

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE SETIF 1
(ALGERIE)**

MEMOIRE

**Présenté à la Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique
Pour l'Obtention du Diplôme de**

MAGISTER

Option : AUTOMATIQUE

Par

Mr : REZIGUE HAMZA

THEME

**MODELISATION, SURVEILLANCE D'UNE CENTRALE A
BETON PAR L'OUTIL BOND GRAPH ET VALIDATION EN
LIGNE PAR UN SYSTEME SCADA**

Soutenu le .. / .. / 2014 devant un Jury composé de :

HARMAS MOHAMED NAGUIB	Prof. à l'université de Sétif	Président
KHEMLICHE MABROUK	Prof. à l'université de Sétif	Rapporteur
LAMAMRA ATHMANE	M.C. à l'université de Sétif	Examineur
SAIT BELKACEM	M.C. à l'université de Sétif	Examineur
ABDELAZIZ MOURAD	M.C. à l'université de Sétif	Examineur

Dédicaces

À ma petite famille

À mon fils Anes

À ma femme

À ma grande famille

À ma mère

À mon père

À mes frères et sœurs

À toute ma famille

À tous mes amis

REZIGUE HAMZA

Remerciements

Je remercie Dieu le tout Puissant qui m'a donné la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à remercier en premier lieu Monsieur KHEMLICHE Mabrouk Professeur à l'université Farhet Abbas (UFA, Sétif), d'avoir accepté d'être mon encadreur durant ce travail, et pour la confiance qu'il m'a donné et ses précieux conseils.

Mes remerciements vont également aux membres de jury d'avoir accepté de juger mon travail. Monsieur HARMAS Mohamed Naguib Professeur à l'université Farhet Abbas (UFA, Sétif). Monsieur LAMAMRA Athmane maître de conférences à l'université Farhet Abbas (UFA, Sétif). Monsieur SAIT Belkacem maître de conférences à l'université Farhet Abbas (UFA, Sétif). Monsieur ABDELAZIZ Mourad maître de conférences à l'université Farhet Abbas (UFA, Sétif).

Je remercie tous les personnes qui m'ont aidé durant la préparation de ce mémoire de près ou de loin. Merci à le consortium japonais pour l'autoroute algérienne COJAAL pour ces aides, me permettre d'inspecter la centrale à béton et de faire les expériences et les modifications au sein de cette centrale.

Je conclurai, en remerciant vivement toute ma famille qui m'a toujours supporté moralement et financièrement pendant toutes mes longues années d'étude.

Table de matières

Introduction générale	1
Chapitre 1	
Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels	
1.1 Etat de l'art des outils de surveillance.....	4
1.1.1 Introduction	4
1.1.2 Définitions et terminologie	4
1.1.3 Les systèmes de surveillance dans un processus de supervision	7
1.1.3.1 Classification des méthodes de surveillance.....	7
1.1.3.2 Méthodes de surveillance	9
1.1.3.2.1 Méthodes sans modèle.....	10
1.1.3.2.2 Méthodes avec modèles	11
1.1.3.2.2.1 Modèles hiérarchiques	12
1.2 Modélisation structurelle pour le diagnostic des systèmes physiques.....	12
1.2.1 Introduction	12
1.2.2 Modélisation des systèmes.....	13
1.2.2.1 Modélisation comportementale et fonctionnelle	13
1.2.2.2 Modélisation structurelle	13
1.2.2.3 Rappel des travaux sur le raisonnement structurel pour le diagnostic de défauts	14
1.2.3 Représentation structurelle des systèmes.....	14
1.2.3.1 Modélisation par matrice structurelle	14
1.2.3.2 Représentation structurelle par graphe.....	18
1.2.3.2.1 Représentation structurelle par digraphe associé à la représentation d'état.....	18
1.2.3.2.2 Représentation structurelle par graphe biparti	21
1.2.3.2.3 Représentation structurelle par bond graph (graphe de liaison)	30
1.3 Conclusion	34
Chapitre 2	
Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes	
2.1 Introduction	35
2.2 Représentation bond graph d'un système de surveillance.....	35

2.3 Représentation par bond graph d'un système dynamique	36
2.3.1 Les contraintes C	36
2.3.2 Les variables	38
2.3.3 Les paramètres	38
2.4 Génération d'algorithmes pour le diagnostic.....	38
2.4.1 Algorithme de génération de relation de redondance analytique par bond graph N ⁰ : 01	38
2.4.1.1 Exemple d'application	40
2.4.1.2 Matrice de signature des défaillances.....	43
2.4.1.3 Procédure de détection et d'isolation des défaillances.....	44
2.4.2 Algorithme de génération de relation de redondance analytique par bond graph N ⁰ : 02	45
2.4.2.1 Contraintes non-inversibles	45
2.4.2.2 Détecteurs de résidus numériques.....	46
2.4.2.3 Modifications sur le modèle bond graph en causalité dérivée.....	47
2.4.2.4 Algorithme de Génération des résidus.....	49
2.4.2.5 Exemple	49
2.4.3 Application générale	51
2.4.3.1 Description du processus.....	51
2.4.3.2 Modèle Pseudo bond graph des deux réservoirs	52
2.4.3.3 Génération des RRAs	53
2.4.3.4 Matrice de signature des défaillances.....	55
2.4.3.5 Simulation des résultats de l'application.....	55
2.5 Supervision de systèmes dynamiques par Bond Graph et modèles externes	59
2.5.1 Les modèles externes	59
2.5.2 Bond graph et les modèles externes	61
2.5.3 Application sur un système hydraulique.....	62
2.6 Conclusion	68

Chapitre 3

Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

3.1 Introduction.....	69
3.2 Les centrales à bétons	69
3.2.1 Classification des centrales à bétons.....	69

3.2.1.1 Répartition selon la méthode de fabrication utilisée.....	70
3.2.1.2 Répartition selon le degré de mobilité	70
3.2.1.3 Répartition selon le degré d'automatisation.....	71
3.2.2 Le dosage des matières premières.....	71
3.2.3 Description de la centrale étudiée	72
3.3 Modélisation de la centrale à béton par l'outil bond graph.....	74
3.3.1 Modélisation du circuit d'alimentation et du système de dosage d'eau par bond graph	75
3.3.2 Modélisation du circuit d'alimentation et du système de dosage des adjuvants par bond graph.....	79
3.3.3 Modélisation de stockage, de transport et de système de dosage de ciment par bond graph	83
3.3.4 Modélisation de stockage, de transport et de système de dosage des granulats par bond graph.....	86
3.4 Détection et isolation des défauts par l'outil bond graph.....	89
3.4.1 Détection et isolation des défauts de circuit d'alimentation et de système de dosage d'eau	89
3.4.2 Détection et isolation des défauts de circuit d'alimentation et de système de dosage des adjuvants	92
3.4.3 Détection et isolation des défauts de convoyeur à vis du ciment.....	96
3.4.4 Détection et isolation des défauts de tapis convoyeur	99
3.5 Conclusion	101

Chapitre 4

Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

4.1 Introduction.....	102
4.2 Supervision dans un environnement SCADA.....	102
4.2.1 Définition du SCADA.....	102
4.2.2 Architecture du SCADA.....	102
4.2.3 Avantage du SCADA.....	103
4.2.4 Interfaces graphiques du SCADA.....	104
4.2.5 Fonctionnalité temps réel	105
4.3 Description des logiciels utilisés	105
4.3.1 Description du logiciel 20 sim v4.1	105
4.3.2 Description du logiciel step7.....	106
4.3.2.1 Définition du logiciel	106
4.3.2.2 Applications du logiciel de base STEP 7.....	106

4.3.2.3 Gestionnaire de projet SIMATIC Manage	107
4.3.2.4 Configuration du matériel HW Config.....	107
4.3.2.5 Editeur de mnémoniques	108
4.3.2.6 Editeur de programme	108
4.3.2.7 Configuration de communication Net Pro	109
4.3.2.8 Diagnostic du matériel.....	109
4.3.3 Description du logiciel PLCSIM	109
4.3.4 Description du logiciel Wincc.....	110
4.3.4.1 Aperçu du logiciel de visualisation WinCC.....	110
4.3.4.2 Création d'un nouveau projet.....	111
4.3.4.3 Les fonctionnalités principales du projet.....	112
4.3.4.4 Système d'alarme	115
4.4 Architecture de système de supervision de la centrale à béton	116
4.5 Programmation par step 7 de la centrale à béton	118
4.5.1 Définition des documents utilisés.....	118
4.5.2 Création d'un projet S7 avec configuration matérielle	118
4.5.3 La Structure du programme.....	119
4.5.4 Programme du circuit d'eau intérieur dans la chambre de la centrale à béton.....	122
4.5.4.1 Mise à l'échelle d'une entrée analogique.....	124
4.5.4.2 Table des mnémoniques du réservoir interne.....	125
4.5.4.3 Programme Step 7 et simulation du système de remplissage du réservoir interne	125
4.5.4.4 Table des mnémoniques du système du pesage d'eau	127
4.5.4.5 Programme Step 7 et simulation du système du dosage d'eau	127
4.6 Réalisation de l'interface homme machine graphique HMI sous un environnement SCADA	130
4.7 Conclusion	132

Chapitre 5

Implémentation en temps réel des résidus et supervision en En ligne dans un environnement SCADA

5.1 Introduction.....	133
5.2 Types des défaillances dans la centrale à béton	133
5.3 Paramètres et conditions initiales utilisés	133
5.4 Surveillabilité et placement de capteurs	136

5.5 Implémentation en temps réel	138
5.5.1 Procédure de validation des ARR dans l'API.....	138
5.5.2 Exemple de validation d'une relation de redondance analytique dans l'API.....	139
5.5.3 Matrice pratique de signature des défaillances	142
5.5.4 Procédure de décision	142
5.6 Supervision en ligne	144
5.6.1 Fenêtre d'alarme	144
5.6.2 Résultats expérimentaux	145
5.6.2.1 Opération de pesage d'eau dans la trémie	145
5.6.2.2 Défaillance de pesage d'eau.....	145
5.6.2.3 Opération de pesage d'adjuvants dans la trémie.....	147
5.6.2.4 Défaillance de pesage d'adjuvant N0 01	147
5.6.2.5 Défaillance de pesage d'adjuvant N0 02	149
5.7 Conclusion	150
Conclusion générale	151
Bibliographie	i

Introduction générale

Introduction Générale

Pour faire face au besoin du marché et à la concurrence économique qui devient de plus en plus sévère, les industriels ont tendance de plus en plus à élargir leurs installations et à les rendre plus complexes, contribuant en même temps à rendre la commande plus difficile et surtout à diminuer la sécurité et à augmenter les risques de pannes ou d'explosions.

La sécurité industrielle est une partie intégrante et indissociable de la commande, telle qu'on ne peut pas envisager une installation industrielle sans une coche qui assure la sécurité. En effet, la sécurité non seulement évite les explosions qui pourraient provoquer des dégâts matériels et humains, mais aussi assure la continuité de la production, ainsi elle assure la survie de l'installation.

Aujourd'hui, un autre défi est relevé, il s'agit de l'automatisation de la supervision des processus en utilisant des systèmes intelligents. Ces derniers fournissent à l'utilisateur une aide dans la gestion de ses tâches d'alarmes urgentes dans le but d'augmenter la fiabilité et la sûreté de fonctionnement des processus.

L'amélioration de la sûreté de fonctionnement des systèmes repose essentiellement sur les algorithmes de détection et d'isolation des défauts, connus sous l'expression anglaise Fault Détection & Isolation (FDI), qui consistent principalement à comparer le comportement réel du système avec des comportements de référence décrivant le fonctionnement normal (pour la détection des défauts), ou décrivant différents genres de défauts (pour l'analyse et l'isolation des pannes), tout en minimisant les fausses alarmes, les non détections ainsi que les retards dans la détection des défauts. La dégradation des performances des algorithmes de diagnostic est principalement due à la connaissance imparfaite des valeurs paramétriques des modèles et à leurs variations aléatoires [39].

Les méthodes à base de modèle utilisent des approches opératoires construits à partir des lois physiques ou identifiées du processus. Ces approches sont basées sur la comparaison entre le comportement réel du système et un comportement de référence décrit par un modèle mathématique. Cette comparaison se fait en utilisant des indicateurs de fautes, appelés résidus, générés à partir du modèle de référence en ayant recours à des méthodes analytiques, telles que: les observateurs,

l'espace de parité, ou à des méthodes graphiques telles que les bond graphs, et les graphes bipartis.

L'outil bond graph, qui a prouvé son efficacité pour construire des modèles de connaissance de systèmes multi physiques, est utilisé dans notre cas pour la conception intégrée des systèmes de supervision allant de la modélisation, la détermination hors ligne des conditions, moyens de surveillabilité avant réalisation industrielle à la génération d'algorithmes de diagnostic en ligne [48].

L'intérêt du modèle bond graph se situe à plusieurs niveaux :

- La démarche est une approche complète pour la conception intégrée d'un système de supervision. La démarche est générique et flexible et n'utilise qu'une seule représentation.
- Grâce aux aspects graphiques et les propriétés structurelles et causales du bond graph, les modèles ainsi que les relations de redondances analytiques (RRAs) peuvent être générés sous forme symbolique et donc adapter à une implémentation informatique en utilisant des logiciels dédiés [35].

D'autres techniques de supervision ont été développées pour la surveillance à distance. En effet pour les installations à risque élevé, il est préférable de les superviser d'un poste de pilotage qui se situe très loin du site, évitant ainsi des risques sur les opérateurs si jamais un incident se produit, cette technique de supervision à distance est appelée supervision dans un environnement SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition).

SCADA est un environnement où interviennent plusieurs outils de supervision, tels que, des logiciels conçus spécialement pour créer des interfaces graphiques avec lesquelles l'opérateur pourra intervenir à modifier des paramètres de l'installation et aussi à suivre l'évolution des états de variables de l'installation à chaque instant, ces logiciels offrent aussi des outils pour établir une communication à l'internet dans le but de superviser et de contrôler une installation située à des milliers de kilomètres du poste de pilotage [50].

Notre mémoire est organisée autour de cinq chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons le principe de la surveillance dans les systèmes industriels à base et sans modèle ainsi que la représentation structurelle de ces systèmes. Le deuxième chapitre présente la surveillance par l'outil bond graph et les modèles externes des systèmes industriels. La première partie de ce chapitre explique les

étapes de diagnostic par bond graph; représentation par bond graph d'un système dynamique, surveillabilité structurelle, génération des résidus, détection des défauts, décision et placement de capteurs. Dans sa deuxième partie, une approche combinée de bond graph et modèles externes est représentée pour la supervision d'un système dynamique. Le troisième chapitre a pour but la modélisation, la détection et l'isolation des défauts d'une centrale à béton en utilisant seulement l'outil bond graph. Le quatrième chapitre présente l'automatisation d'une centrale à béton et la création d'une interface homme-machine dans le but d'avoir une supervision en ligne. Le cinquième chapitre donne l'implémentation en temps réel des résidus calculés par l'outil bond graph et l'application du système de supervision en ligne sur la centrale à béton.

Chapitre 1

**Surveillance et modélisation structurelle
des systèmes industriels**

1.1 Etat de l'art des outils de surveillance

1.1.1 Introduction

Les systèmes conçus et fabriqués par l'homme (véhicules, avions, réseaux de télécommunications, usines de production...) sont de plus en plus complexes. Cette complexité est due au grand nombre de composants constituant ces systèmes. Malgré les besoins de haute sécurité, la réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité des équipements, ces systèmes ne sont pas à l'abri de défaillances. C'est pourquoi les activités de surveillance, diagnostic (détection, localisation, identification de défaillances), réparation ou reconfiguration sont très importantes. Ces activités permettent de détecter et localiser les défauts, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements.

De nos jours, l'implémentation des systèmes automatisés suppose la mise en place d'outils importants pour le diagnostic et la surveillance pour aider les entreprises dans leur recherche permanente d'un meilleur fonctionnement de leurs systèmes à moindre coût [1].

1.1.2 Définitions et terminologie

On peut trouver plusieurs définitions quelquefois divergentes. C'est pourquoi nous nous positionnons dans la première partie de ce chapitre, en donnant des définitions des mots clés qui sont utiles pour compréhension.

- **Définition 1.** *Un processus industriel est un assemblage fonctionnel de composants technologiques associés les uns aux autres de façon à former une entité unique accomplissant ou pouvant accomplir une activité clairement définie (i.e. colonne de distillation, générateur de vapeur,...)*
- **Définition 2.** *Un composant industriel est un organe technologique destiné à former une partie du processus industriel (pompe, vanne, conduite, ...).*
- **Définition 3.** *L'architecture du système est un modèle orienté composant qui décrit directement le processus industriel comme un réseau des composants industriels.*
- **Définition 4.** *Nous appellerons P&ID (Piping and Instrumentation Diagrams) la définition des Plans des Instruments Détaillés ou diagrammes d'acheminement et d'instrumentation. Il comprend les outils d'agencement général destinés au positionnement et à la localisation des équipements, à la création et la gestion des lignes d'acheminement, à la création et la gestion des boucles d'instrumentation et de contrôle. Ce diagramme est utilisé pour*

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

une description visuelle de l'architecture du processus. Il utilise (selon des normes ISO) des symboles pour représenter les composants technologiques et des lignes pour leur connexion. Les entrées et sorties peuvent représenter des flux d'énergies (des variables de puissance comme débit massique, pression,...) pour les composants technologiques et des flux d'informations pour les capteurs et les correcteurs. Sur la figure 1.1 est donné un exemple d'un P&ID. Les symboles utilisés peuvent être trouvés dans n'importe quel manuel spécialisé.

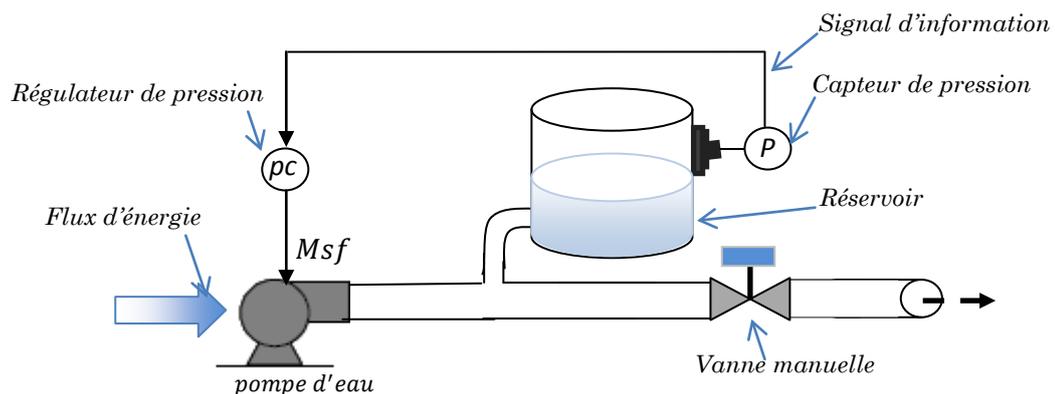


Fig.1.1 Exemple d'un Plan des Instruments Détaillé (P&ID).

- **Définition 5.** tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications.

Il existe une progression dans la sévérité des défauts [1]: naissant, passager, permanent et catastrophique. Les défauts (voir figure 1.2) sont classés selon leur origine en :

- **Défauts capteur :** Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure. On classe ces défauts en fonction de leur type en : biais, dérive, modification du gain de mesure, valeurs aberrantes, blocage du capteur à une valeur atteinte ou à une coupure électrique du capteur.
- **Défauts d'actionneurs :** Ils se traduisent par une incohérence entre les commandes et la sortie (la pompe délivre un débit incohérent avec sa caractéristique hydraulique).
- **Défauts du processus physique :** Ces défaillances sont dues à des modifications de la structure (fuite, rupture d'un organe,...) ou des paramètres du modèle (encrassement d'un tube d'un four, bouchage partielle d'une conduite, ..).
- **Défauts du système (ou de l'algorithme) de commande.** Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la sortie du contrôleur (selon l'algorithme implémenté) et sa mesure.

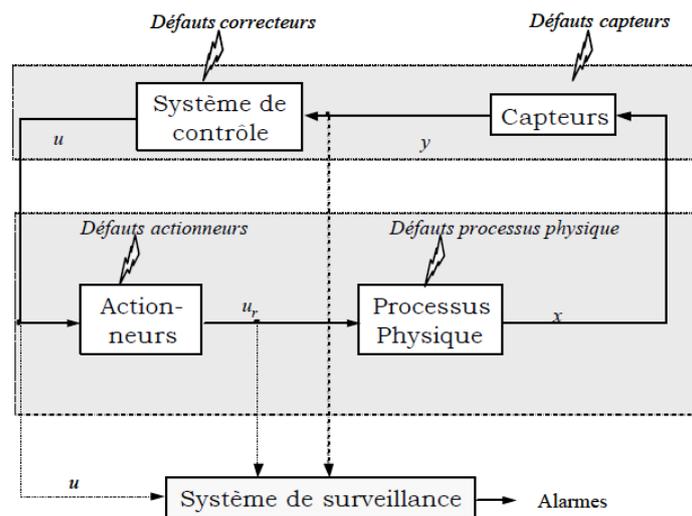


Fig.1.2 Types de défaillances dans un système de diagnostic.

- **Définition 6.** Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans le cahier de charge. Ou ses fonctions requises avec les performances définies dans le cahier de charge [2].
- **Classification des défaillances :** On peut classer les défaillances :
 - Selon leur fonction des causes.
 - Selon leur vitesse d'apparition.
 - Selon leur date d'apparition.
- **Définition 7.** Une panne est une interruption permanente de la capacité du système à réaliser sa fonction requise.
- **Définition 8.** Une erreur est définie comme l'écart entre une valeur mesurée ou estimée d'une variable et une valeur spécifiée par un capteur étalon ou jugée (par un modèle) théoriquement correcte.
- **Définition 9.** Les symptômes sont les traductions d'un changement d'un comportement d'une variable détectée par comparaison à des valeurs de référence.
- **Définition 10.** Les contraintes sont les limitations imposées par la nature (lois physiques) ou l'opérateur.
- **Définition 11.** Un résidu ou indicateur de faute exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle (supposées décrire correctement le processus).
- **Définition 12.** La Perturbation est une entrée inconnue et non contrôlée agissant sur un système [3], [4].

1.1.3 Les systèmes de surveillance dans un processus de supervision

1.1.3.1 Classification des méthodes de surveillance

L'amélioration de la sûreté de fonctionnement repose essentiellement sur la surveillance, qui constitue une interface entre l'installation physique et les opérateurs (hommes ou automatismes). La surveillance fournit des informations sur l'état de fonctionnement (correct, défaillant) des dispositifs surveillés. Elle valide les informations issues des capteurs et localise les dispositifs défaillants. Le système de surveillance constitue une couche particulièrement importante du système d'information des processus de production automatisés sûrs de fonctionnement, comme l'illustre la (figure 1.3)

Les données brutes sont des données connues. Elles sont constituées de variables de commande (issues des automatismes et des opérateurs) et de variables mesurées (issues des capteurs). Les algorithmes de surveillance traitent ces données brutes pour produire des données validées et enrichies. Les données validées sont celles dont la véracité a été "prouvée" par le système - en garantissant le fonctionnement correct d'un capteur, en remplaçant une mesure erronée par une estimation par exemple.

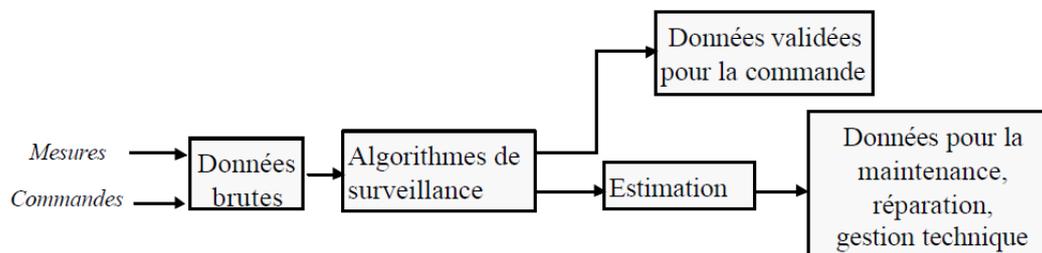


Fig.1.3 Le système de surveillance dans un système de production.

Les algorithmes de surveillances sont tous basés sur le principe de la redondance des sources d'information (figure 1.4). La redondance est obtenue par comparaison des données réelles issues du processus et des données théoriques fournies par un type de modèle (connaissance a priori). La comparaison des données réelles (transmises par les capteurs) et celles théoriques (fournies par une connaissance a priori sur le système) permet de vérifier que l'information obtenue à un instant donné reste conforme à des normes de fonctionnement normal (ou dans des limites fixées de tolérance). Cette étape met obligatoirement en œuvre des banques de données contenant tous les modes de fonctionnement. On distingue deux étapes, une phase de détection de l'alarme et une phase de décision afin d'une part de décider de l'existence ou non de l'alarme et de localiser la défaillance d'autre part.

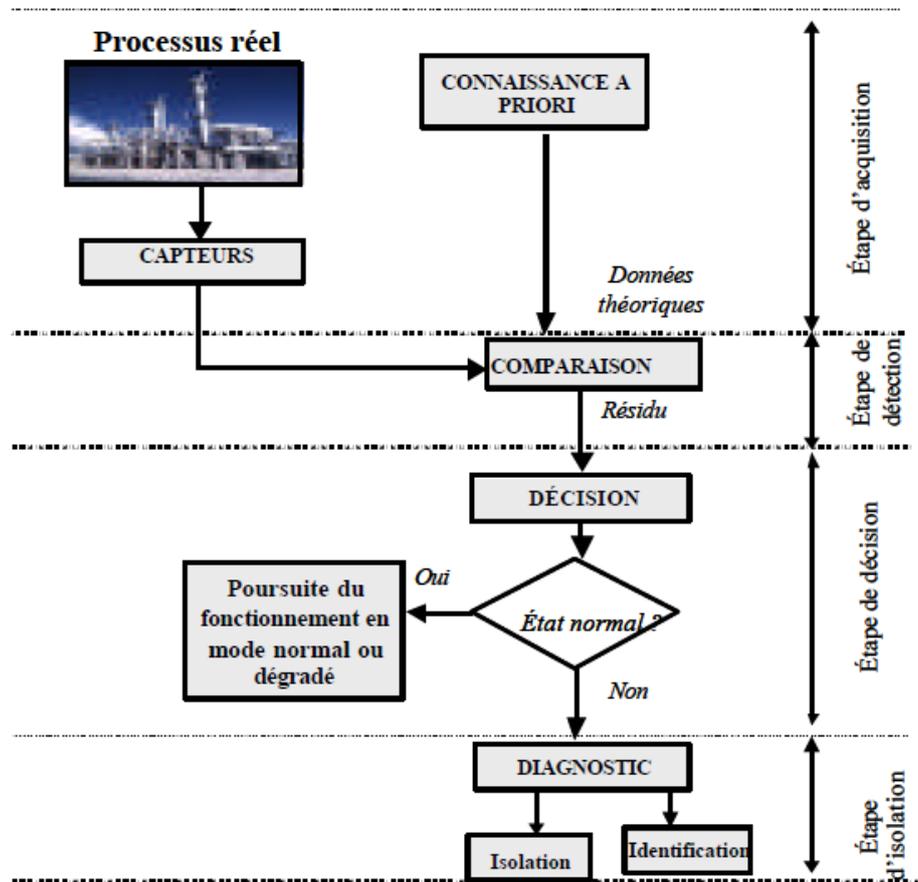


Fig.1.4 Etapes de diagnostic.

- L'acquisition des informations.** Cette opération est destinée à obtenir les informations sur le processus réel à surveiller et celles fournies par la connaissance du système. Elle se réalise à l'aide de capteurs spécialisés.
- Etape de détection.** On surveille le fonctionnement réel en testant la cohérence entre ce modèle et les observations. Si celles-ci ne vérifient pas les équations du modèle, on en déduit que le fonctionnement réel n'est pas le fonctionnement normal. Ces changements sont alors détectés et traduits en termes de symptômes ou d'événements. On produit alors une alarme ou résidu.
- Décision.** La procédure de décision conduit à définir des seuils qui permettent d'accepter avec un risque raisonnable une non-détection ou une fausse alarme. Si le défaut est "tolérable", le système peut continuer à fonctionner. Si le défaut est conditionnellement tolérable (une pompe est défaillante mais il est possible d'utiliser une autre pompe installée en parallèle), alors le système continuera à fonctionner, mais dans un mode dégradé en attendant qu'une maintenance soit effectuée.

d) Etape de diagnostic. Dans cette phase, un (ou plusieurs) modèle(s) de mauvais fonctionnement est (sont) utilisé (s) selon le même principe pour déterminer la (les) défaillance(s) présente(s). C'est l'étape de localisation des défaillances. Cette étape se déclenche quand la comparaison ne correspond pas à un état normal de fonctionnement caractérisé par un état de référence et que la procédure de décision a indiqué que c'est une vraie alarme. Lorsque la faute est localisée, il faut alors identifier les causes précises de cette anomalie. On fait alors appel à des signatures répertoriées par les experts et validées après expertise et réparation des dysfonctionnements. Le système de surveillance produit également un enrichissement de ces données en générant d'autres données, qui caractérisent l'état de fonctionnement du processus (détection, localisation et diagnostic des défaillances), et qui sont utilisées pour la maintenance, la réparation, la gestion technique. Les opérations de maintenance permettent de reconstituer et restaurer les capacités du système de production. Les prestations de maintenance peuvent être systématiques (identifiées et prévues dans le temps), ou aléatoires. Dans ce dernier cas, les méthodes d'optimisation et d'ordonnancement fournissent des outils d'aide aux opérations de maintenance (planification des entretiens, calcul des taux de défaillance etc...) [3], [4].

1.1.3.2 Méthodes de surveillance

Les deux principaux critères de classification des méthodes de surveillance sont le type de connaissance utilisé, et la stratégie de diagnostic. Même si, il faut le souligner, la méthode de diagnostic utilisée dépend fortement du type de modèle, le type de la connaissance a priori sur le système reste le critère principal de classification des méthodes de surveillance. Les méthodes de surveillance sont principalement basées sur deux approches : les méthodes utilisant des modèles opératoires et celles utilisant des modèles de diagnostic. On les classe souvent en méthodes avec ou sans modèle. Une classification globale est donnée par la (figure 1.5).

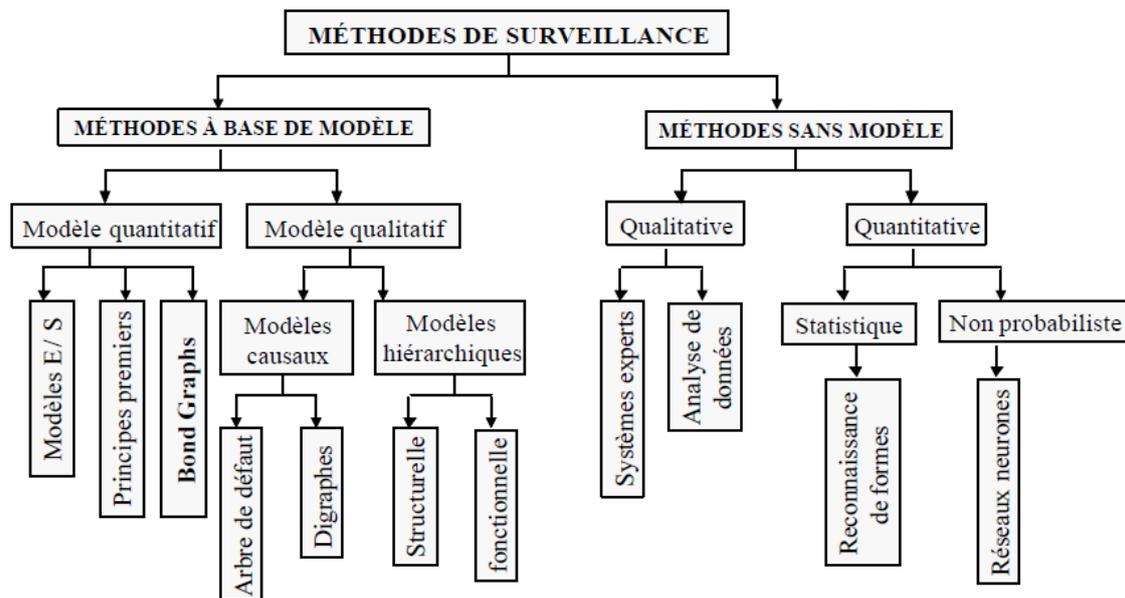


Fig.1.5 Classification des méthodes de surveillance:
Arbre de défaillance.

1.1.3.2.1 Méthodes sans modèle

Décrit par un certain nombre de réalisations, les méthodes sans modèle comme l'indique leur nom, ne disposent pas de modèle opératoire. Autrement dit, on ne dispose pas de modèle décrivant le comportement normal et les comportements défaillants du système. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de formes [5],[6],[7], ou à l'intelligence artificielle[8].

La méthode sans modèle est utilisée dans le cas de systèmes complexes traitant des données très variées (analogique, numérique..) ou imprécises (bruit de mesure). L'objectif de la reconnaissance des formes consiste à classer automatiquement des formes dans des modes (classes) connues a priori. Par conséquent, ces techniques doivent connaître a priori tous les états de fonctionnement (normal et en faute).

La conception d'un système de diagnostic sans modèle se déroule en trois phases :

a) Phase d'analyse. Cette phase consiste à rassembler toutes les informations existantes sur le processus : les données des différents capteurs, les modèles des dispositifs, l'historique, l'expérience accumulée. A partir de cette phase doit sortir une définition précise des paramètres à observer ou qui représentent les modes de fonctionnement. Une suite d'observations du même mode ne se trouve pas en un seul point, mais occupe une zone de l'espace des observations. Il s'agit donc d'associer à chaque forme observée un mode ou une classe. Après avoir représenté

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

les modes par des paramètres significatifs, on essaye d'avoir le maximum de données sur chacun des modes observables; c'est la phase d'apprentissage.

b) Phase de choix d'un système de détection. Les frontières entre les classes sont définies dans cette phase. Un système de décision capable de décider de l'appartenance ou non d'une nouvelle observation à une des classes existantes est créé. De nombreuses solutions servant à définir le système de décision peuvent être retenues [5]. On cite d'une manière non exhaustive les méthodes de discrimination paramétrique avec rejet (supposent la connaissance totale des lois de probabilité régissant les observations et appliquées sous l'hypothèse gaussienne avec estimation des paramètres), les méthodes de discrimination non paramétrique (les lois de probabilité dans chaque classe sont inconnues mais peuvent être estimées par la méthode de Parzen ou celle des plus proches voisins), les méthodes se reposant sur le concept de distance (paramétrique ou non) et les méthodes recherchant les équations de frontières (délicate et largement heuristique).

c) Phase d'exploitation. C'est la phase d'implémentation du système de diagnostic afin de proposer une décision pour toute nouvelle observation effectuée. Le système doit adapter sa règle de décision en fonction des nouvelles classes détectées.

1.1.3.2.2 Méthodes avec modèles

Cette deuxième famille se base sur l'existence de redondance matérielle ou analytique pour caractériser le mode de fonctionnement ou l'état du système. Le principe de redondance consiste à déterminer la valeur des variables par différentes manières et à analyser si les résultats coïncident. La redondance physique consiste à utiliser plusieurs capteurs afin de mesurer la même variable [9], [10], [11]. Ces capteurs indiquent en fonctionnement normal la même valeur aux bruits et imprécisions de mesure près. Une duplication des capteurs est nécessaire pour la détection de pannes simples. Cependant la localisation de la défaillance exige un minimum de trois capteurs, on procédera alors à un vote majoritaire. Cette méthode a été largement utilisée dans l'industrie car elle est facile à appliquer et est très fiable, cependant elle est très lourde et coûteuse. De plus elle n'est pas toujours applicable pour des raisons architecturales et matérielles et son champ d'application est limité aux seules défaillances capteurs. Contrairement à la redondance matérielle, la redondance analytique consiste à trouver des relations entre les variables connues du système (entrées et sorties). Bon nombre de travaux leur sont consacrés, citons les synthèses trouvées dans [2],[12], [13] et le livre pédagogique [4] pour les systèmes linéaires.

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

Dans ce cas, la génération des résidus peut être réalisée par différentes approches :

- ✓ **Approche par estimation de paramètres** (estimation paramétrique).
- ✓ **Approche par estimation de l'état** (observateur).
- ✓ **Approche par espace de parité.**

1.1.3.2.2.1 Modèles hiérarchiques

Dans ce cas, on décrit le processus de diagnostic par une approche fonctionnelle présentée sous forme d'une décomposition structurelle. La modélisation fonctionnelle [14], [15], [16] comme l'indique son nom se base sur la fonction du composant (i.e. stocker pour la fonction d'un réservoir,...). La modélisation téléologique, quant à elle, exprime la finalité du composant (la fonction téléologique d'une chaudière est la production de la vapeur). Cette fonction sert un dessein, un projet, un but. Un réservoir peut avoir plusieurs fonctions téléologiques (en fonction de son utilisation et de l'interprétation de l'opérateur), par contre le type de transformation de l'énergie est indépendante de sa fonction. Cette démarche entraîne une ambiguïté en raison de la subjectivité de la notion de fonction : il existe autant de fonctions que d'opérateurs.

Toutefois quelques travaux [15], [17] associent des fonctions génériques issues des bond-graphs afin de rendre la fonction plus objectives en introduisant les notions d'effort et de flux et les éléments bond graphs (R, C et I). Les modèles externes trouvent aussi un intérêt dans cette approche [18].

1.2 Modélisation structurelle pour le diagnostic des systèmes physiques

1.2.1 Introduction

Des outils performants et génériques permettant d'analyser les systèmes physiques dans toute leur diversité sont nécessaires à la conception de systèmes de diagnostic de défauts. Dans cette section, la représentation structurelle des systèmes est analysée. La représentation structurelle consiste à d'écrire les composants et les flux qui les lient. Ces flux sont généralement représentés par des variables. Nous examinerons différentes modélisations structurelles adoptées par [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25].

1.2.2 Modélisation des systèmes

Etablir un modèle pour le diagnostic est une tâche plus complexe qu'établir un modèle pour commander un système. Il faut représenter les modes de comportements ou de Fonctionnements associés aux contraintes de manière à être capable d'analyser les symptômes engendrés (un test ou une relation de redondance analytique étant une contrainte particulière).

La modélisation d'un système physique se base sur différents niveaux de représentation [26], parmi lesquels : le niveau fonctionnel et comportemental, et le niveau structurel.

1.2.2.1 Modélisation comportementale et fonctionnelle

Le modèle du comportement d'un système Σ peut être défini par un ensemble de relations (contraintes K), définies sur un espace correspondant à un ensemble de variables V . L'ensemble de contraintes K est partitionné en deux sous-ensembles : K_{proc} , qui correspond aux composants du système sans capteurs et actionneurs et K_{obs} , qui correspondent aux capteurs et actionneurs que nous ajoutons au système. En plus de la notion de contraintes, la notion de réalisation doit être introduite : elle permet de tenir compte du fait qu'une relation ne peut pas toujours être utilisée de n'importe quelle façon, en particulier lorsqu'il peut y avoir des problèmes d'inversibilité et plus généralement, certaines variables ne peuvent pas être déduites d'autres pour une contrainte donnée.

1.2.2.2 Modélisation structurelle

Un système automatisé est constitué d'un ensemble de composants qui interagissent entre eux afin de réaliser la (les) tâche(s) pour laquelle (lesquelles) le système a été conçu. Chaque composant peut être décrit par un ensemble de relations (contraintes) algébriques, continues ou discrètes, linéaires ou non linéaires, statiques ou dynamiques qui définissent le comportement attendu des phénomènes liés. Les variables impliquées dans ces contraintes peuvent être classées en deux types :

- Les variables inconnues.
- Les variables connues, soit parce qu'elles sont mesurées, contrôlées ou connues par hypothèses.

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

Le modèle structurel ne considère que les interconnexions entre les contraintes d'écrivant les modes de comportement des composants d'un système. Cela revient à voir un système comme un ensemble de composants interconnectés.

1.2.2.3 Rappel des travaux sur le raisonnement structurel pour le diagnostic de défauts

L'analyse structurelle est un outil puissant et performant qui permet de déterminer de nombreuses propriétés d'un système. Ces propriétés sont obtenues à partir de la seule connaissance de l'existence de liens entre les composants d'un système sans que les modèles de comportement détaillé si soient nécessaires. Ce prétraitement, qui peut être entièrement automatisé, même pour de très grands systèmes, permet par exemple de connaître les conditions structurelles d'observabilité ou de commandabilité [27], [28], les possibilités de détection et de localisation des défauts [29], [20], [23]. Cette analyse structurelle permet aussi de déterminer un placement de capteurs satisfaisant un cahier des charges lié à des critères de diagnosticabilité [22]. Pour toutes les propriétés structurelles étudiées, les conditions obtenues sont nécessaires mais en général non suffisantes car elles sont indépendantes de la valeur réelle des paramètres.

1.2.3 Représentation structurelle des systèmes

Il y a plusieurs méthodes pour représenter structurellement le modèle d'un système. Dans cette section, différentes représentations structurelles des systèmes à diagnostiquer sont présentées.

1.2.3.1 Modélisation par matrice structurelle

Considérons un système Σ . Le modèle du système $\Sigma = (K, V)$ peut-être défini par un ensemble de n contraintes (relations) K , qui lient un ensemble de m variables V .

L'ensemble de variables V est constitué de deux ensembles : l'ensemble de variables connues O et l'ensemble de variables inconnues X .

Nous savons qu'une contrainte ne peut pas être toujours utilisée de n'importe quelle façon car parfois certaines variables ne peuvent pas être déduites des autres variables au moyen de la contrainte. Pour des modèles mathématiques, on parle d'inversibilité. C'est pourquoi, nous allons définir la notion de causalité et la notion de déductibilité (calculabilité).

L'analyse de la causalité dans les systèmes physiques a donné lieu à plusieurs conceptions dont les plus connues ont été proposées par [30]. Iwasaki et Simon

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

déduisent l'ordre causal à partir d'une analyse purement Structurelle d'un modèle comportemental (décrit par un ensemble d'équations).

Avec cette approche, il n'est pas nécessaire de résoudre les équations, contrairement à L'approche proposée par De Kleer et Brown qui consiste à déterminer les chemins de propagation suivis par les perturbations sur les variables en réalisant une propagation de contraintes. La notion de causalité est importante pour la conception des systèmes de diagnostic.

La notion de la causalité étant assimilée à la notion de déductibilité (calculabilité), un ordonnancement causal permet d'orienter les relations entre les variables apparaissant dans les contraintes du système.

Nous allons définir maintenant cette notion de déductibilité (calculabilité) assimilée à la notion de causalité.

Définition 1. Déductibilité (calculabilité)

Soient v_i , $i = 1, \dots, p, \dots, m$ des variables intervenant dans la contrainte kj . La variable v_p est déductible (calculable) si ses valeurs peuvent être déduites à travers la contrainte kj en utilisant les autres variables v_i , $i = 1, \dots, m$ avec $i \neq p$, tel que les valeurs de ces variables sont connues.

Le modèle du système peut être représenté par une matrice structurelle dont les colonnes représentent l'ensemble des variables et les lignes représentent l'ensemble des contraintes du modèle. Dans cette matrice, l'intersection entre chaque colonne et ligne $a(i, j)$ prend une de ces 3 valeurs :

- $a(i, j) = 0$ si le variable v_i n'est pas apparue dans la contrainte kj
- $a(i, j) = 1$ si le variable v_i est déductible pour la contrainte kj
- $a(i, j) = -1$ si le variable v_i n'est pas déductible pour la contrainte kj

Considérons un système de deux bacs présenté dans la figure 1.6.

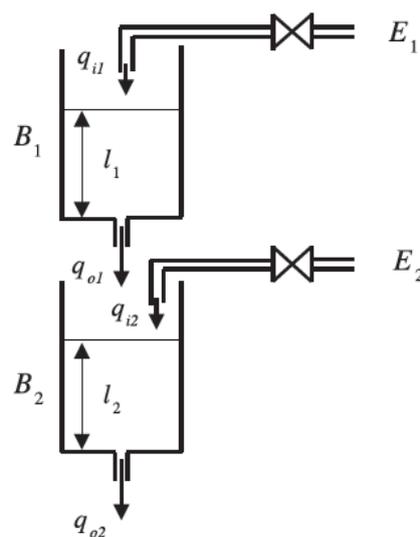


Fig.1.6 Système de deux bacs.

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

Les composants de ce système sont : deux bacs B_1 et B_2 , deux vannes E_1 et E_2 et deux capteurs de hauteur d'eau L_1 et L_2 . Les variables du système sont : les débits d'eau en entrée des bacs q_{i1} et q_{i2} , les débits d'eau en sortie des bacs q_{o1} et q_{o2} et les hauteurs d'eau dans les deux bacs l_1 et l_2 .

Le modèle de comportement MC du système de deux bacs est décrit par quatre contraintes :

$$\begin{aligned}
 k_1 : S \frac{dl_1}{dt} &= q_{i1} - q_{o1} \\
 k_2 : q_{o1} &= k l_1 \\
 k_3 : S \frac{dl_2}{dt} &= q_{i2} + q_{o1} - q_{o2} \\
 k_4 : q_{o2} &= k l_2
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Et le modèle d'observation MO est décrit par les contraintes suivant :

$$\begin{aligned}
 k_5 : l_1 &= \tilde{l}_1 \\
 k_6 : l_2 &= \tilde{l}_2 \\
 k_7 : q_{i1} &= \tilde{q}_{i1} \\
 k_8 : q_{i2} &= \tilde{q}_{i2}
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

Concernant les systèmes comportant des équations différentielles ordinaires, différentes représentations structurelles sont proposées.

Concernant la première représentation structurelle, les contraintes k_1 et k_3 induisent deux contraintes implicites :

$$\begin{aligned}
 k_9 : l_1 &= \int_0^t \frac{dl_1}{dt} \\
 k_{10} : l_2 &= \int_0^t \frac{dl_2}{dt}
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

Les variables connues sont : $(\tilde{l}_1, \tilde{l}_2, \tilde{q}_{i1}, \tilde{q}_{i2})$ et les variables inconnues sont : $(q_{i1}, q_{i2}, l_1, l_2, q_{o1}, q_{o2}, \frac{dl_1}{dt}, \frac{dl_2}{dt})$.

Pour éviter les inconvénients liés à la dérivation, dans les contraintes k_9 et k_{10} , les variables $\frac{dl_1}{dt}$, $\frac{dl_2}{dt}$ ne sont pas considérées comme déductibles (calculables). La première représentation est donnée par la matrice structurelle suivante :

Tab.1.1 La matrice structurelle du système de deux bacs.

	q_{i1}	q_{o1}	q_{i2}	q_{o2}	l_1	$\frac{dl_1}{dt}$	l_2	$\frac{dl_2}{dt}$	\tilde{q}_{i1}	\tilde{q}_{i2}	\tilde{l}_1	\tilde{l}_2
k_1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
k_2	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
k_3	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
k_4	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
k_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
k_6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
k_7	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
k_8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
k_9	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
k_{10}	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0

Dans les contraintes k_9 et k_{10} , seulement les variables l_1 et l_2 sont considérées comme déductibles afin d'éviter les dérivations qui amplifient les bruits de haute fréquence. Cette représentation est utilisée pour le diagnostic dans [23].

Concernant la deuxième représentation structurelle du système, les contraintes implicites k_9 et k_{10} ne sont pas présentés et les variables inconnues sont : $(q_{i1}, q_{i2}, l_1, l_2, q_{o1}, q_{o2})$.

Dans ce cas, les variable (q_{i1}, q_{o1}) dans la contrainte k_1 et les variables (q_{i2}, q_{o1}, q_{o2}) dans la contrainte k_3 ne sont pas calculables afin d'éviter les dérivations qui amplifient les bruits hautes fréquences. Cette représentation est donnée par la matrice structurelle suivante :

Tab.1.2 La matrice structurelle du système de deux bacs sans les contraintes k_9 et k_{10} .

	q_{i1}	q_{o1}	q_{i2}	q_{o2}	l_1	l_2	\tilde{q}_{i1}	\tilde{q}_{i2}	\tilde{l}_1	\tilde{l}_2
k_1	-1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0
k_2	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
k_3	0	-1	-1	-1	0	1	0	0	0	0
k_4	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
k_5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
k_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
k_7	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
k_8	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0

1.2.3.2 Représentation structurelle par graphe

Dans de nombreux domaines de la science, l'utilisateur est amené à traduire un problème par des graphes avec des nœuds représentant des individus, des objets et avec des arcs orientés ou non, reliant les nœuds et symbolisant une relation entre eux. Ces graphes sont utilisés dans différentes applications telles que les réseaux de communication, les circuits électriques, les réseaux de Petri, etc. La théorie des graphes a énormément progressé et a été utilisée pour représenter les structures d'une grande variété de problèmes pratiques. Les types de graphes utilisés pour représenter les problèmes sont nombreux : graphe linéaire, graphe fonctionnel, réseau de Pétri, graphe orienté (digraphe), graphe biparti, etc.

1.2.3.2.1 Représentation structurelle par digraphe associé à la représentation d'état

En donnant une orientation aux arêtes d'un graphe, on obtient un digraphe (ou graphe orienté). Un digraphe est défini par deux ensembles : un ensemble d'éléments appelés "sommets" et un ensemble d'éléments appelés "arcs". Dans ce paragraphe, nous présentons une utilisation d'un digraphe pour représenter un système donné par des équations d'état [23]. Supposons un système représenté par les équations suivantes :

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

$$\begin{aligned}\frac{dx_i(t)}{dt} &= g(x(t), u(t), \Theta) \\ y(t) &= h(x(t), u(t), \Theta)\end{aligned}\tag{1.4}$$

Tel que $x(t)$ représente l'état du système, $u(t)$ les entrées du système, $y(t)$ les sorties du système et Θ un vecteur de paramètres.

L'ensemble de variables et contraintes de ce système sont :

$$\begin{aligned}V &= \{x, u, y\} \\ K &= \{g, h\}\end{aligned}\tag{1.5}$$

Où g représente l'ensemble des contraintes différentielles :

$$\begin{aligned}\frac{dx_i(t)}{dt} = g(x(t), u(t), \Theta) = 0, i = 1 \dots, n \text{ et } h \text{ l'ensemble des contraintes de mesure :} \\ y(t) = h(x(t), u(t), \Theta) = 0, j = 1 \dots, n.\end{aligned}$$

Le comportement de ce système peut être représenté structurellement par un graphe orienté [23].

En effet, le digraphe lié avec le système représenté par les équations 1.4 est un graphe dont les sommets sont les variables d'entrée, sortie et d'état, et dont les arcs sont définis par les règles suivantes :

- Il existe un arc du sommet x_k (respectivement du sommet u_l) au sommet x_i si et seulement si la variable d'état x_k (respectivement la variable d'entrée u_l) apparaît dans la fonction g_i (c'est à dire $\frac{dg_i}{dg_k}$ respectivement $\frac{dg_i}{du_l}$ est non nul).
- Il existe un arc du sommet x_k au sommet y_j si et seulement si la variable d'état x_k apparaît dans la fonction h_j .

En effet, un arc du sommet x_k (respectivement u_l) vers le sommet x_i signifie que l'évolution de la dérivée de $x_i(t)$ dépend de l'évolution de $x_k(t)$ (respectivement $u_l(t)$). De la même manière, un arc du sommet x_k au sommet y_j signifie que l'évolution de la sortie $x_i(t)$ dépend de l'évolution de la variable d'état $x_k(t)$.

Considérons le système linéaire suivant :

$$\begin{aligned}\frac{dx_i(t)}{dt} &= A x(t) + B u(t) \\ y(t) &= C x(t)\end{aligned}$$

Tel que les matrices A , et C sont données par :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a \\ 0 & 0 & b \\ c & d & e \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f \end{bmatrix}, C = [p \ 0 \ 0]$$

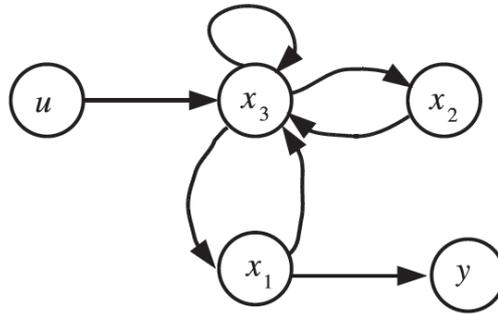


Fig.1.7 Digraphe du système linéaire.

Leurs structures sont :

$$S_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, S_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, S_C = [1 \ 0 \ 0].$$

Le digraphe associé au système est donné par la figure 1.7 ou $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$

Reprenons l'exemple de deux bacs et supposant que les variables d'état sont : (l_1, l_2) , les variables d'entrée sont : $\tilde{q}_{i1}, \tilde{q}_{i2}$ et les variables de sortie sont : $(\tilde{l}_1, \tilde{l}_2)$. En remplaçant les contraintes k_2 et k_4 dans les contraintes k_1 et k_3 et en remplaçant les variables q_{i1}, q_{i2} par leurs mesures, nous obtenons les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{dl_1}{dt} &= \frac{1}{s} \tilde{q}_{i1} - \frac{K}{s} l_1 \\ \frac{dl_2}{dt} &= \frac{1}{s} \tilde{q}_{i2} - \frac{K}{s} l_2 \end{aligned} \tag{1.6}$$

Nous pouvons déduire la représentation d'état suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{k}{s} & 0 \\ \frac{k}{s} & -\frac{k}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{q}_{i1} \\ \tilde{q}_{i2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{l}_1 \\ \tilde{l}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}$$

Leurs structures sont :

$$S_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, S_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, S_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Le digraphe associé avec le système est donné par la figure 1.8.

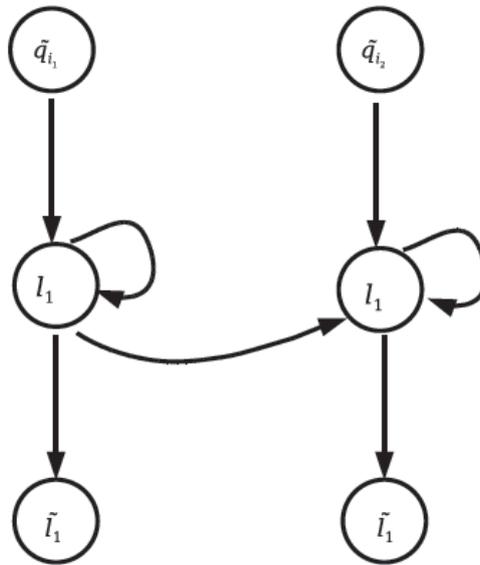


Fig.1.8 Digraphe de deux bacs.

1.2.3.2 Représentation structurelle par graphe biparti

Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser à la représentation structurelle des problèmes à l'aide de graphes bipartis [23]. Cette représentation est un formalisme graphique très intéressant. Elle met en évidence de nombreuses propriétés difficilement observables avec d'autres représentations. Ce paragraphe introduit la modélisation structurelle d'un système par graphe biparti. Un graphe biparti est un graphe dont l'ensemble de nœuds est divisé en deux sous-ensembles tel que chaque arc de ce graphe relie un nœud du premier ensemble à un nœud de l'autre ensemble. Un graphe biparti peut être un digraphe et un digraphe est généralement un graphe biparti en diagnostic. En ce qui concerne le digraphe, les nœuds représentent les variables du système et les arcs représentent les équations d'états (contraintes). Ce digraphe peut être représenté comme graphe biparti en considérant que les variables et les contraintes sont les nœuds.

Le modèle d'un système $\Sigma = (K, V)$ peut être défini par un ensemble de n contraintes K , qui relient un ensemble de m variables V . L'ensemble des variables V est constitué de deux sous-ensembles: l'ensemble de variables connues O et l'ensemble de variables inconnues X , $V = X \cup O$. La structure d'un modèle peut être représentée par un graphe biparti $G = (K, V, A)$, où A est un ensemble d'arcs tel que $a(i, j) \in A$ si et seulement si la variable $v_j \in V$ apparaît dans la contrainte $k_i \in K$. Le graphe biparti associé à un système $\Sigma = (K, V)$ est un graphe non orienté avec deux ensembles de sommets K et V et un ensemble d'arcs défini par la règle suivante :

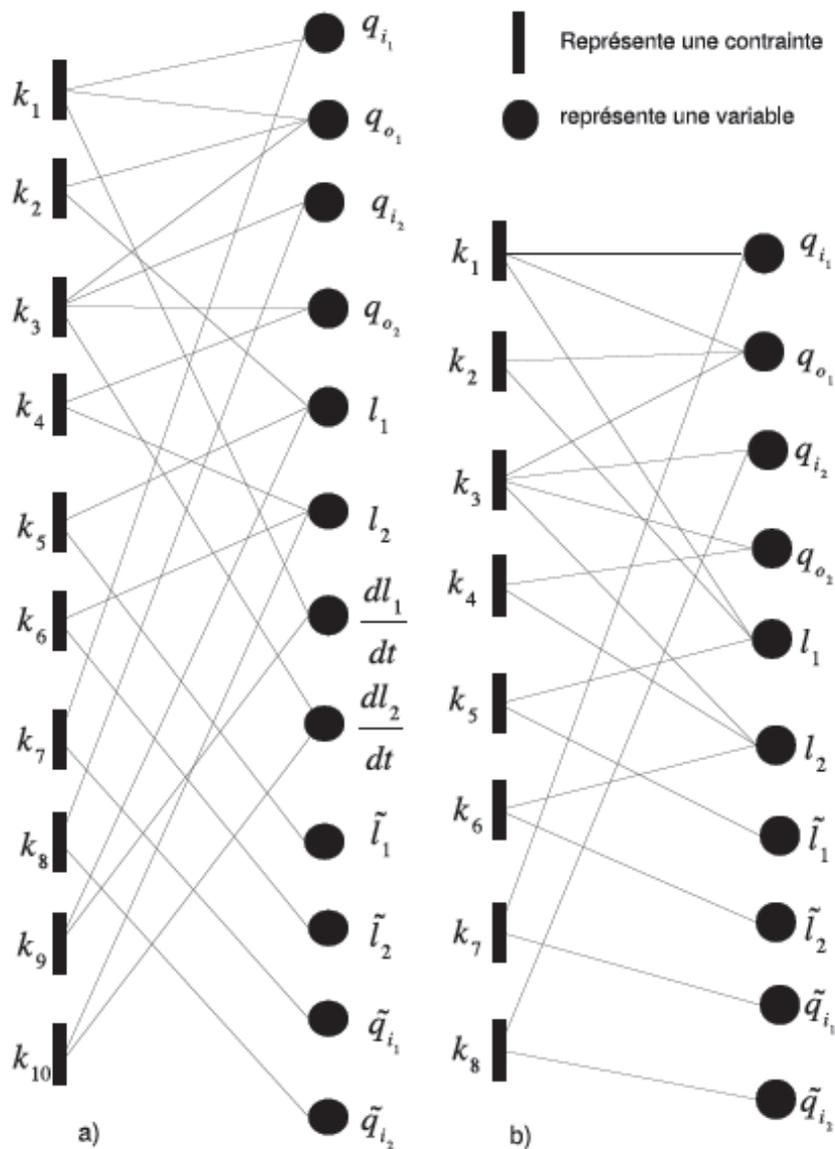


Fig.1.9 Graph biparti du système de deux bacs.

Un arc existe entre le sommet $k_i \in K$ et le sommet $v_i \in V$ si et seulement si le variable v_i apparaît dans la contrainte k_i . La matrice d'incidence M correspondant à un graphe biparti $G = (K, V, A)$ est une matrice booléenne où les lignes correspondent aux contraintes et les colonnes correspondent aux variables et $M = \{m_{ij} | m_{ij} = 1 \text{ si } v_j \text{ apparaît dans } k_i, \text{ autrement } \}$. Reprenons l'exemple de deux bacs. Nous allons représenter le graphe biparti correspondant à cet exemple avec ou sans les contraintes implicites. Le graphe biparti correspondant à la représentation avec contraintes implicites est représenté par la figure 1.9.a, tandis que le graphe biparti correspondant à la représentation sans contraintes implicites est représenté par la figure 1.9.b.

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

Le modèle structurel d'un système est une abstraction de son modèle de comportement. Deux systèmes sont équivalents structurellement s'ils ont la même structure.

L'analyse structurelle se sert de la structure d'un système pour étudier ses propriétés. Plusieurs outils spécifiques ont été développés dans ce but.

Couplage. La notion de couplage est centrale dans les approches liées au diagnostic exploitant les graphes bipartis.

Pour introduire la notion de couplage, supposons que dans un ensemble de Q hommes et N femmes, on désire créer des couples en tenant compte des préférences de chacun.

Dans un premier temps, nous construisons une table de deux colonnes avec les noms des hommes dans l'une, ceux des femmes dans l'autre. Nous relient les noms de l'une des colonnes à ceux de l'autre selon les préférences des personnes. Nous obtenons alors un graphe biparti $G(Y,Z,A)$ où Y est l'ensemble des hommes et Z l'ensemble des femmes et A est l'ensemble des arcs reliant Y et Z .

Supposons que le nombre $q = \text{card}(Y)$ d'éléments de Y est inférieur ou égal au nombre $n = \text{card}(Z)$ d'éléments de Z . Trouver un couplage de Y dans Z consiste à trouver un sous-ensemble d'arcs deux à deux non adjacents (sans extrémités communes).

Tous les sommets de Y sont ainsi associés à un arc unique. Les sommets de Z sont associés à un arc au plus. Le couplage obtenu est alors maximal.

Définition 1. (Couplage)

Soit un graphe biparti $G(K, X, A)$ où K est un ensemble des contraintes du système. X est l'ensemble des variables $X \subset V$ et A est l'ensemble des arcs liant K à X . Un couplage M dans $G(K, X, A)$ est un ensemble d'arcs tel qu'il n'y pas un couple d'arcs dans M qui ont un sommet commun.

Définition 2. (Couplage maximal)

Soit un graphe biparti $G(K, X, A)$. Un couplage maximal est un couplage M tel que aucun arc ne peut être ajouté sans violer la propriété selon laquelle deux arcs ne doivent pas avoir de sommet commun.

Définition 3. (Couplage complet)

Soit un graphe biparti $G(K, X, A)$. Un couplage M dans ce graphe est dit complet par rapport à K si $|M| = |K|$ (respectivement un couplage est dit complet par rapport à X si $|M| = |X|$).

En général, différents couplages peuvent être trouvés dans un graphe biparti. Par exemple, dans la figure 1.9.b, plusieurs couplages peuvent être trouvés dans le graphe biparti $G(K, X, A)$. Deux d'entre eux sont illustrés dans la figure 1.10.a et 1.10.b. Nous remarquons que ces deux couplages présentés sont complets par rapport aux variables inconnues X [23].

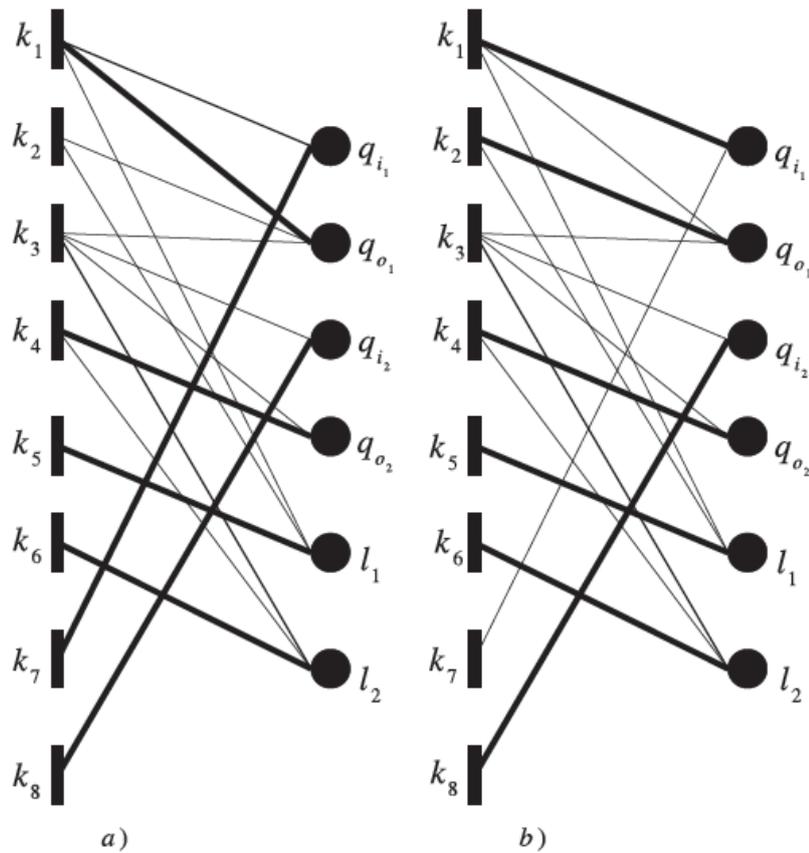


Fig.1.10 Deux couplages possibles pour le système de deux bacs.

- **Graphe biparti orienté associé avec un couplage**

Définir un couplage dans un graphe biparti $G (K, X, A)$ impose quelques orientations. Le graphe biparti devient alors être orienté. Le problème d'orientation ne s'applique pas aux contraintes mais juste aux variables. Par exemple, reprenons la contrainte suivante du système de deux bacs avec les contraintes implicites (première représentation, voir tableau 1.1) :

$$k_1 : S \frac{dl_1}{dt} = q_{i1} - q_{o1} \quad (1.7)$$

Les trois variables $(\frac{dl_1}{dt}, q_{i1}, q_{o1})$ sont considérées comme déductibles, alors la contrainte k_1 peut être utilisée pour calculer chacune de ces trois variables quand les deux autres variables sont connues ou déduites. Une fois un couplage choisi, nous remarquons que chaque contrainte couplée est maintenant liée avec une variable couplée et plusieurs variables non couplées.

Puisque quelques contraintes ne pourraient pas être couplées, les règles suivantes sont appliquées :

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

- Une contrainte est dite couplée si les arcs liés à cette contrainte sont équipés d'orientation :
 - o des variables non couplées (entrées) à la contrainte
 - o de la contrainte à la variable couplée (sortie)
- Une contrainte est dite non couplée si toutes les variables sont considérées comme entrées, c'est-à-dire cette contrainte ne sera pas utilisée pour déduire une variable et par conséquent, tous les arcs sont orientés des variables à la contrainte.

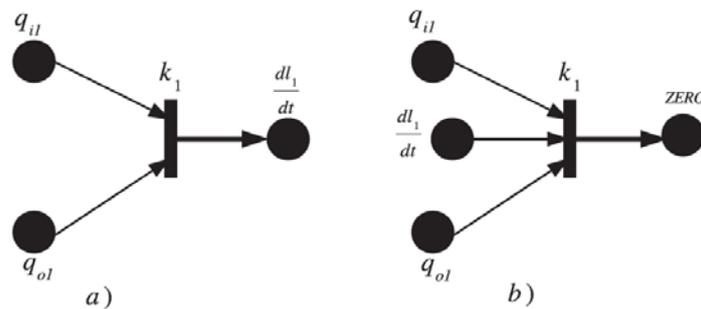


Fig.1.11 – a) une contrainte couplée b) une contrainte non couplée.

La figure 1.11 représente une contrainte couplée et une autre non couplée : Dans la figure 1.11.a, nous remarquons que la contrainte k_1 est couplée avec la variable $\frac{dl_1}{dt}$, c'est-à-dire, la variable $\frac{dl_1}{dt}$ sera déduite des variables q_{i1} et q_{i2} en utilisant la Contrainte k_1 . Dans la figure 1.11.b, nous remarquons que la contrainte k_1 n'est couplée avec aucune variable, c'est-à-dire cette contrainte ne sera pas utilisée pour déduire une de ces variables.

Pour bien comprendre l'intérêt de ces règles, considérons un couplage M et un arc (k, x) où k est une contrainte et x est une variable inconnue. La variable x peut être considérée comme une sortie de la contrainte k tandis que les autres variables dans k sont les entrées. Le couplage représente une certaine tâche de causalité par laquelle la contrainte k est utilisée pour calculer la variable x en supposant que les autres variables sont connues. La causalité est dépeinte en orientant tous les arcs (k_i, x_j) du graphe biparti $G(K, X, A)$ de la façon suivante :

- si k_i et x_i sont couplés, $k_i \rightarrow v_i$
- sinon $v_i \rightarrow k_i$

Reprenons le graphe biparti représenté dans la figure 1.9.a et choisissons un couplage représenté par la figure 1.12. Le graphe orienté associé avec ce couplage est représenté dans la figure 1.13. Dans cette figure, nous remarquons que les contraintes (k_5, k_6, k_7, k_8) sont utilisées pour déduire les variables $(q_{i1}, q_{i2}, l_1, l_2)$ des observations $(\tilde{l}_1, \tilde{l}_2, \tilde{q}_{i1}, \tilde{q}_{i2})$. Ces variables déduites permettent de déduire les autres variables du système. Nous remarquons aussi que les contraintes (k_9, k_{10})

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

sont des contraintes non couplées c'est-à-dire qu'elles ne seront pas utilisées pour déduire des variables, c'est pourquoi elles sont liées au zéro [23].

– Interprétation causale

Le but de ce paragraphe est de discuter de l'interprétation causale du graphe biparti orienté lié avec un couplage. En effet, sélectionner une paire (k, x) pour appartenir à un couplage, implique que la variable x doit être déductible dans la contrainte k .

Cependant si la déductibilité n'est pas systématique, tous les arcs (k, x) ne peuvent pas intervenir dans un couplage. Une situation évidente dans laquelle (k, x) ne peut pas être couplé est quand k est non inversible en ce qui concerne x (x est une variable non déductible dans k). Reprenons la contrainte suivante du système de deux bacs sans les contraintes implicites (deuxième représentation, voir figure 1.12) [23].

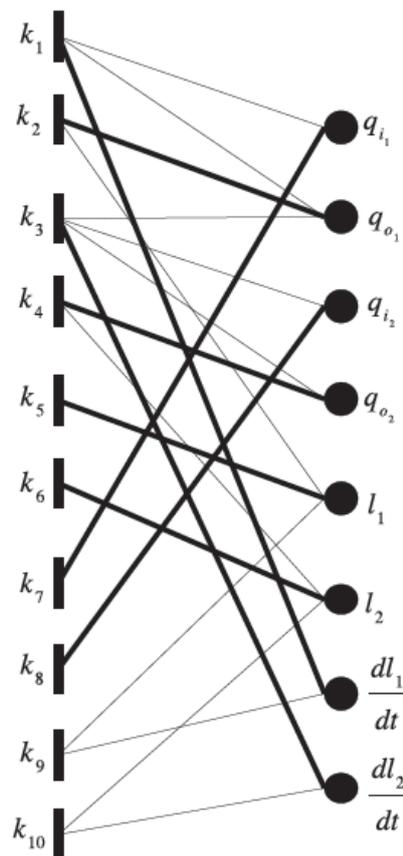


Fig.1.12 Un couplage.

$$k_1 : S \frac{dl_1}{dt} = q_{i1} - q_{o1} \quad (1.8)$$

Dans cette contrainte, la variable $k_1 : l_1 = \int_0^t \frac{1}{S} \frac{dl_1}{dt} (q_{i1} - q_{o1})$ peut être calculée en supposant que les variables (q_{i1}, q_{o1}) sont connues c'est-à-dire la variable l_1 peut être couplée avec la contrainte k_1 . Par contre la variable q_{i1} ne peut pas être déduite en supposant que les variables q_{o1} et l_1 sont connues pour éviter les dérivations qui amplifient les bruits hautes fréquences. De la même façon, la variable q_{o1} ne peut pas être déduite en supposant que les variables q_{i1} et l_1 . Par conséquent, les variables q_{i1} et q_{o1} ne peuvent jamais être couplées avec la contrainte k_1 . La figure 1.14 représente les couplages possibles et impossibles.

Décomposition de Dulmage-Mendelsohn

La décomposition de Dulmage- Mendelsohn notée décomposition DM est un outil intéressant pour l'analyse structurelle des systèmes à diagnostiquer. La décomposition DM peut être obtenue en appliquant des algorithmes classiques de la théorie des graphes [31].

Ceux-ci consistent à permuter les colonnes et les lignes de la matrice d'incidence représentant le graphe afin d'obtenir une représentation bloc triangulaire inférieur.

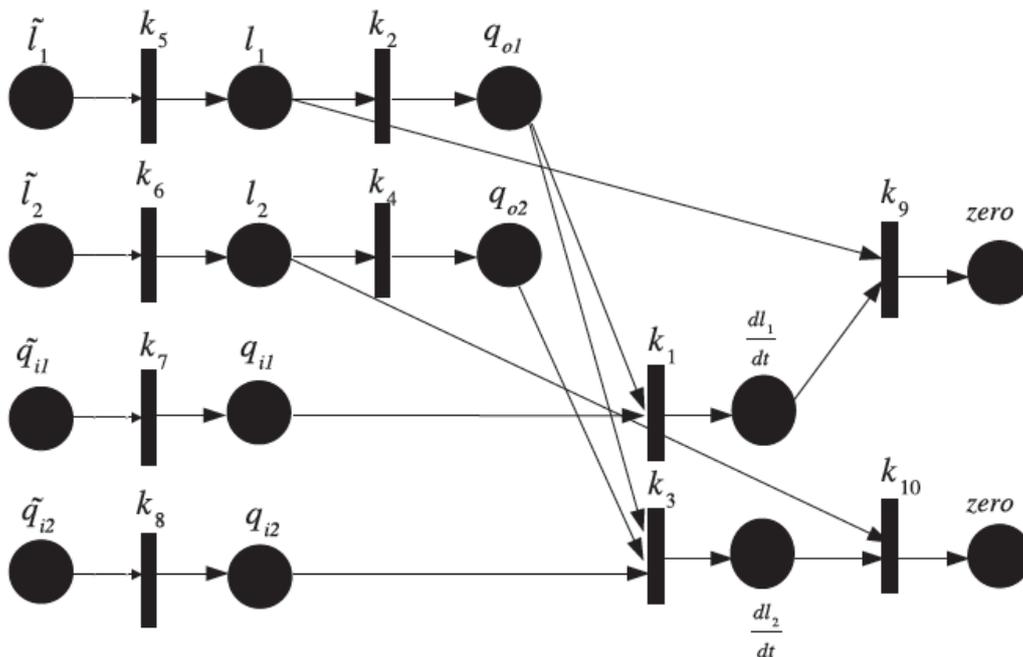


Fig.1.13 Graphe biparti orienté associé avec le couplage.

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

Quelques définitions sont proposées pour illustrer la base de la décomposition DM.

Définition 4. *Grappe surdétermine ou (sur-contraint)*

Un graphe biparti $G(K, X, A)$ est nommé surdétermine ou (sur-contraint) si il existe un couplage complet par rapport aux variables X et non par rapport aux contraintes K .

Définition 5. *Grappe juste-détermine ou (juste-contraint)*

Un graphe biparti $G(K, X, A)$ est nommé juste-déterminé ou (juste-contraint) si il existe un couplage complet par rapport aux variables X et aux contraintes K .

Définition 6. *Grappe sous-déterminé ou (sous-contraint)*

Un graphe biparti $G(K, X, A)$ est nommé sous-déterminé ou (sous-contraint) si il existe un couplage complet par rapport aux contraintes K et non par rapport aux variables X .

Une décomposition Dulmage-Mendelshon d'un graphe biparti $G = (K, X, A)$ conduit à trois composants canoniques nommés K^+ , K^0 , K^- (voir la figure 1.15) :

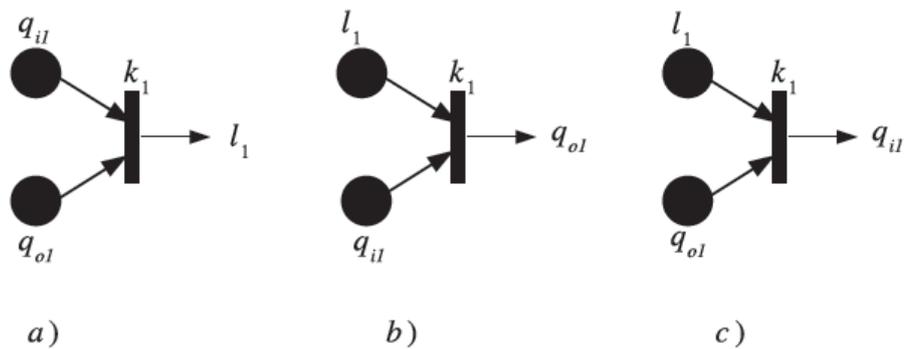


Fig.1.14 – a) Un couplage possible, b) Un couplage impossible et c) Un autre couplage impossible.

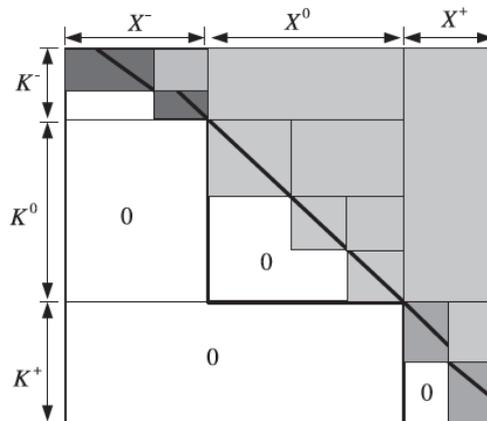


Fig.1.15 Décomposition Dulmage-Mendelshon d'une représentation structurelle.

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

Dans cette figure, nous remarquons qu'il y a trois sous-systèmes :

$$S^+ = (K^+, X^+).$$

$$S^0 = (K^0, X^+ \cup X^0).$$

$$S^- = (K^-, X^+ \cup X^0 \cup X^-).$$

Tel que :

- (K^+, K^0, K^-) est la partition des contraintes du système K .
- (X^+, X^0, X^-) est la partition des variables inconnues du système X .
- (K^+, X^+) surdéterminé ou (sur-contraint).
- (K^0, X^0) juste-déterminé ou (juste-contraint).
- (K^-, X^-) sous-déterminé ou (sous-contraint).

Tab.1.3 Exemple d'une matrice structurelle.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
k_1	1	0	0	0	0	1
k_2	0	1	0	0	0	1
k_3	0	0	1	1	1	1
k_4	1	0	0	1	0	0
k_5	0	1	0	0	1	0
k_6	0	0	1	0	0	1
k_7	1	0	0	0	0	1

- S^+ est nommé un bloc surdéterminé. Il est caractérisé par $|K^+| > |X^+|$. Dans S^+ , il peut y avoir plusieurs sous blocs surdéterminés ou juste-déterminés (pas de sous-blocs sous-déterminés). Mais au moins un sous-bloc surdéterminé doit exister sinon S^+ sera juste-déterminé.
- S^0 est nommé un bloc juste-déterminé. Il est caractérisé par $|K^0| = |X^0|$. Dans S^0 , il peut avoir plusieurs sous-blocs juste-déterminés (pas de sous-bloc sous-déterminés ou surdéterminés).
- S^- est nommé un sous-ensemble sous-déterminé. Il est caractérisé par $|X^-| > |K^-|$. Dans S^- , il peut avoir plusieurs sous-ensembles sous déterminés (pas de sous-ensembles juste-déterminés ou sur -déterminés).

Cette décomposition représente un outil très important pour la conception des sous-systèmes testables **SSTs** et pour la conception des placements de capteurs. Considérons un système représenté par la matrice structurelle du tableau 1.3.

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

Ce système contient six sous-blocs, un sous-bloc surdéterminés ($\{k_3, k_5\}$, $\{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$) et quatre sous-blocs juste-déterminés ($\{k_4\}$, $\{x_1, x_4\}$, $\{k_6\}$, $\{x_3, x_6\}$), ($\{k_2\}$, $\{x_2, x_6\}$), ($\{k_1\}$), $\{x_1, x_6\}$) et ($\{k_7\}$, $\{x_6\}$). Le décomposition DM est présenté dans la matrice structurelle du tableau 1.4.

Tab.1.4 Décomposition Dulmage-Mendelsohn.

	x_5	x_4	x_3	x_2	x_1	x_6
k_1	1	1	1	0	0	1
k_2	1	0	0	1	0	0
k_3	0	1	0	0	1	0
k_4	0	0	1	0	0	1
k_5	0	0	0	1	0	1
k_6	0	0	0	0	1	1
k_7	0	0	0	0	0	1

1.2.3.2.3 Représentation structurelle par bond graph (graphe de liaison ou graphe à liens)

Le bond graph (BG) est un outil de modélisation graphique qui peut être appliqué à tous les domaines des sciences. Il s'agit d'une approche structurelle de la modélisation des systèmes. L'outil bond-graph (ou graphe de liaison), défini par [32] et [33], est considéré comme intermédiaire entre le système physique et les équations mathématiques d'écrivant le comportement de ce système.

L'approche bond graph [34], est basée essentiellement sur la caractérisation des phénomènes d'échange d'énergie au sein de système.

L'énergie est un concept important pour d'écrire l'évolution des systèmes technologiques. La méthodologie bond graph permet de traiter les chaînes d'énergie et d'information et elle peut être appliquée sur tous les systèmes dans tous les domaines (linéaire, non linéaire, continue, discrète, numérique, électronique, mécanique, hydraulique...). La démarche se décompose en plusieurs étapes :

- la première étape consiste à étudier l'architecture du système, soit l'interconnexion des composants, soit le couplage des phénomènes physiques retenus, et à la reproduire graphiquement avec un langage unique pour tous les domaines de la physique.

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

- la deuxième étape consiste à d'écrire les lois consécutives des composants ou des phénomènes, linéaires ou non linéaires. Pour cela la notion de causalité est un atout majeur de cette technique.

Le bond graph obtenu peut facilement évoluer en ajoutant simplement d'autres éléments bond-graph, sans recommencer la démarche du début. De plus, grâce à son caractère graphique et à sa structure causale, le modèle bond-graph représente un excellent outil pour analyser structurellement un système.

La modélisation par bond graph des systèmes à structure rigide (mécanique, électrique) a connu d'importants développements. Par contre, la modélisation des systèmes en génie énergétique restent encore un domaine ouvert en raison de la complexité de ces phénomènes. Ce sont pourtant ces types de processus, présents dans le monde industriel à grand risque qui nécessitent, pour leur contrôle, des modèles de plus en plus précis et exploitables [34].

Le bond graph est un graphe orienté qui fait apparaître des variables dynamiques, qui traduisent des transferts de puissance entre systèmes. Considérons le système mécanique représenté dans la figure 1.16. Dans ce système, il y a une liaison physique entre les deux éléments A et B par l'intermédiaire d'une barre. Dans ce système il y a conservation de l'énergie et continuité de puissance.

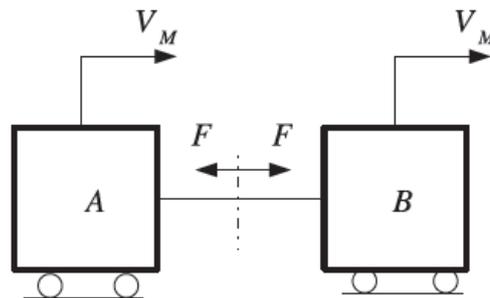


Fig.1.16 Système mécanique.

Le flux d'énergie entre A et B est représenté par un lien de puissance,



caractérisée par le symbole suivant : qui correspond au lien du bond graph. La puissance échangée entre A et B est donnée par $P = F_M V_M$ où l'action d'une force F_M représente l'effort et la vitesse V_M représente le flux. Le schéma physique de la figure 1.16 est traduit par la figure 1.17.



Fig.1.17 Transfert de puissance.

Chapitre 1. Surveillance et modélisation structurelle des systèmes industriels

Après avoir défini le transfert de puissance, nous montrerons le bond graph du système de deux bacs qui est plus compliqué que le système présenté par la figure 1.16. Le bond graph correspondant à ce système est représenté par la figure 1.18. Cette représentation structurelle a été utilisée dans [18] pour la détection et la localisation de défauts et dans [22] pour trouver le placement de capteurs.

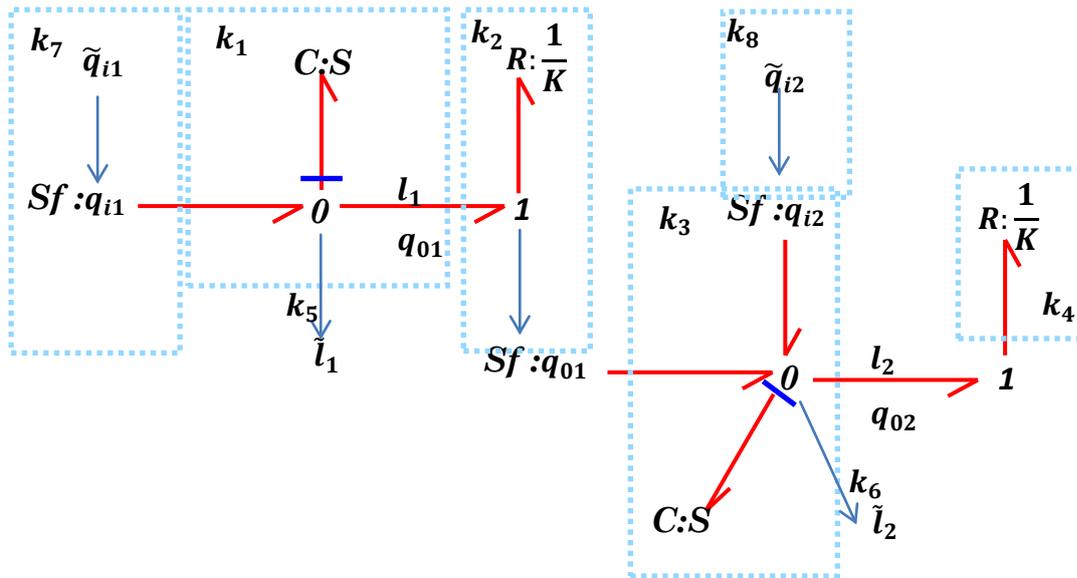


Fig.1.18 Modèle bond graph du système de deux bacs.

La méthodologie de la modélisation par bond graph avec les différentes étapes est représentée dans la figure 1.19.

- Avantages de la modélisation structurelle par l'outil bond graph

L'outil bond graph, à vocation pluridisciplinaire apparaît alors très bien adapté pour la connaissance de systèmes en génie des procédés. Ce langage, bien que différent de celui utilisé par les experts des domaines qu'il recouvre, répond particulièrement bien à ces besoins par les caractéristiques suivantes :

- Une approche énergétique qui permet une décomposition du système étudié en sous-systèmes échangeant de la puissance, et qui structure la procédure de modélisation.
- Une terminologie unifiée pour tous les domaines physiques, fondée sur la notion d'analogie entre phénomènes.

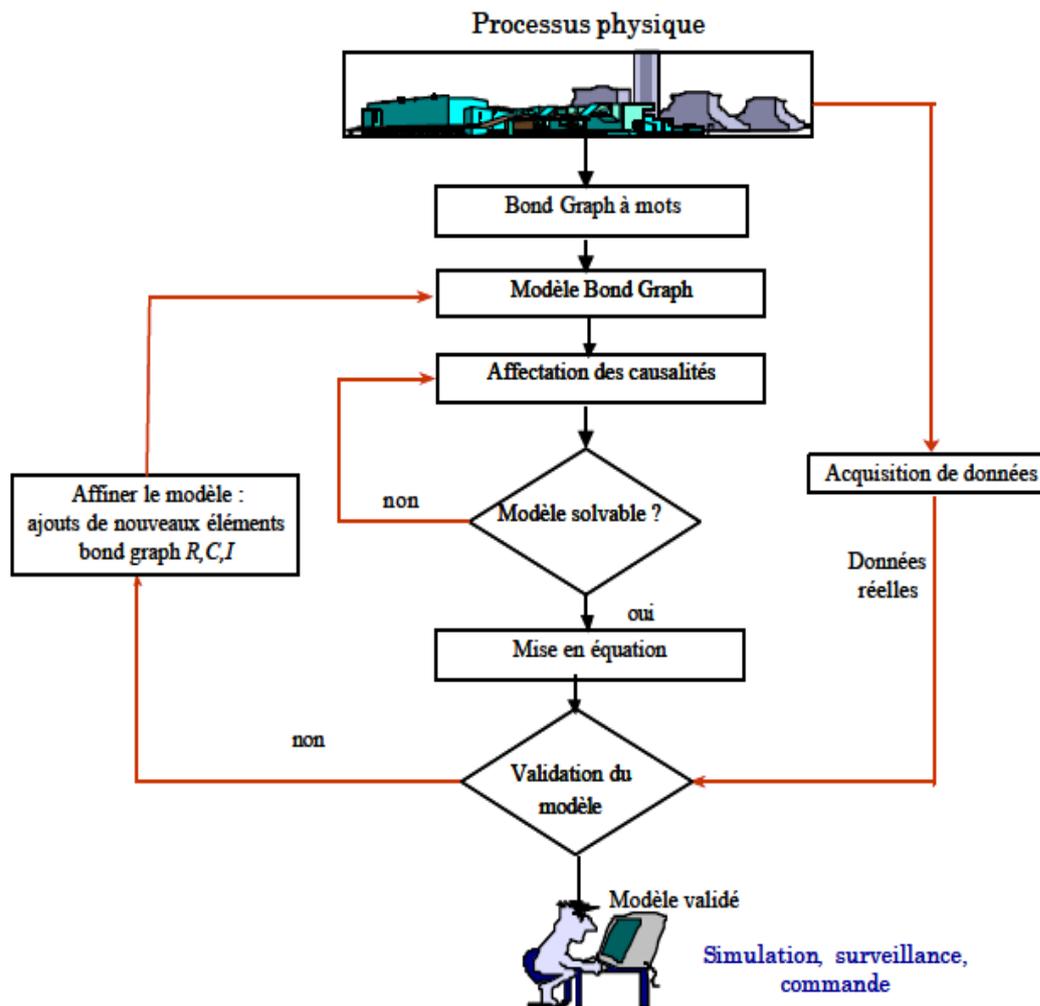


Fig.1.19 Étapes de modélisation par bond graph.

- Une représentation graphique pour visualiser les transferts de puissance, mais aussi de causalité.
- Une souplesse inhérente qui permet de faire évoluer le modèle en ajoutant des phénomènes négligés.
- Une écriture systématique des équations mathématiques issues du modèle bond graph sous forme d'équations différentielles ou algèbro-différentielles.
- Un support pour une analyse structurelle des propriétés du modèle et plus particulièrement pour la surveillance des processus qui sera présenté dans le chapitre suivant [34].

1.3 Conclusion

L'objectif de la première section de ce chapitre de donner un aperçu des techniques habituellement utilisées pour résoudre des problématiques de surveillance.

La surveillance d'un système se fait au travers de deux fonctions de base : la détection et le diagnostic des défaillances. La détection des défaillances a pour rôle de signaler toute situation autre qu'une situation nominale. En d'autres termes, tout ce qui n'est pas normal doit être classé comme anormal.

C'est alors que la fonction diagnostic doit localiser l'organe défaillant et identifier les causes ayant provoqué ces situations de défaillance. Cette opération est souvent menée par un expert et dans certains cas exige des connaissances poussées sur le système.

Le critère principal de classification des méthodes de surveillance est basé sur le type de la connaissance, on a distingué deux types d'approches : les méthodes avec ou sans modèle.

La surveillance à base de modèle offre des outils totalement découplé de la structure du système, permettant un suivi temps réel de l'évolution de celui-ci. Le raisonnement en ligne fait que l'approche de surveillance à base de modèle est plus robuste à des changements de modes opératoires comme pour les systèmes ayant plusieurs configurations. Elle est donc évolutive.

Dans la deuxième section, nous avons étudié les représentations structurelles des systèmes physiques en vue de leur utilisation dans le contexte du diagnostic de défaut (bond graph, matrice structurelle et graphe biparti).

Ces représentations surtout par bond graph seront utilisées pour analyser les propriétés des systèmes qui pourront être utilisées pour la conception des relations de redondance analytique ou le placement de capteurs.

Chapitre 2

**Surveillance des systèmes industriels par
les bond graphs et les modèles externes**

2.1 Introduction

Dans le présent chapitre, est montré comment l'outil bond graph, qui a prouvé son efficacité pour construire des modèles de connaissances de systèmes physiques pluridisciplinaires, peut être aussi un excellent support pour la conception des systèmes de surveillance.

Dans la première section de ce chapitre nous expliquons les étapes de diagnostic par bond graph, (Représentation par bond graph d'un système dynamique, surveillabilité structurelle, génération des résidus, détection des défauts, décision et placement de capteurs) [35], [36], [22].

Nous présenterons 2 algorithmes pour la génération des RRAs. Ces RRAs générées de l'algorithme N°: 01 sont alors présentées sous forme de relations symboliques obtenues en éliminant les variables inconnues du modèle bond graph. Toutefois, dans certains cas (présence de relations non inversibles) l'élimination des variables inconnues n'est pas possible à réaliser. Nous proposerons alors le deuxième algorithme, des modifications sont apportées au modèle initial bond graph [37], [38], [39], [40].

La deuxième section expliquent les modèles externes et sont contribution dans la supervision des systèmes industriels, une approche combinée de bond graph et modèles externes est représentée pour la supervision d'un système dynamique hydraulique [41], [42], [43], [18].

2.2 Représentation bond graph d'un système de surveillance

La représentation bond graph est d'utiliser un seul outil pour la modélisation, la génération des RRAs, l'analyse structurelle, surveillabilité et le placement de capteurs.

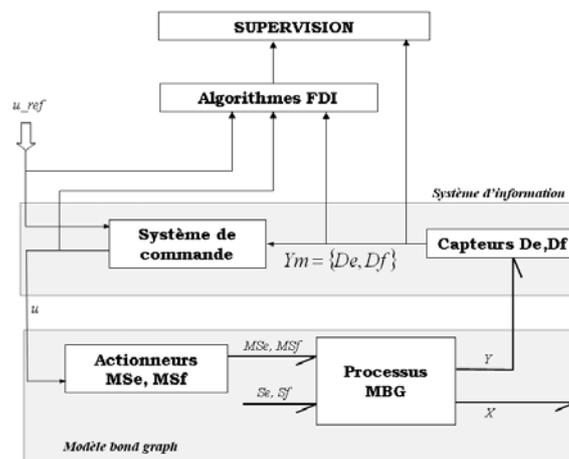


Fig.2.1 La représentation bond graph d'un système de surveillance.

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

Un système de surveillance par bond graph peut être représenté par le schéma de la figure 2 .1. On distingue essentiellement deux parties: le modèle bond graph et le système d'information. Le modèle bond graph représente la partie énergétique du processus physique.

Il comporte le processus et l'ensemble des actionneurs. Ces derniers sont modélisés par des sources (d'effort ou de flux). Les sources peuvent être simples Se , Sf (pompe, chauffage, pression d'alimentation, etc.) ou modulées MSe , MSf (sources commandées par un signal externe fourni par un régulateur ou un utilisateur).

Les capteurs et le système de commande (PID, ToR, etc.) forment le système d'information.

Dans le premier système (énergétique), la puissance échangée est représentée par une demi-flèche (un lien) qui traduit les variables de puissance (l'effort et le flux). Dans le second système (système d'information) la puissance échangée est négligeable, elle est représentée par un lien d'information [36].

2.3 Représentation par bond graph d'un système dynamique

En utilisant la représentation bond graph, l'ensemble des variables Z (connues K et inconnues X) et l'ensemble des contraintes C peuvent être déduits directement du modèle bond graph du processus [39].

2.3.1 Les contraintes C

Les contraintes C peuvent être vues comme n'importe quelles relations qui relient les variables et les paramètres du système. Elles sont représentées par les contraintes structurelles (F_J), de comportement (F_B), de mesure (F_Y), du système de commande (F_C) et des sources contrôlées (F_A).

$$C = \{F_J, F_B, F_Y, F_C, F_A\} \quad (2.1)$$

- Les équations structurelles F_J

Elles représentent l'ensemble des lois de conservation (de masse, d'énergie, etc.) et/ou des équations d'équilibre. Elles sont déduites des équations aux jonctions. Le nombre d'équations F_J est égal au nombre d'équations dans les "jonction 0" plus celles des "jonction 1" plus celles des éléments 2-ports (transformateur TF, et gyrateur GY).

$$F_J = \{F_{J0}\} \cup \{F_{J1}\} \cup \{F_{TF}\} \cup \{F_{GY}\} \quad (2.2)$$

$F_J \in R^{n_j+2*n_{2p}, n_j}$ est le nombre de jonctions 0 et 1, et n_{2p} est le nombre d'éléments 2-ports (TF et GY).

- Les équations de comportement F_B

Les lois physiques exprimant la façon dont l'énergie est transformée représentent le modèle de comportement. Dans le modèle bond graph, elles décrivent les phénomènes physiques au niveau des éléments bond graphs (R, C, et I), et sont appelées "lois constitutives".

$$F_B = \{F_C\} \cup \{F_I\} \cup \{F_R\} \quad (2.3)$$

$F_B \in \mathbb{R}^{n_e, n_e}$ est le nombre total des liens de puissance dans les éléments bond graph, R, C et I.

- Le modèle des mesures F_Y

Il décrit les mesures disponibles sur le modèle bond graph. Ce modèle exprime la façon dont les capteurs transforment les variables d'état du processus en signaux de sortie qui peuvent être utilisés dans l'élaboration des lois de commande et dans la détection et l'isolation des défaillances.

Sur un modèle bond graph les capteurs sont représentés par des détecteurs de flux (Df) et d'effort (De):

$$F_Y = \{F_{De}\} \cup \{F_{Df}\} \quad (2.4)$$

$F_Y \in \mathbb{R}^{n_s, n_s}$ est le nombre de détecteurs (ou capteurs).

- Le modèle des algorithmes de commande F_C

Il décrit les algorithmes de commande dans lesquels les entrées des régulateurs sont les valeurs des consignes et de mesure des capteurs. Les sorties des régulateurs agissent sur les actionneurs représentés par des sources modulées d'effort (M_{Se}) ou de flux (M_{Sf}).

$$F_C(u_{ref}, Y_m, \theta_{reg}) = 0 \quad (2.5)$$

Où θ_{reg} est un paramètre du régulateur (gain, temps d'intégration, etc.), u_{ref} , et Y_m représentent respectivement la consigne et les sorties des capteurs.

On a donc $F_C \in \mathbb{R}^{n_r}$ avec n_r le nombre de régulateurs.

Contrairement aux équations structurelles et de comportement qui utilisent les variables de puissance effort-flux comme variables d'entrée-sortie, les lois de commande et de mesure utilisent les signaux d'information.

- Modèle des sources contrôlées F_A

Ces modèles décrivent les sources d'énergie contrôlées ou modulées par les signaux de commande (pompe régulée, source de tension commandée, etc.). Les signaux d'entrée u sont fournis par les régulateurs et les signaux de sortie sont les variables régulées M_{Se} et M_{Sf} .

$$F_{A1}(M_{Sf}, u) = 0, F_{A2}(M_{Se}, u) = 0 \quad (2.6)$$

Où $F_A \in \mathbb{R}^{n_a}$ où n_a est le nombre total de sources (modulées ou non).

2.3.2 Les variables

L'ensemble des contraintes F s'appliquent à l'ensemble des variables Z : connues (K) et inconnues (X).

$$Z = X \cup K$$

Les variables inconnues X sont les variables de puissance (flux et effort) supportées par les liens de puissance du modèle bond graph. Le vecteur X contenant toutes les variables de puissance est:

$$X(t) = \{e_1(t), f_1(t)\} \cup \{e_2(t), f_2(t)\} \dots \dots \cup \{e_{nc}(t), f_{nc}(t)\} \quad (2.7)$$

Avec n_c le nombre de liens de puissance. La dimension de X est donc $2 * n_c \rightarrow X \in R^{2*n_c}$

Le sous-ensemble K des variables connues contient les valeurs des sources, les sorties des régulateurs (u), et les variables mesurées par les capteurs (Y_m).

$$K = MSe \cup MSf \cup Se \cup Sf \cup Y_m \quad (2.8)$$

Finalement, $K \in R^l$ avec $l = n_s + n_a$. Donc $Z = l + 2 * n_c \Rightarrow Z \in R^{l+2*n_c}$.

2.3.3 Les paramètres

$\theta \in R_p$ est le vecteur des paramètres. Dans le modèle bond graph les paramètres correspondent aux caractéristiques des éléments R, C et I, i.e. le coefficient de flux, la valeur de la capacité (qui peut être variable), les paramètres de supervision (tel que la consigne u_{ref}), etc.. [39].

2.4 Génération d'algorithmes pour le diagnostic

2.4.1 Algorithme de génération de relation de redondance analytique par bond graph N⁰:01

La génération des RRAs par la méthodologie bond graph repose sur les mêmes principes que dans le graphe biparti, à savoir l'élimination des variables inconnues dans un sous-système sur déterminé et observable. Sur un modèle bond graph, l'observabilité peut être vérifiée en utilisant les propriétés structurelles développées dans [8], [41]. Les variables connues K sont celles des détecteurs et des sources et les variables inconnues X sont celles des liens de puissances dans les éléments C, I et R. L'élimination des variables inconnues est systématique sur un

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

modèle bond graph grâce à ses propriétés causales et au parcours des chemins causaux.

Dans ce qui suit, la démarche développée consiste à générer de façon algorithmique et systématique les RRAs, les résidus correspondants et la matrice de signature des défaillances.

Dans une représentation par bond graph, la relation relative à la définition d'une RRA est:

$$f(De, Df, Se, Sf, MSe, MSf, \theta_m) = 0, \quad (2.9)$$

avec θ_m l'ensemble des paramètres mesurés ou estimés du système.

Dans ce qui suit, nous présentons une méthode permettant de générer de façon algorithmique et systématique les RRAs, les résidus correspondants et la matrice de signature des défaillances. L'algorithme suivant permet de générer des RRAs de façon systématique à partir d'un modèle bond graph. Voici, dans l'ordre, les étapes à suivre :

- 1- mettre le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle (en inversant la causalité des détecteurs si possible).
- 2- écrire les équations du modèle obtenu.
- 3- pour toute équation de jonction 0 et 1 contenant au moins un détecteur :
 - éliminer les variables inconnues en parcourant les chemins causaux sur le bond graph.
 - pour tout détecteur dont la causalité est inversée une RRA est déduite.
 - pour tout détecteur dont la causalité ne peut pas être inversée une RRA est déduite en mettant à égalité sa sortie avec la sortie d'un autre détecteur de même nature (redondance matérielle).
- 4- une RRA est obtenue à partir de chaque régulateur en comparant sa sortie mesurée avec la sortie prédite par son algorithme de commande.
- 5- refaire les étapes 3 et 4. Si les RRAs obtenues sont strictement différentes de celles déjà obtenues alors on les garde, sinon continuer jusqu'à ce que toutes les équations des jonctions et celles des régulateurs soient explorées.

Proposition 1 : *Dans un modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle et observable, pour chaque jonction, 0 ou 1 avec un seul détecteur, correspond une RRA.*

Proposition 2 : *Dans le cas où n détecteurs de même nature (effort ou flux) sont présents sur une seule jonction, $n-1$ RRAs directes sont obtenues en mettant simplement à égalité les valeurs fournies par chaque détecteur.*

Proposition 3 : *Dans un modèle bond graph totalement observable, le nombre de RRAs est égal au nombre de détecteurs. En outre, les RRAs obtenus sont structurellement indépendantes [37], [39].*

2.4.1.1 Exemple d'application

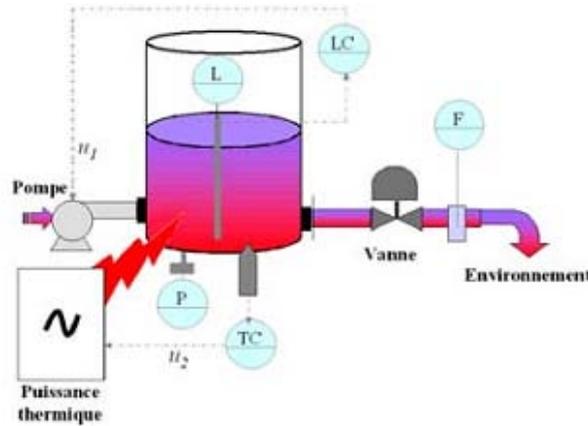


Fig.2.2 Réservoir alimenté en eau par une pompe.

Le système consiste en un réservoir alimenté en eau par une pompe. Le régulateur de niveau (**LC**) agit sur la pompe pour maintenir le niveau d'eau constant dans le réservoir. L'eau dans ce dernier est chauffée par une résistance thermique et sa température est contrôlée par le régulateur (**TC**) en agissant sur la source thermique.

L'instrumentation du processus est constituée des capteurs de niveau d'eau (**L**), de la température du réservoir (**T**) et du débit (**F**) au travers de la vanne manuelle. Les capteurs de niveau et de température sont utilisés pour réguler respectivement le niveau et la température de l'eau dans le réservoir. Le capteur de débit mesure la quantité d'eau qui sort du réservoir tandis que le capteur de pression (**P**) représente une redondance matérielle par rapport au capteur de niveau $L = \frac{P}{\rho g}$.

- Représentation par bond graph

Le modèle bond graph en causalité dérivée correspondant à la partie hydraulique du système est donné à la figure 2.3 :

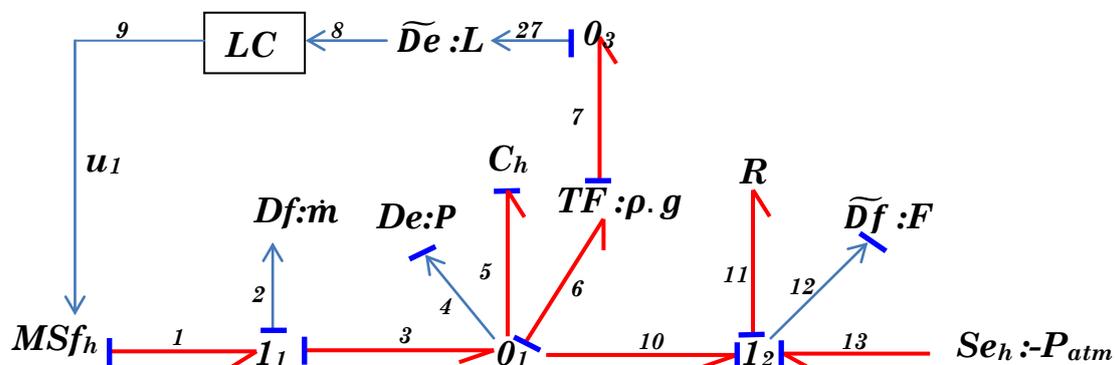


Fig.2.3 Modèle bond graph en causalité dérivée de la partie hydraulique de l'exemple de la figure 2.2.

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

- **Les contraintes**

- Les contraintes F_J sont:

$$\begin{aligned}
 F_{j01}: f_6 &= f_3 - f_4 - f_5 - f_{10} \\
 F_{j12}: e_{12} &= e_{10} - e_{11} + e_{13} \\
 F_{j03}: f_{27} &= f_7 \\
 F_{TF}: e_6 &= \rho \cdot g \cdot e_7 \\
 F_{TF}: f_7 &= \rho \cdot g \cdot f_6 \\
 F_{j11}: e_1 &= e_2 + e_3
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

- Les équations de comportement F_B sont :

Les éléments C_h et R :

$$\begin{aligned}
 f_5 &= C_h \cdot \frac{de_5}{dt} \\
 e_{11} &= \Phi_R f_{11}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Où Φ_R est une fonction correspondant à la caractéristique de la vanne. Le paramètre C_h est donné par la relation suivante:

$$C_h = \frac{A}{g} \tag{2.12}$$

Avec A la section du réservoir et g la constante de gravité.

- les équations de mesure F_Y sont :

$$\begin{aligned}
 e_5 &= e_6 = \rho \cdot g \cdot e_7 = \rho \cdot g \cdot L \\
 e_4 &= e_6 = P = \rho \cdot g \cdot L \\
 f_{11} &= f_{12} = F \\
 f_2 &= f_1
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

- Le modèle des algorithmes de commande F_C :

La sortie u_1 de l'algorithme de commande du régulateur de niveau d'eau utilisé dans l'exemple est donnée par l'équation suivante:

$$u_1 = \Phi_{LC}(L_{ref}, L) \tag{2.14}$$

Où L_{ref} est la consigne de niveau et Φ_{LC} la loi de commande du régulateur LC.

- Modèle des sources contrôlées F_A :

La contrainte relative à la source modulée MSf_h de notre exemple correspond à celle donnée par l'équation suivante:

$$f_1 = \Phi_{pompe}(u_1) \tag{2.15}$$

Où Φ_{pompe} représente la caractéristique de la pompe.

A noter que dans notre algorithme, nous considérons que les sorties des sources et des régulateurs sont connues (mesurées). L'étape 3 de l'algorithme consiste à éliminer les variables inconnues de chaque équation de jonction. Choisissons comme première équation celle correspondant à la jonction θ_1 :

$$f_6 = f_3 - f_4 - f_5 - f_{10} \tag{2.16}$$

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

Dans cette équation, le sous-ensemble des variables inconnues est :

$$X = \{f_6, f_3, f_5, f_4, f_{10}\} \quad (2.17)$$

Ces variables peuvent être éliminées (ou déterminées) en parcourant les chemins causaux sur le modèle bond graph de la figure 2.3. f_4 et f_6 correspondent respectivement aux variables flux des capteurs de pression $De : P$ et de niveau $De : L$ et par conséquent, leurs valeurs sont nulles ($f_6 = f_4 = 0$). La variable f_3 peut être déterminée en parcourant le chemin causal $MSf_h : \Phi Pump (u_1) \rightarrow f_1 \rightarrow f_3$ (voir figure 2.3, puisque la sortie de l'actionneur est considérée dans notre cas comme étant connue ($MSf_h = \Phi Pump (u_1)$)). On peut donc écrire :

$$f_3 = \Phi Pump (u_1)$$

Le chemin causal $D_f : F \rightarrow f_{12} \rightarrow f_{10}$ permet de déterminer la variable f_{10} : $f_{10} = F$, tandis que la variable f_5 peut être calculée à partir de la relation constitutive de l'élément C_h :

$$f_5 = C_h \cdot \frac{de_5}{dt} \text{ où } C_h = \frac{A}{g}$$

e_5 est déterminé en parcourant le chemin causal :

$$De : L \rightarrow e_{27} \rightarrow e_7 \rightarrow e_6 \rightarrow e_5 \Rightarrow e_5 = g \cdot L. \text{ On a donc :}$$

$$f_5 = \frac{A}{g} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{dL}{dt} = A \cdot \rho \cdot \dot{L}$$

Toutes les variables inconnues de l'équation 2.16 étant déterminées, on obtient la première relation de redondance analytique suivante :

$$RRA1 = \Phi_{pompe}(u_1) - A \cdot \rho \cdot \dot{L} - F = 0 \quad (2.18)$$

En procédant de la même façon pour une deuxième RRA peut être générée à partir de l'équation constitutive de la jonction I_2 . Dans cette équation, $e_{12} = 0$ puisqu'elle correspond à la variable effort d'un détecteur de flux ($D_f : F$). On peut donc écrire :

$$e_{12} = e_{10} - e_{11} + e_{13} \Rightarrow e_{10} - e_{11} + e_{13} = 0 \quad (2.19)$$

Le chemin causal $De : L \rightarrow e_{27} \rightarrow e_7 \rightarrow e_6 \rightarrow e_{10}$ permet de calculer e_{10} . La variable e_{13} représente la pression atmosphérique de l'environnement ambiant, tandis que e_{11} peut être obtenue à partir de la relation constitutive de l'élément bond graph R :

$$\begin{cases} e_{10} = \rho \cdot g \cdot L \\ e_{13} = -P_{atm} \\ e_{11} = \Phi_R(f_{11}) = \Phi_R(F) \end{cases}$$

La deuxième RRA qui est structurellement indépendante de la première est donc :

$$RRA2 = \rho \cdot g \cdot L - P_{atm} - \Phi_R(F) = 0 \quad (2.20)$$

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

La RRA correspondant au régulateur de niveau d'eau est directement déduite de l'algorithme de commande (étape 4 de l'algorithme de génération de RRAs). Elle correspond à la différence entre la sortie, supposée mesurée du régulateur, et la sortie prédite fournie par l'algorithme de commande. Dans notre exemple, cette RRA est donnée par la relation suivante :

$$RRA3 = u_1 - \Phi_{LC}((L_{ref}, L)) = 0 \quad (2.21)$$

Sur le modèle bond graph de la figure 2.3, la causalité du capteur de débit $Df: \dot{m}$ (jonction 1_1) ne peut pas être inversée. En effet, ce détecteur est matériellement redondant avec la sortie mesurée du régulateur LC . Pareil pour le capteur de pression $De : P$ qui est matériellement redondant avec le capteur de niveau $De : L$. D'où les deux RRAs supplémentaires suivantes :

$$RRA4 = \dot{m} - \Phi_{pompe}(u_1) = 0 \quad (2.22)$$

$$RRA5 = P - \rho . g . L = 0 \quad (2.23)$$

Comme résultat de l'algorithme présenté ici, pour un système disposant de n capteurs, il doit y avoir n résidus structurellement indépendants. De plus, en l'absence de défaillances la valeur de chaque résidu r_i ($i = 1...n$) est égale à zéro. L'indépendance structurelle signifie que deux résidus ne doivent pas faire intervenir exactement les mêmes variables.

Sur un modèle bond graph, cela se traduit par le fait que les résidus ont été obtenus par l'élimination des variables inconnues en parcourant des chemins causaux différents.

2.4.1.2 Matrice de signature des défaillances

La structure des RRAs forme une matrice binaire S_{ji} qui nous renseigne sur la sensibilité des résidus aux défaillances des composants du processus physique (capteurs, actionneurs, régulateurs, éléments physiques). Les éléments de la matrice sont définis comme suit:

$$S_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{si la } i^{\text{ème}} \text{ RRA contient des variables du } j^{\text{ème}} \text{ composant} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.24)$$

La matrice S_{ji} est appelée la matrice de signature des défaillances qui fournit la logique pour la localisation des défaillances détectées durant le fonctionnement du système. L'objectif de la procédure de localisation (isolation) est de fournir à l'opérateur la liste des composants défaillants. Chaque composant a une signature représentée par un vecteur ligne de la matrice et qui ne prend pas en compte les valeurs affectées aux variables D_b (détectabilité) et I_b (isolabilité).

Une défaillance d'un composant est détectable si la variable associée au composant est présente dans au moins une RRA (ou résidu r correspondant). Cette défaillance est localisable si et seulement si sa signature est unique, différente des signatures des autres composants [37], [37], [39].

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

La matrice de signature des défaillances correspondant à l'exemple de la figure 2.3 est donnée dans le tableau 2.1. Toutes les défaillances du processus sont théoriquement détectables ($D_b = 1$) et isolables ($I_b = 1$). La non détectabilité et la non isolabilité, des défaillances d'un composant, correspondent respectivement à $D_b = 0$ et $I_b = 0$.

r_i	$De:P$	$De:L$	$Df:\dot{m}$	$Df:L$	reservoir	vanne	pompe	LC
r_1	0	1	0	1	1	0	1	0
r_2	0	1	0	1	0	1	0	0
r_3	0	0	0	0	0	0	0	1
r_4	0	0	1	0	0	0	1	0
r_5	1	1	0	0	0	0	0	0
D_b	1	1	1	1	1	1	1	1
I_b	1	1	1	1	1	1	1	1

Tab.2.1 Matrice de signature de défaillances du système.

2.4.1.3 Procédure de détection et d'isolation des défaillances

Une fois les relations de redondance analytique obtenues et la matrice de signature de défaillances générée, la procédure de décision est la prochaine étape dans la conception d'un système de surveillance. Elle consiste à rendre la détection et la localisation des défaillances robuste, fiable et efficace. En général, la logique suivie pour conclure si oui ou non une défaillance est apparue, dépend du type de connaissance disponible concernant le processus, de l'approche utilisée et du type des défaillances traitées.

Une procédure de décision est appliquée sur l'ensemble des résidus r pour générer ce que nous appelons un vecteur de cohérence binaire $V = [v_1 v_2 \dots v_n]$, qui indique si oui ou non une défaillance est présente sur le système. Chaque élément v_i de V est obtenu en appliquant une procédure de décision $\Phi_i(r_i)$ sur le résidu correspondant. Une alarme (présence d'une défaillance) est alors générée si un élément $v_i = 1$ (i.e. $V \neq [0 \ 0 \ \dots \ 0]$).

Théoriquement, si le système est en bon fonctionnement, la valeur de chaque résidu r_i ($i = 1 \dots n$) doit être nulle. Mais en pratique, et dans le cas le plus simple, la valeur de $|\Psi \Delta T(r_i)|$ est bornée par une petite quantité ε_i , avec $\Psi_{\Delta T}$ le prétraitement sur chaque résidu (e.g. une moyenne glissante sur un intervalle de temps ΔT). Le paramètre ε_i est un seuil fixé (par expérience, par exemple). En effet, en pratique les valeurs des résidus en fonctionnement normal ne sont jamais nulles. Ceci étant dû aux erreurs de modélisation ainsi qu'aux bruits des mesures. Pour décider de la présence d'une défaillance, chaque résidu traité est comparé à

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

une valeur de seuil ε_i fixée a priori [39], [36]. Dans le cas le plus simple (ce qui est notre cas) chaque élément v_i de V est obtenu en utilisant la condition suivante:

$$v_i = \begin{cases} 1, & \text{si } |\Psi \Delta T (r_i)| > \varepsilon_i \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.25)$$

2.4.2 Algorithme de génération de relation de redondance analytique par bond graph N⁰: 02

Dans cette deuxième partie du chapitre, est présentée une méthodologie permettant d'obtenir des résidus numériques à partir de modèles bond graphs présentant des non linéarités complexes non inversibles et/ou des boucles algébro-différentielles. Des modifications ont été alors apportées au modèle bond graph initial du processus physique. Ces modifications ont pour but final d'obtenir une forme de modèle dans lequel les variables connues (mesures, sources et paramètres) sont les entrées, et les résidus numériques sont des sorties. Cette forme de représentation est appelée modèle Bond Graph de Diagnostic (BGDg) [36], [36], [39].

2.4.2.1 Contraintes non-inversibles

Pour introduire la problématique et montrer les motivations derrière ce travail, prenons comme exemple le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle de la figure 2.4 Ce modèle présente une boucle algébrique A.

Physiquement, les éléments (R1 et R2) et (C1 et C2) peuvent représenter respectivement des vannes et des réservoirs de stockage.

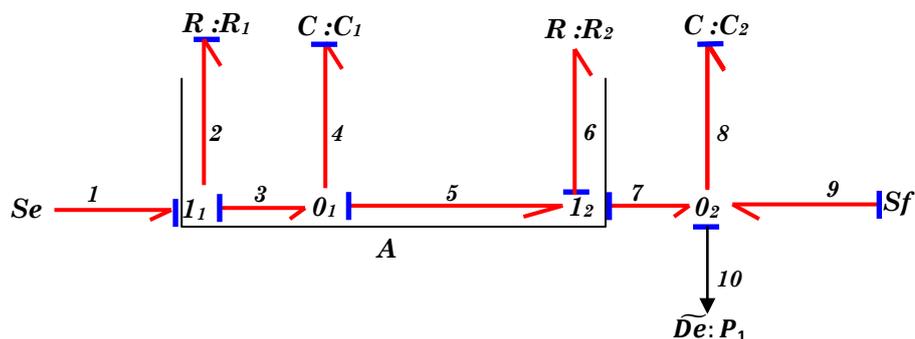


Fig.2.4 Modèle bond graph avec une boucle algébrique.

Si on admet que la causalité affectée à R1 est fixe et correspond à celle de la figure 2.4, sa relation constitutive, exprimant la variable flux f_2 en fonction du variable effort e_2 , peut être alors exprimée par la relation non linéaire suivante:

$$f_2 = \Phi R_1 (e_2)$$

avec ΦR_1 une relation non inversible. De même, la relation constitutive de R_2 est donnée par :

$$e_6 = \Phi R_2 (f_6)$$

La boucle algébrique qui lie les deux éléments R est exprimée analytiquement par la relation suivante :

$$f_2 = \Phi R_1 (S_e - \Phi R_2 (f_2 - f_4) - P_1) \quad (2.26)$$

La relation 2.26 exprime la variable f_2 comme une fonction non linéaire d'elle-même qui, en plus, ne permet pas de calculer f_2 puisqu'on a supposé que les causalités des éléments R est fixe et que les relations ΦR_1 et ΦR_2 sont non-inversibles. L'équation 2.26 peut alors être réécrite comme:

$$f_2 = \Psi_1 (f_2; f_4; P_1) \quad (2.27)$$

Qui exprime bien une boucle algébrique non solvable. Toutefois, il est possible, au moyen de logiciels appropriés (Matlab Simulink, 20-Sim, Symbols etc.), de résoudre la plupart des boucles [36], [39].

2.4.2.2 Détecteurs de résidus numériques

Un élément détecteur D_s , est un élément qui mesure la valeur d'un signal quelconque à l'exception du flux et de l'effort. Par exemple, un capteur mesurant la sortie d'un régulateur est représenté par un élément D_s . Lorsque la causalité de cet élément est inversée, on représente l'élément correspondant obtenu par un détecteur de source (signal), appelé S_s .

D_s et S_s , permettent en surveillance de représenter les parties commande des processus.

En affectant la causalité dérivée préférentielle au modèle bond graph, avec si possible inversion de la causalité des détecteurs, cinq configurations possibles peuvent apparaître:

1. Causalité inversée dans un détecteur d'effort (De).
2. Causalité inversée dans un détecteur de flux (Df).
3. Causalité non inversée d'un détecteur d'effort (De).
4. Causalité non inversée d'un détecteur de flux (Df).
5. Inversion d'un détecteur de signal, D_s , pour donner lieu à une source de signal, S_s (toujours inversée).

On suppose que la causalité des sorties des détecteurs liés aux régulateurs n'est jamais inversée. En effet, les sorties des régulateurs correspondent aux valeurs de retour des lois de commandes programmées [36], [39], [40].

2.4.2.3 Modifications sur le modèle bond graph en causalité dérivée

Un détecteur d'effort dont la causalité est inversée peut être considéré comme une source d'effort modulée par la valeur mesurée comme le montre la figure 2.5.c, la variable réactive (ici le flux) d'un détecteur d'effort dont la causalité est inversée correspond à un détecteur de résidu numérique représenté par l'élément Df^* comme le montre la figure 2.5 (c) [39], [40].

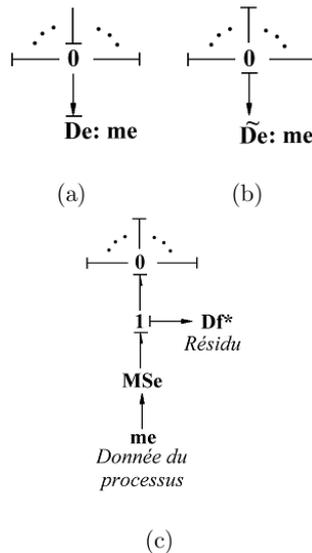


Fig.2.5 —(a) De en causalité intégrale (b) De en causalité inversée (c) représentation proposée pour la causalité inversée de De donnant lieu au détecteur de résidu Df^* .

Le même raisonnement s'applique à un détecteur de flux dont la causalité est inversée pour générer un résidu numérique représenté par l'élément De^* à ce type de détecteur sont données en figure 2.6. Cette représentation est la forme duale à celle du détecteur d'effort.

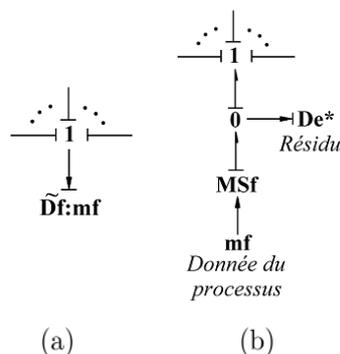


Fig.2.6 - (a) Df en causalité inversée (b) substitution correspondante et détecteur de résidu.

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

Concernant un détecteur d'effort dont la causalité ne peut pas être inversée, les modifications proposées sont données par la figure 2.7(a). La valeur mesurée de ce détecteur peut être déterminée à travers les mesures des autres détecteurs de même nature (effort ou flux). Il a été montré dans [39] qu'un détecteur dont la causalité ne peut pas être inversée lorsqu'on met le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle est un détecteur redondant du point de vue structurel. Le résidu obtenu dans ce cas est un résidu direct (i.e. sans passer par l'élimination de variables inconnues).

Les modifications apportées à un détecteur de flux dont la causalité ne peut pas être inversée donnent lieu à une forme duale à celle donnée par la figure 2.7(b).

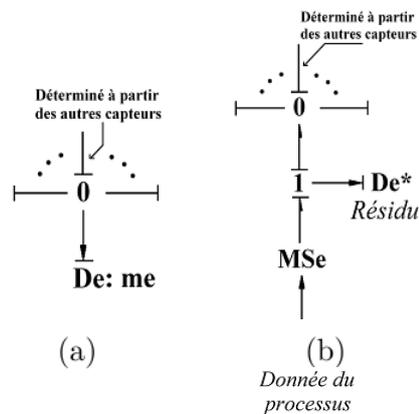


Fig.2.7 - (a) causalité non inversée d'un détecteur d'effort, D_e , (b) substitution correspondante et détecteur de résidu obtenu.

Concernant le système d'information constitué du système de commande (voir figure 2.1). Les sorties des régulateurs sont des signaux à puissance nulle et dont les valeurs sont supposées connues (mesurées). Les résidus générés à partir des régulateurs sont en fait de simples comparaisons entre les mesures des sorties des régulateurs et celles prédites par les algorithmes de commande. Le résidu numérique obtenu est représenté par un élément détecteur D_s^* , comme le montre la figure 2.8 (b).

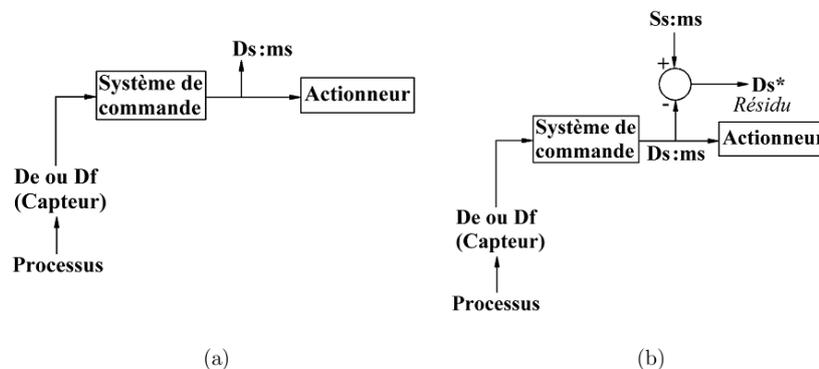


Fig.2.8 - (a) détecteur de signal, D_s , (b) substitution correspondante et capteur de résidu.

2.4.2.4 Algorithme de Génération des résidus

La procédure de génération de résidus numériques à partir d'un processus physique comporte les étapes suivantes:

- 1- construire le modèle bond graph en causalité intégrale préférentielle.
- 2- mettre le modèle bond graph obtenu en causalité dérivée préférentielle.
- 3- introduire les modifications sur tous les détecteurs pour générer des résidus numériques.
- 4- construire à partir du modèle bond graph en causalité intégrale le bloc diagramme correspondant.
- 5- faire la même chose que dans l'étape 4 sur le modèle bond graph en causalité dérivée (avec les modifications).
- 6- en l'absence d'installation réelle, coupler les deux modèles de telle sorte que les sorties du modèle en causalité intégrale soient les entrées de celui en causalité dérivée. Sinon, injecter les sorties des capteurs dans le modèle en causalité dérivée.
- 7- les résidus sont obtenus à partir des détecteurs de résidus numériques du modèle bond graph en causalité dérivée [35], [39].

2.4.2.5 Exemple

A titre d'exemple en prenant l'exemple de la figure suivante, système a 2 réservoirs sans régulation et loi de commandes :

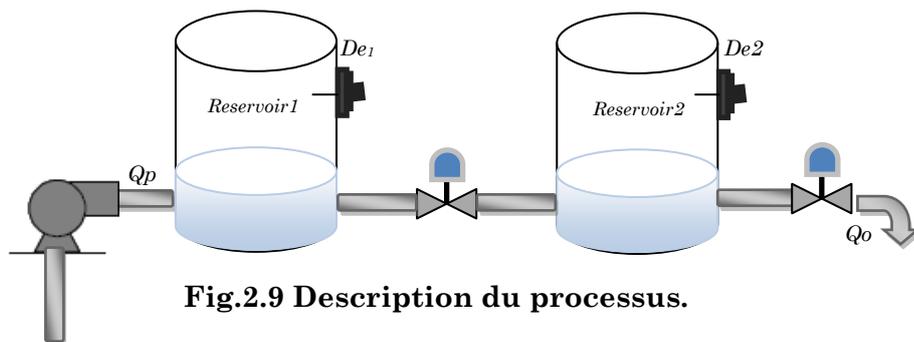


Fig.2.9 Description du processus.

- le modèle bond graph en causalité intégrale préférentielle de ce système est :

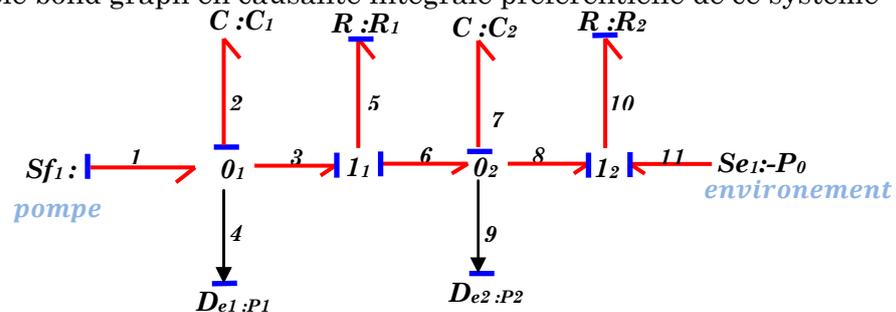


Fig.2.10 Modèle bond graph en causalité intégrale préférentielle.

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

- le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle.

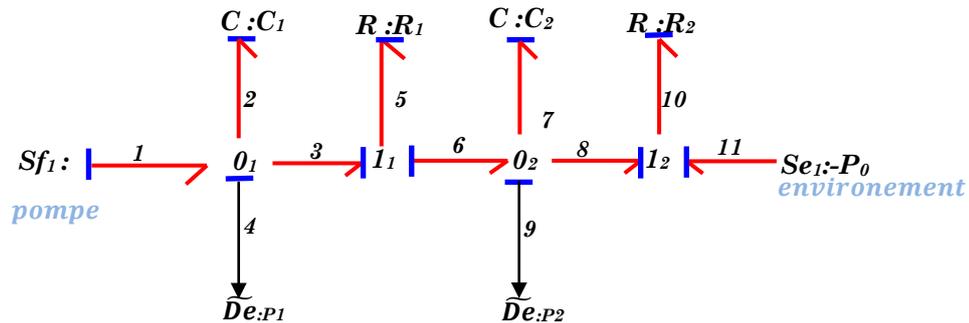


Fig.2.11 Modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle.

- le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle après les modifications BGDg :

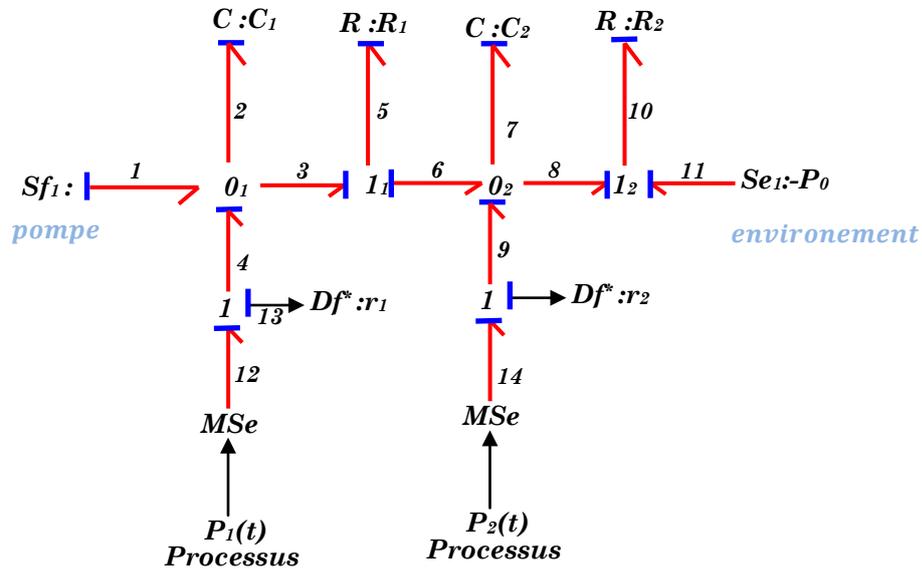


Fig.2.12 BGDg de deux réservoirs.

- **Construction du modèle de simulation**

Le modèle global de simulation se compose de deux modèles distincts: le modèle bond graph en causalité intégrale avec les différentes défaillances possibles et le modèle bond graph en causalité dérivée qu'on appelle aussi BGDg. Les sorties du premier sont injectées comme entrées du second.

- **Connexion des deux modèles**

Le couplage des deux modèles bond graphs, en causalité Dérivée et intégrale, a pour but la construction de modèles en mode normal et défaillant, on distingue quatre zones distinctes, la zone de couplage dans laquelle on a ajouté du bruit aux sorties du modèle en causalité intégrale, et enfin le modèle bond graph de diagnostic qui permet de générer des résidus sous forme numérique.

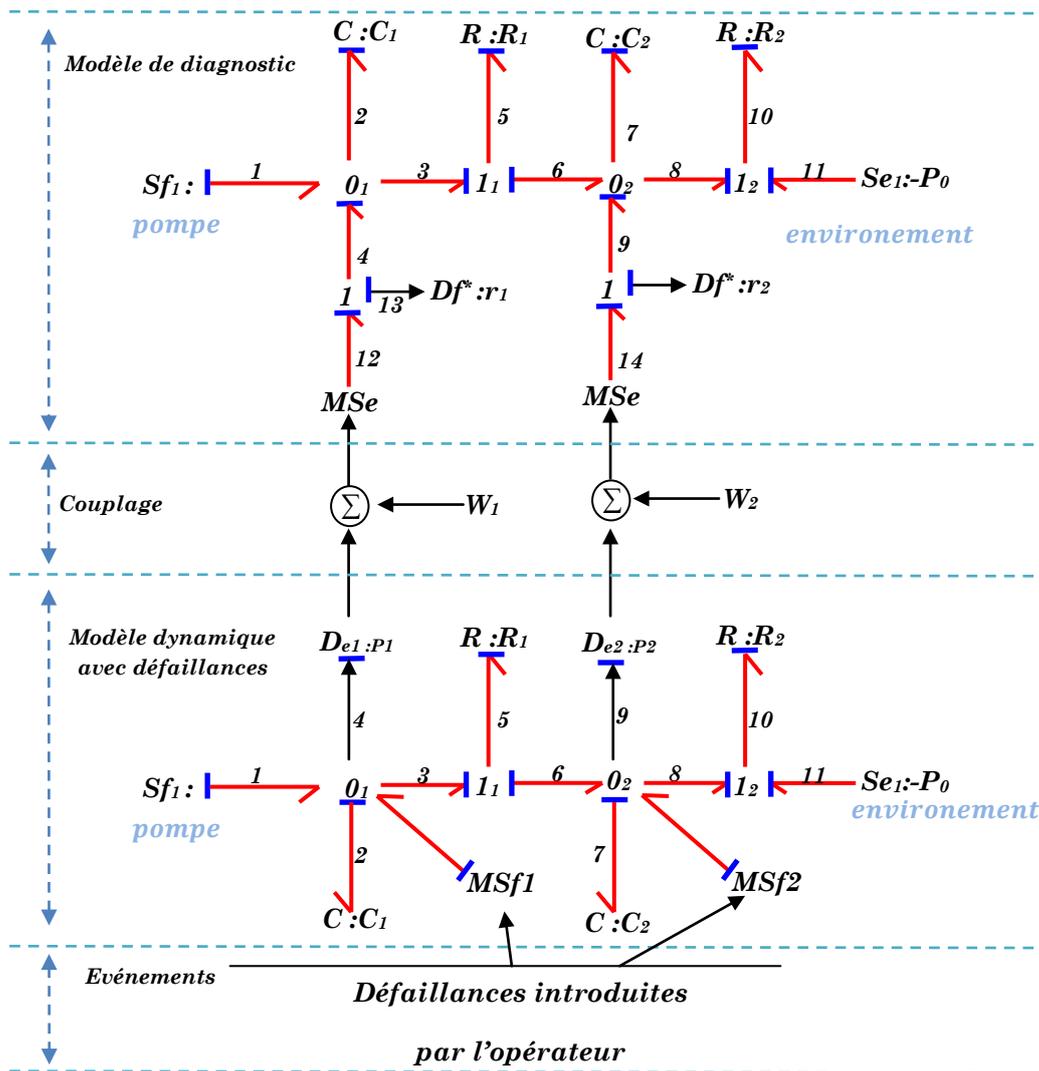


Fig.2.13 Construction du modèle de simulation.

2.4.3 Application générale

2.4.3.1 Description du processus

La fonction principale de ce processus est de fournir un débit d'eau Q_0 continu à un consommateur. Le système consiste en deux réservoirs T_1 et T_2 reliés par une conduite et une vanne. Le réservoir T_1 est rempli en eau jusqu'à un niveau $h_1 = 0.5$ m au moyen d'une pompe P_1 . Ce niveau est régulé par un PI en agissant sur le débit d'entrée Q_p fourni par la pompe. Le débit d'eau qui traverse la vanne V_b est régulé par un régulateur "On-Off". En agissant sur la vanne V_b , on maintient le niveau d'eau h_2 dans le réservoir T_2 autour d'une valeur donnée ($0.09 \text{ m} \leq h_2 \leq 0.11$ m). La quantité d'eau Q_0 fournie à un consommateur dépend du degré d'ouverture ou de fermeture de la vanne V_0 .

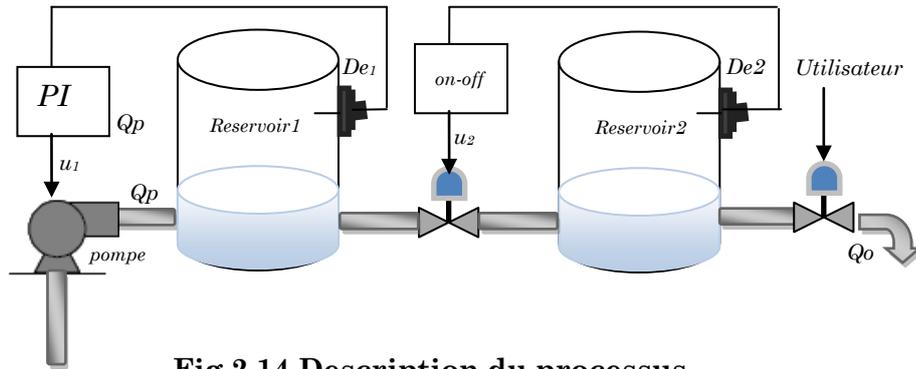


Fig.2.14 Description du processus.

2.4.3.2 Modèle Pseudo bond graph des deux réservoirs

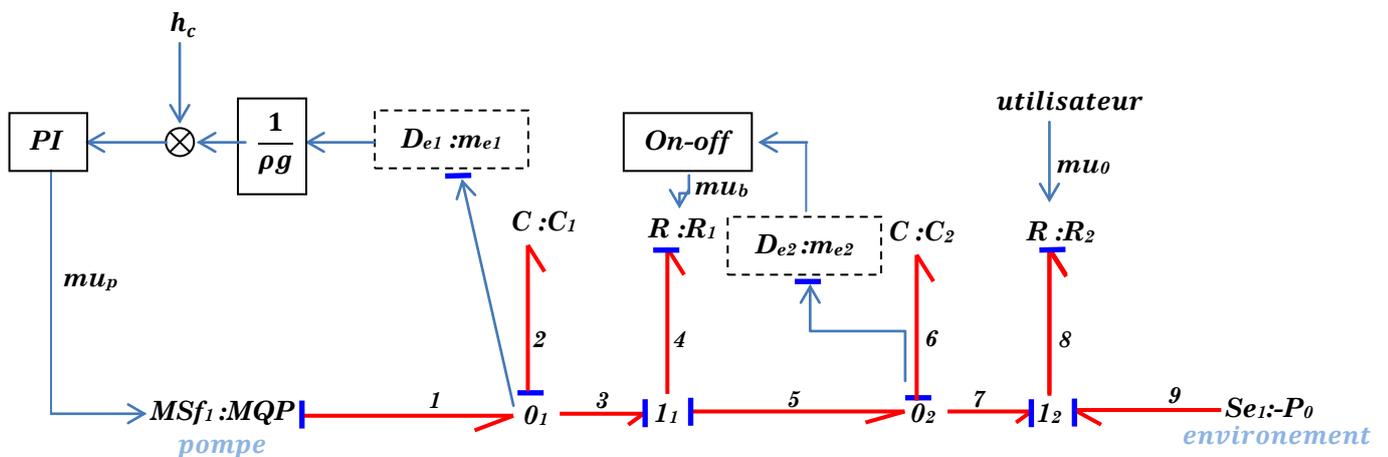


Fig.2.15 Modèle Pseudo bond graph des deux réservoirs.

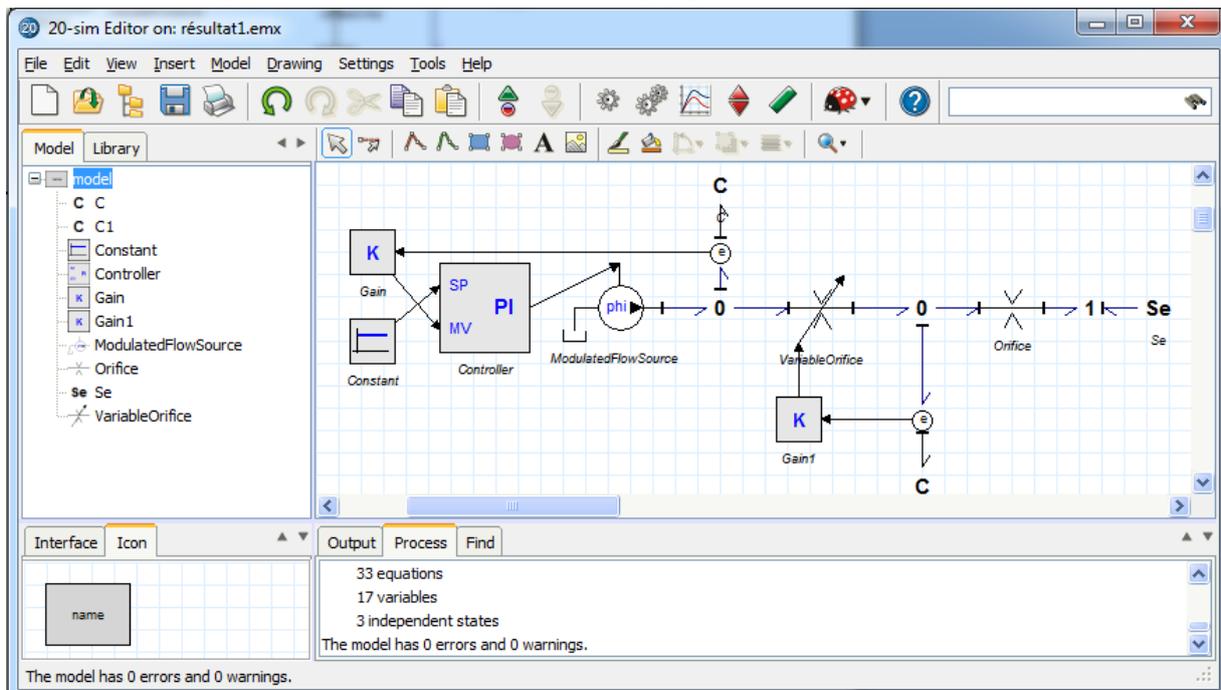


Fig.2.16 Modèle Pseudo bond graph des deux réservoirs dans 20-sim 4.1.

2.4.3.3 Génération des RRAs

- **Les variables**

Le vecteur contenant toutes les variables pour les détections des défauts associé au modèle bond graph donnée :

$$Z = X \cup K \quad (2.28)$$

Nous avons quatre éléments bond graph (R1, R2, C1 C2), donc le vecteur de variables inconnues X est de dimension 8:

$$X \in R^8: X = [f_2 \ e_2 \ f_4 \ e_4 \ f_6 \ e_6 \ f_8 \ e_8] \quad (2.29)$$

Le vecteur des variables connues dans le modèle bond graph est de dimension 7: Sont les deux sources , deux capteurs et 3 contrôleurs :

$$K = [MQp \ P_0 \ me_1 \ me_2 \ mu_p \ mu_b \ f_8 \ mu_0]^T \quad (2.30)$$

- **Les paramètres**

Le vecteur θ des paramètres est composée de (les coefficients hydrauliques des éléments R1, R2) et (les capacités hydrauliques des éléments C1, C2).

$$\theta = [C_{d1} \ C_{d2} \ C_1 \ C_2]^T \quad (2.31)$$

- **Les contraintes**

Le pseudo bond graph des deux réservoirs consistent de : 04 jonction ($n_j=4$), 04 éléments bond graph ($n_e=4$), 02 capteurs ($ns=4$), et deux contrôleurs PI et on-off ($nc=4$), ($mu_0=1$), donc on a 13 Relations des contraintes sont disponibles et seulement 8 variables sont inconnus, ce qui implique que le système est déterministe.

- **Les équations structurelles F_J**

Les équations structurelles des jonctions 0,1 sont :

$$\Phi_1: MQp - f_4 - f_2 = 0, \quad \Phi_2: e_2 - e_4 + e_6 = 0 \quad (2.32)$$

$$\Phi_3: -f_6 - f_8 + f_4 = 0, \quad \Phi_4: -e_8 + e_6 - P_0 = 0$$

- **Les équations de comportement F_B**

Les équations constitutives pour les éléments C1, R1, C2, R2 sont :

$$\Phi_5: \begin{cases} s.e_2 = \frac{1}{C_1} f_2, & \text{if } e_2 < \rho g Z_{1max} \\ s.e_2 = 0, & \text{if } e_2 = \rho g Z_{1max} \\ e_2 \in [0, \rho g Z_{1max}] \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\Phi_6: f_4 = C_{d1} \cdot \text{sign}(e_4) \sqrt{|e_4|} \mu_b \quad (2.34)$$

$$\Phi_7: \begin{cases} s.e_6 = \frac{1}{C_2} f_6, & \text{if } e_6 < \rho g Z_{2max} \\ s.e_6 = 0, & \text{if } e_6 = \rho g Z_{2max} \\ e_6 \in [0, \rho g Z_{2max}] \end{cases} \quad (2.35)$$

$$\Phi_8: f_8 = C_{d2} \cdot \text{sign}(e_8) \sqrt{|e_8|} \mu_0 \quad (2.36)$$

- **Les équations des mesures F_Y**

Les équations des capteurs De₁ ; De₂ sont :

$$\Phi_9: me_1 = \begin{cases} e_2, & \text{if } e_2 < \rho g Z_{1max} \\ \rho g Z_{1max}, & \text{if } e_2 = \rho g Z_{1max} \end{cases} \quad (2.37)$$

$$\Phi_{10}: me_2 = \begin{cases} e_6, & \text{if } e_6 < \rho g Z_{2max} \\ \rho g Z_{2max}, & \text{if } e_6 = \rho g Z_{2max} \end{cases} \quad (2.38)$$

- Les équations des contrôleurs

Le niveau d'eau dans le réservoir 1 est contrôlé par un contrôleur PI, l'équation est :

$$\Phi_{11}: mu_p = PI_{K_p} \left(h_c - \frac{1}{\rho g} me_1 \right) + PI_{K_i} \int \left(h_c - \frac{1}{\rho g} me_1 \right) dt \quad (2.39)$$

Le niveau d'eau dans le réservoir 2 est contrôlé par un contrôleur TOR (on-off), l'équation est :

$$\Phi_{12}: mu_b = on_off(me_2, onoff_{state}, onoff_{min}, onoff_{max}) \quad (2.40)$$

me_2 , $onoff_{min}$ et $onoff_{max}$ sont respectivement l'indication de capteur de pression, minimum niveau dans le réservoir, et maximum niveau dans ce réservoir.

- Les équations des sources contrôlées

Pour simplifié les équations de commande de la source, nous supposons que le débit fourni par la pompe MQp est proportionnelle à la sortie du régulateur PI et le débit de la pompe est limité à $Pump_Max$ et $Pump_Min$, la MQp peut être écrit comme suit :

$$\Phi_{13}: MQp = \begin{cases} mu_p, & \text{if } 0 < mu_p < Pump_Max \\ Pump_Min, & \text{if } mu_p \leq Pump_Min \\ Pump_Max, & \text{if } mu_p \geq Pump_Max \end{cases} \quad (2.41)$$

$$= MinMax(mu_p, Pump_Min, Pump_Max)$$

- Génération des résidus

À titre d'exemple, prenons la jonction 0_1 : la première équation structurelle Compte tenu de deux variables sont inconnues (f_4 et f_2), L'objectif est de diminuer le nombre des variables inconnues et d'augmenter le nombre des variables connues. L'ARR est alors générée lorsque toutes les variables inconnues sont déterminées. Les variables inconnues sont directement déduites en utilisant les chemins causaux.

f_2 est calculé par l'équation constitutive du stockage de réservoir 1 modélisé par l'élément C_1 , l'effort e_2 est mesuré et déterminé à l'aide l'équation de mesure et ($e_2 = me_1$), enfin on trouve :

$$f_2 = C_1 s me_1$$

f_4 est calculé par l'équation constitutive de l'élément R_1 , e_4 est inconnue. Cette variable est exprimée en termes de variables connues en utilisant les chemins causaux :

$$\begin{aligned} \text{On a : } & (e_3 = De_1 = me_1) \\ \text{et : } & (e_5 = De_2 = m_2) \\ \text{alors : } & (e_4 = e_3 - e_5 = me_1 - me_2) \end{aligned}$$

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

Donc : $f4 = Cd1.sgn(me1 - me2)\sqrt{:(me1 - me2):}.m_{ub}$

Enfin on obtient la première relation de redondance analytique :

$$ARR = MQp - C_1 s m_{e1} + Cd1.sgn(me1 - me2)\sqrt{:(me1 - me2):}.m_{ub}$$

En utilisant la même méthode pour obtenir les ARR, en ajoutant aussi les RRAs de chaque régulateur en comparant sa sortie mesurée avec la sortie prédite par son algorithme de commande.

Les RRAs de ce système sont :

$$ARR1 = MQp - MinMax(mup, pump_min, pump_max) \quad (2.42)$$

$$ARR2 = m_{up} - PI_{kp} \left(hc - \frac{1}{\rho g} me1 \right) + PI_{ki} \int \left(hc - \frac{1}{\rho g} me1 \right) dt \quad (2.43)$$

$$ARR3 = MQp - C_1 s m_{e1} - Cd1.sgn(me1 - me2)\sqrt{:(me1 - me2):}.m_{ub} \quad (2.44)$$

$$ARR4 = Cd1.sgn(me1 - me2)\sqrt{:(me1 - me2):}.m_{ub} - C_2 s m_{e2} - \quad (2.45)$$

$$Cd2.sgn(me2 - Po)\sqrt{:(me2 - Po):}.m_{u0}$$

$$ARR5 = m_{ub} - OnOff(me2, OnOff_{min}, OnOff_{max}) \quad (2.46)$$

2.4.3.4 Matrice de signature des défaillances

	D_{e1}	D_{e2}	$pump$	T_1	T_2	V_1	V_2	PI	$On - Off$
r_1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
r_2	1	0	0	0	0	0	0	1	0
r_3	1	1	1	1	0	1	0	0	0
r_4	1	1	0	0	1	1	1	0	0
r_5	0	1	0	0	0	0	0	0	1
M_b	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M_i	1	1	1	1	0	1	0	1	1

Tab.2.2 matrice de signature des défaillances de l'application.

2.4.3.5 Simulation des résultats de l'Application

- La réponse de système :

On fait la simulation du modèle bond graph de la Fig.2.16 Les résultats de simulation correspondant aux niveaux d'eau dans les deux réservoirs sont donnés à la figure :

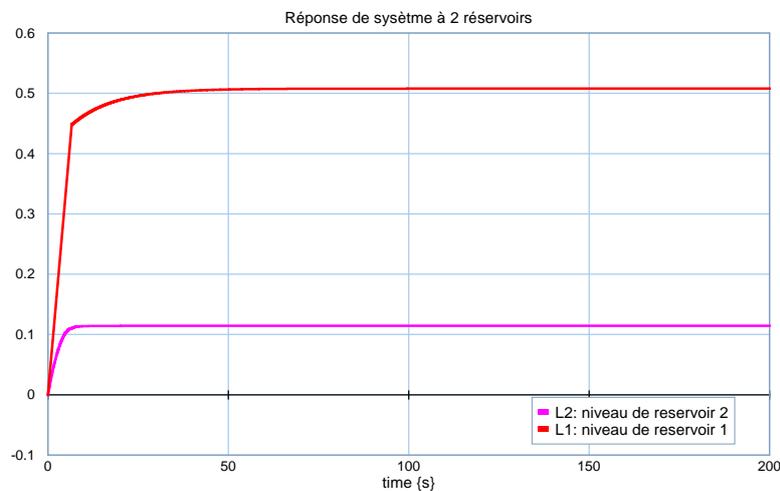


Fig.2.17. Niveau d'eau dans les réservoirs 1 et 2.

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

- Défaut de fuite au niveau de réservoir 1

On applique un défaut structurel présente comme un source de flux au niveau de réservoir 1, cette fuite égale a $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$ d'une durée de 50 s (100 s jusqu'à 150s), la réponse de niveau d'eau dans le réservoir 1, ARR3, 4 et le débit d'eau de la sortie sont montrées par les figures suivantes :

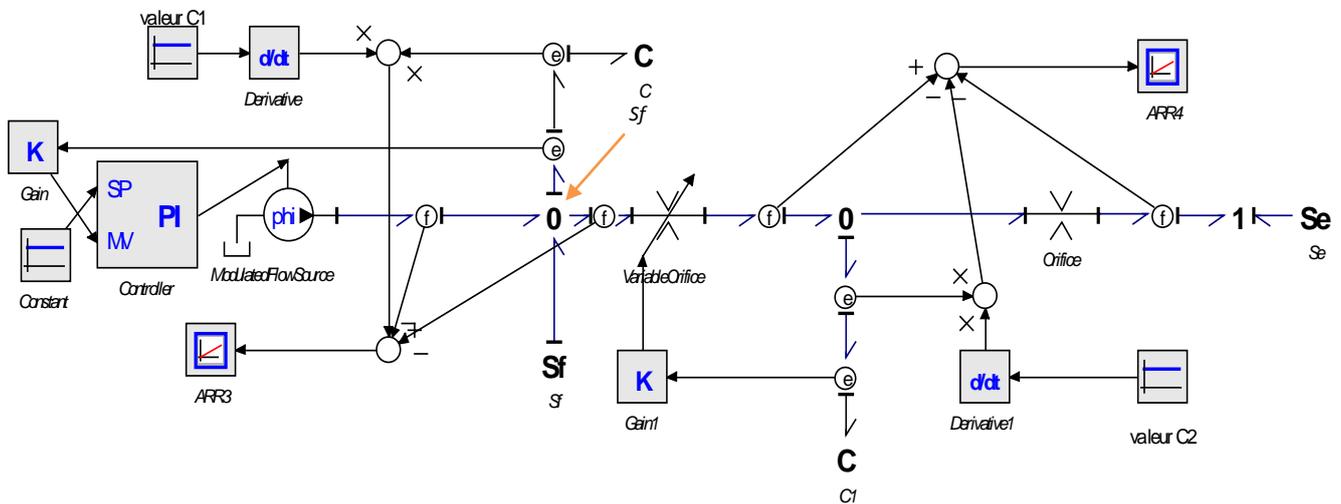


Fig.2.18 Génération des ARR3, ARR4 et création d'un Défaut de fuite au niveau du réservoir 1.

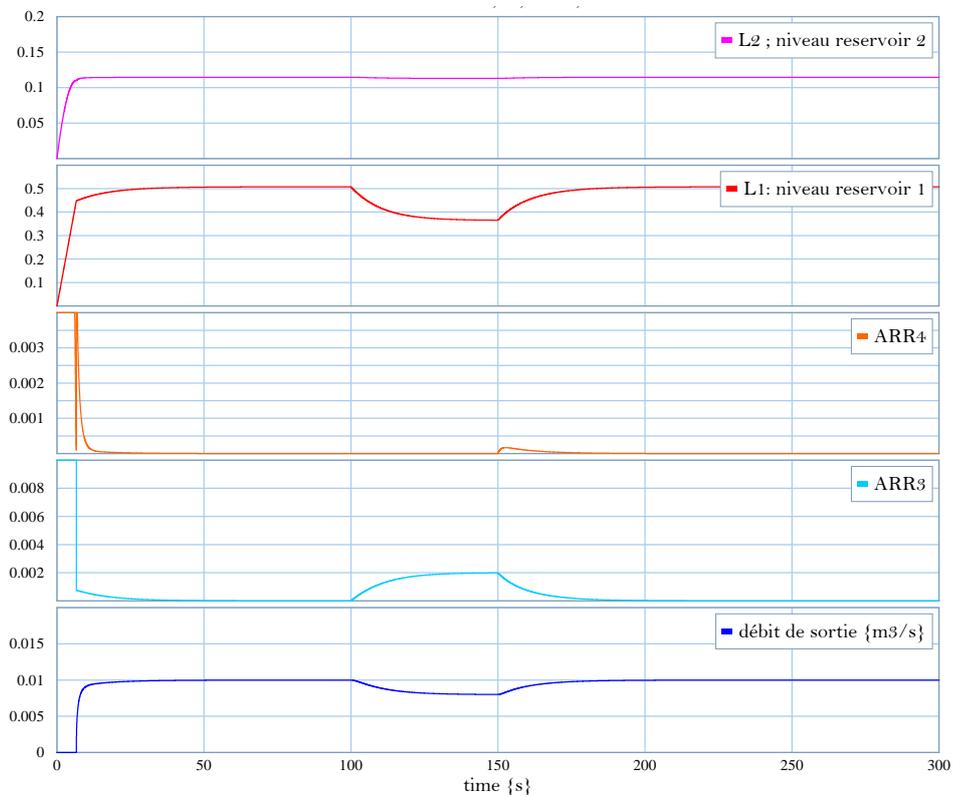


Fig.2.19 Les réponses des ARR3, ARR4, L1, L2 et débit de sortie d'eau vers l'utilisateur avec fuite dans le réservoir 1.

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

On remarque que le niveau d'eau du réservoir 1 est diminué lors l'excitation d'une fuite égale a $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$, et la même remarque pour le débit d'eau de sortie, après 150s le niveau d'eau de réservoir 1 et le débit de sortie augmentent jusqu'à la consigne, ARR4 égale à 0 dans la durée de défaut, ARR3 égale à 0 en régime permanent sauf dans la durée d'excitation de défaut.

- Défaut de fuite au niveau de réservoir 2

On applique un défaut structurel présente comme un source de flux au niveau de réservoir 2, d'une durée de 50 s (150 s jusqu'à 200s), la réponse de niveau d'eau dans le réservoir 2, ARR3,4 et le débit d'eau de la sortie sont montrées par les figures suivantes:

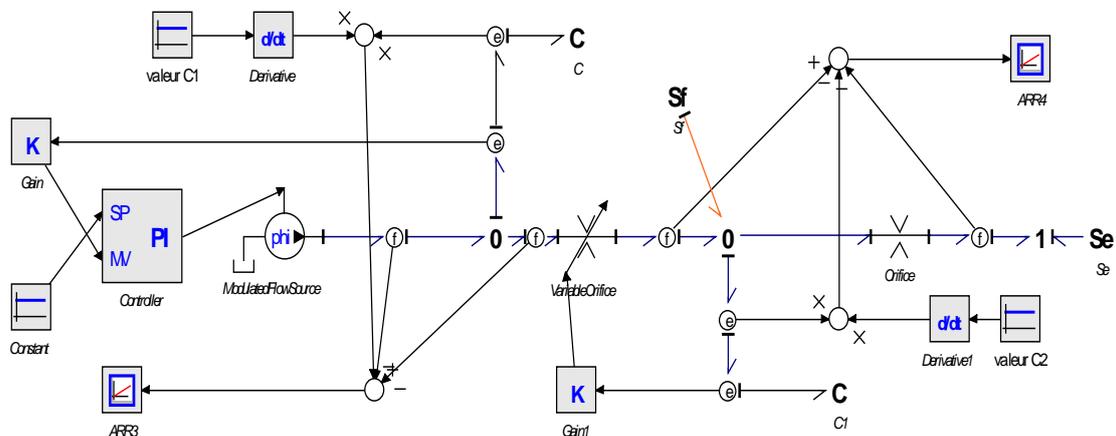


Fig.2.20 Génération de RRA3, RRA4 et création d'un Défaut de fuite d'eau dans le réservoir 2.

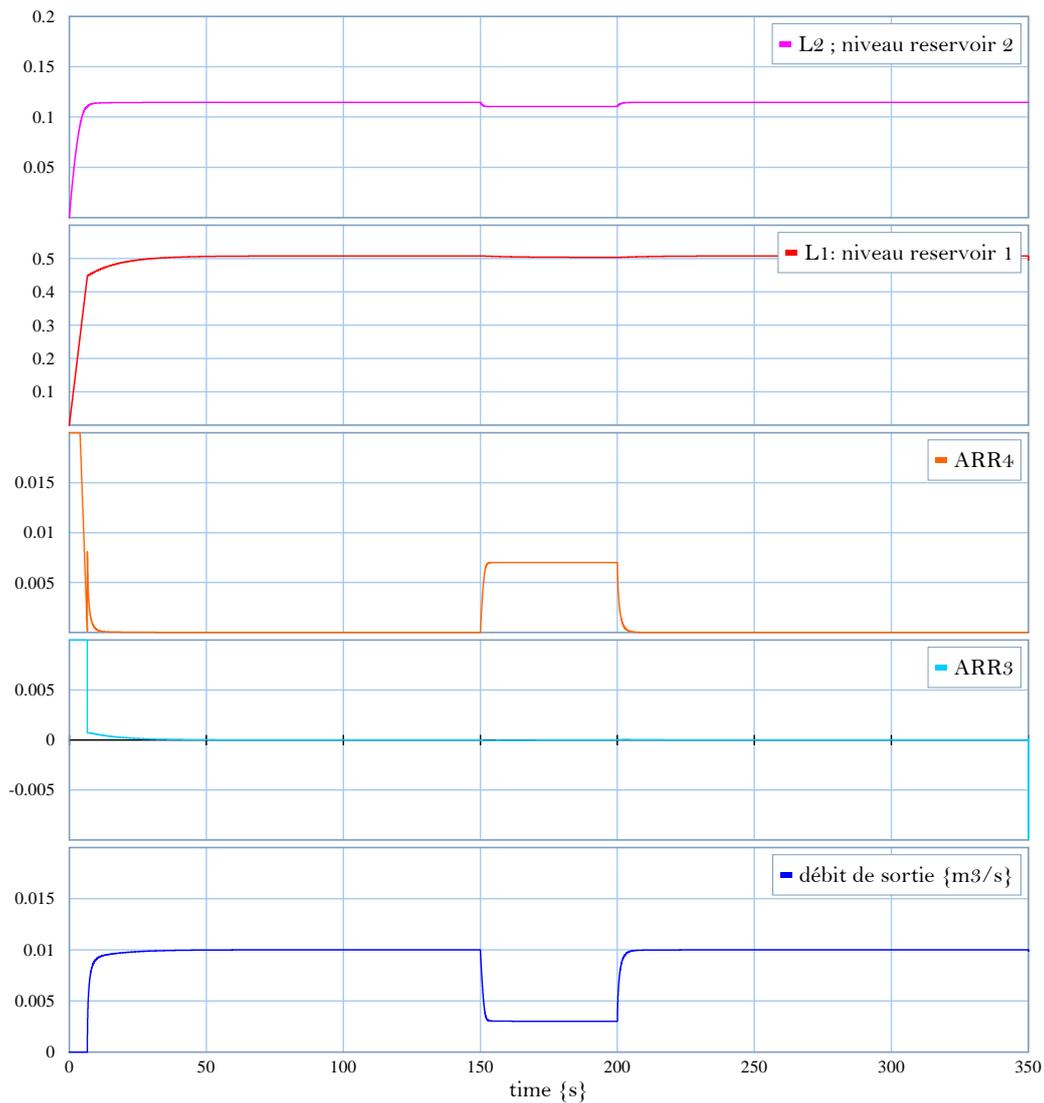


Fig.2.21 Les réponses des ARR3, ARR4, L1, L2 et débit de sortie d'eau vers l'utilisateur avec fuite dans le réservoir 2.

On remarque que le niveau d'eau du réservoir 2 est diminué lors l'excitation d'une fuite d'eau et la même remarque pour le débit d'eau de sortie, après 240s le niveau d'eau de réservoir 1 et le débit de sortie augmentent jusqu'à la consigne, ARR3 égale à 0 en (150s à 200s) montre que ce résidus ne détecte pas ce défaut, le contraire pour ARR4 détecte ce défaut dans cette durée mais égale a 0 dans le régime permanent.

2.5. Supervision de systèmes dynamiques par Bond Graph et modèles externes

Les modèles externes structurer le processus industriel, selon plusieurs modes de fonctionnement (dégradés et normale). La commutation d'un mode à un autre mode actionné est décrite par un diagramme appelé diagramme du gestion de mode d'utilisation. Il représente le système d'interface homme-machine.

Les fonctions logiques sont contrôlées par la disponibilité des services et par conséquent l'état des composants technologiques. Ainsi, la disponibilité des services (nécessaires pour mener une mission) seront fournis par l'algorithme de suivi basé sur bond graph BG au diagramme du gestion de mode d'utilisation.

Le bond graph est utilisé pour la détection et l'isolation des défauts affectant capteurs, actionneurs ou des composants physiques du processus.

La représentation combinée BG-EM est appliqué pour la conception du système de surveillance [41], [42].

2.5.1 Les modèles externes

Les systèmes industriels consistent en un ensemble d'équipements interconnectés les uns avec les autres. Une défaillance matérielle d'un ou de plusieurs de ces éléments peut mener à une partie des objectifs pour lesquels le système a été conçu, et alors il devrait prévenir des utilisateurs de générer des alarmes. Le dernier doit être suffisamment synthétique pour exprimer clairement à l'opérateur la nature de l'échec et de ses conséquences.

Le modèle externe qui est proposé par [43] est considéré ici. Ce modèle est basé sur les notions de services, les missions et les modes d'utilisation.

- Service

Les systèmes industriels sont constitués d'un ensemble d'équipements (échangeur de chaleur, la pompe à moteur ...), qui sont organisés afin que les systèmes puissent atteindre les objectifs pour lesquels ils ont été conçus:

- **Le niveau bas:** Ce sont les services de base, ils sont directement interfacé avec le processus (pompes, vannes, capteurs ...).
- **Le niveau élevé:** Ce sont des services composés, ils sont composés de services de base (refroidissement, chaudière ...).

L'ensemble des services S ; qui sont offerts par un équipement est défini :

$$S = \{s_i, i \in 1 \dots n\}$$

- Missions

Les services de base (niveau bas) sont associés les uns aux autres à définir les services composés et ils réalisent une mission (figure 2.22). Une défaillance matérielle signifie l'indisponibilité de certaines de base services.

S_i : service i

Mission 1: S_1, S_4, S_5, S_7, S_9

Mission 2: S_2, S_5, S_6, S_7, S_8

Mission 3: S_3, S_4, S_6, S_7

Chaque mission a beaucoup de services. Nous pouvons trouver le même service dans les différentes missions. Par exemple, le service S_7 se trouve dans les trois missions.

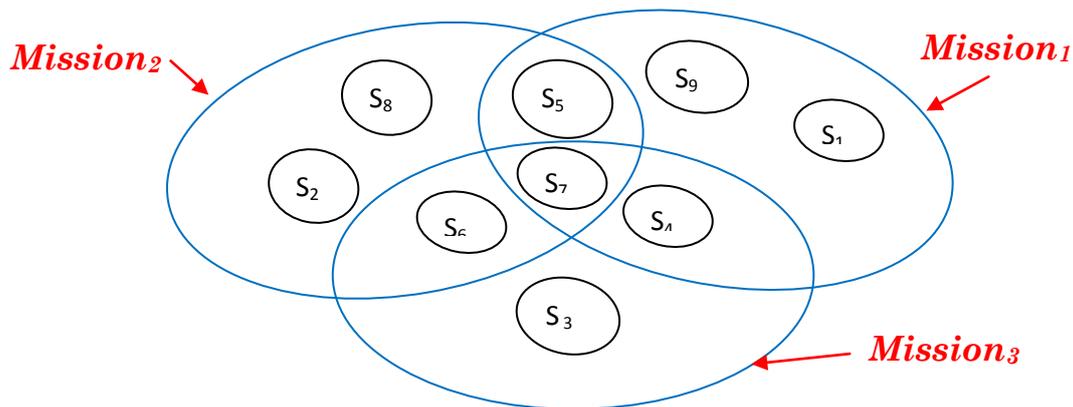


Fig.2.22 Les services et les missions.

- Modes d'opération

Les missions diriger et gérer les systèmes en conformité avec les spécifications. Mais à un moment donné, seul un sous-ensemble de ces missions est nécessaire pour atteindre les objectifs. Chacun de ces sous-systèmes est appelé un mode de fonctionnement ou bien opération. Un mode d'opération (OM_i) est un ensemble de services représentés par la relation suivante:

$$OM_i = (S_1, S_2, \dots, S_n)$$

Les modes opérations sont donnés par une classification générale des modes de fonctionnement des dispositifs industriels: hors exploitation, la configuration, le mode manuel ou automatique, nominal...etc.

- Gestion de modes d'opération

Les modes d'opérations sont connectés à exécuter ce que nous appelons gestion de mode d'utilisation. La demande de changement d'un mode à un autre mode doit être affichée pour des raisons de sécurité parce que le système peut échouer sur un mode OM_j d'utilisation lorsque certains services ne sont pas disponibles. La commutation est représentée par une variable booléenne b_{ij} . L'ensemble des modes de fonctionnement et les conditions de commutation b_{ij} sont décrits par un graphe nommé gestion de mode d'opération (*User operating mode management*).

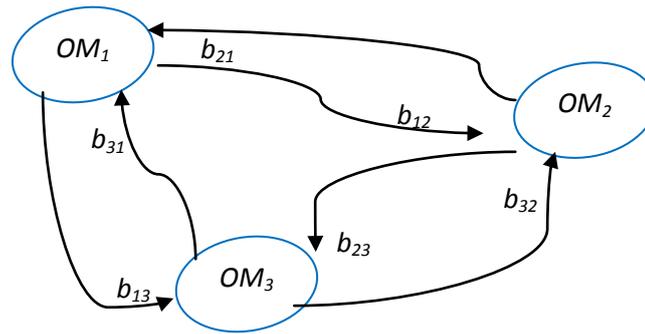


Fig.2.23 Diagramme de gestion de modes d'utilisation.

2.5.2 Bond graph et les modèles externes

L'utilisation des BG et le modèle externe comme une approche combinée pour superviser un processus est proposé par [18].

- **Sens des missions et services utilisant le bond graph**

Les services tels que définis dans les modèles externes sont représentés par des éléments du bond graph. Les services offerts par l'équipement de source d'énergie (mécanique : moteur), (thermiques : résistance à la chaleur) et (hydraulique pompe d'eau)...etc sont représentés par des sources d'effort ou de flux. Les services offerts par le rôle fonctionnel de l'équipement (stockage, le traitement, le transport, etc) sont représentés dans le bond graph par R, C, TF et éléments GY. Il convient toutefois de noter que les services en bond graph peuvent être quantifiés par des équations constitutives déduites de modèle BG. Les missions représentées par des ensembles de services sont destinés à répondre à tous les objectifs fixés par le cahier des charges, et bien sûr, ils sont basés sur les services fournis par l'équipement de niveau inférieur.

- **Modes d'opération par modèle BG**

De chaque mode d'opération OM_i correspond à un modèle bond graph

$$BGM_i : \quad OM_i \rightarrow BGM_i \quad (2.47)$$

- **Gestion modes d'opération par modèle BG**

A un moment donné, le procédé fonctionne dans un mode de fonctionnement nominal représenté par le model bond graph correspondant.

Soit BGM l'ensemble des modèles bond graph, et BGM_j le modèle bond graph correspondant au mode de fonctionnement j , et n le nombre total des modes de fonctionnement.

$$BGM = \{BGM_1, BGM_2, \dots, BGM_l, \dots, BGM_n\} \quad (2.48)$$

Soit l'ensemble b des transitions: $b = \{b_{ij}\}$

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

Où b_{ij} indique la condition requise pour passer de MBG_i à MBG_j , l'état de transition est représenté par la variable booléenne $b_{ij} \in \{0,1\}$

Il est considéré que toutes les conditions de changement de mode C_m sont correctement définies.

$$\forall BGM_i (i = 1, n) \in BGM, \exists j \text{ Tel que } b_{ij} \in C_m \text{ et } b_{ij} \neq 0 \quad (2.49)$$

BGM est l'ensemble des modèles BG. Les ensembles des BGM_i et les conditions de transition peuvent être représentés comme le montre la figure :

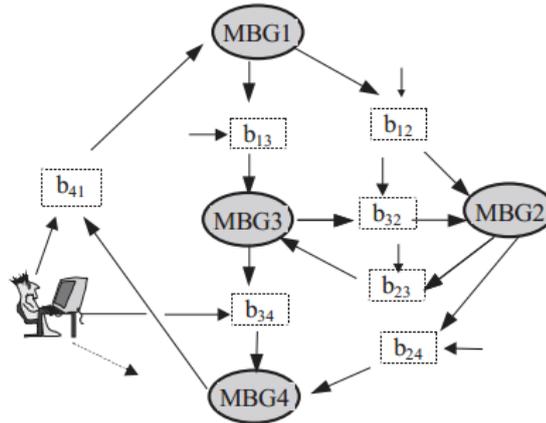


Fig.2.24 Diagramme de gestion mode d'opération en sens bond graph.

2.5.3 Application sur un système hydraulique

Ce système hydraulique est le même de la figure 2.14, sauf en ajoutant deux vannes de drainage au niveau des réservoirs C1,C2 : donc les éléments de ce système sont :

- 1 pompe hydraulique alimente les deux réservoirs C1 et C2.
- 2 réservoirs de stockage de fluide C1, C2.
- 4 valve (ON / OFF) valves R1, R2, R3 et R4.
- 2 capteurs de niveau De_1 , De_2 placés respectivement au-dessus du réservoir (C1, C2).
- Un régulateur PI et commande on-off de la vanne.

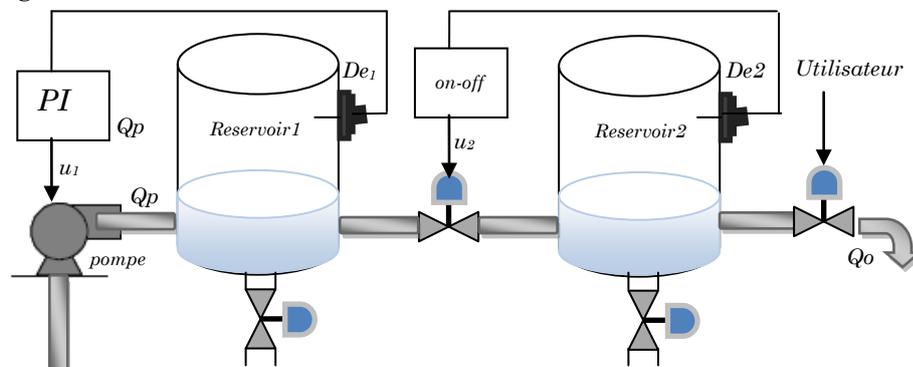


Fig.2.25 Description du processus.

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

- Missions et services

Une liste non exhaustive des missions et des services associés au système hydraulique est illustrée dans le tableau suivant:

N°	Missions	BG éléments
1	remplir les 2 réservoirs avec la pompe avec existence d'un utilisateur	$Sf_1, Se1, C1, C2, R1, R2, R_3, R_4, De1, De2$
2	Remplir les 2 réservoirs mais sans utilisateur.	$Sf_1, C1, C2, R1, R_3, R_4, De1, De2$
3	arrêter la pompe et vider tous les réservoirs	R_3, R_4
4	Maintenance	-

Tab.2.3 Liste des missions de système hydraulique.

Les différents modes d'opération du procédé sont les suivants:

- **Mode normal OM_1** : Le système fonctionne dans un mode normal (missions 1, 2, 3 et 4).
- **Mode défaillant OM_2** : Le système est défaillant (missions 2, 3, et 4).
- **Mode d'arrêt -stop- OM_3** : L'installation est drainé par les vannes R_3 et R_4 (vidange de l'installation), (missions 3 et 4).

Chaque mode d'opération (OM_i) est représentée par un modèle bond graph, il ya trois modèles:

- **BGM₁ : OM_1** (missions 1, 2, 3 et 4)
- **BGM₂ : OM_2** (missions 2, 3, et 4)
- **BGM₃ : OM_3** (missions 3 et 4)

Le diagramme de la gestion de mode d'opération de l'installation es représenté par la figure suivante :

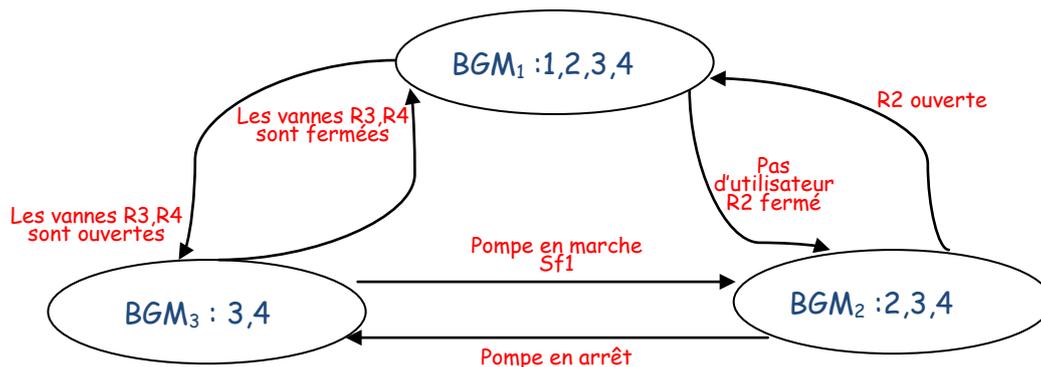


Fig. 2.26 Diagramme de la gestion de mode d'opération des deux réservoirs.

- Modèle bond graph des trois modes

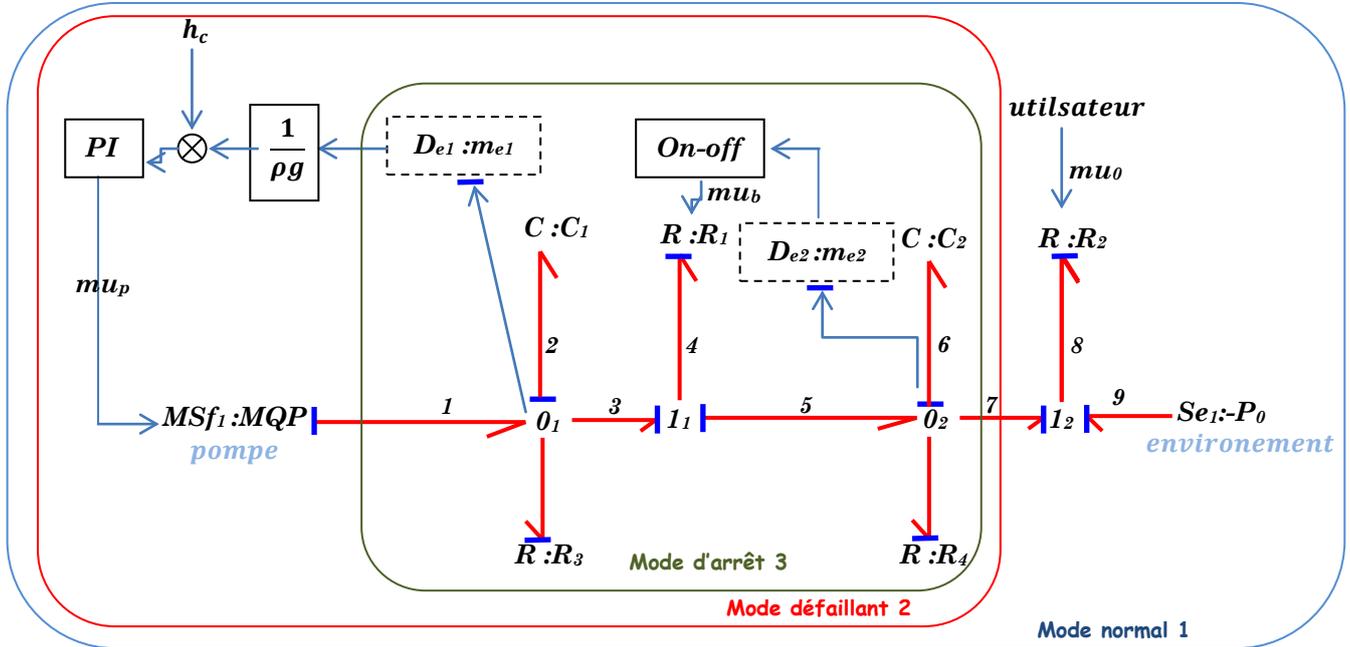


Fig.2.27 Modèle bond graph dans les trois modes.

- Détection et isolation des défauts par bond graph

Les équations structurelles et de comportement déjà présentés, seulement l'ajout d'une vanne R₃ à la jonction 0₁ et la vanne R₄ à la jonction 0₂

En utilisant l'algorithme 1 pour obtenir les ARR_s, en ajoutant aussi les RRAs de chaque régulateur, Les RRAs de ce système sont :

$$ARR1 = MQP - MinMax (m_{up}, pump_min, pump_max)$$

$$ARR2 = m_{up} - PI_Kp \left(hc - \frac{1}{\rho g} me1 \right) + PI_Ki \int \left(hc - \frac{1}{\rho g} me1 \right) dt$$

$$ARR3 = MQP - C_1 s me1 - Cd1. \operatorname{sgn} (me1 - me2) \sqrt{:(me1 - me2):} \cdot m_{ub} - 1/R_3 me1$$

$$ARR4 = Cd1. \operatorname{sgn} (me1 - me2) \sqrt{:(me1 - me2):} \cdot m_{ub} - C_2 s me2 -$$

$$Cd2. \operatorname{sgn} (me2 - Po) \sqrt{:(me2 - Po):} \cdot m_{u0} - \frac{1}{R_4} me2$$

$$ARR5 = m_{ub} - OnOff (me2, OnOff_min, OnOff_max)$$

- Matrice de Signature des défaillances

Toutes les défaillances du processus sont théoriquement détectables ($D_b = 1$) et non isolables ($I_b = 1$). quelques composants ne sont pas isolables tel-que T1-T2-V2-R3-R4, La non détectabilité et la non isolabilité des défaillances d'un composant, correspondent respectivement à $D_b = 0$ et $I_b = 0$.

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

r_i	D_{e1}	D_{e2}	<i>pompe</i>	T_1	T_2	V_1	V_2	R_3	R_4	<i>PI</i>	<i>On - Off</i>
r_1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
r_2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
r_3	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0
r_4	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0
r_5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
D_b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
I_b	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1

Tab.2.4 Matrice de Signature des défauts en mode normal.

- Simulation des résultats
- En mode normal

On remarque que les résidus ARR4 et ARR3 sont égales a zéro dans le mode normale de fonctionnement sauf dans le régime transitoire.

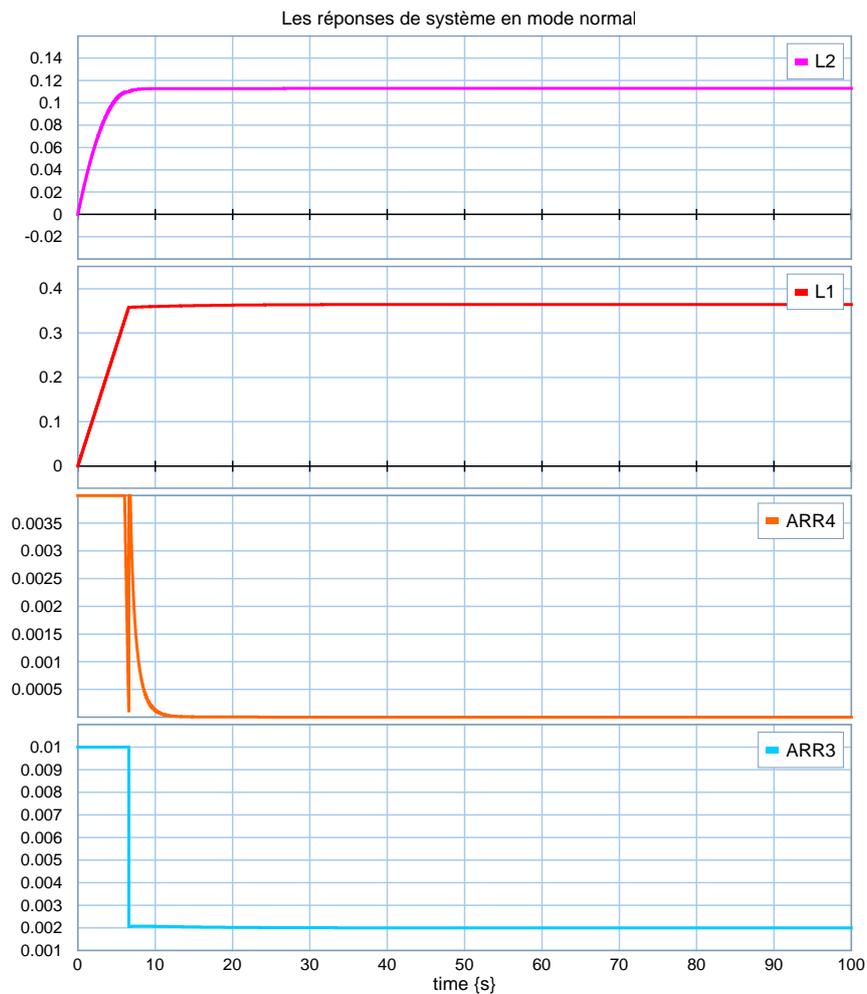


Fig.2.28 Les réponses de système en mode normal.

- Défaut de bouchage au niveau de la vanne 1

On applique un défaut paramétrique présente comme un bouchage dans la vanne 1, d'une durée de 50 s (250 s jusqu'à 300 s), les réponses des niveaux d'eau dans le réservoir 1,2, ARR3 ARR4 et le débit d'eau de la sortie sont montrées par les figures suivants :

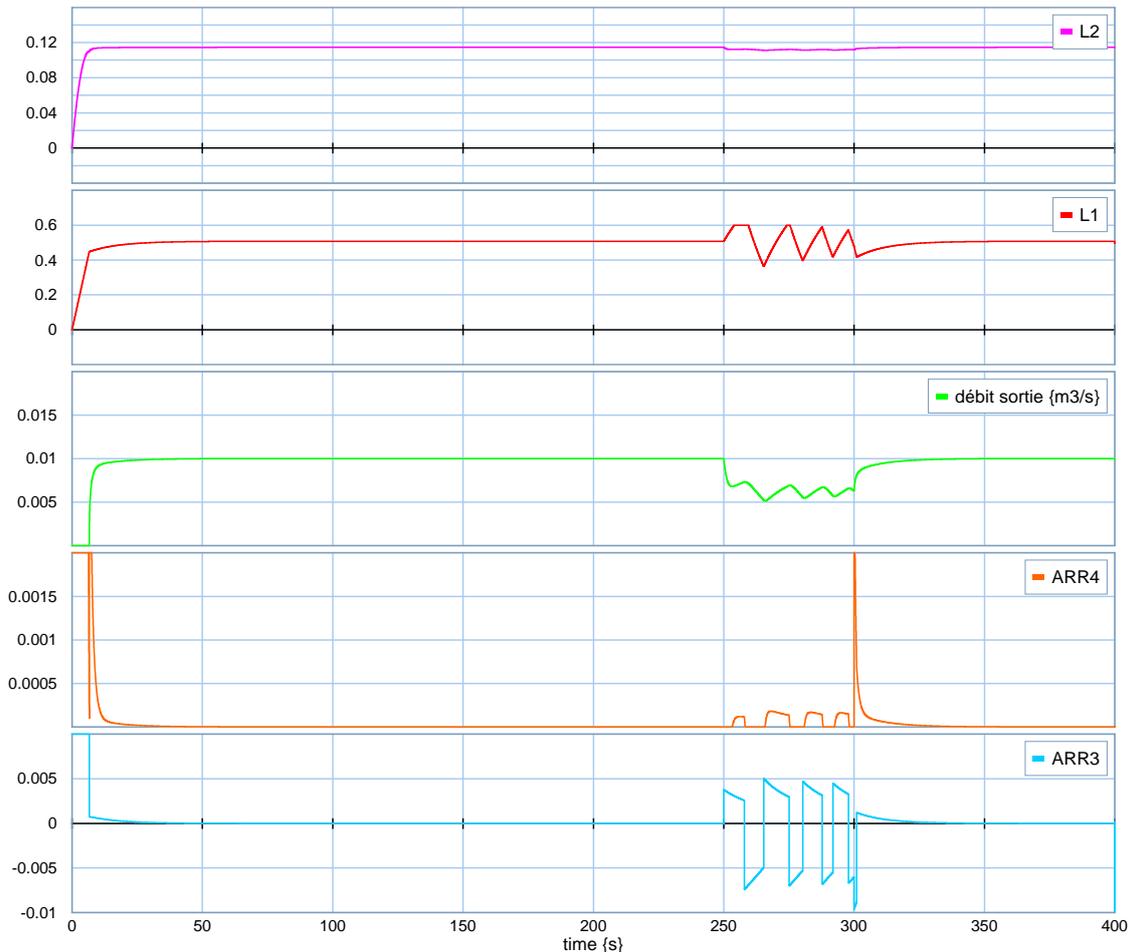


Fig.2.29 Les réponses des ARR3, ARR4, L1, L2 et débit de sortie vers l'utilisateur avec bouchage dans la vanne 1.

On remarque que le défaut paramétrique (bouchage dans la valve1) qui influe sur le coefficient de décharge de la valve1, fait une dégradation des performances du système, et peut engendrer sa défaillance totale si en fait un grand changement dans ce paramètre, Les courbes de ARR3 et ARR4 montrent bien que ce défaut est détectable par les 2 résidus.

- Procédure de décision

Nous supposons que le système est en mode de fonctionnement normal (OM_1). Par exemple, si la vanne R_1 n'est pas disponible en raison d'un bouchage, le mode normal (OM_1) doit être rejeté comme ce service fourni par la procédure de prise de décision n'est pas disponible. La transition vers le mode

Chapitre 2. Surveillance des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes

de fonctionnement réduit (OM_2) va également être rejetée parce que ce service est un élément de ce mode de fonctionnement, de sorte que la transition vers le mode d'arrêt (OM_3) est autorisée.

Nous vous proposons tel que présenté dans la figure 2.30 un algorithme de conception de la supervision des systèmes industriels fondés sur des bond graphs et les modèles externes. Le bond graph et le modèle externe peuvent être mis hors ligne. Seuls les résidus sont vérifiés en ligne pour la détection, isolation des défauts et le système de reconfiguration [41], [42].

Lorsque le modèle bond graph de chaque mode est déterminé, nous va décider d'effectuer la reconfiguration du système au niveau de chaque faute. S'il n'y a pas de faute, le test des résidus de système sont répétés.

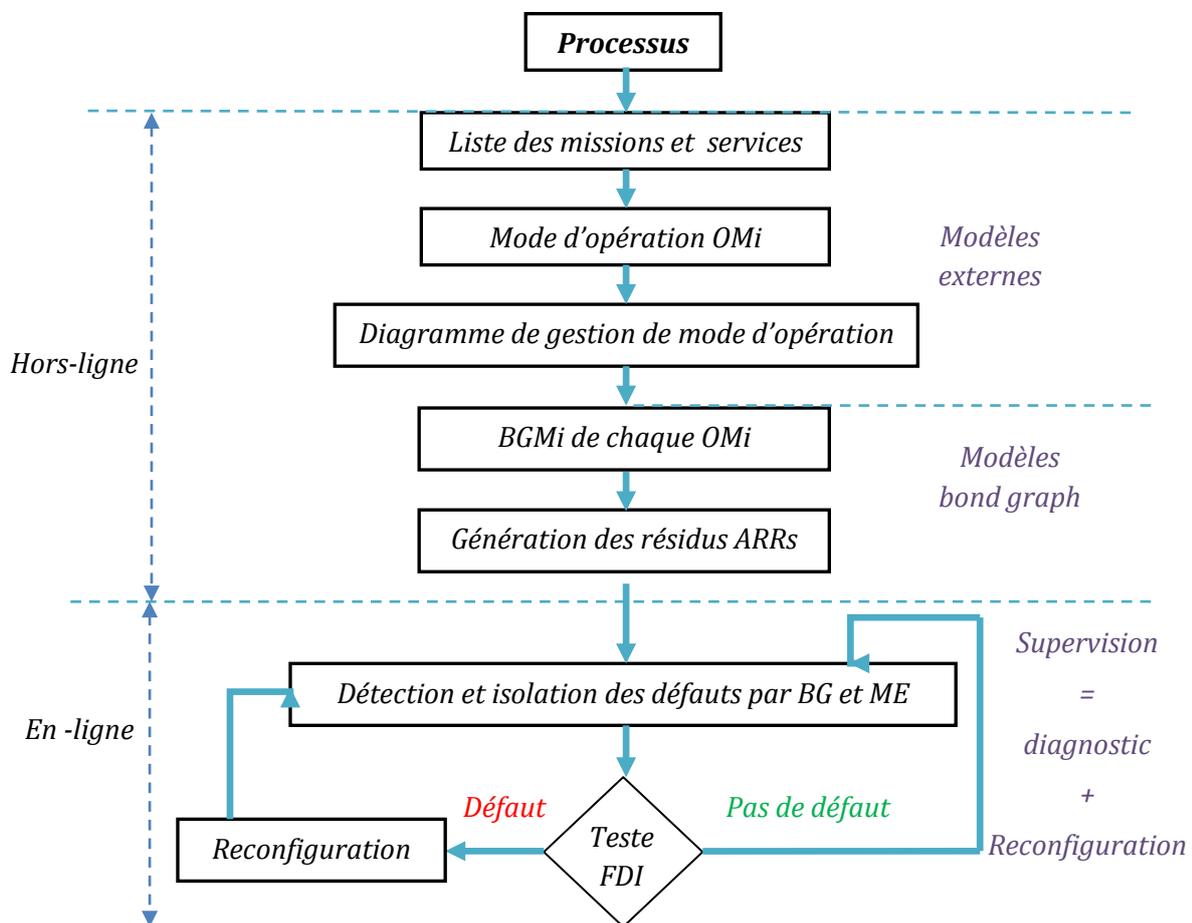


Fig.2.30 Algorithme de conception de la supervision des systèmes industriels par les bond graphs et les modèles externes.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la surveillance des systèmes industriels par l'approche bond graph, utilisant 2 algorithmes pour la génération des ARRs. Les résultats de l'exemple donné simulé par 20 sim v4.1 montrent bien l'efficacité des bond graphs pour la conception des systèmes de supervision.

Une approche combinée entre les bond graphs et les modèles externes est donnée pour la conception d'un système de supervision et appliquée sur l'exemple dynamique hydraulique.

Chapitre 3

Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est la modélisation, Détection et isolation des défauts d'un processus dynamique utilisent les algorithmes cités dans le chapitre deux. Le système étudié est une unité de production du béton (centrale à béton industriel), bien instrumenté et relié à un PC de supervision.

La détection de défauts correspond à la mise en évidence de tout phénomène anormal pouvant affecter le comportement du système surveillé. L'isolation et l'identification du défaut est définie comme la détermination des composants affectés par ce phénomène [44], [45].

On s'intéresse dans la modélisation, détection et isolation des défauts de la centrale sur les parties de système qui jouent le rôle de pesage et transport des matières premières.

3.2 Les centrales à bétons

Le béton est un mélange de ciment, de sable (granulats fins), petite pierre ou de gravier (agrégat grossier) et d'adjuvants. Lorsque l'eau est ajoutée ces produits, la réaction chimique du ciment est activée, cette réaction est responsable de la liaison du mélange pour former une masse solide.

Le béton comme étant un élément structurel en nombreuses applications, il y a donc plusieurs recettes pour avoir le mélange approprié selon l'application voulue. Par exemple, pour un mélange d'une force moyenne, connu sous le nom RN20, qui signifie que le mélange après 28 jours atteindra une résistance équivalente à la compression de 20 Nt/mm².

Les proportions de matériaux pour ce mélange sont : ciment, granulats, les adjuvants et l'eau, puisque les agrégats sont souvent humides, la masse d'eau doit être soigneusement calculé pour assurer ce mélange. En outre, le volume d'eau et les adjuvants utilisés peuvent dicter la force et l'ouvrabilité du mélange fini, et donc la tâche de dosage est très importante.

Les procédés de mélange et de l'état de mélangeur utilisé pour traiter le béton sont d'une grande importance, car ils déterminent dans une certaine mesure la microstructure du béton et donc sa performance globale [46].

3.2.1 Classification des centrales à bétons

Toutes les centrales à bétons ont des activités similaires sauf quelques différences dans les types de composants et le niveau d'automatisation.

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

Leur fonction principale est de mélanger les différents composants avec des quantités exactes qui donneront au béton produit les caractéristiques voulues. Les différents types de centrales à bétons peuvent être classés selon:

- La méthode de fabrication utilisée;
- La configuration de la centrale;
- Le degré de mobilité;
- Le degré d'automatisation ;

3.2.1.1 Répartition selon la méthode de fabrication utilisée

✓ Centrale sans malaxeur

Dans ce type de centrale, les matières premières sont uniquement dosées et déversées dans un camion malaxeur. Le malaxage a lieu dans le camion malaxeur; cette méthode, moins appréciée, est très peu utilisée de nos jours.

✓ Centrale avec malaxeur

Dans ce type de centrale, les matières premières ne sont pas uniquement pesées mais aussi mélangées dans un malaxeur fixe d'où le béton frais est déversé vers un mode de transport approprié.

✓ Centrale mixte

Dans le cas d'une centrale mixte, le sable, le ciment, l'eau et les éventuels adjuvants et/ou additions sont dosés et pré-malaxés dans un malaxeur fixe. Le malaxage du mortier et des gros granulats s'effectue dans le camion malaxeur.

3.2.1.2 Répartition selon le degré de mobilité

✓ Centrale fixe

Une centrale fixe ne peut être déplacée. Seuls certains éléments sont récupérables en cas de remontage.

✓ Centrale mobile

Une centrale mobile est équipée de roues permettant un déplacement sur route ou installation sur un bateau pour un déplacement sur eau.

3.2.1.3 Répartition selon le degré d'automatisation

✓ Centrale semi-automatique

L'opérateur de la centrale à béton doit faire le pesage et le dosage des composants de béton manuellement.

✓ Centrale automatique

Le dosage et le processus commande et supervision sont fait d'une façon totalement automatique, gérer par un logiciel de supervision et commande comme les systèmes SCADA, donc l'opérateur de centrale à béton seulement doit faire le choix de la formule utilisée et démarre le processus [47].

3.2.2 Le dosage des matières premières

Pour toute recette de béton à produire, une instruction de malaxage écrite doit être disponible; elle donne des détails sur le type et la quantité des composants.

- **Ciment**

Le ciment est généralement dosé en poids. Le dosage en volume est déconseillé étant donné que la masse volumique de ce matériau dépend fortement de son degré de compactage.

Dans les centrales à bétons, le dosage en volume n'est pas autorisé. Pour le dosage du ciment en vrac, l'extraction à la base du silo se fait par avec une vis à ciment vers une trémie peseuse située au-dessus du malaxeur.

- **Granulats**

• **Dosage en volume**

Le dosage en volume automatique consiste à que les quantités soient mesurer sous les trémies de vidange des silos grâce à un registre dont la hauteur d'ouverture est ajustable et à une petite bande transporteuse à vitesse réglable. Le volume des matières premières dosées est déterminé par la largeur (largeur utile de la bande), l'épaisseur (hauteur de l'ouverture) et la longueur (fonction de la vitesse de la bande et du temps d'ouverture du registre) de la couche prélevée de granulats.

• **Dosage en poids**

Le dosage en poids s'effectue différemment selon le type de centrale, le degré d'automatisation et la méthode de pesage utilisée (mécanique, électronique). On distingue :

- Le pesage séparé de chaque granulats.

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

- Le pesage cumulatif où l'on pèse successivement les différents granulats dans une même trémie.
- **Eau**

La mesure du taux d'humidité des granulats permet de déterminer la quantité d'eau présente dans les granulats. La quantité d'eau à ajouter au mélange est la quantité totale d'eau de gâchage prévue, diminuée de la quantité d'eau contenue dans les granulats.

Pour une mesure correcte, les installations sont pourvues :

 - soit d'un réservoir à eau avec indicateur de niveau et des capteurs de poids.
 - soit d'un réservoir à eau avec compteur volumétrique.
- **Adjuvants et additions**

L'utilisation d'adjuvants et d'additions nécessite certaines précautions.

Les adjuvants et les additions liquides sont généralement dosés en poids par un petit réservoir qui contient des capteurs de poids [47].

3.2.3 Description de la centrale à béton étudiée

La centrale à béton étudiée (figure 3.1) est implantée dans la ville Tadjanet - wilaya de Mila dans le cadre de projet d'autoroute Est-Ouest d'Algérie du Consortium Japonais pour d'Autoroute Est-Ouest Algérienne (COJAAL) de la section Sétif - Constantine.



Fig.3.1 La centrale à béton étudiée.

Elle est de type fixe et automatique de capacité de production 120 m³/h HBP120. Elle est commandée par un système de supervision qui utilise un automate

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

programmable Siemens et une interface homme machine (HMI) appelée SKOB++ conçu par le constructeur de cette centrale S-couvrot.

Toutes les matières premières : ciment, granulats, eau et adjuvants sont stockés par lots dans des silos, des réservoirs et des trémies. La centrale à béton comporte :

- 02 silos de ciment d'une capacité de stockage 200 tonne de chaque silo.
- 04 trémies de stockage des granulats : 0/3-3/8-8/15-15/25.
- 2 cuves de stockage des adjuvants d'un volume de 2m³ de chaque réservoir.
- 1 réservoir d'eau externe de volume 16 m³.
- Une chambre contient le malaxeur et les trémies de pesages des ciments, adjuvants et d'eau.

Toutes les actions de dosage et de mélange sont affichées. Pour commencer la production, l'opérateur du système doit choisir la recette souhaitée et insère la quantité du béton voulue grâce à l'interface utilisateur graphique comme dans la figure 3.2.



Fig.3.2 Salle de commande de la centrale à béton.

Ensuite, le processus de production de béton commence par l'étape de préparation qui est le dosage ou le pesage des différents types de matériaux (granulats, ciment, adjuvants et l'eau), après il passe à l'étape de mélange, mais seulement quand tous les ingrédients sont regroupés correctement. Le système commence à compter le temps de mélange après que tous les composants sont placés dans le malaxeur et quand le temps s'écoule, le mélange est prêt, le camion malaxeur est chargé avec le produit fini.

3.3.1 Modélisation du circuit d'alimentation et du système de dosage d'eau par bond graph

Le système comporte : un réservoir externe C1 de volume 16 m^3 alimenté avec l'eau par une pompe P1, situé hors la centrale à béton. Le niveau d'eau de ce réservoir est maintenu grâce à un capteur de niveau d'eau L1.

Le réservoir interne C2 d'un volume de 3 m^3 est relié par une pompe P2, cette dernière est reliée à son tour avec le réservoir C1. La pompe P2 a pour but de donner la pression nécessaire pour pousser l'eau vers la chambre du malaxeur. Un capteur de niveau d'eau L2 est placé dans C2. Une commande agit sur la pompe P2 pour contrôler le niveau du réservoir C2.

Le système de dosage est construit par un petit réservoir (trémie) avec un capteur de poids et une vanne automatique on-off. Quand le système démarre le pesage d'eau, la vanne est ouverte jusqu'à où le réservoir atteint la quantité d'eau souhaitée de la formule. Le système est bien détaillé dans la figure suivante :

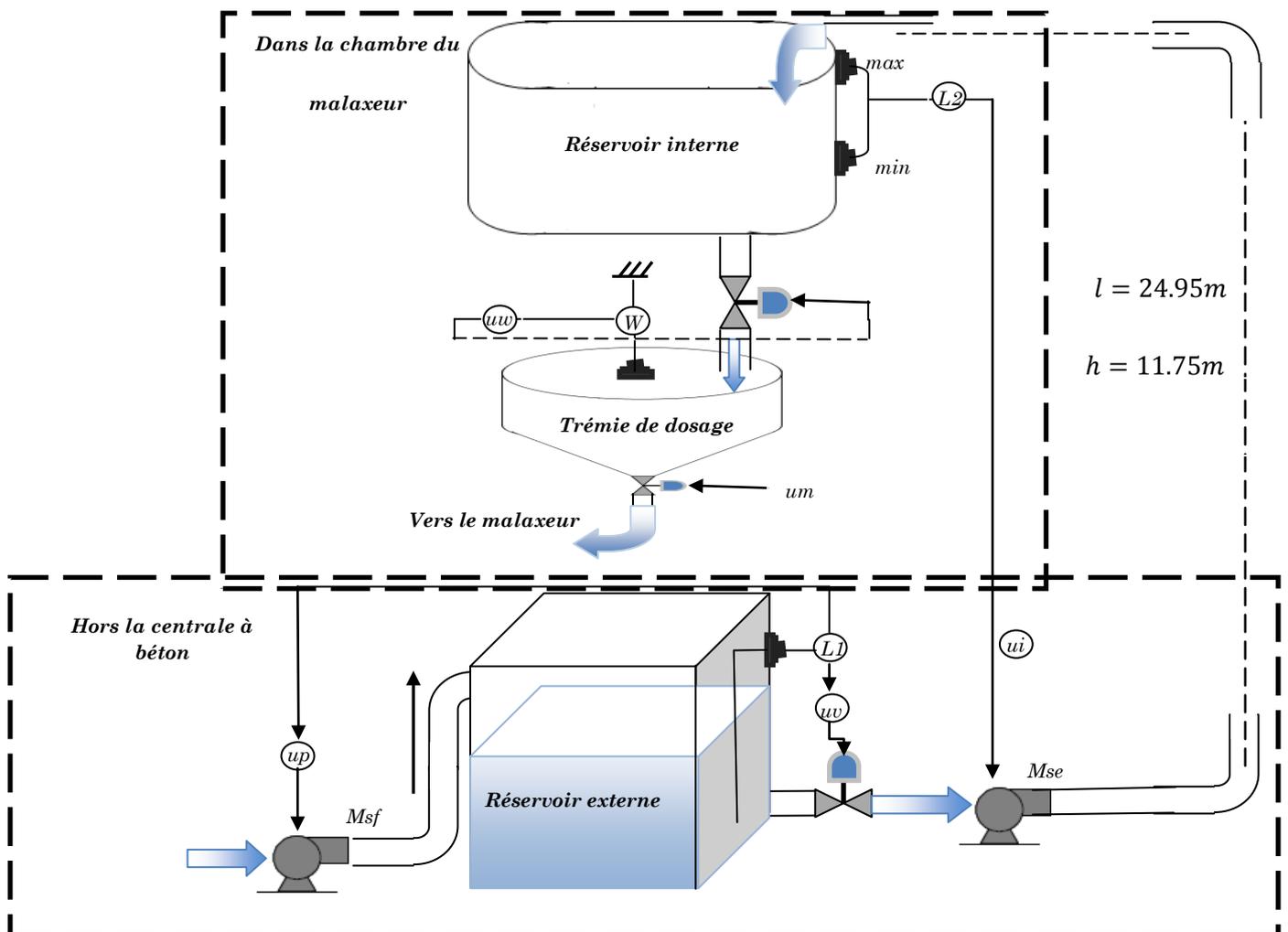


Fig.3.4 Circuit d'alimentation et système de dosage d'eau.

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

Le modèle pseudo bond graph en causalité intégrale de ce système est présenté dans la figure suivante:

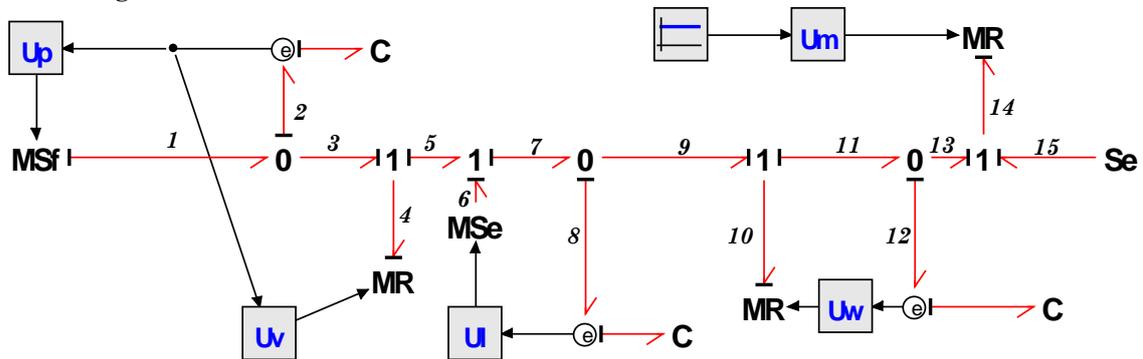


Fig.3.5 Modèle pseudo bond graph du circuit d'alimentation et du dosage d'eau.

Afin de faciliter la modélisation, on a utilisé la bibliothèque développée par le logiciel 20 Sim V4.1 2009. On peut représenter la source Msf par une pompe (qui existe dans la bibliothèque hydraulique), ainsi qu'on utilise les capteurs de déplacements parce qu'ils donnent directement la masse ou le volume d'eau au lieu qu'on utilise le capteur de niveau qui est déduit par l'effort (la pression) $P = \rho gh$; donc : $h = \frac{P}{\rho g}$, tel que ρ est la densité de l'eau et g est la gravité.

En respectant la causalité des éléments, le modèle bond graph traduit est :

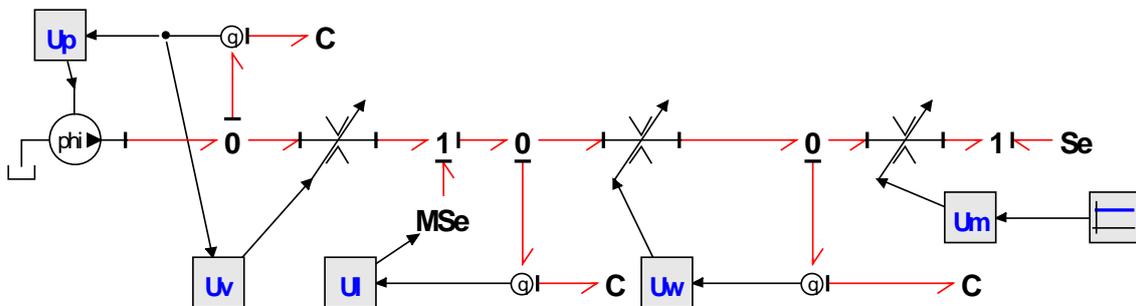


Fig.3.6 Modèle pseudo bond graph de circuit d'alimentation et dosage d'eau en utilisant la bibliothèque du 20 sim 4.1

La cuve externe, interne ou bien la trémie de pesage sont soumises à un régime thermodynamique sous-saturé, La pression au fond du réservoir ne dépend que du volume ou de la masse.

$$P = \rho gh = \rho g \frac{V}{A} = \frac{\rho g}{A} \cdot \frac{m}{\rho} = \frac{g \cdot m}{A} \quad (3.1)$$

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

Où P , ρ , g , h , V , A , m désignent respectivement la pression dans la cuve, la masse volumique de l'eau, la gravité, la hauteur de l'eau dans la cuve, le volume de l'eau dans la cuve, la section de la cuve et la masse stockée.

La capacité hydraulique de l'élément C peut être présentée comme suit :

$$C_h = \frac{A}{g} \quad (3.2)$$

La pompe avec conduite est un système largement utilisé dans les procédés industriels, il consiste le système d'alimentation en eau. Le modèle bond graph de ce type de systèmes dépend de leurs propriétés spécifiques. Certaines références présentent la pompe comme une source d'effort Se qui augmente la pression d'entrée Pin d'une valeur ΔP comme dans notre cas la pompe qui mène l'eau vers le réservoir interne est présentée comme une source d'effort modulé [48].

- **Les équations structurelles F_J :**

Les équations structurelles des jonctions 0 sont :

$$\begin{aligned} \Phi_1: \quad MQp - f_2 - f_3 &= 0 \\ \Phi_2: \quad f_7 - f_8 - f_9 &= 0 \\ \Phi_3: \quad f_{11} - f_{12} - f_{13} &= 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Les équations structurelles des jonctions 1 sont :

$$\begin{aligned} \Phi_4: \quad e_3 - e_4 + e_5 &= 0 \\ \Phi_5: \quad e_5 + e_6 - e_7 &= 0 \\ \Phi_6: \quad e_9 + e_{10} - e_{11} &= 0 \\ \Phi_7: \quad e_{13} + e_{14} - P_0 &= 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

- **Les équations de comportement F_B :**

Les équations constitutives pour les éléments sont :

$$C: \quad \Phi_8: s.e_2 = \frac{1}{C} f_2 \quad (3.5)$$

$$C1: \quad \Phi_9: s.e_8 = \frac{1}{C_1} f_8 \quad (3.6)$$

$$C2: \quad \Phi_{10}: s.e_{12} = \frac{1}{C_2} f_{12} \quad (3.7)$$

$$MR: \quad \Phi_{11}: f_4 = C_d \cdot \text{sign}(e_4) \sqrt{|e_4|} U_v \quad (3.8)$$

$$MR1: \quad \Phi_{12}: f_{10} = C_{d1} \cdot \text{sign}(e_{10}) \sqrt{|e_{10}|} U_w \quad (3.9)$$

$$MR2: \quad \Phi_{13}: f_{14} = C_{d2} \cdot \text{sign}(e_{14}) \sqrt{|e_{14}|} U_m \quad (3.10)$$

- **Les équations des mesures F_Y :**

Les équations des capteurs De_1 ; De_2 ; sont :

$$\Phi_{14}: \quad me = e_2 \quad (3.11)$$

$$\Phi_{15}: \quad me1 = e_8 \quad (3.12)$$

$$\Phi_{16}: \quad me2 = e_{12} \quad (3.13)$$

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

- Les équations des contrôleurs :

$$\Phi_{17}: U_p = \begin{cases} P_{max}, & \text{Si } 0 < \frac{1}{\rho g} me < Niv_{max} \\ P_{Min}, & \text{Si } \frac{1}{\rho g} me \geq Niv_{Max} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\Phi_{18}: U_v = On_off(Niv - min \text{ dans réservoir externe }) \quad (3.15)$$

$$\Phi_{19}: U_i = \begin{cases} pre_{max}, & \text{Si } 0 < \frac{1}{\rho g} me_1 < Niv_{max} \\ pre_{Min}, & \text{Si } \frac{1}{\rho g} me_1 \geq Niv_{Max} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\Phi_{20}: U_w = On_off(masse \ d'eaude \ la \ formule = 175kg) \quad (3.17)$$

$$\Phi_{21}: U_m = On_off(commande \ de \ demarage \ de \ malaxage) \quad (3.18)$$

- Les équations des sources contrôlées :

$$\Phi_{22}: MSf = \begin{cases} Pump_Min, & \text{if } U_p = p_{max} \\ Pump_Max, & \text{if } U_p = p_{max} \end{cases} \quad (3.19)$$

$$= MinMax(U_p, Pump_Min, Pump_Max)$$

$$\Phi_{23}: MSe = \begin{cases} Pression_Min, & \text{Si } U_i = pre_min \\ pression_{Max}, & \text{Si } U_i = pre_max \end{cases} \quad (3.20)$$

$$= MinMax(U_i, Pression_Min, Pression_Max)$$

- Résultats de simulation :

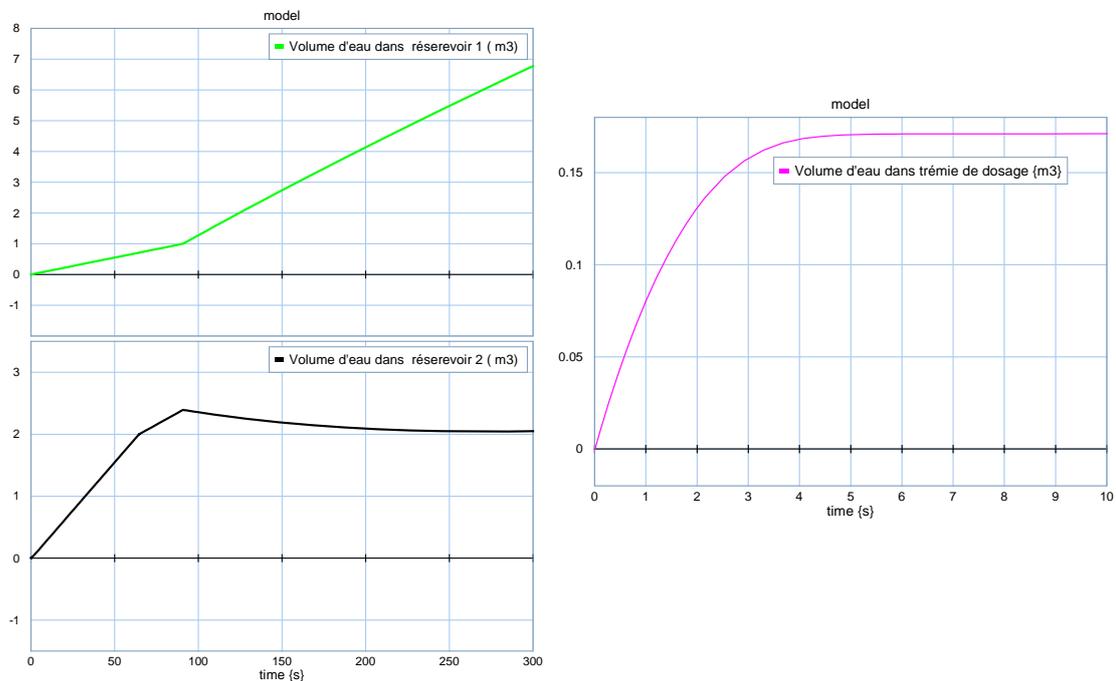


Fig.3.7 Les volumes d'eau dans les trois réservoirs.

On remarque que le volume d'eau dans la trémie du dosage a atteint la valeur souhaitée de la formule 175 Kg d'eau dans 1 m³ béton, tout en tenant en compte la masse volumique d'eau égale à 998.2Kg/m³ à 20 °C.

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

Le modèle pseudo bond graph en causalité intégrale de ce système est représenté dans la figure suivante:

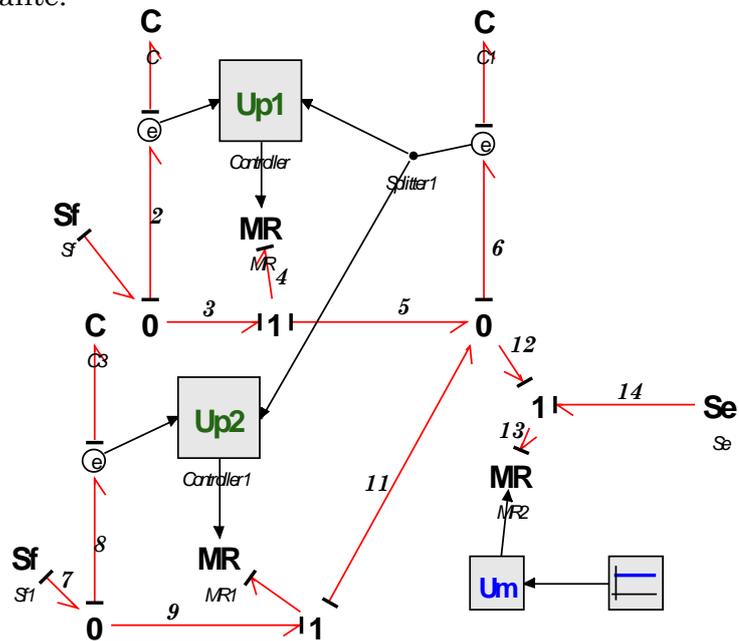


Fig.3.9 Modèle pseudo bond graph du circuit d'alimentation et du dosage des adjuvants.

La modélisation de ce modèle par 20 Sim V4.1 2009 est représentée dans la figure suivante en utilisant la bibliothèque développée de ce logiciel.

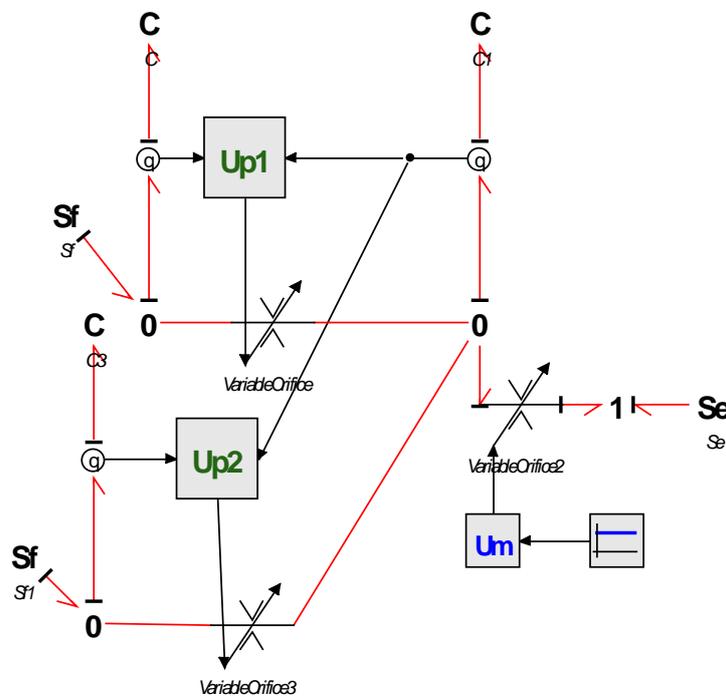


Fig.3.10 Modèle pseudo bond graph du circuit d'alimentation et du dosage des adjuvants en utilisant la bibliothèque de 20 Sim v 4.1.

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

Dans ce modèle, le débit d'adjuvant qui permet de remplir les deux cuves de stockages d'adjuvants est considéré comme nul c'est-à-dire les cuves sont initialement pleines d'adjuvants à température ambiante, donc les deux cuves sont soumises à un régime thermodynamique sous-saturé.

Les deux pompes chargées de déplacer les deux adjuvants à la trémie de pesage sont présentées par les deux résistances MR et $MR1$. Ces dernières sont modélisées par les caractéristiques des pompes données comme une courbe entre la pression ΔP et le flux de masse généré par les deux pompes \dot{m} . Les équations 3.21 et 3.22 des caractéristiques des deux pompes sont données dans [48].

$$\dot{m}_4 = b1(k_1.(P_3 - P_5) + k_2) \quad (3.21)$$

$$\dot{m}_{10} = b2(k_3.(P_9 - P_{11}) + k_4) \quad (3.22)$$

k_1, k_2, k_3 et k_4 sont des paramètres des caractéristiques des deux pompes. $b1$ et $b2$ sont des variables booléennes (0,1) délivrées par le régulateur tout-ou-rien de la pression.

- **Les équations structurelles F_J :**

Les équations structurelles des jonctions 0 sont :

$$\begin{aligned} \Phi_1: Sf - f_2 - f_3 &= 0 \\ \Phi_2: f_5 + f_{11} - f_6 - f_{12} &= 0 \\ \Phi_3: f_7 - f_8 - f_9 &= 0 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Les équations structurelles des jonctions 1 sont :

$$\begin{aligned} \Phi_4: e_3 - e_4 + e_5 &= 0 \\ \Phi_5: e_9 + e_{10} - e_{11} &= 0 \\ \Phi_6: e_{12} - e_{13} - e_{14} &= 0 \end{aligned} \quad (3.24)$$

- **Les équations de comportement F_B :**

Les équations constitutives pour les éléments sont :

$$C: \Phi_7: s.e_2 = \frac{1}{c} f_2 \quad (3.25)$$

$$C1: \Phi_8: s.e_6 = \frac{1}{c_1} f_6 \quad (3.26)$$

$$C2: \Phi_9: s.e_8 = \frac{1}{c_2} f_8 \quad (3.27)$$

$$MR: \Phi_{10}: f_4 = (k_1.(e_3 - e_5) + k_2) U_{p1} \quad (3.28)$$

$$MR1: \Phi_{11}: f_{10} = (k_1.(e_9 - e_{11}) + k_2) U_{p2} \quad (3.29)$$

$$MR2: \Phi_{12}: f_{13} = C_{d2} \cdot \text{sign}(e_{13}) \sqrt{|e_{13}|} U_m \quad (3.30)$$

- **Les équations des mesures F_Y :**

Les équations des capteurs De_1 ; De_2 ; sont :

$$\Phi_{13}: me = e_2 \quad (3.31)$$

$$\Phi_{14}: me1 = e_6 \quad (3.32)$$

$$\Phi_{15}: me2 = e_8 \quad (3.33)$$

- **Les équations des contrôleurs :**

$$\Phi_{16}: U_{p1} = \begin{cases} Pre_max, & Si \frac{1}{\rho g} me > Niv_min \text{ et} \\ Pre_min, & Si \frac{1}{\rho g} me \geq Niv_Max \end{cases} \quad (3.34)$$

$$\Phi_{17}: U_{p1} = \begin{cases} P_max, & Si 0 < \frac{1}{\rho g} me < Niv_max \\ P_Min, & Si \frac{1}{\rho g} me \geq Niv_Max \end{cases} \quad (3.35)$$

$$\Phi_{18}: U_w = On_off(\text{masse d'adjuvant dans la formule}) \quad (3.36)$$

$$\Phi_{19}: U_m = On_off(\text{commande de demarage de malaxage}) \quad (3.37)$$

- **Résultats de simulation :**

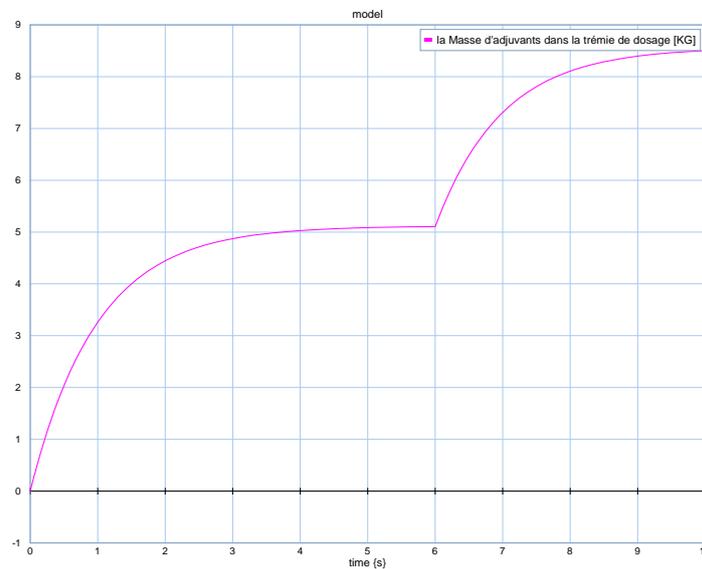


Fig.3.11 La masse des adjuvants dans la trémie de dosage.

On remarque que la masse d'adjuvant N⁰:01 a été chargée dans l'intervalle de 0s à 6s jusqu'à ce que la quantité atteigne la valeur souhaitée de la formule 5.2 Kg d'adjuvants dans 1 m³ béton, si on tient en compte la masse volumique d'adjuvant qui est égale à 1700 Kg/m³ à 20 °C avec le débit de la pompe est égal 2.23 m³/h, à une hauteur de 9.55m. La même chose s'applique pour le deuxième adjuvant N⁰:02, quand le processus du premier pesage est terminé, le deuxième processus du pesage d'adjuvant N⁰:02 démarre directement par le déclenchement de la pompe 2. La masse augmente jusqu'à la valeur déterminée dans la formule.

3.3.3 Modélisation de stockage, de transport et de système de dosage de ciment par bond graph

Le système de stockage des ciments comporte deux silos identiques de capacité 200 tonne dans chacun, le système d'alimentation du ciment se fait de la même manière dans les deux silos, ce qui nous laisse étudier un seul silo et faire une seule modélisation.

Le système de dosage comporte : une trémie de pesage avec deux capteurs de poids alimentée par un convoyeur du ciment. Le transport du ciment du silo vers la trémie de dosage passe par un convoyeur. Ce dernier se consiste d'un moteur réducteur et un arbre à vis.

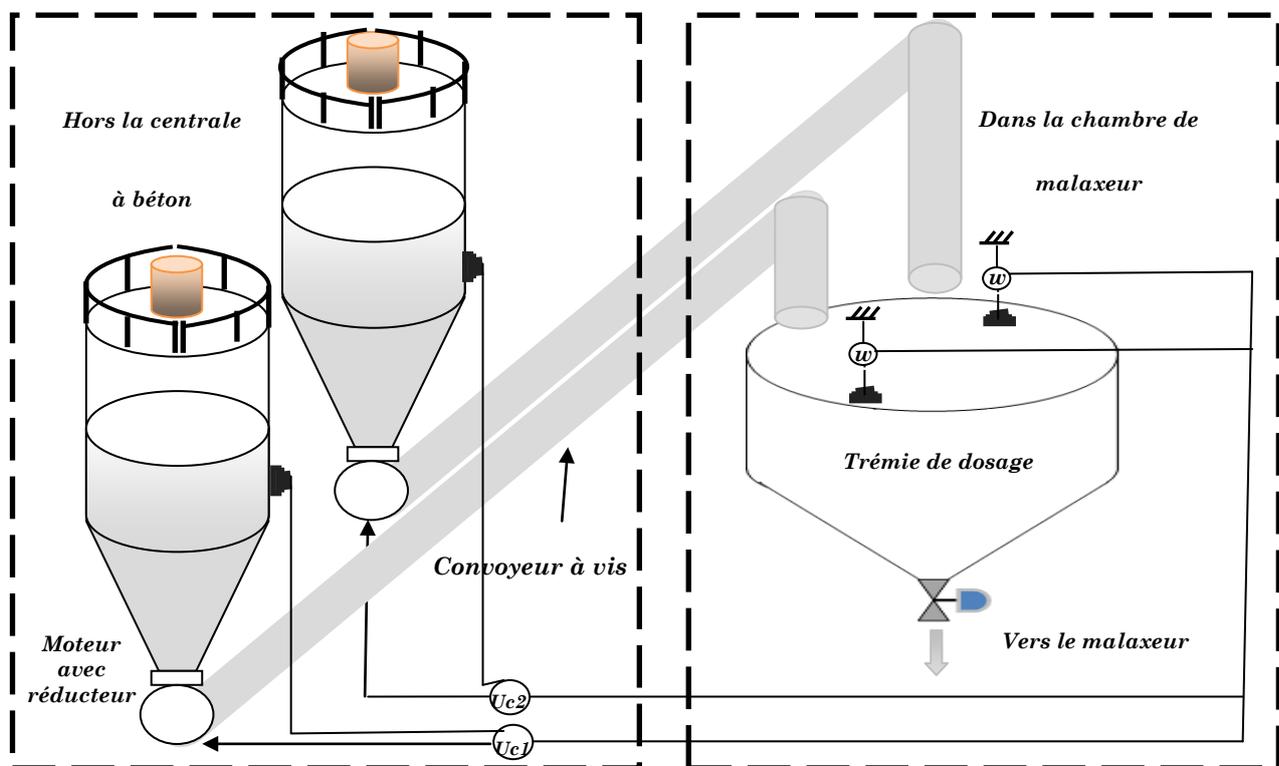


Fig.3.12 Le système de stockage et dosage de ciment.

Pour commencer le processus du pesage : la commande du moteur est actionnée, ce qui laisse le ciment passe dans la vis jusqu'à la trémie. Le moteur s'arrête une fois la consigne de la masse du ciment atteint la valeur déjà prescrite dans la formule du béton. Donc pour un bon pesage, nous avons besoin d'un bon fonctionnement du convoyeur (moteur, réducteur et arbre à vis).

Ce système électromécanique peut être présenté comme suit :

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

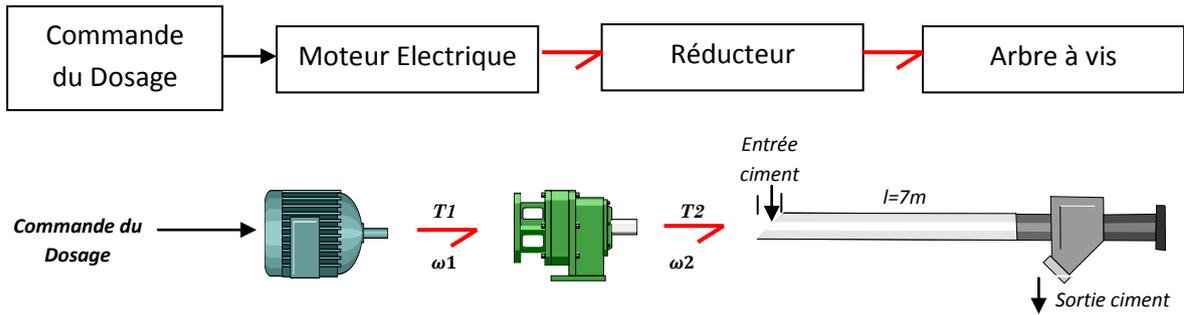


Fig.3.13 Convoyeur du ciment à vis.

Le modèle bond graph simplifié du convoyeur à vis est présenté dans la figure 3.14. Dans ce modèle bond graph, la partie mécanique du moteur est modélisée par un élément résistif représentant le frottement visqueux R:R1 et un élément de stockage d'énergie cinétique représentant l'inertie du rotor I:I1.

Le réducteur est modélisé par un transformateur TF avec une constante de réduction $1/n$. L'élément C représente le coefficient d'élasticité de l'arbre à vis, le frottement visqueux d'arbre à vis [49].

L'inertie de l'arbre à vis et de ciment est présentée par I:I2, en supposant que tout le cylindre est plein (vis + ciment). Autrement dit, le cylindre plein contient une seule matière. L'inertie d'un cylindre plein se calcule de la façon suivante :

$$J = \int_0^R e^2 (\rho 2\pi r h) = \frac{1}{2} \rho \pi R^4 h = \frac{1}{2} M R^2 \text{ avec } M = \rho \pi R^2 h \quad (3.38)$$

Où : le cylindre plein de rayon R et de hauteur, ρ la masse volumique de la matière.

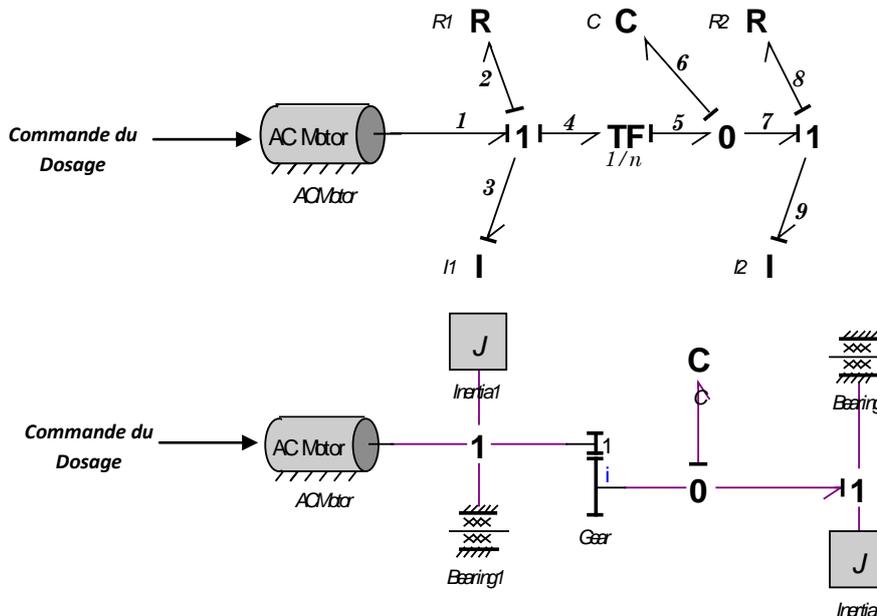


Fig.3.14 Modèle Bond graph du convoyeur à vis.

Du Modèle Bond Graph, les équations suivantes sont générées :

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

- **Les équations structurelles F_J :**

Les équations structurelles des jonctions 0 sont :

$$\Phi_1: f_5 - f_6 - f_7 = 0 \quad (3.39)$$

Les équations structurelles des jonctions 1 sont :

$$\begin{aligned} \Phi_2: e_1 - e_2 - e_3 - e_4 &= 0 \\ \Phi_3: e_7 - e_8 - e_9 &= 0 \end{aligned} \quad (3.40)$$

L'équation structurelle de TF :

$$\Phi_4: e_4 = \frac{1}{n} e_5, \quad f_5 = \frac{1}{n} f_4 \quad (3.41)$$

- **Les équations de comportement F_B :**

Les équations constitutives pour les éléments sont :

$$\Phi_5: R_1: e_2 = R_1 f_2 \quad (3.42)$$

$$\Phi_6: R_2: e_8 = R_2 f_8 \quad (3.43)$$

$$\Phi_7: I_1: f_3 = \frac{1}{J_1} \int e_3 dt \quad (3.44)$$

$$\Phi_8: I_2: f_9 = \frac{1}{J_2} \int e_9 dt \quad (3.45)$$

$$\Phi_9: C: \frac{1}{k} \text{ et } e_6 = \frac{1}{C} \int f_6 dt = k \int f_6 dt \quad (3.46)$$

- **Les équations des contrôleurs :**

$$\Phi_{10}: U_{c1} = on - off AC \text{ (démarrage de pesage)} \quad (3.47)$$

- **Résultats de simulation :**

Dans notre cas, le moteur à vis a une puissance de 18.5 KW avec 1500 tr/min. Le réducteur peut réduire le nombre de tour par minute jusqu'à 120tr/min et augmente le couple à 2980 N.M.

L'inertie de l'arbre à vis et du ciment est considérée comme un cylindre plein, les résultats de simulation du convoyeur à vis en charge sont présentés dans la figure suivante :

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

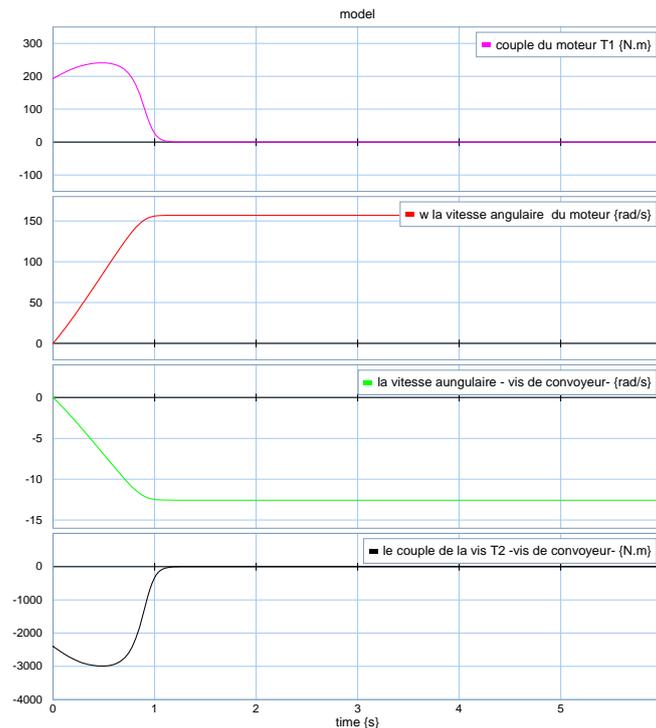


Fig.3.15 Résultats de simulation du convoyeur à vis.

On remarque que le couple du moteur démarre par le couple de démarrage de ce moteur jusqu'à atteindre le couple maximale en charge du moteur. La vitesse angulaire du moteur augmente de zéro jusqu'à atteindre 1500 tr/min. Le réducteur diminue la vitesse angulaire et augmente le couple de vis convoyeur avec le ciment.

3.3.4 Modélisation de stockage, de transport et de système de dosage des granulats par bond graph

Le système de stockage des granulats consiste de quatre trémies identique avec une capacité de stockage volumique égale à 9m^3 où chaque trémie est destiné de stocker un type de granulats selon le diamètre (0/3-3/8-8/15-15/25), ces trémies sont conçues de façon que le chargement se fait en haut et déchargement et alimentation du tapi convoyeur en bas. Chaque trémie comporte un capteur booléen indiquant l'existence des matériaux dans les trémies.

L'opération du dosage se fait sur le tapis convoyeur d'une façon statique, c'est-à-dire le moteur du convoyeur est en arrêt quand le processus du pesage commence par l'ouverture des portes situées au-dessous de la trémie, les matériaux se renversent par effet de gravité. Une fois la quantité des granulats atteint la consigne de la formule, les portes se ferment et le moteur démarre en charge (voir fig3.16).

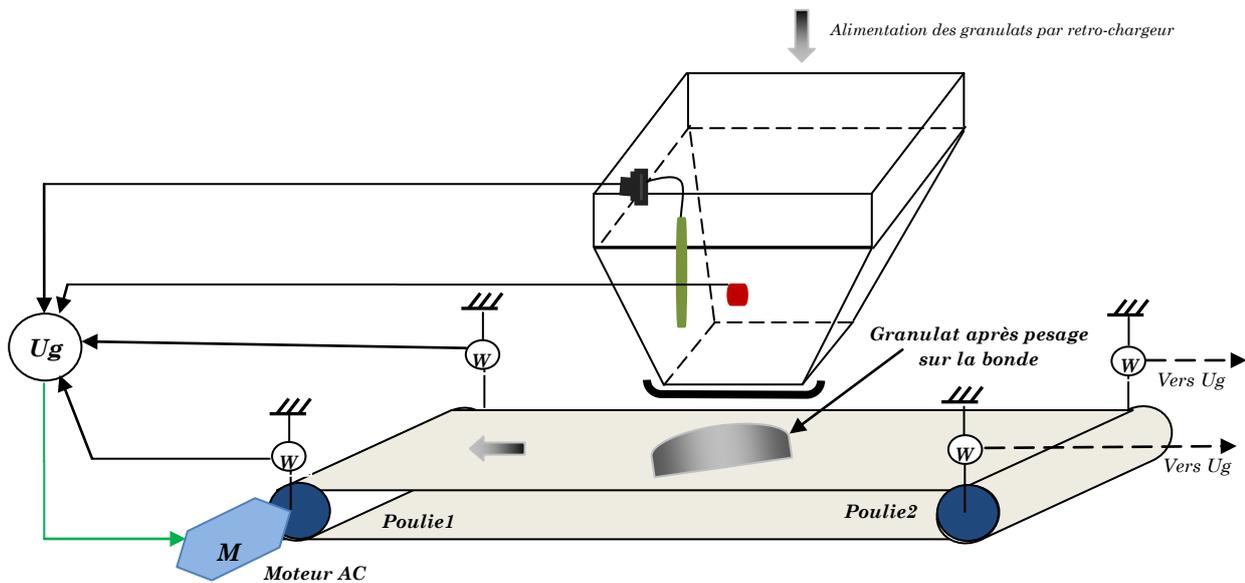


Fig.3.16 Description de stockage, de transport et système de dosage des granulates.

Comme le pesage se fait d'une manière statique, on modélise le convoyeur avec les agrégats mesurés. Le rôle du convoyeur est de transporter les agrégats vers le malaxeur. Ce système électromécanique peut être présenté comme suit :

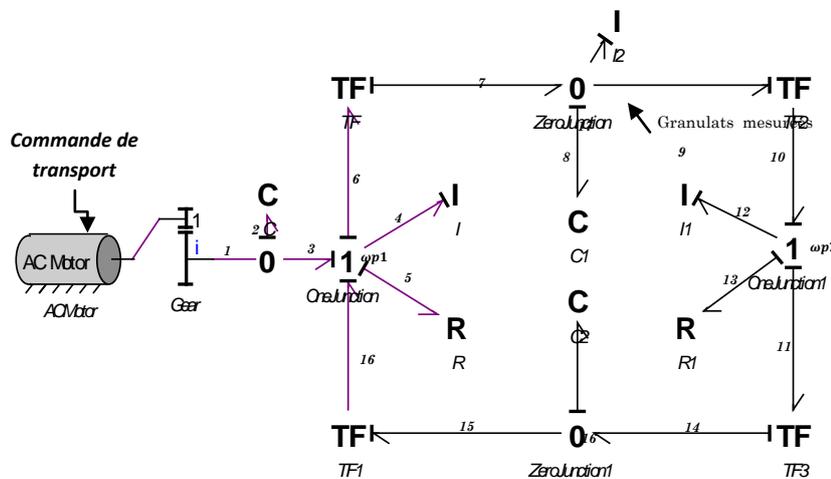


Fig.3.17 Modèle bond graph de système de transport avec granulates mesurés.

Dans le modèle bond graph, L'élément C présente le coefficient d'élasticité de l'arbre du réducteur, la jonction 1 présente la poulie motrice (conductrice) de diamètre r_1 avec sont inertie $I:I$ et le frottement $R:R$. la jonction 1_1 présente la poulie de serrage avec un diamètre r_2 avec une inertie $I:I_1$ et le frottement $R:R_1$,

Les éléments C_1, C_2 représentent le coefficient de rigidité de tapis k_b .

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

Les éléments TF présentent le transfert de diamètre de r_1 vers r_2 et r_2 vers r_1 . Dans notre cas $r_1=r_2$.

L'élément I : I_2 présente l'inertie des granulats mesurés sur le tapis convoyeur.

Le modèle déterministe du tapis convoyeur est déjà présenté dans certaine référence telle que [49].

Si on utilise un moteur 11.5 kw, avec 1500 tr/min et un réducteur de 2100 Nm avec 100 tr/min en charge c'est-à-dire les granulats mesurés sur le tapis convoyeur, les résultats de simulation de ce système sont présentés dans la figure suivante :

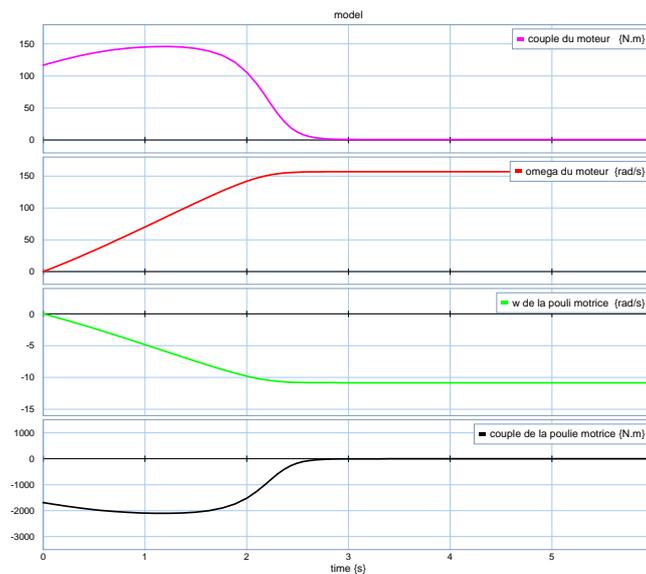


Fig.3.18 Couple et vitesse angulaire de la poulie motrice.

3.4 Détection et isolation des défauts par l'outil bond graph

3.4.1 Détection et isolation des défauts de circuit d'alimentation et de système de dosage d'eau

- Génération des résidus

En utilisant l'algorithme N° 01 donné dans la section 2.4.1 du chapitre deux pour générer les résidus. Par exemple, prenons la jonction 0₁ de la figure 3.5. L'objectif est de diminuer le nombre des variables inconnues et d'augmenter le nombre des variables connues. Les variables inconnues sont directement déduits en utilisant les chemins causaux.

De l'équation 3.3 :

$$\Phi_1: MQp - f_2 - f_3 = 0$$

f_2 est calculé par l'équation constitutive du stockage de réservoir 1 modélisé par l'élément C de l'équation 3.5. L'effort e_2 est mesuré et déterminé à l'aide de l'équation de mesure 3.11, à la fin on trouve :

$$f_2 = Cs me$$

f_4 est calculé par l'équation constitutive de l'élément MR de l'équation 3.8, e_4 est inconnue. Cette variable est exprimée en termes de variables connues en utilisant les chemins causaux :

$$\text{On a : } (e_4 = e_3 - e_5)$$

$$\text{et : } (e_3 = e_2 = me)$$

$$\text{et : } (e_5 + Mse - e_7 = 0) \rightarrow e_5 = me - Mse$$

$$\text{Donc : } f_4 = Cd1. \operatorname{sgn}(me - (me - Mse)) \sqrt{(me - (me - Mse))} \cdot U_v$$

Enfin, on obtient la première relation de redondance analytique :

$$ARR 1 = Msf - C sm_e - Cd. \operatorname{sgn}(me + Mse - me) \sqrt{(me + Mse - me)} \cdot U_v$$

$$ARR 1 = (Msf, me, me1, Mse, Uv, C)$$

En utilisant la même méthode pour obtenir les RRAs. On calcule aussi les RRAs de chaque régulateur en comparant sa sortie mesurée avec la sortie prédite par son algorithme de commande.

Les RRAs de ce système sont :

$$ARR 1 = Msf - C sm_e - Cd. \operatorname{sgn}(me - (me - Mse)) \sqrt{(me - (me - Mse))} \cdot U_v$$

$$ARR 2 = Cd. \operatorname{sgn}(me - (me - Mse)) \sqrt{(me - (me - Mse))} \cdot U_v - me_1 C_1 S$$

$$- Cd1. \operatorname{sgn}(me_1 - me_2) \sqrt{(me_1 - me_2)} \cdot U_w$$

$$ARR 3 = Cd1. \operatorname{sgn}(me_1 - me_2) \sqrt{(me_1 - me_2)} \cdot U_w$$

$$- me_2 C_2 S - Cd2. \operatorname{sgn}(me_2 - Se) \sqrt{(me_2 - Se)} \cdot U_m$$

$$ARR 4 = Msf - \operatorname{MinMax}(U_p, Pump_Min, Pump_Max)$$

$$ARR 5 = Mse - \operatorname{MinMax}(U_i, Pression_Min, Pression_Max)$$

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

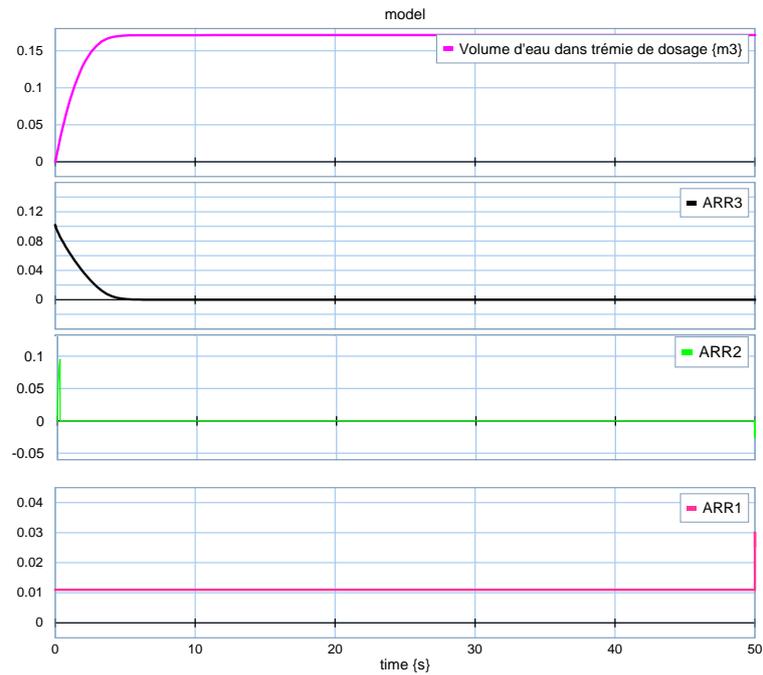


Fig.3.20 Volume d'eau dans la trémie, ARR1, ARR2 et ARR3 sans défaut.

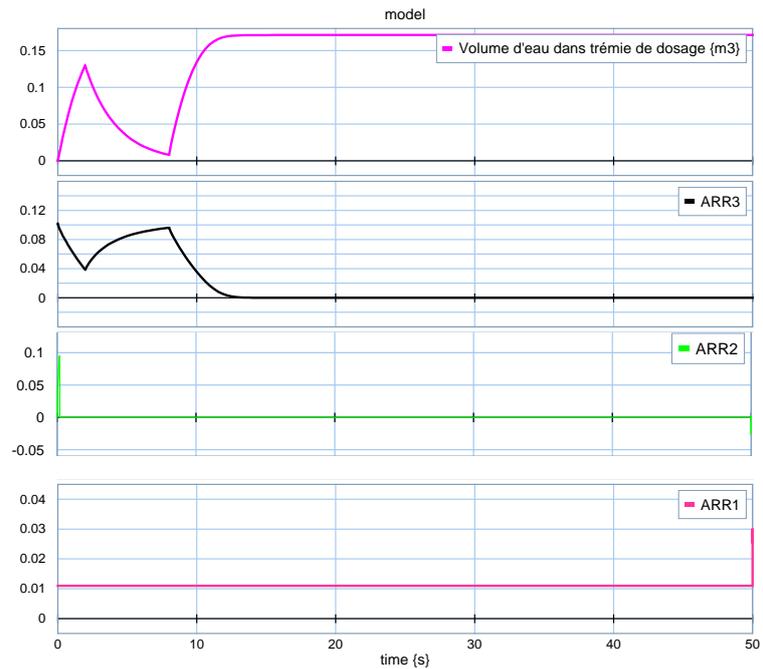


Fig.3.21 Volume d'eau dans la trémie, ARR1, ARR2 et ARR3 avec défaut.

On remarque que le volume d'eau de la trémie a diminué lors de l'excitation d'une fuite égale à $0.02m^3/s$, après 8s (la fin de l'excitation de fuite) le niveau d'eau de réservoir 3 et le débit de sortie augmentent jusqu'à la consigne. La fuite est détectable dans ARR3 mais pas dans ARR1 et ARR2.

3.4.2 Détection et isolation des défauts de circuit d'alimentation et de système de dosage des adjuvants

- **Génération des résidus**

On utilise les équations des contraintes du modèle dans la figure 3.9 pour générer les RRAs du système.

Prenons la jonction 0_1 de la figure 3.9:

$$\Phi_1: Sf - f_2 - f_3 = 0$$

f_2 est calculé par l'équation constitutive du stockage de la cuve modélisée par l'élément C de l'équation 3.26, donc :

$$f_2 = Cs me$$

f_3 est calculé par l'équation constitutive de l'élément MR de l'équation 3.29, e_4 est inconnue. Cette variable peut être exprimée en termes de variables connues en utilisant les chemins causaux :

$$\text{On a : } (e_4 = e_3 - e_5)$$

$$\text{et : } (e_3 = e_2 = me)$$

$$\text{et : } (e_5 = e_6 = me_1)$$

$$\rightarrow e_4 = me - me_1$$

$$\text{Donc : } f_4 = (k_1 \cdot (e_3 - e_5) + k_2) U_{p1} \rightarrow f_4 = (k_1 \cdot (me - me_1) + k_2) U_{p1}$$

On obtient la première relation de redondance analytique :

$$ARR 1 = Sf - Csm_e - (k_1 \cdot (me - me_1) + k_2) U_{p1}$$

$$ARR 1 = (Sf, MR, me, me_1, U_{p1}, C)$$

En utilisant la même méthode pour obtenir les ARRs :

$$ARR 1 = Sf - C sm_e - (k_1 \cdot (me - me_1) + k_2) U_{p1}$$

$$ARR2 = (k_1 \cdot (me - me_1) + k_2) U_{p1} + (k_1 \cdot (me_2 - me_1) + k_2) U_{p2} - C_1 sme_1$$

$$- Cd2 \cdot \text{sgn}(me_1 - Se) \sqrt{|(me_1 - Se)|} \cdot U_m$$

$$ARR3 = Sf1 - C_2 sme_2 - (k_1 \cdot (me_2 - me_1) + k_2) U_{p2}$$

En ajoutant aussi les RRAs de chaque régulateur et en comparant sa sortie mesurée avec la sortie prédite par son algorithme de commande, on obtient :

$$ARR4 = U_{p1} - \text{MinMax}(U_{p1}, Pre_{min}, Pre_{max}, me, me_1,)$$

$$ARR5 = U_{p2} - \text{MinMax}(U_{p2}, Pre_{min}, Pre_{max}, me_2, me_1,)$$

$$ARR6 = U_m - \text{On_off}(\text{commande de démarrage de malaxeur})$$

- Matrice de signature des défaillances

	m_e	m_{e1}	m_{e2}	C	C_1	C_2	MR	MR_1	MR_2	Sf	$Sf1$	$UP1$	$UP2$	Um
r_1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
r_2	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1
r_3	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0
r_4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
r_5	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
r_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
D_b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
I_b	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1

Tab.3.2 Matrice de signature des défaillances de circuit d'alimentation et de dosage d'adjuvants.

La matrice de signature des défaillances correspondante à ce système de la figure 3.9 est donnée par la table 3.2. Toutes les défaillances du processus sont théoriquement détectables ($D_b = 1$) mais quelques éléments ne sont pas isolables ($I_b = 0$) tel que : $m_e, m_{e2}, C, C_1, C_2, MR_1, sf, sf_1, up_1, up_2$.

- Résultats de simulation avec un défaut de pesage dans la trémie des adjuvants

1- Défaut dans le pesage d'adjuvant N° 01

Après la génération des ARR1, ARR2 et ARR3 dans le modèle bond graph. On applique un défaut structurel, par exemple une fuite dans la trémie de pesage après le chargement de l'adjuvant N° 01 à la trémie de pesage, pour une durée de 6 s jusqu'à 10 s. la réponse de masse d'adjuvants 1 et 2 dans la trémie, ARR3,ARR2 et ARR1 avec et sans défaut sont montrées par les figures suivantes :

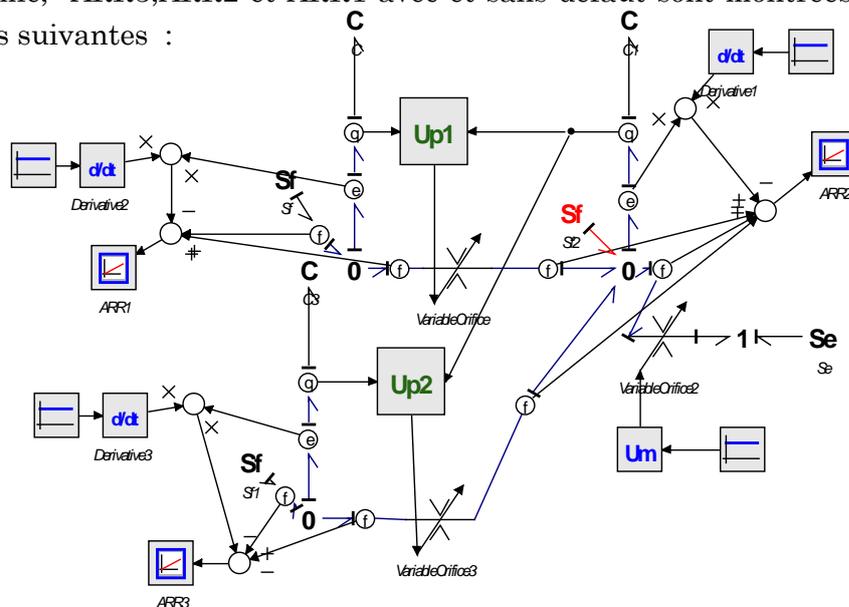


Fig.3.22 Génération des ARR1, ARR2 et ARR3.

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

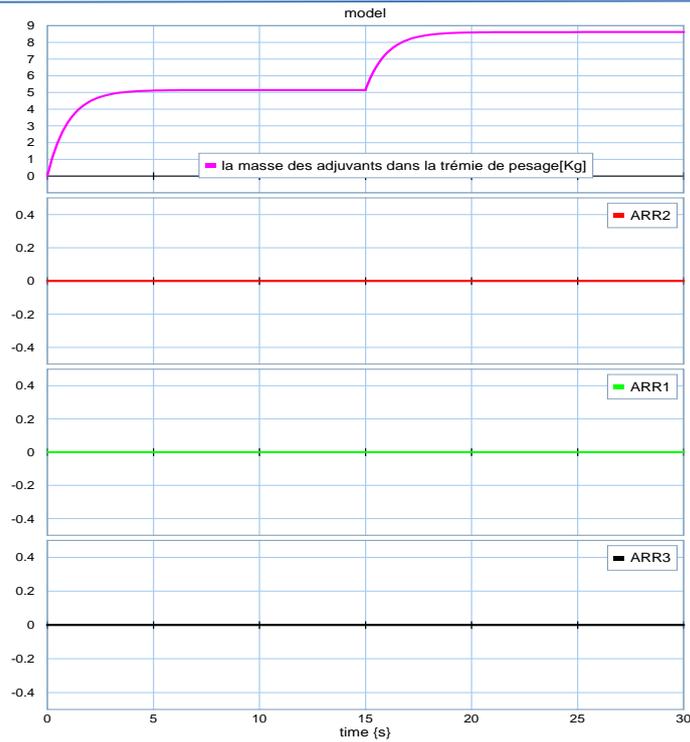


Fig.3.23 La masse des adjuvants dans la trémie, ARR1, ARR2 et ARR3 sans défauts.

Dans la figure 3.23 ARR1, ARR2 et ARR3 sont égales à zéro.

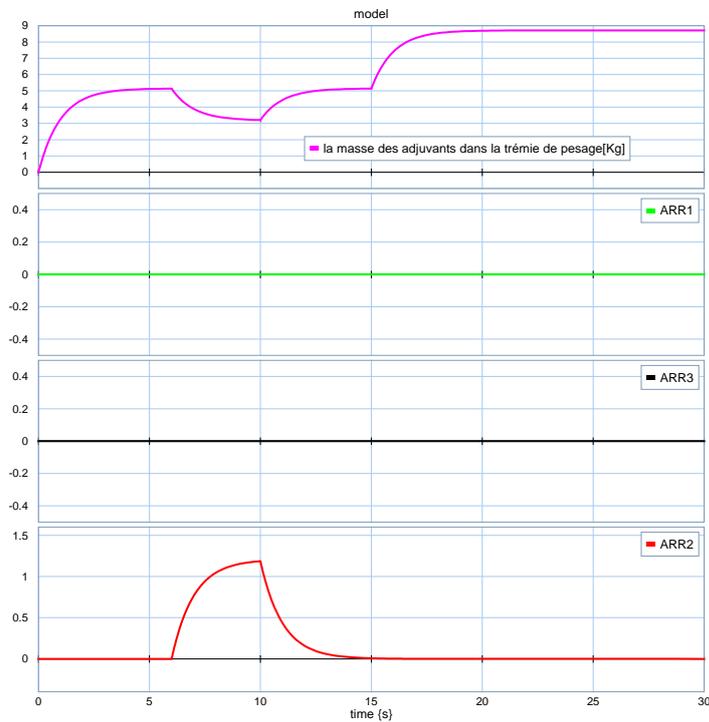


Fig.3.24 La masse des adjuvants dans la trémie, ARR1, ARR2 et ARR3 avec défaut lors du pesage d'adjuvant N° 01.

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

On remarque que la masse d'adjuvant N° 01 dans la trémie a diminué lors de la présence d'une fuite entre 6s à 10s. Après 10s (absence de la fuite) la masse d'adjuvant augmente jusqu'à la consigne et le processus commence le pesage d'adjuvant N° 02. ARR2 est détectable de cette fuite, ARR1 et ARR2 ne sont pas détectables de cette fuite.

2- Défaut dans le pesage d'adjuvant N° 02

On applique un défaut structurel (la présence d'une fuite) dans la trémie de pesage au moment du chargement de l'adjuvant N° 02 à la trémie de pesage pour une durée de 20 s jusqu'à 24 s. la réponse de masse d'adjuvants N° 01 et N° 02 dans la trémie, ARR1, ARR2 et ARR3 avec défaut sont montrées par les figures suivantes :

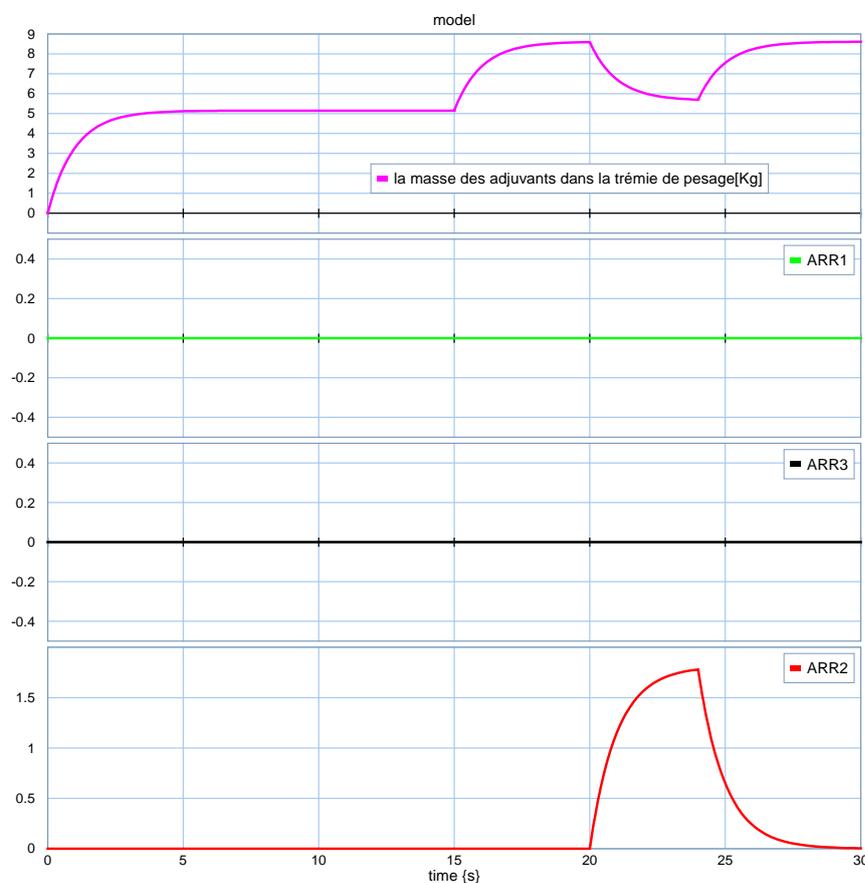


Fig.3.25 La masse des adjuvants dans la trémie, ARR1, ARR2 et ARR3 avec défaut lors du pesage d'adjuvant N° 02.

On remarque que la masse d'adjuvants N°: 02 dans la trémie a diminué lors de la présence d'une fuite entre 20s à 24s. Après 24 s (absence de la fuite) la masse d'adjuvants augmente jusqu'à la consigne et le processus commence le pesage d'adjuvant, cette fuite est détectables sur ARR2 mais pas sur ARR1 et ARR3.

3.4.3 Détection et isolation des défauts de convoyeur à vis du ciment

- Placement de capteurs

Dans l'installation réelle du convoyeur à vis étudié, il n'existe aucun capteur. Donc le modèle n'est pas observable. Pour observer et détecter les défauts, on ajoute des capteurs (un placement de capteurs virtuel) dans le modèle bond graph de notre système sur les jonctions 0 et 1 [22].

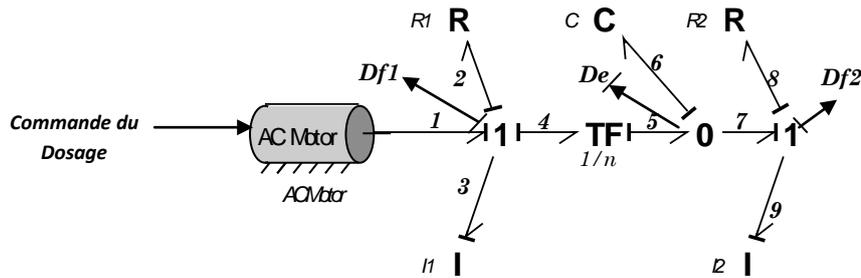


Fig.3.26 Placement de capteurs sur le modèle bond graph du convoyeur à vis.

- Génération des résidus

Maintenant, on peut utiliser les équations des contraintes du modèle dans la figure 3.26 pour générer les RRAs selon les capteurs placés dans le système.

$$ARR 1 = e_1 - R_1 Df_1 - J_1 s Df_1 - \frac{1}{n} D_e$$

$$ARR 2 = \frac{1}{n} Df_1 - C s D_e - Df_2$$

$$ARR 3 = D_e - R_2 Df_2 - J_2 s Df_2$$

- Matrice de signature des défaillances

	D_e	Df_1	Df_2	C	J_1	J_2	R_1	R_2
r_1	1	1	0	0	1	0	1	0
r_2	1	1	1	1	0	0	0	0
r_3	1	0	1	0	0	1	0	1
D_b	1	1	1	1	1	1	1	1
I_b	1	1	1	1	0	0	0	0

Tab.3.3 matrice de signature des défaillances de convoyeur à vis.

La matrice de signature des défaillances correspondante à ce système de la figure (3.21) est donnée par la table 3.3. Toutes les défaillances du processus sont théoriquement détectables ($D_b = 1$) mais quelques éléments ne sont pas isolables ($I_b = 0$).

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

- Résultats de simulation

Défaut d'un grand frottement dans le convoyeur à vis

Après la génération des ARR1, ARR2 et ARR3 dans le modèle bond graph, on applique un défaut, dans le roulement de la vis ce qui augmente le frottement dans l'arbre de vis. Par exemple une grande pierre passe le convoyeur à vis aussi implique un grand frottement. Les figures suivantes présentes le modèle bond graph après la génération des RRAs, sans et avec défaut :

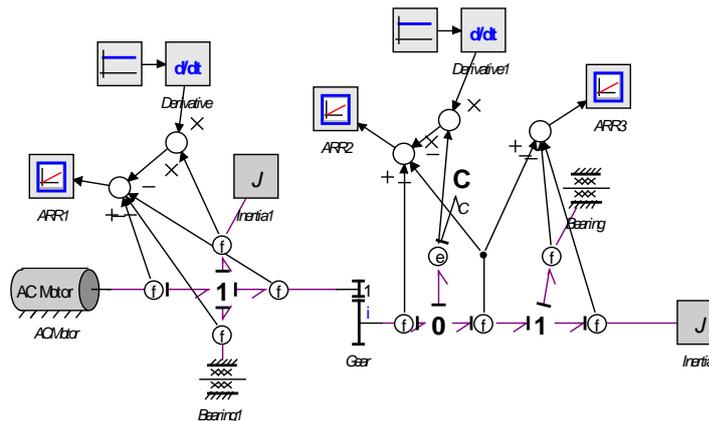


Fig.3.27 Génération des ARR1, ARR2 et ARR3.

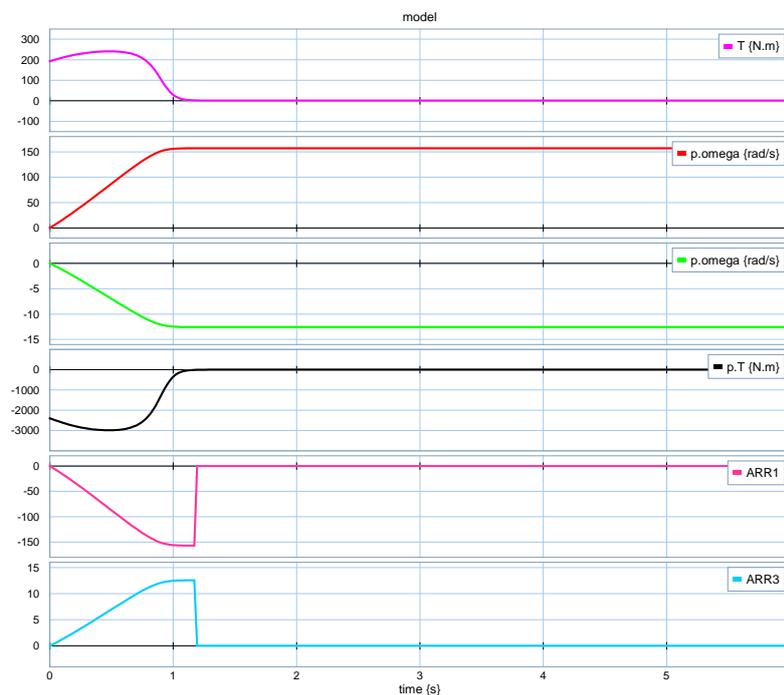


Fig.3.28 Réponse du système sans défauts.

Dans la figure (3.28) ARR1 et ARR3 sont égales à zéro sauf dans les régimes transitoires.

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

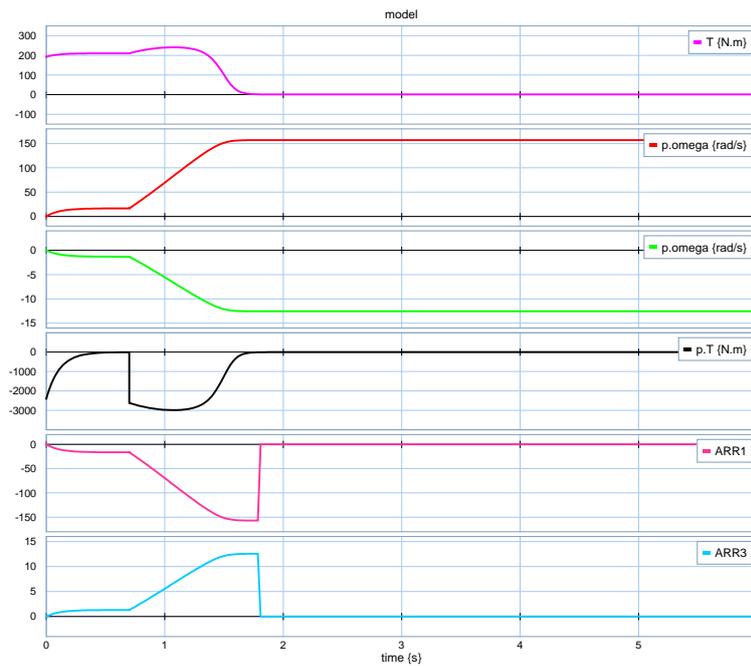


Fig.3.29 Réponse du système avec défauts de frottement.

Lorsque on applique un frottement entre 0.2s à 0.7s que la valeur du couple de l'arbre de vis est presque à zéro avec une très petite vitesse angulaire ce qui signifie le grand frottement.

Pour le moteur : quand on implique le défaut du frottement le couple de moteur égale le couple de démarrage jusqu'à la fin de défaut, la vitesse angulaire du moteur du moteur est très petite se qui signifie que le moteur marche en très grande charge.

Chapitre 3. Modélisation, détection et isolation des défauts d'une centrale à béton par l'outil bond graph

Toutes les défaillances du processus sont théoriquement détectables ($D_b = I$) mais quelques éléments ne sont pas isolables ($I_b = 0$).

- Résultats de simulation
- Exemple d'un Défaut paramétrique

Après la génération des ARR, On applique un défaut, tel que le changement dans le coefficient de rigidité du tapis k_b , les figures suivantes présentent le modèle bond graph sans et avec défaut :

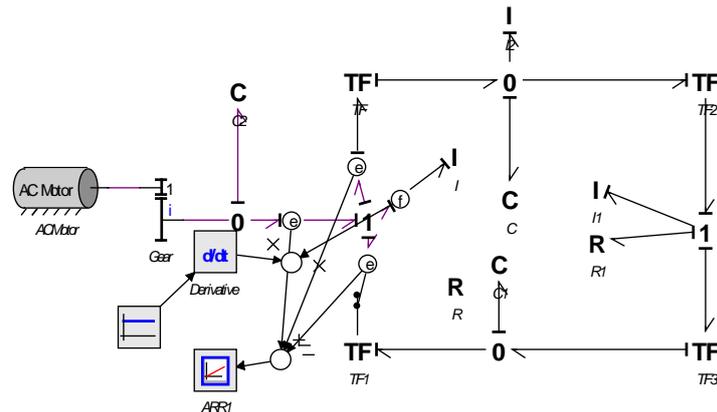


Fig.3.31 Génération d'ARR1.

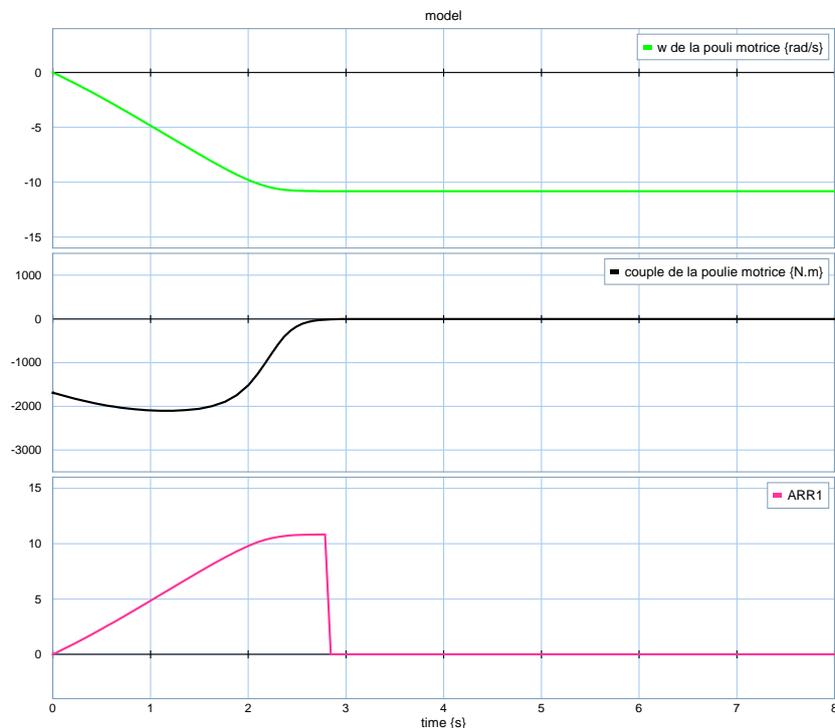


Fig.3.32 Réponse du système sans défauts.

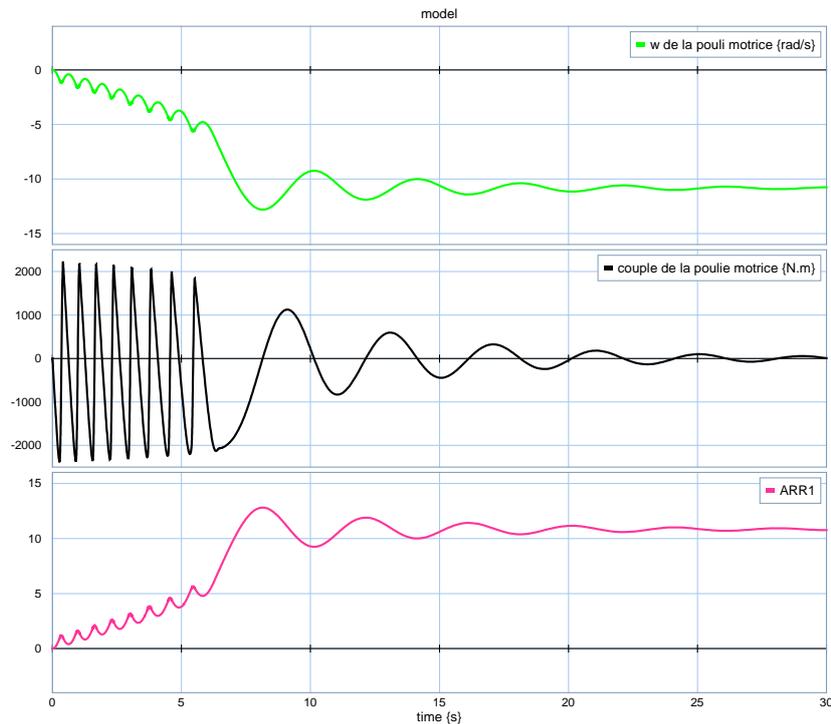


Fig.3.33 Réponse du système avec défaut de frottement.

On applique le défaut paramétrique : Un changement dans le coefficient de rigidité de tapis kb provoque une dégradation des performances du système, et peut engendrer sa défaillance totale.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, le modèle de la centrale à béton a été décomposé en plusieurs sous-systèmes suivant le rôle, tels que le stockage, le transport et le pesage. Par la suite on a modélisé chaque sous-système afin d'appliquer les algorithmes présentés dans le chapitre deux, de détecter et isoler les défauts.

Les deux sous-systèmes dosage d'eau et pesage des adjuvants sont déjà équipés des capteurs, ce qui démontre que les sous-systèmes sont observables ainsi que tous les défauts sont détectables.

Par contre, les autres deux sous-systèmes étudiés, le transport du ciment du silo vers la trémie du pesage avec un arbre à vis et le transport des granulats avec un tapis convoyeur, ces deux sous-systèmes ne sont pas observables, ce qui nous a poussé à placer des capteurs virtuels sur le modèle bond graph afin d'étudier la détectabilité et l'isolation des défauts.

Chapitre 4

Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

4.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est l'automatisation de la centrale à béton modélisée, surveillée par l'outil bond graph dans le chapitre trois. Dans le but d'afficher les alarmes dans le système de supervision conçu à l'aide des résidus calculés de la centrale à béton par l'outil bond graph.

On donnera quelques aspects de la supervision dans un environnement SCADA fondamentaux, ensuite on présente les logiciels utilisés dans ce chapitre pour automatiser la centrale à béton et crée l'interface homme machine graphique.

Ensuite on donnera des exemples d'automatisations des sous-systèmes de la centrale à béton après la programmation dans l'API.

4.2 Supervision dans un environnement SCADA

Le système SCADA fonctionne par l'acquisition de données provenant de l'installation, ces dernières sont affichées sur une interface graphique sous un langage très proche de langage humain, les opérations sont exécutées en temps réel, ainsi les systèmes SCADA donnent aux opérateurs le maximum d'information pour une meilleure décision, il permet un très haut niveau de sécurité, pour les personnels et pour l'installation et permet aussi la réduction des coûts des opérations [50].

4.2.1 Définition du SCADA

SCADA est un acronyme qui signifie le contrôle et la supervision par acquisition de données (en anglais: Supevisory Control And Data Acquisition). L'environnement SCADA collecte des données de diverses appareils d'une quelconque installation, puis transmet ces données à un ordinateur central, que ce soit proche ou éloigné, qui alors contrôle et supervise l'installation, ce dernier est subordonné par d'autres postes d'opérateurs.

4.2.2 Architecture du SCADA

SCADA entoure un transfert de données entre le Serveur (MTU, master terminal units) et une ou plusieurs unités terminales distantes (Remote Terminal Units RTUs), et entre le Serveur et les terminaux des opérateurs, la figure ci-dessous représente un schéma sur l'architecture d'un réseau SCADA qui utilise des routeurs pour joindre le poste de pilotage par le billet de l'Internet [50].

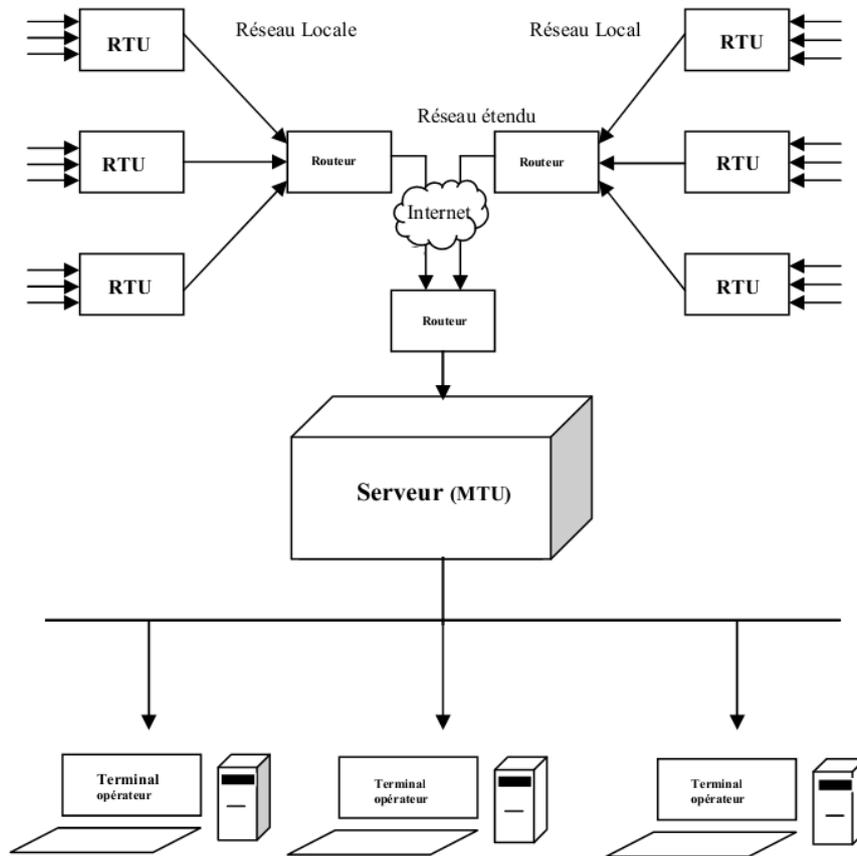


Fig.4.1 Architecture d'un système SCADA.

Les logiciels de supervision sont une classe de programmes applicatifs dédiés au contrôle de processus et à la collecte d'informations en temps réel depuis des sites distants (ateliers, usines), en vue de maîtriser un équipement (machine, partie opérative).

Les éléments hardware assurent la collecte des informations qui sont à disposition du calculateur sur lequel est implanté le logiciel de supervision, le calculateur traite ces données et en donne une représentation graphique réactualisée périodiquement, le système SCADA enregistre les événements dans des fichiers ou envoie vers une imprimante, mail..., ainsi le système surveille les conditions de fonctionnement anormal et génère des alarmes [50].

4.2.3 Avantage du SCADA

Parmi les avantages du SCADA, on retrouve :

- Le suivi de près du système ; voire l'état du fonctionnement de procédé dans des écrans même s'il se situe dans une zone lointaine.

Chapitre 4. Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

- Le contrôle et l'assurance que toutes les performances désirées sont atteintes ; de visualiser les performances désirées du système à chaque instant, et s'il y aurait une perte de performance, une alarme se déclencherait d'une manière automatique pour prévenir l'opérateur.
- Produire une alarme lorsque une faute se produit et visualiser même la position où se situe la faute et l'élément défectueux, ce qui facilite la tâche du diagnostic et de l'intervention de l'opérateur.
- Donne plusieurs informations sur le système ainsi aide l'opérateur à prendre la bonne décision, et ne pas se tromper dans son intervention.
- Diminue les tâches du personnel en les regroupant dans une salle de commande.
- Elimination ou réduction du nombre de visites aux sites éloignés ; avec une interface graphique, on peut suivre l'état de l'installation à chaque instant, ainsi on n'aura pas besoin de faire des visites de contrôle.

4.2.4 Interfaces graphiques du SCADA

Les interfaces graphiques sont un outil très important pour le bon déroulement de la procédure d'aide à la décision, elles sont le seul point d'interaction entre l'opérateur et les algorithmes d'aide à la décision, ainsi, elles aident l'opérateur dans sa tâche d'interprétation et de prise de décision, en lui offrant une très bonne visibilité sur l'état et l'évolution de l'installation, avec l'affichage en différentes couleurs des résidus, des alarmes et des propositions sur l'action à entreprendre [51].

La figure suivante représente l'interface graphique de la supervision utilisée dans la centrale à béton avant de créer notre interface HMI.

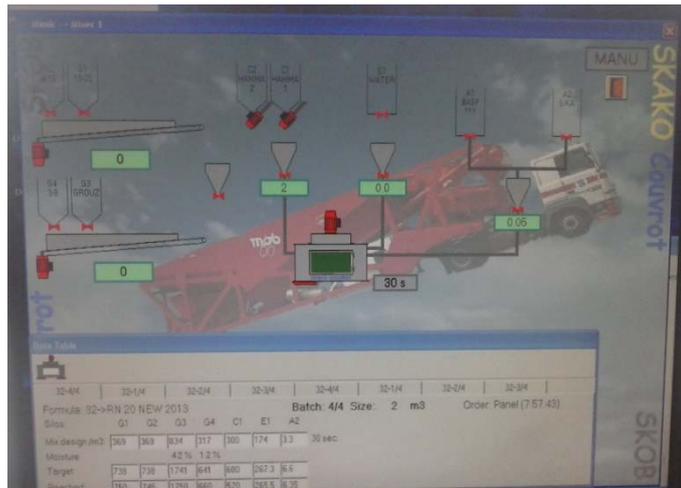


Fig.4.2 Interface graphique de supervision utilisée dans la centrale à béton.

4.2.5 Fonctionnement en temps réel

La notion du temps réel est devenue très importante et indispensable dans la procédure de surveillance et de supervision en générale, elle permet de faire le rafraîchissement des signaux à chaque instant, ce qui permet de suivre l'évolution de l'état du système d'une façon continue [51].

4.3 Description des logiciels utilisés

4.3.1 Description du logiciel 20 sim v4.1

Le logiciel 20-Sim a été développé dans le cadre de la thèse de doctorat de J. Broenink , à l'université de Twente aux Pays bas. Du point de vue modélisation, 20-Sim est un support de modélisation hiérarchique, séparant l'interface de définition du sous-modèle de son corps. Le logiciel est composé d'une fenêtre pour les spécifications des ports et des paramètres du sous-modèle, avec une fenêtre pour l'implémentation sous forme graphique ou textuelle. Une autre fenêtre est consacrée à la réalisation d'une icône personnalisée du sous-modèle en utilisant un éditeur graphique. En cliquant sur les icônes des sous-modèles, l'utilisateur peut accéder aux différentes implémentations. Pour créer le modèle complet d'un système, les sous-modèles doivent être créés, ou choisis parmi les sous-modèles prédéfinis dans la boîte à outil. La figure.4.3 montre les différentes fenêtres de l'éditeur 20-Sim, où la fenêtre centrale représente le modèle en bond graph déterministe du 2 réservoirs déjà présentée dans le chapitre deux [48].

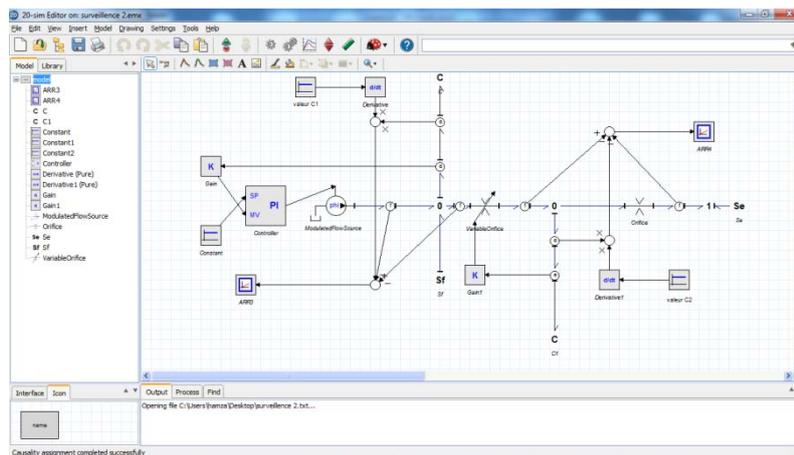
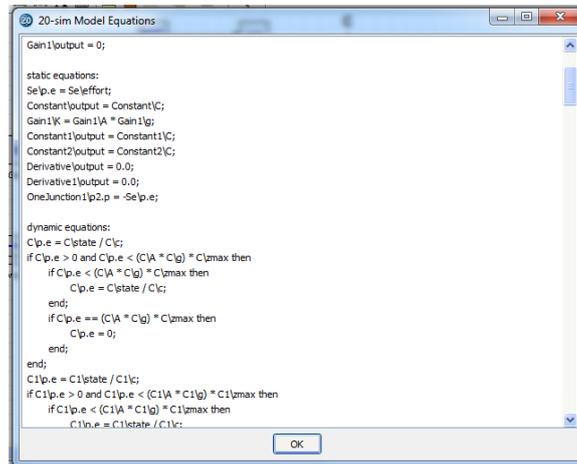


Fig.4.3 Interface graphique de l'éditeur 20-Sim

Les caractéristiques des manipulations symboliques de 20-Sim permettent de résoudre numériquement des boucles algébriques par itération et d'introduire la méthode BDF (Bloc Diagram Fonctionnel) pour l'intégration numérique des

systèmes DAE (Differential-Algebraic Equations). Pour accélérer la simulation, toutes les équations n'ayant aucun effet sur l'évolution des variables d'état du système sont ignorées pendant l'étape d'intégration. Un ensemble d'équations est généré pour d'éventuelles vérifications, ou pour être utilisées dans d'autres programmes (FIG. 4.4).



```
Gain1\output = 0;

static equations:
Se\p.e = Se\effort;
Constant1\output = Constant1\C;
Gain1\K = Gain1\A * Gain1\g;
Constant2\output = Constant2\C;
Derivative1\output = 0.0;
Derivative2\output = 0.0;
One\function1\p2.p = -Se\p.e;

dynamic equations:
C\p.e = C\state / C\c;
if C\p.e > 0 and C\p.e < (C\A * C\g) * C\lmax then
  if C\p.e < (C\A * C\g) * C\lmax then
    C\p.e = C\state / C\c;
  end;
  if C\p.e == (C\A * C\g) * C\lmax then
    C\p.e = 0;
  end;
end;
C1\p.e = C1\state / C1\c;
if C1\p.e > 0 and C1\p.e < (C1\A * C1\g) * C1\lmax then
  if C1\p.e < (C1\A * C1\g) * C1\lmax then
    C1\p.e = C1\state / C1\c;
  end;
end;
```

Fig.4.4 Ensemble des équations générées à partir du modèle bond graph du système.

4.3.2 Description du logiciel step7

4.3.2.1 Définition du logiciel

Step7 fait parti de l'industrie logiciel SIMATIC. Il représente le logiciel de base pour la configuration et la programmation de système d'automatisation. Les tâches de bases qu'il offre à son utilisateur lors de la création d'une solution d'automatisation sont :

- La création et gestion de projet ;
- La configuration et le paramétrage du matériel et de la communication ;
- La gestion des mnémoniques ;
- La création des programmes ;
- Le chargement des programmes dans les systèmes cibles ;
- Le teste de l'installation d'automatisation ;
- Le diagnostic lors des perturbations des l'installation [53].

4.3.2.2 Applications du logiciel de base STEP 7

Le logiciel Step7 met à disposition les applications suivantes :

- Le gestionnaire de projet ;
- La configuration du matériel ;

Chapitre 4. Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

- L'éditeur de mnémoniques ;
- L'éditeur de programmes CONT, LOG et LIST ;
- La configuration de la communication NETPRO ;
- Le diagnostic du matériel ;

4.3.2.3 Gestionnaire de projet SIMATIC Manager

Le gestionnaire de projets SIMATIC manager gère toutes les données relatives à un projet d'automatisation, il démarre automatiquement les applications requises pour le traitement de données sélectionnées. La figure 4.5 représente la fenêtre qui apparaît au lancement de SIMATIC Manager.

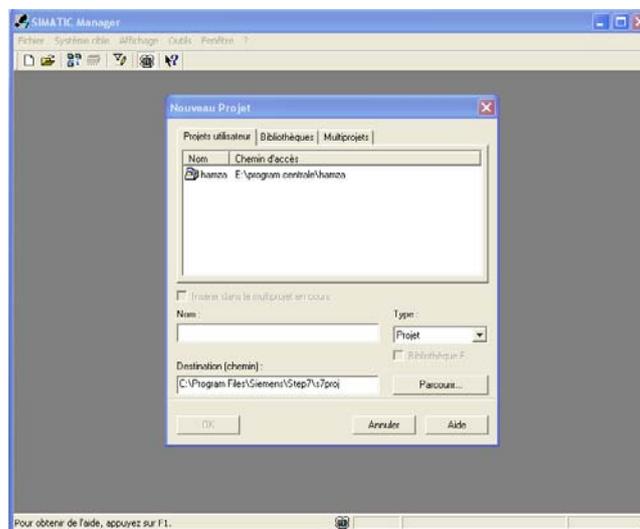


Fig.4.5 Gestionnaire de projet SIMATIC Manager.

4.3.2.4 Configuration du matériel HW Config

HW Config est utilisé pour configurer et paramétrer le support matériel dans un projet d'automatisation comme dans la figure suivante :

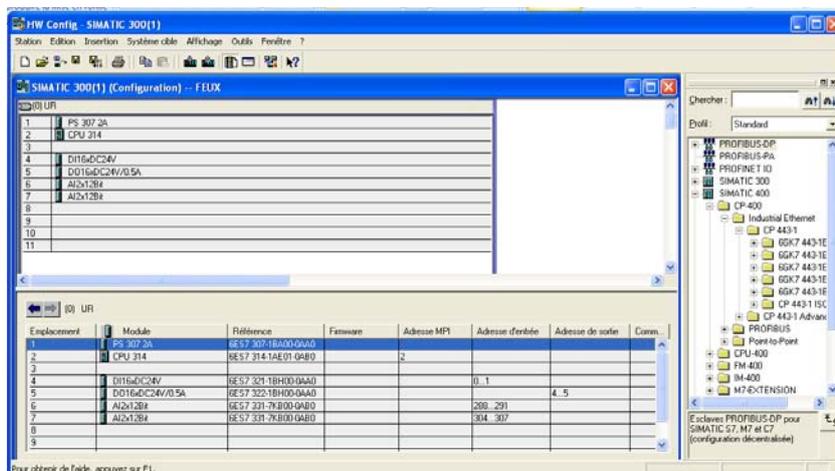
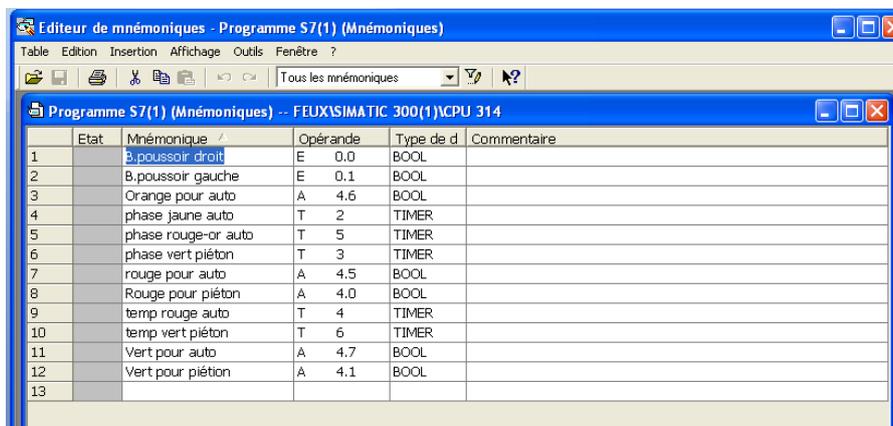


Fig.4.6 Configuration du matériel HW Config.

4.3.2.5 Editeur de mnémoniques

Il permet la gestion de toutes les variables globales. Il définit des désignations symboliques et des commentaires pour les signaux du processus (entrées/sorties), les mémotos, les blocs de données, les temporisations et les compteurs.

La table des mnémoniques qui en résulte est mise à disposition de toutes les applications. La modification de l'un des paramètres d'une mnémonique est de ce fait reconnue automatiquement par toutes les applications.



The screenshot shows a software window titled 'Editeur de mnémoniques - Programme S7(1) (Mnémoniques)'. The window contains a table with the following data:

	Etat	Mnémonique	Opérande	Type de d	Commentaire
1		B.poussoir droit	E 0.0	BOOL	
2		B.poussoir gauche	E 0.1	BOOL	
3		Orange pour auto	A 4.6	BOOL	
4		phase jaune auto	T 2	TIMER	
5		phase rouge-or auto	T 5	TIMER	
6		phase vert piéton	T 3	TIMER	
7		rouge pour auto	A 4.5	BOOL	
8		Rouge pour piéton	A 4.0	BOOL	
9		temp rouge auto	T 4	TIMER	
10		temp vert piéton	T 6	TIMER	
11		Vert pour auto	A 4.7	BOOL	
12		Vert pour piéton	A 4.1	BOOL	
13					

Fig.4.7 Editeur de mnémoniques.

4.3.2.6 Editeur de programme

Les langages de base proposés sont

- Le schéma à contact (CONT); langage graphique similaire aux schémas de circuit à relais, il permet de suivre facilement le trajet du courant ;
- Liste d'instruction (LIST); langage textuel de bas niveau, à une instruction par ligne, similaire au langage assembleur ;
- Le logigramme (LOG); langage de programmation graphique qui utilise les boites de l'algèbre de Boole pour représenter les opérations logiques.

L'éditeur de programme permet aussi la visualisation et forçage de variables [53].

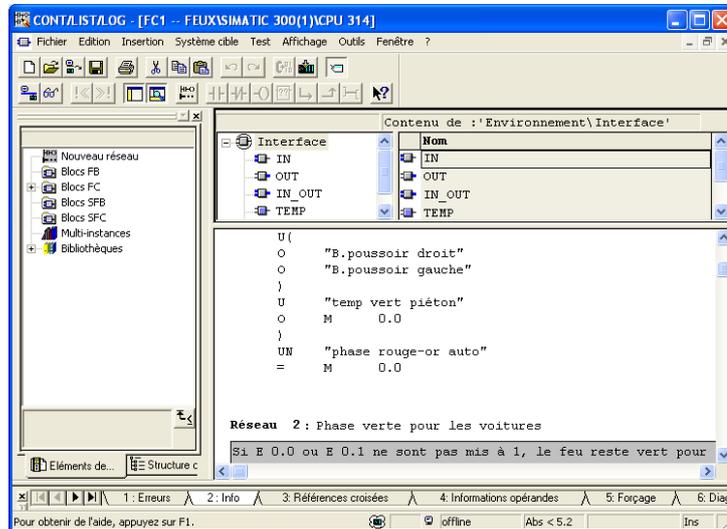


Fig.4.8 Editeur de programme.

4.3.2.7 Configuration de communication Net Pro

La configuration et le paramétrage de réseaux se font à l'aide de l'application Net Pro. Elle permet de :

- Créer une vue graphique du réseau en question ainsi que les sous-réseaux qui le constituent.
- Déterminer les propriétés et les paramètres de chaque sous-réseau [53].

4.3.2.8 Diagnostique du matériel

Le diagnostic du matériel fournit un aperçu de l'état du système d'automatisation. Dans une représentation d'ensemble, un symbole permet de préciser pour chaque module, s'il est défaillant ou pas. Une double clique sur le module défaillant permet d'affiche les informations détaillées sur le défaut. Avec le diagnostic, on peut avoir des informations générales sur les modules, les causes des erreurs, comme on peut détecter les causes des défaillances dans un programme [53].

4.3.3 Description du logiciel PLCSIM

L'application de simulation de modules S7-PLCSIM nous permet d'exécuter et de tester notre programme dans l'automate programmable (AP), ainsi permet de simuler dans l'ordinateur ou dans la console de programmation. La simulation

Chapitre 4. Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

étant complètement réalisée au sein du logiciel STEP 7, il n'est pas nécessaire qu'une liaison soit établie avec un matériel S7 quelconque (CPU ou module de signaux).

S7-PLCSIM dispose d'une interface simple qui nous permet de visualiser et de forcer les différents paramètres utilisés par le programme (comme par exemple l'activation ou la désactivation des entrées). Tout en exécutant notre programme dans l'AP de simulation, nous avons également la possibilité de mettre en œuvre les diverses applications du logiciel STEP7 comme, par exemple, la table des variables (VAT) afin d'y visualiser et d'y forcer des variables.



Fig.4.9 Interface de PLCSIM.

4.3.4 Description du logiciel Wincc

4.3.4.1 Aperçu du logiciel de visualisation WinCC

Le WinCC (Windows Control Center) de Siemens, est un logiciel d'ingénierie pour la configuration de pupitres SIMATIC, de PC industriels SIMATIC et de PC standard avec le logiciel de visualisation WinCCRuntime [53].

Il a pour but grâce à la programmation de résoudre les tâches de supervision concernant la surveillance de l'opérateur, de fabrication et le contrôle de l'automate de la production. Il fournit des unités fonctionnelles appropriées à l'industrie pour la représentation graphique, les alarmes, l'archivage et le protocole.

Les systèmes d'exploitation MS Windows 95/98 ou MS Windows NT, xp, vista, seven servent de plate-forme pour le WinCC.

La conception du logiciel pour un Centre de contrôle:

- **Centre de contrôle**
 - L'explorateur : il fonctionne en parallèle avec le Centre de contrôle.
 - Le gestionnaire de données : fournir l'image du process avec les valeurs des variables et les lectures des capteurs en communiquant avec l'automate (émission réception).

- **Les unités de fonction**
 - Système graphique (Graphics Designer): représentation graphique et le processus d'interfaçage.
 - Traitement d'action (Global Scripts): Dynamisation du projet aux besoins spécifiques de l'utilisateur.
 - Système d'alarme (AlarmLogging).
 - L'archivage et le traitement des valeurs de mesure (Tag Logging).
 - Système de rapport (Report Designer).
- **Matériel et logiciel**

L'exécution de la visualisation requiert les composants matériels et logiciels suivants:

- Programmable Logic Controller S7-300 avec ses composants.
- PC avec une configuration minimale.
- Logiciel WinCC.

4.3.4.2 Création d'un nouveau projet

Après l'exécution du WinCC, une fenêtre de choix s'affiche (fig.4.10). Elle porte le choix entre création d'un projet qui peut être projet monoposte, multiposte ou projet client, ou bien l'ouverture d'un projet existant.

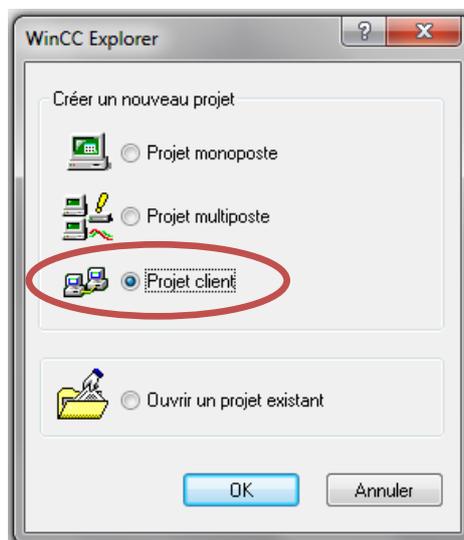


Fig.4.10 Choix de projet dans wincc.

La figure 4.11 présente l'explorer de wincc, La partie gauche de la fenêtre contient la section de navigation du projet, ce qui mène vers les fonctionnalités individuelles du projet. La partie droite contient les détails de chaque fonctionnalité du projet.

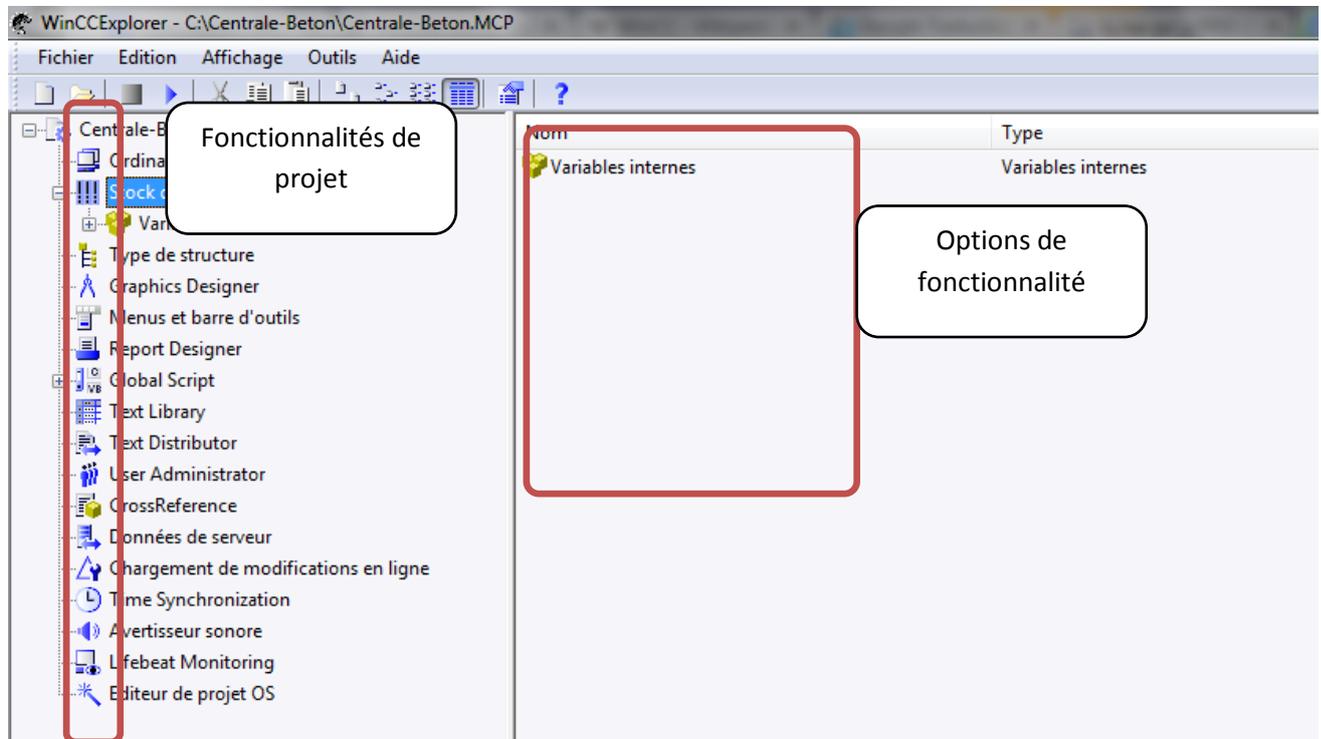


Fig.4.11 Explorer de wincc.

4.3.4.3 Les fonctionnalités principales du projet

Dans chaque projets, nous trouvons plusieurs fonctionnalités qui serrent à configurer le WinCC avec l'automate ; parmi ces fonctionnalités nous sétons les plus importants tel que : le stock des variables, le Graphics Designer, type de structure, l'avertisseur sonore et chargement de médicaments en ligne.

- Le stock de variables

La première des fonctionnalités c'est bien le stock des variables, elle est impérative pour la configuration de chaque projet.

Pour accéder aux variables de l'automate PLC avec le WinCC, une connexion entre les deux doit être configurée.

La communication est assurée avec des pilotes spéciaux appropriés pour chaque type de PLC, le WinCC contient ces pilotes. Dans notre cas nous avons utilisés le Driver du step 7, Voir figure 4.12.

Chapitre 4. Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

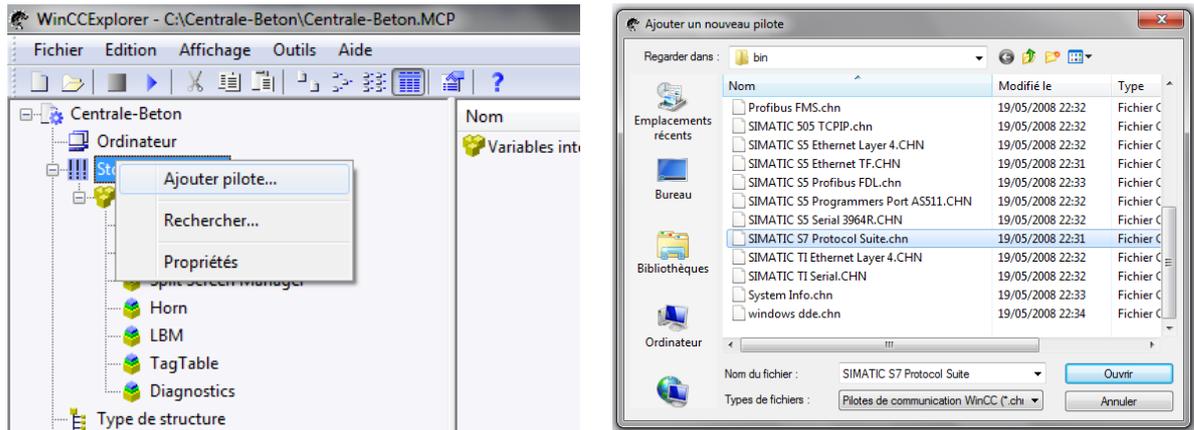


Fig.4.12 Choix des variables dans wincc.

Il faut tout d'abord créer une nouvelle variable sur le WinCC, la configurer et après il faut l'affecter a une adresse sur l'automate, voir la fig.4.13.

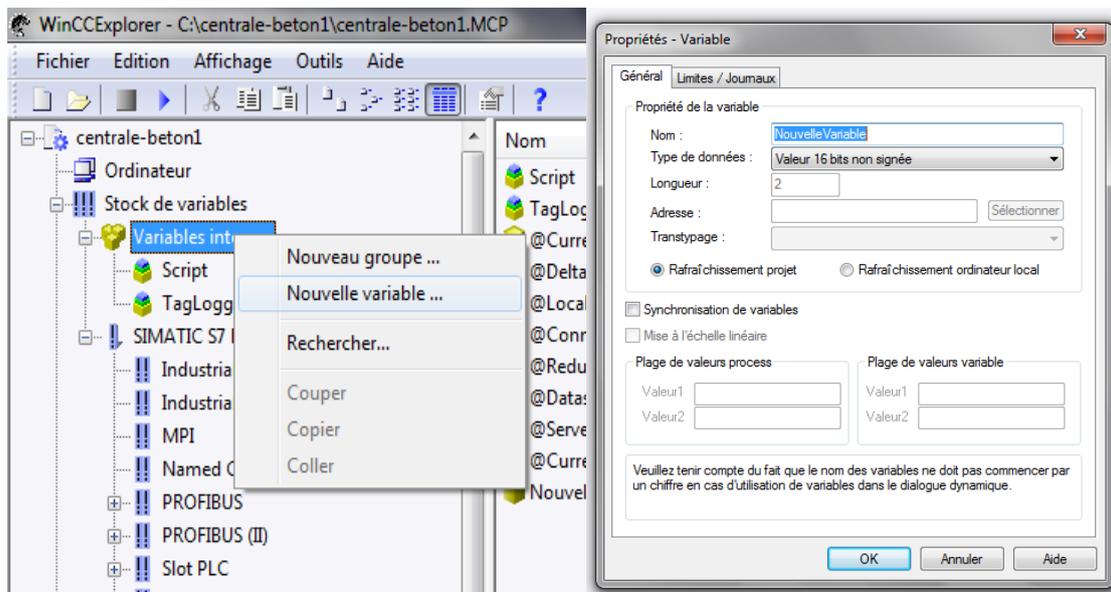


Fig.4.13 Création d'une nouvelle variable.

- Fonctionnalité du Graphic Designer

La fonctionnalité du Graphic Designer est de grande importance, elle permet de traduire le processus sous forme des écrans d'illustration généraux et des détails en temps réel. Les vues d'illustration sont créées avec le système graphique, pour but avoir une vue simplifiée pour la supervision.

Chapitre 4. Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

Pour passer à cette fonctionnalité (voir fig.4.14), il faut double-cliquer sur (Graphic Designer) où Clique-droit pour ajouter une nouvelle vue.

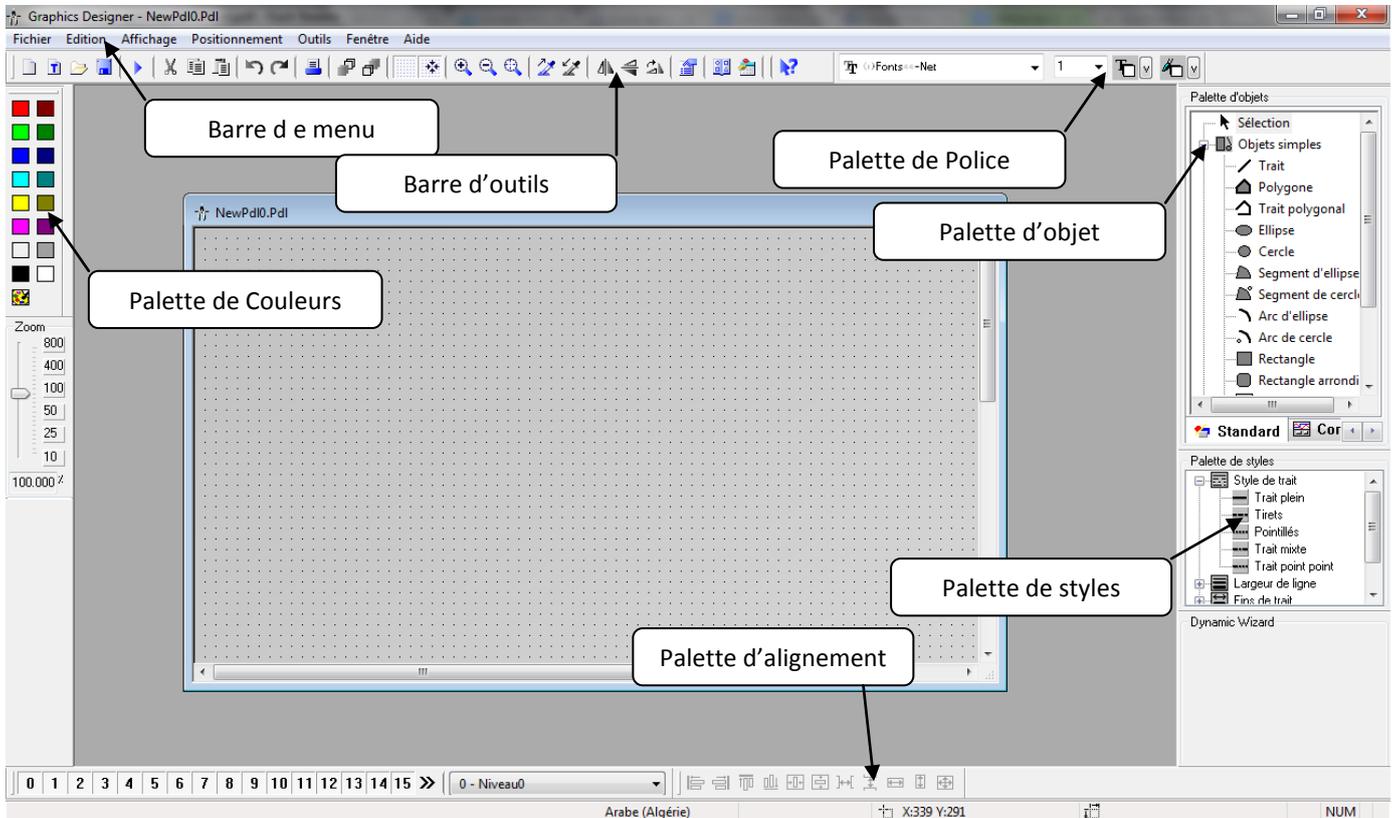


Fig.4.14 Graphic Designer de wincc.

- **Description des menus de Graphic Designer**
- **Palette de couleurs**

Affectation de couleurs aux objets sélectionnés. En plus des 16 couleurs standards, il existe également des couleurs personnalisées.
- **Palette d'objet**

Contient les objets standard (Polygone, Ellipse, Rectangle, etc), les objets dynamiques (Contrôle OLE, OLE Elément, Champ d'E / S, etc) et les objets Windows (Buttons, Check-Box, etc.)
- **Palette de styles**

Modification l'apparence d'un objet sélectionné. Selon l'objet, nous pouvons changer la ligne frontière ou le type, la largeur de raie ou la frontière, la section d'extrémité de la ligne, ou le motif de remplissage.
- **Palette d'alignement**

Permet de modifier la position absolue d'un ou plusieurs objets, changer la position des objets sélectionnés par rapport à l'autre ou unifier la hauteur et la largeur de plusieurs objets.

- **Barre de Menu**
Contient toutes les commandes disponibles dans le menu des concepteurs graphiques. Commandes qui actuellement ne peuvent pas être activés sont grisés.
- **Barre d'outils**
Contient les boutons pour effectuer rapidement des commandes courantes.
- **Palette de police**
Change le type de police, taille et couleur des objets de texte ainsi que la couleur de la ligne d'objets standards.

Comme il existe une bibliothèque contenant des articles pour dessiner le processus en des vue plus simples. Voir l'exemple d'application de la fig.4.15.

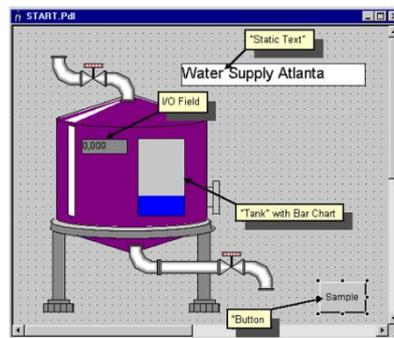


Fig.4.15 Exemple d'un processus dans wincc.

4.3.4.4 Système d'alarme

Le WinCC fournit aussi une fonctionnalité importante c'est bien celle d'un système d'alarme, avec une tâche principale d'informer l'opérateur sur le dysfonctionnement du processus. Cette option aide à détecter les situations critiques et éviter tout type d'arrêt imprévu. Voir fig.4.16 [53].

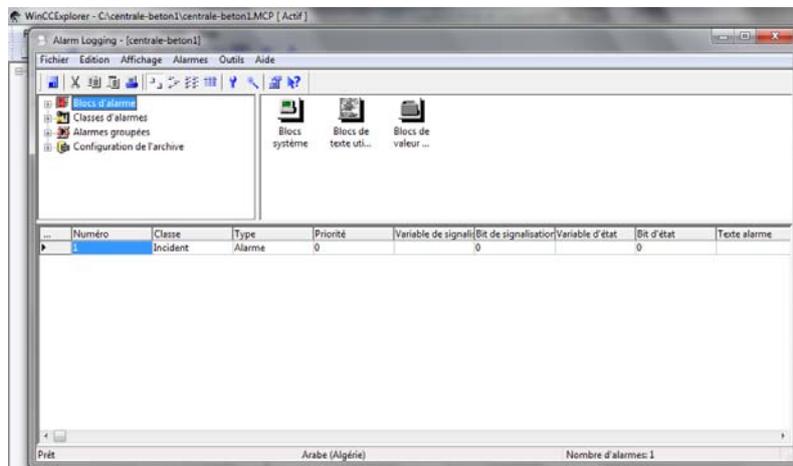


Fig.4.16 Fenêtre d'alarme dans wincc.

4.4 Architecture du système de supervision de la centrale à béton

Notre système d'automatisation et supervision modifiée dans la centrale à béton est bien détaillée dans la figure suivante :

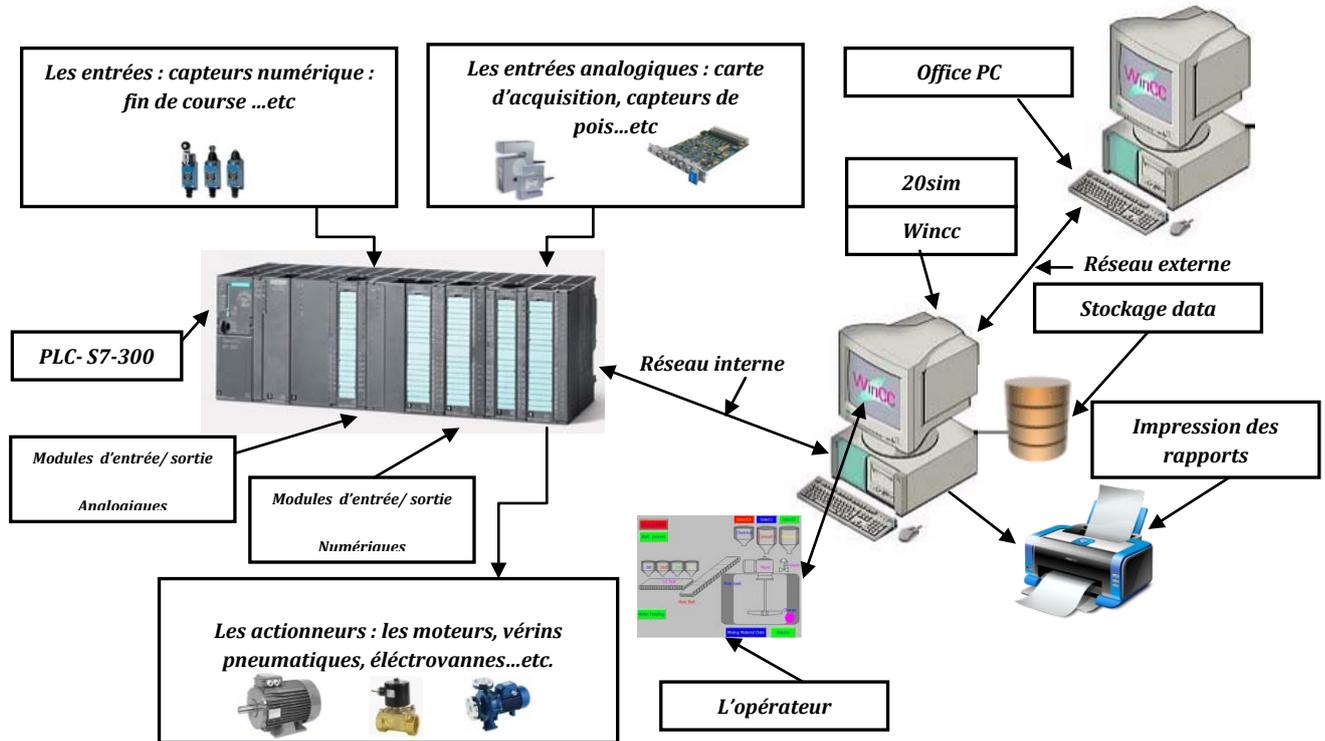


Fig.4.17 L'architecture générale modifiée de la centrale à béton de système de supervision.

Le PLC ou L'API est de type S7-300 relié avec des modules d'entrées numériques ou analogiques, tels que : les capteurs de niveaux, les sondes, fin de course, les capteurs de poids et les carte d'acquisition...etc. Les modules de sorties numériques ou analogiques reliés avec les actionneurs tels que : les pompes, les moteurs, les vérins pneumatiques et les électrovannes...etc.

L'API est connectée avec le PC d'interface HMI par un réseau interne (câble MPI), cette interface est réalisée par le logiciel Wincc. Avec cette HMI en peut contrôler, superviser le système, stocker les données et les rapports de production.

Chapitre 4. Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

Le diagramme fonctionnel de l'ensemble du processus est représenté dans la figure suivante, où toutes les actions de dosage et de mélange sont affichées. Lorsque la production commence, l'opérateur du système doit choisir la recette souhaitée et insérer la quantité voulue du béton grâce à l'interface graphique HMI-SCADA.

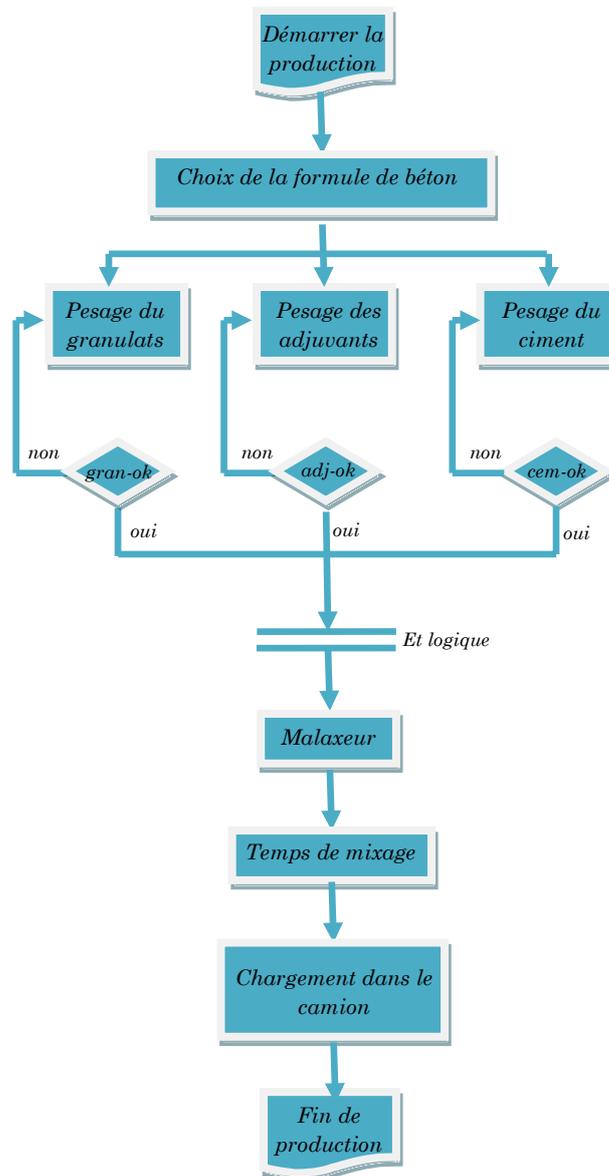


Fig.4.18 Diagramme fonctionnel du processus de la centrale à béton.

4.5 Programmation par step 7 de la centrale à béton

4.5.1 Définition des documents utilisés

- P&ID : "Piping and Instrumentation Diagram"; diagramme schématique illustrant la tuyauterie, l'équipement et les connexions de l'instrumentation dans le circuit d'eau comme dans la figure 3.4 du chapitre trois qui illustre bien le circuit hydraulique d'eau et les commandes associés.
- Spécification du système de contrôle ; document élaboré par le constructeur de la centrale à béton dans lequel sont définis les exigences minimales et les spécifications de l'ingénierie de détail pour le système de contrôle.
- Schémas électriques , Schéma unifilaire, Tableau MCC; documents représentant à l'aide de symboles graphiques, les différentes parties d'un réseau, d'une installation ou d'un équipement qui sont reliées et connectées fonctionnellement, ils ont pour but d'expliquer le fonctionnement des équipements.
- Schémas des armoires automates, variateurs de fréquence ; documents représentant la configuration des automates, les E/S du PLC et les connexions fonctionnelles.
- Documentation technique du fournisseur ; représente les caractéristiques et les spécifications techniques des composants et des équipements présents dans l'unité de production.

4.5.2 Création d'un projet S7 avec configuration matérielle

Les procédures qui permettent de créer un projet sous STEP 7 sont les suivantes :

- 1- Lancer SIMATIC Manager par un double clic sur son icône.  SIMATIC Manager
- 2- La fenêtre suivante permet de passer aux étapes de la création du projet.
- 3- Les étapes de l'assistant de création du projet sont : choisir la CPU utilisé, choisir le type des blocs de programme avec le langage souhaité (LIST, CONT, LOG) et le nom du projet.
- 4- Après l'exécution de la commande Créer, SIMATIC Manager s'ouvre avec la fenêtre du projet nouvellement créé comme dans la figure suivante :

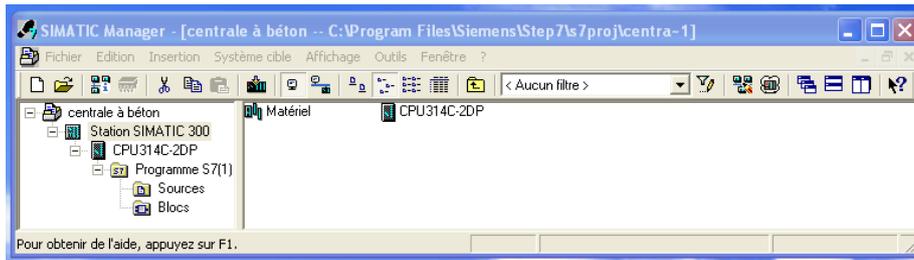


Fig.4.19 Nouveau projet step7 de la centrale à béton.

- 5- Sélectionner le dossier Station SIMATIC 300 et double-cliquer sur Matériel. Ceci ouvre la fenêtre "HW Config" :

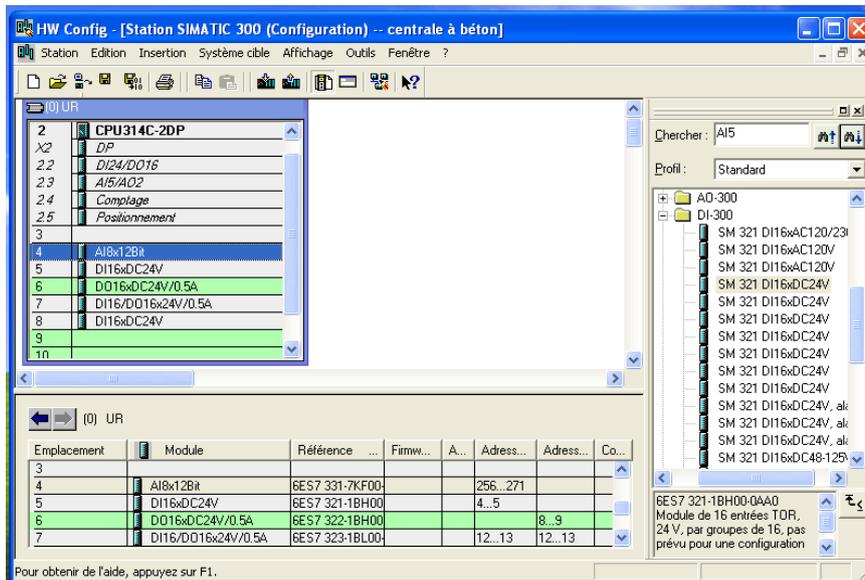


Fig.4.20 Configuration hardware du projet step7 de la centrale à béton.

Les composants de l'API sont :

- Un module d'alimentation : PS 307-10 A.
- CPU : est de type CPU314C-2P.
- Module d'entrées analogiques : 8 entrées AI8x12bit
- Module d'entrées TOR : 16 entrées DI16xDC24V
- Module de sorties TOR : 16 sorties DO16xDC24V
- Module d'entrées et sorties : 16 entrées et 16 sorties DI16/DO16 24V
- Module d'entrées : 16 entrées DI16xDC24V

4.5.3 La Structure du programme

Les automates Siemens sont orientés « programmation structurée ». Cela signifie que le programme utilisateur peut être découpé en blocs qui sont eux même découpés en segments.

Chapitre 4. Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

Sur les automates Siemens il existe différents types de blocs programmes : les blocs OB, FB, FC, DB..etc.

A. Les blocs d'organisation (OB)

Les blocs d'organisation (OB) constituent l'interface entre le système d'exploitation et le programme utilisateur. Ils sont appelés par le système d'exploitation selon leur priorité et gèrent le traitement des programmes cycliques et déclenchés par alarme, ainsi que le comportement à la mise en route de l'automate programmable et le traitement des erreurs.

Les blocs d'organisation définissent l'ordre (événements de déclenchement) dans lequel les différentes parties du programme sont traitées. L'exécution d'un OB peut être interrompue par l'appel d'un autre OB. Cette interruption se fait selon la priorité : les OB de priorité plus élevée interrompent les OB de priorité plus faible.

Bloc d'organisation de traitement cyclique (OB1)

Le bloc d'organisation OB1 sert à l'exécution cyclique du programme utilisateur. On programme, dans l'OB1, des appels correspondant aux blocs fonctionnels FB ou aux fonctions FC ou à d'autres types de structures. L'OB1 ne peut être appelé que par le programme système dès que l'exécution du programme de mise en route est achevée.

B. Les blocs fonctionnels (FB)

Les blocs fonctionnels sont subordonnés aux blocs d'organisation. Ils renferment une partie du programme qui peut être appelée dans l'OB1 ou dans un autre bloc fonctionnel FB.

Avant de commencer la programmation du bloc fonctionnel, il est indispensable de remplir la table de déclaration des variables d'entrées/sorties dans chaque bloc fonctionnel, en utilisant des noms qui ne figurent pas dans la table des mnémoniques, ainsi que les paramètres formels et les données statiques.

C. Les blocs FC

Une fonction FC est un bloc de code sans mémoire. Les variables temporaires d'une fonction sont sauvegardées dans la pile des données locales qui sont perdues à l'achèvement de la fonction. Les fonctions peuvent faire appel à des blocs de données globaux pour la sauvegarde des données.

Une fonction contient un programme qui est exécuté quand cette fonction est appelée par un autre bloc en vue de :

Chapitre 4. Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

- Renvoyer une valeur de fonction au bloc appelant (exemple : fonctions mathématiques),
- Exécuter une fonction technologique (exemple : commande individuelle avec combinaison binaire).

D. Les blocs de données (DB)

Dans les blocs de données, sont mémorisées les données nécessaires au traitement du programme et les données affectées à chaque bloc fonctionnel. On distingue deux types de blocs de données :

- Blocs de données d'instance

Un bloc de données d'instance est associé à chaque appel de bloc fonctionnel transmettant des paramètres. Ces blocs contiennent les paramètres effectifs et les données statiques du FB. Les variables déclarées dans le FB déterminent la structure du bloc de données d'instance. L'instance est l'appel d'un bloc fonctionnel. Si, par exemple, un bloc fonctionnel est appelé cinq fois dans le programme utilisateur S7, il existe cinq instances de ce bloc.

- Blocs de données globaux

Contrairement aux blocs de code, les blocs de données ne contiennent pas d'instructions STEP7; ils servent à l'enregistrement des données du programme utilisateur pouvant être utilisées par tous les autres blocs: ils contiennent des données variables que le programme utilisateur utilise [53].

Les figures suivantes montrent bien les blocs de programme de la centrale à béton et l'architecture (structure du programme) :

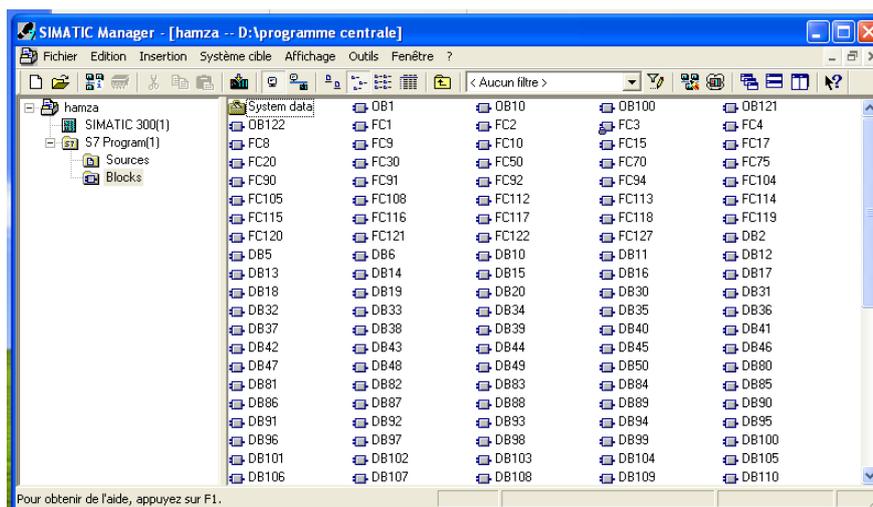


Fig.4.21 Les blocs du programme de la centrale à béton.

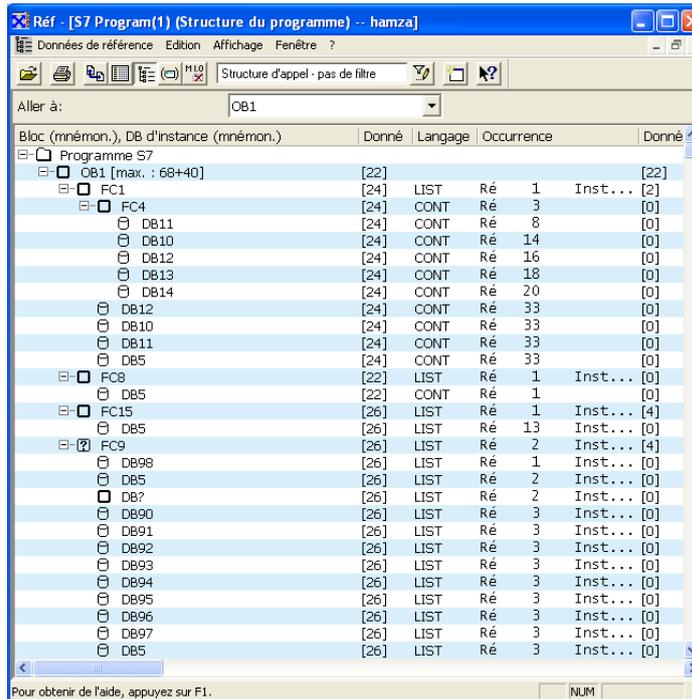


Fig.4.22 La structure du programme de la centrale à béton.

4.5.4 Programme du circuit d'eau intérieur dans la chambre de la centrale à béton

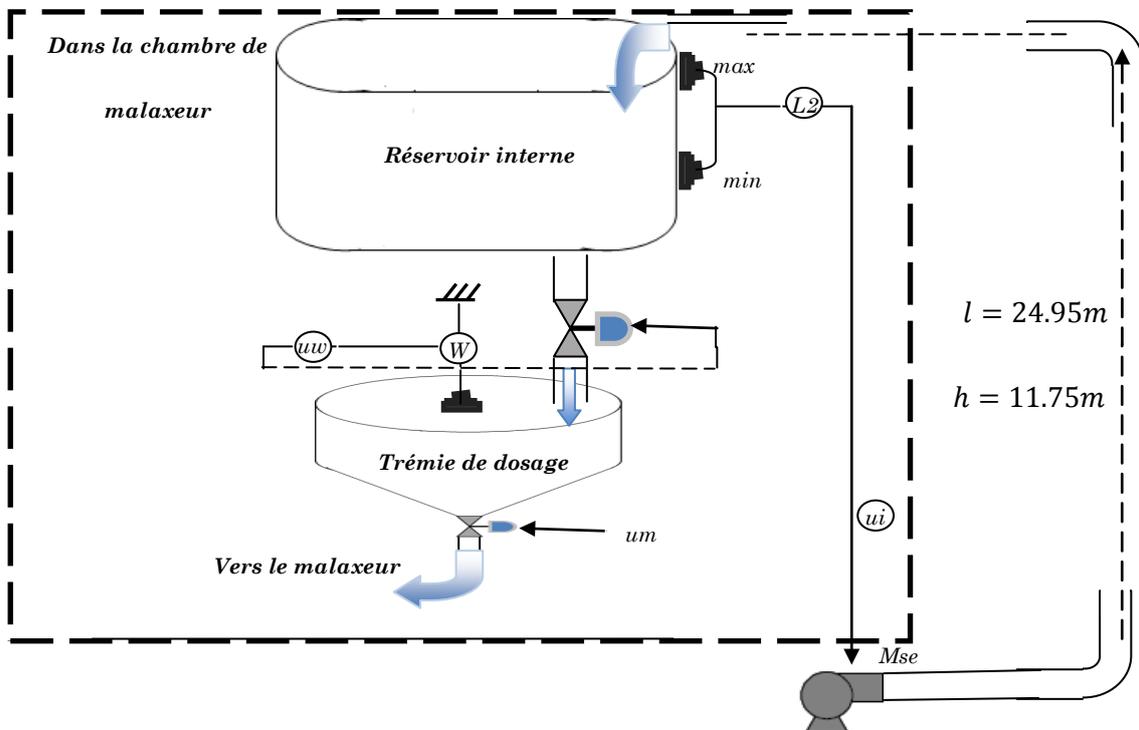


Fig.4.23 Circuit d'eau dans la chambre de malaxeur.

Suivant la figure 4.23, la pompe d'eau est contrôlée par la commande u_i issue de la valeur du transmetteur de niveau d'eau L2 :

$$U_i = \begin{cases} 0 & \text{à dire la pompe en arrêt , Si } L \geq Niv_Max \\ 1 & \text{à dire la pompe en marche , Si } L \leq Niv_min \end{cases}$$

Lorsque le niveau d'eau est diminué jusqu'à $L = Niv_min$, La pompe déclenche pour remplir le réservoir interne afin d'atteindre le niveau $L = Niv_max$.

Pour la trémie de pesage, le processus commence le pesage quand la commande $u_w=1$ c'est à dire la vanne en état ouverte. Le transmetteur de poids donne la quantité d'eau dans la trémie jusqu'à atteindre la valeur de formule. Par exemple $W=175\text{ kg}$, la vanne mis en état fermée. Si la commande $u_m=1$, la vanne de décharge vers le malaxeur mis en état ouverte.

Le diagramme fonctionnel de ce processus : remplissage de réservoir interne et le dosage d'eau dans la trémie est expliqué dans la figure suivante :

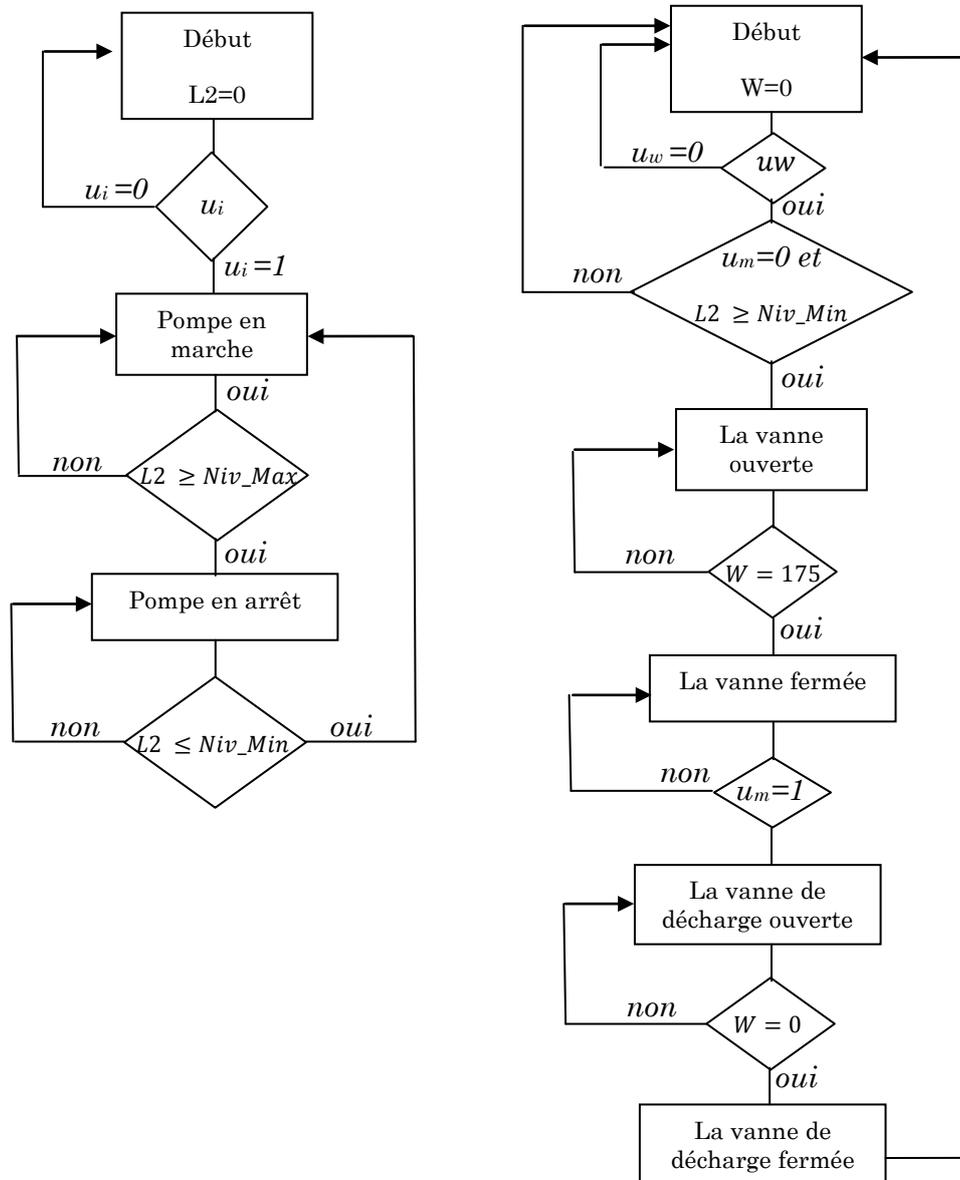


Fig.4.24 Diagramme fonctionnel du système de remplissage du réservoir interne et du dosage de la trémie du pesage.

4.5.4.1 Mise à l'échelle d'une entrée analogique

Dans notre cas les transmetteurs du niveau d'eau dans le réservoir interne ou bien le transmetteur du poids dans la trémie de pesage donnent des signaux analogiques. En général dans l'industrie les capteurs analogiques donnent des signaux électriques normalisés, par exemple : 4mA-20 mA, 0v -10v ...etc. Donc il faut faire une conversion de ces signaux analogiques vers des signaux numériques en utilisant les convertisseurs analogiques numériques CAN situés dans les modules d'entrées analogiques des API.

Un schéma bloc d'une chaîne d'acquisition pour une entrée d'un courant unipolaire 4 à 20 mA et une conversion numérique sur 12 bits (sans bit de signe) est représentée dans la figure suivante :

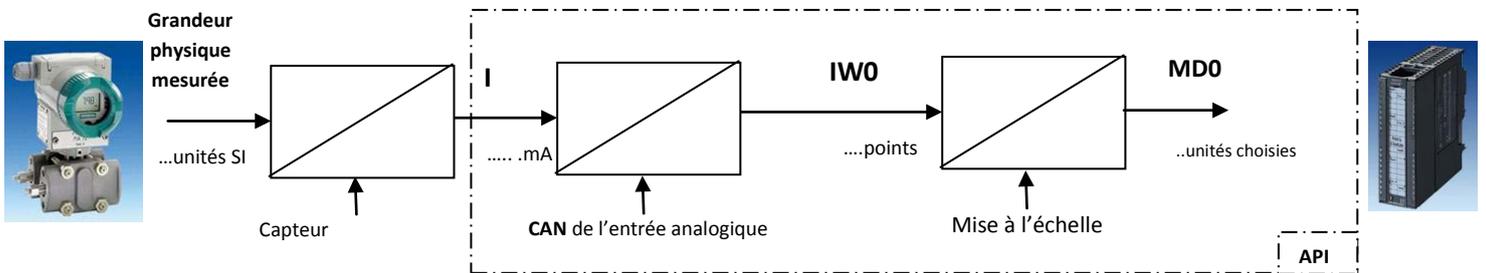


Fig.4.25 Chaîne d'acquisition d'une entrée analogique d'un API.

Dans les CAN des API siemens, la plage des nombres entiers entre : 0 et 27648. Ces valeurs numériques doit représenter la grandeur à mesurer (comme par exemple un remplissage en litres). Cette opération s'appelle normalisation ou mise à l'échelle de la valeur analogique. Par exemple :

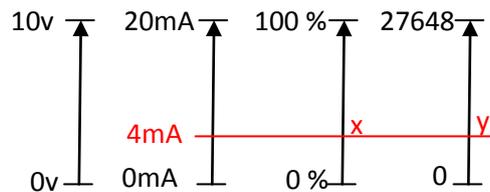


Fig.4.26 Mise à l'échelle d'une valeur analogique.

La conversion de la valeur numérique entière (plage nominale : entre 0 et 27648) de l'entrée analogique en valeur normée (normalisation) est réalisée par le bloc fonctionnel standard « Mise à l'échelle » (SCALE) FC105. La fonction FC 105 est fournie par STEP 7 dans la bibliothèque « Standard Library » dans le programme S7 « TI-S7 Converting Blocks ».

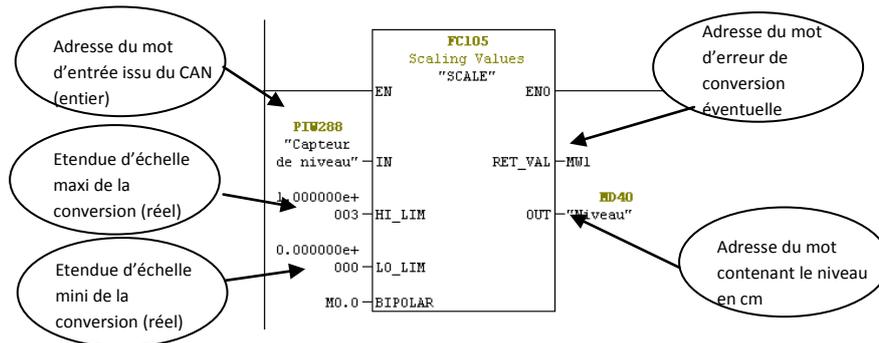


Fig.4.27 BLOC FC105 de step 7 « Mise à l'échelle ».

4.5.4.2 Table des mnémoniques du réservoir interne

La table des mnémoniques concernant le système de remplissage du réservoir interne sont présentés dans la figure suivante :

	Mnémonique	Opérande	Type de d	Commentaire
1	alarme niv-max	A 8.2	BOOL	
2	alarme niv-min	A 8.3	BOOL	
3	pompe en arrêt	A 8.0	BOOL	
4	pompe en marche	A 8.1	BOOL	
5	ui=1	E 124.1	BOOL	
6	valeur de capteur niv	MD 10	DWORD	
7	NIV-MAX	MD 18	DWORD	
8	NIV-MIN	MD 8	DWORD	
9				

Fig.4.28 Table des mnémoniques du processus de remplissage du réservoir.

4.5.4.3 Programme Step 7 et simulation du système de remplissage du réservoir interne

Le niveau min nécessaire pour démarrer la pompe qui est de 30 cm. Le niveau max pour arrêter la pompe est 170 cm et le transmetteur du capteur de niveau est étalonné sur l'échelle (4mA-20mA) → (0cm-200cm)

La valeur du niveau d'eau est stockée dans la mémoire mot double MD10. La valeur de niveau min nécessaire pour démarrer la pompe est stockée dans MD8 et la valeur de niveau max est stockée dans MD18.

Après l'exécution du programme Step 7 de ce processus est le logiciel PLCSIM , on force la variable du capteur du niveau pour tester les sorties de L'API qui sont : arrêt pompe, marche pompe, alarme niveau max et alarme niveau min situés dans les adresses successives A8.0,A8.1,A8.2 et A8.3. L'exécution du programme et la simulation est bien présentée dans les deux figures suivantes.

Chapitre 4. Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

Dans la première le niveau d'eau est 195,313 cm et dans la deuxième le niveau est 14,467 cm :

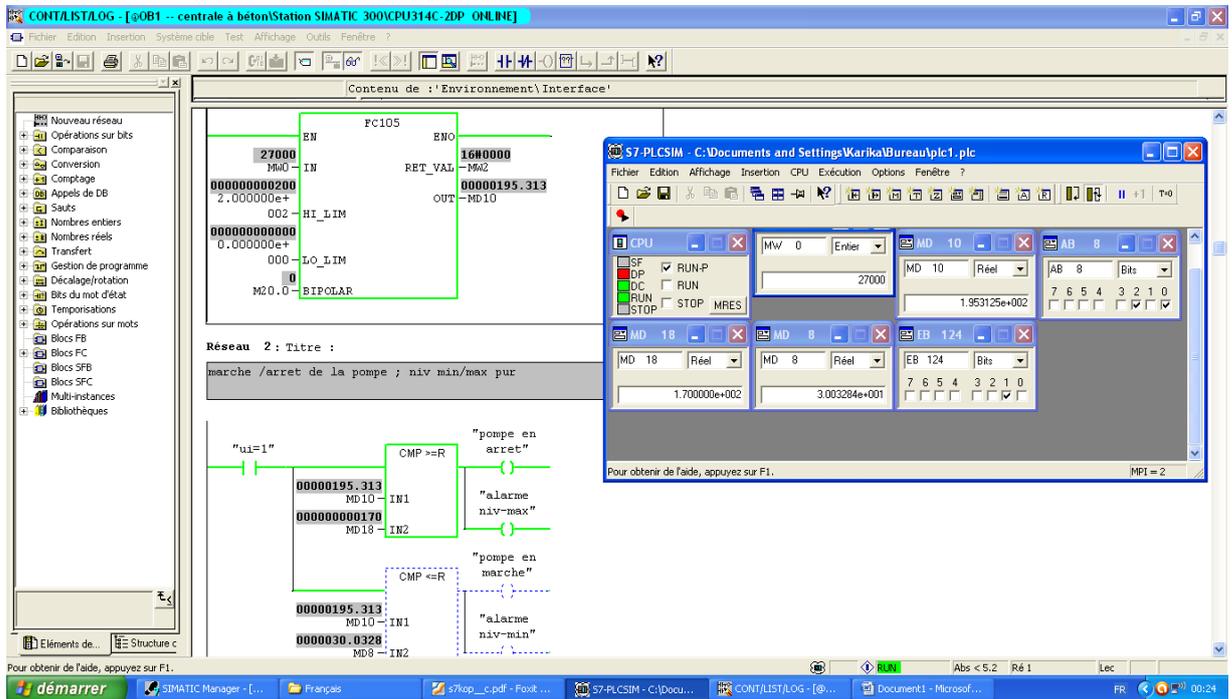


Fig.4.29 Exécution du programme Step 7 est simulation du processus de remplissage du réservoir dans le cas : L= 195,313 cm.

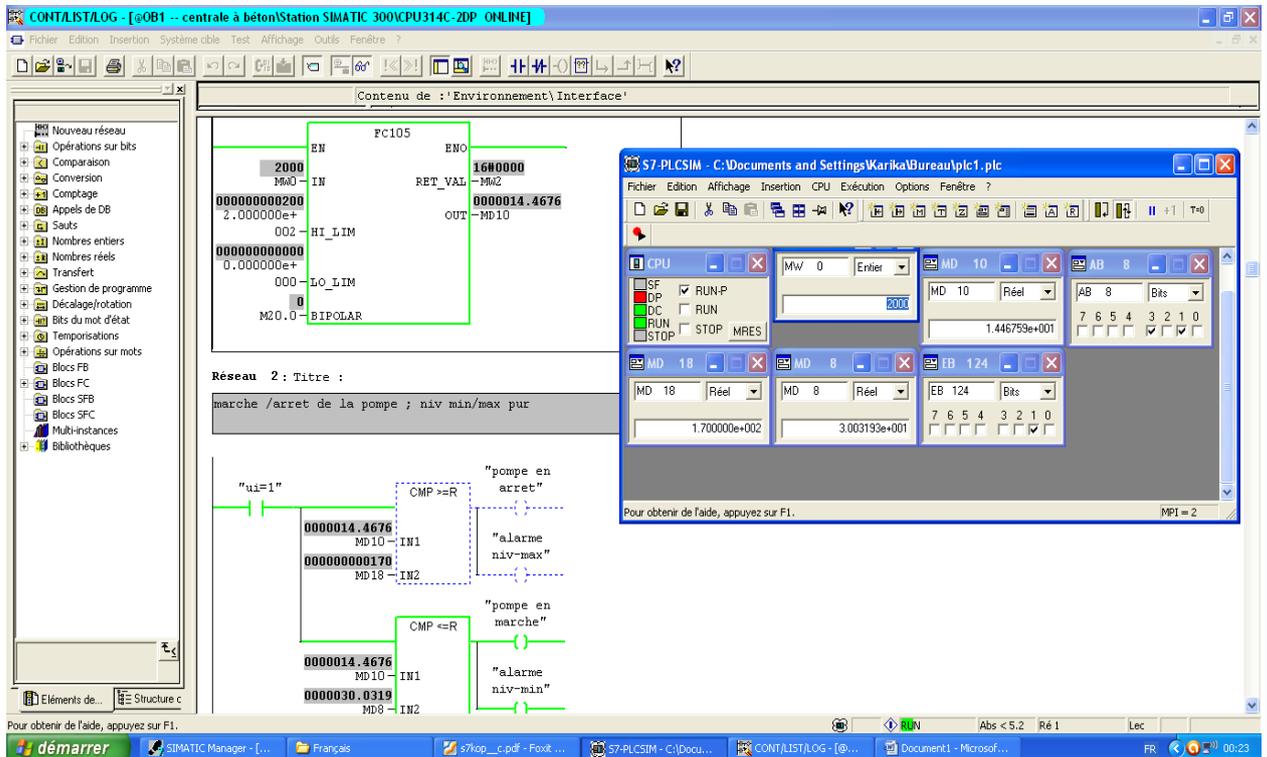
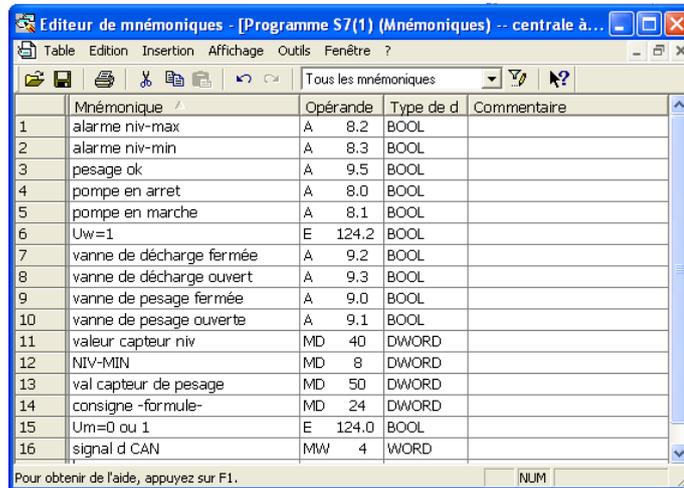


Fig.4.30 Exécution du programme Step 7 est simulation du processus de remplissage du réservoir dans le cas : L=14,467 cm.

4.5.4.4 Table des mnémoniques du système du pesage d'eau

La table des mnémoniques concernant le système du pesage d'eau est présenté dans la figure suivante :



	Mnémonique	Opérande	Type de d	Commentaire
1	alarme niv-max	A 8.2	BOOL	
2	alarme niv-min	A 8.3	BOOL	
3	pesage ok	A 9.5	BOOL	
4	pompe en arret	A 8.0	BOOL	
5	pompe en marche	A 8.1	BOOL	
6	Uw=1	E 124.2	BOOL	
7	vanne de décharge fermée	A 9.2	BOOL	
8	vanne de décharge ouvert	A 9.3	BOOL	
9	vanne de pesage fermée	A 9.0	BOOL	
10	vanne de pesage ouverte	A 9.1	BOOL	
11	valeur capteur niv	MD 40	DWORD	
12	NIV-MIN	MD 8	DWORD	
13	val capteur de pesage	MD 50	DWORD	
14	consigne -formule-	MD 24	DWORD	
15	Um=0 ou 1	E 124.0	BOOL	
16	signal d CAN	MW 4	WORD	

Fig.4.31 Table des mnémoniques du processus du pesage d'eau.

4.5.4.5 Programme Step 7 et simulation du système du dosage d'eau

Les conditions nécessaires pour démarrer le système du pesage est sont bien déterminée dans la figure 4.24 du diagramme fonctionnel du circuit d'eau qui sont :

- Il faut $Uw=1$, la commande de démarrage de pesage.
- Il faut $Um=0$, la commande de décharge d'eau vers le malaxeur.
- Le niveau d'eau dans le réservoir interne doit être plus que le niveau min.

Si Le signal du capteur de poids est atteindre la consigne de la formule, la vanne de pesage change l'état vers l'état fermée. Le processus de décharge d'eau vers le malaxeur est commence par l'ouverture de la vanne de décharge.

Après l'exécution du programme Step 7 et PLCSIM, les états des : vanne de pesage, vanne de décharge, les entrées et les sorties de L'API est présentées dans les figures suivantes :

Chapitre 4. Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

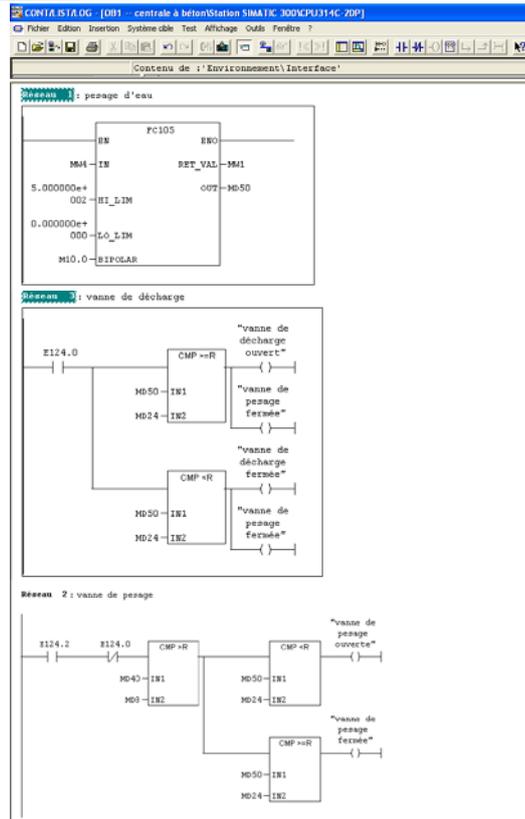


Fig.4.32 Programme Step7 du processus du pesage d'eau.

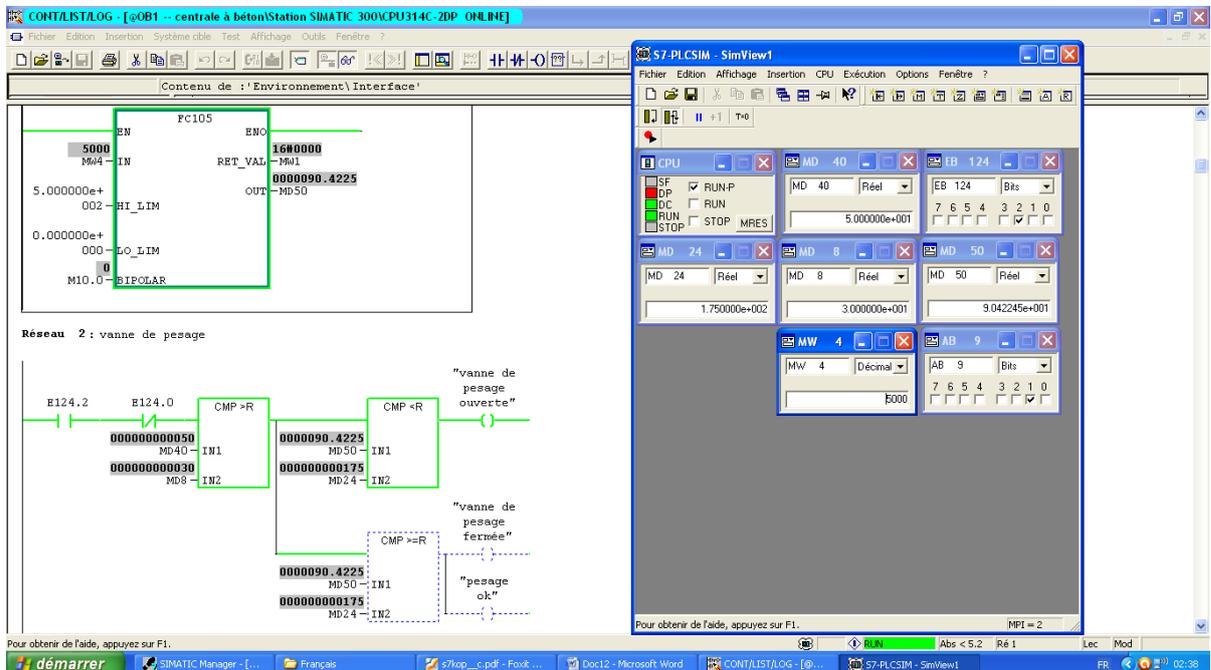


Fig.4.33 Exécution du programme Step 7 est simulation du processus du pesage, la vanne de pesage ouverte dans le cas : W=90,422 kg.

Chapitre 4. Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

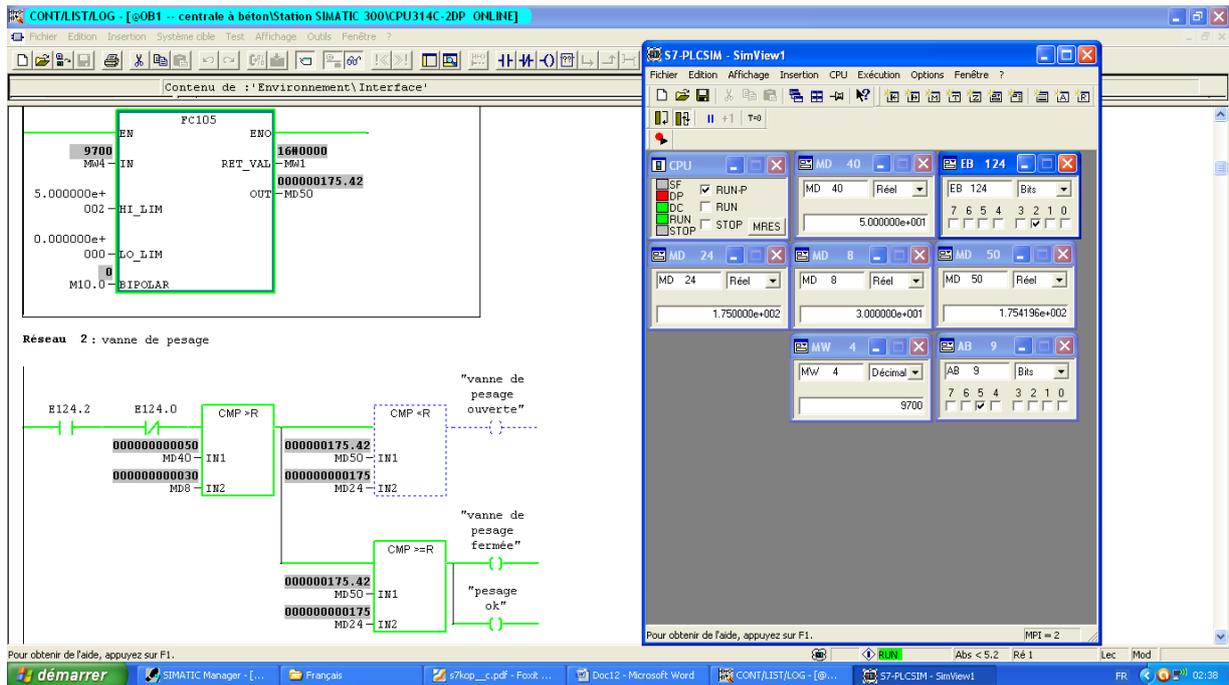


Fig.4.34 Exécution du programme Step 7 est simulation du processus du pesage, la vanne de pesage fermée dans le cas : $W=175,42$ kg.

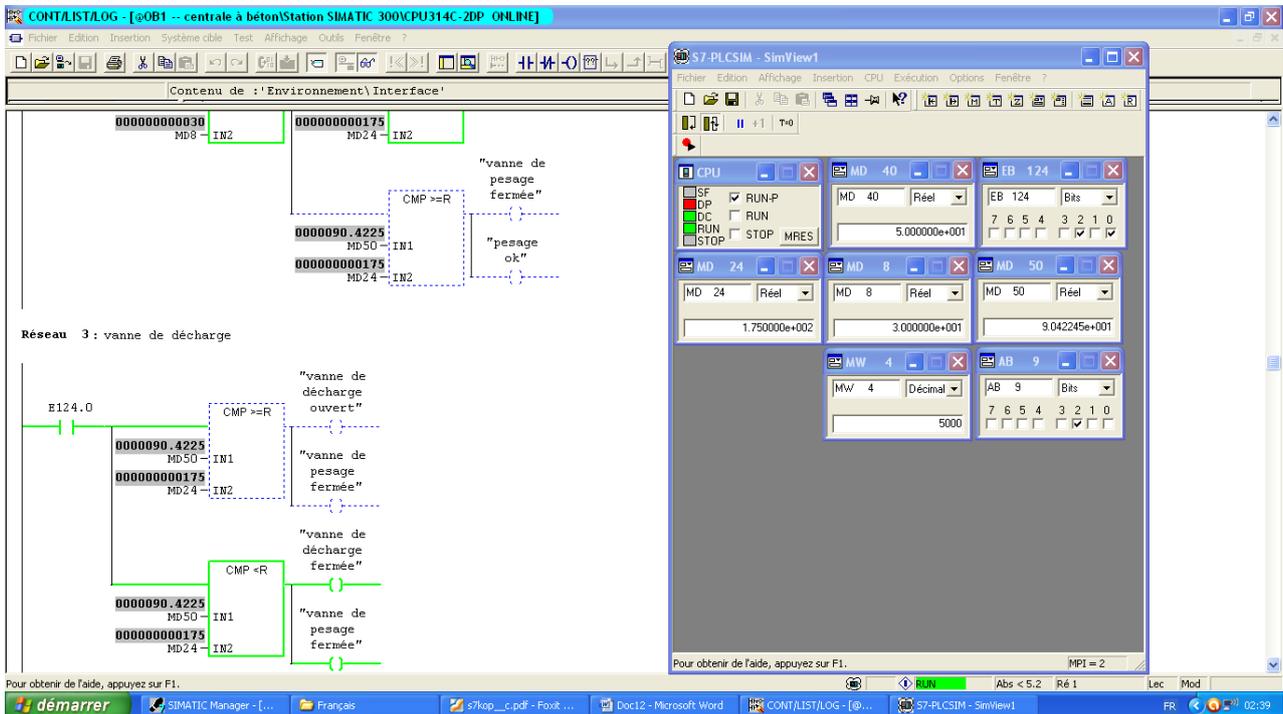


Fig.4.35 Exécution du programme Step 7 est simulation du processus de pesage, la vanne de décharge fermée dans le cas : $W=90,422$ kg.

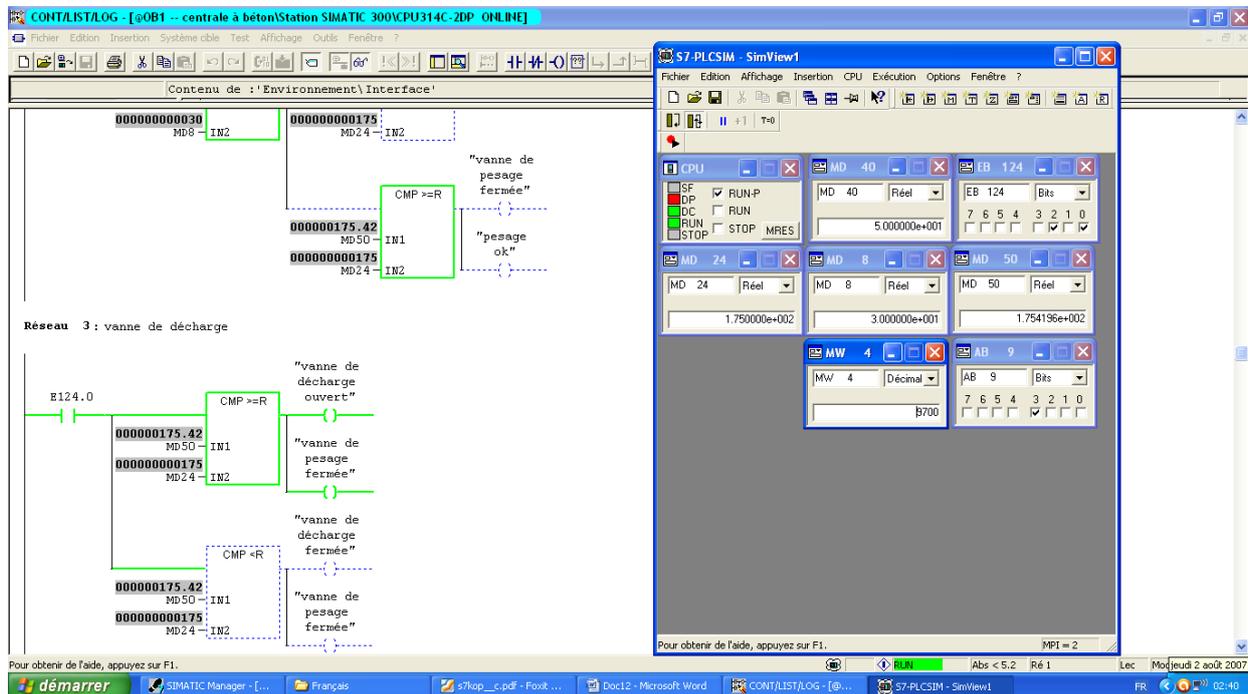


Fig.4.36 Exécution du programme Step 7 est simulation du processus du pesage, la vanne de décharge ouverte dans le cas : $W=175,42$ kg.

4.6 Réalisation de l'interface homme machine graphique HMI sous un environnement SCADA

Cette interface a été réalisée avec le WinCC, en liaison avec l'automate Siemens de CPU S300. Nous avons mis une vue globale de la centrale à béton.

Chaque sous-modèle est démontré dans la vue, avec des lectures en temps réel de chaque moment. Ça permet aussi à l'opérateur de contrôler et superviser la centrale à béton.

Chapitre 4. Automatisation et création d'une HMI de la centrale à béton

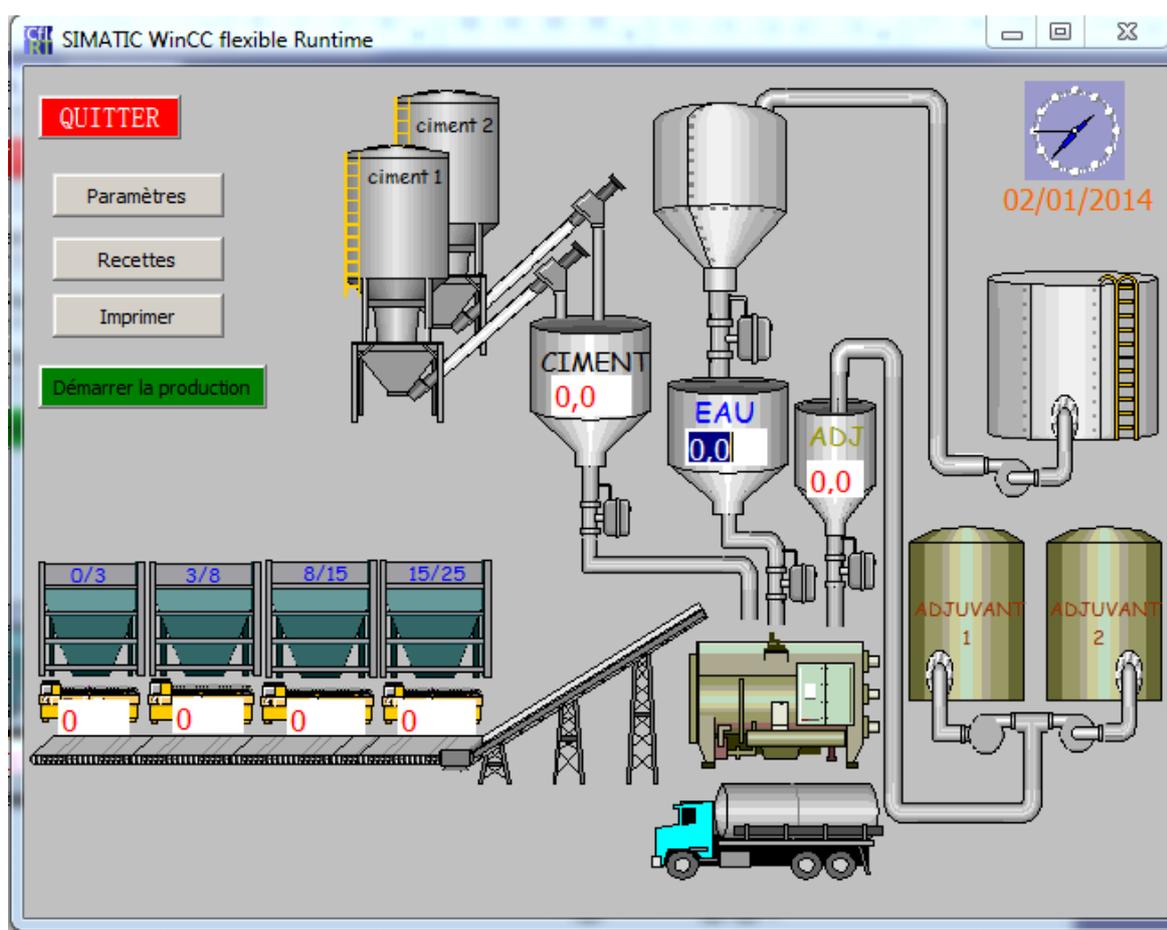


Fig.4.37 HMI réalisée de la centrale à béton.

Nous avons mis les options suivantes :

- **Choix de la recette**

Comme nous avons déjà expliqué au chapitre trois, le béton se différencie avec formule de mélange, ce qui réalisable avec notre HMI grâce au men « Recettes »

- **Démarrer et arrêt de production**

Après le choix de la recette à mélanger, l'opérateur doit lancer le cycle de production avec le bouton « démarrer la production », après le lancement le bouton devient « arrêt de production ».

- **L'impression**

Cette option est faite pour imprimer tout type de rapport de production réalisé sur la centrale, ainsi les rapports d'alarme.

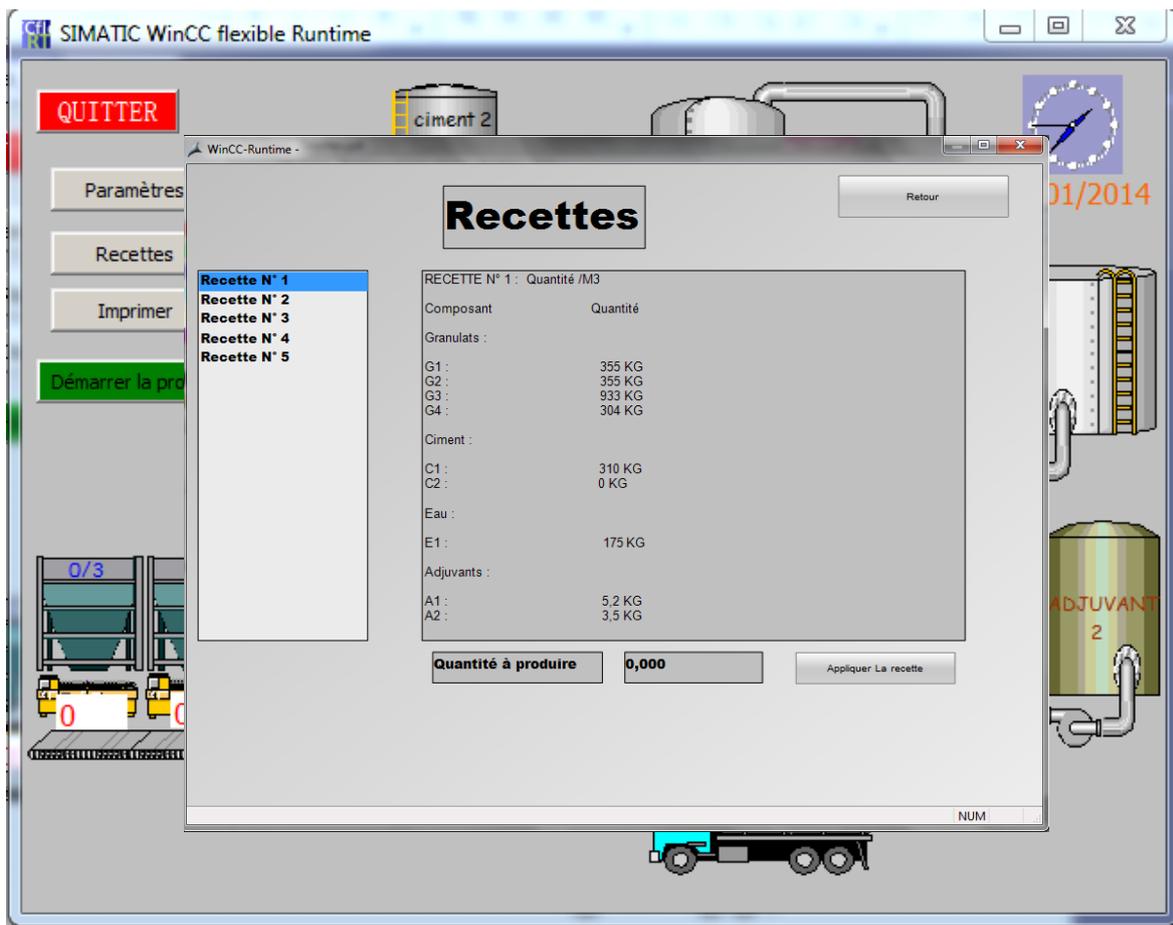


Fig.4.38 Menu du choix de la Recette dans HMI.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu une vue globale sur l'environnement SCADA, et des descriptions sur les logiciels utilisés :

- 20SIM : logiciel de modélisation et simulation des systèmes dynamiques
- SIMATIC STEP 7 : Logiciel de programmation et configuration des automates de type SIEMENS.
- PLC Sim : Simulateur des automates Siemens
- WinCC : Logiciel de création des HMI et de supervision des systèmes industriels.

Nous avons donné la structure du programme de la centrale à béton par STEP7 et des exemples de la programmation de quelques sous systèmes de cette centrale avec simulation dans le PLCSIM. On a réalisé une HMI Graphique interconnectée avec l'automate, dans le but de commander et superviser cette unité de production.

Chapitre 5

**Implémentation en temps réel des résidus
et supervision en En ligne dans un
environnement SCADA**

5.1 Introduction

Après la modélisation, la détection et l'isolation des défauts de la centrale à béton par l'approche bond graph dans le chapitre trois, les équations de redondances analytiques trouvées sont générées et implémentées dans L'API. Une analyse de la Surveillabilité et le placement de capteurs est donnée des sous systèmes de la centrale à béton.

La procédure de validation d'une équation de redondance analytique dans l'API est bien montrée dans les sections de ce chapitre. Une supervision en temps réel des deux systèmes (circuit d'alimentation et de pesage d'eau et adjuvants) de la centrale à béton est réalisée pour obtenir des alarmes dans l'HMI de cette centrale.

5.2 Types des défaillances dans la centrale à béton

L'automatisation de la centrale à béton a été spécialement conçue pour tester des différentes défaillances. Il est possible de simuler, manuellement ou automatiquement, un grand nombre de défaillances. Ces dernières peuvent être:

- **Physiques**
 - Fuite d'eau dans le réservoir interne et dans la trémie de pesage d'eau dans le circuit d'alimentation d'eau.
 - Fuite d'adjuvants 1 et 2 dans les réservoirs de stockage ou bien la trémie de pesage des adjuvants.
- **Actionneurs**
 - Défaillance dans la pompe d'eau ou dans les vannes d'eau.
 - Défaillance dans les pompes d'adjuvants 1 et 2, ou dans les vannes d'adjuvants.
- **Capteurs**
 - Capteurs de niveau, capteurs de poids dans les deux circuits d'alimentation d'eau et adjuvants en supprimant par exemple leur alimentation électrique au moyen d'interrupteurs dédiés à cet effet.
- **Régulateurs**
 - En modifiant les algorithmes de commande en temps réel.

5.3 Paramètres et conditions initiales utilisés

Les paramètres et les valeurs initiales utilisés dans les modèles bond graphs dans le chapitre trois, ainsi dans l'automatisation et la supervision obtenue dans le chapitre quatre et cinq, sont introduits par l'observation, l'expérimentation et les cahiers techniques des différents constructeurs : pompes, vannes...etc.

Par exemple, pour obtenir le coefficient de décharge de la vanne d'eau, on a mesuré la section réelle de cette vanne.

Chapitre 5. Implémentation en temps réel des résidus et supervision en En ligne dans un environnement SCADA

Pour déterminer le débit de la pompe d'eau qui alimente le réservoir interne, on avait deux possibilités, soit à partir du cahier technique fournis par le constructeur, ou bien par expérimentation, on mesurait la quantité d'eau donnée dans des intervalles de temps bien déterminés pour identifier le débit réel mais avec incertitudes considérées.

L'automatisation de la centrale a été validée à travers des comparaisons entre sa sortie : les observations expérimentales fournies par les différents capteurs, cahier de charge (condition de fonctionnement : la formule) et résultats de simulation dans le chapitre trois.

Les conditions initiales utilisées dans les simulations ou bien dans la validation du modèle automatisé sont des approximations des valeurs expérimentales en régime permanent correspondant à des valeurs de consignes données. Par exemple, la quantité initiale d'eau W_0 dans la trémie de pesage est la valeur du capteur de poids avant commencer la commande de pesage U_w . (voir figure 3.7)

$$\text{Consigne d'eau dans la formule } 175 \text{ kg} = W+W_0 \quad (5.1)$$

Les paramètres utilisés sont donnés dans le tableau suivant :

Symboles	Terminologies des paramètres	Valeurs
$V_{eau-ext}$	Volume du réservoir extérieur d'eau	$16m^3$
$A_{int-eau}$	Section du réservoir interne d'eau	$1.04m^2$
A_{tr-eau}	Section de la trémie de pesage d'eau	$0.96 m^2$
$h_{int-eau}$	Hauteur du réservoir interne d'eau de la terre	$11.75m$
Q_{p-ext}	Débit de la pompe d'eau extérieur	$0.011m^3/s$
Q_{p-int}	Débit de la pompe d'eau alimente le réservoir interne	$0.026 m^3/s$
h_{eau}	Hauteur de la trémie de pesage d'eau	$0.61 m$
w_{eau}	Quantité d'eau dans la formule de béton	$175kg/m^3$
l_{min}	Niveau minimum d'eau dans le réservoir interne	$0.4m$
l_{max}	Niveau maximum d'eau dans le réservoir interne	$2m$
ρ_{eau}	Densité d'eau	$998,2 \text{ kg} / m^3$
g	Constante de Gravité	9.81 N/m
$V_{adj-ext}$	Volume des cuves de stockage des adjuvants	$2 m^3$

Chapitre 5. Implémentation en temps réel des résidus et supervision en En ligne dans un environnement SCADA

A_{tr-adj}	Section de la trémie de pesage des adjuvants	0.407 m ²
l_{tr-adj}	Niveau maximum dans la trémie de pesage	0.5m
h_{adj}	Hauteur de la trémie de pesage des adjuvants de la terre	$h=9.55$ m
Q_{p-adj}	Débit des pompes des adjuvants	2.23 m ³
ρ_{adj}	Densité des adjuvants	1700kg/ m ³
w_{adj1}	Quantité d'adjuvant N° 01 dans la formule de béton	5.2 kg
w_{adj2}	Quantité d'adjuvant N° 02 dans la formule de béton	3.5 kg
w_{cim}	Quantité du ciment dans la formule de béton	310 kg
$W_{agg-0/3}$	Quantité d'agrégat 0/3 dans la formule de béton	355 kg
$W_{agg-3/8}$	Quantité d'agrégat 3/8 dans la formule de béton	355 kg
$W_{agg-8/15}$	Quantité d'agrégat 8/15 dans la formule de béton	304 kg
$W_{agg-15/25}$	Quantité d'agrégat 15/25 dans la formule de béton	333 kg
l_{arb}	Longueur d'arbre à vis du convoyeur de ciment	7 m
P_{n-mvis}	Puissance nominal du moteur de vis convoyeur de ciment	18.5 Kw
w_{n-mvis}	Vitesse angulaire nominal du moteur de vis convoyeur de ciment	157.079 rad.s ⁻¹
C_{n-mvis}	Couple nominal du moteur de vis convoyeur de ciment	120 N.m
$w_{n-redvis}$	Vitesse angulaire nominal du réducteur de vis convoyeur de ciment	12.56 rad.s ⁻¹
$C_{n-redvis}$	Couple nominal du moteur de vis convoyeur de ciment	2980 N.m
r_{poul}	Rayon des poulies de convoyeur des agrégats	0.2 m
P_{n-mtap}	Puissance nominal du moteur de convoyeur agrégat	11.5 Kw
w_{n-mtap}	Vitesse angulaire nominal du moteur de convoyeur agrégat	157.079 rad.s ⁻¹
C_{n-mtap}	Couple nominal du moteur de convoyeur agrégat	74 N.m
$w_{n-redtap}$	Vitesse angulaire nominal du réducteur de convoyeur agrégat	10.47 rad.s ⁻¹
$C_{n-redtap}$	Couple nominal du réducteur de convoyeur agrégat	2100 N.m

Tab.5.1 Valeurs des paramètres de la centrale à béton.

5.4 Surveillabilité et placement de capteurs

L'analyse structurelle effectuée sur les RRAs permet de construire la matrice de signature des défaillances. Pour cela, le cahier des charges doit être respecté. En effet, il arrive que des composants du système soient par définition non faillibles et donc exclus de la matrice des signatures. Concernant la centrale à béton, les régulateurs sont des lois de commande programmées (donc logiciels) et leur valeur de retour sont considérées comme des sorties des capteurs. Elles sont donc considérées comme des composants infaillibles de l'installation.

Dans le chapitre trois, sur la matrice de signature des défaillances de circuit d'alimentation et de pesage d'eau du tableau 3.1, on constate que, théoriquement, toutes les défaillances des composants sont détectables et isolables sauf celles relatives aux composants (C_2 , MR_2) et (U_w , me_2). En effet, les termes entre parenthèses ont les mêmes signatures. A partir de cette observation, on peut proposer un placement des capteurs supplémentaires sur ces composants du modèle bond graph pour isoler leurs défaillances. Pratiquement, cela se traduit par la génération à nouveau des RRAs et de la matrice des signatures.

Pour isoler les défaillances dans les composants C_2 et MR_2 c-à-d la trémie de pesage et la vanne de décharge d'eau, on a choisi d'ajouter un capteur de débit dans le système de décharge d'eau vers le malaxeur de béton. La figure 3.5 après l'ajout du capteur de débit est montrée dans la figure 5.1.

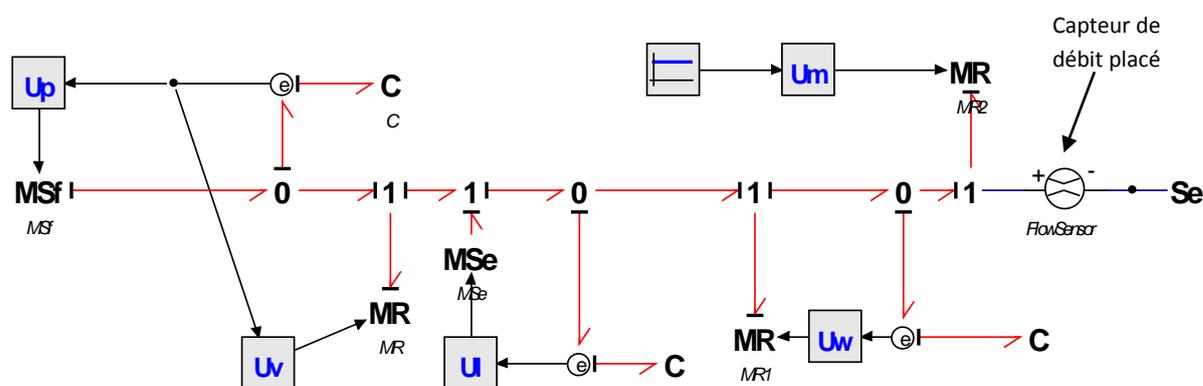


Fig.5.1 Modèle pseudo bond graph du circuit d'alimentation et du dosage d'eau après un placement d'un capteur de débit.

Quelques logiciels de modélisation et simulation par bond graph, peuvent générer les relations de redondances analytiques d'une façon automatique comme le SYMBOLS 2000 des versions SYMBOLS SHAKTI et SONATA, ce qui donne une facilité offerte de traiter des systèmes complexes, au lieu calculé les ARR's manuellement traduit du modèle bond graph du système étudié en causalité dérivée.

Chapitre 5. Implémentation en temps réel des résidus et supervision en En ligne dans un environnement SCADA

Pour isoler les défaillances dans les composants me_2 et U_w (c-à-d le capteur de pesage et la commande de pesage d'eau), on a proposé d'ajouter un deuxième capteur de poids me_3 dans la trémie de pesage d'eau, ce dernier est matériellement redondant avec me_2 . Ce qui permet de confirmer le défaut de capteur de poids si les mesures des deux capteurs sont différents.

La redondance matérielle entre les deux capteurs conduit à une RRA statique. Cette dernière améliore l'insolvabilité des défaillances et fournit des moyens pour la reconfiguration et la commande tolérante aux fautes [54].

Dans le circuit d'alimentation et de pesage d'adjuvants, la matrice de signature des défaillances présentée dans le tableau 3.2 montre bien que théoriquement les composants (me, Up_1) , (me_2, Up_2) , (C, Sf) , (C_2, Sf_1) , (C_1, MR_1) ne sont pas isolables. Pour isoler les défaillances de ces composants, il faut ajouter d'autres capteurs soit nouveaux capteurs dans les différents composants ou bien des capteurs redondants matériellement avec les autres capteurs. Il est important de noter que le placement des capteurs proposé est réalisé d'une façon intuitive.

Dans l'installation réelle de la centrale à béton, il n'existe aucun capteur dans les deux systèmes étudiés dans la section 3.4.3 et 3.4.4 du chapitre trois (le convoyeur à vis du ciment et le tapis convoyeur des agrégats). Ce qui rendent un grand risque. Des défaillances non détectables par le système de supervision qui peuvent détruire l'installation ou bien arrêtent la production. Ces défaillances physiques éventuelles sont découvert par l'opérateur de la centrale durant la production de béton. Parmi ces défaillances :

- Un grand frottement dans l'arbre de vis à cause d'une pierre dans le silo du ciment, ce qui implique l'arrêt du moteur.
- Un grand frottement dans l'arbre à vis à cause du roulement du réducteur, ou bien manque de graissage dans la maintenance préventive.
- Une déchirure dans le tapis convoyeur des agrégats à cause du frottement des pierres avec le tapis.

Ont propose un placement des capteurs dans ces deux systèmes pour surveiller les défaillances possibles, donner des indicateurs sur ces défaillances et éviter l'arrêt complet de la production.

5.5 Implémentation en temps réel

Dans cette section, on présente une implémentation en temps réel des résidus des deux systèmes d'alimentation et de pesage d'eau et adjuvants des sections 3.4.1 et 3.4.2.

5.5.1 Procédure de validation des ARR dans l'API

Après avoir vérifié les schémas électriques et circuit des commandes de la centrale à béton. Dans l'installation réelle de cette centrale, le circuit d'alimentation d'eau et de pesage connecté à L'API par les entrées (capteurs de niveau, capteurs de poids) et des sorties (pompes, vannes) est présenté dans la figure 4.23, le modèle bond graph de cette installation est présentée dans la figure 5.2, dans le but de générer et valider les résidus, la matrice de signature des défaillances pratique dans l'API.

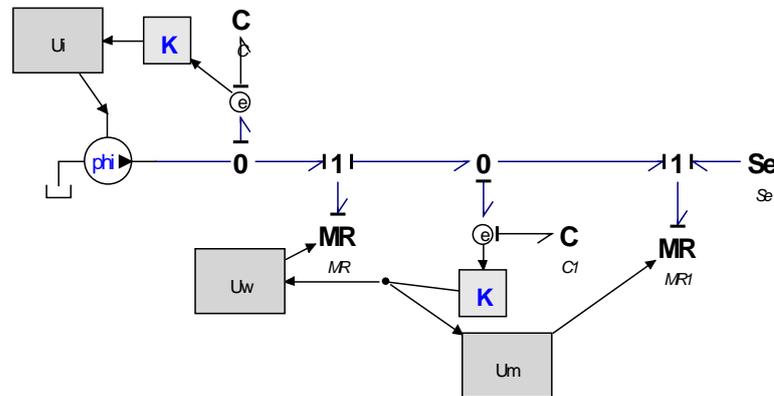


Fig.5.2 Modèle pseudo bond graph du circuit d'alimentation et du dosage d'eau de la figure 4.24.

Les RRAs correspondants à ce modèle bond graph en causalité dérivée est calculé manuellement sont :

$$ARR1 = U_i Q_p - C s m_{e1} - Cd1.sgn(me1 - me2)\sqrt{:(me1 - me2)} : .U_w \quad (5.2)$$

$$ARR2 = Cd1.sgn(me1 - me2)\sqrt{:(me1 - me2)} : .U_w - C_1 s m_{e2} - Cd2.sgn(me2 - Po :me2 - Po) : .U_m \quad (5.3)$$

$$ARR3 = U_i - minmax(me1, OnOff_{min}, OnOff_{max}) \quad (5.4)$$

$$ARR4 = U_w - on_off(me2, OnOff_{min}, OnOff_{max}) \quad (5.5)$$

$$ARR5 = U_m - on_off(me2, OnOff_{min}, OnOff_{max}) \quad (5.6)$$

$Q_p, me1$ et $me2$ sont respectivement débit de la pompe d'eau, la lecture du capteur de pression dans le réservoir interne et la lecture du capteur de pression dans trémie de pesage.

Chapitre 5. Implémentation en temps réel des résidus et supervision en En ligne dans un environnement SCADA

Dans l'installation réelle de ce système, les capteurs utilisés sont le capteur de niveau dans le réservoir interne h et le capteur de poids dans la trémie de pesage m , donc en utilisant l'équation 3.1 de la pression en régime thermodynamique sous-saturé pour obtenir les RRAs pratiques.

$$\text{On a: } P = \rho gh = \rho g \frac{V}{A} = \frac{\rho g}{A} \cdot \frac{m}{\rho} = \frac{g \cdot m}{A}$$

$$\text{Alors : } me_1 = \rho gh \text{ et } me_2 = \frac{g \cdot w}{A} \quad (5.7)$$

Les ARR utilisées dans la validation dans l'API sont :

$$ARR1 = U_i Q_p - C_s \rho gh - Cd_1 \cdot \text{sgn} \left(\rho gh - \frac{g \cdot w}{A} \right) \sqrt{\left(\rho gh - \frac{g \cdot w}{A} \right)} \cdot U_w \quad (5.8)$$

$$ARR2 = Cd_1 \cdot \text{sgn} \left(\rho gh - \frac{g \cdot w}{A} \right) \sqrt{\left(\rho gh - \frac{g \cdot w}{A} \right)} \cdot U_w - C_1 s \frac{g \cdot w}{A} \quad (5.9)$$

$$- Cd_2 \cdot \text{sgn} \left(\frac{g \cdot w}{A} - P_o \right) \sqrt{\left(\frac{g \cdot w}{A} - P_o \right)} \cdot U_m$$

$$ARR3 = U_i - \text{minmax} (\rho gh, OnOff_{min}, OnOff_{max}) \quad (5.10)$$

$$ARR4 = U_w - \text{on_off} \left(\frac{g \cdot w}{A}, OnOff_{min}, OnOff_{max} \right) \quad (5.11)$$

$$ARR5 = U_m - \text{on_off} \left(\frac{g \cdot w}{A}, OnOff_{min}, OnOff_{max} \right) \quad (5.12)$$

5.5.2 Exemple de validation d'une relation de redondance analytique dans l'API

On prendant l'équation 5.8 de la relation de redondance analytique suivante :

$$ARR1 = U_i Q_p - C_s \rho gh - Cd_1 \cdot \text{sgn} \left(\rho gh - \frac{g \cdot w}{A} \right) \sqrt{\left(\rho gh - \frac{g \cdot w}{A} \right)} \cdot U_w$$

Les variables et les paramètres de cette équation sont donnés dans la table de mnémoniques dans la figure suivante :

Et /	Mnémonique	Opérande	Type de données	Commentaire
1	Differenzierer_DB	DB 1	FB 1	
2	VAT_1	VAT 1		
3	CYCL_EXC	OB 1	OB 1	Cycle Execution
4	rho	MD 12	DWORD	
5	g gravité	MD 14	DWORD	
6	c capacité hydraulique	MD 38	DWORD	
7	Qp débit de la pompe	MD 16	DWORD	
8	capteur de niv	MD 10	DWORD	
9	capteur de poids	MD 40	DWORD	
1	A section	MD 18	DWORD	
1	Cd1	MD 34	DWORD	
1	Ui	E 124.1	BOOL	
1	Uw	E 124.2	BOOL	
1	Um	E 124.0	BOOL	
1	sortie CAN niv	MW 0	WORD	
1	sortie CAN poids	MW 4	WORD	
1	ARR1	MD 56	DWORD	

Fig.5.3 Table des mnémoniques de l'ARR1.

On présente dans la programmation de l'ARR1, la bibliothèque du step7 tel que la fonction mise en échelle FC105, déjà expliquée dans la section 4.4.4.1 du

Chapitre 5. Implémentation en temps réel des résidus et supervision en En ligne dans un environnement SCADA

chapitre quatre, la fonction de dérivée, multiplier réels, diviser réels, soustraire réels, additionner réels, fonction signe d'un nombre réel et la valeur absolue d'un nombre réel.

Il faut respecter les types des variables et les paramètres déclarés dans la table des mnémoniques (booléen, entier 16 bits, entier 32 bits réel, mot et mot double).

L'ARR1 validée dans le programme step 7 de la centrale à béton est donnée dans le tableau suivant avec deux langages CONT et LIST :

Tab.5.2 validation de l'ARR1 dans le programme de la centrale à béton.

```

FBI : Titre :
ARR1 :relation de redondance anaytique 1

Réseau 1: Titre :
valeur capteur de poids

FC105
EN  ENO
IN  RET_VAL=MW1
"sortie CAN poids" IN
5.000000e+002 HI_LIM
0.000000e+000 LO_LIM
M10.0 BIPOLAR
OUT "capteur de poids" MD40

Réseau 2: Titre :
valeur du capteur de niveau

FC105
EN  ENO
IN  RET_VAL=MW1
"sortie CAN niv" IN
2.000000e+002 HI_LIM
0.000000e+000 LO_LIM
M10.0 BIPOLAR
OUT "capteur de niv" MD10

Réseau 3: Titre :
valeur poids x gravité g / section A

MUL_R  DIV_R
EN  ENO  EN  ENO
MD40  MD20  MD20  IN1  OUT  MD22
"capteur de poids" IN1  OUT  MD20
MD14  MD18  MD18  IN2  OUT
"gravité" IN2
"gravité" IN2

Réseau 4: Titre :
RHO (densité) x g(gravite) x h(valeur de niv) - w x g / section A

MUL_R  MUL_R  SUB_R
EN  ENO  EN  ENO  EN  ENO
MD12  MD22  MD26  MD22  MD26  MD28
"rho" IN1  OUT  MD24  MD22  IN1  OUT  MD26  MD26  IN1  OUT  MD28
MD14  MD10  MD22  MD22  IN2
"gravité" IN2  "capteur de niv" IN2

```

```

FBI : Titre :
ARR1 :relation de redondance anaytique 1

Réseau 1: Titre :
valeur capteur de poids

U M 10.0
= L 0.0
BLD 103
CALL FC 105
IN :=MW4
HI_LIM :=5.000000e+002
LO_LIM :=0.000000e+000
BIPOLAR:=L0.0
RET_VAL:=MW1
OUT :=MD40
NOP 0

Réseau 2: Titre :
valeur du capteur de niveau

U M 10.0
= L 0.0
BLD 103
CALL FC 105
IN :=MW0
HI_LIM :=2.000000e+002
LO_LIM :=0.000000e+000
BIPOLAR:=L0.0
RET_VAL:=MW1
OUT :=MD10
NOP 0

Réseau 3: Titre :
valeur poids x gravité g / section A

U(
L MD 40
L MD 14
*R
T MD 20
UN OV
SAVE
CLR
U BIE
)
SPBNB _001
L MD 20
L MD 18
/R
T MD 22
_001: NOP 0

Réseau 4: Titre :
RHO (densité) x g(gravite) x h(valeur de niv) - w x g / section A

U(
U(
L MD 12
L MD 14
*R
T MD 24
UN OV
SAVE
CLR
U BIE
)
)
SPBNB _002
L MD 22
L MD 10
*R
T MD 26
UN OV
SAVE
CLR
_002: U
)
)
SPBNB _003
L MD 26
L MD 22
-R
T MD 28
_003: NOP 0

```

Chapitre 5. Implémentation en temps réel des résidus et supervision en En ligne dans un environnement SCADA

Réseau 5: Titre :
racine carée de la valeur absolue : RHO (densité) x g(gravite) x h(valeur de niv) - w x g / section A et multiplier pars la commande Uw

Réseau 6: Titre :
coefficient de décahrge cdl x sign de (RHO (densité) x g(gravite) x h(valeur de niv) - w x g / section A)

Réseau 7: Titre :
dérivé de rho g h

Réseau 8: Titre :
capacité hydralique C1 x dérivé de rho g h

Réseau 9: Titre :
débit de la pompe x la commande U1

Réseau 10: Titre :
ARR1 =

Réseau 5: Titre :
racine carée de la valeur absolue : RHO (densité) x g(gravite) x h(valeur de niv) - w x g / section A et multiplier pars la commande Uw

```

U(
L MD 28
ABS
T MD 30
SET
SAVE
CLR
U BIE
)
SPBNB_004
L MD 30
SQRT
T MD 32
UN OV
SAVE
CLR
_004: U BIE
)
U E 124.2
SPBNB_005
L MD 32
L 1.000000e+000
*R
T MD 32
_005: NOP 0

```

Réseau 6: Titre :
coefficient de décahrge cdl x sign de (RHO (densité) x g(gravite) x h(valeur de niv) - w x g / section A)

```

L MD 32
L MD 34
*R
T MD 36
NOP 0

```

Réseau 7: Titre :
dérivé de rho g h

```

U "Start_Reset" M0.1
= L 20.0
BLD 103
U "Release" M0.0
SPBNB_001
CALL "Differenzierer", "Differenzierer_DB" FB1 / DB1
start :=L20.0
time_ms :=#OB35_EXC_FREQ #OB35_EXC_FREQ
count_new:=valeur de rho g h MW26
d :=dérivée 1" d MD50
dd :=dd" MD60
_001: NOP 0

```

Réseau 8: Titre :
capacité hydralique C1 x dérivé de rho g h

```

L MD 50
L MD 34
*R
T MD 52
NOP 0

```

Réseau 9: Titre :
débit de la pompe x la commande U1

```

U E 124.1
SPBNB_006
L MD 16
L 1.000000e+000
*R
T MD 16
_006: NOP 0

```

Réseau 10: Titre :
ARR1 =

```

U(
L MD 16
L MD 52
-R
T MD 54
UN OV
SAVE
CLR
U BIE
)
SPBNB_007
L MD 52
L MD 36
-R
T MD 56
_007: NOP 0

```

5.5.3 Matrice pratique de signature des défaillances

Dans un système de surveillance, il existe deux types de matrices de signature des défaillances: une matrice théorique qui est déduite directement de l'analyse des RRAs et une autre matrice pratique qui est réellement implémentée et utilisée dans les procédures de détection et de localisation des défaillances. La principale différence entre ces deux matrices est que la matrice pratique tient compte de la sensibilité des résidus par rapport aux variations et ordres des mesures et des paramètres.

L'analyse de la sensibilité de chaque résidu se poursuit pour construire la signature pratique de chaque composant. Cette analyse est réalisée sur la base des résultats de simulation et des données en hors ligne acquises lors des différents modes de fonctionnement de l'installation.

Par exemple, la matrice pratique des défaillances est utilisée pour le circuit d'alimentation et de pesage d'eau est présentée dans le tableau suivant :

	<i>h</i>	<i>w</i>	<i>C</i>	<i>C₁</i>	<i>MR</i>	<i>MR₁</i>	<i>Msf</i>	<i>Ui</i>	<i>Uw</i>	<i>Um</i>
<i>r₁</i>	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0
<i>r₂</i>	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1
<i>r₃</i>	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0
<i>r₄</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>r₅</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>D_b</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>I_b</i>	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1

Tab.5.3 Matrice de signature des défaillances pratique de circuit d'alimentation et de dosage d'eau.

En analysant la matrice de signature des défaillances du tableau 5.3, on constate que la trémie *C1* et la vanne de décharge vers le malaxeur ont des signatures identiques. On peut donc dire que les défaillances affectant ces deux composants ne sont pas isolables.

En analysant la structure causale du modèle bond graph en causalité dérivée de la figure 5.2, on peut conclure qu'un seul détecteur de flux (capteur de débit) supplémentaire sur le système de décharge d'eau suffit pour localiser les défaillances de ce sous-système.

5.5.4 Procédure de décision

Généralement, la logique adoptée pour conclure l'apparition d'une défaillance, dépend du type de connaissance disponible sur le processus, de l'approche utilisée pour générer les indicateurs de défaillances et du type des défaillances traitées.

Chapitre 5. Implémentation en temps réel des résidus et supervision en En ligne dans un environnement SCADA

Pour plus de détails, un grand nombre d'algorithmes de décision est publié dans [39], [55].

Une fois la procédure de décision choisie, elle est appliquée sur l'ensemble des résidus pour générer le vecteur de cohérence binaire $V = [v_1 v_2 \dots v_n]$. Il y a alors présence d'une défaillance lorsqu'au moins un élément v_i de V est égal à 1 ($V \neq [0 \dots 0]$).

Théoriquement, dans le cas où le système est en bon fonctionnement, la valeur de chaque résidu r_i ($i=1 \dots n$) doit être nulle. Mais en pratique, ceci n'est pas toujours le cas.

Concernant la centrale à béton, le mode de fonctionnement normal vérifie la condition suivante:

$$|\Psi\Delta T(r_i)| \leq \varepsilon_i$$

Avec $\Psi\Delta T$ un prétraitement sur chaque résidu (une moyenne glissante sur un intervalle de temps ΔT). Comme expliqué dans le deuxième chapitre dans la section 2.4.1.3, ε_i est dû aux erreurs de modélisation ainsi qu'aux bruits des mesures.

Dans les deux installations de la centrale à béton, le circuit d'alimentation et de pesage d'eau et des adjuvants, le problème est alors de déterminer le seuil ε_i au delà duquel les résidus traités ne sont plus cohérents avec la condition de fonctionnement normal du processus. La valeur choisie de ε_i ne doit pas être assez élevée pour éviter les non-détections et pas assez faible pour éviter les fausses alarmes.

En outre, la valeur de chaque résidu est traitée par rapport la valeur maximale correspondant à l'amplitude du résidu en présence de défaillance. Pour déterminer le seuil de chaque résidu, une base de données représentative a été enregistrée pendant différents modes de fonctionnements de la centrale à béton. Elle est ensuite utilisée en hors ligne pour tester et vérifier les réponses des résidus et déterminer pour chacun d'eux la valeur correspondante du seuil ε .

Une moyenne glissante sur une fenêtre temporelle de 10s a été appliquée sur tous les résidus. Les seuils choisis pour les résidus des deux installations (circuits d'alimentations et de pesages d'eau et des adjuvants) sont donnés par le tableau suivant :

Circuit d'alimentation et de pesage d'eau		Circuit d'alimentation et de pesage d'adjuvants	
r_i	ε_i	r_i	ε_i
r_1	0.05	r_1	0.5
r_2	0.05	r_2	0.5
r_3	0.05	r_3	0.7
r_4	0.2	r_4	0.3
r_5	0.2	r_5	0.3
		r_6	0.3

Tab.5.4 Les seuils expérimentaux des résidus.

5.6 Supervision en ligne

5.6.1 Fenêtre d'alarme

Pour tenir l'opérateur au courant du fonctionnement de la centrale à béton, une petite partie a été ajoutée pour afficher les alarmes, et deux sous fenêtres pour la supervision en ligne des deux systèmes de circuit d'alimentation et de pesage d'eau et d'adjuvants comme vous pouvez le constater sur la figure suivante :

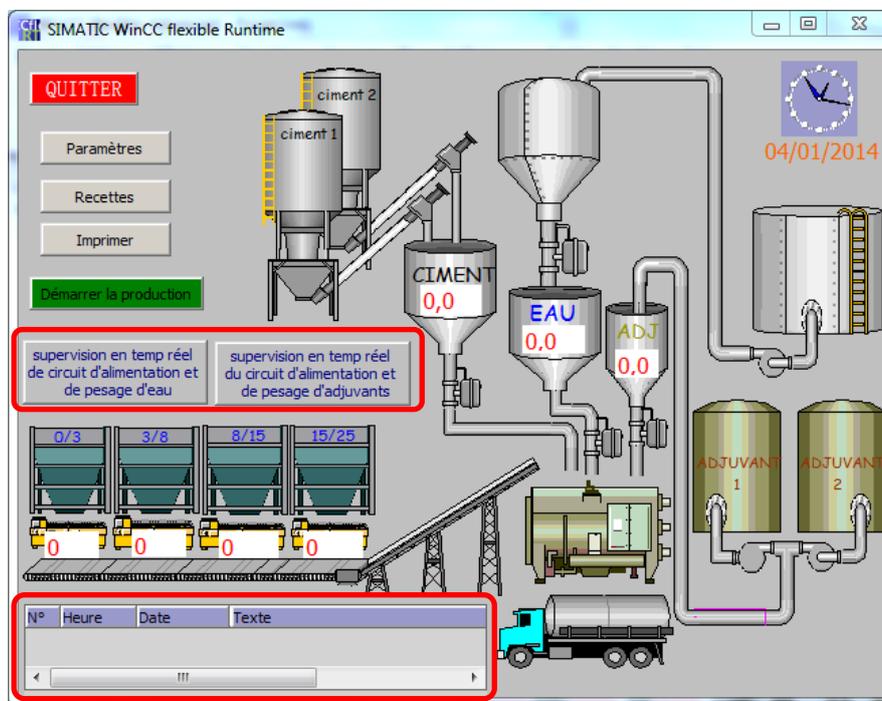


Fig.5.4 Menu principal de l'HMI avec fenêtre d'alarme.

5.6.2 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux présentés dans les sections suivantes ont été obtenus à partir d'un fonctionnement réel dans le temps de pesage de l'eau et les adjuvants.

- **Défaillances physiques du processus** Ce sont des défaillances qui peuvent survenir sur les deux systèmes de pesages d'eau et adjuvants : l'usure des vannes, une fuite dans les trémies... etc.

5.6.2.1 Opération de pesage d'eau dans la trémie

Dans la première vue, nous avons fait un dosage d'eau où la quantité d'eau a atteint la consigne de la recette sans aucun défaut signalé. Les résultats obtenus des résidus 1,2 et poids d'eau dans la trémie reflètent bien les résultats de simulations obtenues dans la figure 3.20 du chapitre trois.

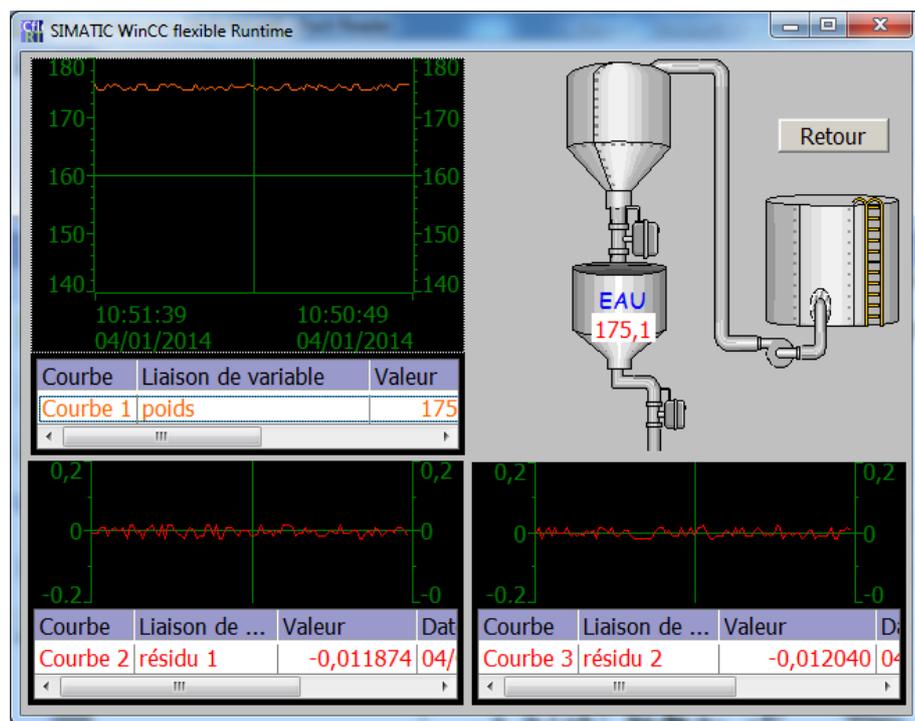


Fig.5.5 Fenêtre de supervision de dosage d'eau.

5.6.2.2 Défaillance de pesage d'eau

On a créé un défaut de fuite dans la trémie de pesage par l'ajout d'une vanne sous cette trémie, en ouvrant la vanne de vidange de la trémie dans un intervalle de temps bien déterminée. Après la fermeture de cette vanne, la vanne de remplissage reste ouverte pour compléter la quantité d'eau manquée. La figure 5.7 montre le menu principal d'HMI avec un défaut dans la fenêtre d'alarme.

Chapitre 5. Implémentation en temps réel des résidus et supervision en En ligne dans un environnement SCADA

Les résultats obtenus des résidus 1,2 et poids d'eau dans la figure suivante justifient les résultats de simulation obtenues dans la figure 3.21 du chapitre trois.

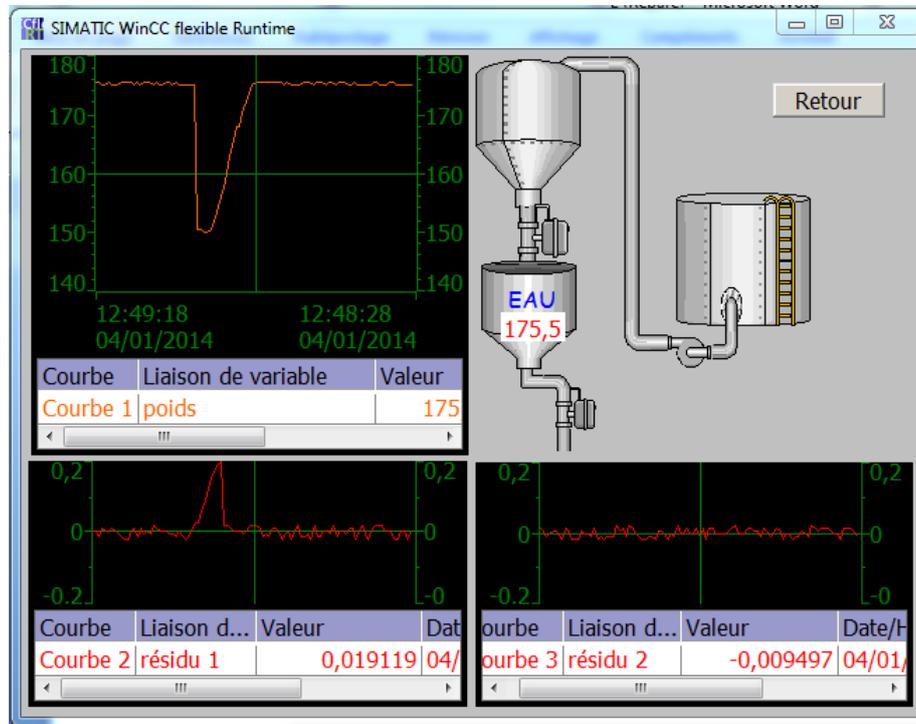


Fig.5.6 Fenêtre de supervision de dosage d'eau avec une défaillance.

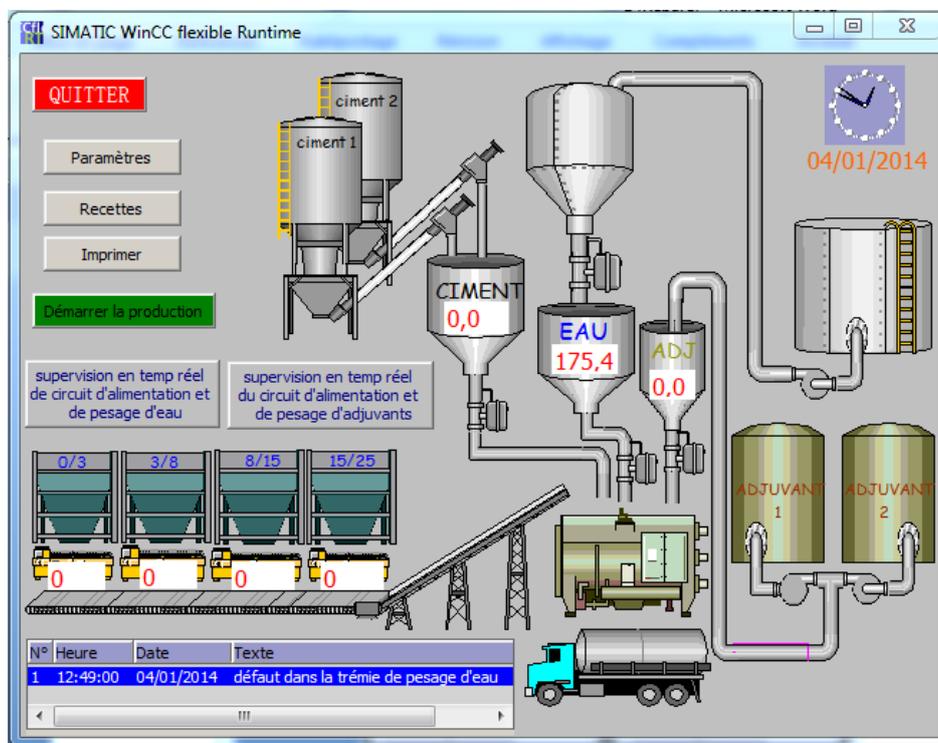


Fig.5.7 Capture d'écran d'HMI avec un défaut de pesage d'eau.

5.6.2.3 Opération de pesage d'adjuvants dans la trémie

Nous avons fait un pesage des adjuvants où la quantité a atteint la consigne de la recette sans aucun défaut signalé. La pompe d'adjuvant N° 01 marche jusqu'à où la quantité dans la trémie de pesage atteint 5,2 kg après cette pompe s'arrête et la deuxième pompe d'adjuvant N° 02 déclenche jusqu'à où la trémie atteint 8,7 kg au total. Les résultats obtenus des résidus 1,2,3 et poids d'adjuvants dans la trémie justifient les résultats de simulation obtenues dans la figure 3.23 du chapitre trois.

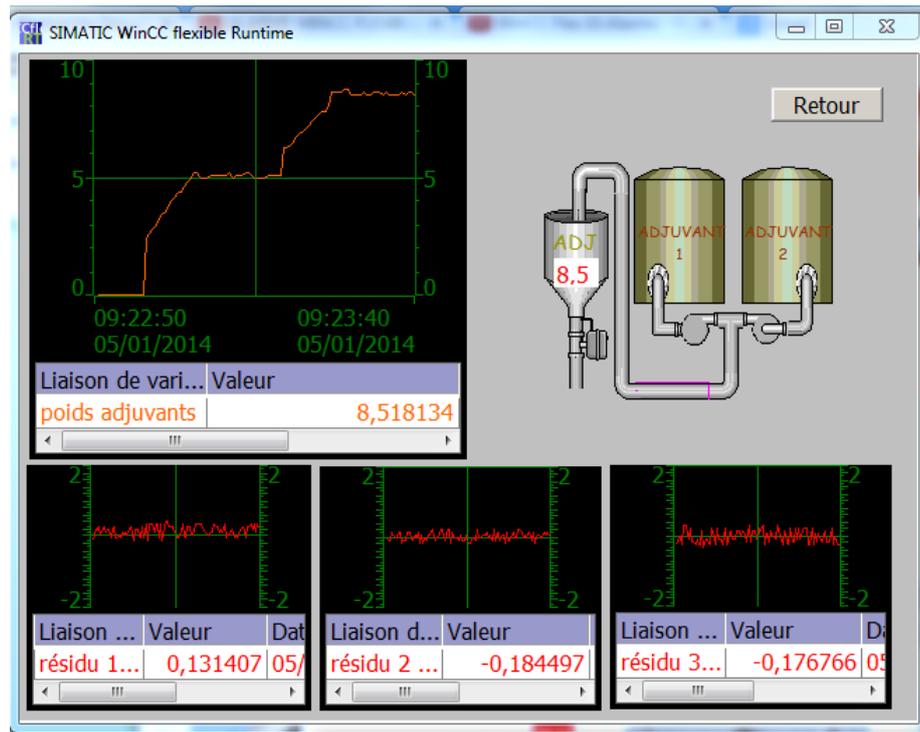


Fig.5.8 Fenêtre de supervision du pesae d'adjuvants.

5.6.2.4 Défaillance de pesage d'adjuvant N° 01

On a créé une fuite dans la trémie après terminé le pesage d'adjuvant N° 01. La pompe de remplissage reste en état de marche pour compléter la quantité d'adjuvant manquée. La figure 5.10 montre le menu principal d'HMI avec un défaut dans la fenêtre d'alarme.

Les résultats obtenue des résidus 1,2,3 et poids d'adjuvant N° 01 dans la figure suivante montrent que les résultats de simulation obtenues dans la figure 3.24 du chapitre trois reflètent bien la réalité.

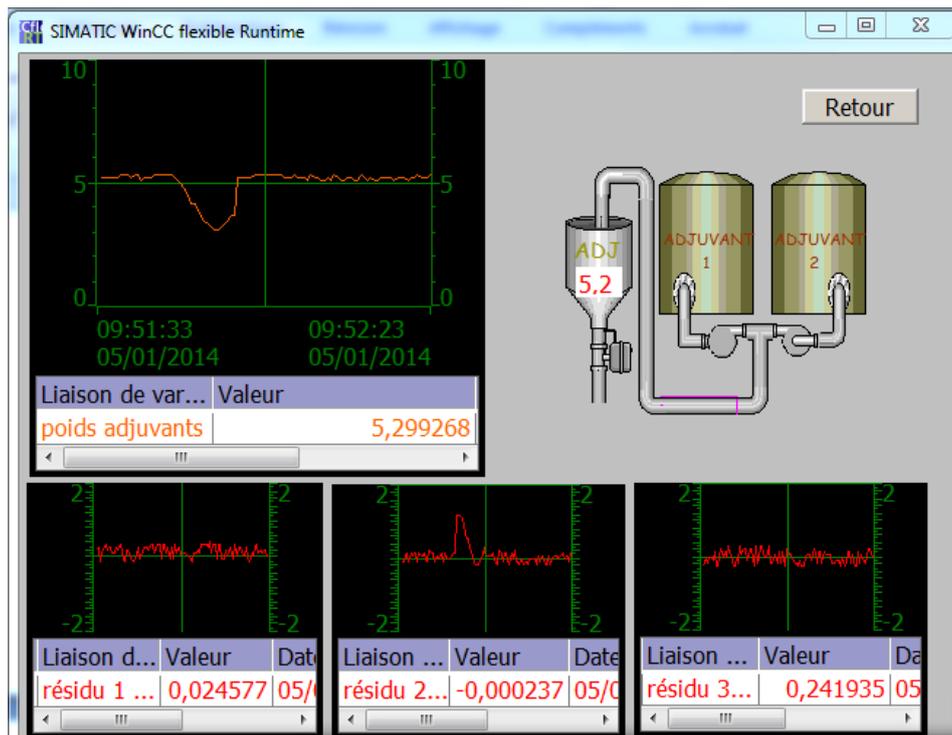


Fig.5.9 Fenêtre de supervision du pesage d'adjuvant N°01 avec une défaillance.

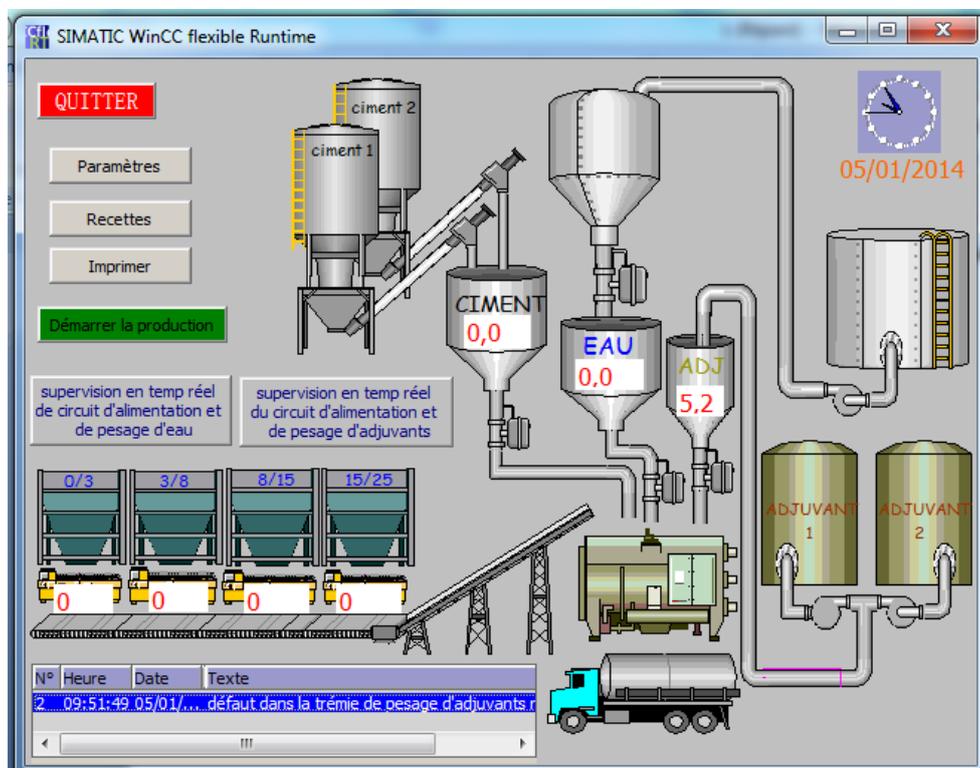


Fig.5.10 Capture d'écran d'HMI avec un défaut de pesage d'adjuvant N°01.

5.6.2.5 Défaillance de pesage d'adjuvant N° 02

On a créé une fuite dans la trémie après la terminaison de pesage d'adjuvant N° 02. La pompe de remplissage reste en état de marche pour compléter la quantité d'adjuvant manquée. La figure 5.12 montre le menu principal d'HMI avec un défaut dans la fenêtre d'alarme.

Les résultats obtenus des résidus 1, 2, 3 et poids d'adjuvant N° 02 dans la figure suivante montrent que les résultats de simulation obtenus dans la figure 3.25 du chapitre trois reflètent bien la réalité.

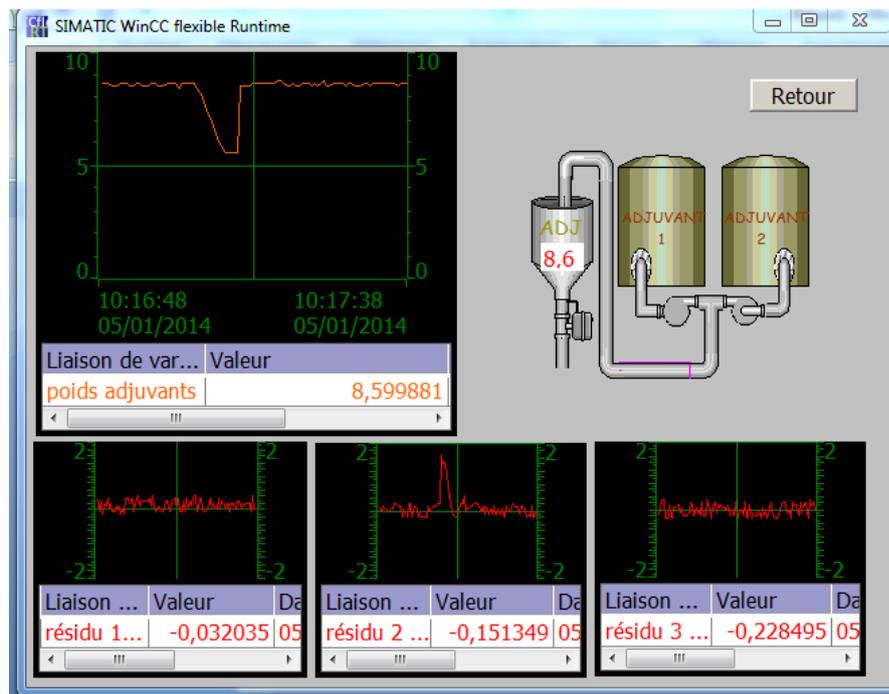


Fig.5.11 Fenêtre de supervision de dosage d'adjuvant N°02 avec une défaillance.

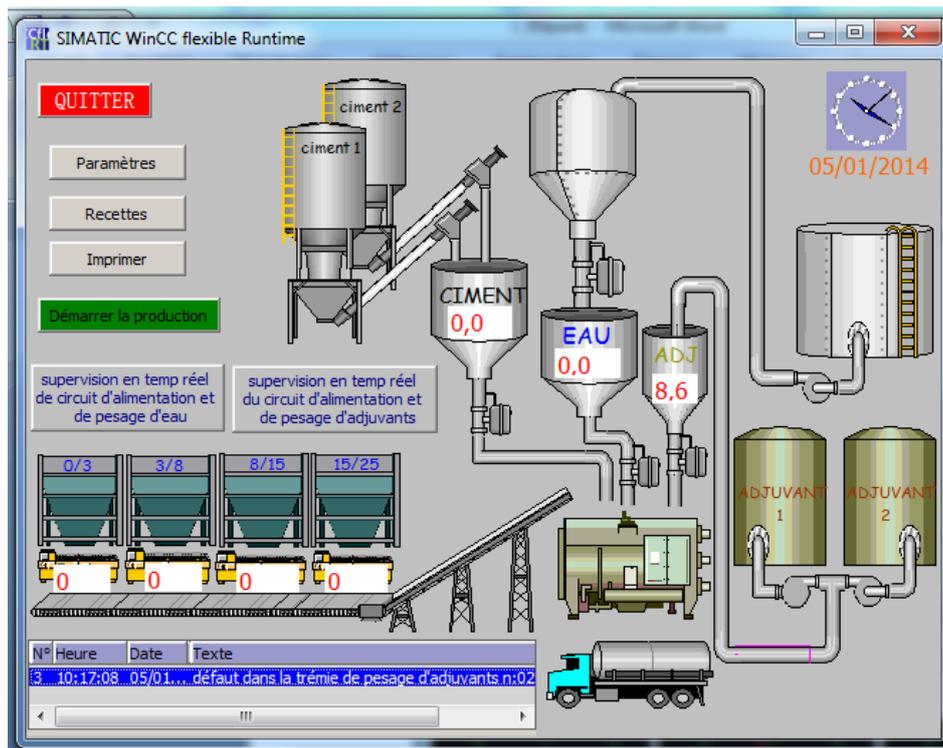


Fig.5.12 Capture d'écran d'HMI avec un défaut de pesage d'adjuvant N°02.

5.7 Conclusion

Après la création de l'HMI de supervision de la centrale à béton, nous avons réalisés la supervision en ligne après l'implémentation des résidus dans l'API. Dans le but d'avoir des alarmes et affichées dans la fenêtre HMI de supervision. Les résultats expérimentaux obtenues montrent que les résultats de simulation obtenues dans le chapitre trois des deux systèmes de pesages d'eau et adjuvants reflètent bien la réalité.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

1 Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons présenté une démarche complète pour construire un système de supervision en ligne d'une centrale à béton, allant de la modélisation, la simulation des modèles dynamiques obtenues, générations des équations de redondances analytiques, détection et isolation des défauts, à l'analyse de la surveillabilité et le placement des capteurs en vue de satisfaire le cahier des charges pour la surveillance.

Nous avons utilisé un seul outil : les bond graphs. Ce travail a été finalisé par l'automatisation de la centrale à béton, création d'une interface homme machine, afin d'implémenter les résidus obtenues en ligne dans un environnement SCADA.

Dans le premier chapitre a été présenté un aperçu général sur l'état de l'art sur la surveillance et la modélisation structurelle des systèmes industriels.

Ensuite dans le deuxième chapitre, dans la première section nous avons présenté 2 algorithmes pour la génération des ARR par l'approche bond graph. Les résultats de l'exemple donnée simulé par 20 sim v4.1 montre bien l'efficacité des bond graphs pour la conception des systèmes de supervision. Dans la deuxième section, une approche combinée entre les bond graphs et les modèles externes a été donnée pour la conception d'un système de supervision, cette approche a été appliquée sur l'exemple dynamique hydraulique.

Dans le troisième chapitre, Nous avons modélisé une centrale à béton par l'outil bond graph et simuler dans le logiciel 20 sim 4.1, nous avons appliqué les 2 algorithmes précédents pour générer les résidus, détecter et isoler les défauts. Nous avons intéressé dans cette partie sur les sous systèmes de la centrale à béton qui jouent le rôle de pesage et transport des matières premières.

Dans le quatrième chapitre, Nous avons présenté une vue globale sur l'environnement SCADA, et des descriptions sur les logiciels utilisés, Wincc est un logiciel fonctionnant dans l'environnement SCADA. Il possède plusieurs avantages tel que : une supervision et une commande en temps réel, une création des interfaces graphiques très représentatives de l'installation supervisée. Nous avons donnés des exemples d'automatisation des sous-systèmes de la centrale à béton,

après la programmation dans l'API par step 7. Nous avons réalisé une HMI Graphique interconnectée avec l'automate de la centrale à béton, dans le but de la commander et la superviser.

Dans le cinquième chapitre, nous avons donné une analyse sur la Surveillabilité et placement de capteurs des sous systèmes de la centrale à béton. La procédure de validation d'une équation de redondance analytique dans l'API a été donnée dans les sections de ce chapitre. Une supervision en temps réel a été réalisée des deux systèmes (circuit d'alimentation et de pesage d'eau et adjuvants), pour obtenir des alarmes dans l'HMI. Les résultats expérimentaux obtenus justifient les résultats de simulation.

2 Perspectives

- Dans ce travail, nous avons utilisé pour la modélisation le bond graph classique (une barre de causalité sur chaque lien) qui ne permet pas d'affecter arbitrairement la causalité. Dans ce cas, il nous arrive de ne pas représenter tous les couplages (entre variables) ce qui peut parfois réduire le nombre de RRAs générées. Nous projetons alors d'étendre notre travail à l'utilisation de la notion de la bicausalité (qui a été utilisée pour l'inversion des systèmes, estimations des paramètres et le dimensionnement des actionneurs) pour exploiter tous les couplages possibles à la génération de RRAs.
- Les RRAs générées dans le présent travail sont déterministes ne tenant pas compte des incertitudes des paramètres. L'outil bond graph permet de rajouter graphiquement ces incertitudes et de générer ainsi des RRAs robustes par rapport aux incertitudes paramétriques.
- Le pronostic est la thématique en perspective, car dans certains domaines comme le nucléaire et l'aéronautique, la détection de la présence d'une défaillance aussi précoce que possible ne peut que limiter les dégâts. Le challenge est donc de prévenir ces défaillances avant même qu'elles ne se manifestent, afin d'éviter tout danger sur les personnes et l'environnement.
- Le dernier point est de réaliser un outil de communication à distance, c'est-à-dire la possibilité de superviser un système très éloigné qui se trouve à millier de kilomètres du poste de pilotage.

Bibliographie

- [1] **BRUNET, J., JAUME, D., LABARRÈRE, M., et al.** *Détection et Diagnostic de Pannes. Approches Par Modélisation. Paris (France), série diagnostic et maintenance édition, 1990.*
- [2] **ISERMANN, Rolf.** *Process fault detection based on modeling and estimation methods—a survey. Automatica, 1984, vol. 20, no 4, p. 387-404.*
- [3] **ZWINGELSTEIN, G.** *Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels, traité des nouvelles technologies, Paris (France), éd. hermès. 1995.*
- [4] **MAQUIN, Didier et RAGOT, José.** *Diagnostic des systèmes linéaires. Paris (France), Hermès science publications, 2000.*
- [5] **DUBUISSON, D.** *Diagnostic et Reconnaissance Des Formes. Paris (France), Hermes, 1990.*
- [6] **DENOEU, Thierry.** *Analysis of evidence-theoretic decision rules for pattern classification. Pattern recognition, 1997, vol. 30, no 7, p. 1095-1107.*
- [7] **BOUDAUD, Nassim et MASSON, Mylène.** *Diagnosis of Transient States: A Pattern Recognition Approach, 2000. APII-JESA, Vol. 34, no. 5, pp. 689-708*
- [8] **GENTIL, S.** *Intelligence artificielle pour la surveillance des procédés continus. Actes de L'école D'été D'automatique de Grenoble, France, vol. 1, 1996.*
- [9] **EVANS, F. A. et WILCOX, J. C.** *Experimental strapdown redundant sensor inertial navigation system. Journal of Spacecraft and Rockets, 1970, vol. 7, no 9, p. 1070-1074.*
- [10] **PATTON, Ron.** *Robustness issues in fault-tolerant control. In: Fault Diagnosis and Control System Reconfiguration, IEE Colloquium on. IET, 1993. p. 1/1-125.*
- [11] **CHOW, Edward Yik.** *A failure detection system design methodology. 1980. Thèse de doctorat. Massachusetts Institute of Technology, Lab. Information and Detection System, Cambridge.*
- [12] **FRANK, Paul M.** *Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: A survey and some new results. Automatica, 1990, vol. 26, no 3, p. 459-474.*
- [13] **RAGOT, José et MAQUIN, Didier.** *An algorithm for obtaining the redundancy equations of LTI systems. Automatica, 1994, vol. 30, no 3, p. 537-542.*
- [14] **MILLOT, P.** *Supervision des procédés automatisés et ergonomie, Traité des nouvelles technologies Série automatique. Paris, Editions HERMES, 1988.*

- [15] **CHITTARO, Luca, GUIDA, Giovanni, TASSO, Carlo, et al.** *Functional and teleological knowledge in the multimodeling approach for reasoning about physical systems: a case study in diagnosis. On Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions, 1993, vol. 23, no 6, p. 1718-1751.*
- [16] **FELIOT, Claude.** *Modélisation de systèmes complexes: intégration et formalisation de modèles. 1997. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve D'Ascq (France).*
- [17] **MODARRES, M.** *Functional modeling of complex systems using a GTST-MPLD framework. In: Proceedings of the First International Workshop on Functional Modeling of Complex Technical Systems. Center for Reliability Engineering: MD, Italy, 1993.*
- [18] **OULD BOUAMAMA, B., MEDJAHHER, K., BAYART, M., et al.** *Fault detection and isolation of smart actuators using bond graphs and external models. Control Engineering Practice, 2005, vol. 13, no 2, p. 159-175.*
- [19] **DECLERCK, Ph et STAROSWIECKI, M.** *Characterization of the Canonical Components of a Structural Graph for Fault Detection in Large Scale Industrial Plants. In Proceedings of ECC'91 (July 1991), p. 298-303.*
- [20] **KRYSANDER, Mattias et NYBERG, Mattias.** *Structural analysis utilizing MSS sets with application to a paper plant. In the thirteenth International Workshop on Principles of Diagnosis, Semmering, Austria. 2002.*
- [21] **IZADI-ZAMANABADI, Roozbeh, BLANKE, Mogens, et KATEBI, Serajeddin.** *Cheap diagnosis using structural modelling and fuzzy-logic-based detection. Control Engineering Practice, 2003, vol. 11, no 4, p. 415-422.*
- [22] **KHEMLICHE, M., OULD BOUAMAMA, B., et HAFFAF, H.** *Sensor placement for component diagnosability using bond-graph. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, vol. 132, no 2, p. 547-556.*
- [23] **ISERMANN, Rolf.** *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance. Springer, 2006.*
- [24] **DÜŞTEGÖR, Dilek, FRISK, Erik, COCQUEMPOT, Vincent, et al.** *Structural analysis of fault isolability in the DAMADICS benchmark. Control Engineering Practice, 2006, vol. 14, no 6, p. 597-608.*
- [25] **COMMAULT, Christian, DION, Jean-Michel, et YACOUB AGHA, Sameh.** *Structural analysis for the sensor location problem in fault detection and isolation. Automatica, 2008, vol. 44, no 8, p. 2074-2080.*
- [26] **CHITTARO, Luca et KUMAR, Amruth N.** *Reasoning about function and its applications to engineering. Artificial intelligence in engineering, 1998, vol. 12, no 4, p. 331-336.*

- [27] **STAROSWIECKI, M.** *Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control, chapter Structural Analysis for Fault Detection and Isolation and for Fault Tolerant Control. Encyclopedia of Life Support Systems. 2002.*
- [28] **BLANKE, Mogens (ed.).** *Diagnosis and fault-tolerant control. Springer, 2003.*
- [29] **PULIDO, Belarmino et ALONSO, Carlos.** *An alternative approach to dependency-recording engines in consistency-based diagnosis. In : Artificial Intelligence: Methodology, Systems, and Applications. Springer Berlin Heidelberg, 2000. p. 111-121.*
- [30] **IWASAKI, Yumi et SIMON, Herbert A.** *Causality in device behavior. Artificial intelligence, 1986, vol. 29, no 1, p. 3-32.*
- [31] **MUROTA, Kazuo.** *Systems analysis by graphs and matroids: structural solvability and controllability. Berlin, Springer-Verlag, 1987.*
- [32] **PAYNTER, Henry M.** *Analysis and design of engineering systems. MIT press, 1961.*
- [33] **THOMA, Jean U.** *Introduction to bond graphs and their applications. Pergamon Press, Oxford, 1975.*
- [34] **VERGÉ, Michel et JAUME, Daniel.** *Modélisation structurée des systèmes avec les Bond Graphs. Editions Technip, 2004.*
- [35] **SAMANTARAY, Arun K. et OULD BOUAMAMA, Belkacem.** *Model-based process supervision: a bond graph approach. Springer Verlag, Series: Advances in Industrial Control, 2008.*
- [36] **SAMANTARAY, Arun K., MEDJAHHER, K., OULD BOUAMAMA, B., et al.** *Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation. Simulation Modelling Practice and Theory, 2006, vol. 14, no 3, p. 237-262.*
- [37] **OULD BOUAMAMA, B., SAMANTARAY, A. K., STAROSWIECKI, M., et al.** *Derivation of constraint relations from bond graph models for fault detection and isolation. SIMULATION SERIES, 2003, vol. 35, no 2, p. 104-109.*
- [38] **MEDJAHHER, K. et SAMANTARAY, Arun K.** *Contribution de l'outil bond graph pour la conception de système de supervision des processus. Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement. Lille France, octobre 2006.*
- [39] **MEDJAHHER, Kamal.** *Contribution de l'outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision des processus industriels. 2005. Thèse de doctorat. Lille 1.*
- [40] **AROGETI, Shai A., WANG, Danwei, LOW, Chang Boon, et al.** *Fault detection and isolation in a mobile robot test-bed. In: Advanced Intelligent Mechatronics, 2009. AIM 2009. IEEE/ASME International Conference on. IEEE, 2009. p. 398-404.*

- [41] **SALLAMI, Abderrahmène, ZANZOURI, Nadia, KSOURI, Mekki, et al.** *Supervision of dynamic systems by bond graph and external models. In :Proceedings of the 10th WSEAS international conference on Signal processing, computational geometry and artificial vision. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2010. p. 115-121.*
- [42] **SALLAMI, Abderrahmène, ZANZOURI, Nadia, KSOURI, Mekki, et al.** *Supervision of a Three Tanks System by Bond Graph and External Models. In: Communications, Computing and Control Applications (CCCA), 2011 International Conference on. IEEE, 2011. p. 1-6.*
- [43] **BAYART, M., et LEMAIRE, E.** *Intelligent formal description applied to hybrid systems. In IFAC, SICICA'97, IFAC, Annecy, France, 1997, p. 715–720.*
- [44] **OULD BOUAMAMA, B., MEDJAHHER, K., SAMANTARAY, A. K., et al.** *Supervision of an industrial steam generator. Part I: Bond graph modelling. Control Engineering Practice, 2006, vol. 14, no 1, p. 71-83.*
- [45] **MEDJAHHER, K., SAMANTARAY, A. K., OULD BOUAMAMA, B., et al.** *Supervision of an industrial steam generator. Part II: Online implementation. Control engineering practice, 2006, vol. 14, no 1, p. 85-96.*
- [46] **DELIGIANNIS, V. et MANESIS, S.** *Concrete batching and mixing plants: A new modeling and control approach based on global automata. Automation in Construction, 2008, vol. 17, no 4, p. 368-376.*
- [47] **ZAYED, Tarek M. et HALPIN, Daniel.** *Simulation of concrete batch plant production. Journal of Construction Engineering and Management, 2001, vol. 127, no 2, p. 132-141.*
- [48] **DJEZIRI, Mohand Arab.** *Diagnostic des systèmes incertains par l'approche bond graph. 2007. Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique de Lille.*
- [49] **GHOSHAL, S. K. et SAMANTA, S.** *Model based fault diagnosis of a belt conveyor through parameter estimation. In: Recent Advances in Information Technology (RAIT), 2012 1st International Conference on. IEEE, 2012. p. 897-902.*
- [50] **DANEELS, Axel et SALTER, Wayne.** *What is SCADA?. In: International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, 1999, p. 339-343.*
- [51] **BAILEY, David et WRIGHT, Edwin.** *Practical SCADA for industry. Newnes. 2003.*
- [52] **GARCIA-BELTRAN, Carlos.** *Outils pour l'aide à la supervision de procédés dans une architecture multiagent. 2004. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.*

[53] *SIMATIC HMI WinCC flexible 2008 Compact/ Standard/ Advanced Manuel d'utilisation.* [Consulté le 25 mai 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.fichier-pdf.fr/2013/04/07/manuel-utilisateur-wincc-flexible-fr-fr/manuel-utilisateur-wincc-flexible-fr-fr.pdf>.

[54] **TOUATI, Youcef.** *Diagnostic Robuste et estimation de défauts à base de modèle Bond Graph.* 2012. Thèse de doctorat. Université Lille 1

[55] **BASSEVILLE, Mich Ele et NIKIFOROV, Igor V.** *Detection of Abrupt Changes: Theory and Application.* Prentice Hall, 1993.

Résumé

Répondant aux besoins de la qualité, de la quantité de la production et de la concurrence du marché économique, les industriels ont tendance à améliorer et à élargir leurs installations et deviennent ainsi de plus en plus complexes, contribuant en même temps à augmenter les risques de pannes qui peuvent survenir sur le fonctionnement de l'installation et à diminuer la sécurité du personnel et de l'environnement .

Dans cette recherche une approche est présentée pour la conception de systèmes de supervision appliqués aux processus industriels, utilisent un seul outil : les bond graphs.

Nous avons présenté une démarche complète pour construire un système de supervision en ligne d'une centrale à béton , allant de la modélisation, la simulation des modèles dynamiques obtenues, générations des équations de redondances analytiques, détection et isolation des défauts, a l'analyse de la surveillabilité et le placement des capteurs en vue de satisfaire le cahier des charges pour la surveillance .

Ce travail a été finalisé par l'automatisation de la centrale à béton, création d'une interface homme machine HMI, afin d'implémenter les résidus obtenues en ligne dans un environnement SCADA.

Mots clés : Modélisation par bond graph, surveillance, FDI, Relations de Redondance Analytique, Résidus, placement de capteurs, Supervision en ligne, SCADA, centrale à béton.

Abstract

Meeting the needs for quality, quantity of the production and competition of the economic market, the industrialists tend to improve and widen their installations and become thus increasingly complex, contributing at the same time to increase the risks of failures who can occur on the operation of the plant and to decrease the environment and staff safety.

In this research an approach is presented for the design of systems of supervision applied to the industrial processes, use only one tool: the bond graphs.

We presented a comprehensive approach to build a system of supervision online of concrete batching and mixing plant, from the modeling, the simulation of obtained dynamic models, generation of analytic redundancy relations, detection and fault isolation, to the analysis of the placement of sensors in order to satisfy the specifications for monitoring.

This work was completed by automating the concrete batching and mixing plant , creation of an interface man machine HMI, to implement the residue obtained online in a SCADA environment.

Keywords: Bond graph modelling, Monitoring, FDI, Analytical Redundancy Relations, residues, sensor placement, online supervision, SCADA, concrete batching and mixing plant.

ملخص

نظرا للمنافسة في الأسواق الاقتصادية، تضطر المؤسسات المصنعة إلى تطوير وتحسين مرافقها من أجل الاستجابة لاحتياجات الإنتاج من حيث الكمية والنوعية. وهذا ما يؤدي بها إلى التعقيدات وزيادة في أخطار العطل في المنشآت وفي نفس الوقت تقليل من سلامة الأفراد والبيئة.

يتم تقديم نهج لتصميم أنظمة الرقابة المطبقة على الأنظمة الصناعية في هذا البحث، واستخدام أداة واحدة فقط: روابط الرسم البياني.

قدمنا نهج شامل لبناء نظام الرقابة على المباشر لمصنع الخرسانة، من النمذجة، ومحاكاة النماذج الديناميكية التي تم الحصول عليها، وتوليد علاقات التكرار التحليلية، كشف وعزل الخطأ، تحليل وضع أجهزة الاستشعار، من أجل تلبية مواصفات الرصد والمراقبة.

تم الانتهاء من هذا العمل من خلال أتمتة مصنع خلط الخرسانة، إنشاء واجهة رجل آلة HMI، والرصد والمراقبة على المباشر لمعادلات البقايا في بيئة SCADA.

الكلمات الرئيسية : النمذجة بروابط الرسم البياني، المراقبة، كشف وعزل الخطأ FDI، علاقات التكرار التحليلية، وضع أجهزة الاستشعار، الرقابة على المباشر، SCADA، مصنع الخرسانة.