

Optimisation d'un schéma d'instrumentation d'une installation pour la surveillance

Sabrina Abid *, Pr.Hafid Haffaf **,

*Département Informatique, Université Mustapha Stambouli, Mascara

**Département d'Informatique, Université d'Es-Senia, Oran

{abidsabrina2006,haffaf_hafid}@yahoo.fr

Résumé. Une conception de capteurs optimisée et une stratégie de placement de capteurs seront extrêmement bénéfiques à la fois pour assurer la sécurité et la réduction des coûts structurels des systèmes. L'objectif de ce travail est d'établir un schéma d'instrumentation d'une installation permettant de détecter et de localiser les défaillances de composants définis dans un cahier des charges de surveillance. L'approche choisie s'appuie sur l'analyse structurelle du système. Le placement de capteurs dans le but de rendre détectable et localisable l'ensemble des relations du système à surveiller est un problème d'ordre combinatoire. Comme contribution, une solution basée sur l'optimisation combinatoire est proposée pour la résolution en temps polynomial du problème.

Mots-clés: Surveillance; Placement Capteurs ; Analyse Structurelle ; Optimisation.

1 Introduction

L'amélioration du processus de sécurité est essentiellement basée sur la procédure de détection et l'isolation de faute (FDI) [7,6]. Les algorithmes de FDI consistent en la comparaison du comportement actuel avec le comportement de référence qui décrit le comportement en mode normal.

Compte tenu de l'existence d'une procédure efficace de détection de fautes, le problème qui se pose est de savoir comment les capteurs doivent être placés pour une efficacité optimale. Le problème fondamental de la détection de faute est de déduire l'existence d'une irrégularité dans la structure à partir des mesures prises par des capteurs répartis sur la structure. Il serait nécessaire dans la pratique, d'optimiser le nombre et l'emplacement des capteurs pour avoir un coût minimal et une fiabilité du système.

L'estimation de la qualité de l'état d'un processus et, par conséquent, sa sûreté de fonctionnement sont fortement conditionnées par le nombre et la répartition des mesures effectuées sur celui-ci. La disponibilité d'un processus peut être augmentée si celui-ci est capable de continuer à fonctionner même lors de la défaillance de certains capteurs. La conception de l'architecture d'instrumentation d'un système représente donc une étape très importante.

Les exigences de maintenance et de diagnostic doivent être examinées aux premiers stades de la conception. Pour cette raison, les méthodes d'analyse de la surveillance d'un système et la détermination de l'instrumentation nécessaire pour atteindre le niveau souhaité de surveillance, sont très appréciées.

Cette analyse d'un système donné peut être effectuée à la phase de conception, permettant de déterminer les capteurs qui sont nécessaires.

La surveillance (capacité de détecter et d'isoler les défauts) d'un système dépend essentiellement de l'architecture d'instrumentation implémentée [1]. Deux méthodes de placement de capteurs ont été développées, selon le type de connaissances utilisées pour décrire le processus : basée sur modèle (le modèle est donné sous forme analytique), et non basée sur modèle (le modèle est donné sous forme de règles, tables, la reconnaissance des formes, . . .).

Parmi les approches non basées sur modèle, on peut citer les approches neuronales (RN) [19], les algorithmes génétiques (GA) [7], les algorithmes du recuit simulé (RS) [18] et l'algorithme itératif d'insertion / délétion (I / D) [18].

Le principal inconvénient de l'utilisation de ces méthodes consiste en leur besoin d'une étape d'apprentissage du modèle, la connaissance physique est également supprimé, et les algorithmes de placement de capteur sont principalement basés sur l'heuristique.

L'approche basée sur modèle utilise les relations de redondance analytique (RRAs), pour lesquelles un algorithme de placement de capteur est appliqué. Le modèle analytique utilisé peut être donné sous forme structurelle ou sous forme d'équation d'état [4]. Pour les méthodes citées, le placement de capteur ne peut pas être défini de manière explicite. En outre, en plus du problème de l'étape de modélisation, la génération des RRAs n'est pas triviale et nécessite une théorie d'élimination complexe des variables inconnues.

La redondance analytique vise à trouver les relations entre les variables connues du système. Ces relations sont satisfaites dans le mode normal et pas satisfaites en la présence d'une faute.

Ce document porte la question spécifique du placement optimal de capteurs pour la surveillance; les solutions réfléchies sont celles de l'analyse structurelle.

Ce document est présenté comme suit: En Section 2 on donne une étude sur les méthodes de placement de capteurs ainsi que quelques concepts sur l'analyse structurelle, la section 3 définit le contenu du cahier de charge de surveillance. La Section 4 décrit une démarche suivie pour le placement de capteurs basé sur une méthode graphique et enfin une Conclusion.

2 Méthodes de placement de capteurs

2.1. Classification des méthodes de placement de capteurs

Pour le problème de placement de capteurs, on distingue deux types de méthodes: non basée sur modèle et basée sur modèle (Fig. 1).

Selon les travaux antérieurs on peut citer: les réseaux de neurones (RN), les algorithmes génétiques (GA), l'algorithme du recuit simulé (RS) et l'algorithme itératif d'insertion / délétion (I / D). Ils sont un objet d'une comparaison en [10], [18], [9].

Pour le deuxième type de méthodes, nous utilisons un modèle mathématique basé sur des lois physiques. Ce modèle peut être sous forme analytique, forme structurelle ou sous forme de modèle bond-graph.

L'inconvénient du diagnostic basé sur modèle est la nécessité d'un modèle fiable, qui suppose l'utilisation de l'ensemble des connaissances du système, ce qui rend la procédure de conception plus difficile.

Toutefois, la précision du modèle est la principale limite des approches basées sur modèle. Les méthodes non basée sur modèle requièrent des connaissances sur le système. Ces informations ne peuvent être obtenues sans phase d'apprentissage.

Le placement de capteurs a différents objectifs. Parmi eux, la vérification d'observabilité ainsi que la décomposition du système en partie redondante et inobservables à l'aide de la matrice d'incidence qui fait l'objet de nombreux travaux. Pour quantifier la redondance d'une variable, deux concepts peuvent être utilisés: le degré de redondance [8] et le degré de calculabilité [5]. L'approche matricielle [11,15] a été utilisée pour résoudre ce problème.

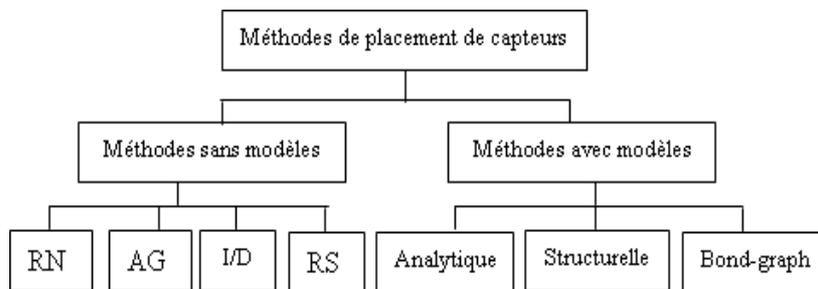


Fig. 1 Classification des méthodes de placement de capteurs

2.2. Optimisation des critères de placement des capteurs

Sur la base des stratégies de la recherche opérationnelle, plusieurs méthodes traitent le problème le placement de capteur où il faut optimiser une fonction objective sous contraintes.

Branch and Bound [14] est la méthode la plus utilisée dans l'optimisation discrète. La méthode développée par Narendra et Fukunaya en 1977, consiste à réduire l'espace de recherche au moyen d'une stratégie profonde d'abord.

En général, les conditions de surveillance n'imposent pas assez de contraintes conduisant à une solution unique du problème de placement de capteurs. L'ajout d'autres critères permet un choix unique. Parmi les solutions proposées, ces critères peuvent être le coût [12] ou de la sensibilité [13] du système de surveillance, ou les deux. La recherche opérationnelle est très bénéfique dans cette contribution [16].

La méthodologie développée dans [3] est basée sur l'analyse structurelle des systèmes utilisant des graphes bipartis orientés. Afin de représenter les relations existantes entre les différentes variables du système, une procédure de placement de capteurs a été élaborée pour détecter et localiser les défauts.

2.3. Analyse structurelle

L'avantage de l'approche analyse structurelle est le fait qu'elle ne peut conserver que les informations sur les contraintes agissant sur les variables. Cela permet de tenir compte de la non linéarité du système et de nombreux types de représentations: les règles, les tableaux, . . .

La première étape dans la procédure FDI consiste à générer un sous ensemble d'équations appelé relations de redondance analytiques (RRAs) qui expriment la différence entre le comportement de référence et le comportement actuel fournit par les donnée mesurées par les capteurs. Ces relations, dont l'évaluation numérique conduit à des résidus disparaissent quand le comportement de ce système est conforme au modèle, sont constituées seulement par des variables connues. Différentes approches ont été développées pour générer des résidus, basées sur la théorie des graphes [17], La théorie de Bond-graph [2]. . .

L'ensemble des RRAS est représenté dans un tableau binaire. Les colonnes de ce tableau sont appelés signatures de fautes. le "1" dans la $i^{\text{ème}}$ rangée et la $j^{\text{ème}}$ colonne du tableau indique que le résidu r_i est sensible à la $J^{\text{ème}}$ faute.

3 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.

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 nécessaire à la conduite du système.

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 [3].

4 Solution proposée

L'optimisation combinatoire est une discipline combinant diverses techniques des mathématiques discrètes et de l'informatique afin de résoudre des problèmes d'optimisation.

Afin de vérifier le cahier de charges contenant les degrés de redondance voulus des variables du système à surveiller, nous avons à placer les capteurs de mesure de façon optimale pour rendre ce système surveillable. Plusieurs combinaisons de placement de capteurs sont possibles, la question posée est : Quelle est la meilleure combinaison ou structure des capteurs qui vérifie au mieux le cahier de charge et qui donne un coût économique minimal du système. Afin de remédier à ce problème combinatoire, nous donnons comme perspectives de représenter le système sous forme de graphe tripartite. En terme de classement, la place d'un nouveau capteur crée un nouveau rapport fixe entre les relations et les variables connues du système (voir Figure 02).

Ce concept est fermé au degré de l'observabilité, de sorte que nous avons à choisir une place de telles manières à créer un nouveau cycle indépendant (s) contenant une des variable (s) et ne contenant pas d'autre (s).

Enfin, le domaine de la tolérance aux fautes est un problème qui est également fondée sur l'analyse structurelle pour englober les modes de fonctionnement défectueux. Graphiquement, quelques pistes dans le graphe tripartite ne sont pas disponibles, nous devons donc trouver d'autres voies pour vérifier les redondances (redondance) des variables à contrôler, donc nous avons à résoudre le problème en essayant d'éliminer la combinatoire.

4.1 Analyse structurelle par graphes :

Un cadre général pour une analyse de faisabilité de diagnostic est l'approche structurelle [21]. Le principe de cette méthode est d'identifier les mesures dans le système qui contiennent des informations redondantes. L'avantage de cette approche est que la structure du système est indépendante de la connaissance détaillée des paramètres.

Les types de variables dans un contexte de diagnostic sont: les variables connues qui correspondent à des mesures et des contrôleurs d'entrées, des variables inconnues, généralement des états internes. Formellement, le modèle structurel du système est défini comme suit:

$R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ Est l'ensemble des équations structurelles.

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_c\}$ Est l'ensemble des variables connues.

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ Est l'ensemble des variables inconnues.

$Z = X \cup C$ Est l'ensemble de toutes les variables. $|Z| = n + c$

Une contrainte R impose une relation entre les variables et les paramètres, appartenant à Z : $R_j(z_1, z_2, \dots, z_{|Z|}) = 0; j = 1, m$.

Ces relations peuvent représenter une relation dynamique, statique, linéaire ou non-linéaire; ce qui constitue la force de l'approche structurelle.

Définition 01: Un graphe triparti $G(C, R, X; A)$ est constitué de trois parties où chaque paire de parties est un graphe biparti, comme indiqué dans (fig1). L'ensemble de nœuds est alors divisée en A_c et A_x reliant C à R dans un coté et R à X dans un autre coté. En grossomodo, nous avons deux graphes biparties: $G_{B_1} = (C, R, A_c)$ et $G_{B_2} = (R, X, A_x)$.

Définition 02 : un *cycle résiduel* est un chemin fermé débutant de l'ensemble C et finissant dans C dans le graphe tripartite (toutes les variables parcouru par un cycle résiduel sont connues par déduction).

Parmi tous les cycles dans le graphe tripartite, seulement ce type de cycle sera investi.

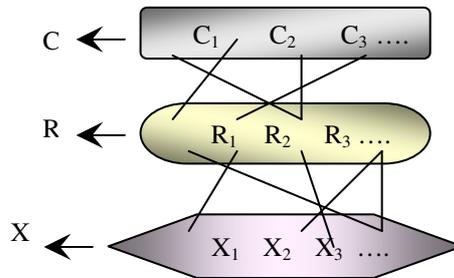


Fig. 2 Graphe tripartite associé à un système.

4.2 Représentation du problème de placement de capteurs :

Initialement, lors de la configuration du système pour la surveillabilité il n'y a pas de capteurs (on peut en avoir sous contraintes physiques). On peut représenter le placement de capteurs sous forme d'un vecteur binaire V défini ainsi :

Un capteur est un instrument de mesure direct sur une variable.

$$V = \begin{cases} V[i]=1 & \text{Si un capteur est placé au niveau de la variable } i \\ V[i]=0 & \text{Sinon.} \end{cases}$$

Observabilité, Redondance et Degré de Redondance

La classification basée sur l'observabilité consiste à mettre en évidence deux catégories de variables : les variables observables dont on peut connaître la valeur (par mesure directe ou par déduction) et les variables inobservables [20].

Observabilité minimale d'une variable

Une variable est redondante de degré 0 (observabilité minimale) s'il existe au moins une configuration telle que la panne d'un seul capteur du processus rend cette variable inaccessible.

Redondance de Degré Quelconque :

La notion précédente peut être étendue. Une variable redondante de degré k est une variable observable dont la valeur reste déductible lors de la défaillance simultanée de k capteurs quelconque du processus.

Positionnement de Capteurs sous Contraintes de Redondance :

Les définitions précédentes permettent de caractériser une variable quelconque à l'aide de son degré de redondance qui traduit sa disponibilité au regard des pannes de capteurs.

Conception du système d'instrumentation:

Nous présentons maintenant une méthode permettant de concevoir une architecture d'instrumentation qui respecte certaines contraintes sur le degré de redondance des variables. Afin de nous placer dans un contexte industriel réel, nous spécifions tout d'abord la liste des variables indispensables à la conduite (liste L_1) qui doivent donc être d'observabilité minimale, puis les listes des variables dont on veut assurer un degré de redondance donné (liste LD_k pour les variables qui doivent être redondante de degré K).

L'objectif de la conception consiste donc à déterminer les variables qu'il faut mesurer afin de respecter les contraintes portant sur leurs degrés de redondance.

Partant du résultat : l'énumération des cycles résiduels dans un graphe triparti est de complexité inférieure qu'énumérer le couplage dans un graphe biparti [22], nous développons notre idée de placement de capteurs :

Phase 01: 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. 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 R des relations et C des variables connues.

Phase 02: Définition du cahier de charge de surveillance contenant l'ensemble des variables d'observabilité minimale L_1 et l'ensembles des variables de degré de redondance LD_k .

Phase 03: Représentation du système à l'aide d'un graphe tripartite.

Phase 04:

- Construction des cycles résiduels.
- Pour chaque élément de C on génère tous les cycles partant de cet élément : en générant un arbre N -aire pour chacune des variables connues. Par cela on créera un algorithme qui génère tous les cycles résiduels d'un graphe Tripartite.
- 4.3 Remplir un vecteur initialement vide par les degrés de redondances générés à partir des cycles (vecteur de cahier de charges).
- Consulter le cahier de charges

- Ajouter un capteur (après recensement et tests)
- Régénérer les cycles manquants
- Revenir à l'étape 4.3 si le cahier de charge n'est pas complètement vérifié.
- Parmi les places potentielles qui ferment les circuits, choisir celles qui appartiennent au plus de cycles possibles; choisir parmi tous les cycles, le placement qui maximise l'intersection des cycles afin d'avoir un nombre min de capteurs.

5. Exemple

Voici les résultats obtenus (cycles résiduels générés à partir de chaque variable connue) du système suivant :

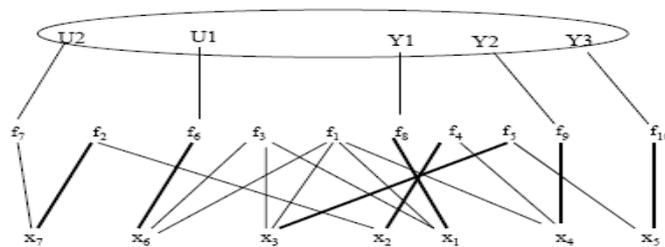


Fig. 3. Graphe triparti du système exemple

En représentant le système par une table de voisinage et un tableau de sortie

Nœud	Ses Voisins		
U1	f6		
U2	f7		
Y1	f8		
Y2	f9		
Y3	f10		
f1	x1	x3	x4
f2	x2	x7	
f3	x1	x3	x6
f4	x2	x4	
f5	x3	x5	
f6	x6		
f7	x7		
f8	x1		
f9	x4		
f10	x5		
x1	f1	f3	f8
x2	f2	f4	
x3	f1	f3	f5
x4	f1	f4	f9
x5	f5	f10	
x6	f1	f3	f6
x7	f2	f7	

f6	U1
f7	U2
f8	Y1
f9	Y2
f10	Y3

Tableau de sortie

Pour chaque variable connue : générer un arbre n-aire qui calcule tous les cycles résiduels possibles

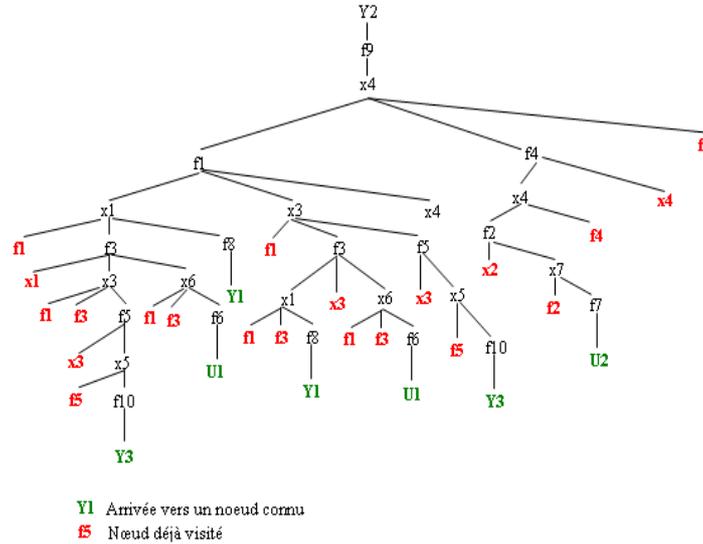


Fig. 4. Arbre N-aire généré à partir de la variable connue Y2

y2	f9	x4	f1	x1	f3	x3	f5	x5	f10	y3
y2	f9	x4	f1	x1	f3	x6	f6	u1		
y2	f9	x4	f1	x1	f8	y1				
y2	f9	x4	f1	x3	f3	x1	f8	y1		
y2	f9	x4	f1	x3	f3	x6	f6	u1		
y2	f9	x4	f1	x3	f5	x5	f10	y3		
y2	f9	x4	f4	x2	f2	x7	f7	u2		

Fig. 5. Cycles résiduels résultants à partir de l'entrée Y2.

Toutes les variables impliquées dans un cycle résiduel seront connues.

Après génération de tous les cycles résiduels à partir de toutes les entrées, nous pouvons conclure le nombre de chemins possibles pour atteindre une variable inconnue ainsi le nombre de cycles où intervient chacune des variables dans le tableau suivant :

Tableau 1. Tableau des résultats initiaux.

Variables	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
Nbre chemins	10	11	12	11	12	9	11
Nbre cycles	33	17	33	32	22	28	17

Cette démarche nous a permis d'extraire tous les chemins possibles pour atteindre chacune des informations (variable) à partir des entrées et ainsi le nombre de cycle où intervient celle-ci. En d'autre terme cette stratégie permet d'extraire toutes les informations sur le système initialement conçu, et ça permet de bien visualiser le système pour bien contrôler l'ajout de capteurs.

5.1 Ajout de capteurs

L'ajout d'un nouveau capteur créera une nouvelle relation (un nœud dans R) et un nouveau arc entre L'ensemble C et l'ensemble R.

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 cycles résiduels et d'améliorer les performances du système de surveillance en termes de détectabilité et de localisabilité.

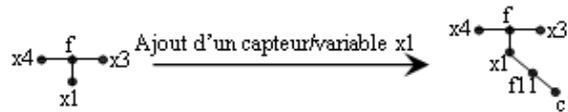


Fig. 6. Ajout d'un capteur de mesure de la variable x1.

5.2 Place d'un nouveau capteur

Pour obtenir la redondance des variables que nous devons contrôler, nous avons à compléter les chemins (ne menant pas à un cycle) dans le graphe triparti pour la construction d'un cycle.

Pour placer un capteur, nous devons voir dans les arbres les chemins qui ne mènent pas à un cycle. À partir de la structure de l'arbre, nous choisissons un endroit de façon à ce qu'un nouveau cycle indépendant est créé (Les chemins qui ne mènent pas à des cycles dans l'arbre sont les cycles absents dans le graphe triparti)

Ceci est fait par un retour arrière vers la variable à contrôler et l'ajout d'un capteur (ce capteur permettra de créer un nouveau nœud "relation")

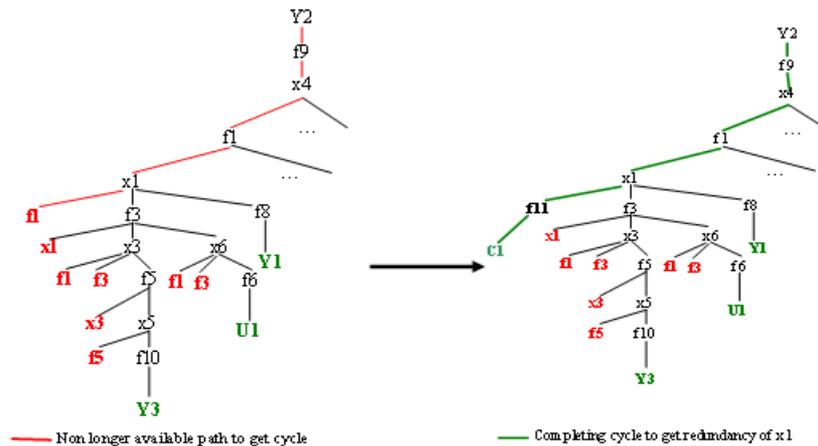


Fig. 7. Comment avoir la redondance à partir de l'arbre.

4 Conclusion

Nous avons présenté dans cet article le problème de placement optimal de capteurs afin de vérifier la surveillance. Nous avons fait une recherche bibliographique sur les méthodes de résolution de ce problème. En s'appuyant sur l'analyse structurelle des systèmes et en définissant les critères d'observabilité et de surveillabilité structurelles, une méthode de placement de capteurs a été proposée utilisant des moyens graphiques pour palier toutes les combinaisons possibles et résoudre le problème efficacement dans un temps polynomial. Cette méthode repose sur la génération des cycles résiduels grâce à la représentation du système à l'aide d'un graphe triparti, l'algorithme de génération de cycles résiduels est très performant et repose sur le développement d'un arbre n-aire et puis l'extraction de tous les chemins menant du nœud père vers les feuilles. Grâce aux différentes informations (degrés de redondances) générées on peut visualiser où on doit ajouter des capteurs en optimisant au mieux notre système et par suite définir une solution de configuration de l'instrumentation.

Cette approche peut être très bénéfique à l'industrie. En étant capable de comprendre les gains à réaliser au prix d'un peu plus de capteurs, il existe une chance réelle de l'instrumentation des systèmes complexes, non seulement pour le contrôle, mais aussi le diagnostic.

La possibilité d'économie de coûts est importante, non seulement des gains directs dans le diagnostic, mais dans la meilleure conception et la capacité de concevoir des systèmes qui seront plus robuste.

Références

1. Basseville, M., Benveniste, A., Moustakides, G., Rougée, A.: Optimal sensor location for detecting changes in dynamical behaviour, *IEEE Trans. Autom. Control*, 1067–1075, AC-32, N°12, (1987).
2. Ould Bouamama, B., Dauphin-Tanguy, G., Staroswiecki, M., Bravo, D.: Bond-graph analysis of structural FDI properties in mechatronics system, 1st IFAC Conference on Mechatronic Systems, Dramstadt (Germany), 3, 18–20 September, pp. 1057–1062, (2000).
3. Carpentier, T., Placement de capteurs pour la surveillance des processus complexes. Thèse de Doctorat de l'Université, USTL, LILLE, France, (1999).
4. Donald-Chimielewski, J., Tasha, P., Tasha, V.M.: On the theory of optimal sensor placement, *AIChE J.* 48 (2002) 1001–1012, n° 5. 7. J. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, (1975).
5. Immonen, P.: 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).
6. Krysander, M., Nyberg, M.: Structural analysis for fault diagnosis of DAE systems utilizing graph theory and MSS sets. Technical report, Tech. Rep. Lith-ISY-R-2410 Dept of electrical engineering, Linköping-Sweeden (2002).
7. Lunze, J., Staroswiecki, M., Blanke, M., Kinneart, M.: *Diagnosis A Fault Tolerant Control*, Springer-Verlag ISBN, 3-540-010556-4, (2003).

8. 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).
9. Madeline, B. : Algorithmes évolutionnaires et résolution de problèmes de satisfaction de contraintes en domaines finis. Thèse de doctorat de l'université de Nice-Sophia Antipolis, Ecole doctorale STIC. Département d'Informatique, NICE, France, 18 décembre, (2002).
10. Mahfoud, S., Goldberg, D.: Parallel recombinative simulated annealing: a genetic algorithm, *Parallel Computing* 21, 1–28, (1995).
11. Maquin, D., Darouach, M., Ragot, J.: Observability and data validation of bilinear system. 1er congrès IFAC AIPAC'89, 2:II.139-II.144, NANCY, France, 3–5 Juillet (1989).
12. 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).
13. Naimimohasses, D.; Barnett, D., Smith, P. : Sensor optimization using neural network sensitivity measures, *Meas. Sci. Technol.* 6, 1291–1300, (1995).
14. Narendra, P., Fukunaga, K.: A branch and bound algorithm for feature sub set selection., *IEEE Trans. Comput.* C-26 (9) 917–922, (1977).
15. Ragot, J., Maquin, D., Darouach, M.: Analysis of generalized bilinear systems. application to diagnosis. IMACS Symposium MCTS Modelling and Control of Technological Systems, 2:528-535, LILLE, France, (1991).
16. Sakarovitch, M. : Optimisation combinatoire-programmation discrète, Hermann, Paris, (1984).
17. Staroswiecki, M., Cassar, J.P. : Approche structurelle pour la conception des systèmes de surveillance. Ecole d'été d'automatique, Grenoble, France, Tome 1, 2–6 September (1996).
18. Worden, K., Burrows, A.: Optimal sensor placement for fault detection, *Eng. Struct.* 23, 885–901, (2001).
19. Worden, K., Burrows, A., Tomlinson, G. : A combined neural and genetic approach to sensor placement, in: *Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference*, Nashville, Tennessee, (1995).
20. Maquin, D., Luong, M. et Ragot, J. : "Sûreté de fonctionnement et redondance analytique," 1^{er} congrès Pluridisciplinaire Qualité et sûreté de fonctionnement, Compiègne, France, (1994).
21. Litwak, R. G., Coquemot Cassar V. : "Approche structurelle des systèmes de surveillance pour des procédés industriels". *Revue Européenne de Diagnostic et Sûreté de Fonctionnement*, 04(02):179—202, (1994).
22. Haffaf, H. , Ould Bouamama B. : "Enumerating cycles algorithm in tripartite graph for FDI". Elsevier Science.