématique de tous les résidus. En effet, les sous-ensembles de résidus  $R_{di}$  sont obtenus grâce à une étape de préparation plus simple et une analyse du graphe biparti orienté matérialisant la structure du système. Ainsi il est plus facilement applicable aux systèmes de grande taille car il limite l'explosion combinatoire en focalisant la génération des résidus sur les relations à surveiller. Par contre sa programmation est moins aisée car il repose sur le parcours d'un graphe [CARPENTIER 97].

#### 3.2.2.1 L'étape de préparation.

L'étape de préparation de l'algorithme amélioré consiste à ajouter un capteur uniquement sur les variables du sous-ensemble  $X'$  qui ne sont pas encore liées à une relation de connaissance. On rappelle que  $X'$  correspond au sous-ensemble des variables inconnues dont l'évolution est contrainte par au moins une

relation de  $F_S$ . Cette étape se justifie par le fait que, pour pouvoir localiser les défaillances de chaque relation  $f_i \in F_S$ , il est nécessaire et suffisant qu'une relation de connaissance permette d'évaluer directement chaque variable inconnue dont l'évolution est contrainte par  $f_i$ . De cette façon, il est possible de générer pour chaque relation  $f_i$  de  $F_S$ , un résidu qui n'est sensible qu'aux défaillances de  $f_i$  et des relations de connaissance des variables inconnues dont elle contraint l'évolution. Le sous-ensemble de résidus ainsi formé est noté  $R_{dF_S}$ , car il permet de détecter les défaillances des relations de  $F_S$  et des relations de connaissance des variables de  $X'$ .

L'application de cette étape de préparation sur notre exemple conduit à l'ajout des relations de connaissance  $f_{17}$  et  $f_{18}$  sur les variables  $x_4$  et  $x_{13}$  (on rappelle que dans ce cas  $F_S = \{f_4, f_{10}\}$ ) :

$$f_{17}(X_4, C_6) = X_4 - C_6 = 0$$

$$f_{18}(X_{13}, C_7) = X_{13} - C_7 = 0$$

Ces deux relations de connaissance supplémentaires permettent de définir le graphe biparti de la figure 4.8 qui va servir de base à l'algorithme.

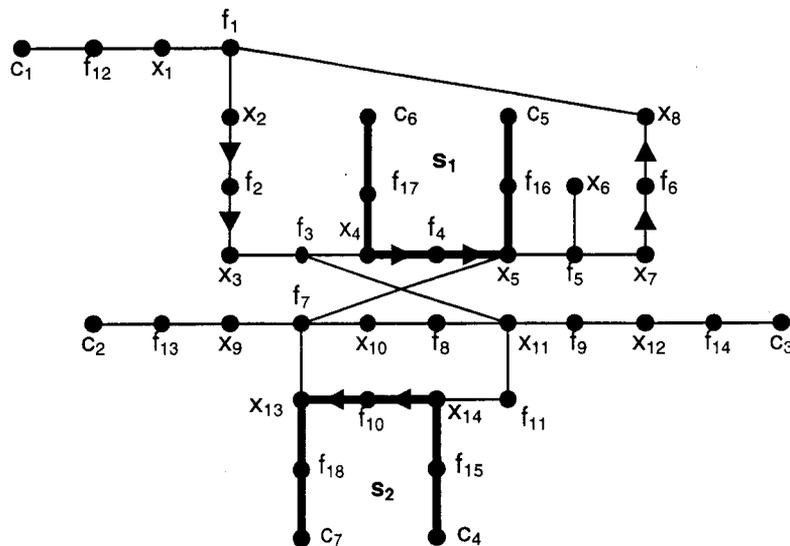


Figure 4.8. Graphe biparti du système à la suite de l'étape de préparation.

Le sous-ensemble de résidus  $R_{dF_S}$  est constitué de deux résidus  $r_1$  et  $r_2$  dont les structures respectives  $s_1$  et  $s_2$  sont matérialisées en gras sur le graphe de la figure 4.8.

### 3.2.2.2 Description de l'algorithme amélioré.

L'objectif de l'algorithme amélioré est de déterminer ou de construire, en plaçant les capteurs adéquats, tous les sous-ensembles de résidus  $R_{di}$ . Pour y parvenir, on détermine pour chaque relation de connaissance d'une variable de  $X'$  notée  $f_j$ , le sous-ensemble de résidus  $R_{dfj}$  utilisant  $f_j$  et n'utilisant aucune relation de  $F_S$  pour son évaluation. Les différents sous-ensembles  $R_{dfj}$  peuvent être obtenus en parcourant le graphe biparti obtenu à la suite de l'étape préliminaire pour rechercher

toutes les structures de résidus matérialisées par un sous-graphe biparti incluant la relation  $f_j$  et n'incluant pas de relations de  $F_S$ .

La suite du traitement effectué par l'algorithme dépend de la cardinalité du sous-ensemble  $R_{dfj}$  ainsi obtenu. Si  $\text{card}(R_{dfj})=1$ , le résidu est automatiquement retenu et ajouté au sous-ensemble de résidus intermédiaire noté  $R_d''$ . Lorsque  $\text{card}(R_{dfj}) > 1$ , on retiendra le résidu utilisant le maximum de relations de connaissance de variables de  $X'$  afin de limiter la cardinalité de  $R_{dfj}$ . Ce résidu est alors ajouté à l'ensemble  $R_d''$ . Enfin, si  $\text{card}(R_{dfj})=0$ , cela signifie que l'instrumentation actuelle ne permet pas de générer de résidus permettant d'isoler la relation  $f_j$  des relations de  $F_S$ .

Dans ce cas de figure, et en se basant sur un parcours du graphe en profondeur, on détermine tous les sous-ensembles de variables inconnues  $X_{fj}^i$ , devant être mesurées pour générer un résidu  $r_{ij}$  sensible aux défaillances de  $f_j$  et insensible à celles des relations de  $F_S$ . Afin de limiter le nombre de capteurs ajoutés, on retiendra les résidus utilisant le moins de nouveaux capteurs pour leur évaluation et qui permettent la détection des défaillances d'un maximum de relations de connaissance de variables de  $X'$ . Si plusieurs sous-ensembles de résidus du type  $r_{ij}$  répondent à ces critères, ils constitueront autant de sous-ensemble  $R_{dfj}$  en y ajoutant le sous-ensemble  $R_d''$ .

Pour obtenir les différents sous-ensembles  $R_{dfj}$ , il suffit d'inclure à chaque sous-ensemble  $R_{dfj}$  obtenu après application de l'algorithme amélioré le sous-ensemble de résidu  $R_{dFS}$  obtenu à l'issue de l'étape préliminaire. L'algorithme amélioré peut donc être traduit en pseudo langage de la façon suivante :

$R_d'' = \emptyset$

**Pour toutes les relations de connaissance  $f_j$  des variables  $\in X'$**

**Sur un parcours du graphe en profondeur déterminer  $R_{dfj}$  :**

**l'ensemble des résidus sensibles aux défaillances de  $f_j$  et insensibles à celles des relations de  $F_S$ .**

**Fin pour**

**Pour toutes les relations de connaissance  $f_j$  des variables  $\in X'$**

**Si  $\text{card}(R_{dfj}) \geq 1$  alors**

$R_d'' = R_d'' \cup \{r_j\}$

**( $r_j$  est le résidu de  $R_{dfj}$  utilisant le maximum de relations de connaissance de variables de  $X'$ )**

**Fin si**

**Si  $\text{card}(R_{dfj}) = 0$  alors**

**Sur un parcours du graphe en profondeur déterminer  $X_{fj}^i$  :**

**Les sous-ensemble des variables inconnues devant être mesurées pour générer un résidu  $r_{ij}$  sensible aux défaillances de  $f_j$  et insensible à celles des relations de  $F_S$**

**Pour tous les sous-ensembles de variables inconnues  $X_{fj}^i$**

$R_{dfj} = R_{dfj} \cup \{r_{ij}\}$

**(le résidu nécessitant le moins de capteurs nouveaux et sensible aux défaillances d'un maximum de relations de connaissance de variables de  $X'$ )**

**Fin pour**

**Fin si**

Fin pour  
 Pour tous les sous-ensembles de résidus  $R_{di}'$   
 $R_{di} = R_{di}' \cup R_{di}'' \cup R_{diFS}$   
 Fin pour

Nous allons appliquer cet algorithme au système utilisé à titre d'exemple. L'ensemble  $X'$  est  $\{x_4, x_5, x_{13}, x_{14}\}$ . Les sous-ensembles de résidus  $R_{di}'$  recherchés par cet algorithme doivent être sensibles aux défaillances des relations  $f_{15}, f_{16}, f_{17}$  et  $f_{18}$  et insensibles à celles des relations  $f_4$  et  $f_{10}$ . Le parcours du graphe biparti de la figure 4.4 montre qu'il existe un résidu  $r_3$ , dont la structure notée  $s_3$  est matérialisée en gras sur la figure 4.9, qui est sensible aux défaillances des relations  $f_{15}, f_{16}$  et  $f_{18}$  et insensible à celles de  $f_4$  et  $f_{10}$ . Afin de limiter la cardinalité des ensembles de résidus  $R_{di}'$ , c'est ce résidu qui est retenu pour la construction du sous-ensemble  $R_{di}'' = \{r_3\}$ .

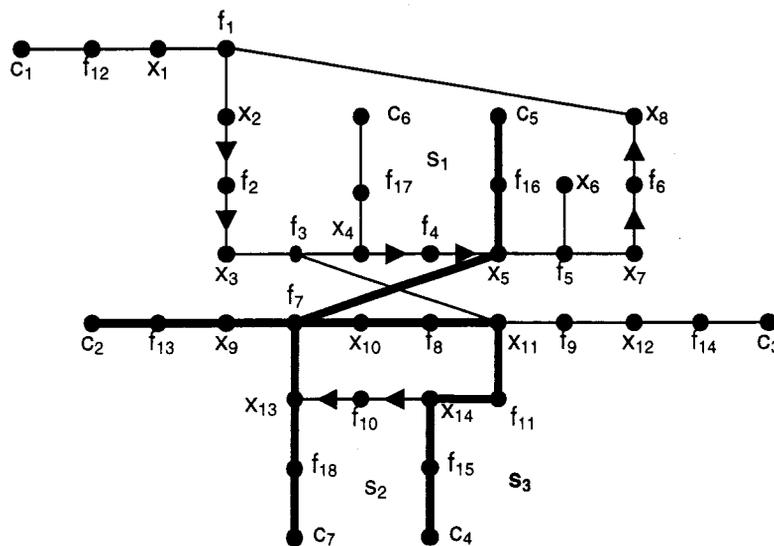


Figure 4.9. Structure du résidu  $r_3$ .

La structure du système ne permet pas de générer de résidus sensibles aux défaillances de  $f_{17}$  et insensibles à celles de  $f_4$  et  $f_{10}$ . Il est donc nécessaire d'ajouter un ou plusieurs capteurs afin de construire ce résidu. Le parcours du graphe en partant de la relation  $f_{17}$ , montre qu'il est possible d'obtenir ce résidu en ajoutant un capteur sur une des variables de l'ensemble  $\{x_4, x_3, x_2, x_8\}$ . Le cas de la variable  $x_4$  est particulier. En effet elle intervient déjà dans la relation de connaissance  $f_{17}$ , mais il est tout à fait concevable de réaliser une redondance matérielle sur sa mesure afin de respecter le cahier des charges de surveillance. Les relations de connaissance pouvant ainsi être ajoutées sont donc les suivantes :

$$\begin{aligned} f_{19}(X_2, C_8) &= X_2 - C_8 = 0 \\ f_{20}(X_3, C_9) &= X_3 - C_9 = 0 \\ f_{21}(X_8, C_{10}) &= X_8 - C_{10} = 0 \\ f_{22}(X_4, C_{11}) &= X_4 - C_{11} = 0 \end{aligned}$$

L'ajout de l'un de ces quatre capteurs permet l'écriture d'un résidu sensible à la défaillance de  $f_{17}$  et insensible à celles de  $f_4$  et  $f_{10}$ . Ces quatre résidus possibles sont notés  $r_4, r_5, r_6$  et  $r_7$ . Leurs structures sont notées respectivement  $s_4, s_5, s_6$  et  $s_7$  et

sont représentées sur la figure 4.10. On obtient ainsi  $R_{d1}' = \{r_4\}$ ,  $R_{d2}' = \{r_5\}$ ,  $R_{d3}' = \{r_6\}$  et  $R_{d4}' = \{r_7\}$ . Au final on obtient donc quatre sous-ensembles de résidus  $R_{d1}$ ,  $R_{d2}$ ,  $R_{d3}$  et  $R_{d4}$  permettant de concevoir un système de surveillance capable de localiser les relations de  $F_S$ . Ils sont obtenus en réunifiant les sous-ensembles  $R_{dFS}$ ,  $R_{d''}$  avec l'un des sous ensembles  $R_{di}'$  :

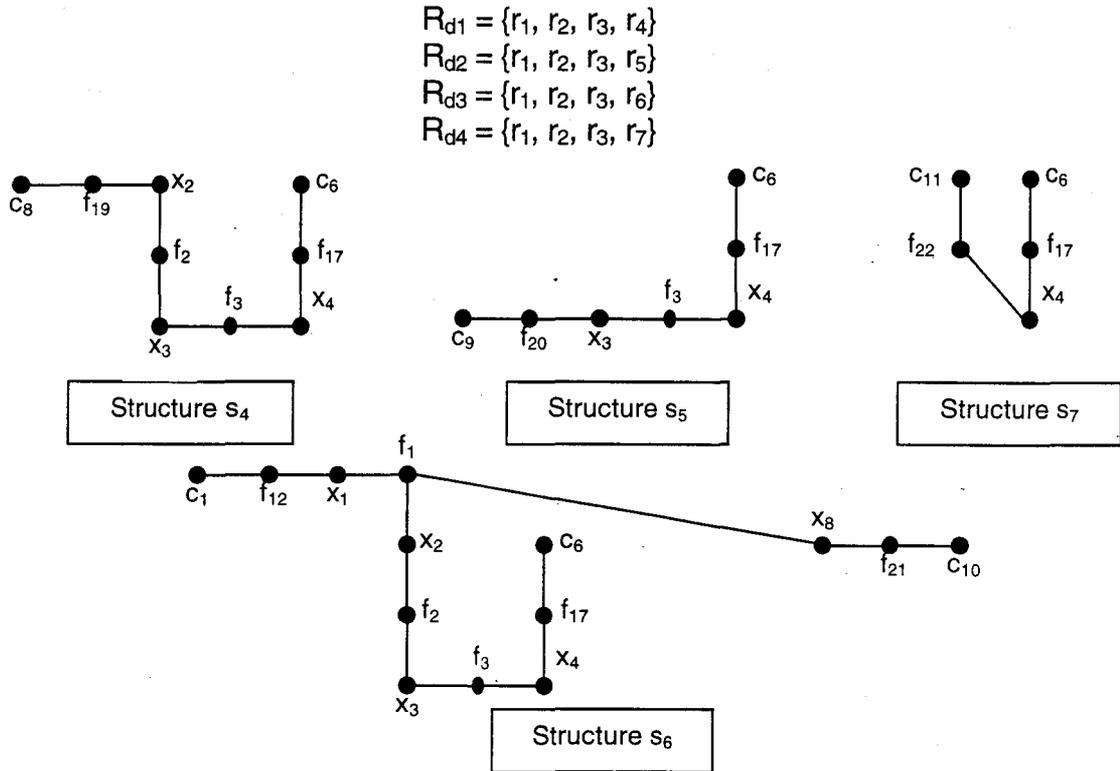


Figure 4.10. Structure des 4 résidus  $r_4$ ,  $r_5$ ,  $r_6$  et  $r_7$ .

Sous-ensemble	Résidus	Structures de résidus
$R_{d1}$	$\{r_1, r_2, r_3, r_4\}$	$S_1 = [00010 \ 00000 \ 00000 \ 11000 \ 00]^t$ $S_2 = [00000 \ 00001 \ 00001 \ 00100 \ 00]^t$ $S_3 = [00000 \ 01100 \ 10101 \ 10100 \ 00]^t$ $S_4 = [01100 \ 00000 \ 00000 \ 01010 \ 00]^t$
$R_{d2}$	$\{r_1, r_2, r_3, r_5\}$	$S_1 = [00010 \ 00000 \ 00000 \ 11000 \ 00]^t$ $S_2 = [00000 \ 00001 \ 00001 \ 00100 \ 00]^t$ $S_3 = [00000 \ 01100 \ 10101 \ 10100 \ 00]^t$ $S_5 = [00100 \ 00000 \ 00000 \ 01001 \ 00]^t$
$R_{d3}$	$\{r_1, r_2, r_3, r_6\}$	$S_1 = [00010 \ 00000 \ 00000 \ 11000 \ 00]^t$ $S_2 = [00000 \ 00001 \ 00001 \ 00100 \ 00]^t$ $S_3 = [00000 \ 01100 \ 10101 \ 10100 \ 00]^t$ $S_6 = [11100 \ 00000 \ 01000 \ 01000 \ 10]^t$
$R_{d4}$	$\{r_1, r_2, r_3, r_7\}$	$S_1 = [00010 \ 00000 \ 00000 \ 11000 \ 00]^t$ $S_2 = [00000 \ 00001 \ 00001 \ 00100 \ 00]^t$ $S_3 = [00000 \ 01100 \ 10101 \ 10100 \ 00]^t$ $S_7 = [00000 \ 00000 \ 00000 \ 01000 \ 01]^t$

Figure 4.11. Les 4 sous-ensembles  $R_{di}$  obtenus grâce à l'algorithme amélioré.

Le tableau de la figure 4.11 reprend les quatre sous-ensembles  $R_{di}$  obtenus grâce à l'algorithme amélioré ainsi que les structures des différents résidus qui les composent.

### **3.2.3 Comparaison des solutions des deux algorithmes.**

Les tableaux des figures 4.6 et 4.11 montrent que l'algorithme amélioré permet d'obtenir une solution de placement de capteurs supplémentaires qui respecte le cahier des charges de surveillance. Il s'agit de la solution consistant à doubler le capteur mesurant la variable  $x_4$ . Par définition, l'algorithme exhaustif ne tient pas compte des possibilités de redondance matérielle, car on ne place qu'un seul capteur sur chaque variable inconnue physiquement mesurable. Il est possible de remédier à ce problème en ajoutant systématiquement non pas un mais deux capteurs sur chaque variable inconnue. Cette opération a pour inconvénient d'alourdir considérablement la structure du système, puisque l'on double le nombre de relations de connaissance, et donc d'accroître énormément l'explosion combinatoire lors de la phase de génération des résidus. Sous ces conditions l'algorithme exhaustif peut prendre en compte les redondances matérielles et aboutir ainsi à la construction des mêmes sous-ensembles de résidus  $R_{di}$  que l'algorithme amélioré.

L'algorithme exhaustif nécessite la génération des 830 résidus de l'ensemble  $R_d$ . Dans l'algorithme amélioré, on ne se focalise que sur la génération des 7 résidus nécessaires à la surveillance des relations de  $F_s$ .

## **3.3 Phase 3 : détermination des différentes configurations de placement de capteurs.**

Les différentes configurations de placement de capteurs, permettant de respecter le cahier des charges de surveillance, sont obtenues en analysant les variables connues mises en jeu pour le calcul des résidus des différents sous-ensembles  $R_{di}$  construits lors de la seconde phase de notre méthode de placement de capteurs.

A chaque sous-ensemble de résidu  $R_{di}$ , on associe le sous-ensemble  $C_i$  de variables connues nécessaires à l'évaluation des résidus de  $R_{di}$ . En retirant des différents sous-ensembles  $C_i$  les variables connues appartenant à l'ensemble  $C$  défini à la suite de la première phase de la méthode, on définit les sous-ensembles  $C_i'$  de variables connues qu'il a été nécessaire d'ajouter. Les sous-ensembles  $C_i'$  définissent donc les différents ensembles de capteurs qu'il est nécessaire d'ajouter au système pour concevoir un système de surveillance respectant le cahier des charges.

Le tableau de la figure 4.12 indique pour notre exemple les quatre sous-ensembles  $C_i$  et  $C_i'$  et les relations de connaissance correspondantes définissant les quatre solutions de placement de capteurs permettant de localiser les défaillances de  $f_4$  et  $f_{10}$ .

$R_{di}$	$C_i$	$C_i'$	Relations de connaissance	Variables mesurées
$R_{d1}$	$C_1=\{C_2, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8\}$	$C_1'=\{C_6, C_7, C_8\}$	$\{f_{17}, f_{18}, f_{19}\}$	$\{X_2, X_4, X_{13}\}$
$R_{d2}$	$C_2=\{C_2, C_4, C_5, C_6, C_7, C_9\}$	$C_2'=\{C_6, C_7, C_9\}$	$\{f_{17}, f_{18}, f_{20}\}$	$\{X_3, X_4, X_{13}\}$
$R_{d3}$	$C_3=\{C_1, C_2, C_4, C_5, C_6, C_7, C_{10}\}$	$C_3'=\{C_6, C_7, C_{10}\}$	$\{f_{17}, f_{18}, f_{21}\}$	$\{X_4, X_8, X_{13}\}$
$R_{d4}$	$C_4=\{C_2, C_4, C_5, C_6, C_7, C_{11}\}$	$C_4'=\{C_6, C_7, C_{11}\}$	$\{f_{17}, f_{18}, f_{22}\}$	$\{X_4, X_4, X_{13}\}$

**Figure 4.12.** Les quatre solutions de placement de capteurs.

On remarque que les différentes configurations de capteurs obtenues à l'issue de cette troisième phase de la méthode sont optimales au sens de la localisabilité structurelle des relations à surveiller. Dans notre exemple les quatre sous-ensembles de résidus permettent l'écriture d'un vecteur signature de défaillance unique pour les relations  $f_4$  et  $f_{10}$  :  $sd_4 = [0 \ 1 \ 0 \ 0]^t$  et  $sd_{10} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^t$ .

Pour notre exemple, on peut affirmer que pour détecter et localiser les défaillances des relations  $f_4$  et  $f_{10}$ , il est nécessaire et suffisant d'ajouter un capteur pour mesurer les variables  $x_4$  et  $x_{13}$  (ceci correspond aux relations de connaissance  $f_{17}$  et  $f_{18}$ ) et, au choix, sur la variable  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_8$  ou  $x_4$  à nouveau (ces capteurs correspondent aux relations de connaissance  $f_{19}$ ,  $f_{20}$ ,  $f_{21}$  ou  $f_{22}$ ).

### 3.4 Phase 4 : choix de la meilleure configuration de placement de capteurs.

Etant donné que les différentes solutions de placement de capteurs obtenues suite à la troisième phase sont structurellement équivalentes car elles sont optimales au sens de la détectabilité et de la localisabilité des défaillances des relations à surveiller, il est nécessaire d'effectuer un choix afin de retenir la meilleure.

Pour retenir le meilleur placement de capteurs parmi les différentes solutions obtenues, nous allons introduire deux critères supplémentaires. Ces critères permettront d'évaluer les systèmes de surveillance construits à partir des solutions de placement de capteurs, en terme de coût et de sensibilité structurelle aux défaillances des relations qui ne figurent pas dans le cahier des charges de surveillance.

En effet, il est tout à fait naturel de chercher à retenir une solution de placement de capteurs qui coûte le moins cher possible et qui permet de détecter et de localiser un nombre maximal de défaillances de composants. Il s'agit dans ce cas présent de composants qui ne sont pas définis dans le cahier des charges, mais dont les défaillances peuvent tout de même être détectées ou localisées par le système de surveillance. Nous appelons cela les services additionnels de surveillance. Ainsi la meilleure solution de placement de capteurs est, si elle existe, celle qui minimise le coût du système de surveillance et qui maximise sa sensibilité structurelle aux défaillances.

Pour déterminer la meilleure solution de placement de capteurs, on peut utiliser une procédure de décision multicritères tel que le surclassement à cause de l'antagonisme des critères de coût et de sensibilité structurelle [CARPENTIER 97].

### 3.4.1 Le critère de coût.

Le coût d'un système de surveillance peut être défini comme étant le coût des capteurs nécessaires. Le coût d'un capteur doit non seulement tenir compte de son prix d'achat mais aussi de ses coûts d'amortissement (les capteurs possèdent un coût d'amortissement comme tous les autres composants du système), de maintenance (chaque capteur possède une certaine fiabilité et doit être remplacé et vérifié périodiquement) et d'utilisation (pour qu'un capteur fonctionne correctement il doit consommer une certaine quantité d'énergie et parfois même il nécessite l'utilisation de produits spécifiques). C'est pour cela que l'on applique à chaque capteur et, par conséquent, à chaque relation de connaissance du système, un coût global qui prend en compte toutes ces dépenses.

Pour déterminer le coût d'un système de surveillance, il suffit de définir dans un premier temps le sous-ensemble des relations de connaissance nécessaires au calcul des résidus de  $R_{di}$  sur lesquels il s'appuie. Dans un second temps, on effectue la somme des coûts de ces relations de connaissance [CARPENTIER 97].

Le tableau de la figure 4.13 indique, à titre d'exemple, les coûts des différentes relations de connaissance mises en œuvre dans les différents algorithmes de placement de capteurs. Le tableau de la figure 4.14 donne les sous-ensembles de relations de connaissance utilisées par les quatre systèmes de surveillance construits à partir des solutions de placement de capteurs. Il indique aussi les coûts de ces différents systèmes de surveillance.

Relation	Coût	Relation	Coût
$f_{12}$	30	$f_{18}$	5
$f_{13}$	5	$f_{19}$	100
$f_{15}$	10	$f_{20}$	50
$f_{16}$	5	$f_{21}$	220
$f_{17}$	5	$f_{22}$	150

Figure 4.13. Coût des différentes relations de connaissance.

Solution	Sous-ensemble de relations de connaissances	Coût
1	{ $f_{13}, f_{15}, f_{16}, f_{17}, f_{18}, f_{19}$ }	130
2	{ $f_{13}, f_{15}, f_{16}, f_{17}, f_{18}, f_{20}$ }	80
3	{ $f_{12}, f_{13}, f_{15}, f_{16}, f_{17}, f_{18}, f_{21}$ }	280
4	{ $f_{13}, f_{15}, f_{16}, f_{17}, f_{18}, f_{22}$ }	180

Figure 4.14. Coût des différentes solutions de placement de capteurs.

### 3.4.2 Le critère de sensibilité structurelle ou services additionnels de surveillance.

Le système de surveillance construit à partir d'un placement de capteurs obtenu à l'issue de la troisième phase de notre méthode est par définition sensible aux défaillances des composants à surveiller définis dans le cahier des charges de surveillance. Or il s'avère que ce système de surveillance permet généralement aussi de détecter voire de localiser les défaillances d'autres composants du système qui n'appartiennent pas au cahier des charges de surveillance. Ceci nous permet d'introduire le critère de services additionnels de surveillance du système ou sensibilité structurelle. Pour le quantifier, on assigne un poids à chaque relation du système matérialisant un mode de comportement d'un composant n'appartenant pas au cahier des charges de surveillance.

Ce poids permet de prendre en compte plusieurs concepts tels que l'intérêt que l'on porte à la surveillance de cette relation en terme de détectabilité ou de localisabilité (le but est alors de retenir le placement de capteurs permettant de construire un système de surveillance permettant de détecter ou de localiser les défaillances des composants intéressants), la qualité et la fiabilité de la modélisation mathématique des composants (on cherche dans ce cas de figure à utiliser les relations du système possédant la meilleure modélisation) ou encore la complexité mathématique des relations (l'objectif est alors d'utiliser des résidus possédant les expressions mathématiques les plus simples afin d'optimiser leur calcul en temps réel) [CARPENTIER 97].

Dans notre exemple nous prendrons en compte uniquement les services additionnels de surveillance et le poids affecté à chaque relation du système représentent l'intérêt de leur détectabilité éventuelle. Dans ce cas de figure, il est possible d'évaluer le critère de sensibilité structurelle d'un système de surveillance en construisant dans un premier temps le sous-ensemble de relations dont il permet de détecter les défaillances et qui n'appartiennent pas au cahier des charges de surveillance. On calcule la sensibilité structurelle des systèmes de surveillance en effectuant la somme des poids des relations détectables supplémentaires. Pour simplifier nous n'avons pas accordé de prime particulière à la localisabilité.

Relation	Poids	Relation	Poids
$f_1$	1	$f_{13}$	1
$f_2$	10	$f_{14}$	5
$f_3$	1	$f_{15}$	1
$f_5$	1	$f_{16}$	1
$f_6$	10	$f_{17}$	1
$f_7$	5	$f_{18}$	1
$f_8$	5	$f_{19}$	10
$f_9$	10	$f_{20}$	10
$f_{11}$	5	$f_{21}$	1
$f_{12}$	1	$f_{22}$	1

Figure 4.15. Poids affectés aux différentes relations du système.

La table de la figure 4.15 donne les poids affectés à chacune des relations du système modélisant un mode de comportement normal de ses composants et qui n'appartiennent pas au cahier des charges de surveillance. La table de la figure 4.16 indique les sous-ensembles de relations dont les défaillances sont non détectables, détectables et localisables. Enfin le tableau de la figure 4.17 indique l'évaluation du critère de sensibilité structurelle de chaque système de surveillance.

N°	Relations non-détectables	Relations détectables	Relations localisables
1	$f_1, f_5, f_6, f_9, f_{12}, f_{14}, f_{21}, f_{20}, f_{22}$	$f_2, f_3, f_7, f_8, f_{11}, f_{13}, f_{15}, f_{18}, f_{19}$	$f_4, f_{10}, f_{16}, f_{17}$
2	$f_1, f_2, f_5, f_6, f_9, f_{12}, f_{14}, f_{19}, f_{21}, f_{22}$	$f_3, f_7, f_8, f_{11}, f_{13}, f_{15}, f_{18}, f_{20}$	$f_4, f_{10}, f_{16}, f_{17}$
3	$f_5, f_6, f_9, f_{14}, f_{19}, f_{20}, f_{22}$	$f_1, f_2, f_3, f_7, f_8, f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{15}, f_{18}, f_{21}$	$f_4, f_{10}, f_{16}, f_{17}$
4	$f_1, f_2, f_3, f_5, f_6, f_9, f_{12}, f_{14}, f_{20}, f_{21}, f_{19}$	$f_7, f_8, f_{11}, f_{13}, f_{15}, f_{18}$	$f_4, f_{10}, f_{16}, f_{17}, f_{22}$

Figure 4.16. Propriétés des relations du système.

Placement de capteurs N°	Evaluation du critère de sensibilité
1	41
2	31
3	43
4	21

Figure 4.17. Evaluation de la sensibilité structurelle des systèmes de surveillance.

### 3.4.3 Procédure de décision multicritères.

L'objectif de la procédure de décision multicritères est de retenir une seule configuration de placement de capteurs solution des algorithmes : la meilleure au sens des deux critères introduits à savoir le coût et la sensibilité structurelle du système de surveillance construit à partir de ces configurations de capteurs.

Les différents placements de capteurs sont appelés « actions » et sont regroupés dans un ensemble  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ . Les différents critères utilisés sont groupés dans l'ensemble  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ . Chaque action  $a_j$  peut être évaluée pour un critère  $d_i$  et cette évaluation est notée  $e_i(a_j)$ .

Si  $\exists a_k \in A / \forall (i,j) \in \{1, 2, \dots, n\} \times \{1, 2, \dots, m\}, e_j(a_k) > e_j(a_i)$ ,  $a_k$  correspond à la meilleure action possible.

Dans notre cas de figure, il est difficile de trouver une action vérifiant cette propriété car les critères utilisés sont antagonistes (par exemple le fait d'ajouter de nombreux capteurs améliore la sensibilité structurelle du système de surveillance mais son coût devient plus important). Pour résoudre ce problème nous devons utiliser une procédure de décision multicritères.

Le modèle le plus simple de procédure de décision multicritères est basé sur l'application d'une règle de décision hiérarchique [FISHBURN 1972]. Pour ce faire

on applique une relation linéaire de préférence  $P$  à l'ensemble des critères  $D$ . Si cette relation crée un ordre total sur l'ensemble des critères, ces derniers peuvent alors être classés du moins important au plus important. Dans cette classification il n'y a plus de critères équivalents. La procédure de décision est alors très simple : on classe les actions en fonction de leur évaluation pour le critère le plus important ou favori. Si plusieurs actions ont une évaluation équivalente pour ce critère, on utilise leur évaluation pour le second critère afin de les départager. On répète cette procédure pour les critères suivants jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'action équivalente. Le problème principal soulevé par cette procédure de décision multicritères est bien entendu la définition de l'ordre total des critères.

Pour remédier à ce problème il est possible d'utiliser une procédure de décision multicritères basée sur le surclassement des actions [ROY 1981]. On dit qu'une action  $a_i$  surclasse une action  $a_j$ , si  $a_i$  est préférée à  $a_j$  pour le plus grand nombre de critères et que les évaluations de  $a_i$  pour les autres critères ne sont pas plus mauvaises que celles de  $a_j$  pour les autres critères. Ainsi on peut définir un ordre complet sur l'ensemble des actions, en utilisant des tests de concordance et de discordance. Cette procédure de décision multicritères permet de tenir compte de notions telles que l'indifférence, les préférences strictes ou faibles, l'incompatibilité.

Dans notre cas de figure, les deux critères utilisés (le coût et la sensibilité structurelle) ne sont pas réellement comparables et par conséquent ils ne peuvent être classés. Ceci nous conduit à utiliser une procédure de décision hiérarchique. Ainsi le placement de capteurs optimal au sens de ces deux critères correspondra à celui qui surclasse tous les autres [CARPENTIER 97].

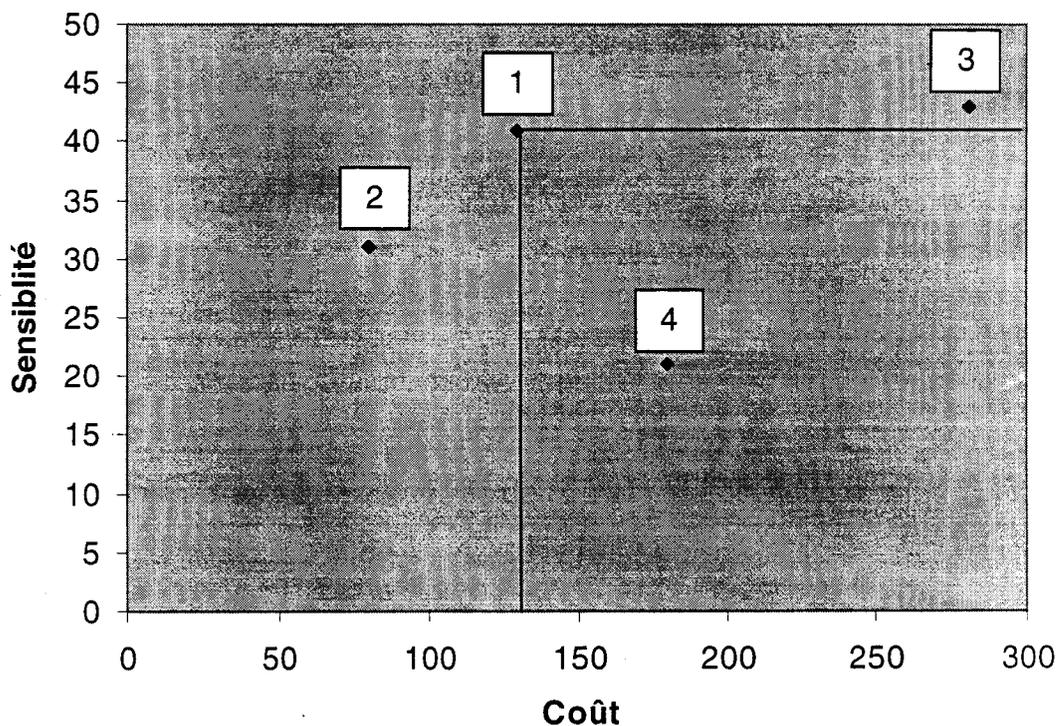


Figure 4.18. Coût et sensibilité structurelle des systèmes de surveillance.

La figure 4.18 représente l'évaluation des critères de coût et de sensibilité structurelle pour les quatre systèmes de surveillance conçus à partir des quatre solutions de placement de capteurs obtenues à la suite de la troisième phase de la méthode. L'axe X correspond au coût et l'axe Y à la sensibilité structurelle. Ce graphique montre que la solution 1 surclasse les solutions 3 et 4 car tout en étant nettement moins chère cette solution présente une sensibilité structurelle équivalente ou supérieure. Par contre, la solution 1 coûte plus cher que la solution 2 mais présente aussi une meilleure sensibilité structurelle aux défaillances. Pour parvenir à effectuer un choix entre ces deux solutions, on est obligé d'utiliser une procédure de décision hiérarchique en décrétant par exemple que l'on souhaite privilégier le coût par rapport à la sensibilité structurelle. Dans ces conditions on retient donc la solution 2, qui consiste à mesurer la variable  $x_3$ .

## **4 CONCLUSION.**

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthode originale de placement de capteurs en vue de la surveillance de composants d'un système. Cette méthode repose sur un cahier des charges de surveillance définissant les composants qu'il est nécessaire de surveiller.

En s'appuyant sur l'analyse structurelle des systèmes et en définissant les critères de détectabilité et de localisabilité structurelles des défaillances, une méthode de placement de capteurs a été proposée. Cette méthode repose sur deux algorithmes qui permettent de définir les sous-ensembles de résidus devant être générés pour concevoir un système de surveillance localisant les défaillances des relations définies dans le cahier des charges de surveillance. Grâce aux différents sous-ensembles de résidus ainsi générés, on peut définir les différents sous-ensembles de capteurs devant être ajoutés au système. Ces sous-ensembles de capteurs définissent autant de solutions de configuration de l'instrumentation.

Dans le but de retenir la meilleure solution, nous avons introduit deux critères supplémentaires à savoir, le coût et les services additionnels de surveillance des systèmes de surveillance. Ainsi en combinant les algorithmes et la procédure de décision multicritères, nous obtenons une solution de placement de capteurs optimale, en terme de détection et de localisation des défaillances définies dans le cahier des charges, et respectant le meilleur compromis en terme de coût et de surveillance.

# ***CHAPITRE V : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES***

# 1 CONCLUSIONS.

Le premier chapitre nous a permis de donner une définition précise de la surveillance des systèmes industriels ainsi que de ses fonctions et des principes qu'elle met en jeu. En replaçant la surveillance dans le contexte plus global de la sûreté de fonctionnement, nous avons pu établir que la surveillance contribue non seulement à l'assurance de l'intégrité du système en reconnaissant et en signalant en temps réel les anomalies de comportement du système, mais aussi à l'accroissement de la maintenabilité du système en indiquant les causes de dysfonctionnement. En ajoutant au système de surveillance une procédure de reconfiguration, elle peut enfin participer à la sécurité du processus. La surveillance des systèmes industriels est donc devenue au fil des années un enjeu technique et économique très important.

Le problème du placement de capteurs pour la surveillance est évoqué dans de nombreux travaux. Il s'avère que le placement de capteurs est plus souvent étudié dans le but d'améliorer les performances des différents outils utilisés par la surveillance (estimation des variables, des paramètres ou de l'état, observabilité) que pour augmenter directement les performances du système de surveillance en terme de détectabilité ou de localisabilité des défaillances. Cette étude bibliographique nous a permis de montrer l'originalité de notre démarche qui consiste à établir le schéma d'instrumentation d'un système industriel permettant de construire un système de surveillance capable de détecter et de localiser les défaillances d'un certain nombre de composants de ce système définis dans un cahier des charges de surveillance.

L'analyse structurelle et son utilisation en surveillance ont été plus particulièrement abordées dans le second chapitre car elle constitue l'outil de base de nos travaux. L'analyse structurelle fait partie de la famille des méthodes de surveillance s'appuyant sur la recherche de relations de redondance analytique. Son choix peut être justifiée par le fait qu'elle est souvent la mieux adaptée aux systèmes industriels complexes. En effet, elle permet de réaliser une modélisation globale du système à partir des modèles des différents composants et de figurer de façon simple leurs interconnexions. De plus elle constitue une approche unifiée pour déterminer les éléments communs des différents modèles de composants qui peuvent avoir des représentations très variées (linéaires ou non, dynamiques, statiques, à base de règles...). L'approche structurelle permet d'établir les contraintes existantes entre les différentes variables et relations du système. De plus l'approche structurelle ne nécessite pas la définition complète des modèles des composants du système. A ce titre elle peut être appliquée dès les phases initiales de l'étude d'un système et permet de changer un composant pour assurer une fonctionnalité donnée ou la valeur d'un paramètre du modèle de comportement sans remettre en cause les résultats de l'étude structurelle. Enfin l'approche structurelle permet aussi d'analyser les performances du système de surveillance ainsi obtenu.

Le troisième chapitre a eu pour objectif de définir un certain nombre de concepts nécessaires à l'élaboration de notre méthodologie de placement de capteurs. Dans un premier temps et en se basant sur une représentation sous forme de graphe biparti orienté de la structure du système, nous avons défini une nouvelle

méthode de génération exhaustive de l'ensemble des résidus. Cette méthode permet de tenir compte de toutes les possibilités d'inversibilité des relations et d'évaluation multiple des variables. Elle est basée sur la construction d'un arbre de résolution en ET/OU à partir de chaque variable connue du système.

La définition généralisée de la notion de défaillance, qui consiste à dire que surveiller un composant du système revient en réalité à surveiller la relation qui modélise un de ses modes de comportement normal, permet de ne plus faire de distinction entre les différents types de défaillances (capteurs, actionneurs, système). L'étude de la sensibilité structurelle des résidus aux défaillances des relations nous a conduit à définir leur nouvelle structuration en fonction des relations et non plus des variables. Ainsi nous avons pu établir qu'un résidu est sensible aux défaillances d'une relation s'il l'utilise pour son calcul. Cette nouvelle structuration des résidus nous a amené à définir le vecteur signature de défaillance d'une relation. Ce vecteur permet d'indiquer le sous-ensemble de résidus sensibles aux défaillances de cette relation.

En se basant sur les vecteurs signatures de défaillances nous avons défini les critères de capacité de détection et de localisation des défaillances. Ainsi on dit qu'une relation est détectable si son vecteur signature de défaillance est non nul. Elle devient localisable si de plus, elle est la seule à posséder ce vecteur signature de défaillance.

Dans le quatrième chapitre nous avons proposé une méthode de placement de capteurs s'appuyant sur le critère de capacité de localisation défini précédemment. Son objectif est de définir la meilleure configuration de placement de capteurs permettant de surveiller les relations définies dans le cahier des charges. Pour y parvenir nous avons proposé deux algorithmes permettant de générer tous les sous-ensembles de résidus à partir desquels il est possible de concevoir un système de surveillance rendant les relations à surveiller localisables. Ces algorithmes donnent toutes les configurations de placement de capteurs optimales au sens de la localisabilité structurelle. Il convient donc d'utiliser des critères supplémentaires permettant d'effectuer un choix parmi les solutions obtenues.

Le premier critère correspond au coût du système de surveillance. On peut remarquer que chaque système de surveillance est aussi sensible aux défaillances d'un certain nombre de relations qui ne sont pas définies dans le cahier des charges. Ainsi pour chaque configuration de capteurs, on peut évaluer les services additionnels de surveillance en affectant un poids à chaque relation n'appartenant pas au cahier des charges et qui matérialise l'intérêt que l'on porte à sa surveillance éventuelle. Les deux critères de coût et de sensibilité structurelle aux défaillances sont contradictoires car la diminution du coût entraîne généralement une diminution de la sensibilité structurelle. Pour trouver le meilleur compromis, on peut utiliser une procédure de décision multicritères. Les procédures utilisées peuvent être hiérarchiques (classement de critères par ordre d'importance) ou basées sur le surclassement (recherche de la solution préférée pour une partie des critères et pas plus mauvaise pour les autres).



## 2 PERSPECTIVES.

Nous avons pu voir que l'originalité de notre méthode est qu'elle s'appuie sur un cahier des charges de surveillance. Ce cahier des charges doit indiquer en particulier les composants du système dont on cherche à détecter et localiser les défaillances. La rédaction de ce cahier des charges doit être effectuée par un expert du processus qui doit être à même de déterminer les composants dont la surveillance présente un intérêt. Il pourrait donc être intéressant de fournir un outil, une méthode ou un guide permettant aux industriels de définir au mieux ce cahier des charges de surveillance. L'objectif de ce guide est alors de fournir une évaluation de la pertinence de la surveillance d'un composant.

Il peut être intéressant de compléter le travail que nous avons effectué pour définir des critères supplémentaires permettant de choisir la meilleure configuration de capteurs issue des algorithmes. En effet, ce choix correspond en réalité à la sélection d'un sous-ensemble de résidus permettant de construire un système de surveillance répondant au cahier des charges. Il est possible de tenir compte de l'aspect analytique des résidus pour effectuer ce choix. A titre d'exemple, on peut envisager un critère de calculabilité qui prend en compte la complexité de l'écriture mathématique des résidus ou leur ordre de calcul. De façon similaire, on peut imaginer d'évaluer la sensibilité ou, a contrario la robustesse, des résidus afin de retenir le système de surveillance détectant ou localisant au mieux les défaillances.

Dans le premier chapitre de ce mémoire nous avons indiqué que la surveillance avait aussi un rôle à jouer dans la reconfiguration du système. On rappelle que dans le cas d'une défaillance procédée, la reconfiguration assure le passage d'un mode de fonctionnement à un autre dans le but de continuer à assurer la mission, même sous forme partielle. Elle consiste donc à prendre en compte une défaillance détectée et localisée grâce au système de surveillance pour élaborer les commandes du système. On parle ainsi de reconfiguration de la commande. Etant donné que notre méthode de placement de capteurs s'appuie sur le parcours d'un graphe représentant la structure du système, il semble possible de l'adapter pour prendre en compte le problème de la reconfiguration. Dans ce cas de figure, elle consiste à déterminer un chemin dans le graphe permettant d'évaluer les variables nécessaires à la commande en évitant de passer par les nœuds matérialisant les relations des composants défaillants.

Dans le même esprit on peut aussi imaginer d'élaborer une méthode de placement de capteurs en vue de la reconfiguration. Son objectif serait alors de déterminer la meilleure configuration de l'instrumentation permettant la reconfiguration de la commande du système en cas de défaillances de relations définies dans un cahier des charges.

***REFERENCES  
BIBLIO-  
GRAPHIQUES***

- [**ABDOLLAHZADEH 96**] : Abdollahzadeh A., Luong M., Maquin D., Ragot J., « Influence de la précision des capteurs sur la précision de l'estimation d'un système – Application au choix de la précision des capteurs. », *SIMO'96 PROGREP*, TOULOUSE, France, 22-23 Octobre 1996.
- [**AFNOR 84**] : Afnor Norme Française X60-010, « Vocabulaire de maintenance et de gestion des biens durables », Juin 1984.
- [**AFNOR 88**] : Afnor Norme Française X60-500, « Terminologie relative à la fiabilité, maintenabilité, disponibilité », Octobre 1988.
- [**ALI 93**] : Ali Y., Narasimhan S. , « Sensor network design for maximizing reliability of linear process. », *AIChE Journal*, vol. 39, N°5, pp 820-828, 1993.
- [**ARBEL 82**] : Arbel A., « Sensor placement in optimal filtering and smoothing problems. », *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-27, N°1, pp 94-98, February 1982.
- [**ARIATTI 75**] : Ariatti F., Marzio L., Ricci P., « Designing state estimation in view of reliability. », PSCC Conference, CAMBRIDGE, United Kingdom, pp 2.3-2.8, September 1975.
- [**BAGAJEWICZ 95**] : Bagajewicz M. J., « Optimal sensor location in process plants. » *5<sup>th</sup> European Symposium on Computer Aided Process Engineering, ESCAPE'95*, BLED, Slovenia, June 11-14, 1995.
- [**BASSEVILLE 87**] : Basseville M., Benveniste A., Moustakides G.V., Rougée A., « Optimal sensor location for detecting changes in dynamical behaviour. », *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-32, N°12, pp 1067-1075, December 1987.
- [**BASSEVILLE 93**] : Basseville M., Nikiforov I., « Detection of abrupt changes. Theory and application. », *Prentice Hall, Information and system science series*, 1993.
- [**BERGE 70**] : Bergé C., « Graphes et hypergraphes. », *Editions Dunod*, 1970.
- [**BRUNET 90**] : Brunet J., Jaume D., Labarrère M., Rault A., Vergé M., « Détection et diagnostic de pannes. Approche par modélisation. », *Editions Hermès*, 1990.
- [**CARPENTIER 96a**] : Carpentier T., Litwak R., « Une approche structurale pour le positionnement de capteurs en vue de la surveillance. », *AGI'96, Forum des doctorants, Automatique, Génie Informatique et Image*, pp 103-107, TOUR, France, 6-7 Juin 1996.
- [**CARPENTIER 96b**] : Carpentier T., Litwak R., « Algorithms and criteria for sensors location in view of supervision. », *CESA'96 IMACS Multiconference. Symposium on Control, Optimization and Supervision*. pp 684-689, LILLE, France, July 9-12 1996.

- [**CARPENTIER 97**] : Carpentier T., Litwak R., Cassar J.P., « Criteria for the evaluation of F.D.I. systems. Application to sensors location. » *IFAC/IMACS symposium on fault detection, supervision and safety for technical processes, SAFEPROCESS'97*, HULL, Great Britain, 25-28 August 1997.
- [**CASSAR 91**] : Cassar J. P., Staroswiecki M., Herbault E., Huynh C. T., Cordier B., « Supervision system Design for a Petroleum Production application. », *IFAC/IMACS symposium on fault detection, supervision and safety for technical processes, SAFEPROCESS'91*, pp 289-294, BADEN-BADEN, Germany, september 1991.
- [**CASSAR 92a**] Cassar J. P., Staroswiecki M., Ferhati R., « Multivalued logic voting scheme for residual evaluation in Failure Detection and Isolation Systems. », *IFAC/IFIP/IMACS Symposium on Artificial Intelligence in Real-Time Control*, pp 573-578, DELFT, The Netherlands, June 16-18 1992,.
- [**CASSAR 92b**] : Cassar J. P., Staroswiecki M., Declerk P., « Structural decomposition of large scale systems for the design of failure detection and isolation procedures. », *System Science XI*, WROCLAW, Poland, September 1992.
- [**CASSAR 94**] : Cassar, J.P., Litwak, R., Cocquempot, V., Staroswiecki, M., « Approche structurelle de la conception de systèmes de surveillance pour les procédés industriels complexes. », *Revue Européenne Diagnostic et Sûreté de Fonctionnement*. Vol. 4 N°2 pp 179-202 1994.
- [**CASSAR 96a**] : Cassar J.P., Staroswiecki M., « Pour une approche unifiée de la surveillance. », *Ecole d'été d'automatique*, Tome 1, GRENOBLE, France, 2-6 septembre 1996.
- [**CASSAR 96b**] : Cassar J.P., Staroswiecki M., « Advanced design of the decision procedure in failure detection and isolation systems. », *Ecole d'été d'automatique*, Tome 2, GRENOBLE, France, 2-6 septembre 1996.
- [**CHOW 84**] : Chow E.Y., A. S. Willsky, « Analytical redundancy and the design of robust failure detection system. », *IEEE transactions on Automatic Control*, AC 29 n°7, July 1984.
- [**COCQUEMPOT 93**] : Cocquempot V., « Surveillance des processus industriels complexes : génération et optimisation des relations de redondance analytique. », *Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille, VILLENEUVE D'ASCQ*, France, 18 février 1993.
- [**CROWE 83**] : Crowe C. M., Garcia Campos Y.A., Hrymak A., « Reconciliation of process flow rates by matrix projection. Part I : linear case. » *AIChE Journal*, vol. 29, pp 881-888, 1983.
- [**DAROUACH 86**] : Darouach M., Ragot J., Fayolle J., Maquin D., « Validation des mesures par équilibrage de bilans-matière. », *International Journal of Mineral Processing*, vol.17, pp 273-285, 1986.

- [DECLERCK 91a] : Declerck P., Staroswiecki M. « Characterization of canonical components of structural graph for fault detection in large scale industrial plants. » *ECC'91, European Control Conference*, GRENOBLE, France, July 2-5, 1991.
- [DECLERCK 91b] : Declerck P., « Analyse structurale et fonctionnelle des grands systèmes. Application à une centrale PWR 900 MW. » *Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille, VILLENEUVE D'ASCQ, France, décembre 1991.*
- [DE KLEER 84] : De Kleer J., S. Brown, « A qualitative Physics based on Confluences. » *Artificial Intelligence* 24, pp 7-83, 1984.
- [DE KLEER 86] : De Kleer J., « An Assumption based TMS », *Artificial Intelligence* N°28-2, pp 127-162, 1986.
- [DELMER 96] : Delmer G., « Comparaison des méthodes d'identification paramétrique et de l'espace de parité pour la détection et la localisation de défaillances dans les systèmes automatisés. », *Thèse de doctorat de l'université de Lille*, 1996.
- [DE MOOR 95] : De Moor B., Van Overschee P., « Numerical algorithm for subspace state space system identification. » *Tutorials of ECC'95, European Control Conference 1995*, ROMA, Italy, September 1995.
- [DUBUISSON 90] : Dubuisson B., « Diagnostic et reconnaissance des formes. », *Editions Hermes*, 1990.
- [DULMAGE 59] : Dulmage A. L., Mendelshon N. S., « Covering of bi-partite graphs. », *Canadian journal of mathematic*, vol 10, 1959, pp 517-534.
- [EVANS 70] : Evans F. A., Wilcox J. C., « Experimental strapdown redundant sensor inertial navigation systems. », *Journal of Spacecraft*, vol. 7, N°9, 1970.
- [FARRENY 89] : Farreny H., GHALLAB M., « Eléments d'intelligence artificielle », *Editions Hermes*, 1989, ISBN 2-86601-072-8.
- [FRANK 93] : Frank P. M., « Advances on observer-based fault diagnosis », *Tooldiag'93, International Conference on Fault Diagnosis*, TOULOUSE, France, April 5-7 1993.
- [FRANK 94] : Frank P.M., « Application of Fuzzy logic to process supervision and fault diagnosis. », *IFAC/IMACS symposium on fault detection, supervision and safety for technical processes, SAFEPROCESS'94*, vol. 2, pp 531-538, ESPOO, Finland, June 13-15, 1994.
- [FISHBURN 72] : Fishburn P.C., « Lexicographic orders, utilities and decision rules : a survey. », *Management Science* N°11, pp 1442-1471, July 1972.

- [**GERTLER 88**] : Gertler J. J., « Survey on model-based failure detection and isolation in complex plants. », *IEEE Control System Magazine*, pp 3-11, december 1988.
- [**GERTLER 89**] : Gertler J.J., Luo Q., « Robust isolable models for failure diagnosis. » *AIChE journal*, vol. 35, N° 11, pp 1856-1868, November 1989.
- [**GERTLER 93**] : Gertler J.,J., Monajemy R., « Generation of Directionnal Residuals with dynamic parity equations. », *12<sup>th</sup> World Congress of Automatic Control*, Vol. VII, pp 505-510, SYDNEY, Australia, july 18-23 1993.
- [**GONDRAN 85**] : Gondran M., Minoux M., « Graphes et algorithmes. », *Editions Eyrolles*, 1985.
- [**GUERNEZ 96**] : Guemez C., Cassar J.P., Staroswiecki M., « Fault detection and isolation on polynomial systems : analytical redundancy relations generation and residuals structuration », *CESA'96, IMACS Multiconference, Symposium on control, optimization and supervision*, pp 690-695, LILLE, France, july 9-12 1996.
- [**HAMAD 86**] : Hamad M., « Validation des mesures et détection des capteurs défaillants dans un système de contrôle commande. », *Thèse de l'Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois*, LILLE, France, Juin 1986.
- [**IMMONEN 94**] : Immonen P. J., « Classification and placement of measurements through LP/MIP algorithms. », *IFAC/IMACS symposium on fault detection, supervision and safety for technical processes, SAFEPROCESS'94*, ESPOO, Finland, June 13-15, 1994.
- [**IGL 89**] : IGL technology, « SADT un langage pour communiquer. », *Editions Eyrolles*, 1989.
- [**IRI 81**] : Iri M., Aoki K., O'Shima E., Maisuyama H., « An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process. », *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 3, N° 1-4, pp 489-493, 1981.
- [**ISERMAN 84**] : Iserman R. « Process fault detection based on modelling and estimation methods. A survey », *Automatica*, vol. 20, pp 387-404, 1984.
- [**ISERMAN 96**] : Iserman R. « Terminology in the field of supervision, fault detection, and diagnosis », <http://w3.rt.e-technik.th-darmstadt.de/TFD/>, *IFAC Technical Committee SAFEPROCESS*, 1996.
- [**KOPPEN-SELIGER 95**] : Köppen-Selger, P., Franck P. M., Wolff A., « Residual evaluation for fault detection and isolation with RCE Neural Networks », *ACC'95, American Control Conference*, vol. 5, pp 3264-3268, WASHINGTON, USA, June 1995.
- [**KOSUT 82**] : Kosut R.L., Arbel A., Kessel K. M., « Optimal sensor system design for state reconstruction. », *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-27, pp 242-244, February 1982.

- [**KRETISOVALIS 87**] : Kretsovalis A., Mah R. S. H., « Effects of redundancy on estimation accuracy in process data reconciliation. », *Chemical Engineering Science*, vol. 42 N°9, pp 215-2121, 1987.
- [**KRETISOVALIS 88**] : Kretsovalis A., Mah R. S. H., « Observability and redundancy classification in generalized process network - Algorithms. », *Computers Chemical Engineering*, vol. 12 N°7, pp 671-703, 1988.
- [**LERMAN 81**] : Lerman I.C., « Classification et analyse ordinaire des données . » *Editions Dunod*, 1981.
- [**LUONG 94**] : Luong, M., Maquin D., Huynh C. T., Ragot J., « Observability, redundancy, reliability and integrated design of measurement system », 2<sup>nd</sup> IFAC Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications, SICICA'94, BUDAPEST, Hungary, June 8-10, 1994.
- [**LUONG 95**] : Luong M., Paris J. M., Maquin D., Ragot J., « Observability, reliability and sensor positioning. », *AIChE Spring National Meeting*, Houston, USA, March 19-23, 1995.
- [**LUONG 96**] : Luong M. « Conception de l'architecture d'un système d'instrumentation sous contraintes de diagnostic, de fiabilité et de disponibilité. », *Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine*, NANCY, France, 1996
- [**MADRON 92**] : Madron F., Veverka V., « Optimal selection of measuring points in complex plant by linear models. », *AIChE Journal*, vol. 38, N°2, pp 227-236, February, 1992.
- [**MAH 76**] : Mah R. S. H., Stanley G. M., Downing D. M., « Reconciliation and rectification of process flow and inventory data. » *Industrial Engineering Chemical Processes*, vol. 5, pp 175-183, 1976.
- [**MAQUIN 87**] : Maquin D., « Observabilité, diagnostic et validation de données des procédés industriels », *Thèse de l'université de Nancy I*, NANCY, France, Novembre 1987.
- [**MAQUIN 89**] : Maquin D., Darouach M., Ragot J., « Observability and data validation of bilinear system. » 1<sup>er</sup> congrès IFAC AIPAC'89, vol. 2, pp II.139-II.144, NANCY, France, 3-5 Juillet 1989.
- [**MAQUIN 94**] : Maquin D., Luong M., Ragot J., « Observability analysis and sensor placement. », *IFAC/IMPACS Symposium on fault detection, supervision and safety for technical processes, SAFEPROCESS'94*, ESPOO, Finland, 13-15 July 1994.
- [**MAQUIN 95**] : Maquin D., Luong M., Ragot J., « Some ideas about the design of measurement systems. », *European Control Conference, ECC'95*, ROME, Italy, September 5-8, 1995.

- [MEYER 93] Meyer, M., Enjalbert M., [1993], « Aide au positionnement de capteurs sur des procédés complexes. », *Entropie* N°179 pp 31-39, 1993.
- [MEYER 94a] : Meyer M., Floquet P., Enjalbert M., « Optimal sensor location on a complex plant : branch and bound and simulated annealing comparison. » 4<sup>th</sup> European Symposium on Computer Aided Process Engineering, ESCAPE'94, pp 175-182, DUBLIN, Eire, 28-30 March 1994.
- [MEYER 94b] : Meyer M., Le Lann J.M., Koehret B., Enjalbert M., « Optimal sensor location on a complex plant, using a graph oriented approach. », *Computers Chemical Engineering*, vol. 18, pp S535-540, 1994.
- [MONTMAIN 94] : Montmain J. « Raisonnement approximatif et graphe causaux pour la détection et la localisation de défaillances. », *Journée d'étude CNRS S<sup>3</sup>, Sécurité, Surveillance, Supervision*, PARIS, France, 17-18 novembre 1994.
- [MULLER 72] : Muller P. C., Weber H. I., « Analysis and optimization of certain qualities of controllability and observability for linear dynamical systems. », *Automatica*, vol. 8, pp 237-246, 1972.
- [PHUA 77] : Phua K., Dillon T. S., « Optimal choice of measurements for state estimation. », *Power Industry Computer Applications Conference*, pp 431-440, 1977.
- [POTTER 77] : Potter J.E., M.C. Suman, « Thresholdless redundancy management with array of skewed instrument. », *Electronic Flight Control Systems*, Agadograph, 224, 1977, pp 15-25.
- [RAGOT 90] : Ragot J., Maquin D., Darouach M., Bloch G., « Validation de données et diagnostic. », *Editions Hermes*, 1990.
- [RAGOT 91] : Ragot J., Maquin D., Darouach M., « Analysis of generalized bilinear systems. Application to diagnosis. », *IMACS Symposium MCTS Modelling and Control of Technological Systems*, vol. 2, pp 528-535, LILLE, France, 1991.
- [RICHETIN 75] : Richetin M., « Analyse structurale des systèmes complexes en vue d'une commande hiérarchisée. », *Thèse de Doctorat d'Etat*, Université Paul Sabatier de TOULOUSE, France, Juillet 1975.
- [ROY 70] : Roy B., « Algèbre moderne et théorie des graphes. », *Editions Dunod*, 1970.
- [ROY 81] : Roy B., Vincke P., « Multicriteria analysis : survey and new directions. », *European Journal of operational research*. Vol. 8, 1981
- [SAPORTA 78] : Saporta G., « Théorie et méthodes de la statistique. », *Editions Paris-Technip*, 1978.

- [SPROSSER 92] : Sprosser T. « Contribution à l'étude des méthodes de détection de défauts par redondance analytique. », *Thèse de doctorat, Univeristé de Haute Alsace, France, 16 décembre 1992.*
- [STAROSWIECKI 89] : Staroswiecki M., Cassar J. P., Declerck P., « Automatic Analytical Redundancy Relationships generation in complex interconnected system based on a structural approach. », *4th INCARF, NEW DELHI, India, December 1989.*
- [STAROSWIECKI 91] : Staroswiecki M., Cocquempot V., Cassar J.P., « Observer based and parity space approaches for failure detection and identification. », *13<sup>th</sup> IMACS World Congress, DUBLIN, Eire, July 1991.*
- [STAROSWIECKI 93] : Staroswiecki M., Cassar J. P., Cocquempot V., « A general approach for multicriteria optimization of structured residuals. », *TOOLDIAG'93 International Conference on Fault Diagnosis, pp 800-807. TOULOUSE, France, April 5-7 1993*
- [STAROSWIECKI 94] : Staroswiecki M., Bayard M. « Actionneurs intelligents », *Editions Hermes, 1994.*
- [STAROSWIECKI 96] : Staroswiecki M., Cassar J. P., « Approche structurelle pour la conception des systèmes de surveillance.», *Ecole d'été d'automatique, Tome 1, GRENOBLE, France, 2-6 septembre 1996.*
- [TATENO 94] : Tateno S., Shibata B., Tsuge Y., Matsuyama H., « Optimal allocation of sensors for fault diagnosis system using the signed directed graph. », *IFAC/IMACS Symposium on Fault Detection, Supervision, and Safety for Technical processes, Safeprocess'94, ESPOO, Finland, pp 756-741, june 1994.*
- [TURBATTE 91] : Turbatte H. C., Maquin D., Cordier B., Huynh C. T., « Analytical redundancy and reliability of measurement system. », *IFAC/IMACS Symposium on Fault Detection, Supervision, and Safety for Technical Processes, Safeprocess'91, vol.1, pp 49-54, BADEN-BADEN, germany, September 10-13,1991.*
- [TURBATTE 92] : Turbatte H.C., « Conception d'architectures d'instrumentation sous contrainte d'observabilité et de fiabilité. Application à des plate-formes pétrolières. » *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, NANCY, France, Octobre 1992.*
- [UDWADIA 94] : Udwadia F. E., Methodology for optimum sensor locations for parameter identification in dynamic systems. », *Journal of engineering mechanics, vol. 120, N°2, pp 368-390, 1994.*
- [VACLAVEK 76] : Vaclavek V., Loukra M. « Selection of measurements necessary to achieve multicomponent mass balances in chemical plant. », *Chemical Engineering Science, vol.31, pp 1199-1205, 1976.*

- [**VANDER VELDE 84**] : Vander Velde W.E., Carignan C.R., « Number and placement of control system components considering possible failures. », *Journal of Guidance, Control, Dynamic*, vol.7, pp 703-709, November and December 1984.
- [**VERGE 91**] : Vergé M., Jaume D., Rault A., « Fault detection and diagnosis applied to a pilot process. », *IFAC/IMACS symposium on fault detection, supervision and safety for technical processes, SAFEPROCESS'91*. vol. 2, BADEN-BADEN, Germany, september 10-13 1991
- [**VERGE 94**] : Vergé M., Jaume D., « Fault detection and Bond graphe modelling. », *IFAC/IMACS, Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS'94*, vol. 2, pp 748-753, ESPOO, Finland, June 13-15, 1994.
- [**VILAIN 98**] : Vilain L., « Conception et évaluation d'un système de surveillance : application au serrage hydraulique. », *Thèse de l'Université de Lille 1*. LILLE, France, avril 1998.
- [**VILLEMEUR 88**] : Villemeur A., « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité - Facteurs humains - Informatisation. », *Editions Eyrolles*, 1988.
- [**WATANABE 85**] : Watanabe K., Sasaki M., Himmelblau D. M., « Determination of optimal measuring sites for fault detection of non-linear systems. », *International Journal of System Science*, vol. 16, pp 1345-1364, November 1985.
- [**ZADEH 69**] : Zadeh L. A., « System theory. » *Mc Graw Hill. Interuniversity Electronics Series*, Vol 8, 1969.
- [**ZWINGELSTEIN 95**] : Zwingelstein G. « Diagnostic des défaillances. Théorie et pratique pour les systèmes industriels. », *Editions Hermes*, 1995.

# ***RESUME***

L'objectif de ce travail est d'établir le schéma d'instrumentation d'une installation permettant de détecter et de localiser les défaillances de composants du système définis dans un cahier des charges. L'approche choisie s'appuie sur l'analyse structurelle du système et sur la représentation de sa structure sous forme de graphe biparti orienté. Une définition généralisée de la notion de défaillance, une nouvelle structuration des résidus et une nouvelle définition des signatures de défaillances (en fonction des relations et non plus des variables) ont permis d'établir les critères de capacité de détection et de localisation des défaillances. La notion de défaillance généralisée s'appuie sur le fait que la surveillance d'un composant d'un système consiste en réalité à surveiller la relation qui modélise un mode de comportement de ce composant. Ce formalisme permet de ne plus faire de distinction entre les différents types de défaillances (capteurs, actionneurs, systèmes). Une méthode de génération de l'ensemble des résidus d'un système a été établie à partir de la construction d'arbre de résolution ET/OU pour chaque variable connue. Puis, la sensibilité structurelle des résidus aux défaillances des relations des systèmes a été étudiée. Cette étude se base sur une nouvelle structuration des résidus qui matérialise cette sensibilité structurelle car elle tient compte de l'utilisation ou non d'une relation dans leur calcul. Une méthodologie de placement de capteurs a été élaborée dans le but de rendre détectable et localisable le sous-ensemble des relations à surveiller. Elle s'appuie sur deux algorithmes permettant la construction d'un sous-ensemble de résidus suffisant pour localiser les défaillances des relations à surveiller. Ces algorithmes donnent toutes les configurations de placement de capteurs répondant au cahier des charges de surveillance. Il convient donc d'utiliser des critères supplémentaires permettant d'effectuer un choix parmi les solutions obtenues. Le premier critère correspond au coût du système de surveillance. On peut remarquer que chaque système de surveillance est aussi sensible aux défaillances d'un certain nombre de relations qui ne sont pas définies dans le cahier des charges. Ainsi pour chaque configuration de capteurs, on peut évaluer les services additionnels de surveillance en affectant un poids à chaque relation n'appartenant pas au cahier des charges et qui évalue l'intérêt que l'on porte à sa surveillance éventuelle. Les deux critères de coût et de sensibilité structurelle aux défaillances sont contradictoires car la diminution du coût entraîne généralement une diminution de la sensibilité structurelle. Pour trouver le meilleur compromis, on peut utiliser une procédure de décision multicritères. Les procédures utilisées peuvent être hiérarchiques (classement de critères par ordre d'importance) ou basées sur le surclassement (recherche de la solution préférée pour une partie des critères et pas plus mauvaise pour les autres).

