

# Étude comparative des approches de construction d'un module de diagnostic des Systèmes à événements discrets

ALAOUI ISMAILI HAJAR

Laboratoire des techniques industriel  
Faculté des sciences et techniques  
Université Sidi Mohammed Ben Abdellah  
Fès, Maroc  
hajar.alaouiismaili@usmba.ac.ma

BELMAJDOUB FOUAD

Laboratoire des techniques industriel  
Faculté des sciences et techniques  
Université Sidi Mohammed Ben Abdellah  
Fès, Maroc  
fbelmajdoub@yahoo.fr

**Résumé**\_\_ Le diagnostic des défauts (Fault Detection and Isolation) des systèmes industriels est défini comme l'opération permettant de détecter un défaut, de localiser son origine et de déterminer ses causes.

L'intérêt pour le diagnostic des défaillances s'explique par la complexité croissante des systèmes industriels qui sont de plus en plus exigeants en termes de contraintes de sécurité, de fiabilité, de disponibilité et de performances (sûreté de fonctionnement). En fait, la possibilité qu'un système tombe en panne croît malgré les précautions de manipulations, Par conséquent, un module de diagnostic est nécessaire pour empêcher la propagation de pannes et pour limiter leurs conséquences qui peuvent être catastrophiques au niveau économique mais aussi au niveau environnemental.

Dans cet article, nous présentons les différentes méthodes de diagnostic de systèmes à événements discrets (SED), avec une étude comparative selon plusieurs critères : l'outil de modélisation (les automates, réseaux de pétri...), la structure de la prise de décision (centralisée, décentralisée, distribuée) et le type de modélisation des défauts (à base d'événements, à base d'états et à base d'informations temporelles) ; dans le but de justifier que le diagnostic des défauts nécessite l'exploitation de toute l'information disponible afin de réaliser un modèle riche du procédé à diagnostiquer.

**Mots clés :** *Diagnostic, Systèmes à événements discrets, sûreté de fonctionnement, outils de modélisation, structure de prise de décision.*

## I. INTRODUCTION

[1] Le diagnostic est défini comme étant le lien de cause à effet entre un symptôme observé et la défaillance qui est survenue, tout en considérant qu'un même symptôme peut apparaître pour différentes causes.

Le diagnostic s'intègre dans le cadre plus général de la surveillance et de la supervision.

C'est un système d'aide à la décision, son objectif est de localiser les composants ou les organes défaillants d'un procédé et éventuellement de déterminer les causes.

Les systèmes à événements discrets finis représentent la classe de systèmes dynamiques dont les états et les transitions sont modélisés de manière discrète, par exemple par un automate à états finis. Tout comportement du système est alors représenté par un chemin sur cet automate. [2]

La notion de diagnostic des SED a été introduite au cours des années dans plusieurs travaux.[3-8]

Dans ce cadre, de nombreuses recherches, citées tout au long de cet article [1, 9-11], ont été effectuées dans le domaine du diagnostic de SED, afin d'établir l'étude comparative des approches de construction d'un module de diagnostic.

Dans ce papier une classification et une étude comparative approfondie des méthodes de diagnostic des SED seront présentées. Ces méthodes seront classifiées selon plusieurs critères :

- L'outil de modélisation
- La modélisation des défauts
- Et la structure de la prise de décision de diagnostic;

Afin de justifier les différents choix Pour la réalisation d'une approche de diagnostic des SED, et mettre en évidence que la construction d'un module de diagnostic a besoin de manipuler les différents modèles de la partie opérative et de la commande.

## II. CONTEXTE GÉNÉRAL

[9] **Le diagnostic des défaillances** : consiste à chercher les liens de causalité entre les symptômes observés, la défaillance et son origine. Cette fonction peut être divisée en trois sous-fonctions.

- La localisation : est chargée de déterminer le sous-système à l'origine d'un symptôme observé.
- L'identification : détermine les causes d'une défaillance
- L'explication : fournit les conclusions du diagnostic

[10] **Un système à événements discrets (SED)** : est un système dynamique dans lequel l'espace des états est discret. Ses trajectoires d'états sont constantes par morceaux. Un tel système évolue conformément à l'occurrence des événements physiques (début traitement, fin traitement, panne, réparation), à des intervalles de temps généralement irréguliers ou inconnus.

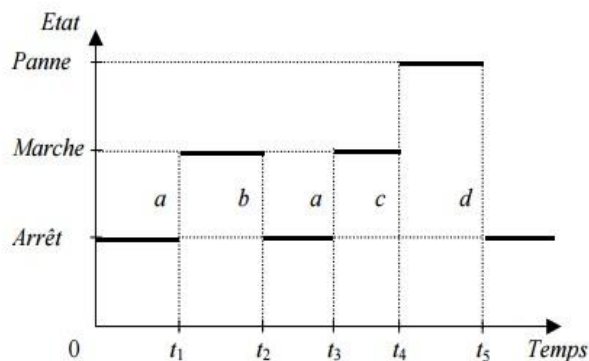


Figure 1 : l'évolution de l'état d'un système à événements discrets

**Diagnostic des systèmes a événements discrets** : consiste à calculer l'ensemble des trajectoires sur le modèle du système qui peuvent générer les observations reçues. Dont les observations reçues sont partiellement ordonnées. Cela signifie que les observations émises par le système ne sont pas reçues dans l'ordre de leur émission. Le comportement observé est alors défini comme l'ensemble partiellement ordonné des observations émises.

## Caractéristiques des méthodes de diagnostic des SED :

Il existe un grand nombre de méthodes de diagnostic, qui sont basé sur un modèle du comportement normal et/ou défaillant du système. Chacune des méthodes de diagnostic doit garantir les caractéristiques suivantes :

- Le diagnostic doit être facile à implémenter.
- Le nombre de capteurs nécessaire pour le diagnostic doit être minimal.
- Le diagnostic doit être prédictif.
- Le diagnostic doit être réalisable en temps réel.
- Le diagnostic doit être concevable algorithmiquement.

## III. CLASSIFICATION ET ETUDE COMPARATIVE DES CRITERES DE CONSTRUCTION D'UN MODULE DE DIAGNOSTIC DES SED

La construction d'une approche de diagnostic des SED repose sur un certain nombre de critères en relation avec :

- Les outils de représentation de la partie commande PC et de la partie opérative PO.
- Le type de modélisation des défauts.
- La structure de la prise de décision des diagnostiqueurs.

Nous allons voir maintenant l'ensemble de ces critères plus en détail.

### A. les outils de représentation du diagnostic des SED

#### 1) Classification

##### a) Diagnostic à base d'automates à état

[11] L'automate est un outil adapté pour la modélisation de l'information sous forme d'événements observables et non observables par l'opérateur. Ce modèle permet de décrire les évolutions à travers des séquences d'événements qui rendent compte de l'état du système. C'est un outil largement utilisé dans les méthodes de diagnostic des SED surtout lorsqu'il s'agit de décrire le comportement complet du système.

Un automate est un quadruplet  $A = (S, S_0, E, T)$ , où :

- $S$  = ensemble d'états.
- $S_0$  = ensemble des états initiaux de l'automate ( $S_0 \subseteq S$ ).
- $E$  = ensemble fini des étiquettes des transitions.
- $T$  = ensemble des transitions ( $T \subseteq S \times E \times S$ ).

##### b) Diagnostic à base de Réseaux de Pétri

[11] Les réseaux de pétri sont utilisés afin de modéliser le comportement dynamique de systèmes discrets. Ils sont composés de deux types d'objets: les places et les transitions. L'ensemble des places permet de représenter l'état du système ; l'ensemble des transitions représente alors l'ensemble des événements dont l'occurrence provoque la modification de l'état du système.

### 3) résultats

Un réseau de pétri est un 4-uplet  $R = \{P, T, W-, W+\}$  ou :

- P est un ensemble fini et non vide de places.
- T est un ensemble fini de transition.
- $W-$  (resp.  $W+$ ) est la fonction d'incidence avant (resp. arrière) de domaine  $P \cdot T$ .

#### c) Diagnostic à base d'expressions logiques

La modélisation par un automate peut être renforcée en exploitant les propriétés algébriques du procédé, car la modélisation d'un SED par un automate permet une interprétation difficilement exploitable de la situation d'un système dans le cas où ce dernier est complexe avec un nombre d'états très important.

[1] En effet, dans le cas où le procédé est composé de plusieurs capteurs et actionneurs de type Tout Ou Rien, renvoyant une valeur 0 ou 1, la modélisation par algèbre de Boole est particulièrement intéressante.

Cet outil de représentation décrit le comportement du système par des spécifications en utilisant des prédicats booléens. C'est un modèle abstrait permettant une exploitation et une compréhension souvent plus aisées. Chaque état du procédé est représenté par un vecteur composé de variables booléennes. Le passage d'un état à un autre ne se produit que par changement d'une variable.

#### 2) Etude comparative

Le tableau ci-dessous (tableau 1) présente une étude comparative des différentes structures de la prise de décision du diagnostic des SED :

Tableau 1 : Etude comparative des différents outils de modélisation

		Avantages	Inconvénients
Outils de modélisation	Automates à états	-Description précise du comportement des systèmes manufacturiers d'un point de vue matériel  -Manipulation facile grâce à la théorie des langages et les outils de composition et de projection	Risque d'explosion combinatoire
	RDP	La gestion des Procédés concurrentiels nécessitant d'établir une distribution des éléments.	Risque d'explosion combinatoire
	Expressions logiques	Modèle abstrait permettant une exploitation et une compréhension souvent plus aisées.	Interprétation difficile Des résultats d'un système complexe

- Il en est ressorti de cette comparaison que la modélisation des SED par les automates à états ainsi que par les RDP n'est pas efficace dans le cas des systèmes manufacturiers complexes à cause du problème de l'explosion combinatoire.

- La modélisation des SED par les expressions logique permet une exploitation facile des données, mais difficilement interprétable dans le cas des systèmes complexes.

#### B. Type de modélisation des défauts

Il existe 3 types de modélisation de défauts soit :

- Modélisation à base d'événements
- Modélisation à base d'états
- Ou encore en combinant les deux modélisations (mixtes).

Chacune de ces modélisations conduit à l'obtention d'un diagnostiqueur à base d'événements, à base d'états ou mixte.

#### 1) Classification

##### a) Modélisation à base d'événements

[1] La modélisation à base d'événements considère le défaut comme l'exécution d'un événement et que la détection d'un défaut est réalisée par la détection d'une séquence de défaillance. L'analyse de cette séquence permet de détecter l'apparition d'un défaut lorsqu'un nouvel événement observable caractérisant ce défaut survient.

A partir d'un modèle de procédé représentant le comportement normal et défaillant, il faut pouvoir créer un modèle permettant d'étudier toutes les séquences observables du procédé et de déterminer si une de ces séquences est normale, défaillante ou correspond à un cas incertain.

La détection et l'isolation des défauts sont réalisées en utilisant uniquement les séquences d'événements observables.

Ces modèles à base d'événements ont l'avantage de détecter les défauts intermittents mais ils nécessitent l'initialisation du diagnostiqueur en même temps que le procédé, ce qui est difficile à obtenir dans le cas des procédés manufacturiers

##### b) Modélisation à base d'états

[1] La modélisation à base d'états considère que l'occurrence d'un défaut est détectée par l'arrivée dans un état caractérisant ce défaut. Un diagnostiqueur à base d'états caractérisé par les sorties des capteurs et des commandes ainsi que le chemin qui conduit à ces états normaux ou défaillants.

Elle détecte et isole le défaut en observant les états caractérisés par les sorties statiques des capteurs et les commandes envoyées par la Partie Commande (PC). Ce type de modélisation a l'avantage de ne pas avoir besoin d'initialiser le diagnostiqueur en même temps que le procédé. L'inconvénient de la modélisation à base d'états est qu'elle ne peut détecter les pannes intermittentes qui sont des événements brefs amenant à des états non stables, donc non représentatifs.

## 2) Etude comparative

Tableau 2 : Etude comparative des différents modèles de défauts

		Pannes permanentes	Pannes intermittentes	initialisation	Avantages	Inconvénients
Modèles de défauts	A base d'événements	Détection	Détection	Problème de détection des défauts à l'initialisation	- Détection des Pannes intermittentes	-Défauts à l'initialisation
	A base d'états	Détection	Problème de détection	détection des défauts à l'initialisation	-Défauts à l'initialisation	-Problème de détection des Pannes intermittentes
	Mixte	Détection	Détection	détection des défauts à l'initialisation	-Détection des pannes intermittentes et des défauts à l'initialisation	

## 3) résultats

Il en est ressorti de cette comparaison que la modélisation mixte (à base d'événements et à base d'états) permet de répondre aux pannes intermittentes et aux défauts dus à l'initialisation des diagnostiqueurs.

### C. Structure de la prise de décision

#### 1) Classification

##### a) Structure centralisée

La structure centralisée est une entité centralisée qui observe, détecte et diagnostique les défaillances du système, en associant un modèle global du procédé avec un seul module de diagnostic, appelé « diagnostiqueur ».

Le diagnostiqueur rassemble les informations nécessaires du procédé avant de prendre la décision finale sur l'état de fonctionnement du procédé.

## c) Modélisation mixte

[1] La modélisation mixte consiste par conséquent à établir un lien entre l'occurrence des événements et l'atteignabilité des états de défaut. Cette modélisation permet ainsi de diagnostiquer un maximum de défauts en palliant aux problèmes de la modélisation à base d'événements et à base d'états. Cette modélisation mixte est intéressante pour le cas des systèmes manufacturiers puisque leur état initial peut être inconnu.

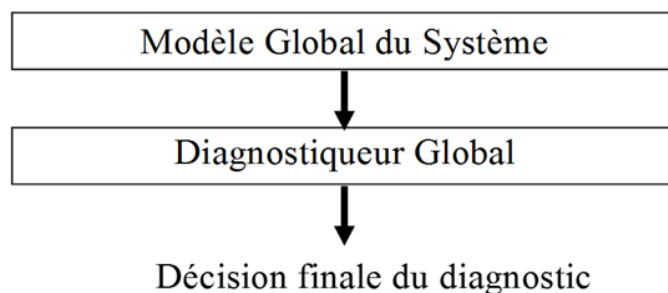


Figure 2 : structure centralisée

Considérons un exemple tiré de [12] d'un procédé représenté par son modèle global G.

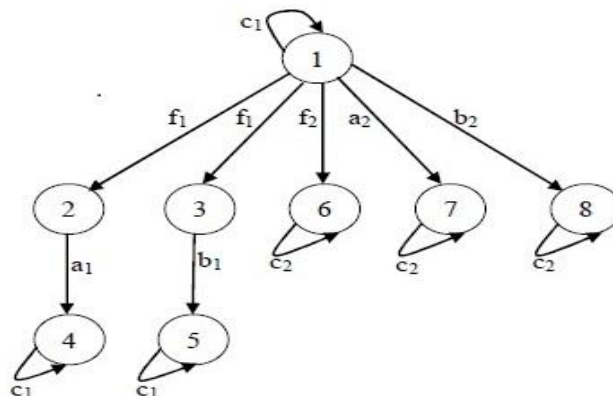


Figure 3 : Modèle global du procédé

Afin de pouvoir construire le diagnostiqueur global Gd du procédé :

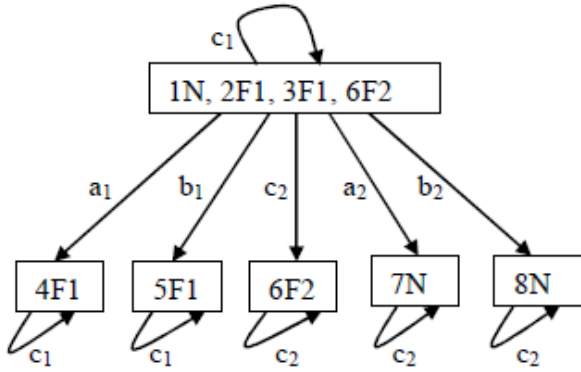


Figure 4 : Diagnostiqueur global du procédé

b) Structure décentralisée

La structure décentralisée : est basée sur un modèle globale du système, à qui on a associé plusieurs diagnostiqueurs locaux indépendants, en mesure de gérer les pannes et leur propagation. Chacun de ces diagnostiqueurs reçoit les observations spécifiques afin de prendre une décision locale basé sur ses observations locales.

Il existe 2 types de structure décentralisée :

- **Sans coordinateur**

- Un seul modelé avec plusieurs diagnostiqueurs locaux
- Pas besoin de coordinateur pour les décisions de diagnostiqueurs locaux
- Architecture non conditionnelle

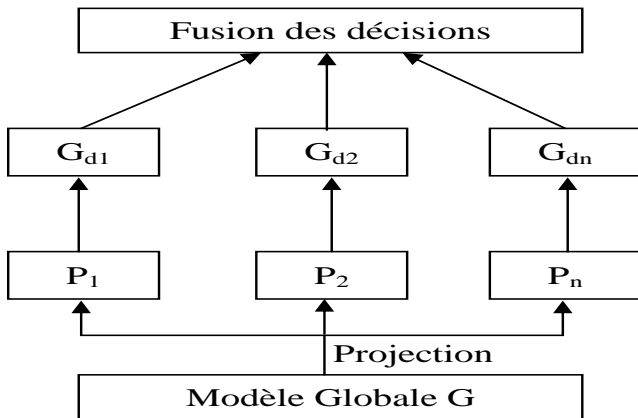


Figure 5: structure décentralisé sans coordinateur

Reprenons le même procédé (figure 4). Nous souhaitons construire un diagnostiqueur selon une approche décentralisée. A partir du modèle global du procédé, il est possible d'établir deux diagnostiqueurs locaux Gd1 et Gd2.

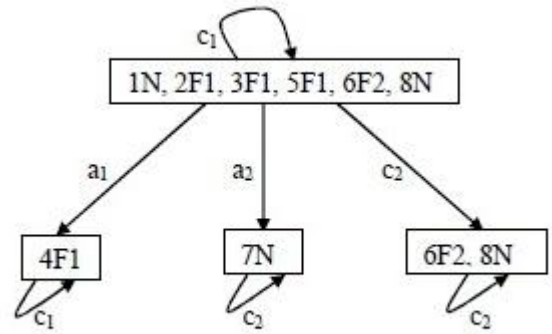


Figure 6 : diagnostiqueur local Gd1

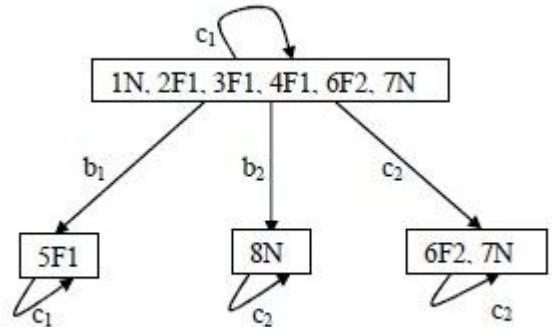


Figure 7 : diagnostiqueur local Gd2

Chaque diagnostiqueur prend une décision locale. Cependant, les diagnostiqueurs locaux doivent fournir au final les mêmes performances qu'un diagnostiqueur global. L'observation de l'événement c2 sur les deux diagnostiqueurs engendre une indécision sur le procédé.

C'est pourquoi, un coordinateur de décisions locales doit être ajouté à la structure décentralisée afin de résoudre le problème d'indécision de l'occurrence du défaut de type F2.

- **Avec coordinateur**

- Une communication limitée est nécessaire pour résoudre le problème d'ambiguïté entre les différents diagnostiqueurs : coordinateur
- Architecture conditionnelle : Défaut si la décision de tous les autres diagnostiqueurs est 'pas de défaut'

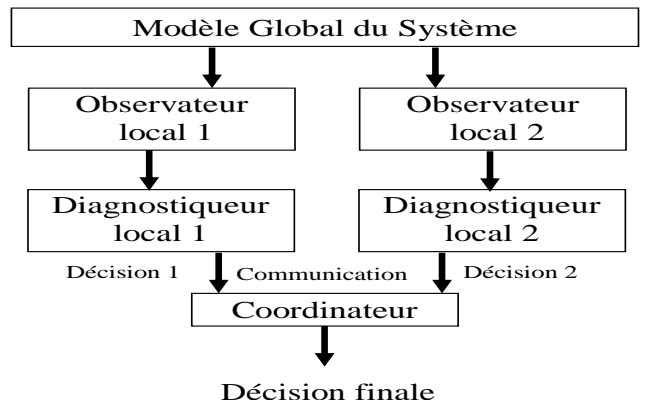


Figure 8: structure décentralisé ave coordinateur

L'obtention d'un coordinateur s'effectue par l'étude du modèle global du procédé par un expert. Il émet des priorités sur les décisions des diagnostiqueurs afin de lever les cas d'indécision.

c) Structure distribuée

- Plusieurs sous modelés chacun a son diagnostiqueur local
- Communication entre diagnostiqueurs pour affiner le diagnostic
- Inconvénients complexité du protocole de communication, délai de communication

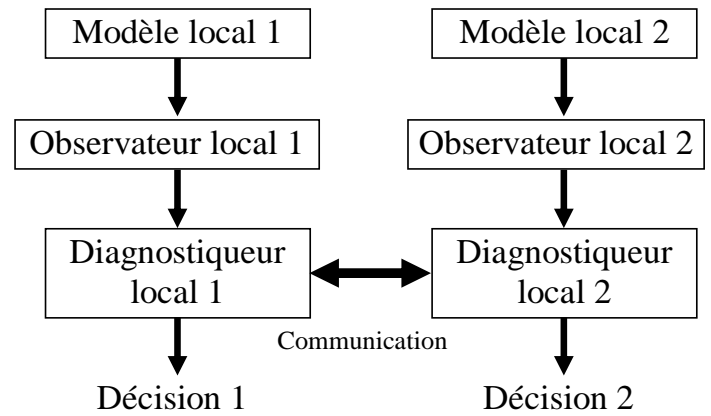


Figure 9: structure distribuée

## 2) Etude comparative

Le tableau ci-dessous présente une étude comparative des différentes structures de la prise de décision du diagnostic des SED :

Tableau 3 : Etude comparative des différentes structures

		Modèle du procédé	diagnostiqueur	Protocole de communication	Décision	Indécision	Complexité du protocole	Avantages	Inconvénients
Structure de la prise de décision	Centralisée	Modèle global	global	aucun	globale	aucune	aucune	-Pas besoin d'un protocole de communication  -Un seul modèle avec un seul diagnostiqueur	-Explosion Combinatoire  -faible robustesse  -faible maintenabilité  -Peu tolérantes aux défaillances  - peu évolutives
	Décentralisée sans coordinateur	Modèle global	Local	aucun	locale	Risque important	aucune	-Diminution de l'explosion combinatoire	-Risque de conflits Décisionnels  - Architecture conditionnelle
	Décentralisée avec coordinateur	Modèle global	local	coordinateur	locale	Faible Risque	faible	-Diminution de l'explosion et gestion des conflits par le coordinateur	-Nécessité d'un coordinateur
	Distribuée	Modèle local	local	Entre modules	locale	aucune	importante	-Gestion des conflits directement	-Protocole de communication

### 3) résultats

- Les structures de prise de décision centralisées sont à éviter à cause de l'explosion du nombre d'états
- Les structures de prise de décision distribuées permettent de diminuer l'explosion combinatoire mais imposent des protocoles de communications parfois lourds et complexes pour la résolution des cas d'indécisions.
- Les structures de prise de décision décentralisées permettent à la fois de diminuer le risque à l'explosion combinatoire et de régler les indécisions à l'aide d'un coordinateur simple d'agrégation des décisions.

## IV. CONCLUSION

Les systèmes manufacturiers sont des systèmes décentralisés et modulaires au terme d'informations ; et l'évolution de ces derniers rend le diagnostic des défaillances indispensable pour la production et le développement industriel.

Cependant, La construction ou bien la réalisation d'un module de diagnostic des systèmes à événements discrets nécessite l'exploitation de plusieurs critères.

Nous venons de voir dans ce papier, les différents critères des méthodes de diagnostic issus de la littérature ; ainsi qu'une étude comparative permettant de justifier le choix d'une approche de diagnostic afin de réaliser un modèle riche du procédé à diagnostiquer.

### Références

- [1] A. Philippot, "Contribution au diagnostic décentralisé des systèmes à événements discrets: Application aux systèmes manufacturiers," Université de Reims-Champagne Ardenne, 2006.
- [2] A. Grastien and A. Anbulagan, "Diagnostic de systèmes à événements discrets à base de cohérence par SAT," *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 24, pp. 757-786, 2010.
- [3] E. Gascard, Z. Simeu-Abazi, and G. Mayol, "Elaboration du comportement dynamique d'un système pour le diagnostic des défaillances," in *Congrès International de Génie Industriel (CIGI'13)*, 2013, p. pp.
- [4] P. Marangé, A. Philippot, J.-F. Pétin, and F. Gellot, "VERIFICATION DE LA DIAGNOSTICABILITE PAR MODEL-CHECKING," in *MOSIM*, 2014.
- [5] D.-T. Nguyen, "Diagnostic en ligne des systèmes à événements discrets complexes: approche mixte logique/probabiliste," Grenoble Alpes, 2015.
- [6] R. Saddem, T. Armand, and T. Moncef, "ALGORITHME D'INTERPRETATION D'UNE BASE DE SIGNATURES TEMPORELLES CAUSALES POUR LE DIAGNOSTIC EN LIGNE DES SYSTEMES A EVENEMENTS DISCRETS," in *9th International Conference on Modeling, Optimization & SIMulation*, 2012.
- [7] M. Sayed-Mouchaweh and E. Lughofer, "Decentralized fault diagnosis approach without a global model for fault diagnosis of discrete event systems," *International Journal of Control*, pp. 1-14, 2015.
- [8] J. Zaytoon and S. Lafortune, "Overview of fault diagnosis methods for Discrete Event Systems," *Annual Reviews in Control*, vol. 37, pp. 308-320, 2013.
- [9] C. G. Lopez-Varela, "Détection et diagnostic basés cohérence pour les systèmes à événements discrets: vers la prise en compte des erreurs de modélisation," 2007.
- [10] A. T. Sava, "Sur la synthèse de la commande des systèmes à événements discrets temporisés," Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2001.
- [11] J. Pradat-Peyre, "Spécification et vérification des problèmes concurrents: Vérification avec les réseaux de Petri et les réseaux de haut-niveau," 2002.
- [12] N. Malki, "Contribution au diagnostic des Systèmes à Evénements Discrets par modèles temporels et distributions de probabilité," Reims, 2013.