

# Diagnostic des défaillances des systèmes cyber-physiques par la modélisation des connaissances

MOHAMED AMINE HAJ KACEM<sup>1</sup>, ZINEB SIMEU-ABAZI<sup>2</sup>, ERIC GASCARD<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire G-SCOP  
46 Avenue Félix Viallet  
38000 Grenoble, France  
Mohamed.Haj-Kacem@grenoble-inp.fr

<sup>2</sup> Laboratoire G-SCOP  
46 Avenue Félix Viallet  
38000 Grenoble, France  
Zineb.Simeu-Abazi@grenoble-inp.fr

<sup>3</sup> Laboratoire G-SCOP  
46 Avenue Félix Viallet  
38000 Grenoble, France  
Eric.Gascard@grenoble-inp.fr

---

## Résumé –

Cet article concerne la détection et diagnostic des défaillances des systèmes cyber-physiques (CPS). La complexité croissante de ces systèmes à technologies hétérogènes, nécessite des techniques de diagnostic et maintenance de plus en plus élaborées. Une approche est proposée permettant de contrôler l'état de santé des CPS, dans laquelle on applique une démarche de modélisation adaptée au système dans sa globalité afin d'augmenter sa disponibilité.

Des représentations de connaissances structurelle, fonctionnelle, topologique et comportementale sont définies avec un exemple qui illustre l'ensemble de notre démarche. Les développements proposés reposent sur trois algorithmes, les deux premiers pour la phase de détection et le troisième pour lever toute ambiguïté de localisation.

## Abstract –

This paper deals with the detection and diagnostic of failures for cyber-physical systems (CPS). The increasing complexity of these systems in heterogeneous technologies requires increasingly elaborate diagnostic and maintenance techniques. An approach is proposed for controlling the CPS condition in which a modeling approach is applied adapted to the whole system to increase its availability.

The structural knowledge representations, functional, and behavioral topology are defined. The overall approach is illustrated in an academic example. The developments are based on the three proposed algorithms: the two first for the detection step and the third one for the avoidance of the localization ambiguity.

**Mots clés - Etat de santé, Systèmes cyber-physiques, Détection, Diagnostic, Disponibilité.**

**Keywords - Health State, Cyber-physical systems, Detection, Diagnostic, Availability.**

---

## 1 INTRODUCTION

Les systèmes cyber-physiques sont présents dans la vie courante et ceci de manière plus ou moins visible [A.Lee, 2007]. Composés de multiples briques technologiques en interaction avec des opérateurs ou des utilisateurs, ils prennent en compte de nombreuses informations pour réaliser une opération complexe de façon plus ou moins automatique. La complexité du système est généralement transparente pour l'utilisateur final, mais ses défaillances peuvent avoir de lourdes conséquences d'où la

nécessité de mettre en place des nouvelles politiques de maintenance basées sur des méthodes fiabilistes qui permettent d'anticiper l'occurrence de toute défaillance et facilitent ainsi, la planification des opérations de maintenance dans le but d'augmenter la disponibilité des CPS [Djeridi, 2011]. Cependant, la maintenance préventive systématique présente des limites. Elle ne permet pas d'annuler tout risque d'occurrence de défaillances d'équipements, modules ou composants avant l'échéance prévue. Ce qui nous oriente vers une maintenance proactive afin

d'organiser les actions de maintenance préventives grâce à la surveillance de paramètres significatifs de dégradation. Aussi, il est nécessaire de fournir des outils permettant la mise en œuvre des méthodologies de détection et traitements d'erreurs, de diagnostic de fautes adapté aux CPS [Soualhi, 2013]. Le développement de telles méthodologies contribue ainsi, à l'utilisation optimale des équipements tout en limitant les risques de défaillance.

Les CPS sont caractérisés par un grand nombre de variables, des non linéarités et des incertitudes. Leur décomposition en sous-systèmes, plus facilement gérables et organisés de façon hiérarchique est fondamentale. Cependant, les fortes interactions entre les sous-systèmes requièrent la mise en place d'un système qui traduit les mécanismes de décentralisation et de coordination devant le grand nombre d'information à échanger. De nouveaux développements sont donc nécessaires pour résoudre les problèmes liés à la taille et à la complexité de tels systèmes. Ils sont relatifs aux méthodologies et aux outils pour traiter de leur modélisation, de leur conception, de leur conduite, ou encore de l'aide à la décision.

Dans cet article, la contribution principale porte sur la proposition d'une architecture distribuée pour le diagnostic des CPS permettant de définir l'état de santé de ce type de système [Bouaziz et Marange, 2014]. Dans cette optique, après avoir présenté les systèmes cyber-physiques et les différentes formes de modélisation nécessaires, la section 4 propose la démarche générale de modélisation illustrée sur un exemple. Une conclusion sur les perspectives de développement terminera cet article.

## 2 LES SYSTEMES CYBER-PHYSIQUES

Les systèmes cyber physiques (CPS) sont des technologies hétérogènes intégrant des sous-systèmes mécaniques, électroniques et logiciels embarqués. Cette hétérogénéité technologique de ces sous-systèmes, dont les durées de vie et les dynamiques d'évolution sont diverses, accentue le problème de surveillance pour garantir la durabilité de leur mission (Figure 1). Des solutions partielles existent pour chacun de ces sous-systèmes mais elles ne sont pas adaptées au système dans sa globalité et engendrent souvent des coûts prohibitifs. Par ailleurs, nombre de ces systèmes interviennent dans les structures de sécurité qui exigent une très haute disponibilité opérationnelle, souvent difficile à garantir. Il est donc important d'élaborer des techniques de diagnostic et maintenance adaptées.

Un CPS possède différents sous-systèmes qui interagissent entre eux pour réaliser différentes fonctionnalités. Chacun de ces sous-systèmes est assuré par un certain nombre de fonctions. Ces fonctions elles-mêmes implémentant un ensemble de composants. Afin de pouvoir suivre et évaluer l'état de santé de ces sous-systèmes, il est nécessaire d'en avoir une connaissance la plus complète.

A partir de ces différentes contraintes présentées par les Systèmes cyber-physiques, il est nécessaire de mettre en place une maintenance préventive conditionnelle [Pascal Vrignat, 2012].

Cette politique de maintenance permet, entre autres apports, d'allonger la durée d'utilisation des composants du CPS et d'espacer les entretiens tout en conservant la possibilité de planification des interventions.

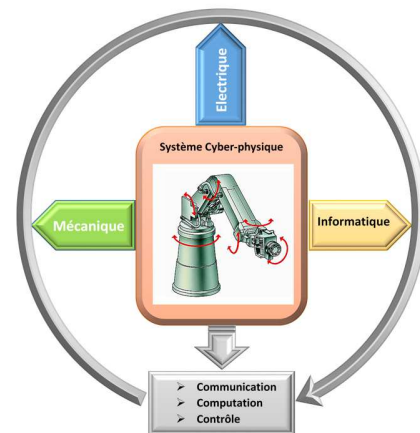


Figure 1. Système cyber-physique

## 3 MODELISATION D'UN SYSTEME CYBER-PHYSIQUE

Un système cyber-physiques est composé de sous-systèmes, dont la conception et le fonctionnement font intervenir différents corps de métiers. Chacun des sous-systèmes est constitué de différents composants interconnectés qui réalisent différentes fonctions.

Un CPS peut donc être décomposé en plusieurs sous-parties jusqu'au niveau composant. Le critère d'arrêt de la décomposition est le composant remplaçable.

Les fonctions de surveillance [Veron, 2007] et de diagnostic des systèmes sont indispensables à la mise en place de cette politique de maintenance [Lefebvre, 2009]. La fonction de surveillance permet de fournir les informations exploitables par les fonctions de diagnostic à partir de données prélevées sur le CPS.

Dans cette optique, parmi les diverses méthodes de modélisation [Diévert, 2010], nous proposons une approche de diagnostic basée sur quatre types de connaissances : fonctionnelle, structurelle, topologique et comportementale.

- L'analyse fonctionnelle recense les fonctions du système qui possèdent des indicateurs pertinents et significatifs. Ces fonctions correspondent à l'analyse du système, aux données de conception et à l'analyse experte.
- L'analyse structurelle s'applique aux fonctions identifiées en recensant l'ensemble des composants et les connexions physiques entre eux.
- L'analyse topologique permet de déterminer les proximités entre les composants pouvant entraîner une défaillance indirecte.
- L'analyse comportementale permet de recenser les variables et leurs relations (relation de causes à effet, de causalité).

### 3.1 Notations

Chaque CPS intègre un certain nombre de systèmes. Ainsi, un CPS sera considéré comme un ensemble de  $n$  systèmes physiques SP.

On notera  $CPS = \{SP_1; SP_2. \dots SP_n\}$ .

Chaque SP est composé de m fonctions F. Pour représenter cette information, l'indice du SP est conservé.

On notera donc :  $SP_i = \{F_{i,1}; F_{i,2} \dots F_{i,m}\}$  où  $F_{i,j}$  désigne la jème fonction du ième SP.

Le même principe est utilisé ensuite pour les composants qui réalisent une fonction. Ainsi, on notera la fonction  $F_{i,j}$  qui est réalisée par p composants de la façon suivante :

$F_{i,j} = \{CR_{i,j,1}; CR_{i,j,2} \dots CR_{i,j,p}\}$  où  $CR_{i,j,k}$  désigne le composant numéro k de la fonction  $F_{i,j}$ .

La démarche de modélisation et d'analyse, est illustrée le long de cet article par un robot industriel composé d'un seul système physique (SP1) qui contient 3 fonctions : électrique, informatique et mécanique. On observera la notation suivante :

$$CPS = \{SP_1\} \text{ et } SP_1 = \{F_{1,1}; F_{1,2}; F_{1,3}\}.$$

De même, chaque fonction est réalisée grâce à un nombre de composants remplaçables allant de 4 à 5 composants remplaçables.

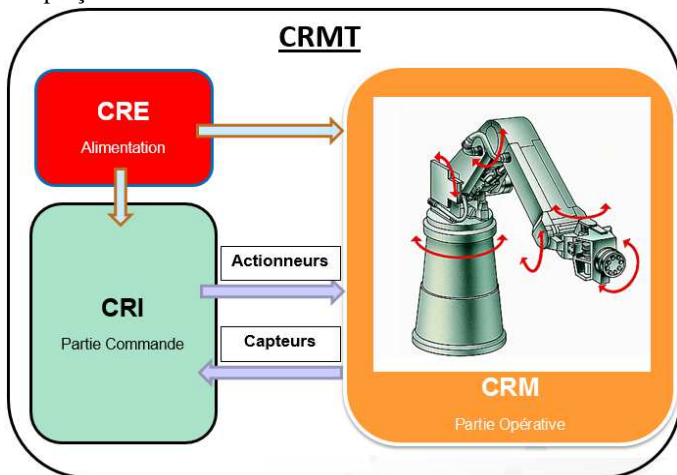


Figure 2. Principe Général de fonctionnement du CPS

### 3.2 Les différents modèles du CPS

Un CPS est réalisé par un certain nombre de sous-systèmes eux-mêmes implémentant des fonctions. Ces fonctions sont elles-mêmes assurées par l'interconnexion de Composants Remplaçables (CR).

Dans le but d'appliquer cette méthode de modélisation sur un système cyber-physique et pour pouvoir représenter ces différentes connaissances, nous avons pris l'exemple d'un robot industriel. Ce système physique est composé d'une partie commande et d'une partie opérative constitué de 7 composants remplaçables dont l'opérateur. Le principe général de fonctionnement du système est détaillé sur le schéma (Figure 3).

On y trouve l'entrée du système (opérateur) ainsi que la sortie du système correspondant à l'exécution d'une tâche du robot.

Le tableau ci-après donne la dénomination de chaque composant remplaçable.

	Composants	Dénomination
Partie Commande	Op	Opérateur
	CRE1	Composant électrique
	CRI2	Composant informatique
	CREI4	Capteur
	CREM5	Composant électromécanique
	CRIM6	Actionneur
	CRMT7	Composant mécatronique
Partie Opérative	CRM3	Composant mécanique
	Op+ CRE1+ CREI4+CREM5+ CRIM6+CRMT7	

Tableau 1. Liste des composants remplaçables

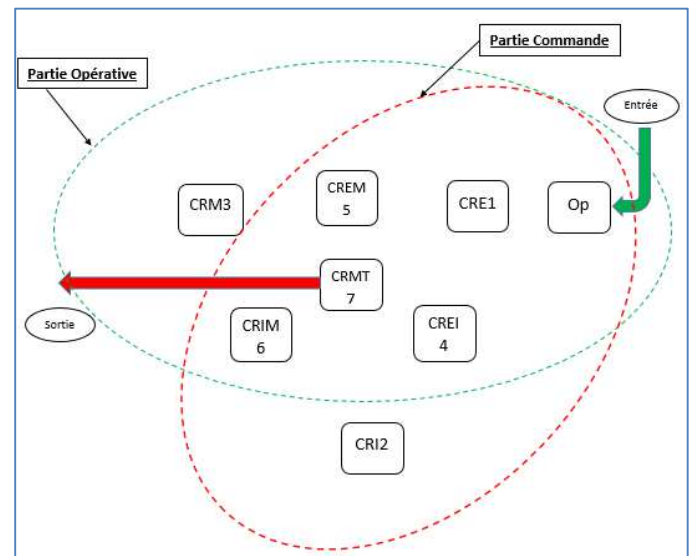


Figure 3. Répartition des composants remplaçables

La difficulté dans les systèmes cyber-physiques réside dans la manière de les appréhender dans leur ensemble et non pas par les composants les constituant.

Afin d'implémenter un CPS et exploiter les informations ou connaissances utiles au développement des fonctions de diagnostic. Plusieurs catégories de connaissances sont nécessaires.

### 3.3 Représentation de la connaissance structurelle

La connaissance structurelle vise à représenter l'ensemble des composants du système ainsi que leurs interconnexions. Elle permet de raffiner le diagnostic en propageant les défaillances entre composants interconnectés.

#### 3.3.1 Formalisation

Soit une fonction implémentée par l'interconnexion de p composants remplaçables :  $F_{i,j} = \{CR_{i,j,1}; CR_{i,j,2}; \dots CR_{i,j,p}\}$ . Chaque composant remplaçable est identifié par un ensemble d'entrées/sorties. On note les entrées  $I_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) et sorties  $O_j$  ( $j=1, \dots, m$ ).

### 3.3.2 Exemple

Afin de modéliser ces interconnexions pour notre exemple, nous avons détaillé les liaisons entre les entrées et les sorties des différents composants.

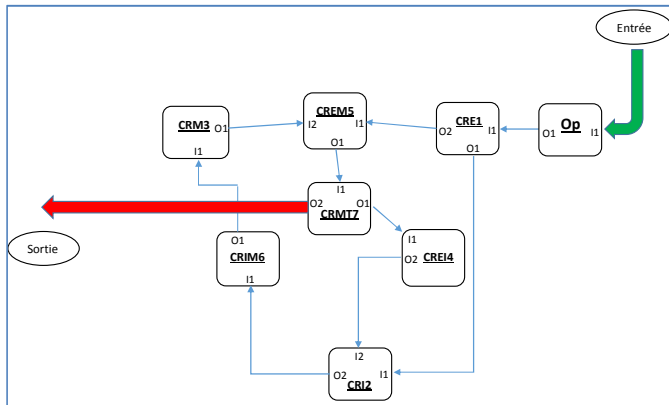


Figure 4. Modélisation structurelle

En appliquant, les notations de la connaissance structurelle dans le cas de l'exemple (Figure 4), les relations suivantes sont obtenues:

Composants	Nombre d'entrées	Composant Amont	Nombre de sorties	Composant Aval
Op (I1 ; O1)	1	Entrée	1	CRE1
CRE1 (I1 ; O2)	1	Op	2	CRI2 et CREM5
CRI2 (I2 ; O1)	2	CRE1 et CREI4	1	CRIM6
CRM3 (I1 ; O1)	1	CRIM6	1	CREM5
CREI4 (I1 ; O1)	1	CRMT7	1	CRI2
CREM5 (I2 ; O1)	2	CRE1 et CRM3	1	CRMT7
CRIM6 (I1 ; O1)	1	CRI2	1	CRM3
CRMT7 (I1 ; O2)	1	CREM5	2	CREI4 et Sortie

Tableau 2. Entrées et sorties des CR

### 3.4 Représentation de la connaissance fonctionnelle

La connaissance fonctionnelle vise à représenter les composants concourants à l'implémentation des différentes fonctions du CPS. Cette modélisation est basée sur la connaissance issue de la description structurelle car elle regroupe l'ensemble des composants qui participent à la réalisation d'une ou plusieurs fonctions. Pour notre exemple le système est implémenté par 3 différentes fonctions F1.1, F1.2 et F1.3 représenté sur le schéma (Figure 5). Le tableau ci-après regroupe l'ensemble des composants remplaçables nécessaires à la réalisation de chacune des fonctions.

Fonctions	Composants
F1.1: Fonction Informatique	CRI2; CREI4; CRIM6; CRMT7
F1.2: Fonction Electrique	Op; CRE1; CREI4; CREM5; CRMT7
F1.3: Fonction Mécanique	CRM3; CREM5; CRIM1,3,6; CRMT7

Tableau 3. Les CR de chaque fonction

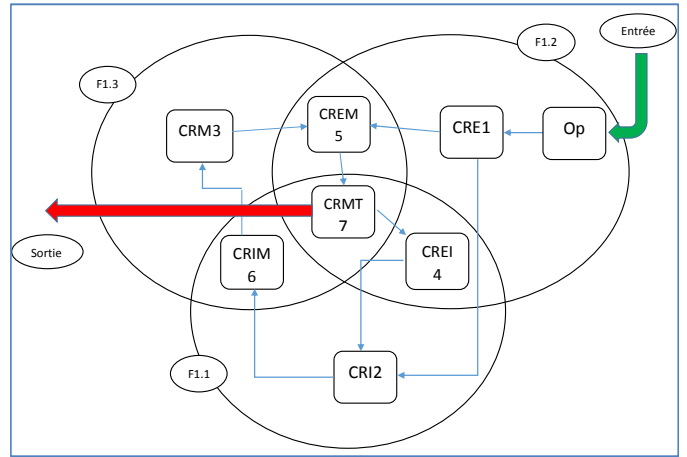


Figure 5. Modélisation fonctionnelle

### 3.5 Représentation de la connaissance topologique

La connaissance topologique vise à représenter les influences par effet de proximité que les composants peuvent avoir entre eux comme, par exemple, des interactions thermiques, physique, etc...

#### 3.5.1 Formalisation

Dans cette modélisation, seule l'influence indirecte que peut avoir une défaillance d'un composant sur un autre est considérée même s'ils ne sont pas structurellement liés.

Nous considérons deux composants sachant que seulement certains types de défaillances peuvent engendrer une dépendance topologique.

Si deux composants, notés  $CR_{i,j,1}$  et  $CR_{i,j,2}$  sont liés par effet de proximité, la relation est alors notée :

$$CR_{i,j,1} \rightarrow CR_{i,j,2}$$

#### 3.5.2 Exemple

Dans notre exemple de robot industriel, nous considérons trois composants remplaçables CRE1, CRM3 et CRI2 sont liés par effet de proximité. Les relations sont alors les suivantes :

$$CRE1 \leftarrow CRM3$$

$$CRI2 \leftarrow CRE1$$

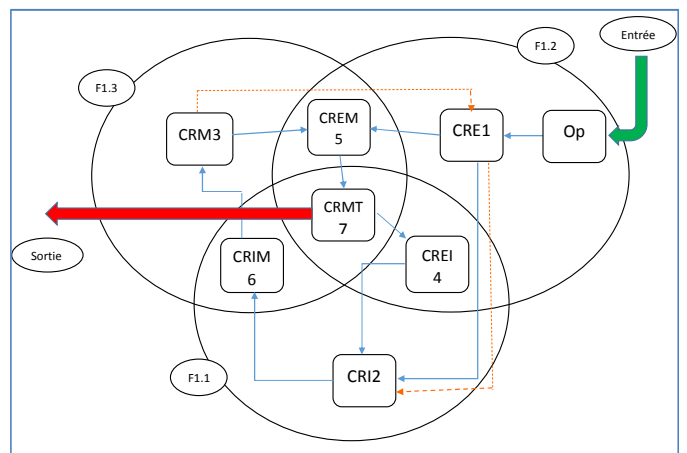


Figure 6. Modélisation topologique

Ces relations sont unidirectionnelles. En effet, en considérant la représentation de la (Figure 6) de deux composants CRE1 et CRM3 pour laquelle CRE1 est spatialement situé en dessous de CRM3. Sachant que CRE1 est un composant principalement constitué d'électronique alors que CRM3 est un composant mécanique, une fuite dans CRM3, entraîne un court-circuit du composant électronique CRE1. La défaillance de CRE1 aura un impact sur CRI2 par effet d'échauffement.

Cet exemple est une illustration du choix qui a été fait d'avoir des dépendances topologiques unidirectionnelles.

Le lien topologique ne concerne que certaines défaillances de composants (une fuite dans notre exemple) et qu'elle est valable uniquement dans ce cas et dans cette configuration du système CRE1 au-dessus de CRM3) sinon, la fuite n'aurait aucune influence sur CRE1.

### 3.6 Représentation de la connaissance comportementale

La modélisation de la connaissance comportementale vise à représenter les composants étudiés afin de déterminer le comportement global du système.

Cette modélisation peut aussi bien décrire les différents modes de fonctionnements de composants, de fonctions, du CPS ainsi que leurs modes de défaillances. Cette description porte aussi sur les liens de causalité entre composants. C'est ainsi que l'on introduit la notion de chemin de succès.

#### 3.6.1 Chemin de succès (CS<sub>i</sub>)

Le chemin de succès permet à partir de la représentation structurale et fonctionnelle de définir les composants observables du CPS pour représenter la matrice d'observation.

##### 1) Matrice d'observation ( $M_{\theta}^i$ )

A partir des chemins de succès CS<sub>i</sub> de chaque fonction, on obtient la matrice d'observation tel que :

$$M_{\theta}^i = \begin{pmatrix} CR_{i,1,1} & \dots & CR_{i,j,p} \\ F_{i,1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \alpha_{i,j} & \dots \\ F_{i,j} & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

$$\text{Avec } \alpha_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{le composant} \in F_{i,j} \\ 0 & \text{le composant} \notin F_{i,j} \end{cases}$$

A partir du chemin de succès du CPS, la matrice nous permet de repérer les problèmes d'ambiguïté dans les différents composants remplaçables et ensuite de les classer suivant les ordres de coupes possibles.

Chaque matrice  $M_{\theta}^i$  est représentée par n composants remplaçables et m fonctions dans le même sous-système i.

##### 2) Vecteur d'observation ( $V_{\theta}^i$ )

On définit un vecteur d'observation  $V_{\theta}^i$  qui exploite chaque colonne de la matrice d'observation. Il indique pour chaque composant remplaçable, l'ensemble des fonctions pour lequel il est sollicité dans le sous-système i. Ce vecteur nous permet d'identifier le nombre de fonctions associées à chaque composant remplaçable. Un algorithme (présenté dans le §4) basé sur

l'analyse de ce vecteur permet en partie, de résoudre le problème d'ambiguïté de localisation suivant que le composant est observable ou pas.

$$V_{\theta}^i (CR_{i,j,p}) = \{F_{i,j}\}$$

#### 3.6.1.1 Exemple

Pour pouvoir représenter la matrice du robot et afin de connaître les composants observables du système. Nous avons réalisé le schéma de succès du système (Figure 7).

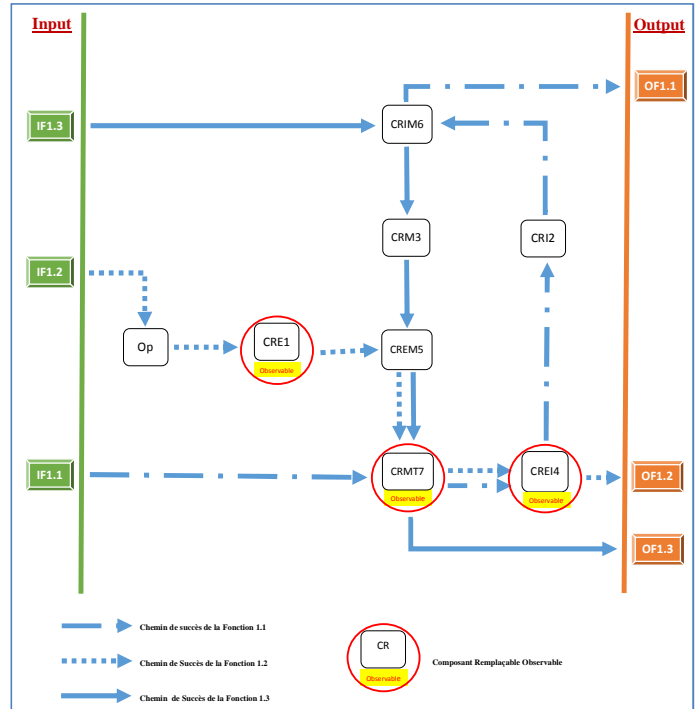


Figure 7. Chemin de succès

A partir du schéma de succès de notre robot, nous avons réalisé la matrice d'observation suivante :

$$M_{\theta}^1 = \begin{pmatrix} & Op & CRE1 & CRI2 & CRM3 & CREI4 & CREM5 & CRIM6 & CRM7 \\ F_{1,1} & - & - & 1 & - & 1 & - & 1 & 1 \\ F_{1,2} & 1 & 1 & - & - & 1 & 1 & - & 1 \\ F_{1,3} & - & - & - & 1 & - & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

A partir de la matrice d'observation du système, des vecteurs d'observation ont été définis:

- $V_{\theta}^1 (Op) = \{F_{1,2}\}$
- $V_{\theta}^1 (CRE1) = \{F_{1,2}\}$
- $V_{\theta}^1 (CRI2) = \{F_{1,1}\}$
- $V_{\theta}^1 (CRM3) = \{F_{1,3}\}$
- $V_{\theta}^1 (CREI4) = \{F_{1,1}, F_{1,2}\}$
- $V_{\theta}^1 (CREM5) = \{F_{1,2}, F_{1,3}\}$
- $V_{\theta}^1 (CRIM6) = \{F_{1,1}, F_{1,3}\}$
- $V_{\theta}^1 (CREI7) = \{F_{1,1}, F_{1,2}, F_{1,3}\}$

En utilisant les résultats obtenus par la matrice et le vecteur d'observation et afin de définir la source de défaillance du système, les composants remplaçables dans lesquelles une

ambiguïté de localisation peut apparaître sont identifiés. Il s'agit de :

- $V_{\theta}^1(\text{CREM5}) = \{F_{1.2}, F_{1.3}\}$
- $V_{\theta}^1(\text{CRIM6}) = \{F_{1.1}, F_{1.3}\}$

### 3.6.2 Coupe minimales

Une coupe décrit un ensemble de blocs de base dont la défaillance entraîne la défaillance du système. Une coupe est dite minimale si en retirant n'importe quel bloc de la liste, le système n'est plus défaillant. L'ordre de la coupe correspond au nombre de composants remplaçables dans la liste.

La connaissance des coupes minimales permet aussi de définir la liste des composants les plus critiques.

Les coupes minimales sont déduites à partir de la matrice d'observation.

Pour une matrice d'observation  $M_{\theta}^i = \{V_{\theta}^1, \dots, V_{\theta}^n\}$ , soit  $V_j^i$ , le vecteur colonne j du sous-système i de  $M_{\theta}^i$ . On obtient une coupe minimale d'ordre  $\alpha$  si et seulement si.

$$\sum_{i=1}^{\alpha} V_j^i = \begin{pmatrix} 1 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Ainsi une coupe minimale d'ordre n est obtenue par la composition de n vecteurs.

Dans le cas de notre exemple, les coupes minimales sont les suivantes :

#### a. Coupe d'ordre 1

On remarque qu'à partir de la matrice  $M_{\theta}^1$ , un seul composant remplaçable regroupe les 3 fonctions. L'équation (1) est vérifiée par  $V_{\theta}^1(\text{CREI7})$ . Le bon fonctionnement du système repose sur la fiabilité du composant remplaçable CREI7.

#### b. Coupe d'ordre 2

Cela concerne le cas où  $\alpha = 2$ . C'est la composition de deux vecteurs extraits de  $M_{\theta}^1$ . Dans notre exemple plusieurs cas sont alors possibles :

$$\text{Coupe d'ordre 2} = \begin{cases} V_{\theta}^1(\text{CREM5}) + V_{\theta}^1(\text{CRIM6}) \\ V_{\theta}^1(\text{CREI4}) + V_{\theta}^1(\text{CRIM6}) \\ V_{\theta}^1(\text{CRE1}) + V_{\theta}^1(\text{CRIM6}) \\ V_{\theta}^1(\text{Op}) + V_{\theta}^1(\text{CRIM6}) \\ V_{\theta}^1(\text{CREI4}) + V_{\theta}^1(\text{CREM5}) \\ V_{\theta}^1(\text{CRI2}) + V_{\theta}^1(\text{CREM5}) \\ V_{\theta}^1(\text{CEM3}) + V_{\theta}^1(\text{CREI4}) \end{cases}$$

#### c. Coupe d'ordre 3

Quand 3 composants remplaçables regroupent les 3 fonctions.

$$\text{Coupe d'ordre 3} = \begin{cases} V_{\theta}^1(\text{Op}) + V_{\theta}^1(\text{CRI2}) + V_{\theta}^1(\text{CRM3}) \\ V_{\theta}^1(\text{CRE1}) + V_{\theta}^1(\text{CRI2}) + V_{\theta}^1(\text{CRM3}) \end{cases}$$

## 4 PRINCIPE DE DETECTION ET LOCALISATION

Deux étapes constituent l'approche proposée de détection et localisation. La première étape exploite les coupes minimales pour la détection. Ainsi, un ensemble de composants susceptibles d'être la cause de la défaillance est identifié. Afin de lever les ambiguïtés de localisation, la deuxième étape basée sur les automates temporisés est appliquée. Pour chacune des étapes un algorithme est développé.

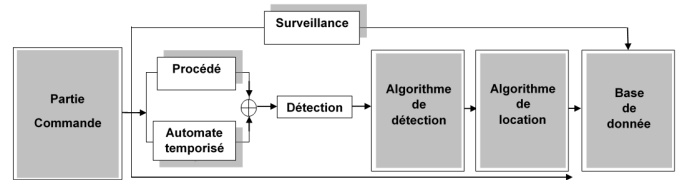


Figure 8. Détection et localisation de défaillance du CPS

### 4.1 Algorithmes de détection

Pour contrôler le bon fonctionnement du système et afin de détecter la source de défaillance au niveau des composants remplaçables. Deux algorithmes sont réalisés :

L'algorithme 1 permet de construire les vecteurs d'observations  $V_{\theta}^i$  des composants remplaçables dans chaque sous-système. Ainsi, dans le cas où une ambiguïté de localisation apparaît, l'application de l'algorithme 2 permet d'identifier la liste  $I_{\text{cra}}$  des composants remplaçables ayant un problème d'ambiguïté en cas de défaillance.

#### Algorithme 1 : Construction des vecteurs d'observations

Données :

CPS = Système cyber-physique

Résultat :

$V_{\theta} = \{V_{\theta}^1, V_{\theta}^2, \dots, V_{\theta}^n\}$  : Liste des vecteurs d'observation de n sous-systèmes

Début :

1. **Pour** chaque sous-système  $SP_i$  **faire**
2. Initialisation :  $V_{\theta}^i \leftarrow [\phi, \phi, \dots, \phi]$
3.  $|V_{\theta}^i|$  est le nombre de  $CR_{i,j,k}$  utilisé dans  $SP_i$
4. **Pour** chaque fonction  $F_{i,j}$  **faire**
5. **Pour** chaque composant remplaçable  $CR_{i,j,k}$  **faire**
6.  $V_{\theta}^i(CR_{i,j,k}) \leftarrow V_{\theta}^i(CR_{i,j,k}) \cup \{F_{i,j}\}$
7. **Fin Pour**
8. **Fin Pour**
9. **Fin Pour**
10. **Fin**

**Algorithme 2 : Détections des ambiguïtés par composants remplaçables**

**Données :** CPS : Système cyber-physique

$V_\theta = \{V_\theta^1, V_\theta^2, \dots, V_\theta^n\}$  : Liste des vecteurs d'observation de n sous-systèmes

**Résultat :**  $l_{CRA}$  : Liste des CR ayant une ambiguïté

**Début :**

1.  $l_{CRA} \leftarrow [\emptyset, \emptyset, \dots, \emptyset]$  avec  $|l_{CRA}| = n$ , le nombre des sous-systèmes
2. **Pour** chaque sous-système  $SP_i$  **faire**
3.     **Pour** chaque fonction  $F_{i,j}$  **faire**
4.         **Pour** chaque composant remplaçable  $CR_{i,j,k}$  **faire**
5.             **Si**  $|V_\theta^i(CR_{i,j,k})| \geq 2$
6.                 **Alors**  $l_{CRA}(i) \leftarrow l_{CRA}(i) \cup \{CR_{i,j,k}\}$
7.             **Fin Si**
8.         **Fin Pour**
9.     **Fin Pour**
10. **Fin Pour**
11. **Fin**

4.2 Algorithme de localisation

Afin de résoudre le problème d'ambiguïté l'automate temporisé est utilisé. Il permet grâce à l'analyse temporelle de comparer avec le temps de démarrage  $T_{1,j}^d$  et de fin  $T_{1,j}^f$  de chaque fonction  $F_{i,j}$  avec le temps d'apparition de la défaillance  $t_{défect}$  dans le composant remplaçable  $CR_i$ . L'algorithme 3 de localisation, utilise les résultats des algorithmes 1 et 2, à savoir :

- le vecteur d'observation  $V_\theta^i$  de chaque composant remplaçable et les fonctions associées par l'application de l'algorithme 1.
- la liste des composants remplaçables ayant un problème d'ambiguïté  $l_{CRA}$ .

Cet algorithme permet de définir la source de chaque défaillance qui peut être une ou plusieurs fonctionnalités comme cela est indiqué dans l'algorithme 3.

**Algorithme 3 : Localisation de l'origine de l'ambiguïté**

**Données :** CPS : Système cyber-physique

$V_\theta = \{V_\theta^1, V_\theta^2, \dots, V_\theta^n\}$  : Liste des vecteurs d'observation de n sous-systèmes

$t_{défect}$  : Temps d'apparition de la défaillance de  $CR_i$

$T^d$  : Matrice des temps de démarrage des fonctions

$T_{i,j}^d$  : Temps de démarrage de  $F_{i,j}$

$T^f$  : Matrice des temps de fin des fonctions

$T_{i,j}^f$  : Temps de fin de  $F_{i,j}$

**Résultat :**  $l_{FD}$  : Liste des Fonctions qui peuvent être la source de défaillance de  $CR_i$

**Début :**

1.  $l_{FD} \leftarrow \emptyset$
2. **Pour** chaque fonction  $F_{i,j}$  de  $V_\theta^i(CR_i)$  **faire**
3.     **Si**  $t_{défect} \geq T_{i,j}^d$  et  $t_{défect} \leq T_{i,j}^f$
4.         **Alors**  $l_{FD}(i) \leftarrow l_{FD}(i) \cup \{F_{i,j}\}$
5.     **Fin Si**
6. **Fin Pour**
7. **Fin**

4.3 Exemple

Pour pouvoir appliquer l'algorithme de détection et de localisation sur notre exemple et dans le but de définir le mode de fonctionnement normal et le mode de défaillance nous avons étudié dans un premier temps les différents cas possibles de dysfonctionnement résumés par le tableau 4.

	F <sub>1.1</sub>	F <sub>1.2</sub>	F <sub>1.3</sub>	Problème Ambiguïté
1 <sup>ère</sup> cas	Défaillante	OK	OK	CRIM6 (F <sub>1.1</sub> ou F <sub>1.3</sub> )
2 <sup>ème</sup> cas	OK	Défaillante	OK	CREM5 (F <sub>1.2</sub> ou F <sub>1.3</sub> )
3 <sup>ème</sup> cas	OK	OK	Défaillante	Non

Tableau 4. Cas de défaillance étudiés

Après avoir étudié les cas possibles de défaillance des 3 fonctions du système, un algorithme de détection est réalisé afin de représenter le fonctionnement normal du robot ainsi que la détection des ambiguïtés au niveau des composants remplaçables comme cela est représenté sur le schéma (Figure 9).

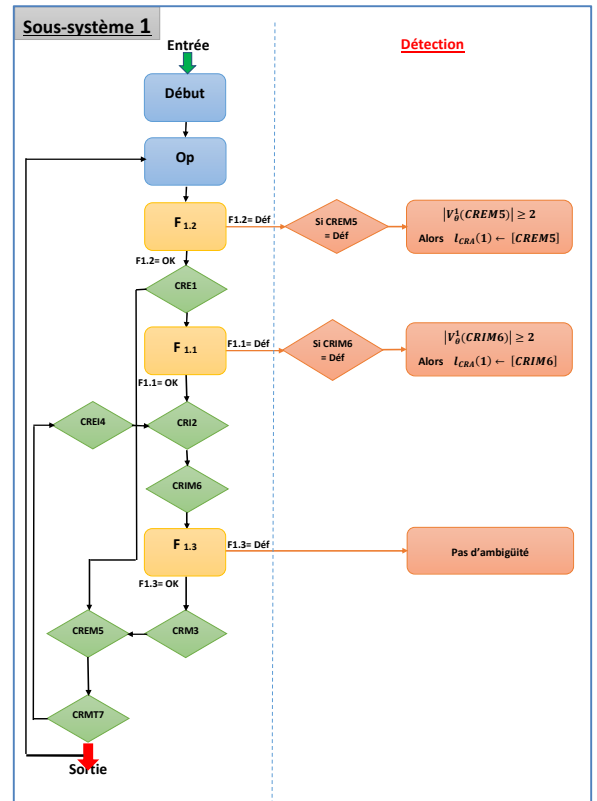


Figure 9. Algorithme de détection

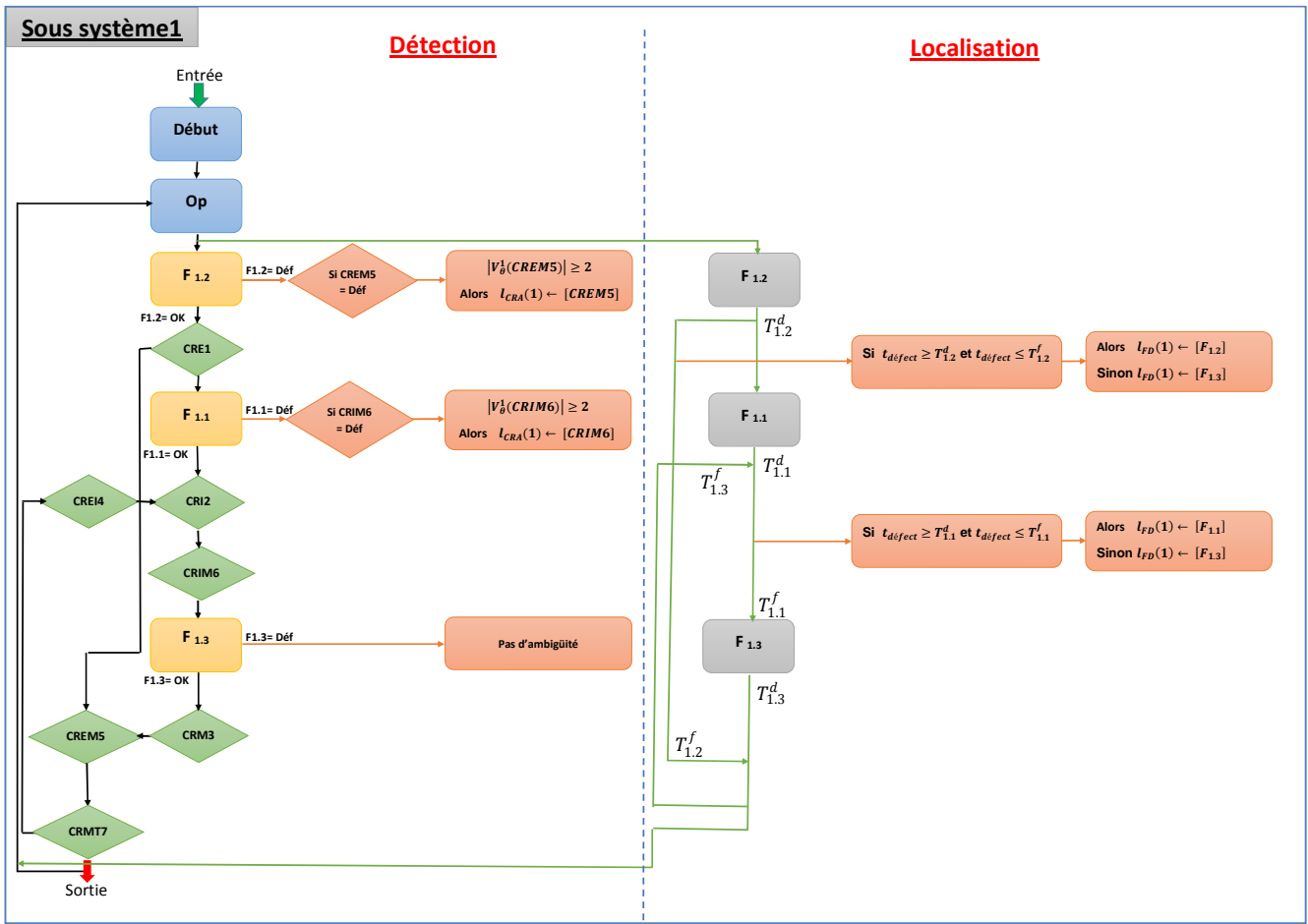


Figure 10. Algorithme de localisation

En utilisant les résultats obtenus par l'algorithme de détection on peut remarquer que la défaillance des deux fonctions  $F_{1.2}$  et  $F_{1.1}$  peut entraîner un problème d'ambiguïté au niveau des composants remplaçables CREM5 et CRIM6. Afin de résoudre ce problème d'ambiguïté, l'algorithme de localisation est appliqué (Figure 10).

L'algorithme 3 est réalisé grâce à l'utilisation de l'automate temporisé qui représente l'évolution temporelle de la dynamique du système. La comparaison du temps d'apparition de la défaillance  $t_{\text{defect}}$  avec le temps de démarrage et de fin dans chaque fonction permet ainsi de résoudre le problème d'ambiguïté de localisation.

## 5 CONCLUSION

Dans l'approche proposée dans cet article, la représentation des connaissances structurelle, fonctionnelle, topologique et comportementale nous a permis d'appliquer cette méthode de modélisation sur exemple de système cyber-physique.

A partir de ces différentes représentations, des algorithmes de localisation et de détection de défaillance sont développés. L'algorithme de détection permet la construction des vecteurs d'observations de chaque composant remplaçable. Quant à l'algorithme 2, il établit la liste des  $CR_i$  ayant un problème

d'ambiguïté. Dans le cas d'ambiguïté persistante, une analyse temporelle est effectuée grâce à l'application de l'algorithme 3. Dans cette phase, l'automate temporisé permet de localiser la source de défaillance dans chaque composant remplaçable.

Afin d'adapter la solution de localisation de défaillance à travers l'automate temporisé sur des systèmes-cyber-physiques plus complexes, d'autres travaux sont en cours de développement. Ils concernent les différentes structures d'automates temporisés incluant les aspects de parallélisme et de synchronisation. C'est une démarche qui peut être généralisée et permettra de résoudre le problème d'ambiguïté des différents types de fonctionnalités qu'on peut avoir dans les CPS.

## 6 REFERENCES

- A.Lee, E., (2007) Computing Foundations and Practice for Cyber-Physical Systems: A Preliminary Report. Electrical Engineering and computer sciences (pp. 1–27).
- Bouaziz, M.F., Marange, P., (2014) Prise en compte de l'état réel d'un système complexe pour l'aide à la décision de séquences de conduite.



- Diévar, M., (2010) Architectures de diagnostic et de pronostic distribués de systèmes techniques complexes de grande dimension. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Djeridi, R., (2011) Contribution à la maîtrise de la disponibilité de systèmes complexes : proposition d'une méthode de réordonnement proactif de la maintenance.
- Lefebvre, A., (2009) Contribution à l'amélioration de la testabilité et du diagnostic de systèmes complexes: application aux systèmes avioniques (pp. 74–83).
- Soualhi, A., (2013) Du diagnostic au pronostic de pannes des entraînements électriques (pp. 12–19).
- Verron, S., (2007) Diagnostic et surveillance des processus complexes par réseaux bayésiens. Grande dimension. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Vrignat, P., (2012) Génération d'indicateurs dans le cadre d'une politique de maintenance préventive conditionnelle  
Indicators generation as part of a policy of conditional preventive maintenance.