



HAL
open science

Contribution à la conception des systèmes sûrs de fonctionnement - Approches fonctionnelles et comportementales

Anne-Lise Gehin

► **To cite this version:**

Anne-Lise Gehin. Contribution à la conception des systèmes sûrs de fonctionnement - Approches fonctionnelles et comportementales. Automatique / Robotique. Université de Lille, 2021. tel-03451781

HAL Id: tel-03451781

<https://hal.science/tel-03451781>

Submitted on 26 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Lille

Ecole Doctorale **Sciences Pour l'Ingénieur**

Unité de recherche **CRISTAL**

Mémoire présenté
en vue de l'obtention de
l'Habilitation à Diriger des Recherches
par

Anne-Lise GEHIN

Maître de Conférences à Polytech'Lille

Contribution à la conception des systèmes sûrs de fonctionnement Approches fonctionnelles et comportementales

Soutenue publiquement le 13 octobre 2021 devant le jury composé de :

| | | |
|---------------|------------------------------|---------------------------------------------|
| Garant : | M. Belkacem OULD BOUAMAMA | Professeur à l'Université de Lille |
| Rapporteurs : | M. Michel COMBACAU | Professeur à l'Université de Toulouse |
| | M. Dominique SAUTER | Professeur à l'Université de Nancy Lorraine |
| | M. Jean-Marc THIRIET | Professeur à l'Université de Grenoble Alpes |
| Examineurs : | Mme Mireille BAYART | Professeur à l'Université de Lille |
| | Mme Geneviève DAUPHIN-TANGUY | Professeur émérite à l'Université de Lille |
| | M. Nouredine ZERHOUNI | Professeur à l'Université de Besançon |

Table des matières

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| Partie 1 : Curriculum Vitae étendu | 9 |
| Synthèse des activités d'enseignement..... | 11 |
| Synthèse des activités de recherche..... | 20 |
| Partie 2 :..... | 41 |
| Partie 2 : Mémoire de Recherche | 41 |
| Introduction | 43 |
| De l'instrument intelligent au Modèle Générique de Composant | 49 |
| 1. L'instrument Intelligent..... | 49 |
| 2. Le Modèle Générique de Composant..... | 58 |
| Le Bond Graph et son interprétation fonctionnelle | 67 |
| 1. Motivation | 67 |
| 2. Les Bond Graphs | 68 |
| 3. Génération d'indicateurs de défauts à partir du Bond Graph..... | 74 |
| 4. Diagnostic à partir du Bond Graph..... | 81 |
| 5. Applications | 87 |
| Le Bond Graph piloté par événements | 91 |
| 1. Motivation | 91 |
| 2. Modélisation bond graph des systèmes dynamiques hybrides | 92 |
| 3. Diagnostic des systèmes dynamiques hybrides | 98 |
| 4. La gestion des modes de fonctionnement..... | 107 |
| 5. Applications | 109 |
| Conclusion..... | 114 |
| 1. Résumé des différentes contributions | 114 |
| 2. Recherches en cours et futures..... | 119 |
| Bibliographie..... | 125 |

Remerciements

Ce mémoire présente une partie des travaux réalisés depuis ma nomination comme maître de Conférences. Je suis rattachée, pour la partie enseignement, à l'École Polytech'Lille, et pour la partie recherche, au Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille.

Je remercie l'ensemble des collègues de ces deux composantes. C'est toujours un plaisir de travailler en équipe et de partager différents points de vue. J'inclus, bien évidemment, dans l'ensemble des collègues, le personnel administratif et technique et je tiens à ne faire aucune distinction hiérarchique.

Tous les travaux présentés dans ce mémoire n'auraient pu voir le jour sans la confiance que m'ont témoignée, mes directeurs successifs, et sans le travail des doctorants que j'ai eu le plaisir d'encadrer. Je les remercie tous.

Je remercie également, les membres du jury qui ont pris le temps d'examiner mon travail, de se déplacer, venant parfois de loin, et d'écrire un rapport.

Nombreuses sont les personnes dans mon entourage professionnel ou personnel qui m'ont aidées et encouragées ces dernières années. Je tiens à leur témoigner de ma plus profonde gratitude.

Préambule

Les recherches fondamentales et appliquées que je mène portent sur la conception de systèmes sûrs de fonctionnement. Faire une synthèse des différents travaux que j'ai pu réaliser, montrer la logique de leur enchainement et ainsi mettre en évidence ma contribution constitue la principale motivation de la rédaction de ce manuscrit, préparé dans le cadre d'une Habilitation à Diriger les Recherches.

Tous ces travaux n'auraient pu être menés sans la confiance que m'ont accordé, en me proposant des co-encadrements ou des participations à des projets et des contrats de recherche, les différents directeurs d'équipes auxquelles j'ai appartenu. Je pense en particulier, à Marcel Staroswiecki, Mireille Bayart et Belkacem Ould Bouamama. Ecrire ce manuscrit est aussi pour moi, une manière de les remercier.

Forte du savoir et des méthodes que ces personnes m'ont inculquées, j'ai à mon tour l'envie de montrer et de transmettre l'idée que la recherche est un métier de passion, culturellement très riche, dans lequel on peut pleinement s'épanouir.

C'est entre autres pour ces raisons que j'ai décidé de rédiger ce manuscrit. J'ai pris beaucoup de plaisir à le faire. J'espère que vous aurez autant d'enthousiasme à le lire. Il a été mon rayon de soleil pendant cette période de Covid. Il se compose de deux parties : un Curriculum Vitae étendu et un mémoire de recherche.

Bien amicalement,

Anne-Lise GEHIN (avril 2021)

Partie 1 :

Curriculum Vitae étendu

Synthèse des activités d'enseignement

1. Présentation générale

Je suis rattachée pour la partie enseignement au département Systèmes Embarqués (SE) de l'École Polytech'Lille. Une grande partie de mes enseignements s'effectue au sein de ce département qui s'appelait Informatique Micro-électronique Automatique (IMA) jusqu'en septembre 2020.

Dès ma nomination, en 1994, j'ai mis en place de nouveaux cours. Ces cours étaient en lien avec mes activités de recherche et les besoins industriels du moment. Je peux citer les deux cours suivants :

- Instrumentation intelligente, module de 24h (CM : 12, TP : 12), enseigné en spécialité Automatique du département IMA (24 étudiants)
- Réseaux de terrain : module de 18h (CM : 6, TP : 12) enseigné en tronc commun IMA (50 étudiants).

Ces deux cours permettaient aux étudiants d'appréhender les nouvelles fonctionnalités d'un capteur ou d'un actionneur et de les faire communiquer via un réseau de terrain.

J'ai entièrement défini les contenus de ces deux cours. J'ai mis en place les TP d'instrumentation intelligente réalisés sous forme de mini-projet, un sujet unique pour les 12h de TP avec comme attentes : la définition du cahier des charges, du cahier des spécifications, le détail de la réalisation, la synthèse des problèmes rencontrés. Une carte d'entrée spécifique, permettant de connecter capteurs et actionneurs a été développé pour ces TP constituant une solution « maison ». Ce matériel a été réutilisé par des enseignants de l'IUT.

En lien avec les deux cours précédents, j'ai, quelques années plus tard, mis en place un cours de systèmes temps réel et fait évoluer l'enseignement des microprocesseurs. Ces cours permettent de définir l'architecture matérielle et logicielle d'un système embarqué en prenant en compte les contraintes de temps.

- Systèmes temps réel, module de 22h (CM : 10h, TP : 12h), tronc commun IMA
- Microprocesseurs, tronc commun IMA, décomposé en deux parties :
 - De la logique au microprocesseur, module de 52h (CM : 20h, TD : 20h, TP : 12h).
 - Microprocesseurs et architecture, module de de 50h (CM : 10h, TD : 10h, TP : 18h, Tutorat : 12h).

J'assure l'animation de ces deux modules répartis sur deux années : définition des contenus, mise en place des équipes pédagogiques, formation des intervenants.

Les TP sont régulièrement mis à jour avec les matériels et logiciels du moment. A l'origine, les TP de temps réel étaient réalisés sous OS9. Ils ont ensuite évolué pour être réalisés sous RTLinux puis sous FreeRTOS. Il en est de même pour les TP de microprocesseurs qui ont été successivement organisés autour des microprocesseurs 8086, 68HC12 et ATMEGA. Ceci suppose à chaque fois de réécrire les sujets et les documentations techniques (32 pages entièrement rédigées pour celle liée au microprocesseur ATMEGA) et de former les intervenants. Là encore, une carte spécifique, construite autour d'un microcontrôleur ATMEGA a été entièrement développée pour mettre en œuvre les TP. Elle s'accompagne d'un simulateur qui permet aux étudiants de travailler en dehors des séances de TP (cf. Figures 1 et 2).

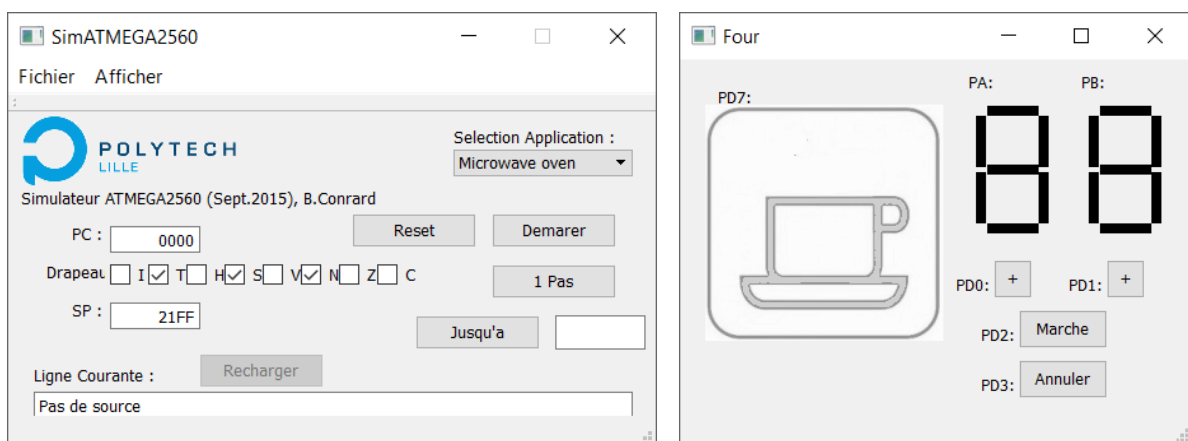


Figure 1 : le simulateur utilisé pour l'enseignement des microprocesseurs

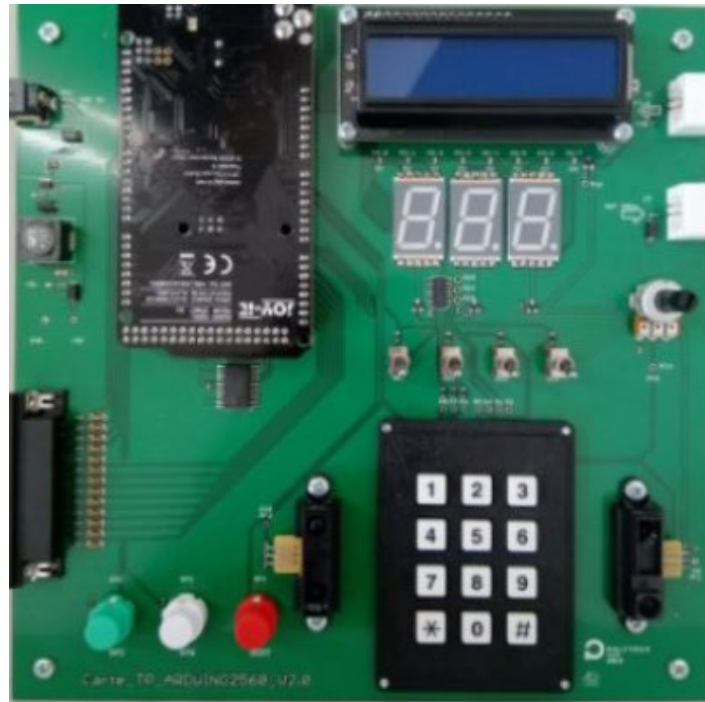


Figure 2 : La carte développée spécifiquement pour les TP de microprocesseurs et temps réel

Pour la partie logique, outre les exercices traités en TD, j'ai co-rédigé un recueil de 28 exercices supplémentaires pour que les étudiants s'entraînent et comparent entre eux leurs solutions. Le cours est également illustré par de nombreuses simulations réalisées sous le logiciel Logisim.

Pour la partie microprocesseurs, une partie de l'enseignement (12h) est proposé sous forme de tutorat. Les étudiants (par groupe de 3) doivent proposer une architecture matérielle et logicielle répondant à un cahier des charges donné (8 sujets différents par groupe de TD). Les soutenances à l'issue du tutorat permettent à l'ensemble des étudiants de voir différentes réalisations (tableau de bord de voiture, robot mobile, gestion d'une pompe à essence ...).

Les cours de logique et microprocesseurs ont été adaptés au public spécifique de la formation IMA par apprentissage (12 étudiants) lors de son ouverture en 2014. Plutôt que de séparer les cours magistraux et les TD, j'ai choisi la formule CTD (cours TD) qui permet de faire suivre toute notion théorique par un exercice d'application directe.

Je suis également à l'origine, en 2016, des cours « Real Time System », module de 14h et « Advanced Programming », module de 16h, ce dernier est partagé avec un collègue. Ces cours sont donnés en anglais dans le cadre du Master International « Robotic and Transport » (environ 8 étudiants). Je m'adapte à ce public non francophone en fournissant un maximum de références bibliographiques et en alternant notions théoriques et mises en pratique.

Suite à la restructuration du département en deux filières, « systèmes autonomes » et « systèmes communicants » plutôt qu'en quatre spécialités « automatique », « micro-

électronique », « informatique », « électrotechnique », j'ai défini, en 2012, avec un collègue le module « Outils de conception des systèmes automatisés ». J'assure environ la moitié des enseignements de ce module de 34h (10h de CM, 8h de TP). L'idée est de donner aux étudiants les méthodes et les outils qui leur permettent, à partir d'un besoin utilisateur, d'élaborer un ensemble de spécifications, de modéliser le système à réaliser, de définir les algorithmes de contrôle/commande et de vérifier via la logique temporelle que la solution proposée respecte bien les spécifications de départ.

Une dernière innovation pédagogique que je voudrais citée est celle du bureau d'étude (40h co-encadrée avec un collègue). Le bureau d'étude donne l'opportunité à un étudiant en cycle préparatoire de découvrir un domaine de métiers liés à une formation d'ingénieur. Il s'agit ici de découvrir la spécialité SE au travers des domaines des systèmes embarqués, de l'automatique et de la robotique. Les étudiants, répartis en binômes ou trinômes utilisent des robots mobiles (Robotino®) pour réaliser des missions de difficulté croissante (suivre un mur, contourner un obstacle, simuler une navette autonome ramassant et déposant des passagers, jouer au hockey ...). Au travers de ces missions ludiques, l'étudiant appréhende les notions de capteurs, actionneurs, contrôle commande, programmation, traitement d'image. L'efficacité des solutions et algorithmes proposés peut être comparée. Nous préparons également les étudiants à la communication écrite et orale par la rédaction de comptes-rendus et en réalisant des interviews filmées de présentation des résultats.

Quel que soit le cours, j'invite également les étudiants à travailler les annales d'examens mises à leur disposition via le site de la bibliothèque universitaire.

2. Présentation synthétique des enseignements

Le tableau page suivante, liste les enseignements que j'assure cette année. Il précise les volumes horaires et les publics concernés. Les différents sigles utilisés sont les suivants :

- SE : Systèmes Embarqués : Polytech'Lille – Cycle ingénieur
- IESP : Ingénieur d'Exploitation des Systèmes de Production : Polytech'Lille - Cycle Ingénieur
- PeiP : Parcours des écoles d'Ingénieurs Polytech : Cycle préparatoire
- MES2M : Mastère Spécialisé « Mécatronique et Management » - Polytech'Lille
- MRT : Master International « Robotic and Transport » - Polytech'Lille et Centrale Lille
- IMQ : Master (M2) « Instrumentation Mesures et qualité » - Université de Lille
- SMART : Master (M2) « Systèmes, Machines autonomes et Réseaux de Terrain » - Université de Lille

* (volume horaire forfaitaire étudiant) suivi de la rémunération équivalent TD

| Enseignements | Public | cours | CTD | TD | TP | tutorat |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|---------------|------------|
| De la logique au microprocesseur | SE 3 ^{ème} année, TC SE Apprent. , 3 ^{ème} année | 8h | 12h | 20h | | |
| Microprocesseurs et architectures | SE 3 ^{ème} année, TC SE Apprent. , 3 ^{ème} année | 10h | 20h | 10h | 16h(x2) | (12h)* 18h |
| Systèmes Temps Réel | SE 4 ^{ème} année, TC SE Apprent. , 4 ^{ème} année | 10h 10h | | | 12h(x2) | |
| Outils de Conception des systèmes automatisés | SE 4 ^{ème} année, Fil. SA SE Apprent. , 5 ^{ème} année | 10h 6h | | | 8h (x2) 7h | |
| Chaîne de Mesures | Master IMQ | 12h | | | 9h | |
| Systèmes Automatisés | Mastère MES2M | 4h | | | 4h | |
| Real Time Systems | Master International MRT | 8h | | 2h | 4h | |
| Advanced Programming | Master International MRT | 4h | | | 4h | |
| Suivi d'apprentant/apprenti | IESP – Formation Continue | | | | | (600h)*18h |
| Suivi de projet | SE 4 ^{ème} année | | | | | (60h) *20h |
| Bureau d'étude | PEIP 2 ^{ème} année | | | | | (40h) *18h |
| Total | | 82h | 32h | 32h | 104h | 74h |

Depuis 2012, j'assure le suivi individualisé d'étudiants en apprentissage ou en formation continue du département IESP. En tant que tutrice école, j'apporte une aide théorique et méthodologique pour les activités réalisées en entreprise et représentant la situation de travail formative. Le suivi de ces étudiants est réalisé sur trois ans. J'ai encadrés deux apprenants et deux apprentis depuis 2012.

Je propose et j'encadre régulièrement des projets de fin d'études d'ingénieur, environ un par an. J'encadre également, de temps en temps, des projets de fin d'études niveau Master 2, deux projets l'an dernier.

J'ai régulièrement assuré, par le passé, le suivi d'étudiants ingénieur en stage de fin d'études (environ 1 par an).

3. Animation, montage de formations

Responsable du semestre S7 de la formation SE

Je suis responsable, depuis septembre 2017, du semestre S7 de la formation Systèmes Embarqués (54 étudiants). Cette activité est reconnue par l'Ecole et donne droit à une décharge de 24h équivalent TD par an. Elle consiste à :

- Organiser les enseignements.
- Répartir les étudiants en groupes de TD, de TP, de LV1, de LV2 et à élaborer les emplois du temps.

- Gérer les emplois du temps des étudiants et des enseignants (y compris intervenants extérieurs et vacataires) au quotidien.
- Organiser les sessions d'examen et préparer les jurys.
- Evaluer les dossiers et éventuellement faire passer des entretiens via vidéoconférences à des étudiants d'universités étrangères partenaires (8 étudiants entrants en 2019).
- Accueillir et intégrer les étudiants d'universités étrangères partenaires.

Responsable de la spécialité Automatique – semestres S9 et S10

J'ai également été responsable, entre 1995 et 2003 des semestres S9 et S10 de la spécialité Automatique du département IMA. La spécialité Automatique comptait à cette époque en moyenne 30 étudiants répartis selon trois orientations : Productique, Instrumentation Intelligente et Systèmes Distribués, Systèmes. Les étudiants suivaient des cours communs aux trois orientations et d'autres cours spécifiques à une orientation ou deux. Mes tâches regroupaient :

- La gestion des emplois du temps (élaboration et diffusion).
- La gestion des intervenants internes et externes à l'école.
- La réservation des salles.
- L'organisation du contrôle des connaissances et des conseils pédagogiques de spécialité.
- Le suivi pédagogique des étudiants.

Responsable des projets de fin d'études de la spécialité Automatique

Entre 2005 et 2011, j'ai été responsable des projets de fin d'études de la spécialité Automatique (24 étudiants). Cette activité est reconnue par l'Ecole et donne droit à une décharge de 18h équivalent TD actuellement. Je ne me rappelle plus du montant accordé à l'époque. Les projets de fin d'études représentaient un volume horaire forfaitaire de 230h par étudiant. Mes tâches consistaient à :

- Réaliser l'appel à projets.
- Evaluer les aspects scientifiques et pédagogiques des différentes propositions.
- Répartir les sujets et leur encadrement.
- Suivre l'encadrement.
- Organiser les soutenances.

Définition de la filière "système autonome"

Fin 2007, il a été décidé de restructurer le département IMA, jusqu'ici organisé en quatre options : informatique, micro-électronique, automatique, électronique de puissance en deux filières : systèmes autonomes et systèmes communicants. J'ai travaillé sur cette restructuration pendant deux ans. Mes tâches ont consisté à :

- Définir les objectifs et les contenus des deux filières, en particulier celui de la filière "systèmes autonomes".
- Définir la maquette horaire, les modalités d'évaluation.
- Rédiger les fiches pédagogiques de description des enseignements proposés.
- Animer des réunions entre collègues et rédiger les comptes-rendus.

Mise en place de la formation IMA par apprentissage

L'année 2012-2013, j'ai représenté l'ensemble des collègues automaticiens, pour la définition de la nouvelle formation d'ingénieurs IMA, par apprentissage, de l'école Polytech'Lille. Mon rôle a consisté à :

- Définir la maquette pédagogique (contenu des enseignements, volumes, modalités d'évaluation ...).
- Rechercher des entreprises susceptibles d'accueillir des étudiants.
- Participer à la rédaction dossier Formasup (analyse de l'opportunité de la formation proposée ...).
- Animer les réunions entre automaticiens et rédiger les comptes-rendus.

Ceci a représenté une charge moyenne de travail d'au moins 2h par semaine.

Mise en place d'un master Professionnel : Université Badji-Mokhtar (Algérie)

J'ai participé en 2005 à un projet de mise en place d'un Master Professionnel : "Exploitation et Maintenance des Installations Industrielles" entre l'Université de Lille (Polytech'Lille) et l'Université Badji-Mokhtar d'Annaba (Algérie). Je me suis rendue sur place une semaine. Ce projet de Master n'a malheureusement pas abouti, faute de financements.

4. Diffusion, rayonnement, activités internationales

4.1. Publications

Mes travaux sur l'enseignement des microcontrôleurs ont fait l'objet de trois communication dans un congrès national (CETSIS) avec actes :

1. B. Conrard, **A.-L. Gehin**, "Enseigner les microcontrôleurs en travaux pratiques : l'expérience IMA/Polytech'Lille" , 8ème Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, CETSIS 2010, 8-10 mars, Grenoble, France.
2. B. Conrard, **A.-L. Gehin**, "Du pseudo-langage dans l'assembleur" , 6ème Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, CETSIS 2007, 29-31 octobre, Bordeaux, France.
3. B. Conrard, **A.-L. Gehin**, "Un outil simple pour l' étude des architectures à base de microprocesseurs " , 5ème Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, CETSIS 2005, 25-27 octobre, Nancy, France.

L'une d'entre elle, a été reprise dans un journal national publié par le club EEA.

B. Conrard, **A.-L. Gehin**, "Enseigner les microcontrôleurs en travaux pratiques : l'expérience IMA/Polytech'Lille", Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes (J3eA), EDP Sciences, DOI: 10.1051/j3ea/2011016, Vol. 9, 6 pages, 2010.

4.2. Echanges internationaux

2005 : Université Badji-Mokhtar (Algérie) : Mise en place Master Professionnel

Dans le cadre de la mise en place d'un Master Professionnel : "Exploitation et Maintenance des Installations Industrielles" entre l'Université de Lille (Polytech'Lille) et l'Université Badji-Mokhtar d'Annaba (Algérie), j'ai donné un premier enseignement dédié aux systèmes temps réel (6h CM).

2001 et 2002 : Université Stefan Cel Mare (Roumanie) : Echanges Erasmus

Je me suis rendue deux fois à l'Université Stefan Cel Mare de Suceava en Roumanie, dans le cadre d'échanges Erasmus. J'y suis restée à chaque fois une semaine. J'ai, à chaque fois, donné 6h de cours sur les réseaux de terrain et les instruments intelligents et participé aux recrutements d'élèves Roumain pour Polytech'Lille.

1996 : Ecole Supérieure des Technologies d'Oujda (Maroc) : Action Intégrée

Je me suis rendue une semaine à l'Ecole Supérieure des Technologies d'Oujda (ESTO), dans le cadre d'une action intégrée, pour donner un cours sur les concepts et les apports des instruments intelligents (6h).

4.3. Diffusion nationale

Mes compétences dans des domaines tels que l'instrumentation intelligente, les réseaux de terrain, les systèmes temps réels, les systèmes embarqués m'ont permis de répondre favorablement à des demandes d'intervention dans des établissements autres que celui auquel je suis rattachée. La liste des interventions est résumée ci-dessous.

- **Depuis 2013** : Université de Lille – Master Instrumentation Mesures et Qualité, Niveau M2, Chaîne de Mesures : 12h CM, 9h TP dans le cadre d'un module de 50h que j'ai co-défini.
- **2010-2015** : Institut Supérieur de l'Electronique et du Numérique (ISEN Lille), Niveau Ingénieur, Systèmes Embarqués : 6h CM, 6h TP dans le cadre d'un module de 24h que j'ai co-défini.
- **1996 et 1997** : Ecole Supérieure des Sciences Informatiques, ESSI Sophia Antipolis, Niveau ingénieur, Instrumentation intelligente : 6h CM

5. Responsabilités administratives

De 2012 à 2019, j'ai été responsable la plate-forme technologique « systèmes automatisés » de l'Ecole Polytech'Lille. Cette plate-forme regroupe les équipements nécessaires à l'enseignement de l'automatique au sein de l'école. C'est une plate-forme transversale, utilisée par plusieurs départements (SE, IESP, IAAL, CM) et plusieurs master(e)s internes et externes à l'école (MRT, MES2M, IMQ ...). Les équipements sont répartis dans 9 salles dont 4 sont partagées avec l'Atelier Inter-établissement de Productique (AIP). La responsabilité de cette plate-forme est une activité reconnue par l'Université et donne droit à une décharge de 24h équivalent TD par an. Elle consiste à :

- Rechercher, mettre en place et maintenir les équipements pédagogiques supports à l'enseignement de l'automatique.
- Réaliser les devis, les demandes d'achats. Suivre les livraisons.
- Définir des partenariats avec des laboratoires de recherche et/ou des industriels pour la définition et l'utilisation de ces équipements,
- Définir et gérer le budget associé (environ 25 k€ d'équipements et 5 k€ de fonctionnement par an).
- Déposer des demandes de crédits exceptionnels (rédaction du dossier, suivi de la demande, réception du matériel).
- Définir et encadrer les activités de l'assistant ingénieur rattaché à la plate-forme (n+1) y compris son temps de travail et ses congés.

Les crédits exceptionnels obtenus sont les suivants :

- 2016 : Crédits Restructuration et Innovation Pédagogique gérés par l'Université : 30 k€ pour contribuer à la mise en place de plate-forme de production et d'utilisation d'hydrogène vert, complétés par 6k€ d'aides spécifiques accordés par Polytech'Lille. En effet, la plate-forme de production et d'utilisation d'hydrogène vert sert à la fois à développer des activités de recherche et comme support à la réalisation de projets de fin d'études d'ingénieur. Installée dans les locaux de Polytech'Lille, elle est également une vitrine de l'école lors de journées portes-ouvertes ou de l'accueil d'industriels et de chercheurs.
- 2018 : Crédits région au titre de l'apprentissage : 36 k€ pour acquérir un système de filtrage sur sable. Cet équipement sert à illustrer des enseignements de la nouvelle filière mécatronique. Cette filière a été mise en place en 2018 et est commune aux départements Construction Mécanique et SE.

J'ai également déposé une demande financement sur taxe d'apprentissage auprès d'EDF en 2017 mais qui n'a malheureusement pas aboutie.

Synthèse des activités de recherche

1. Présentation générale

A l'issue de ma formation d'ingénieur, j'ai entamé une thèse en septembre 1991 que j'ai soutenue en janvier 1994. Cette thèse a été réalisée au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL), sous la direction de Monsieur Marcel Staroswiecki et de Madame Mireille Bayart. Elle est intitulée : Analyse Fonctionnelle et Modèle Générique des capteurs Intelligents – Application à la surveillance de l'anesthésie. Suite à ces travaux de recherche et à l'expérience d'enseignement acquise pendant ces années de thèse, j'ai été nommée, dès septembre 1994, sur un poste de Maître de Conférences à Polytech'Lille et j'ai poursuivi ma recherche au LAIL, dans l'équipe « Analyse et Surveillance des Processus Industriels Complexes (ASPIC) » dirigée par Monsieur Staroswiecki.

Le laboratoire LAIL, dont la majorité des équipes était rattachée à l'Ecole Centrale de Lille, a fusionné en 2003 avec le laboratoire Interaction, Image et Ingénierie de la décision (I3D) dont les équipes dépendaient essentiellement de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL). Le Laboratoire d'Automatique de Génie Informatique et Signal (LAGIS) fût le résultat de cette fusion. Il regroupait environ 75 enseignants-chercheurs, répartis dans six équipes. Mes recherches ont été réalisées dans l'équipe « Sécurité de Fonctionnement des Systèmes Dynamiques » dirigée par Madame Bayart.

En 2015, le LAGIS fusionne avec le Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille (LIFL) pour former le Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille (CRISAL). Le laboratoire CRISAL regroupe environ 230 membres permanents, répartis en douze groupes de recherche, eux-mêmes décomposés en plusieurs équipes.

J'exerce mes activités de recherche dans l'équipe PERSI (PERennisation des Systèmes Industriels) du groupe de recherche ToPSyS (Tolérance Pronostic Système de Systèmes). Le groupe ToPSyS est composé de 23 membres permanents, il est dirigé par Monsieur Rochdi Merzouki. Il est structuré en trois équipes, l'équipe PERSI est constituée de 7 membres permanents et est dirigée par Monsieur Ould Bouamama.

Mes premiers travaux de recherche ont porté sur l'instrumentation intelligente, concept lié au développement de la micro-électronique. Pour décrire un instrument intelligent, j'ai proposé un modèle générique et un langage de description en vue de favoriser l'interopérabilité et l'interchangeabilité des instruments. En s'assurant que des équipements de constructeurs différents sont capables de dialoguer ensemble et de réaliser une mission globale, on contribue à la sûreté de fonctionnement d'un système automatisé.

Il est apparu par la suite, que ce modèle générique d'instrument, reposant essentiellement sur une description fonctionnelle, pouvait être utilisé pour analyser la reconfigurabilité d'un système automatisé. Cette description fonctionnelle a été complétée par modèles dits « structurels ». Ces derniers, en explicitant, les relations de causes à effets permettent d'étudier la reconfigurabilité d'un système via l'analyse graphique des propriétés d'observabilité et de commandabilité. Ils garantissent que toute stratégie de reconfiguration est sûre de fonctionnement.

La reconfiguration d'un système suppose également préalablement une identification correcte des défauts. Pour ce faire, l'outil Bond Graph Signé a été développé. Le Bond Graph appartient à la classe des modèles « structurels ». Il permet d'étudier la surveillabilité du système. Son extension, qu'est Le Bond Graph Signé, associe le raisonnement qualitatif et les approches structurelles pour le diagnostic de défauts simples et multiples.

Consécutivement à l'apparition de défauts, il est possible que certaines missions ne puissent plus être accomplies. Le système automatisé doit alors basculer dans un autre mode de fonctionnement où la réalisation d'un autre sous-ensemble de missions est possible. La logique temporelle est utilisée pour vérifier, de manière formelle qu'une solution de reconfiguration répond aux spécifications de départ.

L'outil Event Driven Hybrid Bond Graph permet de gérer automatiquement les différents modes de fonctionnement d'un système automatisé. Il offre une représentation du comportement dynamique d'un système sûr de fonctionnement.

Ces résultats théoriques, qui décrivent un système sûr de fonctionnement selon trois points de vue complémentaires (fonctionnel, structurel et dynamique) ont été obtenus via le co-encadrement de plusieurs thèses. Ils ont fait l'objet de plusieurs publications et de plusieurs applications réalisées, le plus souvent, dans le cadre de projet de recherche nationaux et internationaux. La Figure 3 résume l'ensemble de ces contributions.

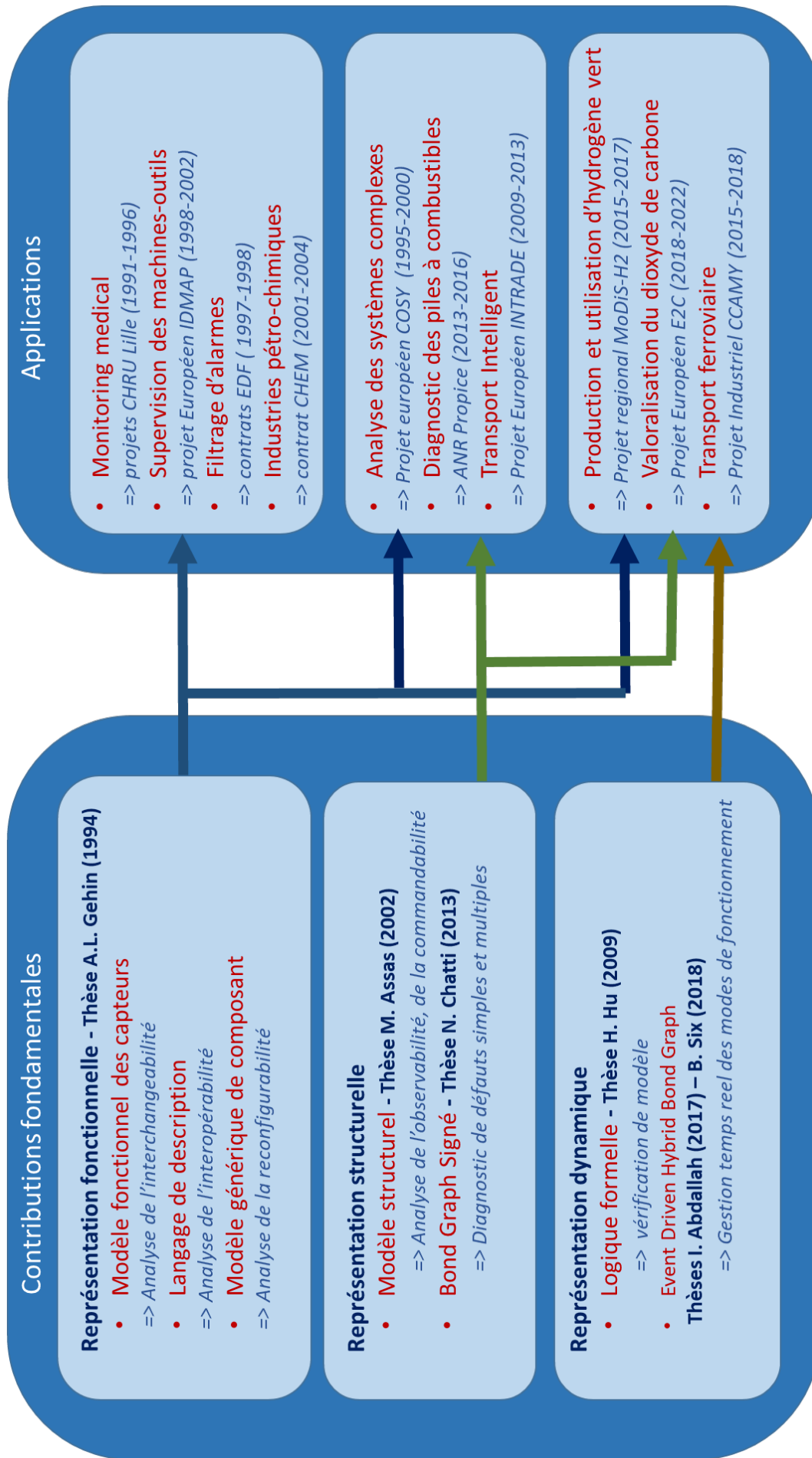


Figure 3 : Contributions fondamentales et Applicatives à la sûreté de fonctionnement

2. Encadrements

Thèses soutenues

Manarshhjet SINGH : Décembre 2017- Avril 2021

Encadrement : 50% A.L. Gehin, 50 % B. Ould Bouamama

Titre : Energy Activity: a common metric to perform diagnosis and prognosis.

Thèse financée par une bourse MESR

Rapporteurs : Monsieur Aziz Naamane – Université d’Aix-Marseille

Monsieur Dominique Sauter, Université de Nancy

Publications¹ : 1 revue soumise, 2 conférences[18], [19]

Béranger SIX : 2015-2018

Encadrement : 50% A.L. Gehin, 50 % B. Ould Bouamama

Titre : Supervision des systèmes multiphysiques décrits par des modèles Bond graphs hybrides – Application aux systèmes ferroviaires

Thèse financée par une convention spécifique avec la société CCamy Systèmes.

Rapporteurs : Monsieur Wolfgang Borutzki, Bonn-Rhein-Sieg University

Monsieur Nouredine Manamanni, Université de Reims

Publications : 1 revue [2], 2 conférences [21], [25]

Devenir du doctorant : Monsieur Six est chef de projet chez BOMBARDIER

Ibrahim ABDALLAH : 2014-2017

Encadrement : 50% A.L. Gehin, 50 % B. Ould Bouamama

Titre : Event-Driven Hybrid Bond Graph – Application : Hybrid Renewable Energy System for Hydrogen Production and Storage

Thèse financée par une bourse MESR.

Rapporteurs : Monsieur Wolfgang Borutzki, Bonn-Rhein-Sieg University

Monsieur Christophe Turpin, Université de Toulouse

Publications : 2 revues [3], [4], 1 chapitre de livre [11], 4 conférences [20], [22], [23], [24]

Devenir du doctorant : Monsieur Abdallah est Ingénieur Recherche et Développement chez HUTCHINSON

Nizar CHATTI : 2010-2013

Encadrement : 50% A.L. Gehin, 50 % B. Ould Bouamama

Titre : Contribution à la supervision des systèmes dynamiques à base des bond-graphs signés

Thèse financée par une bourse MESR.

¹ Les références données sous la forme d’un numéro entre crochets, renvoient, à la liste de mes publications données section 3 de la partie Curriculum Vitae Etendu et non pas à la bibliographie donnée en fin de document.

Rapporteurs : Monsieur Frédéric Hamelin, Université de Nancy

Monsieur Daniel Hissel, Université de Belfort-Montbeliard

Publications : 2 revues [5], [6], 2 chapitres de livres [12], [13], 5 conférences [27 à 31]

Devenir du doctorant : Monsieur Chatti est Maître de conférences à l'Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers (ISTIA)

He-xuan HU : 2004-2009

Encadrement : 70% A.L. Gehin, 30 % M. Bayart

Titre : Modèle formel pour intégrer le diagnostic de fautes multiples et la reconfiguration.

Thèse financée par une bourse MESR.

Rapporteurs : Monsieur Pascal Berruet, Université de Bretagne

Monsieur Jean-Marc Faure, ENS Cachan

Publications : 1 revue [7], 10 conférences [33 à 42]

Devenir du doctorant : Monsieur Hu est enseignant-chercheur en Chine

Mohamed ASSAS : 1998-2002

Encadrement : 50% A.L. Gehin, 50 % M. Staroswiecki

Titre : Analyse de la tolérance aux fautes : Approches fonctionnelle et structurelle.

Thèse financée par une bourse algérienne.

Rapporteurs : Monsieur José Ragot, Université de Nancy

Madame Louise Travé-Massuyès, Université de Toulouse

Publications : 2 conférences [49], [51]

Thèse en cours

Rim ABDALLAH : depuis octobre 2020

Encadrement : 50% A.L. Gehin, 50 % J.Y. Dieulot

Titre : Diagnostic et supervision d'une station de rechargement à base d'énergies renouvelables pour une flotte de véhicules partagés fonctionnant à l'hydrogène et l'électricité.

Thèse financée par une bourse MESR.

DEA et Masters

1. Youness RADI : 2019-2020

Encadrement à 50 % avec B. Ould Bouamama (50%)

Sujet : Développement et paramétrage d'un simulateur énergétique et détection des défaillances d'une plate-forme Multi sources d'énergie (PV et éolien)

2. Wassim FOUANI : 2011-2012

Encadrement à 80 % avec B. Ould Bouamama (20 %)

Sujet : Surveillance distribuée appliquée à un procédé de génération de vapeur.

3. Aymen GDOUBA : 2007-2008

Encadrement à 90 % avec M. Bayart (10 %)

Sujet : Surveillance du train avant d'un véhicule électrique.

4. Li-xin GU : 2006-2007

Encadrement à 90 % avec M. Bayart (10 %)

Sujet : Modèle Hiérarchique Comportemental d'un système.

5. He-xuan HU : 2003-2004

Encadrement à 90 % avec M. Bayart (10 %)

Sujet : Modèles multi-agents et leur apport pour la modélisation d'un système automatisé.

6. Damien RICAUX : 2003-2004

Encadrement à 40 % avec B. Conrard (40 %), M. Bayart (10 %)

Sujet : Etude de la reconfigurabilité d'un système par le biais de sa modélisation objet.

7. Mohamed ASSAS : 1997-1998

Encadrement à 50 % avec M. Staroswiecki (50 %)

Sujet : Etude de la reconfigurabilité des systèmes automatisés : approche modèle d'instrument.

8. Slimane ATTOUCHE : 1997-1998

Encadrement à 50 % avec M. Staroswiecki (50 %)

Sujet : Etude de la reconfigurabilité des systèmes automatisés : approche structurelle.

9. Nicolas FLIX : 1997-1998

Encadrement à 50 % avec A. Aitouche (50 %)

Sujet : Système de contrôle/commande distribué appliqué à la supervision d'un théâtre.

10. Hakim LAICHOIR : 1997-1998

Encadrement à 50 % avec M. Staroswiecki (50 %)

Sujet : Modélisation fonctionnelle et filtrage d'alarmes.

11. Sylvain TRIQUET : 1996-1997

Encadrement à 30 % avec M. Bayart (30 %), N. Devesa (20%), B. Toursel (20%)

Sujet : Vérification de la cohérence temporelle d'une application répartie sur un réseau d'instruments intelligents.

12. Chris CHOUKAIR: 1994-1995

Encadrement à 50 % avec M. Bayart (50 %)

Sujet : Approche ascendante pour la conception des architectures de contrôle/commande distribuées.

3. Publications

Revues

1. S. Sood, Om Prakash, M. Boukerdja, J.Y. Dieulot, B. Ould-Bouamama, M. Bressel, **A.L. Gehin**, Generic Dynamical Model of PEM Electrolyser under Intermittent Sources. *Energies* 2020, 13, 6556. doi.org/10.3390/en13246556
2. B. Six, B. Ould Bouamama, **A.L. Gehin**, “Model builder for diagnosis and simulation of hybrid dynamic systems: Application to railway rolling stock” *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, pp. 1-18, DOI: doi.org/10.1177/0037549720958399, October 2020.
3. I. Abdallah, **A.L. Gehin** and B. Ould Bouamama , “Event Driven Hybrid Bond Graph for Hybrid Renewable Energy Systems Part I: Modelling and Operating Mode Management”. *International journal of hydrogen energy*, Vol. 43, pp. 22088-22107, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.10.144 , December 2018
4. I. Abdallah, **A.L. Gehin** and B. Ould Bouamama “On-line robust graphical diagnoser for hybrid dynamical systems”, *Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 69, pp. 36-49, DOI: 10.1016/j.engappai.2017.12.002, March 2018.
5. N. Chatti, B. Ould-Bouamama, **A.-L. Gehin**, R. Merzouki, “Signed Bond Graph for multiple faults diagnosis”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 36, pp. 134 – 147 DOI : 10.1016/j.engappai.2014.07.018, November 2014.
6. N. Chatti, **A.L. Gehin**, B. Ould Bouamama, R. Merzouki, “Functional and behavioural models for the supervision of an intelligent and autonomous system”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, DOI : [10.1109/TASE.2012.2211350](https://doi.org/10.1109/TASE.2012.2211350), Vol. 10 , N°2, pp: 431 – 445, 2013 (Impact Factor 2012: 1,674)
7. **A.L. Gehin**, H. Hu, M. Bayart, “A self-updating model for analysing system reconfigurability”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, DOI: 10.1016/j.engappai.2011.08.001, Vol. 25, pp: 20-30, 2012 (Impact Factor 2012: 1,625)
8. **A.-L. Gehin**, M. Staroswiecki, “Reconfiguration Analysis using Generic Component Models”, *International Journal IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, part A: Systems and Humans*, Vol. 38, N°3, pp 575- 583, may 2008 (Impact Factor 2012 : 2,183)
9. Aïtouche, **A.L. Gehin**, N. Flix, G. Dumortier, “Generic control / command distributed system -Application to the supervision of moving stage sets in theaters”, *European Journal of Control*, January 2002 (Impact Factor 2012 : 1,250).
10. M. Staroswiecki, **A.L. Gehin**, “From Control to Supervision”, *Annual Reviews in Control*, Vol. 25, pp 1-11, 2001 (Impact Factor 2012 : 1,289).

Contributions à la rédaction d'ouvrages

11. **A.L. Gehin**, B. Ould Bouamama and I. Abdallah “Operating Mode Management of Hybrid Renewable Energy Systems using Event-Driven Hybrid Bond Graphs” In: A. Azar and N. Kamal “Design, Analysis and Applications of Renewable Energy Systems”, 1st Edition, Elsevier, accepté 16 juillet 2020, publié 01 juillet 2021.
<https://www.elsevier.com/books/design-analysis-and-applications-of-renewable-energy-systems/azar/978-0-12-824555-2>
12. B. Ould-Bouamama, N. Chatti and **A.-L. Gehin**, SBG for health Monitoring of Fuel Cell System, In: Hamdan M., Hejase H., Noura H., Fardoun A. (eds) ICREGA'14 - Renewable Energy: Generation and Applications. Springer Proceedings in Energy. Springer, pp. 73-85, 2014.
13. N. Chatti, **A.L. Gehin**, B. Ould Bouamama, *Robust Fault Decision: Application to an Omni Directional Mobile Robot*, Chapter 8 in ebook *Mechatronic & Innovative Applications*, ISBN: 97816080544, pp 147-167, 2012
14. J. Lunze, J. Askari-Marnani, A. Cela, P. M. Frank, **A.L. Gehin**, B. Heiming, M. Lemos, T. Marcu, L. Rato, M. Staroswiecki - *Three Tank Control Reconfiguration* – Chapitre 12 de l'ouvrage *Control of Complex Systems*, Springer, Aström, Albertos, Blanke, Isidori, Schaufelberg, Sanz ed., pp 241-283, 2000.
15. M. Robert, M. Marchandiaux, M. Porte – *Capteurs intelligents et Méthodologie d'Evaluation* – Hermès 1993

Conférences internationales (avec actes et comité de programme)

16. Om Prakash, S. Sood, M. Boukerdja, B. Ould Bouamama, J.Y. Dieulot, **A.L. Gehin**, M. Bressel, A Model-based Prognosis approach to Proton Exchange Membrane Water Electrolysis System, European Control Conference (ECC'21), June 29 – July 2, 2021.
17. S. Sood, Om Prakash, M. Boukerdja, B. Ould Bouamama, J.Y. Dieulot, M. Bressel, **A.L. Gehin**, Model based diagnosis of Proton Exchange Membrane water electrolysis cell (Bond Graph based approach), European Control Conference (ECC'21), June 29 – July 2, 2021.
18. M. Singh, **A.L. Gehin**, B. Ould Bouamama, Prognosis and Health Management using Energy Activity, IFAC World Congress, pp.10445-10452. July 11-17, 2020.
19. M. Singh, B. Ould Bouamama, A.L. Gehin, P. Kumar. Bond graph model for prognosis and health management of mechatronic systems based on energy activity. 7th International conference on Systems and Control (ICSC 2018), Valence, France, October, 2018.
20. B. Ould Bouamama, I. Abdallah, **A.L. Gehin**, Bond Graphs as Mechatronic Approach for Supervision Design of Multisource Renewable Energy System, 5th International Conference on Mechanics and Mechatronics Research (ICMMR 2018) Tokyo, Japan, July 19-21, 2018.
21. B. Six, B. Ould Bouamama, S. Lintz, **A.L. Gehin**, Automated model builder of hybrid bond

- graph: Application to a two level inverter, IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2017), Tinos, Greece, 29 Aug.-1 Sept. 2017
22. I. Abdallah, **A.L. Gehin** and B. Ould-Bouamama, Hybrid Bond Graph Modelling of Multi-Source System for Green Hydrogen Production, IEEE 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2017), Valletta, Malta, July 03-06, 2017
 23. I. Abdallah, **A.L. Gehin**, B. Ould Bouamama – Event Driven Hybrid Bond Graph, European Control Conference (ECC 2016), Aalborg, Denmark., June 29 - July 1, 2016.
 24. I. Abdallah, A.L. Gehin, B. Ould Bouamama - Functional Hybrid Bond Graph for Operating Mode Management, 4th IFAC Conference on Intelligent Control and Automation Sciences, ICONS 2016, Reims, France, June 1–3 2016.
 25. B. Six, B. Ould Bouamama, S. Lintz, **A.L. Gehin** - Railway direct braking system analysis using hybrid bond graph, International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2016, Saint Julian's, Malta, April 6-8 2016.
 26. **A.L. Gehin**, B. Ould Bouamama – Design of distributed Fault Detection and Isolation Systems, 9th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Paris, France, September 2-4, 2015.
 27. N. Chatti, B. Ould Bouamama, **A.L. Gehin**, R. Merzouki – Merging Bond-Graphs and Signed Directed Graphs to improve FDI procedure, *12th biannual European Control Conference, ECC'2013*, July 17-19, Zurich, Switzerland
 28. N. Chatti, B. Ould Bouamama, **A.L. Gehin**, R. Merzouki - Signed Bond Graph for health monitoring of PEM fuel cell, *5th International Conference of Development of Fuel Cells, FCDF'2013*, April 16-18, Karlsruhe, Germany.
 29. N. Chatti, **A.L. Gehin**, B. Ould Bouamama, R. Merzouki, Y. Touati – Bond Graph Model Based and Fussy Logic for Robust FDI of Mechatronic Systems, *8th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes, Safeprocess 2012*, August 29-31 – Mexico City.
 30. N. Chatti, W. Khalil, **A.L. Gehin**, B. Ould Bouamama, R. Merzouki – Intelligent Supervision of Autonomous Heavy Vehicles : Application to Maritime Area , *14th International Conference on Harbor, Maritime & Multimodal Logistic Modelling and Simulation– HMS 2011*, September 12-14 – Rome, Italy.
 31. N. Chatti, **A.L. Gehin**, B. Ould Bouamama, R. Merzouki - Functional and behavior models for the supervision of an intelligent and autonomous system , *IEEE Intelligent Vehicle Symposium – IV 2011*, June 5-9 – Baden-Baden, Germany.
 32. A. Gdoubia, **A.L. Gehin**, M. Bayart - Contribution à la répartition d'une application de surveillance, *8^e IFAC Conférence Internationale de MOdélisation et SIMulation - MOSIM 2010*, 10 -12 mai - Hammamet - Tunisie.
 33. H Hu, **A.-L. Gehin**, M. Bayart - An Extended Qualitative Multi-faults Diagnosis from First Principles I - Theory and Modelling, *in 48th IEEE Conference on Decision and Control, CDC 2009*, December 16-18, Shanghai, China.

34. H Hu, **A.-L. Gehin**, M. Bayart - An Extended Qualitative Multi-faults Diagnosis from First Principles II - Algorithm and Case Study, *in 48th IEEE Conference on Decision and Control*, CDC 2009, December 16-18, Shanghai, China.
35. H Hu, **A.-L. Gehin**, M. Bayart - Qualitative Multi-faults Diagnosis Based on Automated Planning I : Theory and Modelling, *7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis*, ACD 2009, November 19-20, Zielona Gora, Poland.
36. H. Hu, **A.-L. Gehin**, M. Bayart - Qualitative Multi-faults Diagnosis Based on Automated Planning II : Algorithm and Case Study, *7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis*, ACD 2009, November 19-20, Zielona Gora, Poland.
37. H Hu, **A.-L. Gehin**, M. Bayart - Relation between diagnosis and diagnoses obtained from subsystems, *13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, INCOM 2009, june 3-5 2009, Moscow, Russia.
38. H. Hu, **A.-L. Gehin**, M. Bayart - A Merge Method for Decentralized Discrete-Event Fault Diagnosis", *Third International Conference on Internet Monitoring and Protection*, ICIMP 2008, june 29 - july 5, Bucharest, Romania.
39. H. Hu, **A.-L. Gehin**, M. Bayart - A formal framework of reconfigurable control based on model checking, *American Control Conference*, ACC 2008, june 11-13, Seattle, USA.
40. H. Hu, **A.-L. Gehin**, M. Bayart - A new formal framework for reconfigurable control, *in 5th Workshop on Advanced Control and Diagnosis*, ACD 2007, November 15-16, Grenoble, France.
41. H. Hu, **A.-L. Gehin**, M. Bayart - A state-based approach for decentralized fault diagnosis in discrete-event systems", *8th IFAC Symposium on Cost Oriented Automation*, COA 2007, Vol. 8, part. 1, 13-15 february, 2007, Cuba.
42. H Hu, **A.-L. Gehin**, M. Bayart - Model Aggregation for Reconfigurable Control Based on Generic Component Model, *International Conference Service Systems and Service Management*, ICSSSM 2006, 25-26 October, Troyes, France
43. M. Dulac, **A.-L. Gehin**, M. Bayart - A component based approach to evaluate the system availability, *Safety and Reliability Conference*, ESREL 2006, 18-22 sept. 2006, Estoril, Portugal
44. M. Dulac, **A.-L. Gehin**, M. Bayart - Détermination des ressources matérielles indispensables à la réalisation des objectifs d'un SA, *Conférence Internationale Francophone d'Automatique*, CIFA 2006 30, 31 may - 1 june, Bordeaux, France
45. **A.-L. Gehin**, M. Dulac - System Reconfigurability Analysis Using Structural Approach, *13th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation*, MED'05, 26-29 June, Limassol, Cyprus.
46. **A.-L. Gehin**, M. Staroswiecki – Towards the definition of standardised machine tool monitoring system – *7th IFAC Symposium on Cost Oriented Automation*, COA 2004, 6-9 june, pp. 251-256, Gatineau (Canada).
47. **A.-L. Gehin**, M. Staroswiecki – How to continue system operation in the presence of faults ?, *6th International Conference on Development and Application Systems*, DAS 2002, 22-24 may, Suceava (Roumania).
48. B. Ould Bouamama, **A.-L. Gehin**, M. Staroswiecki – Alarm filtering by component

- modelling and Bond Graph Approach – *4th IFAC Workshop on On-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries*, CHEMFAS 2001, 8-9th June, Seoul, Korea.
49. **A.-L. Gehin**, M. Assas and M. Staroswiecki - Structural Analysis of System Reconfigurability, *4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes*, Safeprocess 2000, June 14-15, Vol. 1, pp. 292 – 297, Budapest (Hungary).
 50. M. Staroswiecki and **A.-L. Gehin** - From Control to Supervision, *4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes*, Safeprocess 2000, June 14-15, Vol. 1, pp. 312 - 323, Budapest (Hungary).
 51. **A.-L. Gehin**, M. Staroswiecki, M. Assas - A Bottom-up Approach to Analyse Reconfiguration Possibilities - *10th international Workshop on Principles of Diagnosis*, DX 1999, June, Loc Awe (UK), p. 100-108.
 52. **A.L. Gehin**, M. Staroswiecki - A Formal Approach to Reconfigurability Analysis - Application to the three Tank Benchmark, *European Control Conference ECC'99*, August 31- September 3, Karlsruhe, Germany.
 53. N. Flix, A. Aïtouche, G. Dumortier, **A.L. Gehin** - How can be supervised the supervision ?, *Workshop on Multi agents – IFAC MAS 1999*, december 19-24, Vienna, Austria.
 54. M. Staroswiecki, **A. L. Gehin** - Analysis of System Reconfigurability using Generic Component Models, *International Conference on Control*, Control 1998, 1-4 September, Swansea (UK).
 55. A Hamri, **A.L. Gehin**, Z. Kanev, M. Staroswiecki - Application of the Smart Sensor Concepts to the Monitoring of Free Surface Flows, *IMACS International Conference on Computational Engineering in Systems Application CESA'98*, April 1-4, Nabeul-Hammamet (Tunisia).
 56. **A.L. Gehin**, M. Bayart, M. Staroswiecki - Faulty resources management in automation systems, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, IEEE SMC'97, October 12-15, Orlando (USA).
 57. S. Triquet, **A.L. Gehin**, N. Devesa, B. Toursel, M. Bayart - Fieldbus considered as a smart instrument : modelization using a generic external model, *Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications*, SICICA 1997, June 9-11, Annecy (France).
 58. M. Bayart, **A.L. Gehin**, M. Staroswiecki - Smart Instruments Design, *Third International Symposium on Methods and Models in Automation and Robotics*, MAAR 1996, September 10-13, pp. 727-732, Miedzyzdroje (Poland).
 59. M. Staroswiecki, M. Bayart, **A.L. Gehin** - Mode management in a distributed intelligent automated production system, *IFAC Conference on Algorithms and Architectures for Real Time Control*, AARTC 1995, May 31, june 1-2, pp. 341-348, Ostend (Belgium).
 60. **A.L. Gehin**, M. Bayart - Operating Modes of a Distributed Intelligent Automated Production System, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, IEEE SMC 1995, October 22-27, pp. 1333-1338, Vancouver (Canada).
 61. R. Logier, **A.L. Gehin**, M. Bayart, M. Couvreur, M. Staroswiecki, M. Delecroix, M. Bertrand

- Detection of transient myocardial ischemia by numerical processing of electrocardiographic signal, IMACS International Symposium on Signal Processing, Robotics and Neural Networks SPRANN 1994, April 25-27, pp. 610-613, Villeneuve d'Ascq (France)
- 62. **A.L. Gehin**, R. Logier, M. Bayart, M. Staroswiecki, M. Delecroix, D. Cantineau - Data validation for improving Anesthesia Supervision, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, IEEE SMC'93, October 17-20, Le Touquet (France).
- 63. R. Logier, Arcas group, **A.L. Gehin**, M. Bayart, M. Staroswiecki - Automated monitoring of respiratory mechanics in mechanically ventilated children, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, IEEE SMC'93, October 17-20, Le Touquet (France).
- 64. **A.L. Gehin**, R. Logier, M. Bayart, M. Staroswiecki, M. Delecroix, D. Cantineau - Application of the smart sensor concept to the anesthesia supervision, *15th Annual International Conference, IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 1993, October 28-31, San Diego (USA).
- 65. R. Logier, Arcas group, **A.L. Gehin**, M. Bayart, M. Couvreur, M. Staroswiecki - A new tool for respiratory monitoring and pulmonary mechanics measurements in mechanically ventilated children, *15th Annual International Conference, IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 1993, October 28-31, San Diego (USA).
- 66. M. Bayart, **A.L. Gehin**, M. Staroswiecki - Fault detection and isolation and mode management in smart actuators, *Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications*, IFAC SISICA 1992, May 20-22, Malaga (Spain).

Conférences nationales (avec actes et comité de programme)

- 67. N. Chatti, **A.-L. Gehin**, B. Ould-Bouamama, R. Merzouki - Contribution à la prise de décision robuste pour la détection de défauts: Application à un robot omnidirectionnel“ *13ème Colloque AIP PRIMECA, 2012, 27-30 Mars*.
- 68. N. Chatti, **A.-L. Gehin**, B. Ould-Bouamama, R. Merzouki - Modèles de comportement et fonctionnel pour la supervision d'un système autonome“, *4èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, 2011, 9-10 juin, Marseille – France*.
- 69. **A.L. Gehin**, M. Staroswiecki - Modèle de description d'un système automatisé tolérant aux fautes, *2ème congrès sur la Modélisation des Systèmes Réactifs*, MSR 1999, 24-25 mars, Cachan, France, Ouvrage Hermès.
- 70. C. Choukair, M. Bayart, **A.L. Gehin** - Spécification des propriétés structurelles d'un modèle externe par les hypergraphes, *Automatisation des Processus Mixtes*, ADMP 1998, 19-20 mars, Reims (France)
- 71. C. Choukair, M. Bayart, **A.L. Gehin** - Utilisation des hypergraphes dans la modélisation d'un équipement intelligent - *Colloque de Recherche Doctorale "Automatique, Génie Informatique, Image, Signal*, AGIS 1997, 9 - 11 décembre, pp. 135 - 141, Angers (France).

Journées de diffusion nationales

72. B. Ould Bouamama, J.Y. Dieulot, **A.L. Gehin**, M. Bressel, S. Sood, Production et stockage de l'hydrogène vert - cas du projet E2C « Electrons to high value Chemical products », Plénière GdR Hydrogène, Systèmes et Piles à Combustible (HySPàC), Le Croisic, 11-13 juin 2019
73. **A.L. Gehin**, Modélisation de la chaîne de production et de stockage de l'hydrogène (résultats de projet de recherche Région MoDis-H2), - Journées scientifiques de la Semaine de la recherche et de l'innovation, Amiens , 23 novembre 2016
74. N. Chatti, B. Ould Bouamama, A.L. Gehin, R. Merzouki _ Modélisation par analyse fonctionnelle et Bond Graphs des conditions de fonctionnement d'un véhicule intelligent autonome - Journées Automatique et Automobile du GdR MACS CNRS (GTAA) – Amiens, 7-8 décembre 2011.

Livrables de projet

75. S. Sood, O. Prakash, M. Boukerdja, B. Ould-Bouamama , J. Y. Dieulot, M. Bressel, **A.L. Gehin** “Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyser System Performance and Lifetime Modelling Simulation Tool” – Livrable D1.3.1 – European Interreg Project E2C – 97 pages – Confidential – Janvier 2021.
76. A. Moulé, C. Taché, J.Y. Dieulot, **A.L. Gehin**, S. Verhelst, S. Broekaert – Modélisation et commande de l'auto-ignition d'un moteur HCCI – Rapport final, action Incitative Lille Gand, Mars 2015
77. Toguyeni, **A.-L. Gehin**, N. Dangoumau, E. Craye – Methodology of Development of Toolbox TB7.2 – Contrat IMS CHEM, IFP, Paris, Mars 2002.
78. Toguyeni, **A.-L. Gehin**, N. Dangoumau, E. Craye – Design Specification of Toolbox TB7.2 – Contrat IMS CHEM, IFP, Paris, Juin 2001.
79. **A.-L. Gehin**, M. Staroswiecki - Models for machine tool component standardisation - Contribution to the Final Technical Report of the Project: "Intelligent Devices for the On-Line and Real-Time Monitoring, Diagnosis and Control of Machining Processes" of the Thematic Network in Brite-Euram III - Contract-No: BRRT-CT97-5045 - November 2001.
80. **A.-L. Gehin**, M. Staroswiecki - Disturbance Identification Techniques - Contribution to the Final Technical Report of the Project: "Intelligent Devices for the On-Line and Real-Time Monitoring, Diagnosis and Control of Machining Processes" of the Thematic Network in Brite-Euram III - Contract-No: BRRT-CT97-5045 - November 2001.
81. E. Craye, **A.L. Gehin**, B. Ould Bouamama, M. Staroswiecki, A. Toguyeni- Analyse du RCV et filtrage d'alarmes - Contrat EDF, Ref P31/BO2970/EP885, 1998
82. E. Craye, N. Dangoumau N., S. El Khattabi, **A.L. Gehin**, B. Ould Bouamama, M. Staroswiecki, A. Toguyeni - Analyse du SRI et filtrage d'alarmes - Contrat EDF, Ref P31/BO2970/EP885, 1998

83. E. Craye, **A.L. Gehin**, B. Ould Bouamama, M. Staroswiecki, A. Toguyeni- - Proposition de méthodologies de modélisation en vue du filtrage d'alarmes - Contrat EDF, Ref P31L19/6A2224/EP824, 1997.
84. E. Craye, **A.L. Gehin**, B. Ould Bouamama, M. Staroswiecki, A. Toguyeni-. - Analyse bibliographique et synthèse de filtrage d'alarmes en industrie et laboratoires - Contrat EDF, Ref P31L19/6A2224/EP824, 1997.

4. Responsabilités scientifiques

4.1. Contrats industriels

CCAMY Systèmes 2015-2018 (36 mois)

J'ai été co-responsable (50%) du contrat industriel établi avec la société CCAMY Systèmes. Le thème développé fût le Contrôle commande des systèmes hybrides appliqué aux transports ferroviaires [2], [21]. La thèse de Béranger Six a été réalisée dans ce cadre. Le budget alloué fût de 45k€ pour l'équipe.

Contrat Industriel EDF 1997 et 1998 (2*12 mois)

J'ai été co-responsable (50%) de deux projets industriels avec EDF sur le filtrage d'alarme au niveau des centrales nucléaires [48], [81], [82], [83], [84]. Ces contrats ont impliqué deux équipes du laboratoire pour un montant global de 56,5 k€.

4.2. Projets de recherche

Projet MoDiS-H2 (Janvier 2015-Décembre 2017 : 36 mois)

J'ai été responsable scientifique et animatrice du projet « Modélisation et Diagnostic des Systèmes multi-sources pour la production et le stockage d'Hydrogène (MoDiS-H₂) ». Ce projet a été soutenu et financé par la région Nord-Pas de Calais. L'aide attribuée, de type ARCIR, de 67 617€ HT, a été complétée, en 2016, par des crédits Recherche et Innovation Pédagogique, 30 000 €, octroyés par l'Université de Lille et par une subvention spécifique, 6 000 €, accordée par l'Ecole Polytech'Lille. Le coût total du projet fut de 172 304€ HT. Les partenaires du projet (11 personnes) étaient membres des laboratoires CRISAL et L2EP de Lille et de la Communauté Urbaine de Dunkerque. La thèse d'Ibrahim Abdellah a été réalisée dans ce cadre [3], [11], [22], [23]. Une plate-forme expérimentale spécifique « de production et d'utilisation d'hydrogène vert » a été développée dans ce contexte.

Projet INTERREG 2 mers E2C (Juillet 2018- Décembre 2021 : 42 mois)

Le projet INTERREG 2 mers "Electrons to high value chemical products" vise à développer les technologies Power-to-X qui permettent aux industries chimiques de valoriser une partie du dioxyde de carbone qu'elles produisent en carburants en utilisant les énergies renouvelables

[1], [16], [17]. Huit institutions sont impliquées. Le financement pour l'équipe est de 450 k€. Nous sommes partenaires de ce projet grâce au savoir-faire développé dans le projet MoDiS-H₂ et à l'existence de la plate-forme associée.

Projet Detection and Prediction of Auto-Ignition for HCCI engines (2015)

J'ai assuré la responsabilité scientifique (50%) du projet « Detection and Prediction of Auto-Ignition for HCCI engines » réalisé dans le cadre de l'action incitative entre les Universités de Lille et de Gand [76]. Ce projet a été réalisé par deux étudiants français en fin d'études d'ingénieur et un étudiant belge en post-doctorat. La durée du projet fût d'environ 5 mois dont deux mois à temps plein.

Projet INTERREG NWE INTRADE (2009-2013)

J'ai animé, les actions « Functional Reconfiguration of IAV system » et « IAV's Operating and Functional Modelling » du projet INTRADE (Intelligent Transportation for Dynamic Environment). Ce projet européen, INTERREG IVB, NWE a permis d'améliorer la gestion des marchandises dans les ports maritimes en développant des véhicules porte-conteneurs totalement autonomes. Le budget global du projet était de 7 033 k€ dont 2 806 k€ pour le laboratoire. La thèse de Nizar Chatti a été financée et réalisée dans ce cadre [5], [6], [30], [31].

Projet européen CHEM (2001-2004)

Le projet CHEM G1RD-CT-2001-00466 (Advanced Decision Support System in Chemical/petrochemical Industries) fut un projet du 5^{ème} PCRD (Programme Cadre de Recherche et de Développement de l'Union Européenne). Il avait pour objectif de développer et d'implémenter des outils pour la supervision des processus industriels. Dans le cadre de ce projet, j'ai participé à la définition et à l'implémentation d'une boîte à outils dédiée à l'analyse de la reconfigurabilité des systèmes [8], [45], [77], [78]. Cette boîte a été testée sur le générateur de vapeur du laboratoire. Ce projet, d'un montant global de 6 316 kiloeuros, dont 351 kiloeuros pour le LAGIS, a impliqué 15 partenaires de 8 pays européens.

Projet européen IDMAP (1998-2002)

Le projet IDMAP Brite-EuRam III (Intelligent Devices for on-line and real-time monitoring, diagnosis and control of Machining Processes) fut un projet du 4^{ème} PCRD. Il visait à augmenter les performances des centres d'usinage par le développement d'équipements intelligents permettant le contrôle commande et le diagnostic en ligne. J'ai travaillé sur les aspects instrumentation intelligente et standardisation [46], [79], [80]. J'ai entièrement pris en charge ce projet au niveau du laboratoire et organisé deux journées de formation. Le montant global alloué au projet fut de 1 368 kiloeuros pour 25 partenaires de 8 pays différents. La somme reçue par le laboratoire fut de 17 500 Euros.

4.3. Responsabilité de plate-forme

Je suis responsable scientifique et technique de la plate-forme « production et utilisation d'hydrogène vert ». Cette plate-forme existe grâce aux financements obtenus dans le cadre du projet MoDiS-H₂ (103 k€). J'ai réalisé et suivi deux appels d'offres permettant de mettre en concurrence les fournisseurs. J'ai suivi la mise en place de la plate-forme et je me suis formée à son utilisation. Je continue d'accroître ses performances par l'ajout d'équipements financés par le projet E2C (6,5 k€ d'investissements en 2018 et 8,5 k€ en 2019). Là encore, je réalise les différents devis. Cette plate-forme permet de transformer, l'énergie produite par deux panneaux solaires et une éolienne, en hydrogène et d'utiliser cet hydrogène via une pile à combustible. Je contribue au support technique et à l'encadrement des étudiants travaillant sur cette plate-forme.

- 2020 : 1 stage recherche Master (M2)
- 2019-2020 : 1 projet de fin d'études IMA et 2 projets de fin d'études Master (M2).
- 2018-2019 : 1 projet de fin d'études IMA
- Depuis 2018 : aide ponctuelle aux différents thésards utilisant cette plate-forme.

5. Diffusion et rayonnement

5.1. Participation à des groupes de travail

Depuis 2014 : Participation au groupe régional Hydrogène Les Hauts de France

Je participe depuis 2014 au groupe de travail « hydrogène » mis en place par la région « Les Hauts de France ». Ce groupe réunit universitaires et industriels (20 personnes environ) et a pour objectif d'initier des projets de recherche répondant aux attentes de la transition énergétique. J'ai à ce titre, déposé, et dirigé le projet MoDiS-H₂ et obtenu les financements pour mettre en place la plate-forme de production d'hydrogène vert.

2008-2011 : Participation au groupe de travail INCOS du GdR MACS

Le groupe de travail Ingénierie de la Commande et de la Supervision des systèmes à événements discrets, soutenu par le GdR MACS avait pour objectif de contribuer à la sûreté de fonctionnement et à l'amélioration des performances des systèmes de contrôle/commande et de supervision majoritairement discrets. Les travaux de thèse de He-xuan Hu ont fait l'objet de présentations et de discussions dans ce groupe. Différentes méthodes de diagnostic ont été comparées autour d'un même cas d'étude. La fréquence des réunions fût de 3 par an, avec un effectif moyen de 15 personnes venant de 10 laboratoires ou équipes différentes.

2001-2005 : Participation au groupe de travail Bridge du réseau européen MONET

Bridge fut un groupe de travail s'insérant dans le réseau européen MONET (European Network of Excellence on Model Based Systems and Qualitative Reasoning, contrat N° IST-33540). Il réunissait des partenaires de 6 pays. L'objectif du groupe fut de comparer les approches Fault

Detection and Isolation (FDI) et Diagnosis (DX) pour la détection et la localisation de fautes, les approches étant issues de communautés différentes. J'ai proposé deux journées de formation sur l'analyse structurelle à Lille, en lien avec les travaux de thèse de Mohamed Assas, et j'ai proposé l'utilisation du générateur de vapeur, que nous possédions au laboratoire, comme support d'application. La fréquence des rencontres fut d'environ de deux fois deux jours par an. Les résultats de ce groupe m'ont donné une base pour les publications [33], [34].

1995-2000 : Participation au groupe de travail COSY soutenu par l'ESF

COSY (COntrol of complex SYstems) fut le premier groupe de recherche soutenu par l'European Science Foundation (ESF) dans le domaine des sciences de l'ingénieur, réunissant des partenaires de 14 pays. J'ai participé au thème fault-tolerant control systems de ce réseau. Les résultats ont été publiés, entre autres, dans un ouvrage de synthèse [14]. La fréquence des rencontres fut de deux jours par an.

1991-1994 : Participation au groupe de travail capteur intelligent du CIAME intégré à l'APIST

Ma participation au groupe de travail « capteur intelligent » du CIAME (Comité Interprofessionnel pour l'Automatisation et la Mesure) intégré à l'APIST (Association pour la Promotion de l'Instrumentation Scientifique et Technique) a permis de définir les apports et les fonctions des capteurs intelligents et également de fournir une méthodologie d'évaluation. L'ensemble des résultats est publié dans un ouvrage de synthèse [15]. La fréquence des réunions fut d'environ 1 tous les deux mois avec un effectif moyen de onze personnes (3 universitaires, 8 industriels).

5.2. Invitation dans des universités étrangères

22 octobre au 24 octobre 2018 : Indian Institut of Technology of Roorkee

25 octobre au 27 octobre 2018 : Indian Institut of Technologie of Kharagpur

Dans le cadre du projet de Recherche Collaboratif CNRS-CEFIPRA « Modelling and control of mobile cooperating arms », j'ai été invitée à séjourner trois jours, à chaque fois, dans les « Institut Indien de Technologies » de Roorkee et de Kharagpur. Dans chaque établissement, j'ai présenté mes travaux et donné une conférence sur la modélisation et la commande de robots mobiles coopératifs avec prise en compte des contraintes de temps. J'ai également visité les laboratoires d'enseignement et de recherche, écouté des présentations d'étudiants et donnée envie à deux d'entre eux, de venir travailler sur le projet pendant trois mois en France. Mes discussions avec le chercheur Om Prakash ont également contribué à son recrutement pendant un an pour travailler sur le projet Interreg E2C en tant que post docteur.

2014 : Ghent University - Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics

Dans le cadre d'une action incitative, soutenue par les universités de Lille et de Gand (2014-2015), financée à hauteur de 2000 €/an, visant à établir des relations franco-belges, j'ai présenté mes activités de recherche lors d'un séminaire co-organisé par le département of « Flow, Heat and Combustion Mechanics » de l'Université de Gand et l'équipe MOCIS du laboratoire CRISAL. Suite à cette rencontre, un projet de recherche commun (projet

Detection and Prediction of Auto-Ignition for HCCI engines) a été réalisé et une demande d'ANR « Safe and Reliable Integration of Hydrogen in Harbour Transportation (SafREIGHHT) » a été déposée, malheureusement non retenue.

5.3. Organisation colloques, séminaires, journées d'étude

Journées E2C Lille (2019)

Les 12 et 13 mars 2019, j'ai co-organisé (50%), à Lille, les journées de travail liées au projet Interreg E2C (28 participants de 4 pays) : planning, réservation des salles, aide à la réservation des hôtels, réservations restaurants et traiteurs, accueil des participants, soutien logistique ...

Séminaire Systèmes Hybrides (2015) – Université de Lille - Société de services CCAMY Systèmes

CCAMY Systèmes est une société d'ingénierie et de conseil dans le domaine du contrôle commande embarqué et intervenant dans des secteurs tels que dans le ferroviaire, l'automobile, l'énergie. Suite à une rencontre lors de journées entreprises-école organisées par Polytech'Lille, j'ai organisé un séminaire où j'ai présenté mes résultats de recherche liés à la modélisation des systèmes hybrides et où la société CCAMY a exposé ses besoins. Il en est découlé un contrat industriel de 45k€ et l'encadrement des travaux de thèse de Béranger Six, la thèse étant entièrement financée par l'entreprise.

Formation Analyse Structurelle (2000)

J'ai co-organisé (50%), à Lille, deux journées de formation sur l'analyse structurelle en lien avec le projet IDMAP et le groupe de travail Bridge (20 participants environ de 4 pays) : planning, réservation des salles, aide à la réservation des hôtels, réservations restaurants et traiteurs, accueil des participants, soutien logistique ...

5.4. Participation à des jurys de thèses

J'ai participé à trois jurys de thèse en tant qu'examinatrice.

Solène Houria CHAABNA : 30 novembre 2020, CRISAL, Université de Lille

Encadrant : Jean-Yves Dieulot

Titre : Passivity-based modeling and power routing of a multi-source power cell for hydrogen production

Gerardo Ayala Jaimés Menighed : 15 Décembre 2016, CRISAL, Université de Lille

Encadrant : Rochdi Merzouki

Titre : Supervision of Over-actuated Steering System of Mobile Omnidrive Heavy Vehicle

Kamel Menighed : 23 septembre 2010, CRAN, Université de Nancy

Encadrants : Christophe Aubrun, Joseph Yamé

Titre : Commandes coopératives embarquées et tolérantes aux défauts

5.5. Evaluation d'articles

Depuis 2011 (je n'ai pas noté ce qui a été fait avant), j'ai évalué 4 soumissions pour des revues et 17 articles pour des conférences.

Revues :

2019 : International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields

2017 : Journal of Systems and Control Engineering

2013 : IEEE Transactions on Automation Science and Engineering

2011 : IEEE Transactions on Automation Science and Engineering

Conférences :

2020 : IFAC World Congress

2019 : International Conference on Systems and Control

2016 : International Conference on Systems and Control

2016 : Conference on Control and Fault-Tolerant Systems

2015 : IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (2 papiers)

2014 : IFAC World Congress (2 papiers)

2013 : International Conference on Systems and Control

2013 : IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing

2013 : IEEE International Conference on Automation Science and Engineering

2016 : Conference on Control and Fault-Tolerant Systems

2012 : International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation

2012 : IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes

2012 : Mediterranean Conference on Control and Automation

2011 : IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems

2011 : International Conference on Industrial Engineering and Systems Management

6. Responsabilités collectives

Conseils de laboratoire

- 2011-2015 : membre nommé du conseil de laboratoire
- 2007-2010 : membre élu du conseil de laboratoire

Commission de Spécialistes

- 2007-2009 : Membre nommé de la Commission de Spécialistes 61 – Université de Valenciennes
- 2007-2009 : Membre élu de la Commission de Spécialistes 61 – Université de Lille.
- 2003-2006 : Membre nommé de la Commission de Spécialistes de l'ENSAIT – Roubaix

Participation à des comités de sélection

- 2020 - Membre du comité de sélection pour le poste 61 MCF Polytech'Lille
- 2016 - Membre du comité de sélection pour le poste 61 MCF 2086 pour l'Université de Toulouse
- 2013 - Vice-présidente du comité de sélection pour le poste de MDC 4125 de l'université de Lille1
- 2011 - Membre du comité de sélection pour le poste 61 0352 de l'Université de Toulouse

Partie 2 :

Mémoire de Recherche

Introduction

Ce mémoire de recherche présente mes principales contributions à la conception et à supervision de systèmes sûrs de fonctionnement.

Un système automatisé est sûr de fonctionnement s'il est capable d'exécuter les missions qui lui sont attribuées, à un instant donné ou sur une durée définie. Ceci nécessite que les composants qu'ils regroupent soient interchangeables et interopérables. Deux composants sont interchangeables s'ils sont capables de fournir les mêmes services dans des modes de fonctionnement identiques. Deux composants sont interopérables si les données consommées par l'un sont produites par l'autre et disponibles au moment où le consommateur en a besoin. Outre ces notions d'interchangeabilité et d'interopérabilité qui favorisent la disponibilité du système, exprimée comme sa probabilité de bon fonctionnement à l'instant courant, un système sûr de fonctionnement doit également être crédible. Ceci nécessite qu'il soit capable, d'une part, d'identifier et signaler son état de fonctionnement qui peut être plus ou moins bon en fonction des défaillances ou défauts constatés et d'autre part, qu'il résiste ou refuse toute entrée non autorisée ou incorrecte et en informe éventuellement les utilisateurs.

Dans la boucle Mesure-Décision- Action qui caractérise un système automatisé, la décision est prise en fonction d'une image de l'état du processus à contrôler donnée par les capteurs. Plus cette image est proche de la valeur vraie des grandeurs physiques qui caractérisent le processus, mieux adaptées sont les décisions d'actions.

Pour améliorer la qualité de l'image que l'on a de l'état du processus, deux voies non exclusives sont envisageables :

- L'amélioration de la qualité du signal élaboré par chaque capteur.
- L'augmentation du nombre de capteurs connectés.

Le capteur intelligent est une solution permettant de prendre en compte ces deux possibilités. Il est né des possibilités offertes par la micro-électronique exprimées en termes de puissance de calcul, de capacité de mémorisation et communication numérique. En effet, en associant à un capteur classique, une unité de traitement numérique sous la forme d'un microprocesseur ou autre, de la mémoire, une interface de communication bidirectionnelle on rend possible la réalisation de fonctions auparavant effectuées sous forme analogique (par exemple : le filtrage) mais on permet également l'intégration de fonctions entièrement nouvelles (par exemple : la compensation des non-linéarités, la prise en compte des grandeurs d'influence). Ceci permet au capteur de remplir sa fonction initiale : délivrer une mesure, avec des performances accrues. Il contribue ainsi, en partie, à l'amélioration de la qualité de la représentation de l'état du système. Le capteur intelligent peut aussi prendre en charge une partie des fonctions de décision habituellement réalisées au niveau supérieur concourant ainsi à plus d'interopérabilité avec les autres composants du système automatisé et à plus d'interchangeabilité en cas de défaillance.

Pour favoriser l'interopérabilité et l'interchangeabilité de l'ensemble des composants d'un système automatisé, une description fonctionnelle et comportementale de ces derniers est nécessaire. La description fonctionnelle explicite la manière dont le composant participe à la réalisation des objectifs ou des missions du système. Le composant est vu, d'un point de vue externe comme une entité proposant des services. Un service manipule des variables. Sa réalisation est conditionnée par la vérification d'une condition d'activation. Pour simplifier l'expression de ces conditions d'activation et pour satisfaire la sûreté du système, les services sont organisés en sous-ensemble cohérents, appelés modes de fonctionnement.

Obtenir une sûreté de fonctionnement satisfaisante revient à concevoir des systèmes dits tolérants aux fautes. L'objectif est de faire en sorte que le système ne soit pas complètement à l'arrêt dès lors qu'un de ses composants est défaillant. Ceci suppose l'existence d'une redondance fonctionnelle au niveau de l'ensemble des services rendus par les composants et l'implémentation d'algorithmes capables d'évaluer en temps réel la disponibilité des services.

En associant au modèle fonctionnel une description comportementale qui explicite par un modèle mathématique ou autre les relations entre données produites et données consommées par un même service ou des services différents, il devient possible de générer des indicateurs de défauts construits sur la mise en évidence de relations de redondance analytique (RRA). Une RRA est une relation où toutes les variables ont des valeurs connues. En absence de dysfonctionnement, les RRA représentatives du comportement du système sont vérifiées. En présence d'un défaut, les valeurs mesurées sur le système sont différentes de celles prédites par le modèle et une ou plusieurs RRA ne sont plus satisfaites.

Les RRA peuvent être générées à partir de l'outil Bond Graph dont les propriétés structurelles et causales permettent de définir l'ensemble des possibilités pour calculer la valeur d'une même variable. Le Bond Graph est un graphe habituellement utilisé pour représenter graphiquement les échanges énergétiques entre composants d'un système. En associant à

chacun de ses nœuds, une interprétation fonctionnelle, le bond graph s'avère être un outil adéquat pour représenter services élémentaires, versions d'un même service et missions d'un système. La disponibilité des services et des missions peut ainsi être évaluée, en temps réel, directement à partir des indicateurs de défaut générés par les RRA issues du bond graph.

Chaque fois que la valeur d'une grandeur mesurée est différente de la valeur prédite par le modèle, un dysfonctionnement est détecté. L'analyse des RRA sensibles à ce défaut permet de localiser, avec plus ou moins de précision, la défaillance. Cette localisation peut être améliorée, en prenant en compte le signe de la déviation (la grandeur mesurée est plus petite ou plus grande que la grandeur prédite). Connaissant la nature de la déviation et le comportement des composants associés aux éléments bond graph, il est possible de propager ce signe le long des liens, par un raisonnement abductif, en suivant les chemins causaux, de la grandeur mesurée vers les différents composants. On obtient alors, un Bond Graph Signé permettant de rechercher l'ensemble des causes possibles pour une même défaillance.

Modèles fonctionnels et comportementaux lorsqu'ils sont exploités pour détecter, prédire, mesurer et maîtriser les conséquences d'une défaillance concourent à l'augmentation de la sûreté de fonctionnement du système notamment par l'implantation de stratégies d'accommodation ou de reconfiguration. L'accommodation suppose que la nature et l'amplitude du défaut soient connues de manière à adapter la loi de commande en cours ou à en construire une nouvelle. Ceci suppose que le service rendu par le composant défaillant est toujours disponible mais qu'il est rendu sous forme dégradée. Seule la relation entre données consommées et données produites par le service est modifiée. Si l'accommodation n'est pas possible, soit parce que le service est indisponible, soit parce que la loi de commande n'arrive pas à compenser la dégradation, une solution de reconfiguration doit être recherchée. Les modèles fonctionnels, en explicitant toutes les possibilités de réalisation d'une même mission à partir des services offerts par un ensemble de composants permettent la recherche des différentes possibilités de reconfiguration.

Chaque possibilité de reconfiguration correspond à un sous-ensemble distinct de composants mis en service pour réaliser les missions courantes. Le fait qu'un composant puisse être mis en service ou hors service selon les défaillances constatées et les missions à réaliser par le système confère au système une dynamique dite hybride car présentant conjointement des composantes continues et discrètes. Mathématiquement, ceci implique que le comportement dynamique du système, habituellement décrit par un ensemble d'équations d'états, évolue, non seulement, de manière continue en fonction du temps, mais également de manière discontinue selon le mode de fonctionnement.

Différents modes de fonctionnement peuvent être définis pour un système donné. Chacun d'entre eux correspond à un ensemble de composants dont les services rendus permettent la réalisation des missions courantes. Les transitions entre modes sont définies en fonction d'événements externes ou internes tels que les défaillances constatées, la valeur des variables

représentatives de l'état du système et utilisées par les algorithmes de contrôle-commande, les requêtes utilisateurs, la nature des résultats attendus.

Cette dynamique discrète est prise en compte en introduisant un élément bond graph particulier, dénommé jonction contrôlée. Une jonction contrôlée se comporte comme un commutateur. Elle comporte deux modes de fonctionnement. A l'état ON, elle connecte au reste du système, le composant auquel elle est associée, à l'état OFF, elle le déconnecte. Les signaux booléens qui pilotent ces jonctions sont fournis par l'automate qui gère, au niveau système, les conditions de passage d'un mode vers un autre. On obtient un Bond de Graph piloté par événements où les deux dynamiques, discrète et continue, sont représentées.

La suite de ce mémoire est structurée en trois chapitres suivis d'une conclusion. Chaque chapitre a pour objectif de mettre en avant les contributions scientifiques théoriques obtenues et de les illustrer par des applications réalisées, le plus souvent, dans le cadre de projets industriels ou de recherche nationaux et internationaux. Pour familiariser un grand nombre de lecteurs avec les recherches développées, j'ai choisi, de présenter les résultats théoriques de manière, je l'espère, relativement synthétique et pédagogique. Les références aux thèses encadrées et aux publications associées permettent aux lecteurs intéressés de trouver les détails. Les applications citées ne sont pas exhaustives. Il s'agit des plus significatives.

Le chapitre 1 définit le concept d'instrument intelligent et le modèle générique de composant. Les notions de services, de missions et de modes de fonctionnement y sont définies. Le chapitre 2 montre comment le modèle Bond Graph peut être utilisé pour détecter et localiser des défaillances et ainsi évaluer la disponibilité des services et des missions si on lui associe une interprétation fonctionnelle. Il est également montré, dans le chapitre 2, comment le Bond Graph Signé améliore le diagnostic. Le chapitre 3 introduit les éléments bond graph nécessaires à la représentation des systèmes dits « hybrides » et propose l'Event Driven Hybrid Bond Graph comme outil pour assurer un pilotage sûr de fonctionnement d'un système dynamique hybride. La conclusion reprend les principales contributions de ces travaux de recherche et présente les nouvelles perspectives.

La complémentarité des trois chapitres est illustrée par la Figure 0.

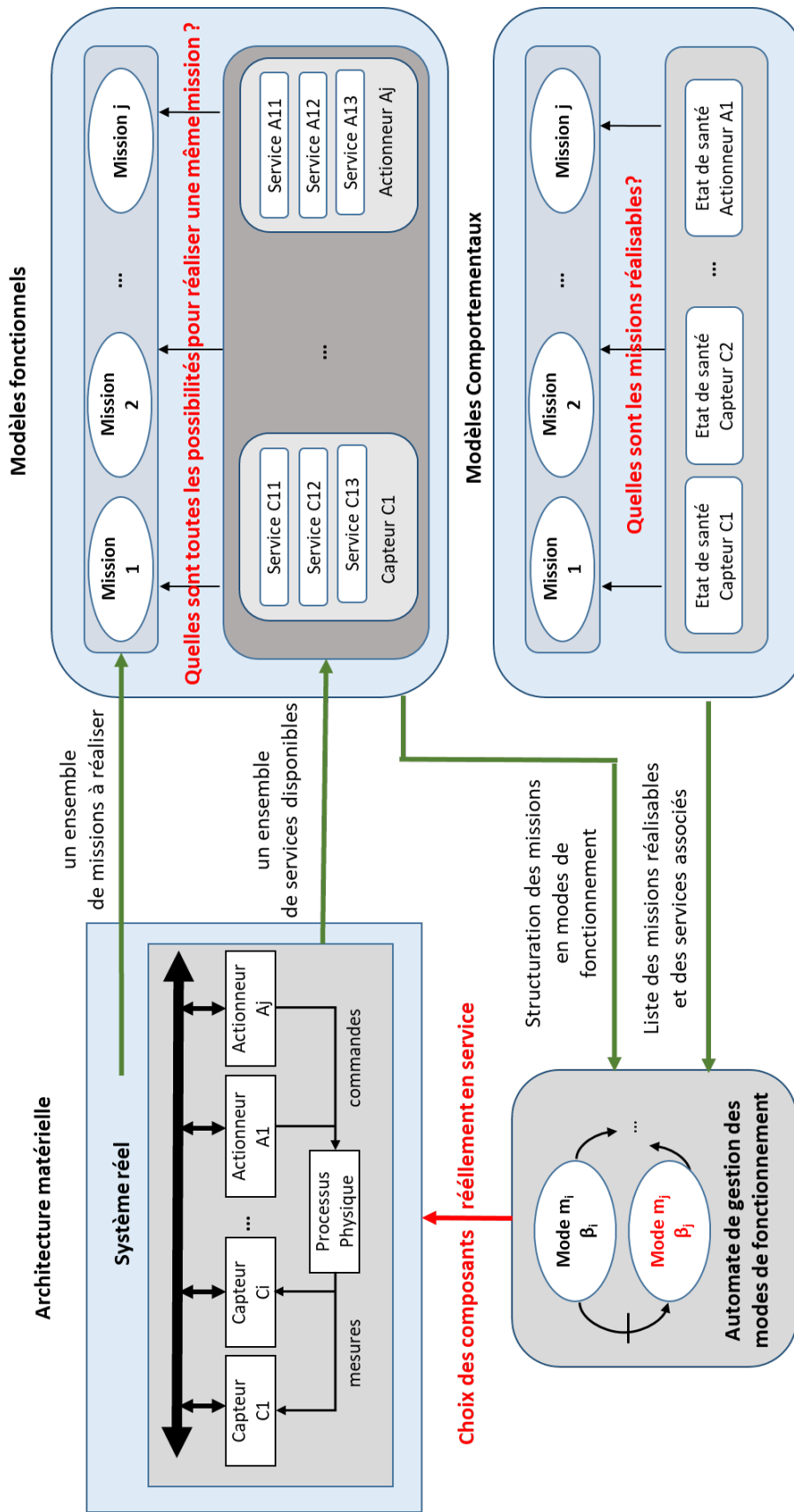


Figure 0 : Complémentarités des modèles fonctionnels et comportementaux.

De l'instrument intelligent au Modèle Générique de Composant

1. L'instrument Intelligent

1.1. Présentation

Ma thèse de Doctorat, soutenue en 1994, intitulée « Analyse fonctionnelle et modèle générique des capteurs intelligents : application à la surveillance de l'anesthésie » est une contribution à la notion d'instrument intelligent [**Gehin, 94**]².

La notion d'instrument intelligent est née dans les années 80-90 avec l'essor de la micro-électronique et le développement des microprocesseurs. Il s'agit de profiter des possibilités de traitement numérique, de mémorisation et de communication avec l'environnement qu'offre un microcontrôleur pour décentraliser une partie des fonctions réalisées au niveau d'un système de contrôle/commande ou d'une unité de supervision directement au niveau d'un capteur ou d'un actionneur. Le système automatisé évolue ainsi d'une architecture à intelligence centralisée vers une architecture à intelligence distribuée ou répartie, chaque capteur, respectivement actionneur, étant capable d'accomplir sa fonction initiale, transmettre une image de l'environnement, respectivement agir sur l'environnement, tout en exécutant des fonctions supplémentaires telles que la validation de données, l'élaboration de

² Une référence est en gras si je suis co-auteur du document.

grandeurs virtuelles, la gestion de différents modes de fonctionnement [Robert et al., 93], [Staroswiecki et Bayart, 94].

D'un point de vue matériel, un instrument intelligent se caractérise par l'intégration de trois sous-ensembles [Bayart et co, 2005] :

- Un transducteur-conditionneur pour le capteur ou un organe d'actionnement pour l'actionneur,
- Une unité de traitement numérique associée à de la mémoire et des interfaces d'entrées/sorties,
- Une interface de communication numérique et bidirectionnelle permettant au capteur ou à l'actionneur de dialoguer avec les opérateurs et le reste du système éventuellement composé d'autres instruments, d'unités de contrôle de commande et de supervision.

D'un point de vue fonctionnel, un instrument intelligent se caractérise par sa capacité à participer pleinement aux fonctions de contrôle/commande : validation des mesures, détection de dysfonctionnements, auto-diagnostic, auto-adaptation à l'environnement, reconfiguration.

La délocalisation d'une partie des traitements de contrôle/commande et de supervision vers les composants de terrain que sont les capteurs et actionneurs a donné naissance aux Systèmes d'Automatisation à Intelligence Distribuée [Thiriet, 04]. Ces systèmes font apparaître deux grands flux d'information (voir Figure 1.1) :

- Les informations échangées entre instruments de terrain définissent un flux horizontal, caractérisé par des données de faible volume mais aux contraintes temporelles strictes. Ce flux est constitué des données produites par les capteurs qui fournissent une image de l'état du processus et des commandes destinées aux actionneurs qui permettent de piloter le processus en fonction des grandeurs mesurées et de l'évolution souhaitée. Les communications supportées par les réseaux ou bus de terrain, tels CAN, Profibus, AS-i ou les réseaux sans fils sont bien adaptées à ce type de trafic, donnant naissance aux systèmes commandés en réseau (Networked Control Systems (NCS) [Bemporad et al, 10]) ou aux réseaux de capteurs (Wireless Sensor Networks (WSN) [Akyildiz et al, 02]).
- Les informations échangées entre système de contrôle/commande et les couches supérieures du système d'automatisation (unité de coordination, unité de supervision, unité de maintenance ...) définissent un flux vertical, caractérisé par des messages de volume plus important, pas forcément émis de manière périodique ou alors avec une période plus grande. Les informations échangées correspondent à des données synthétiques (historiques, données de calibrage ou de configuration, données de

maintenance ...). Elles sont essentiellement destinées à la coordination des contrôleurs locaux et à la supervision du processus.

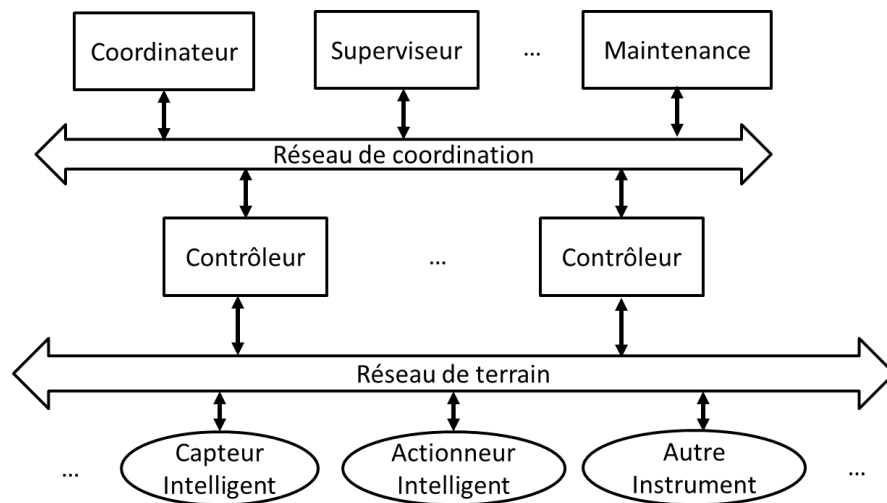


Figure 1.1 : Architecture d'un SAID.

Avec l'essor des SAID, où les instruments intelligents doivent coopérer pour réaliser localement un ensemble de boucles de contrôle/commande tout en validant leur bon fonctionnement, est apparue la nécessité de définir des règles de conception visant à garantir l'interopérabilité et l'interchangeabilité de ces instruments.

1.2. Contribution à l'interopérabilité et l'interchangeabilité des instruments intelligents

L'interopérabilité est la propriété qui garantit qu'une coopération entre deux instruments de constructeurs différents est possible. Ceci se traduit par la possibilité d'échanger des informations et d'utiliser les informations échangées. C'est pourquoi, outre les règles générales d'acheminement des informations numériques fixées par le standard de communication Open System Interconnection (OSI) défini par l'International Standard Organisation (ISO) [ISO 94], une codification commune des données produites et consommées par un instrument intelligent, et des demandes d'accès aux différentes fonctions doit être mis en place.

A la notion d'interopérabilité est souvent associée, la notion d'interchangeabilité qui est la garantie de pouvoir remplacer un équipement par un autre, offrant les mêmes fonctions mais en provenance d'un constructeur différent. Cet échange d'équipement ne doit en aucun cas modifier les propriétés du système qui l'accueille.

La définition d'un langage commun de manipulation des données et d'accès aux fonctions est un premier pas vers l'interopérabilité et l'interchangeabilité des instruments. Cependant, il ne

suffit pas que deux appareils manipulent les mêmes données et proposent les mêmes fonctions pour qu'ils coopèrent de façon cohérente. En effet, d'une part, une même fonction peut être implémentée différemment d'un instrument à l'autre, d'autre part, l'organisation interne des fonctions peut elle-même différer, comme par exemple, dans deux systèmes d'exploitation différents.

Le modèle générique de capteur intelligent que j'ai développé va dans ce sens. Il regroupe :

- Un modèle externe qui décrit l'ensemble des services rendus par le capteur et leur organisation.
- Une analyse fonctionnelle qui offre une vue interne du fonctionnement du capteur intelligent en décrivant sur quels traitements repose la réalisation d'un service.

Le modèle externe :

D'un point de vue externe un capteur intelligent rend des services à l'utilisateur dans pratiquement toutes les phases de son cycle de vie. On peut citer comme exemples, un service d'autocalibration ou d'autocompensation qui facilite l'étalonnage de la chaîne de mesure en prenant en compte les grandeurs d'influence, les dérives temporelles, les non-linéarités, un service d'élaboration d'une image du processus à partir de la fusion de plusieurs grandeurs mesurées, un service d'analyse de grandeurs statistiques qui permet de détecter une dérive de fonctionnement et de planifier une action de maintenance préventive

Un service est demandé par une requête présentée par un utilisateur. Une requête est définie par :

- Son nom qui permet de l'identifier.
- Ses paramètres d'exécution qui permettent d'avoir des services modulables. L'ensemble des requêtes paramétrées auxquelles l'instrument est capable de répondre définit son langage de commande.
- Son origine, c'est-à-dire l'identification de l'entité qui la produit (automate, contrôleur, opérateur ...).
- Son mode de transmission, c'est-à-dire le moyen de dialogue par lequel elle parvient à l'instrument intelligent.

L'ensemble des origines et des modes de transmission autorisés pour les requêtes du langage de commande définissent un protocole de commande.

Même s'il est possible d'émettre n'importe quelle requête à n'importe quel moment, le service associé ne doit pas forcément être rendu dans l'immédiat, ceci pour des raisons évidentes de cohérence et de sécurité de fonctionnement. En effet, il est par exemple, inenvisageable qu'un utilisateur puisse venir modifier un paramètre de configuration pendant que le capteur est utilisé dans un contexte où il produit régulièrement des mesures pour un régulateur. C'est pourquoi, l'ensemble des services que le capteur peut rendre est structuré

en modes de fonctionnement [Gehin et Bayart, 95], [Staroswiecki et al., 95]. Chaque mode de fonctionnement regroupe un sous-ensemble cohérent de services. Les conditions de passage d'un mode de fonctionnement à un autre sont définies par un graphe d'états. Les modes "configuration", "mesure", "test", "maintenance" sont des exemples.

La prise en compte d'une requête et la réalisation du service associé se traduisent par la production d'un résultat. Ce résultat correspond à la modification d'une ou plusieurs données interne au capteur et/ou la production d'un signal ou message sur une interface de sortie. Il résulte de l'exécution d'un traitement (procédure) consommant en entrée des données internes au capteur et/ou issues d'une interface d'entrée. La réalisation effective du traitement associé au service repose sur des ressources matérielles (transducteur, convertisseur, unité arithmétique et logique ...). Pour éviter qu'un service ne puisse être réalisé dès lors qu'une ressource matérielle est défaillante ou qu'une donnée consommée n'est pas présente ou présente avec une qualité insuffisante (car trop bruitée, par exemple), plusieurs versions peuvent être implémentées pour réaliser un même service. Chaque version est caractérisée par un ensemble distinct de ressources matérielles et de données d'entrée. Les versions sont ordonnées par le concepteur selon des critères de fiabilité, de précision, de sécurité En l'absence de dysfonctionnement, l'instrument exécute la version nominale du service, c'est-à-dire la version de plus haut niveau dans l'ordre de préférence. Dans le cas contraire, l'éligibilité de chaque version dégradée est testée selon l'ordre de préférence. Si aucune version ne peut être réalisée, le service devient indisponible.

En ajoutant une codification de l'organisation des services et de leurs conditions d'exécution (appartenir au mode de fonctionnement courant, pouvoir être rendu par une version nominale ou dégradée) à un langage et un protocole de commande normalisés, nous disposons de tous les éléments pour que des équipements de constructeurs différents coopèrent.

Le modèle interne :

Le modèle interne complète le modèle externe de l'instrument. Il décrit les procédures inhérentes aux différents services et leur organisation. Il permet de s'assurer qu'un même service proposé par des équipements de constructeurs différents est, par exemple, rendu avec le même niveau de fiabilité et de robustesse (fonction du nombre de versions implémentées). L'architecture fonctionnelle interne à un capteur intelligent est représentée Figure 1.2.

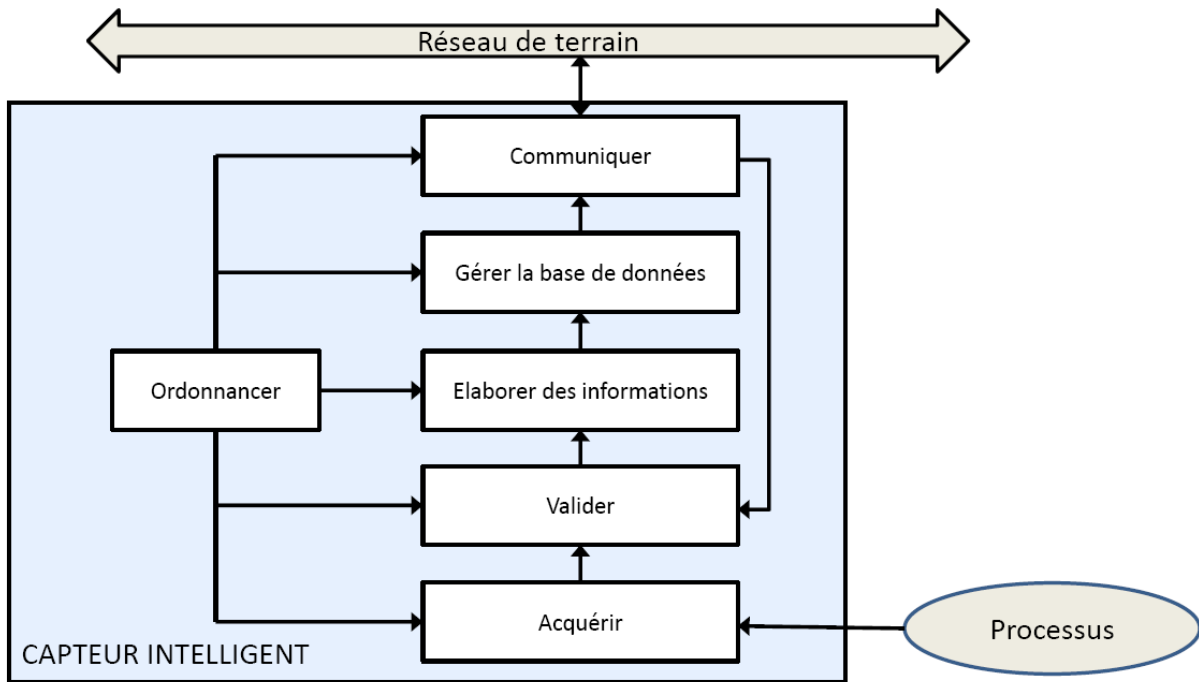


Figure 1.2 : Architecture fonctionnelle du capteur intelligent.

Le capteur est en interaction avec le processus physique et des utilisateurs (opérateurs humains, automates ou autres). En effet, la fonction principale d'un capteur, qu'il soit intelligent ou non, est d'élaborer l'image d'une grandeur physique caractéristique d'un processus grâce au transducteur et au conditionneur regroupés sous la fonction Acquérir et de communiquer cette image à un utilisateur via le transmetteur intégré à la fonction Communiquer. Ces fonctions élémentaires, élaborer l'image d'une grandeur physique, communiquer en sortie continuent d'exister au niveau d'un capteur intelligent. Elles sont cependant, implémentées différemment et accompagnées d'autres traitements qui constituent l'intelligence du capteur, donnant naissance aux fonctions suivantes :

- Acquérir : c'est par l'intermédiaire de cette fonction que le capteur génère des images des grandeurs physiques représentatives de son environnement. La qualité de ces images est améliorée par l'implémentation de fonctionnalités numériques de traitement de signal réalisant la compensation de dérives, de non-linéarités, ou encore, permettant l'élimination de bruits ou la prise en compte de grandeurs d'influence.
- Valider : cette fonction applique des techniques classiques de détection et de localisation de défauts (suivi de grandeurs statistiques, comparaison à des seuils, redondance analytique ou technologique ...) pour valider les données produites par la fonction Acquérir en utilisant éventuellement des données qui seraient produites par d'autres instruments et reçues en entrée, via la fonction Communiquer. Une donnée détectée erronée peut, dans certains cas, être remplacée par son estimation la plus

probable. L'instrument intelligent, apparaît alors comme un producteur de données sûres.

- Elaborer des informations : cette fonction génère, à partir des données validées, des informations supplémentaires telles que l'état opérationnel du capteur (défaillant, ou non défaillant), le niveau de crédibilité des données produites fonction des données qu'il a pu valider ou non, des grandeurs virtuelles comme par exemple, la valeur de l'accélération à partir de la mesure de la vitesse, des historiques ou des tendances.
- Gérer la base de données : cette fonction mémorise au niveau local tout une partie des données produites par le capteur de façon à ne les restituer que sur demande, ce qui offre l'avantage de ne pas saturer les supports de communication. Les paramètres fournis par les utilisateurs, qui représentent par exemple, des données de configuration sont également mémorisés localement.
- Communiquer : cette fonction régit les échanges entre le capteur et ses utilisateurs. Les utilisateurs peuvent être des opérateurs humains ou d'autres composants tels qu'un régulateur, un automate ou même un autre capteur intelligent qui utiliserait les données qu'il reçoit en entrée pour en générer d'autres ou valider celles qu'il mesure. La communication est bidirectionnelle. En entrée, le capteur reçoit des demandes de services de la part de ses utilisateurs. En sortie, le capteur génère les réponses aux demandes de services reçues. Une demande de service peut se traduire par une écriture (mise à jour d'un ou plusieurs paramètres de la base de données) ou par une lecture (accès à un ou plusieurs éléments de la base de données).
- Ordonnancer : cette fonction élabore les signaux d'activation des traitements permettant la réalisation des différentes fonctions.

1.3. Applications

Applications dans le domaine médical

Mes premiers travaux sur l'instrumentation intelligente ont été appliqués à des applications médicales, en collaboration avec le Centre Régional Hospitalier de Lille. J'ai, dans le cadre de ma thèse, contribué à la surveillance de l'anesthésie en développant des instruments qui sont capables de valider les données qu'ils produisent, d'élaborer des données synthétiques et de différencier, lorsque par exemple, la valeur d'une grandeur mesurée change brutalement, un dysfonctionnement matériel d'une modification de l'état physiologique du patient [Gehin, 94], [Gehin et al, 93].

J'ai également contribué à la réalisation d'un instrument de surveillance de la fonction ventilatoire du nouveau-né [Logier et al. 93a] et au développement d'un instrument de surveillance de l'ischémie myocardique [Logier et al., 94].

Le phénomène d'ischémie myocardique se produit lorsqu'une partie des cellules du cœur n'est plus suffisamment alimentée en oxygène parce que l'artère coronaire qui irrigue ces cellules est partiellement obstruée. Si le phénomène perdure et s'aggrave, les cellules meurent, produisant l'infarctus du myocarde. L'angioplastie coronaire est l'intervention qui consiste à traiter une artère coronaire rétrécie, en la dilatant au moyen d'une sonde munie d'un ballon gonflable à son extrémité. L'optimisation de ce geste chirurgical, qui entraîne un phénomène d'ischémie, nécessite que l'on puisse évaluer en temps réel son importance. En effet, le ballon doit rester gonflé suffisamment longtemps pour que l'intervention soit efficace, mais pas trop longtemps pour éviter la mort des cellules.

Le phénomène d'ischémie se traduit sur l'électrocardiogramme par un sous ou sus-décalage de la partie ST, voir Figure 1.3.

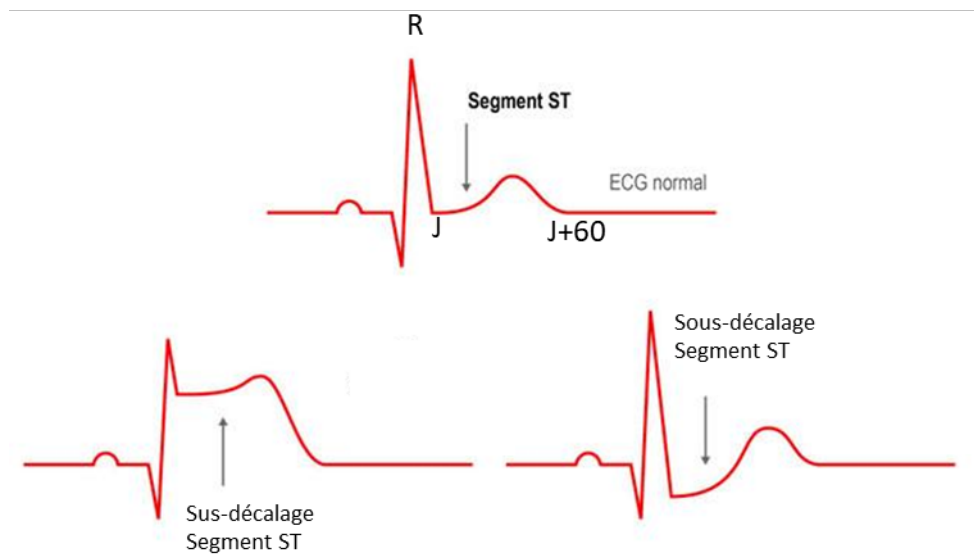


Figure 1.3 : Visualisation et suivi du phénomène d'ischémie.

En suivant l'architecture fonctionnelle présentée Figure 1.2, le capteur réalisé peut être décrit comme suit.

- La fonction Acquérir est réalisée par les électrodes collées sur la poitrine du patient. Le signal analogique produit par ces dernières est échantillonné à une fréquence de 256 Hz. Un filtrage numérique est appliqué pour supprimer l'onde respiratoire et ramener le signal à une ligne isoélectrique de base. De manière à élaborer les grandeurs principales que sont la pente et le décalage du segment ST, le point R est repéré, par détection d'un changement de pente dès que le signal franchit un seuil. Les points J et J+60ms sont ensuite positionnés par simple comptage du nombre d'échantillons. Les valeurs de la pente et du décalage peuvent alors être calculées à partir de ces deux points.
- La fonction Valider s'assure de la qualité du signal (électrodes bien collées) et de la bonne position du point R en comparant chaque nouvel intervalle R-R aux précédents.

- La fonction Elaborer des informations, associée à la fonction Communiquer, se charge de l'affichage du signal brut (directement issu des électrodes) et du signal filtré. Pour chaque motif, elle affiche les valeurs de pente et de décalage. Les tendances des valeurs de pente et de décalage sont également affichées avec l'utilisation d'un code couleur fonction du risque encouru. La fréquence cardiaque est calculée en comptant le nombre de points R par minute.
- Au niveau de la base de données locale sont mémorisées des informations telles que les constantes du filtre numérique, la distance R-J qui peut varier d'un patient à l'autre, l'identification du patient, des intervenants, des portions de signaux affichés qui aideront le cardiologue à faire son compte-rendu d'intervention
- La fonction Communiquer gère les interfaces qui permettent d'afficher les informations élaborées et de paramétrer l'intervention.
- La fonction Ordonnancer fait de ce capteur intelligent un véritable système temps réel en s'assurant qu'un ensemble de tâches périodiques cohabitant avec des tâches a périodiques produira les résultats de sortie aux moments où ils sont attendus.

Application à la supervision des machines-outils

Le modèle générique de capteur intelligent que j'ai développé, a également été appliqué à la conception de systèmes de supervision intelligents pour la commande, le diagnostic et le monitoring des machines-outils dans le cadre du projet européen IDMAP Brite-EuRam III (Intelligent Devices for on-line and real-time monitoring, diagnosis and control of Machining Processes) réalisé entre 1998-2002. J'ai été responsable au niveau du laboratoire des actions des groupes WG2 « Intelligent devices and methods of signal processing » et WG6 « Standardisation of methods, functions and components for monitoring and diagnosis systems ».

Le modèle d'instrument intelligent développé a permis de définir un cadre standard pour la description des services offerts par un système de supervision de machines-outils [Gehin et Staroswiecki, 04]. Le modèle externe est utilisé pour dresser la liste des services rendus par le système. Il précise l'organisation de ces services en modes de fonctionnement. Associé à un langage standardisé, il permet qu'une requête émise par un composant à destination d'un autre composant soit comprise puis exécuter si elle est cohérente avec le mode de fonctionnement du destinataire. L'analyse fonctionnelle complète cette description externe. Elle permet de vérifier que les services sont rendus avec le même niveau de qualité car implémentés de manière similaire, d'un moniteur à l'autre, quel que soit son constructeur.

En fixant des règles de conception, la modélisation proposée a permis de répondre aux attentes du projet : définir des systèmes de supervision pour des machines-outils qui soient interchangeables et capables de dialoguer avec des capteurs et des actionneurs de constructeurs différents. Les efforts en termes de standardisation des protocoles et des

interfaces de communication ont d'abord porté sur les instruments intelligents et les réseaux de terrain. Le projet IDMAP a permis de rattraper le retard au niveau des systèmes de supervision et à augmenter les performances des centres d'usinage en les rendant plus sûrs.

2. Le Modèle Générique de Composant

Il est apparu par la suite que le modèle externe proposé pour décrire les services rendus par un instrument intelligent, et leur organisation en modes de fonctionnement, pouvait s'appliquer à n'importe quel composant ou système de composants, quels que soient ses niveaux d'intelligence et de complexité, donnant naissance au Modèle Générique de Composant (MGC).

En effet, d'un point de vue externe, un composant ou un système rend des services à des utilisateurs. Par exemple, un capteur rend un service de mesure, un réservoir rend un service de stockage et une centrale thermique qui regroupe, capteurs, actionneurs, chaudière et autres composants rend un service de production de vapeur.

- Un service est décrit par les variables qu'il consomme (*cons*), les variables qu'il produit (*prod*), la procédure (*proc*) qui transforme les variables consommées en variables produites. Cette procédure peut correspondre à un traitement numérique comme nous l'avons vu dans le cas de l'instrument intelligent, ou à une loi physique correspondant au modèle comportemental du composant. Cette procédure est par exemple, dans le cas d'un réservoir, donnée par la relation (1.1)

$$\dot{V} = \frac{Q_{in}(t) - Q_{out}(t)}{A} \quad (1.1)$$

où :

- $Q_{in}(t)$ et $Q_{out}(t)$ sont les variables consommées, correspondant respectivement aux débits d'entrée et de sortie du réservoir,
- \dot{V} est la variable produite, correspondant à la variation de volume dans le réservoir
- A est la section du réservoir.

Pour le service de régulation rendu par un contrôleur, la procédure correspond à un algorithme de commande qui consomme en entrée les images des grandeurs mesurées fournies par des capteurs et produit en sortie des signaux pour des actionneurs.

La réalisation du service s'appuie sur un ensemble de ressources matérielles (*res*), par exemple, un réservoir non percé pour le service de stockage et une unité arithmétique et logique, de la mémoire, des interfaces d'entrées/sorties pour le service de régulation.

Le service est rendu de manière permanente, sans qu'on ait besoin de le demander, cas du service de stockage, ou sur réception d'une requête (*rqst*) périodique ou apériodique, cas du service de régulation.

Les composants tolérants aux fautes intègrent plusieurs versions de traitement pour réaliser un même service. Deux types de fautes peuvent affecter la réalisation d'un service. Les fautes internes touchent directement les ressources matérielles (*res*). Les valeurs produites par le service ne sont alors pas celles définies par la procédure. C'est le cas, par exemple, pour le service de stockage, si le réservoir fuit et que le débit de fuite n'est pas pris en compte. Les fautes externes impactent la qualité des variables consommées. Le service de régulation sera sujet à une faute externe si la valeur de la grandeur mesurée qui lui est fournie par un capteur est trop bruitée, ou fournie trop tardivement suite à une dégradation du système de communication.

Selon la phase de vie dans laquelle il est utilisé, un système a un ou plusieurs objectifs bien définis, à réaliser. Par exemple, l'objectif de régulation de niveau associé à un contrôleur n'a de sens que si le réservoir a été rempli préalablement et que la valeur de consigne a été fournie. Le service *réguler le niveau* ne doit donc pas pouvoir être exécuté si le réservoir est vide (*mode pas de production*), ou en train de se remplir à vitesse maximale (*mode préparation*), ou encore être en train de se vider (*mode fin de production*). Le *mode régulation* doit être précédé d'un *mode préparation* dans lequel le réservoir est rempli jusqu'à un niveau de consigne donné.

De manière similaire à une application logicielle qui est décomposée en menus cohérents, l'ensemble des services est structuré en modes de fonctionnement. Chaque mode de fonctionnement regroupe les services permettant la réalisation des objectifs qui lui sont associés. Les conditions de passage d'une mode à un autre sont clairement définies.

2.1. Définition du modèle générique de composant

Définition 1.1 : Modèle Générique de Composant [Gehin et Staroswiecki, 08].

Le MGC est défini par :

1. Un automate déterministe $A(M, T, m^0)$ où
 - $M = \{m_i, i \in I_m\}$ est l'ensemble des modes de fonctionnement, chaque mode correspondant à un état de l'automate.
 - $T = \{t_{ij}, i, j \in I_m\}$ est l'ensemble des transitions, chacune d'elle est définie par $t_{ij} = \{m_i, m_j, c_{ij}\}$ où m_i est le mode initial, m_j est le mode destination et c_{ij} est la condition d'activation.
 - m^0 est le mode initial dans le système se trouve au démarrage.

2. Un ensemble de services $S = \{s_l, l \in I_l\}$, chaque service étant un ensemble ordonné de versions $s_l = \{s_l^j, j \in J(s_l)\}$.

Chaque version est un 5-tuple $s_l^j = \langle cons_l^j, prod_l, proc_l^j, rqst_l, res_l^j \rangle$.

3. Les modes de fonctionnement et les services sont liés de deux façons :

- A chaque mode de fonctionnement m_i correspond un sous-ensemble cohérent de services $S_i, i \in I_m$ avec $\cup_{i \in I_m} S_i = S$.
- A chaque mode de fonctionnement correspond un ou plusieurs objectifs à réaliser.

2.2. Représentation fonctionnelle d'un système

A un système correspond une ou plusieurs missions (objectifs) à réaliser. Pour une voiture, les missions, sont par exemple, transporter une ou deux personnes d'un point A à un point B, garantir la sécurité du conducteur et des passagers, protéger des intempéries ... Les missions sont réalisées à partir des services rendus par les composants qui constituent le système. En effet, un système est formé d'un ensemble de composants interconnectés. Les services fournis par certains composants consomment des variables qui sont produites par les services d'autres composants. Par exemple, la valeur produite par le service mesure d'un capteur de niveau est consommée par le service régulation d'un contrôleur, qui à son tour produit des variables qui sont consommées par le service modulation de puissance de l'actionneur.

Dans le MGC, les interconnexions sont prises en compte en définissant des composants de niveau supérieur comme l'agrégation de composants de niveaux inférieurs. Les capteurs, les actionneurs, les réservoirs, les tuyaux, les tapis, etc. sont les composants de la couche la plus basse. Ils correspondent aux composants élémentaires et fournissent des services élémentaires. Le plus haut niveau d'agrégation correspond au système lui-même et à ses missions, voir Figure 1.4.

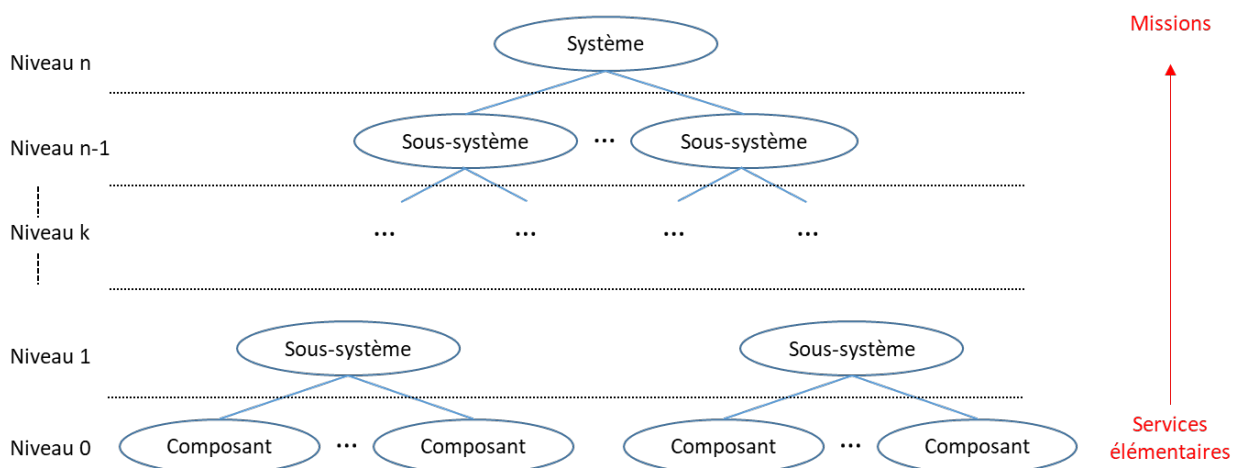


Figure 1.4 : Décomposition pyramidale d'un système.

Décomposition pyramidale d'un système

Parce qu'un composant peut participer à la réalisation de deux services de haut niveau simultanément, la décomposition pyramidale plutôt que hiérarchique est choisie pour représenter les liens entre composants, sous-systèmes et système. Une vanne V entre deux réservoirs A et B , peut par exemple, permettre de ne pas vider le réservoir A et de ne pas alimenter le réservoir B . Cette vanne appartient alors aux deux sous-systèmes composés comme suit : {réservoir A , vanne V , capteur A }, {réservoir B , vanne V , capteur B }.

Soient $l = 0$ le niveau le plus bas de la décomposition pyramidale (niveau correspondant aux composants élémentaires) et $l = n$ le niveau le plus haut (niveau correspondant au système). Les propriétés suivantes s'appliquent pour la décomposition pyramidale ($l \geq 1$) :

- Chaque composant de niveau $l - 1$ appartient au moins à un composant de niveau l .
- Chaque composant de niveau l inclut au moins au composant de niveau $l - 1$.

Le nombre de niveaux de la décomposition pyramidale est choisi de telle manière que la représentation convienne à celui qui la réalise sachant également qu'elle n'est pas forcément unique. Dans le cas des systèmes industriels, les regroupements apparaissent toutefois relativement souvent de manière évidente suite à l'interprétation fonctionnelle qui peut leur être associé (le générateur de vapeur, l'unité de catalyse, la bêche alimentaire ...).

Agrégation des MGC

Soit C_l l'ensemble des composants de niveau l ($l = 0, \dots, n$). Soient $a, b \in C_{l-1}$ ($l \geq 1$) et $c \in C_l$ un composant qui regroupe a et b . Soient $A(M(a), T(a), m^0(a))$ et $A(M(b), T(b), m^0(b))$ les automates déterministes associés aux composants a et b . L'automate $A(M(c), T(c), m^0(c))$ associé au composant c est inclus dans le produit cartésien des deux automates $A(M(a), T(a), m^0(a))$ et $A(M(b), T(b), m^0(b))$ et est tel que les relations (1.2), (1.3) et (1.4) soient vérifiées.

$$M(c) \subseteq M(a) \times M(b) \quad (1.2)$$

$$T(c) \subseteq T(a) \cup T(b) \quad (1.3)$$

$$m^0(c) = (m^0(a), m^0(b)) \quad (1.4)$$

En effet, soient $\gamma = (\alpha, \beta)$, $\gamma \in M(c)$, $\alpha \in M(a)$ et $\beta \in M(b)$. Autrement dit, le mode γ du composant c est défini comme le composant a étant dans le mode α et le composant b étant dans le mode β . Le produit cartésien des automates donne toutes les combinaisons possibles. Toutes n'ont cependant pas d'interprétation fonctionnelle. Par exemple, le mode (*capteur_off*, *actionneur_on*, *regulation_on*) n'a pas de sens et doit être éliminé. Le fait de générer automatiquement, l'ensemble des modes à partir du produit des automates permet de n'en oublier aucun. L'élimination des modes non pertinents évite l'explosion combinatoire.

Soient $S(a)$ et $S(b)$ les services fournis par deux composants a et b . Soit c le composant qui regroupe a et b . Soit $\gamma = (\alpha, \beta)$ un mode pertinent, alors toute combinaison de services $S_\alpha(a)$ (appartenant au mode α du composant a) et $S_\beta(b)$ (appartenant au mode β du composant b) peut être utilisée pour définir les services fournis par le composant c .

De manière plus générale, soient Γ un ensemble de composants de niveau $l - 1$ et c le composant de niveau l qui regroupe les composants $k \in \Gamma$. Soient les ensembles $cons(c)$ et $prod(c)$ définis par les relations (1.5) et (1.6).

$$cons(c) = \bigcup_{k \in \Gamma} \bigcup_{s \in S(k)} cons(s) \tag{1.5}$$

$$prod(c) = \bigcup_{k \in \Gamma} \bigcup_{s \in S(k)} prod(s) \tag{1.6}$$

(On notera que $cons(c) \cap prod(c)$ peut être différent de l'ensemble vide puisque certains composants appartenant à Γ consomment des variables produites par d'autres).

Soient $y_\sigma \subset prod(c)$ et $x_\sigma \subset cons(c)$. Il est possible de créer une relation, si besoin, entre x_σ et y_σ en définissant la procédure σ telle que $cons(\sigma) = x_\sigma$, $prod(\sigma) = y_\sigma$ et $proc(\sigma)$ est un programme qui utilise les services $S(k)$, $k \in \Gamma$. Il est possible qu'il existe plusieurs solutions pour écrire la relation entre x_σ et y_σ , notamment en utilisant les services $S(k)$ rendus par des sous-ensembles distincts de composants $k \in \Gamma$. Chacune de ces solutions constitue une version différente pour réaliser le même service.

Représentation fonctionnelle

Les relations entre les missions d'un mode et les services qui permettent leur réalisation, peuvent être représentées par un arbre ET/OU comme le montre la Figure 1.5.

A chaque mission d'un mode correspond un arbre. La racine de l'arbre est la mission elle-même. L'arbre connecte deux types de nœuds, les nœuds *services* et les nœuds *versions*. Les successeurs d'un nœud *version* (respectivement nœud *service*) sont des nœuds *services* (respectivement nœuds *versions*). Ceci permet d'exprimer qu'une version (de niveau supérieur) utilise un ensemble de services (de niveau inférieur) et qu'un service peut être réalisé selon plusieurs versions. Les feuilles de l'arbre correspondent aux services élémentaires.

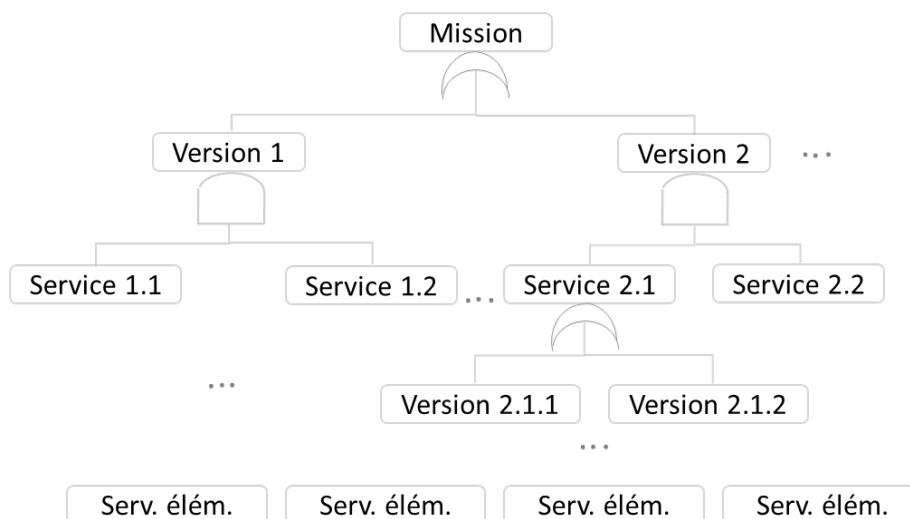


Figure 1.5: Arbre ET/OU

Il est possible que suite à une défaillance, un composant élémentaire ne puisse plus réaliser tout une partie de ses services ou qu'on ne puisse plus en stopper la réalisation. Prenons par exemple le cas d'une vanne tout ou rien. En fonctionnement normal, celle-ci rend deux services, par exemple, *bloquer un flux*, *laisser passer un flux*. L'un est obtenu lorsque la vanne est en position fermée, l'autre est délivré lorsqu'elle est en position ouverte. Si la vanne est bloquée en position fermée, le service *bloquer un flux* sera rendu en permanence alors que le service *laisser passer un flux* ne sera plus disponible.

L'apparition de défauts a pour conséquence de supprimer des arcs dans l'arbre ET/OU. Une version s^j d'un service s devient indisponible dès lors qu'une de ces ressources res^j est détectée défaillante. Un service devient indisponible lorsqu'il n'existe plus aucune version pour le réaliser. La pertinence de rester dans tel ou tel mode est fonction de la criticité des services qui lui sont associés. Le parcours ascendant de l'arbre ET/OU permet d'analyser les conséquences de la perte d'un service sur la réalisation des objectifs d'un mode. Nous verrons dans le chapitre 2, les méthodes de détection et de localisation de défauts qui permettent de d'évaluer en temps réel la disponibilité des services. Le chapitre 3 détaillera la gestion des différents modes de fonctionnement en fonction des ressources disponibles.

2.3. Applications

Analyse de la reconfigurabilité d'un système

L'analyse de la reconfigurabilité d'un système consiste à déterminer les possibilités de reconfiguration d'un système en présence de défaillances. Celles-ci se déduisent directement à partir du parcours de l'arbre ET/OU dès lors que la disponibilité des services élémentaires a été évaluée. On notera que même une localisation imprécise de la défaillance peut conduire à des résultats, il suffit de faire l'hypothèse que certains services sont indisponibles alors qu'ils ne le sont pas réellement. Les résultats en termes de stratégies de reconfigurations s'expriment selon trois grands axes :

- Poursuivre la réalisation des missions du système sans dégradation notable des performances.
- Poursuivre la réalisation des missions avec un niveau de dégradation toléré (défini par les spécifications initiales).
- Abandonner les missions en cours et placer le système dans un mode de fonctionnement où les conditions de sécurité sont garanties.

Ces travaux sur l'analyse de la reconfigurabilité d'un système automatisé ont été confrontés à d'autres approches dans le cadre du groupe de recherche européen Control of complex SYstems (COSY) soutenu par European Science Foundation (ESF). Les résultats ont été publiés, entre autres, dans un ouvrage de synthèse [Lunze et co, 2000].

Les résultats théoriques obtenus sur l'analyse de la reconfigurabilité ont été mis en pratique dans le cadre du projet européen : Advanced Decision Support System in Chemical/petrochemical Industries (CHEM). Ce projet du 5ème PCRD (Programme Cadre de Recherche et de Développement de l'Union Européenne) avait pour objectif de développer et d'implémenter des outils pour la supervision des processus industriels. Dans le cadre de ce projet, j'ai participé à la définition et à l'implémentation d'une boîte à outils dédiée à l'analyse de la reconfigurabilité des systèmes [Toguyeni et co, 2002], [Toguyeni et co, 2001]. Cette boîte a été testée, avec succès sur le générateur de vapeur du laboratoire.

Ce générateur est représenté Figure 1.6. Il reproduit, à échelle réduite, une centrale thermique. Le circuit primaire, voir Figure 1.7 est constitué d'une chaudière alimentée par deux pompes redondantes puisant de l'eau dans un réservoir. Le circuit secondaire regroupe trois vannes en parallèle qui simulent la consommation de vapeur et un circuit de refroidissement dont la longueur peut être plus ou moins grande selon la position d'une vanne trois voies. Les redondances matérielles, que ce soient en termes de capteurs et d'actionneurs de ce générateur de vapeur ont permis d'en faire un support intéressant pour implémenter les travaux sur la reconfigurabilité des systèmes.

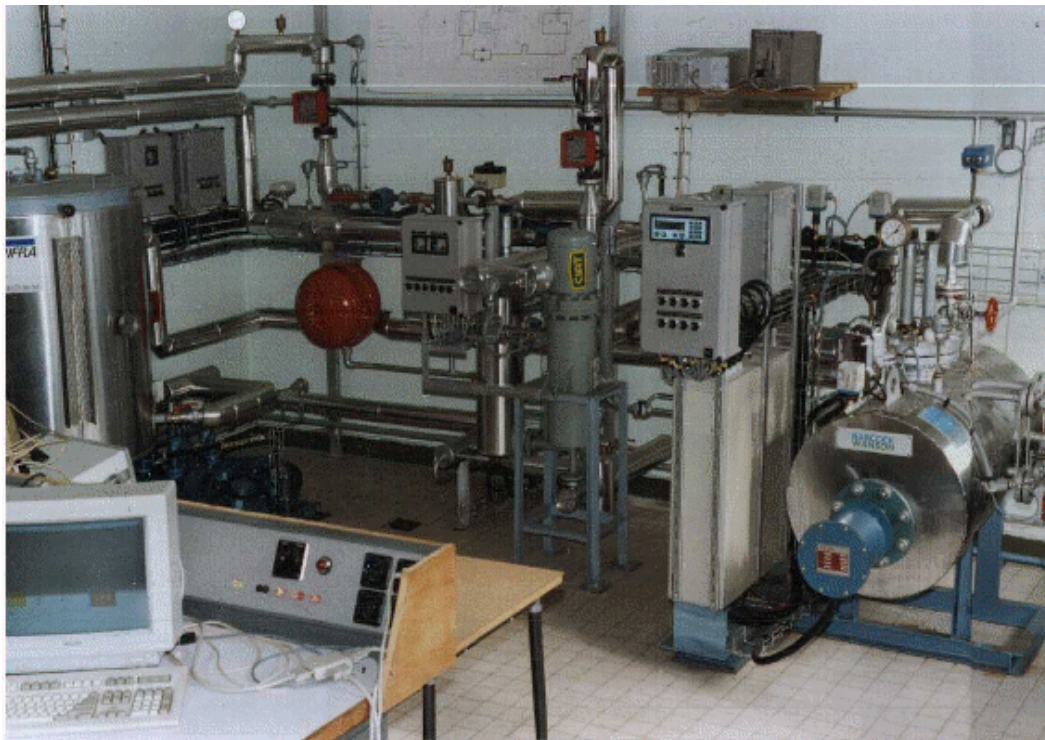


Figure 1.6: Générateur de vapeur : installation réelle

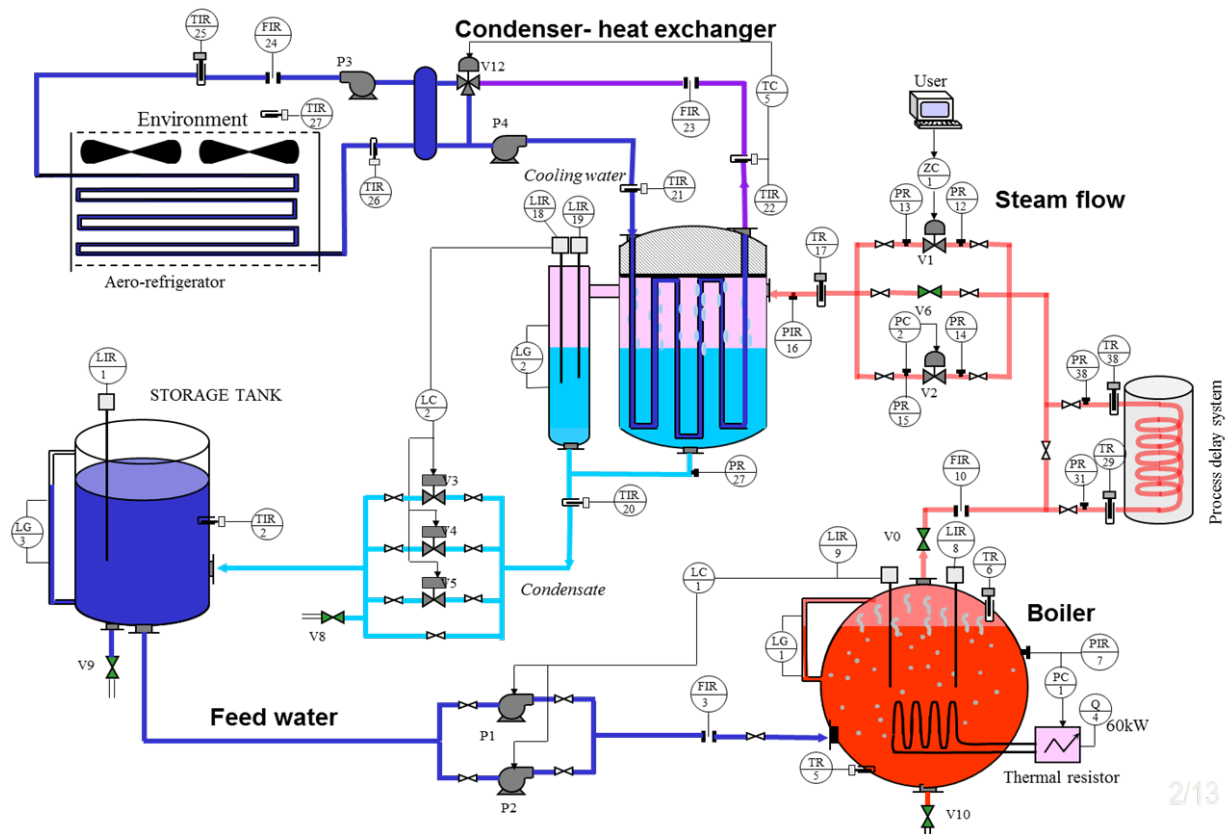


Figure 1.7: Générateur de vapeur : représentation fonctionnelle

Filtrage d'alarmes

Le filtrage d'alarme a pour objectif, dans le cadre de la supervision des procédés industriels, de générer des alarmes synthétiques et significatives. Ceci suppose d'éviter que la cause et les effets d'une même défaillance ne génèrent des alarmes multiples. Il est, en outre, nécessaire que la défaillance à l'origine de l'alarme soit clairement identifiée et indiquée à l'opérateur, et que les possibilités en termes de conduite opérationnelle du système soient évaluées et communiquées [Ould Bouamama 2001 et co].

Le modèle générique de composant développé et la représentation fonctionnelle associée ont été exploités dans ce sens dans le cadre de deux contrats industriels réalisés avec EDF [Craye et co, 1998]. L'objectif était de réduire le nombre d'alarmes liées à la supervision des centrales nucléaires et de ne communiquer qu'un sous ensemble d'informations réellement pertinent pour la conduite de la centrale. Nos travaux ont permis d'apporter une réponse satisfaisante à ces besoins. En effet, une fois la défaillance localisée par les algorithmes adéquats, il devient possible, en parcourant l'arbre ET/OU, de masquer toutes les alarmes liées à des conséquences de cette alarme primaire et d'indiquer clairement aux opérateurs concernés, les possibilités en terme de conduite. Ces dernières sont directement générées, à partir de l'évaluation de la disponibilité des services selon l'approche ascendante proposée.

Le Bond Graph

et son interprétation fonctionnelle

1. Motivation

On attend d'un système automatisé autonome la réalisation de divers objectifs en rapport avec la productivité, la qualité de service, la sûreté, la disponibilité du système, voir le respect de l'environnement. La réalisation de ces objectifs repose sur les services rendus par les composants internes au système. Suite à des défaillances matérielles, il est possible qu'un ou plusieurs services ne soient plus fournis et que par conséquent la réalisation de certains objectifs du système ne soit plus possible.

Pour définir l'état du système à chaque instant, il est donc nécessaire de compléter le modèle générique de composant proposé au chapitre précédent, par une description comportementale qui permettra d'évaluer à chaque instant la disponibilité de chaque service. Un service est dit disponible s'il peut être rendu dans sa version nominale ou selon une version dégradée. Le service est dit indisponible, s'il n'existe aucune version permettant de le réaliser. Le composant qui le produit est alors défaillant au sens de la définition AFNOR X60-500.

Définition 2.1 : Défaillance. AFNOR X60-500.

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble (de composants) à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.

Après défaillance, l'entité est dans un état de panne. La défaillance est la cause première, encore appelée, faute origine d'une panne. Une défaillance ne s'observe pas forcément

directement sur le système. Elle se manifeste par un ou plusieurs effets, appelés fautes, défauts ou symptômes.

Définition 2.2 : Défaut, faute ou symptôme.

On appelle faute, défaut ou symptôme, l'écart entre la valeur réelle et la valeur prédite par un modèle de bon fonctionnement, d'une variable ou d'un ensemble de variables caractéristiques de l'état du système.

L'évaluation de la disponibilité d'un service suppose deux types d'algorithmes :

- Les algorithmes de surveillance permettent, d'évaluer à chaque instant l'état réel du système et le cas échéant de détecter et éventuellement de localiser des défauts au niveau des variables caractéristiques de l'état du système.
- Les algorithmes de diagnostic permettent de remonter à l'origine de la faute, d'évaluer la disponibilité des ressources matérielles utilisées pour réaliser le service ou pour produire les données consommées par le service et ainsi de mettre à jour la liste des services rendus par chaque composant.

De manière à disposer d'un unique outil qui permette à la fois la description comportementale du service, la génération d'indicateurs de défauts nécessaire à la surveillance en ligne, et l'explicitation des relations de causes à effets requises pour le diagnostic, éventuellement réalisé hors ligne, l'outil bond graph signé a été développé dans le cadre de la thèse de Nizar Chatti que j'ai dirigée avec Belkacem Ould Bouamama [Chatti, 13].

2. Les Bond Graphs

L'outil Bond Graph a été introduit par Paynter [Paynter, 61] au MIT (Boston, USA) en 1959 avant de faire son apparition en France dans les années 1970. Le Bond Graph est un outil pluridisciplinaire permettant de représenter graphiquement les échanges énergétiques (stockages, transformations, dissipations ...) entre composants d'un système. Il est donc parfaitement adapté à la description de la procédure inhérente à un service qui transforme des données consommées en données produites. Il ajoute la composante comportementale à la composante fonctionnelle apportée par la notion de service. Les propriétés structurelles et causales du Bond Graph peuvent, par ailleurs, être exploitées pour générer automatiquement :

- Des relations de redondances analytiques à partir desquelles des indicateurs de défauts seront construits.
- Un graphe signé permettant d'associer à un ensemble d'effets observés un ensemble de causes probables.

2.1. Formalisme du BG

Un Bond Graph (BG) est un graphe $G(N, B)$ où :

- N est un ensemble de nœuds. Chaque nœud correspond, soit à un phénomène physique associé à un composant élémentaire ou à un sous-système, soit à un élément de connexion.
- B est un ensemble d'arcs orientés (bonds) utilisés pour représenter les échanges de puissance entre éléments de N . A chaque bond sont associées deux variables : une variable d'effort e , placée au-dessus du bond et une variable de flux f , placée sous le bond. Le choix des variables d'effort et de flux dépend du domaine physique concerné. L'effort (respectivement le flux) peut ainsi représenter une tension (respectivement un courant), une pression (respectivement un débit volumique), une force (respectivement une vitesse), une différence de température (respectivement un flux de chaleur), etc. Les variables de flux et d'effort sont liées par la relation (2.1) qui définit la puissance instantanée échangée entre le nœud origine et le nœud destination du bond.

$$P(t) = e(t) \times f(t) \quad (2.1)$$

La demi-flèche associée au bond indique que la puissance est comptée positivement pour le nœud connecté du côté de ce bond (nœud destination). Indépendamment de ce sens de direction, un trait vertical (dit marque de causalité) est ajouté au bond et placé près (respectivement loin) du nœud pour lequel la valeur de la variable effort (respectivement flux) est imposée. Cette marque de causalité permet de visualiser les relations de « cause à effet » et d'écrire les équations pour chaque composant. La Figure 2.1 donne les modèles BG équivalents à deux représentations sous forme de blocs diagrammes et les équations associées.

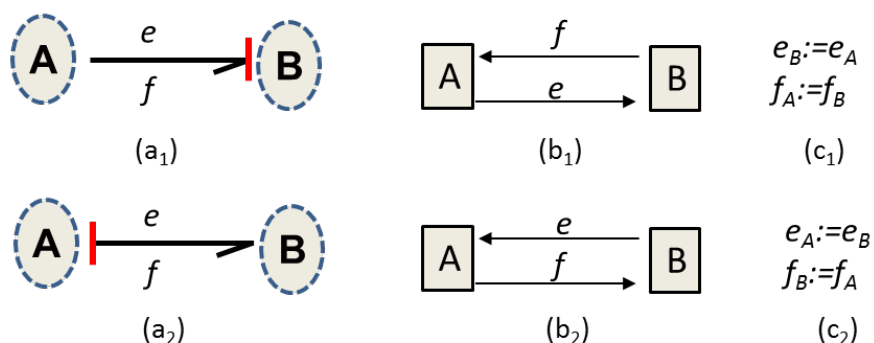


Figure 2.1 : Bond Graph (a₁), respectivement (a₂), représentation blocs diagrammes équivalentes (b₁), respectivement (b₂) et équations associées (c₁), respectivement (c₂).

En plus des variables de puissance (effort et flux), deux autres variables sont importantes pour la description dynamique des systèmes. Ces variables dites d'énergie notées $p(t)$ et $q(t)$ sont

appelées respectivement **moment généralisé** ou **impulsion** et **déplacement généralisé**. Elles sont définies à partir des intégrales des variables d'effort et de flux, par les relations (2.2) et (2.3).

$$p(t) \equiv \int_0^t e(t).dt = p(0) + \int_0^t e(t).dt \quad (2.2)$$

$$q(t) \equiv \int_0^t f(t).dt = q(0) + \int_0^t f(t).dt \quad (2.3)$$

2.2. Interprétation fonctionnelle du BG

D'un point de vue fonctionnel, l'ensemble des nœuds N du bond graph $G(N, B)$ peut être décomposé en deux sous-ensembles distincts S et J tels que les relations (2.4) et (2.5) soient vérifiées, où $S = \{s\}$ désigne l'ensemble des services rendus par les composants élémentaires du système et $J = \{j\}$ représente un ensemble de connecteurs (jonctions) utilisés pour associer les services élémentaires selon différentes configurations (parallèle, séquentielle ...) comme le seraient les instructions élémentaires d'un programme informatique.

$$N = S \cup J \quad (2.4)$$

$$S \cap J = \emptyset \quad (2.5)$$

Les composants élémentaires rendent des services élémentaires qui une fois associés permettent la réalisation des objectifs du système. Les bonds B traduisent les relations entre données produites et données consommées par les services. Un modèle BG explicite alors, la réalisation d'un service de haut niveau par l'agrégation de services de niveaux inférieurs. Il est en quelque sorte une représentation énergétique et comportementale de l'arbre fonctionnel ET/OU présenté Figure 1.5.

Les services rendus par les composants élémentaires peuvent être répartis selon quatre classes et correspondent, dans la modélisation BG à des éléments bien précis. On notera qu'un composant élémentaire peut rendre plusieurs services et être modélisé par plusieurs éléments BG.

- **Les services d'alimentation en énergie.** Les services d'alimentation en énergie sont fournis par des composants actifs qui fournissent de la puissance au système. Ils sont représentés, dans la théorie BG, par les sources d'effort Se et les sources de flux Sf si la puissance délivrée n'est pas contrôlée (source utilisée en boucle ouverte) ou par les sources modulées d'effort MSe et les sources modulées de flux MSf si la puissance délivrée est contrôlée par une variable externe (source utilisée en boucle fermée). Les pompes, les générateurs de tension, les sources de chaleur sont des exemples de composants qui fournissent un service d'alimentation en énergie.

- **Les services de dissipation ou de stockage de l'énergie.** Les services de dissipation ou de stockage de l'énergie sont fournis par des composants passifs. Ils sont représentés, dans la théorie BG, par les éléments **R, C, I**.

- Les éléments **R**. Les éléments *R* correspondent à un service de dissipation d'énergie. Le service consomme en entrée une puissance E^{pw1} fournie par une source ou transmise indirectement par un autre composant et produit en sortie une énergie E^{pw2} dissipée le plus souvent, sous forme thermique. Le modèle comportemental associé à l'élément *R* est la relation statique (2.6).

$$\Phi_R(e, f) = 0 \quad (2.6)$$

Les résistances électriques, les membranes chimiques, les restrictions hydrauliques, les composants qui exercent un frottement mécanique sont des exemples de composants fournissant un service équivalent à un élément *R*.

- Les éléments **C**. Les éléments *C* correspondent à un service de stockage d'énergie sous forme potentielle ou électrique. Le service consomme en entrée une puissance E^{pw} fournie par une source ou transmise indirectement par un autre composant et produit en sortie une énergie E^{pot} stockée sous forme potentielle. Le modèle comportemental associé à l'élément *C* est la relation dynamique (2.7) liant l'intégrale du flux (ou déplacement généralisé) à l'effort.

$$\Phi_C\left(e, \int^t f(t).dt\right) = \Phi_C(e, q) = 0 \quad (2.7)$$

Les réservoirs, les ressorts, les condensateurs sont des exemples de composants qui fournissent un service équivalent à un élément *C*.

- Les éléments **I**. Les éléments *I* correspondent à un service de stockage d'énergie sous forme cinétique pour les systèmes mécaniques ou magnétiques pour les systèmes électriques. Le service consomme en entrée une puissance E^{pw} fournie par une source ou transmise indirectement par un autre composant et produit en sortie une énergie E^{cin} stockée sous forme cinétique ou magnétique. Le modèle comportemental associé à l'élément *I* est la relation dynamique (2.8) liant l'intégrale de l'effort (ou impulsion) au flux.

$$\Phi_I\left(f, \int^t e(t).dt\right) = \Phi_I(f, p) = 0 \quad (2.8)$$

Les inductances, les objets en déplacements, les tuyaux acheminant un liquide sont des exemples de composants qui fournissent un service représenté par un élément *I*.

- **Les services de transformation.** Les services de transformation sont fournis par des composants capables de transformer une énergie d'un domaine vers un autre tout en respectant les lois de conservation de l'énergie exprimées par les relations (2.9) ou (2.10). Le service reçoit en entrée une puissance d'un domaine E^{pw1} et produit en sortie une

puissance d'un domaine E^{pw2} . Selon le type de transformation opérée, le service est modélisé, dans la théorie BG, par un transformateur TF ou un gyrateur GY dont les modèles comportementaux sont respectivement donnés par les relations (2.9) et (2.10) où $e_1, f_1 \in E^{pw1}$ et $e_2, f_2 \in E^{pw2}$.

$$\begin{cases} e_1 = m \times e_2 \\ f_2 = m \times f_1 \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} e_1 = r \times f_2 \\ e_2 = r \times f_1 \end{cases} \quad (2.10)$$

Un bras de levier, un piston, un moteur sont des exemples de composants rendant des services de transformation.

- **Les services de mesure.** Les services de mesures sont directement fournis par les capteurs. Selon la grandeur mesurée, ils sont représentés par un détecteur d'effort De ou un détecteur de flux Df . Aucune énergie n'est consommée ou fournie par le détecteur. Le détecteur n'est donc pas relié aux autres éléments par un bond, mais est connecté par un simple lien d'information. Le détecteur est sensible à une grandeur physique qu'il transforme en donnée connue.

Un BG associe des services élémentaires pour définir des services de niveau supérieur. Cette association est réalisée via les nœuds de type jonction. On distingue deux types de jonctions.

- **Les jonctions 0.** Les jonctions J_0 permettent de coupler des éléments soumis au même effort. Le modèle comportemental d'une jonction J_0 est donné par les relations (2.11) où b_i, b_j désigne un bond ayant comme nœud source ou destination J_0 et n désigne le nombre de ces bonds. a_i est égal à 1 ou à -1 selon la direction de l'arc.

$$\begin{aligned} \forall b_i, b_j, e_i = e_j \\ \sum_{i=1}^n a_i \cdot f_i = 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

- **Les jonctions 1.** Les jonctions J_1 permettent de coupler des éléments traversés par le même flux. Le modèle comportemental d'une jonction J_1 est donné par les relations (2.12) où b_i, b_j désigne un bond ayant comme nœud source ou destination J_1 et n désigne le nombre de ces bonds. a_i est égal à 1 ou à -1 selon la direction de l'arc.

$$\begin{aligned} \forall b_i, b_j, f_i = f_j \\ \sum_{i=1}^n a_i \cdot e_i = 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Le Tableau 2.1 donne une représentation générale de l'ensemble des éléments BG et définit les règles de causalités associées. Pour plus de détail, il est possible de consulter les références [Ould Bouamama et Dauphin-Tanguy, 06], [Thoma, 75], [Dauphin-Tanguy, 00].

| Elément | Symbole | Equation | Règle |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Se | $Se: e \longrightarrow$ | e connu. | L'effort imposé par la source est une donnée connue du système. => <i>Causalité obligatoire.</i> |
| Sf | $Sf: f \longleftarrow$ | f connu. | Le flux imposé par la source est une donnée connue du système. => <i>Causalité obligatoire.</i> |
| R | $\begin{array}{c} \longleftarrow e \\ f \longrightarrow R \end{array}$ | $e = \Phi_R(f)$ | Causalité résistance |
| | $\begin{array}{c} e \longrightarrow \\ f \longleftarrow R \end{array}$ | $f = \Phi_R^{-1}(e)$ | Causalité conductance |
| C | $\begin{array}{c} \longleftarrow e \\ f=dq/dt \longrightarrow C \end{array}$ | $e(t) = \Phi_C(\int^t f(t).dt)$ | Causalité préférentielle intégrale |
| | $\begin{array}{c} e \longrightarrow \\ f=dq/dt \longleftarrow C \end{array}$ | $f(t) = \frac{d}{dt}(\Phi_C^{-1}(e(t)))$ | Causalité dérivée |
| I | $\begin{array}{c} e=dq/dt \\ f \longrightarrow I \end{array}$ | $f(t) = \Phi_I(\int^t e(t).dt)$ | Causalité préférentielle intégrale |
| | $\begin{array}{c} e=dq/dt \\ f \longleftarrow I \end{array}$ | $e(t) = \frac{d}{dt}(\Phi_I^{-1}(f(t)))$ | Causalité dérivée |
| TF | $\begin{array}{c} \longleftarrow e_1 \quad TF \quad \longrightarrow e_2 \\ f_1 \quad :m \quad f_2 \end{array}$ $\begin{array}{c} e_1 \longrightarrow \quad TF \quad \longleftarrow e_2 \\ f_1 \quad :m \quad f_2 \end{array}$ | $\begin{cases} e_1 = m \cdot e_2 \\ f_2 = m \cdot f_1 \end{cases}$ $\begin{cases} e_2 = \frac{1}{m} \cdot e_1 \\ f_1 = \frac{1}{m} \cdot f_2 \end{cases}$ | Un effort et un flux sont imposés au TF. => <i>Un trait causal près de TF</i> |
| GY | $\begin{array}{c} \longleftarrow e_1 \quad GY \quad \longrightarrow e_2 \\ f_1 \quad :r \quad f_2 \end{array}$ $\begin{array}{c} e_1 \longrightarrow \quad GY \quad \longleftarrow e_2 \\ f_1 \quad :r \quad f_2 \end{array}$ | $\begin{cases} e_1 = r \cdot f_2 \\ e_2 = r \cdot f_1 \end{cases}$ $\begin{cases} f_2 = \frac{1}{r} \cdot e_1 \\ f_1 = \frac{1}{r} \cdot e_2 \end{cases}$ | Deux flux ou deux efforts sont imposés au GY. => <i>Aucun trait ou deux traits causaux près de GY.</i> |
| De | $\longrightarrow De: e_m$ | e_m connu. | L'effort mesuré par le détecteur est une donnée connue. |
| Df | $\longleftarrow Df: f_m$ | f_m connu. | Le flux mesuré par le détecteur est une donnée connue. |

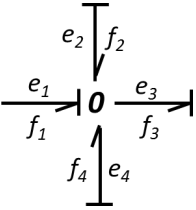
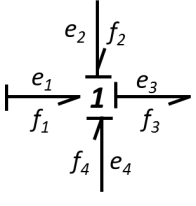
| | | | |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| J_0 |  | $\begin{cases} e_2 = e_1 \\ e_3 = e_1 \\ e_4 = e_1 \\ f_1 = -f_2 + f_3 - f_4 \end{cases}$ | <p>Un seul effort peut donner sa valeur aux autres, (ici e_1). => <i>Un seul trait causal près de la jonction 0.</i></p> |
| J_1 |  | $\begin{cases} f_2 = f_1 \\ f_3 = f_1 \\ f_4 = f_1 \\ e_1 = -e_2 + e_3 - e_4 \end{cases}$ | <p>Un seul flux peut donner sa valeur aux autres, (ici f_1). => <i>Un seul bond sans trait causal près de la jonction 1.</i></p> |

Tableau 2.1 : Représentation et règles de causalité des éléments BG
(d'après [Ould Bouamama et Dauphin-Tanguy, 06b])

3. Génération d'indicateurs de défauts à partir du Bond Graph

Le BG, nous venons de le voir, permet de compléter le modèle générique de composant en offrant une représentation interne des procédures permettant la réalisation des services fournis par les composants d'un système. En tant que modèle structurel, il permet en outre, de générer des indicateurs informant de la présence ou non de défauts.

3.1. Modèle structurel

Du point de vue général où se situe l'analyse structurelle, le modèle du système est considéré comme un ensemble de contraintes qui s'appliquent à un ensemble de variables, dont seules certaines sont mesurées. L'ensemble des variables considéré est celui qui a été retenu pour décrire l'évolution temporelle du processus. Dans le cas de la modélisation BG, il s'agit des variables de flux et d'effort qui caractérisent les données consommées et produites par les services contribuant globalement aux transferts de puissance.

Le terme "contrainte" fait référence au fait qu'un équipement technologique impose certaines relations aux évolutions temporelles des variables qui le décrivent. En d'autres termes, le vecteur de ces variables ne peut pas prendre ses valeurs dans tout l'espace auquel il appartient, mais seulement dans un sous-ensemble de valeurs compatibles avec les lois physiques sous-jacentes aux services rendus par le composant matériel. Prenons l'exemple simple d'une résistance R, deux variables lui sont associées, la différence de potentiel à ses

bornes, notée U , et l'intensité du courant qui la traverse, notée I . La trajectoire du vecteur (U, I) ne peut se situer que dans l'espace défini par la loi d'Ohm $U - RI = 0$ correspondant à la contrainte structurelle $f(U, I) = 0$.

La notion de modèle structurel et son utilisation pour l'analyse des propriétés d'un système ont été développées dans le cadre de la thèse de Mohamed Assas que j'ai dirigée avec Marcel Staroswiecki [Assas 02]. J'en reprends ici les principales définitions.

Définition 2.3 : Modèle Structurel.

La structure d'un système est définie la relation binaire (2.13) entre un ensemble de contraintes $C = \{c_i\}$ et un ensemble de variables $V = \{v_i\}$.

$$S: C \times V \rightarrow \{0, 1\}$$

$$(c_i, v_i) \rightarrow \begin{cases} S(c_i, v_i) = 1 \text{ si } v_i \text{ apparait dans } c_i \\ S(c_i, v_i) = 0 \text{ si } v_i \text{ n'apparait dans pas } c_i \end{cases} \quad (2.13)$$

La structure d'un système peut être représentée par un graphe biparti.

Définition 2.4 : Graphe Biparti.

Le graphe biparti associé à la structure d'un système est défini par $G(C, V, E)$ où $E \subseteq C \times V$ est l'ensemble des arcs définis par $(c_i, v_i) \in E$ si v_i apparait dans c_i .

L'ensemble des variables peut être décomposé, selon la relation (2.14), en deux sous-ensembles où :

- K est l'ensemble des variables connues constituées des grandeurs mesurées et des variables de commande.
- X est l'ensemble des variables inconnues.

$$V = K \cup X \quad (2.14)$$

De cette décomposition, il découle que l'ensemble des contraintes peut lui-même être partitionné en deux parties, selon la relation (2.15) où :

- C_K est l'ensemble des contraintes qui ne lient que des variables connues.
- C_X est l'ensemble des contraintes dans lesquelles au moins une variable inconnue apparait.

$$C = C_K \cup C_X \quad (2.15)$$

L'analyse du sous-système (C_x, X) permet de déterminer la possibilité de calculer la valeur des variables inconnues à partir de la valeur des variables connues. On appelle couplage, le processus causal permettant de calculer la valeur d'une variable inconnue x_i à partir de la contrainte c_j sous l'hypothèse que la valeur de toutes les autres variables $Q(c_j) \setminus \{x_i\}$ apparaissant dans c_j soit connue. La notion de couplage introduit un ordre dans l'utilisation des contraintes pour calculer la valeur des variables inconnues à partir des variables connues. La valeur des variables qui ne peuvent pas être couplées ne peut pas être déterminée. Les variables qui peuvent être couplées de plusieurs manières, en utilisant des sous-ensembles

différents de contraintes, peuvent être calculées de plusieurs façons. Il existe dans ce cas, des relations de redondances analytiques permettant de détecter des défauts.

Définition 2.5 : Relation de Redondance Analytique (RRA).

Une RRA est relation analytique ne faisant intervenir que des variables connues dont la forme est donnée par (2.16).

$$f(K) = 0 \tag{2.16}$$

L'existence de RRA est liée à la présence d'un système surdéterminé dans la décomposition canonique de Dulmage-Mendelson du système $S = (C, V)$ [Dulmage et Mendelson, 58], [Blanke et al., 06]. Le nombre de variables est, dans ce cas, supérieur au nombre de contraintes.

Définition 2.6 : Résidu (ou indicateur de défaut).

Un résidu est un signal $r(t)$ qui reflète la cohérence des données ($|r(t)| \leq \text{seuil}_r$) vis-à-vis d'un modèle de comportement décrivant le fonctionnement attendu du système en l'absence de défaillance.

Chaque RRA permet de générer un résidu. La valeur du résidu est alors calculée en affectant aux variables apparaissant dans la RRA, les valeurs mesurées correspondantes.

En présence de défaillances, le modèle Bond Graph qui décrit la procédure sur laquelle repose la réalisation du service en fonctionnement normal, est erroné. En effet, par exemples, une fuite dans un réservoir introduit un débit de fuite qui devrait être modélisé par une source et un frottement au niveau d'un moteur ajouterait un élément R. En conséquence, les données produites par le service ne sont pas celles décrites par le modèle et un ou plusieurs résidus s'en trouvent affectés.

Définition 2.7 : Résidu affecté par une faute.

Un résidu $r(t)$ est affecté par une faute f , si l'apparition de la faute f à l'instant t entraîne $|r(t)| > \text{seuil}_r$.

Le problème de détection, en utilisant la technique des résidus, peut alors se définir comme suit.

Définition 2.8 : Détection d'une faute.

Soit $R = \{r_i, i \in I_r\}$ l'ensemble des résidus, une faute est détectée à l'instant t , s'il existe :

$$r_i \in R: |r_i(t)| > \text{seuil}_{r_i}$$

La localisation de la faute nécessite d'étudier la structure des résidus et la signature des fautes.

Définition 2.9 : Structure (ou signature d'un résidu) d'un résidu.

La structure (ou signature) d'un résidu r_i par rapport à un ensemble de fautes $F = \{f_j, j \in I_f\}$ envisagées pour le système est le mot binaire S_{r_i} composé des bits s_{ij} tels que :

- $s_{ij} = 1$ si le résidu r_i est affecté par la faute f_j .

- $s_{ij} = 0$ si le résidu r_i n'est pas affecté par la faute f_j .

Définition 2.10 : Matrice des signatures.

L'ensemble des structures S_{r_i} sur l'ensemble des fautes F constitue la matrice des signatures.

Définition 2.11 : Signature d'une faute.

La signature S_{f_j} d'une faute f_j est le $j^{\text{ème}}$ vecteur colonne de la matrice des signatures.

Définition 2.12 : Localisation d'une faute.

Si $\forall j \neq l, S_{f_j} \neq S_{f_l}$ alors la faute f_j est localisable. Sa signature est différente de toutes les autres signatures.

3.2. Génération des RRA à partir du BG

Le BG est un modèle structurel. Il peut être ramené à un graphe biparti en adoptant les analogies suivantes.

L'ensemble des variables, noté V , pour le graphe biparti, correspond aux variables de puissance (effort et flux) associé à chaque bond.

$$V = \{e_i\} \cup \{f_i\}, \forall b_i \in B \tag{2.17}$$

Selon la relation 2.14, une partie de ces variables est connue. Ce sont les variables imposées par les sources et les variables mesurées par les détecteurs. On note e_x (respectivement f_x) l'effort (respectivement le flux) imposé ou mesuré par l'élément x . On a alors :

$$K = \{e_{Se}\} \cup \{f_{Sf}\} \cup \{e_{MSe}\} \cup \{f_{MSf}\} \cup \{e_{De}\} \cup \{f_{Df}\} \tag{2.18}$$

L'ensemble des contraintes, noté C , pour le graphe biparti, correspond aux lois physiques ou structurelles imposées par les éléments N (nœuds) du BG. Plus précisément, ces contraintes se répartissent en quatre types :

$$C = C_C \cup C_\varphi \cup C_S \cup C_D \tag{2.19}$$

où :

- C_C représente les contraintes structurelles correspondant aux lois de conservation de l'énergie, imposées par les éléments J_0, J_1, TF et GY .
- C_φ représente les contraintes comportementales (équations constitutives) correspondant aux lois physiques imposées par les éléments R, I et C qui rendent un service de dissipation ou de stockage d'énergie.
- C_S représente les contraintes imposées par les éléments sources Se, SF, MSe et MSf qui alimentent le système en énergie.
- C_D représente les contraintes correspondant aux équations de mesure relatives aux détecteurs De et Df .

La génération des RRA par la méthodologie bond graph repose sur les mêmes principes que pour le graphe biparti, à savoir l'élimination des variables inconnues dans un sous-système surdéterminé. La recherche de ce dernier est équivalente à l'identification de sous-graphes structurellement observables dans le BG. Cette observabilité s'étudie à partir des chemins causaux.

Définition 2.13 : Chemin causal [Sueur et Dauphin-Tanguy, 91].

Un chemin causal est une alternance de bonds et de nœuds telle que tous les nœuds ont une causalité complète et correcte, et deux bonds du chemin causal ont en un même nœud des orientations causales opposées. Suivant la causalité, la variable traversée est l'effort ou le flux. Pour changer cette variable il faut passer par un nœud R, I, C ou GY.

Définition 2.14 : Dualisation d'un détecteur.

Dualiser un détecteur consiste à inverser sa causalité. Ceci revient à le remplacer par une source d'information de même type. Ainsi un détecteur d'effort D_e (respectivement un détecteur de flux D_f) dualisé devient une source d'effort (respectivement une source de flux D_f) et inversement.

Définition 2.15 : Bond Graph dualisé.

Un BG dualisé est un BG où les détecteurs ont été dualisés.

Théorème 2.1 : Observabilité structurelle sur le BG. [Sueur et Dauphin-Tanguy, 91]

Un modèle bond-graph est structurellement observable si et seulement si les deux conditions suivantes sont vérifiées.

- 1. Sur le modèle BG mis en causalité préférentielle intégrale, il existe un chemin causal entre tous les éléments I et C en causalité intégrale et un détecteur D_e ou D_f .*
- 2. Tous les éléments I et C admettent une causalité dérivée sur le modèle BG mis en causalité préférentielle dérivée. Si des éléments dynamiques I ou C restent en causalité intégrale, la dualisation de détecteurs D_e ou D_f doit permettre de les mettre en causalité dérivée.*

Si une variable inconnue est observable alors sa valeur peut être déterminée à partir des variables connues.

L'algorithme de génération des RRA à partir du modèle BG est réalisé selon les étapes suivantes [Ould Bouamama et al, 04].

- Mettre le modèle bond graph en causalité dérivée et dualiser les détecteurs.
- Ecrire les équations du modèle à partir des contraintes données par la relation (2.19). Pour toute contrainte C_C (conservation de l'énergie à une jonction J_0 ou J_1) contenant au moins un détecteur :

- Eliminer les variables inconnues (e_i ou f_i) en parcourant les chemins causaux sur le bond graph de la variable inconnue vers une variable connue (capteur ou source).
- Pour tout détecteur dualisé, 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) situé dans la même jonction.

La signature du résidu est ensuite aisément déduite. En effet, la RRA est sensible aux défauts introduits par les éléments qui apparaissent dans son expression et qui réalisent les services cités paragraphe 2.2. La procédure de génération des RRA à partir du BG est entièrement automatisée dans le logiciel Symbols2000 [Ould Bouamama et al, 06a].

3.3. Exemple

Pour illustrer les notions vues jusqu'à présent, considérons le schéma électrique et son BG associé, présentés Figure 2.2. Dans cet exemple, les éléments R1 et L1 sont parcourus par le même courant. Ils sont donc connectés à une jonction 1 (même flux). Les éléments R2 et C1 sont quant à eux soumis à une même tension. Ils sont connectés à une jonction 0 (même effort). Un détecteur de flux est utilisé pour mesurer le courant i_m traversant R1 et L1. Un détecteur d'effort est utilisé pour mesurer la tension e_m aux bornes de C1 et R2.

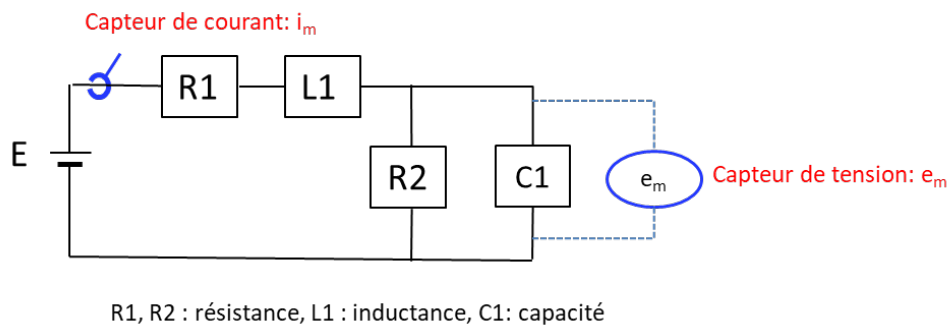


Figure 2.2 : Circuit électrique support d'exemple.

Les causalités sont affectées selon les règles classiquement définies [Merzouki et al, 2013]. La source Se:E impose l'effort. La causalité des éléments I et C peut être préférentiellement une causalité intégrale ou différentielle. La causalité intégrale facilite la génération des équations d'état et la simulation numérique par la prise en compte des conditions initiales. La causalité différentielle est plus adaptée à la génération des RRA puisqu'elle ne nécessite pas de connaître la valeur des conditions initiales.

Si une causalité intégrale est choisie pour L1 et C1 (marques de causalité placée près de L1 et éloignée de C1), R1 ne peut être qu'en causalité résistance, R2 ne peut être qu'en causalité

conductance et la marque de causalité pour le lien entre les deux jonctions est du côté de la jonction 1 (un seul flux peut donner sa valeur aux autres pour une jonction 1, un seul effort peut donner sa valeur aux autres pour une jonction 0, voir Tableau 2.1).

Si une causalité dérivée est choisie pour L1 et C1, R1 peut être au choix en causalité résistance ou conductance mais ce choix impose la causalité de R2, et vice versa.

La Figure 2.3 donne les BG en causalité intégrale et dérivée correspondant au système électrique présenté Figure 2.2. La Figure 2.4 donne le BG dualisé utilisé pour générer les RRA (BG où les détecteurs Df et De ont été dualisés).

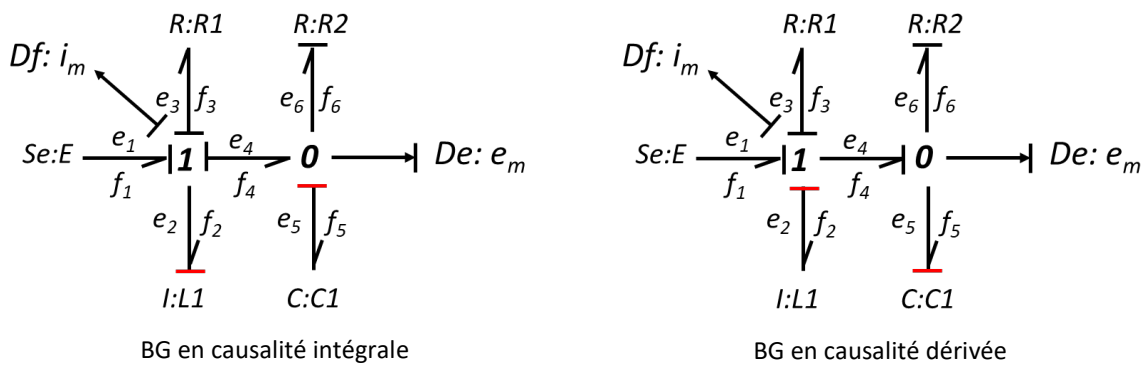


Figure 2.3 : Les deux représentations BG su système électrique

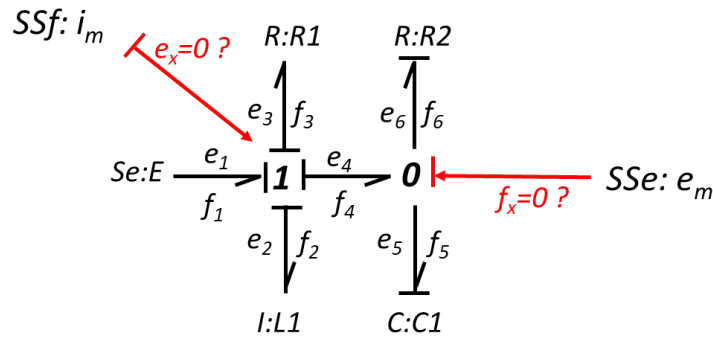


Figure 2.4 : BG dualisé utilisé pour la détection de fautes

Les contraintes structurelles sont données par les équations (2.20).

$$\begin{aligned}
 \text{jonction 1} : e_1 - e_2 - e_3 - e_4 &= 0 \\
 \text{jonction 0} : f_4 - f_5 - f_6 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

Les contraintes comportementales sont données par les équations (2.21).

$$\begin{aligned}
 R1 : e_3 &= R1 \times f_3 \\
 L1 : e_2 &= L1 \times \frac{df_2}{dt} \\
 R2 : f_6 &= \frac{e_6}{R2} \\
 C1 : f_5 &= C1 \times \frac{de_5}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

Les RRA, équations (2.22) sont obtenues au niveau de chaque jonction. Les variables inconnues sont éliminées en suivant les chemins causaux conduisant aux variables connues. Les résidus (indicateurs de fautes) correspondant sont donnée par les équations (2.23).

$$\begin{aligned}
 RRA1 : E - L1 \times \frac{di_m}{dt} - R1 \times i_m - e_m &= 0 \\
 RRA2 : i_m - C1 \times \frac{de_m}{dt} - \frac{e_m}{R2} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

$$\begin{aligned}
 r1 &= E - L1 \times \frac{di_m}{dt} - R1 \times i_m - e_m \\
 r2 &= i_m - C1 \times \frac{de_m}{dt} - \frac{e_m}{R2}
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

La matrice de signature de fautes est présentée Figure 2.5. Le résidu r1 est sensible à un défaut capteur, un défaut d'alimentation ou à un défaut au niveau de R1 ou L1. Le résidu r2 est sensible à un défaut capteur ou à un défaut au niveau de R2 ou C1. Si les résidus r1 et r2 sont par exemple tous les deux égaux à 1, nous pourrions en déduire que les services de mesures sont indisponibles.

| | r1 | r2 |
|----------------|----|----|
| E | 1 | 0 |
| R1 | 1 | 0 |
| L1 | 1 | 0 |
| C1 | 0 | 1 |
| R2 | 0 | 1 |
| i _m | 1 | 1 |
| e _m | 1 | 1 |

Figure 2.5 : Matrice des signatures de fautes associée au circuit électrique

4. Diagnostic à partir du Bond Graph

4.1. Définitions

Le diagnostic est le raisonnement qui permet de déduire la cause (l'origine) d'une défaillance à partir de l'observation de ses effets (symptômes). L'idée générale est de déterminer l'ensemble des composants du système, qui supposés défaillants, pourrait expliquer

l'incohérence entre le comportement observé du système et celui prédit par son modèle. Raymond Reiter est l'un des premiers à avoir développé et formulé cette théorie [Reiter, 87]. Nous nous appuyerons dans ce qui suit sur certaines de ses définitions en les adaptant au BG.

Définition 2.16 : Système.

Un système est un triplet (BG, N, OBS) où :

- BG est le Bond Graph $G(N, B)$ donné en causalité intégrale et décrivant le fonctionnement normal du système.
- N est l'ensemble des nœuds du BG $G(N, B)$. Cet ensemble de nœuds est partitionné selon la relation 2.4 où S est l'ensemble des services rendus par les composants élémentaires du système.
- OBS est l'ensemble des observations faites sur le système. Ces observations correspondent aux grandeurs mesurées par les détecteurs et aux valeurs imposées par les sources.

Soit $AB(n)$ un prédicat signifiant que le service rendu par le nœud n est indisponible, autrement dit non rendu ou rendu de façon anormale, non conforme aux spécifications. L'opérateur logique \neg est utilisé pour exprimer la négation et la notation $\neg AB(n)$ signifie que le service représenté par l'élément n est rendu correctement, selon la procédure *proc* qui le décrit.

La détection d'un fonctionnement anormal peut alors être formulée comme suit :

$$BG \cup OBS \cup \{\neg AB(n), \forall n \in N\} \text{ est incohérent.} \quad (2.24)$$

Autrement dit, les observations faites sur le système et l'hypothèse que tous les services sont rendus correctement sont en contradiction avec ce que prédit le modèle de bon fonctionnement.

Définition 2.17 : Diagnostic.

Un diagnostic, pour le système (BG, N, OBS) est un ensemble minimal de nœuds $\Delta \subseteq N$ tel que :

$$BG \cup OBS \cup \{AB(n), \forall n \in \Delta\} \cup \{\neg AB(n), \forall n \in N - \Delta\} \text{ est cohérent.} \quad (2.25)$$

Autrement dit, un diagnostic est l'ensemble minimal des services qui supposés non rendus correctement, explique l'écart entre les observations réelles et celles prédites par le modèle.

La détermination du diagnostic passe par la recherche des conflits.

Définition 2.18 : Conflit.

Un conflit pour (BG, N, OBS) est un ensemble $\{n_1, \dots, n_k\} \subseteq N$ tel que :

$$BG \cup OBS \cup \{\neg AB(n_1), \dots, \neg AB(n_k)\} \text{ est incohérent.} \quad (2.26)$$

Définition 2.19 : Conflit minimal.

Un conflit est minimal pour (BG, N, OBS) si et seulement si aucun de ses propres sous-ensembles n'est un conflit pour (BG, N, OBS) .

Un conflit se traduit par une déviation des grandeurs mesurées. Les valeurs observées ne sont pas celles prédites par le modèle.

Définition 2.20 : Signe d'une observation.

Soient ε_{obs}^- et ε_{obs}^+ deux valeurs seuils fixant la plage d'appartenance de la valeur nominale attendue pour une observation $obs \in OBS$. Le signe de l'observation $obs \in OBS$ est :

- $sign(obs) = 0$ si $\varepsilon_{obs}^- \leq obs \leq \varepsilon_{obs}^+$
- $sign(obs) = -$ si $obs \leq \varepsilon_{obs}^-$
- $sign(obs) = +$ si $obs \geq \varepsilon_{obs}^+$

La recherche des conflits est réalisée directement à partir du BG donné en causalité dérivée. Le signe associé à un nœud d'observation est propagé en suivant les chemins causaux, par chainage arrière vers d'autres nœuds d'observation. Les conflits correspondent aux sous-ensembles minimaux de nœuds appartenant aux chemins causaux, qui supposés fonctionner anormalement, expliquent les observations constatées.

Pour la propagation du signe, de nœud en nœud, le long du chemin causal, les règles énoncées ci-dessous s'appliquent. Elles sont résumées par le tableau 2.2.

- **Détecteurs De et Df .** Soit De (resp. Df) le détecteur mesurant l'observation obs . Soit e_m (resp. f_m) la variable associée à l'arc reliant le détecteur De (resp. Df) à la jonction J_0 (resp. J_1). On a alors :

$$\neg AB(De) \Rightarrow sign(e_m) := sign(obs)$$

$$\neg AB(Df) \Rightarrow sign(f_m) := sign(obs)$$

- **Jonctions J_0 et J_1 .** Soit J_0 (resp. J_1) une jonction pour laquelle l'effort e_m (resp. le flux f_m) est mesuré. Soit e_n (resp. f_n) l'effort (resp. le flux) associé à l'unique bond dont la marque de causalité est proche (resp. éloignée) de la jonction. La variable concernée est celle qui impose sa valeur aux autres. On a alors :

$$\text{Jonction } J_0 : sign(e_n) := sign(e_m)$$

$$\text{Jonction } J_1 : sign(f_n) := sign(f_m)$$

- **Éléments R, C, I .** Soit $n \in \{R, C, I\}$ un nœud pour lequel le signe de la variable qui n'impose pas sa valeur au nœud est déterminé. On a alors :

$$\neg AB(n) \Rightarrow sign(e_n) := sign(f_n) \text{ si } e_n \text{ est la variable qui impose sa valeur au nœud } n$$

$$\neg AB(n) \Rightarrow sign(f_n) := sign(e_n) \text{ si } f_n \text{ est la variable qui impose sa valeur au nœud } n$$

autrement dit si l'effort (resp. le flux) a augmenté en sortie du nœud n c'est parce que le flux (resp. l'effort) imposé a augmenté (resp. diminué).

- **Éléments TF.** Soit $n \in \{TF\}$ un nœud pour lequel le signe de la variable qui n'impose pas sa valeur au nœud est déterminé. Soit e_j (resp. f_j) cette variable. Le signe de l'effort e_i (resp. du flux f_i) imposé vérifie alors :

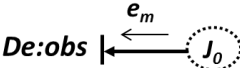
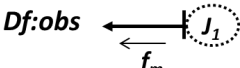
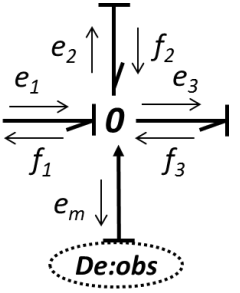
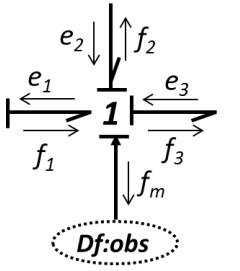
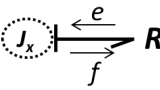
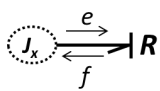
$$\neg AB(n) \Rightarrow \text{sign}(e_i) := \text{sign}(e_j) \text{ si } e_i \text{ est la variable qui impose sa valeur au nœud } n$$

$$\neg AB(n) \Rightarrow \text{sign}(f_i) := \text{sign}(f_j) \text{ si } f_i \text{ est la variable qui impose sa valeur au nœud } n$$

- **Éléments GY.** Soit $n \in \{GY\}$ un nœud pour lequel le signe de la variable qui n'impose pas sa valeur au nœud est déterminé. Soit e_j (resp. f_j) cette variable. Le signe du flux f_i (resp. de l'effort e_i) imposé vérifie alors :

$$\neg AB(n) \Rightarrow \text{sign}(f_i) := \text{sign}(e_j) \text{ si } e_i \text{ est la variable qui impose sa valeur au nœud } n$$

$$\neg AB(n) \Rightarrow \text{sign}(e_i) := \text{sign}(f_j) \text{ si } e_i \text{ est la variable qui impose sa valeur au nœud } n$$

| Élément | Symbole BG | Equation BG | Affectation des signes |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| De |  | $obs \text{ connu}$ | $\neg AB(De) \Rightarrow \text{sign}(e_m) := \text{sign}(obs)$ |
| Df |  | $obs \text{ connu}$ | $\neg AB(Df) \Rightarrow \text{sign}(f_m) := \text{sign}(obs)$ |
| J_0 |  | $\begin{cases} e_1 = e_m \\ e_2 = e_m \\ e_3 = e_m \\ 0 = f_1 + f_2 - f_3 \end{cases}$ | Partant de De , un seul chemin causal possible : $e_m \rightarrow e_1$ $\text{sign}(e_1) := \text{sign}(e_m)$ |
| J_1 |  | $\begin{cases} f_1 = f_m \\ f_2 = f_m \\ f_3 = f_m \\ 0 = e_1 + e_2 - e_3 \end{cases}$ | Partant de Df , un seul chemin causal possible : $f_m \rightarrow f_1$ $\text{sign}(f_1) := \text{sign}(f_m)$ |
| R |   | $e = \Phi_R(f)$ $f = \Phi_R^{-1}(e)$ | Chemin causal : $J_x \rightarrow e \rightarrow R \rightarrow f$ $\neg AB(R) \Rightarrow \text{sign}(f) := \text{sign}(e)$ Chemin causal : $J_x \rightarrow f \rightarrow R \rightarrow e$ $\neg AB(R) \Rightarrow \text{sign}(e) := \text{sign}(f)$ |

| | | | |
|----|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C | | $e(t) = \Phi_C \left(\int^t f(t) \cdot dt \right)$ $f(t) = \frac{d}{dt} (\Phi_C^{-1}(e(t)))$ | <p>Chemin causal : $J_x \rightarrow e \rightarrow C \rightarrow f$ $\neg AB(C) \Rightarrow \text{sign}(f) := \text{sign}(e)$</p> <p>Chemin causal : $J_x \rightarrow f \rightarrow C \rightarrow e$ $\neg AB(C) \Rightarrow \text{sign}(e) := \text{sign}(f)$</p> |
| I | | $f(t) = \Phi_I \left(\int^t e(t) \cdot dt \right)$ $e(t) = \frac{d}{dt} (\Phi_I^{-1}(f(t)))$ | <p>Chemin causal : $J_x \rightarrow f \rightarrow I \rightarrow e$ $\neg AB(I) \Rightarrow \text{sign}(e) := \text{sign}(f)$</p> <p>Chemin causal : $J_x \rightarrow e \rightarrow I \rightarrow f$ $\neg AB(I) \Rightarrow \text{sign}(f) := \text{sign}(e)$</p> |
| TF | | $\begin{cases} e_1 = m \cdot e_2 \\ f_2 = m \cdot f_1 \end{cases}$ $\begin{cases} e_2 = \frac{1}{m} \cdot e_1 \\ f_1 = \frac{1}{m} \cdot f_2 \end{cases}$ | <p>Chemins causaux : $e_1 \rightarrow TF \rightarrow e_2$ $\neg AB(TF) \Rightarrow \text{sign}(e_2) := \text{sign}(e_1)$</p> <p>$f_2 \rightarrow TF \rightarrow f_1$ $\neg AB(TF) \Rightarrow \text{sign}(f_1) := \text{sign}(f_2)$</p> <p>Chemin causaux : $e_2 \rightarrow TF \rightarrow e_1$ $\neg AB(TF) \Rightarrow \text{sign}(e_1) := \text{sign}(e_2)$</p> <p>$f_1 \rightarrow TF \rightarrow f_2$ $\neg AB(TF) \Rightarrow \text{sign}(f_2) := \text{sign}(f_1)$</p> |
| GY | | $\begin{cases} e_1 = r \cdot f_2 \\ e_2 = r \cdot f_1 \end{cases}$ $\begin{cases} f_2 = \frac{1}{r} \cdot e_1 \\ f_1 = \frac{1}{r} \cdot e_2 \end{cases}$ | <p>Chemins causaux : $e_1 \rightarrow GY \rightarrow f_2$ $\neg AB(GY) \Rightarrow \text{sign}(f_2) := \text{sign}(e_1)$</p> <p>$e_2 \rightarrow GY \rightarrow f_1$ $\neg AB(GY) \Rightarrow \text{sign}(f_1) := \text{sign}(e_2)$</p> <p>Chemin causaux : $f_2 \rightarrow GY \rightarrow e_1$ $\neg AB(GY) \Rightarrow \text{sign}(e_1) := \text{sign}(f_2)$</p> <p>$f_1 \rightarrow GY \rightarrow e_2$ $\neg AB(GY) \Rightarrow \text{sign}(e_2) := \text{sign}(f_1)$</p> |

Tableau 2.2 : Règles de propagation des signes.

4.2. Exemple

Pour illustrer la notion de BGS, reprenons l'exemple du système électrique décrit Figure 2.2. La direction causale des bonds est représentée Figure 2.6. A chaque variable d'effort ou de flux un arc, dirigé vers le nœud portant la marque de causalité si la variable associée à l'arc est l'effort ou dirigé vers le nœud ne portant pas la marque de causalité si la variable associée à

l'arc est le flux. Cette représentation facilite la lecture des chemins causaux, elle n'apporte aucune information supplémentaire, elle est redondante avec la marque de causalité.

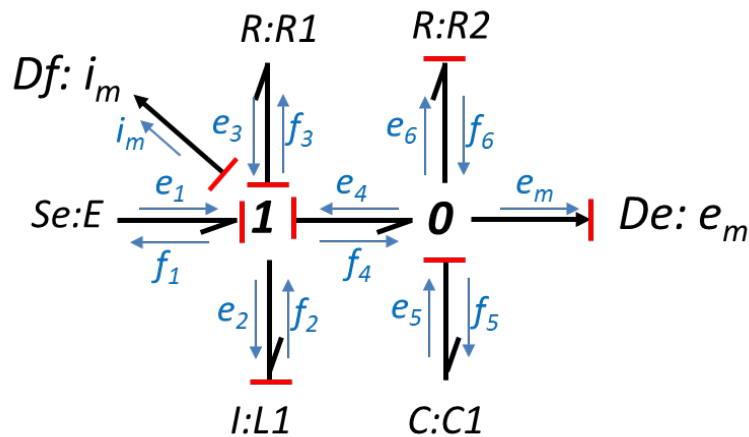


Figure 2.6 : Direction causale des bonds du BG associé au système électrique.

Les chemins de propagation de faute et les conflits associés sont donnés Figure 2.7.

Partant de $Df : i_m$, un chemin causal possible est (cf. définition 2.13) :

$$i_m \leftarrow 1 \leftarrow f_2 \leftarrow L_1 \leftarrow e_2 \leftarrow 1 \leftarrow e_3 \leftarrow R_1 \leftarrow f_3$$

Supposons maintenant, que le courant i_m observé par le détecteur Df dépasse sa valeur seuil maximale. Nous avons donc $sign(i_m) = +$, ce que nous notons i_m^+ pour plus de commodité. Ceci implique que le flux f_2 , dépasse sa valeur, noté f_2^+ . Au niveau de L1, il existe deux possibilités :

- L1 n'est pas défaillante, par conséquent $sign(e_2) = sign(f_2)$.
- L1 est défaillante, par conséquent $sign(e_2) = -sign(f_2)$. Une flèche en pointillés, sur le graphe causal donné Figure 2.7, permet de représenter que le composant à l'origine de cette flèche est supposé défaillant.

Pour déterminer le signe de e_3 , l'équation structurelle ($e_1 = e_2 + e_3 + e_4$) de la jonction 1 est exploitée. Autrement dit, si e_2 augmente (respectivement diminue), c'est parce que e_3 ou e_4 diminue (respectivement augmente), d'où $sign(e_3) = -sign(e_2) = -sign(e_4)$. La variation de e_4 doit alors être cohérente avec ce que l'on observe au niveau du détecteur De puisque $e_4 = e_m$. Si $sign(e_3) = -$, deux possibilités doivent être envisagées :

- R1 n'est pas défaillante, par conséquent $sign(f_3) = sign(e_3) = -$, ce qui n'est pas possible puisque $sign(f_3) = sign(i_m)$ et on observe $sign(i_m) = +$
- R1 est défaillante, par conséquent $sign(f_3) = -sign(e_3) = +$. Ce qui est cohérent avec l'observation. La défaillance de la résistance R1 est un composant qui explique l'observation $sign(i_m) = +$.

L'hypothèse, L1 défaillante, R1 en bon état conduit à la même conclusion. Les deux composants L1 et R1 appartiennent au même conflit PC1.

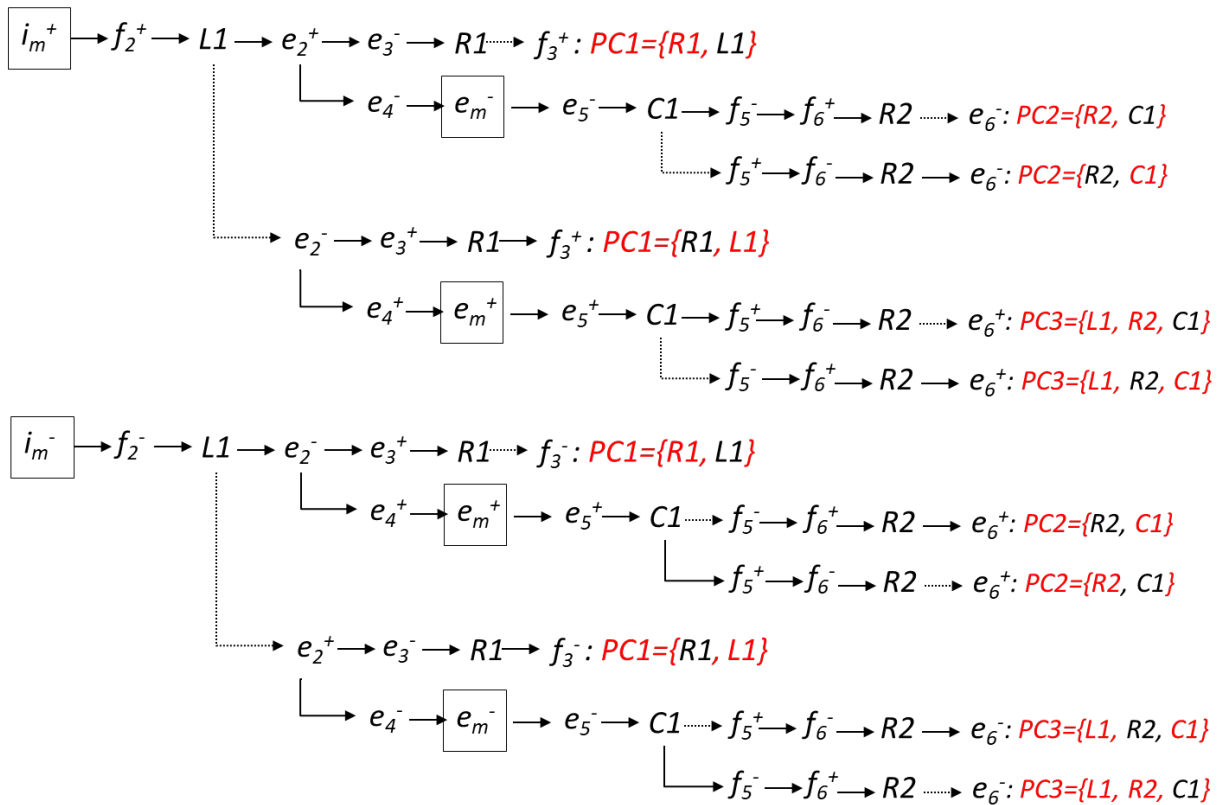


Figure 2.7 : Déduction des conflits à partir des chemins causaux.

5. Applications

5.1 Augmentation de la durée de vie d'une pile à combustible

Une pile à combustible est un composant capable de fournir une tension électrique grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant. Si le combustible utilisé par la pile est l'hydrogène vert, c'est-à-dire produit à partir d'énergies renouvelables en utilisant l'électrolyse de l'eau, et si l'oxydant est l'oxygène présent dans l'air, la pile à combustible est une solution très prometteuse pour réduire la pollution atmosphérique et le réchauffement climatique. Elle permet de palier l'intermittence des sources d'énergies renouvelables.

Le développement à grande échelle des piles à combustibles nécessite cependant d'optimiser leur fonctionnement et d'augmenter leur durée de vie. Ceci passe par l'utilisation de techniques systématiques pour la détection et l'isolation de défauts. Les approches reposant sur des modèles mathématiques sont difficiles à implémenter car les piles à combustibles, sont d'une part mal instrumentées, et d'autre part des systèmes couplant de multiples phénomènes physiques (électrique, chimique, thermodynamiques ...).

L'outil BGS, par son aspect graphique, sa facilité à représenter des grandeurs physiques de différente nature tout en explicitant les relations de causalité entre variables s'est avéré être un outil précieux pour la modélisation et le diagnostic des piles à combustibles à membranes échangeuses de protons (PEM). Les travaux ont été développés dans le cadre de l'ANR-12-PRGE-0001 « Propice » visant à augmenter la durée de vie des PEM par le développement de méthodes permettant d'évaluer (diagnostic) et de prédire (pronostic) l'état de santé des PEM [Ould-Bouamama et al, 2014].

L'approche BGS permet de détecter et isoler les défauts réversibles et antagonistes que sont l'engorgement et l'assèchement de la membrane. Il est ainsi possible d'optimiser l'humidification de la membrane et de prolonger la durée de vie de la pile. En effet, un excès d'eau nuit à la diffusion des gaz et une mauvaise hydratation dégrade le transport des ions H^+ .

5.2 Véhicule autonome intelligent

Le véhicule présenté Figure 2.8, appelé RobuTainer est un véhicule dit intelligent et autonome en raison de l'instrumentation embarquée dont il dispose qui lui permet de recueillir les informations mesurées par de nombreux capteurs (GPS, télémètres, centrale inertielle, gyroscopes ...), d'implémenter des algorithmes de surveillance en ligne et de naviguer en toute autonomie. Il a été développé dans le cadre du projet européen, INTERREG IVB NWE, « Intelligent Transportation for Dynamic Environment (InTraDe) ». L'objectif était d'améliorer la gestion des marchandises dans les ports maritimes en développant des véhicules porte-conteneurs totalement autonomes.

Le véhicule RobuTainer est multi-actionné pour se déplacer dans toutes les directions, se placer sous une table lui permettant de recevoir le conteneur et transporter le conteneur. Il présente des redondances matérielles notamment au niveau des chaînes d'actionnement de traction et de direction permettant l'implémentation de stratégies de reconfiguration afin de garantir une continuité de services suite à l'apparition de défauts.



Figure 2.8 : Premier prototype RobuTainer

Cette application a permis de valider les algorithmes de diagnostic basés sur le BGS et de proposer une gestion intelligente des modes de fonctionnement du RobuTainer basée sur le modèle générique de composants. Les tests ont été réalisés sous un logiciel de simulation de la dynamique des véhicules (CALLAS/SCANeR Studio) et sur des données réelles issues du RobuTainer. La complémentarité des approches fonctionnelles et comportementales a été mise en évidence **[Chatti et al., 2012]**.

Le Bond Graph piloté par événements

1. Motivation

Selon les missions qu'il a à réaliser et l'état opérationnel (défaillant ou non défaillant) des composants qu'il regroupe, un système automatisé présente plusieurs modes de fonctionnement. Le modèle générique de composant, présenté chapitre 1, définit l'ensemble des modes de fonctionnement d'un système et associe à chaque mode de fonctionnement un ou plusieurs objectifs réalisés à partir des services rendus par la mise en service d'une partie, bien définie, des composants qui constituent le système. Le fait que certains composants puissent être mis en service ou hors service selon les objectifs à réaliser et les indisponibilités matérielles constatées confère au système une dynamique dite hybride, car présentant à la fois une composante continue, à l'intérieur d'un même mode, et une composante discrète, lors d'un changement de mode.

Les changements de mode sont pilotés par des événements qui peuvent être autonomes (provoqués par des variables continues dont les valeurs franchissent des valeurs seuils) ou résultants de commandes externes (manuelles ou automatiques).

Pour prendre en compte cette double dynamique, le bond graph hybride piloté par événements (Event Driven Hybrid Bond Graph (EDHBG)) a été développé dans le cadre de la thèse d'Ibrahim Abdallah que j'ai co-encadrée avec Belkacem Ould-Bouamama [Abdallah, 17]. Cet outil graphique, basé sur le bond graph, offre, via un modèle unique,

- Une représentation de l'ensemble des modes et de leur commutation.
- Une représentation de la dynamique continue sous-jacente à chaque mode.

- La gestion des changements de modes en fonction des objectifs à réaliser et des résultats fournis par les algorithmes de diagnostic.

En séparant la dynamique continue pilotée par le bond graph, des états discrets modélisés par un automate intégré, l'approche proposée simplifie la gestion des modes de fonctionnement. Intégrant un Bond Graph Diagnostiqueur, elle permet également la réalisation d'un diagnostic en ligne sans avoir recours à une description analytique du système. L'association diagnostic et gestion des modes de fonctionnement permet alors de définir des stratégies de reconfiguration adaptées et/ou des procédures sécuritaires lorsque des fautes sont détectées.

2. Modélisation bond graph des systèmes dynamiques hybrides

2.1. Les systèmes dynamiques hybrides

Définition 3.1 : Système dynamique hybride (SDH).

Un système est défini comme hybride si et seulement si les différents éléments ou sous-systèmes qui le constituent font intervenir :

- Des phénomènes dont les dynamiques sont de type continue et événementielle.
- Des variables analogiques et des états logiques.
- Des équations différentielles, aux différences, et logiques.

Définition 3.2 : Système à commutation (switching system).

Un SDH est un système à commutation si et seulement si :

- Il peut être décrit par un ensemble de modes caractérisés par une dynamique continue.
- Les transitions entre modes (appelées commutation) sont contrôlées par des équations logiques dont le résultat est booléen.

Une chaudière contrôlée par un thermostat est un exemple de système à commutation. Elle présente deux modes de fonctionnement : {En marche, A l'arrêt}. A l'intérieur de chaque mode, la variable température évolue de manière continue. Les commutations entre modes s'expriment par une équation logique fonction de la température mesurée, de la consigne et d'une valeur seuil, cf. Figure 3.1.

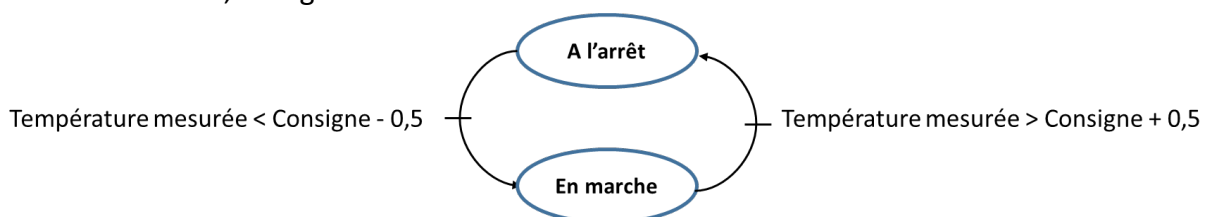


Figure 3.1 : Les modes de fonctionnement d'une chaudière.

Un système à commutation intègre un ou plusieurs commutateurs.

Définition 3.3 : Commutateur (switching element).

Un commutateur est un composant présentant deux modes de fonctionnement. Dans le mode actif (ON), il transmet un flux de puissance. Dans le mode inactif (OFF), il bloque un flux de puissance.

Le relais qui contrôle la mise en route ou l'arrêt de la chaudière est un commutateur. Il transmet ou non le courant.

Définition 3.4 : Commutation autonome

Une commutation est autonome si la valeur de la variable qui contrôle cette commutation est déterminée par l'état interne du système.

Définition 3.5 : Commutation contrôlée

Une commutation est contrôlée si la valeur de la variable qui contrôle cette commutation est déterminée par un signal externe reçu sur une entrée du système.

Les changements de mode liés à la direction du courant qui parcourt une diode (cf. Figure 3.2) sont consécutifs à une commutation autonome. Le relais utilisé pour mettre en marche ou arrêter la chaudière reçoit un signal de commutation externe issu du thermostat.

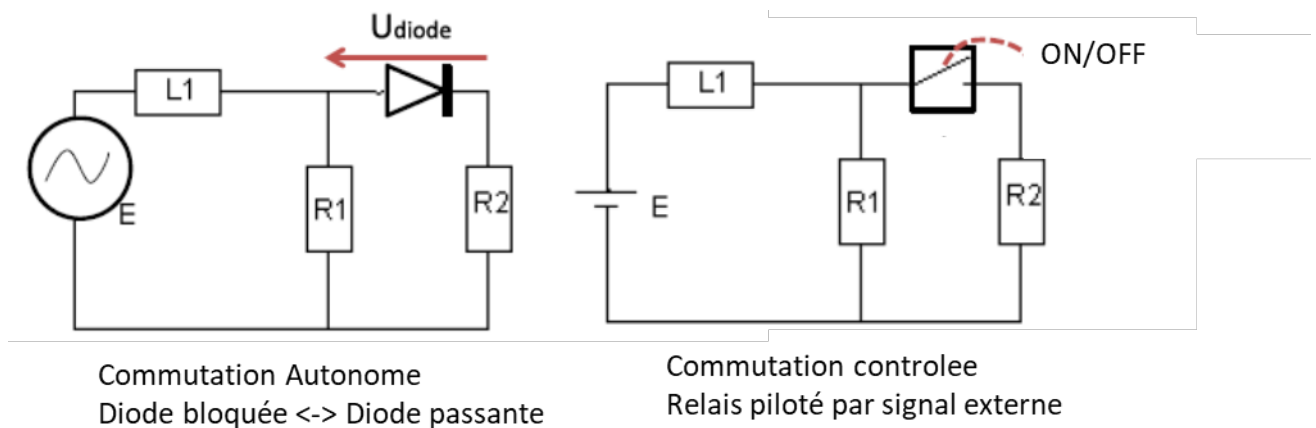


Figure 3.2 : Les types de commutation.

2.2. Modélisation bond graph des commutateurs

Un commutateur se comporte comme un interrupteur contrôlant un flux de puissance. Lorsqu'il reçoit le signal OFF, il coupe le flux de puissance entre les deux composants qu'il connecte, lorsqu'il reçoit le signal ON il transmet intégralement (sans perte de charge) la puissance d'un composant à l'autre.

La jonction contrôlée est un élément bond graph permettant de modéliser un commutateur.

Définition 3.6 : Jonction contrôlée [Mosterman et Biswas, 1995]

Une jonction contrôlée ($X0$ ou $X1$) est une jonction dont le comportement dynamique est contrôlé par un signal booléen. Si la valeur du signal booléen est :

- ON , la jonction se comporte comme une jonction classique.
 - Pour une jonction $X1$: La somme des efforts présents sur chacun des bonds que la jonction connecte est égal à 0 et pour ces mêmes bonds toutes les valeurs de flux sont égales.
 - Pour une jonction $X0$: La somme des flux présents sur chacun des bonds que la jonction connecte est égal à 0 et pour ces mêmes bonds toutes les valeurs d'effort sont égales.
- OFF
 - La jonction $X1$ impose une valeur de flux égale à 0 à tous les bonds qui lui sont connectés, comme s'ils étaient connectés à une source de flux nul.
 - La jonction $X0$ impose une valeur de flux égale à 0 au bond pour lequel la causalité est respectée et un effort égal à 0 pour tous les autres bonds.

Les Figures 3.4 et 3.5 illustrent la notion de jonction contrôlée.

Sur la figure 3.4, deux éléments A et B sont reliés ou non, en série, via un commutateur. Lorsqu'ils sont connectés ensemble, ils sont soumis au même flux. La jonction $X1$ qui modélise ce commutateur reçoit alors le signal de commande $u := ON$. Lorsque les éléments A et B ne sont plus connectés ensemble ($u := OFF$), chacun d'entre eux est connecté à une source de flux nul.

Les équations décrivant ce fonctionnement sont :

$$u := ON \Rightarrow \begin{cases} e_b := e_a \\ f_a := f_b \end{cases} \quad \text{où } e_a \text{ et } f_b \text{ sont déterminés par les BG des sous-systèmes A et B.}$$

$$u := OFF \Rightarrow \begin{cases} f_a := 0 \\ f_b := 0 \end{cases} \quad \text{où } e_a \text{ et } e_b \text{ sont déterminés les BG des sous-systèmes A et B}$$

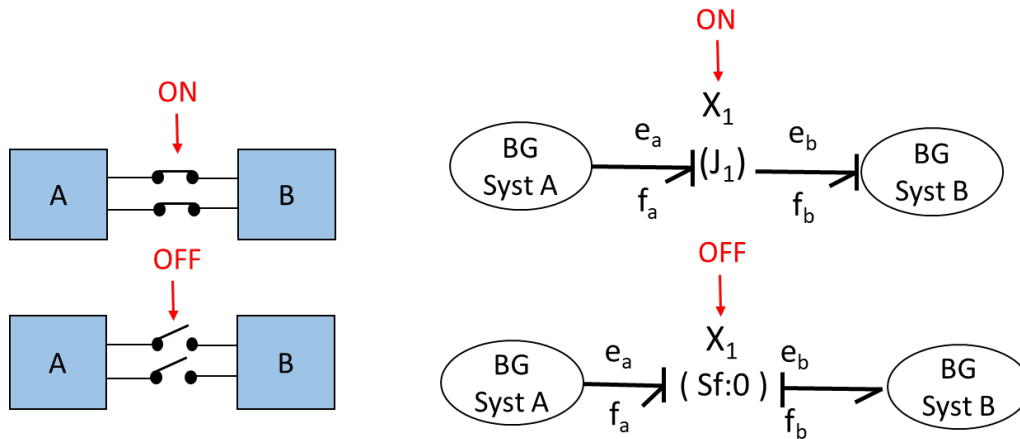


Figure 3.4 : Illustration d'une jonction contrôlée X1.

Sur la figure 3.5, les deux éléments A et B sont soit reliés ensemble, $u := ON$, et soumis au même effort (connexion en parallèle) ou alors l'un deux (élément A) est court-circuité, $u := OFF$.

Les équations décrivant ce fonctionnement sont :

$$u := ON \Rightarrow \begin{cases} e_a := e_b \\ f_b := f_a \end{cases} \quad \text{où } e_b \text{ et } f_a \text{ sont déterminés par les BG des sous-systèmes A et B.}$$

$$u := OFF \Rightarrow \begin{cases} e_a := 0 \\ f_b := 0 \end{cases} \quad \text{où } e_b \text{ et } f_a \text{ sont déterminés les BG des sous-systèmes A et B}$$

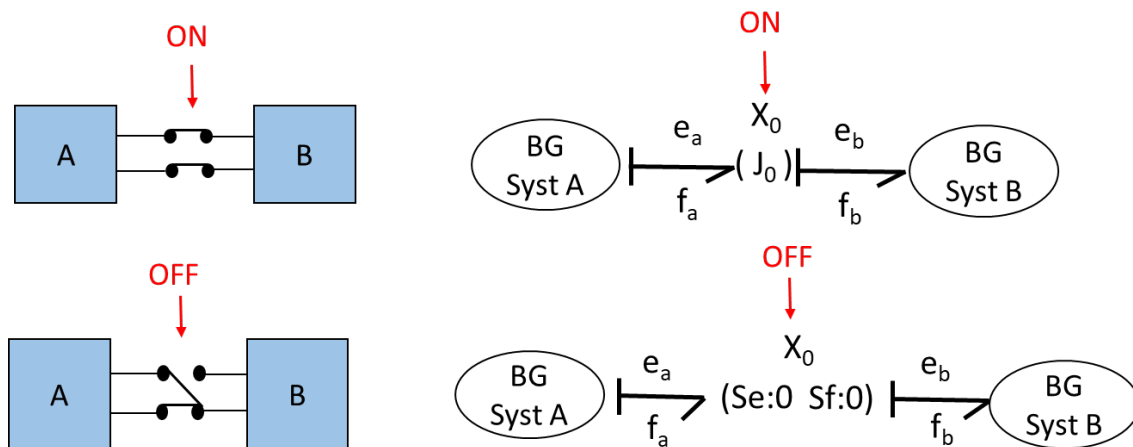


Figure 3.5 : Illustration d'une jonction contrôlée X0.

Remarque : La jonction contrôlée peut dans certains cas, modifier la causalité des bonds qu'elle connecte, cf. Figure 3.4. Si cette inversion de causalité est un inconvénient, le commutateur sera modélisé par une résistance contrôlée.

Définition 3.7 : Résistance contrôlée [Borutsky, 1995]

Une résistance contrôlée est une résistance dont la valeur varie en fonction d'un signal booléen. Si la valeur du signal booléen est ON, la valeur de la résistance est très faible. Si la valeur du signal booléen est OFF, la valeur de la résistance est très grande.

Remarque : Il n'est pas possible d'associer les valeurs théoriques {zéro, infini} à une résistance contrôlée. En effet, si la résistance est en causalité conductance, la valeur de flux donnée par : $f = \frac{1}{R} e$ ne pourrait être calculée.

2.3. Le bond graph piloté par événements

Un mode de fonctionnement correspond à un ensemble d'objectifs à réaliser par le système à un moment donné. La réalisation de ces objectifs repose sur les services rendus par un sous-ensemble de composants, ceux qui sont en service à l'instant considéré. Tout composant qui présente deux modes de fonctionnement (en service, ou non) est un commutateur.

Définition 3.8 : Vecteur de commutation

Soit $M = \{m_i, i \in I_m\}$, l'ensemble des modes de fonctionnement d'un système.

Soit $C = \{c_i, i \in I_n\}$, l'ensemble des commutateurs d'un système.

Soit $b_i = \{ON, OFF\}$, la variable booléenne associée au commutateur $c_i \in C$.

On appelle vecteur de commutation, le vecteur booléen $\beta_i = [b_1, b_2, \dots, b_n]$ associé au mode de fonctionnement $m_i \in M$.

Définition 3.9: Bond Graph Hybride (HBG)

Soit $V = \{\beta_i, i \in I_m\}$, un ensemble de vecteurs de commutation.

Soit $\mathcal{B} = \{BG_i, i \in I_m\}$ un ensemble de Bond Graph.

Un Bond Graph Hybride (HBG) est l'application bijective, définie par l'équation 3.1, qui associe à tout vecteur β_i un bond graph BG_i .

$$\begin{aligned} HBG : V &\rightarrow \mathcal{B} \\ \beta_i &\mapsto BG_i \end{aligned} \quad (3.1)$$

Définition 3.10 : Bond Graph Hybride piloté par événements

Un HBG est piloté par événements lorsque la valeur des vecteurs de commutation est définie par un automate déterministe $A = (Q, T, q^0)$ où Q est l'ensemble des états, T est l'ensemble des transitions d'un état vers un autre et q^0 est l'état initial.

Dans notre cas, l'automate déterministe choisi est celui qui gère les différents modes de fonctionnement. Il est défini par le modèle générique de composant présenté chapitre 1, cf. définition 1.1. Il détermine à chaque instant, cf. Figure 3.6 :

- Le mode de fonctionnement courant en fonction des demandes des utilisateurs et de la disponibilité des services élémentaires rendus par les composants du système.
- Les versions permettant de réaliser les objectifs du mode avec le moindre niveau de dégradation. Chaque version correspond à un BG spécifique et est déterminée par la valeur du vecteur β_i associée au mode de fonctionnement m_i .

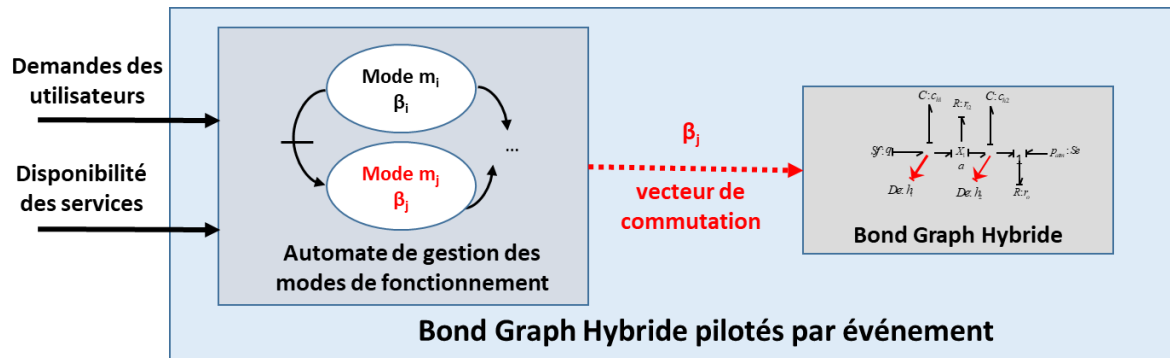


Figure 3.6 : Bond Graph Hybride pilotés par événement

Définition 3.11 : EDHBG

Nous appelons EDHBG, le bond graph hybride piloté par événements, défini par :

$$EDHBG = (A(M, T, m^0), HBG) \tag{3.2}$$

où

- $M = \{m_i, i \in I_m\}$ est l'ensemble des modes de fonctionnement du système, chaque mode correspond à un état de l'automate et à un vecteur β_i .
- $T = \{t_{ij}, i, j \in I_m\}$ est l'ensemble des transitions, chacune d'elle est définie par $t_{ij} = \{m_i, m_j, c_{ij}\}$ où m_i est le mode initial, m_j est le mode destination et c_{ij} est la condition d'activation.
- m^0 est le mode initial dans le système se trouve au démarrage.
- HBG est le bond graph hybride représentant l'ensemble des dynamiques continues inhérentes à chaque mode de fonctionnement.

3. Diagnostic des systèmes dynamiques hybrides

3.1. Equation de redondance analytique généralisée

Bond Graph classique

Comme expliqué dans le chapitre 2, l'évaluation de la disponibilité des services élémentaires s'étudie directement à partir de l'évaluation numérique des résidus générés à partir de l'expression algébriques des relations de redondance analytique (RRA).

La procédure qui permet de générer ces RRA à partir d'un BG mis en causalité préférentielle dérivée et où les détecteurs ont été dualisés est détaillée dans le chapitre 2. Pour toute jonction reliée au moins à une variable connue (capteur ou source) par un chemin causal, une RRA est obtenue en écrivant la somme des efforts (jonction 1) ou la somme des flux (jonction 0).

Exemple :

Considérons le circuit donné Figure 3.7 où R1, R2 et R3 sont trois éléments résistifs. La tension e_m aux bornes de R2 et le courant i_m traversant R1 sont mesurés. Le BG associé est donné sur la même figure. Le BG où les détecteurs sont dualisés est représenté figure 3.8.

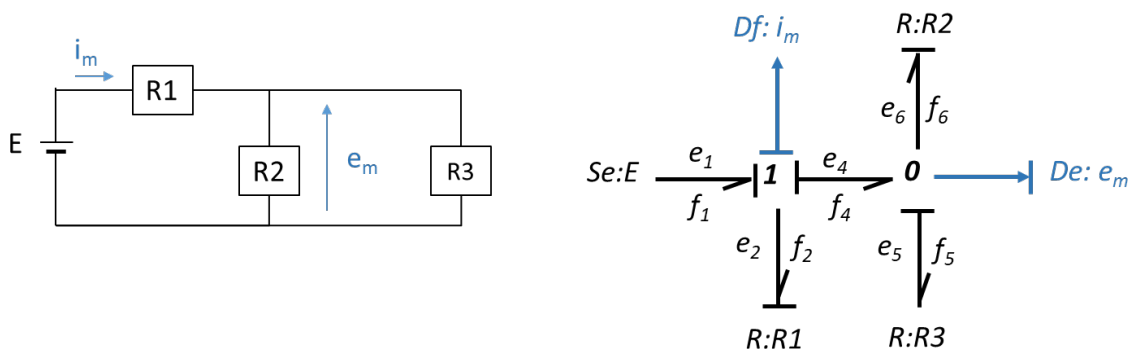


Figure 3.7 : Circuit électrique support d'exemple et BG associé.

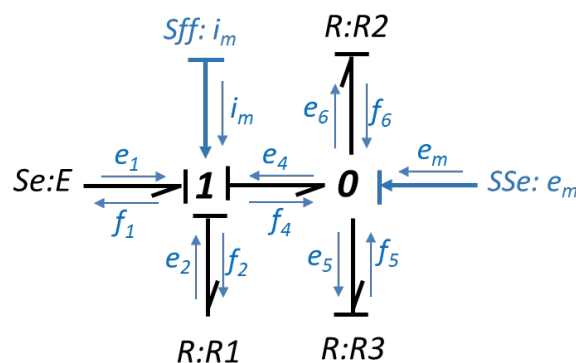


Figure 3.8 : BG dualisé du circuit électrique présenté figure 3.5.

La première RRA (eq. 3.3) est obtenue en écrivant la somme des efforts au niveau de la jonction 1 puis en éliminant les variables inconnues en suivant les chemins causaux représentés Figure 3.9a.

$$RRA1 = e_1 - e_2 - e_4 = E - R1 \cdot i_m - e_m \quad (3.3)$$

La deuxième RRA (eq. 3.4) est obtenue en écrivant la somme des flux au niveau de la jonction 0 puis en éliminant les variables inconnues en suivant les chemins causaux représentés Figure 3.9b.

$$RRA2 = f_4 - f_6 - f_5 = i_m - \frac{e_m}{R2} - \frac{e_m}{R3} \quad (3.4)$$

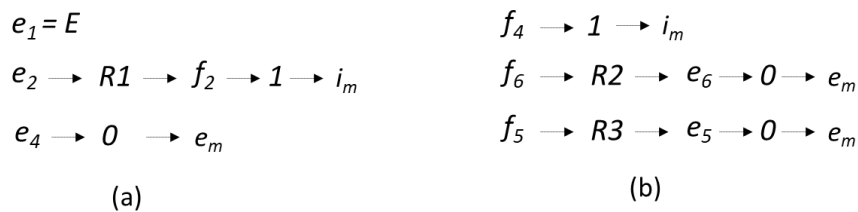


Figure 3.9 : Chemins causaux utilisés pour l'élimination des variables inconnues

Bond Graph Hybride

La méthode permettant de générer les RRA directement à partir du BG classique peut être généralisée aux systèmes hybrides présentant plusieurs modes de fonctionnement. En effet, il suffit lors de la recherche des chemins causaux permettant d'exprimer une variable inconnue en fonction de variables uniquement connues, de multiplier la variable d'effort ou de flux concernée par la variable booléenne $b_i \in [0, 1]$ lorsque le chemin causal traverse une jonction contrôlée X_i . La matrice de signature des fautes peut alors faire apparaître des variables booléennes relatives à différents modes de fonctionnement.

Définition 3.12 : Relation de Redondance Analytique Généralisée (RRAG).

Une RRAG est relation analytique dont la forme est donnée par la relation xx , où K est l'ensemble des variables connues et β le vecteur de commutation.

$$\beta^T \cdot f(K) = 0 \quad (3.5)$$

Exemple :

Reprenons le circuit donné Figure 3.7 et supposons qu'il existe un commutateur X permettant ou non de mettre en service l'élément R3, cf. figure 3.10. X est contrôlée par une variable booléenne $b \in [0, 1]$ prenant la valeur 1 lorsque R3 est en service et la valeur 0 sinon. Le bond graph hybride dualisé associé à ce nouveau circuit est donné sur la même figure.

Deux RRA peuvent être générées. La première est donnée par l'équation 3.3. La seconde est donnée par l'équation 3.6. En effet, si la jonction X0 reçoit le signal de commande $b = 0$, la résistance R3 est connectée à une source d'effort nul et $e_5 = 0$.

$$RRA2 = f_4 - f_6 - b \cdot f_5 = i_m - \frac{e_m}{R2} - x \cdot \frac{e_m}{R3} \quad (3.6)$$

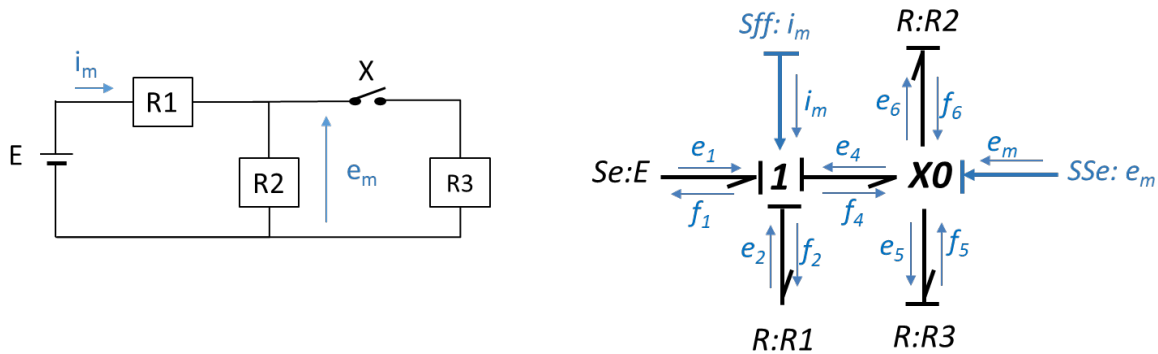


Figure 3.10 : Circuit électrique support d'exemple et HBG dualisé associé.

3.2. Diagnostic en ligne

L'élaboration de RRAG, à partir d'un HBG, pour détecter et isoler des fautes et donc évaluer la disponibilité des services élémentaires est une méthode éprouvée. Cette approche qui repose sur un parcours des chemins causaux et sur l'expression mathématique des modèles de comportement (équations constitutives) associés aux éléments BG, peut parfois s'avérer fastidieuse.

Partant de l'idée que le BG est à lui seul, une modélisation dynamique du comportement du système qu'il représente, il permet, si on le considère comme modèle de référence, d'implémenter un diagnostic en ligne sans passer par l'expression mathématique des RRA. En effet, ces dernières sont implicitement contenues dans le bond graph puisqu'elles correspondent aux contraintes structurelles associées aux jonctions. Elles peuvent être directement vérifiées en ligne, via un Bond Graph Diagnostiqueur.

Définition 3.13 : Bond Graph Diagnostiqueur (BGD).

Un BGD est un BG ou un HBG, normalement utilisé pour simuler ou modéliser le comportement dynamique d'un système où :

- Les détecteurs d'effort De et de flux Df ont été dualisés, respectivement en source modulée d'effort MSe et en source modulée de flux MSf . Ces sources sont appelées sources dualisées et représentent des sources d'information.
- Un détecteur d'effort De , respectivement un détecteur de flux Df , a été ajouté à chaque bond connectant la source de flux dualisée (respectivement d'effort dualisé) au reste du BG. Ces points de connexions sont appelés jonctions dualisées.

- Une causalité dérivée préférentielle a été choisie pour les éléments C et I.

Si chaque source dualisée du BGD, correspondant à un détecteur du BG de simulation, reçoit en entrée le signal directement mesuré par le capteur installé sur le système automatisé réel, alors les signaux mesurés par les capteurs virtuels ajoutés au BGD représentent directement l'évolution de la valeur des résidus.

Pour illustrer ce postulat, considérons les deux cas représentés Figures 3.11 et 3.12.

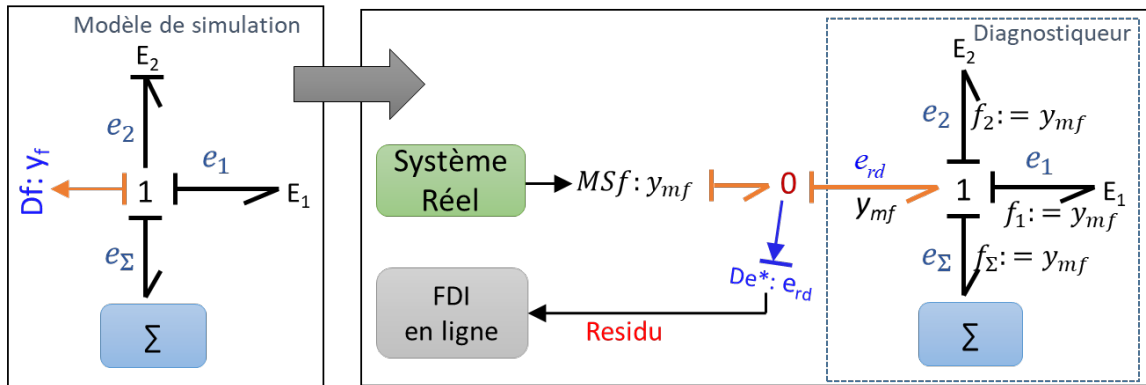


Figure 3.11 : BGD pour une jonction 1.

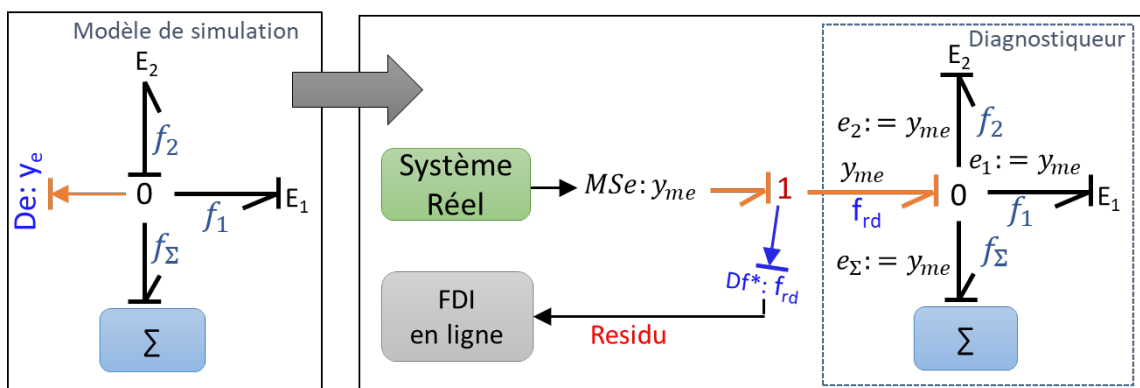


Figure 3.12 : BGD pour une jonction 0.

La partie gauche des Figures 3.11 et 3.12 représente un BG utilisé pour simuler le comportement dynamique d'un système en l'absence de défaillance. Les éléments E1, E2 sont des éléments BG tels que des éléments R, I ou C. Σ représente le reste du BG.

Si ces éléments sont connectés à une jonction 1 (Figure 3.11) et que la variable de flux est connue, mesurée par le détecteur Df , la RRA qui peut être déduite est classiquement donnée par la somme des efforts (Eq. 3.7) où les variables e_1 et e_2 sont déterminées par les équations constitutives, $e_1 = \Phi_{E1}(\cdot)$, $e_2 = \Phi_{E2}(\cdot)$, associées aux éléments E1 et E2 et où e_Σ est déterminé par le reste du BG.

$$RRA1 = e_1 + e_2 + e_\Sigma \quad (3.7)$$

Le BGD, partie droite de la Figure 3.11, est obtenu en remplaçant le détecteur Df par une source $MSf: y_{mf}$ où y_{mf} est directement la valeur de la grandeur de flux mesurée par le capteur réel. En ajoutant le capteur virtuel $De^*: e_{rd}$, on permet une évaluation numérique de la RRA comme le montre l'équation 3.8.

$$e_{rd} = e_1 + e_2 + e_\Sigma = \text{évaluation de RRA1} \quad (3.8)$$

Le même raisonnement peut être tenu pour la jonction 0 (Figure 3.12) où le capteur virtuel $Df^*: f_{rd}$ évalue la RRA obtenue classiquement au niveau de la jonction 0 donnée par l'équation 3.9.

$$\begin{aligned} RRA0 &= f_1 + f_2 + f_\Sigma \\ &= f_{rd} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Comme illustré sur la Figure 3.13, le BGD reçoit les mêmes commandes que le système à contrôler et les mêmes mesures que celles faites sur le système réel. L'état de ses jonctions contrôlées est également le reflet de l'état d'activation (en service, on non) des composants réels. Vérifier les sommes algébriques au niveau des jonctions dualisées, revient à vérifier que le comportement du système réel n'a pas dévié par rapport au comportement prédit par le modèle de bon fonctionnement. En effet, si la valeur d'un paramètre caractéristique d'un composant réel est modifiée suite à une défaillance, alors la valeur de l'élément R, C ou I qui la représente au niveau du BG est fautive et les lois de conservations d'énergie ou de comportement dynamique, exprimées par les relations entrées-sorties, ne sont plus vérifiées.

De manière similaire à l'approche classique présentée précédemment, une matrice de signature des fautes est nécessaire pour localiser le défaut et déterminer le (ou les) service(s) élémentaire(s) affecté(s). Celle-ci s'obtient directement à partir du BGD en suivant les chemins causaux.

L'avantage principale de cette technique est qu'elle permet d'évaluer les résidus sans avoir besoin de formuler mathématiquement l'expressions des RRA. Un logiciel tel que 20sim 4C permet d'implémenter le BGD et de lui injecter en temps réel les mesures faites sur le système réel.

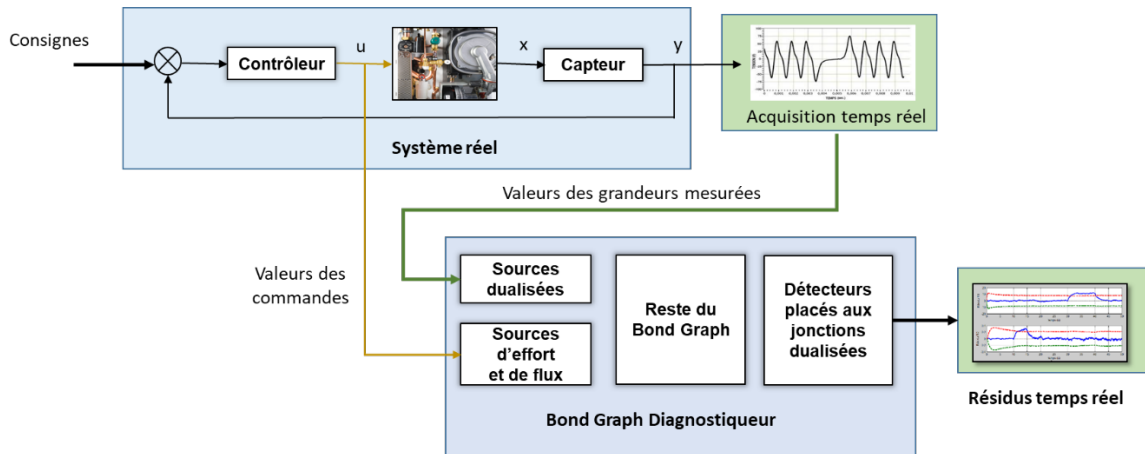


Figure 3.13 : Détection de défauts en temps réel.

3.3. Diagnostic robuste

En pratique, il est très difficile de déterminer précisément la valeur de certains paramètres caractéristiques des composants du système, ce qui peut nuire à la robustesse des algorithmes de détection et de localisation de défauts et surtout générer de fausses alarmes.

Pour exprimer l'écart existant entre la valeur vraie d'un paramètre et la valeur qu'il est supposé avoir, appelée valeur nominale, une incertitude multiplicative ou additive et ajoutée à la valeur nominale. La valeur d'une résistance sera par exemple donnée par le constructeur à plus ou moins 5% près. Ceci signifie, que la valeur réelle de la résistance appartient à un intervalle défini à partir d'une valeur nominale et de seuils minimum et maximum fixés en fonction de cette valeur nominale. Ceci s'exprime mathématiquement par les relations (3.10) et (3.11) :

$$P = P_N \pm \Delta P \quad (3.10)$$

$$P = P_N(1 \pm \delta_P) \quad (3.11)$$

où :

- P est la valeur vraie mais inconnue du paramètre. Elle appartient à un intervalle.
- P_N est la valeur nominale du paramètre. C'est celle qui est estimée ou mesurée.
- ΔP est l'incertitude absolue bornée par valeur minimale ΔP_{min} et une valeur maximale ΔP_{max} . En général, $\Delta P_{min} = -\Delta P_{max}$.
- $\delta_P = \frac{\Delta P}{P_N}$ est l'incertitude relative.

La méthode pour prendre en compte les incertitudes paramétriques dans le Bond Graph est connue [Djeziri et al., 11]. Le résultat est un LFT BG (Linear Fractional Transformation Bond

Graph). Pour illustrer la méthode, considérons une résistance dont la valeur vraie R est incertaine.

Considérons, tout d'abord, que cette résistance soit en causalité résistance (le flux f_R est imposé, c'est l'entrée, et l'effort e_R est la sortie). L'équation constitutive associée à cette résistance peut alors s'écrire :

$$e_R := R \cdot \Phi(f_R) \tag{3.12}$$

où $\Phi(f_R)$ est une fonction du flux.

En utilisant la valeur nominale R_N de la résistance et son incertitude δ_R , comme proposé dans l'équation, (3.11), l'équation (3.12) peut se réécrire :

$$\begin{aligned} e_R &:= R_N \cdot (1 \pm \delta_R) \cdot \Phi(f_R) && (3.13) \\ &:= \underbrace{R_N \cdot \Phi(f_R)}_{e_{R_N}} \pm \underbrace{\delta_R \cdot R_N \cdot \Phi(f_R)}_{e_{inc}} \\ &:= e_{R_N} \pm \delta_R \cdot e_N \end{aligned}$$

où e_N est la valeur nominal de l'effort et e_{inc} son incertitude.

En l'absence d'incertitude ($\delta_R = 0$), l'équation (3.13) donne directement e_{R_N} . Le schéma bloc et sa traduction bond graph sont donnés par la partie haute de la Figure 3.14.

La partie basse de la même figure montre comment l'incertitude sur la valeur nominale de la résistance est prise en compte. Sur le modèle Bond Graph équivalent, Le détecteur d'effort virtuel $De^* : z_r$ est ajouté pour mesurer e_{R_N} et l'incertitude $e_{inc} = \delta_R \cdot e_{R_N}$ est ajoutée à e_{R_N} en utilisant la source d'effort $MSe : w_r$.

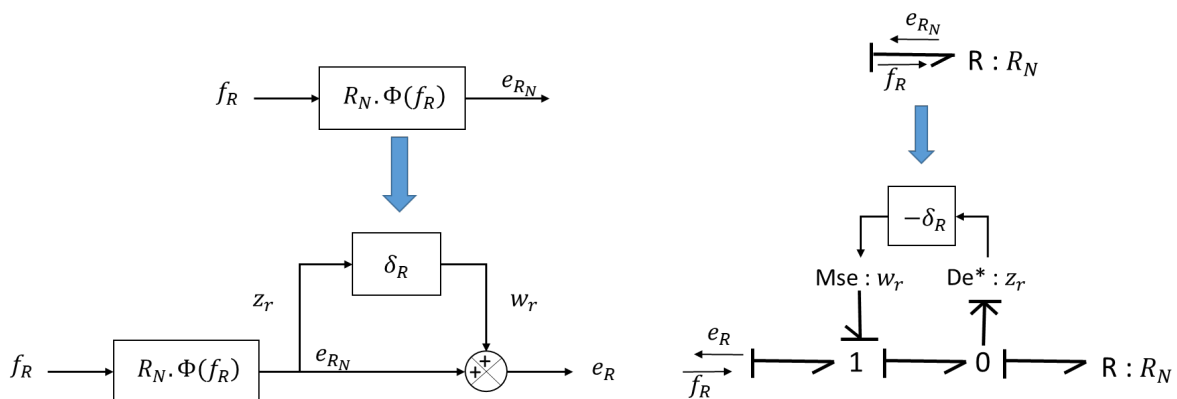


Figure 3.14 : Représentation schéma bloc et bond graph d'une résistance à valeur incertaine (causalité résistance).

Considérons maintenant que la résistance soit en causalité conductance (l'effort e_R est imposé, le flux f_R est la sortie). L'équation constitutive associée à cette résistance peut alors s'écrire :

$$f_R := \frac{\Phi^{-1}(e_R)}{R} \quad (3.14)$$

En utilisant la valeur nominale R_N de la résistance et son incertitude δ_R , comme proposé dans l'équation, (3.11), l'équation (3.15) peut se réécrire :

$$\begin{aligned} f_R &:= \frac{\Phi^{-1}(e_R)}{R_N(1 \pm \delta_R)} & (3.15) \\ &:= \frac{f_{R_N}}{(1 \pm \delta_R)} = \frac{f_{R_N} (1 \pm \delta_R \mp \delta_R)}{(1 \pm \delta_R)} \\ &:= f_{R_N} \pm f_{R_N} \underbrace{\frac{-\delta_R}{1 \pm \delta_R}}_{\delta'_R} = f_{R_N} \pm \underbrace{f_{R_N} \cdot \delta'_R}_{f_{inc}} \end{aligned}$$

En l'absence d'incertitude ($\delta_R = 0$), l'équation (3.15) donne directement f_{R_N} . Le schéma bloc et sa traduction bond graph sont donnés par la partie haute de la Figure 3.15.

La partie basse de la même figure montre comment l'incertitude sur la valeur nominale de la résistance est prise en compte. Sur le modèle Bond Graph équivalent, Le détecteur de flux virtuel $Df^* : z_r$ est ajouté pour mesurer f_{R_N} et l'incertitude $f_{inc} = f_{R_N} \cdot \frac{-\delta_R}{1 \pm \delta_R}$ est ajoutée à f_{R_N} en utilisant la source de flux $MSf : w_r$.

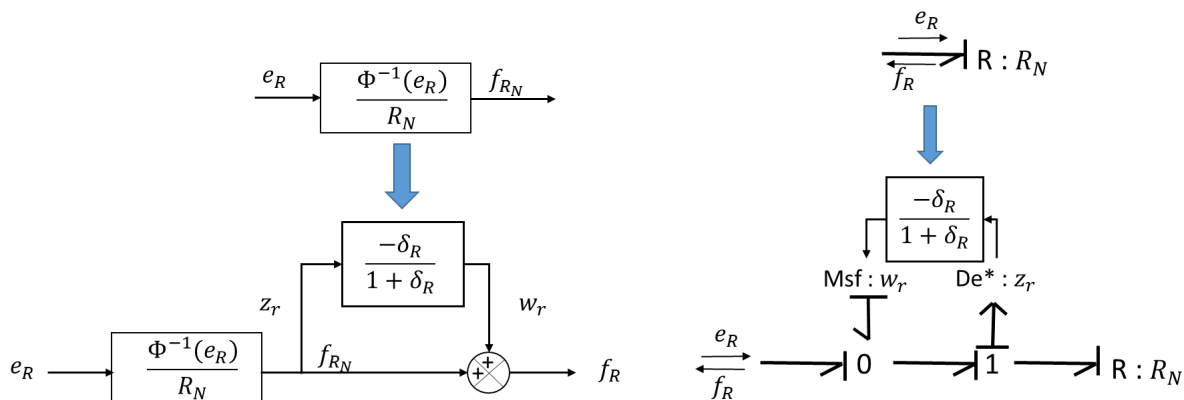


Figure 3.15 : Représentation schéma bloc et bond graph d'une résistance à valeur incertaine (causalité conductance).

Si les incertitudes paramétriques sont intégrées comme proposé, à un bond graph hybride, on obtient un LFT BGH à partir duquel des Relations de Redondance Analytique Généralisées

(RRAG) peuvent être déduites. Ces dernières, au lieu de ne dépendre que des variables connues et du vecteur de commutation, comme proposé par l'équation (3.5), vont également dépendre des incertitudes paramétriques.

Pour fixer les intervalles de tolérance de ces incertitudes paramétriques, il est supposé que chaque intervalle est symétrique ($\delta \in [\delta_{min}, \delta_{max}]$ et $\delta_{min} = -\delta_{max}$). Ce sont alors les valeurs δ_{max} qui sont utilisées dans la construction du LFT BGH. La détection de défauts ne consiste plus à vérifier que le résultat de l'évaluation d'une RRAG est nul mais à vérifier qu'il appartient à un intervalle de tolérance délimité par deux valeurs seuils, elles même fonctions des incertitudes liées aux paramètres apparaissant dans la RRAG.

Une RRA, rappelons-le, consiste à vérifier que la somme des flux ou des efforts, calculée au niveau d'une jonction est nulle. Si chaque effort ou chaque flux est exprimé comme proposé par les équations (3.13) et (3.15) (somme d'une partie nominale plus ou moins une partie incertaine), le résidu R obtenu à partir de l'évaluation d'une RRAG peut s'écrire, comme le montre l'équation (3.16), sous la forme d'une partie nominale notée $R_N(y, u, \beta)$ et d'une partie incertaine, notée $R_\delta(y, u, \beta, \delta)$ où y représente les sorties du système, u les entrées du système, β le vecteur de commutation et δ les incertitudes.

$$R = R_N(y, u, \beta) - R_\delta(y, u, \beta, \delta) \quad (3.16)$$

La partie nominale $R_N(\cdot)$ du résidu est évaluée à partir du Bond Graph Diagnostiqueur (nominal BGD) où les paramètres sont tous représentés par leur valeur nominale.

Le LFT Bond Graph diagnostiqueur (LFT BGD), construit en utilisant les valeurs nominales et les incertitudes maximales des paramètres incertains, permet d'évaluer $R_N(\cdot) + R_{\delta_{max}}(\cdot)$.

La soustraction des résultats fournis par le nominal BGD et le LFT BGD permet d'obtenir $R_{\delta_{max}}(\cdot)$ et par voie de conséquence, $R_{\delta_{min}}(\cdot) = R_{\delta_{max}}(\cdot) - R_N(\cdot)$.

Une faute est détectée, si la valeur du résidu mesurée par le BGD n'appartient pas à $[R_{\delta_{min}}(\cdot), R_{\delta_{max}}(\cdot)]$.

La solution proposée pour générer des résidus robustes est résumée Figure 3.16. Elle est entièrement démontrée dans la publication référencée [Abdallah et al, 2018].

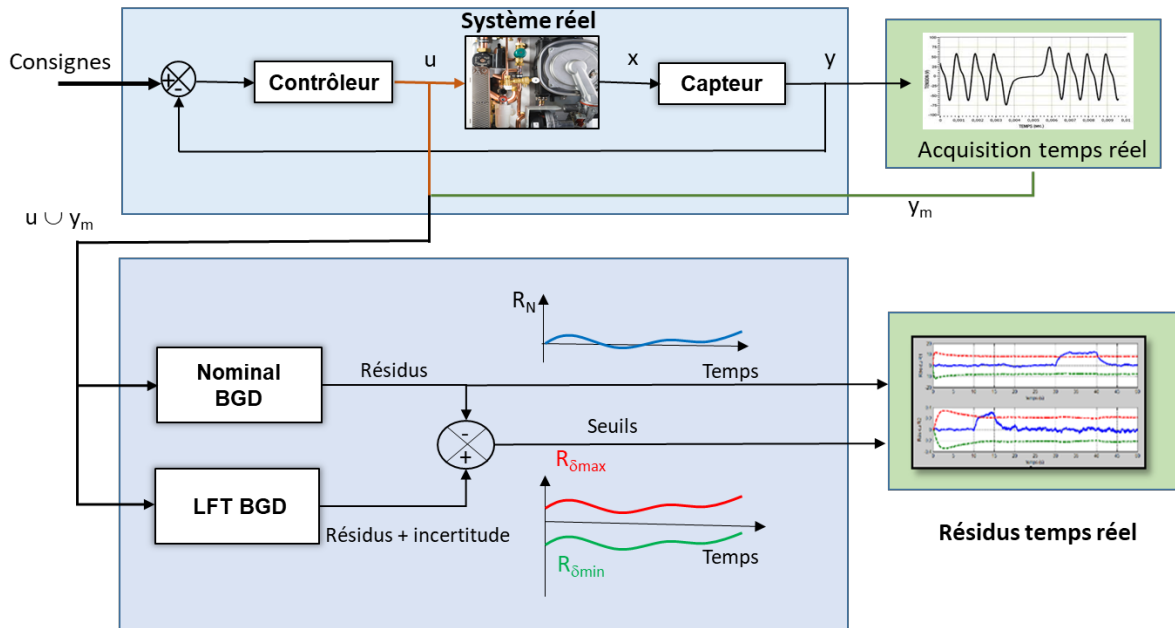


Figure 3.16 : Evaluation robuste des résidus.

4. La gestion des modes de fonctionnement

Le BGD proposé permet d'évaluer la disponibilité opérationnelle des services élémentaires puis par une approche ascendante de gérer correctement les différents modes de fonctionnement du système. Cette gestion repose sur les définitions suivantes.

Définition 3.14 : Disponibilité opérationnelle d'un service élémentaire.

Rappel : Un BG est un graphe $BG_i = (S, J, B)$ où $S \cup J$ est l'ensemble des nœuds et B l'ensemble des bonds. S est l'ensemble des services élémentaires et J l'ensemble des connecteurs permettant d'associer ces services élémentaires pour réaliser des services de plus haut niveau.

La disponibilité opérationnelle du service élémentaire $s \in S$ est définie par l'application suivante :

$$DO(s): S \rightarrow (0,1)$$

$$s \mapsto DO(s) = \begin{cases} 0 & \text{si le service } s \text{ est détecté défaillant} \\ & \text{par le diagnostiqueur utilisant } BG_i \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.17)$$

Définition 3.15 : Disponibilité d'une version.

Rappel : Une version v_i est représentée par un BG $BG_i = (S, J, B) \in \mathcal{B}$.

Soit V l'ensemble des versions. La disponibilité d'une $v_i \in V$ est définie par l'application suivante :

$$D(v_i): V \rightarrow (0,1) \quad (3.18)$$

$$v_i \mapsto D(v_i) = \prod D(s) | s \in S$$

où \prod correspond à un ET logique.

Définition 3.16 : Disponibilité d'une mission.

Soit MIS l'ensemble des missions. La disponibilité d'une mission $mis_i \in MIS$ est définie par l'application suivante :

$$D(mi_i): MIS \rightarrow (0,1) \quad (3.19)$$

$$mis_i \mapsto D(mis_i) = \sum D(v_j) | v_j \text{ soit une version permettant de réaliser } mis_i$$

où \sum correspond à un OU logique.

Définition 3.17 : Disponibilité d'un mode de fonctionnement.

Soit M l'ensemble des modes de fonctionnement. La disponibilité d'un mode de fonctionnement $m_i \in M$ est définie par l'application suivante :

$$D(m_i): M \rightarrow (0,1) \quad (3.20)$$

$$m_i \mapsto D(mi_i) = \prod D(mis_i) | mis_i \text{ soit une mission appartenant à } m_i$$

où \prod correspond à un ET logique.

L'évaluation de la disponibilité d'un mode de fonctionnement permet de savoir s'il est possible ou non de rester dans le mode courant et/ou de basculer dans un autre mode en fonction des résultats donnés par le BGD. Elle se fait en fonction de la disponibilité des services élémentaires selon les relations (3.17) à (3.20). Associée aux objectifs des utilisateurs, elle intervient dans l'expression des conditions d'activation associées aux transitions entre modes.

Le système peut rester dans le mode courant tant que sa disponibilité est égale à 1. Si celle-ci devient égale à 0, le système doit basculer vers un autre mode pour lequel la disponibilité est de 1. De manière à éviter des situations de blocage et des conséquences dramatiques, il doit exister dans tout système bien conçu un mode dans lequel les missions seront d'assurer la sécurité des opérateurs, de l'environnement et des équipements.

Chaque changement de mode s'accompagne de la modification des valeurs du vecteur β permettant de mettre en service les composants impliqués dans la réalisation des missions du mode choisi. Ce vecteur β est également transmis au BGD. Il pilote les jonctions contrôlées du BGD de manière à avoir à chaque instant un modèle qui soit le reflet exact, en l'absence de

défaillance, de la configuration matérielle choisie pour réaliser les objectifs du mode. Cette synchronisation entre le système réel et le modèle de comportement est la condition nécessaire à la détection et la location de défauts. L'ensemble de la procédure est représenté Figure 3.17.

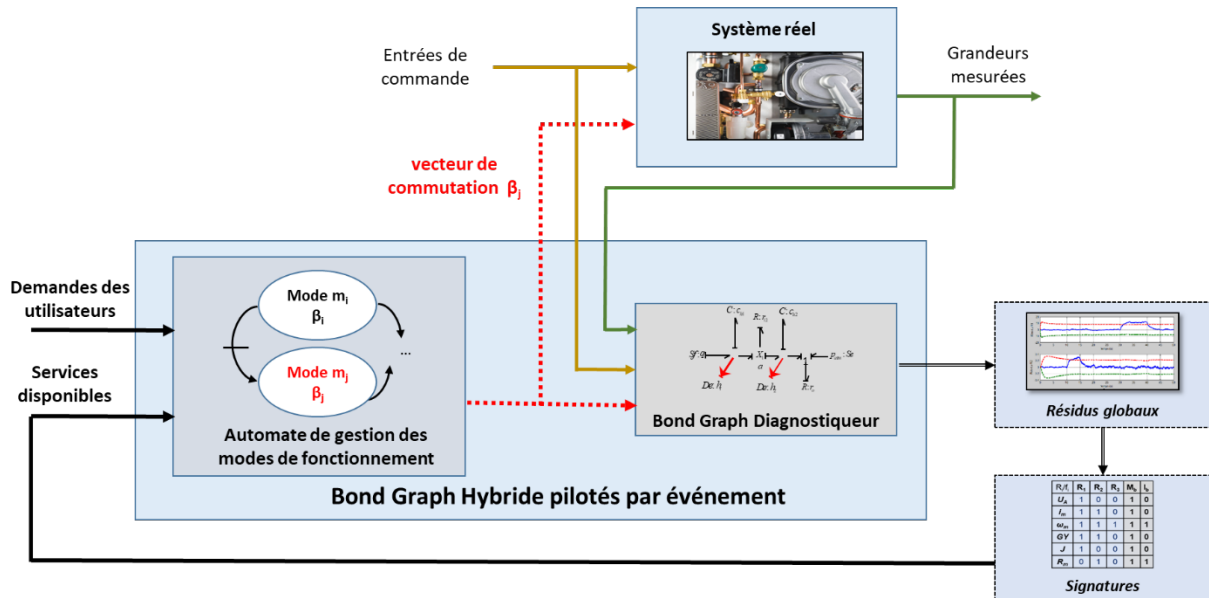


Figure 3.17 : Le Bond Graph Hybride piloté par événements et synchronisé avec le système réel.

5. Applications

5.1. Production et utilisation d'hydrogène vert

Le bond Graph piloté par événement a été développé et appliqué dans le cadre du projet de recherche « Modélisation et Diagnostic des Systèmes multi-sources pour la production et le stockage d'Hydrogène (MoDiS-H2) ». Les budgets attribués par la région Nord pas de Calais, l'Université de Lille et l'école Polytech'Lille ont permis de financer l'achat d'une plate-forme expérimentale de production et d'utilisation d'hydrogène vert, voir Figure 3.18. L'idée est de stocker l'excès de puissance produite par les énergies renouvelables sous forme d'hydrogène via l'électrolyse de l'eau et de restituer cette puissance via une pile à combustible lorsque la puissance produite par les sources renouvelables est inférieure à la demande.

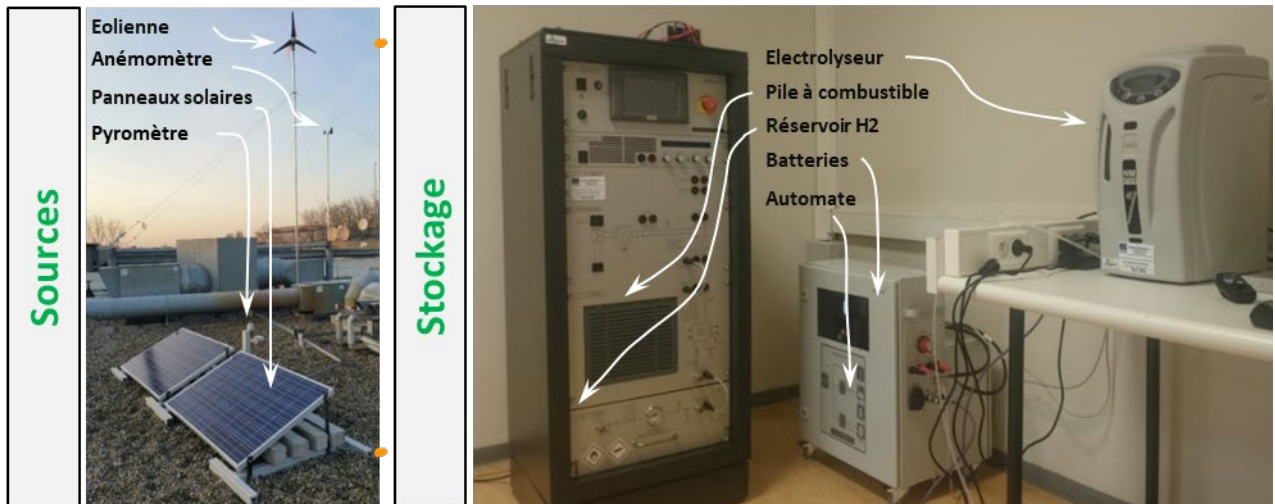


Figure 3.18 : la plate-forme expérimentale de production et d'utilisation d'hydrogène vert.

La plate-forme se compose de :

- Deux panneaux photovoltaïques de 200 Watt chacun connectés en parallèle.
- D'une éolienne de diamètre 1,20m délivrant une puissance maximale entre 350W et 400W à 12,5 m/s de vent.
- Deux batteries 12V CC 55 Ah.
- Un électrolyseur de technologie PEM capable de produire 30 litres standards d'hydrogène par heure et consommant jusqu'à 400 Watt.
- Une pile à combustible de technologie PEM pouvant générer une puissance allant jusque 1500 W.
- Trois bouteilles destinées au stockage de l'hydrogène sous forme d'hydrure métallique (760 NI à 14 bars).
- Un automate de contrôle commande.
- Une charge électronique
- Divers capteurs (anémomètre, pyromètre, température, pression, courant, tension, débit d'hydrogène).

Le schéma fonctionnel de cette installation est donné Figure 3.19. On y remarque la présence de plusieurs interrupteurs permettant de connecter ou non les principaux composants de l'installation à un bus commun de 24V DC. L'éolienne sera, par exemple, mise en court-circuit si la vitesse du vent dépasse 30m/s. La pile à combustible sera mise en service, à condition que le stock d'hydrogène soit suffisant, si la puissance produite par l'éolienne et les panneaux solaires ne suffit pas à couvrir la charge.

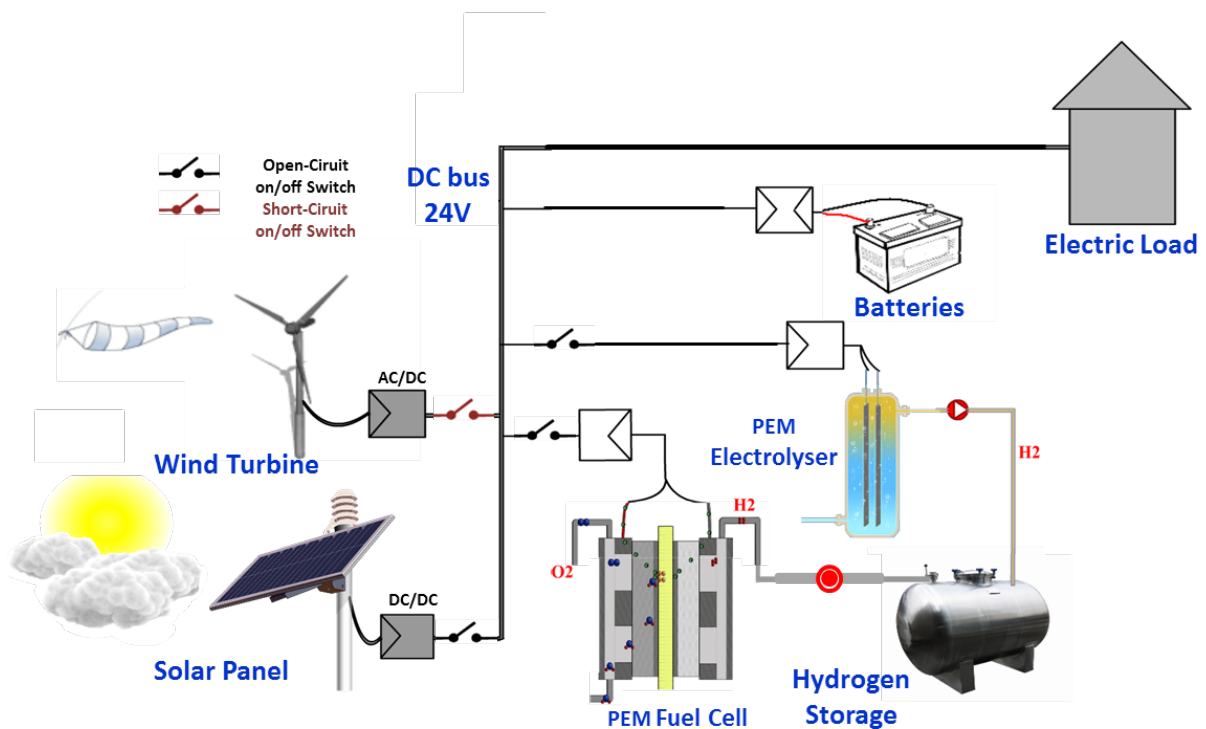


Figure 3.19 : Schéma fonctionnel de la plate-forme expérimentale présentée figure 3.18.

Le EDHBM de ce système a été développé sous 20-sim (voir Figure 3.20). Les modèles des différents composants (panneaux solaires, éolienne, électrolyseur, pile, batterie, stockage) ont été validés en comparant les sorties du modèle avec les sorties des composants réels lorsque modèle et système réel sont dans le même mode de fonctionnement et soumis aux mêmes entrées de commande.

Le modèle développé sous 20-sim est entièrement paramétrable. Il est possible de définir, par exemple, la taille et le nombre de panneaux solaires, le diamètre du rotor de l'éolienne, la capacité de production de l'électrolyseur, etc. Ce qui permet à tout concepteur de dimensionner et simuler le comportement d'une future installation. Un fichier de données météo peut également être fourni en entrée du simulateur. La partie diagnostic est également implémentée offrant la possibilité de simuler le comportement du système en présence de défaillances et toute sécurité.

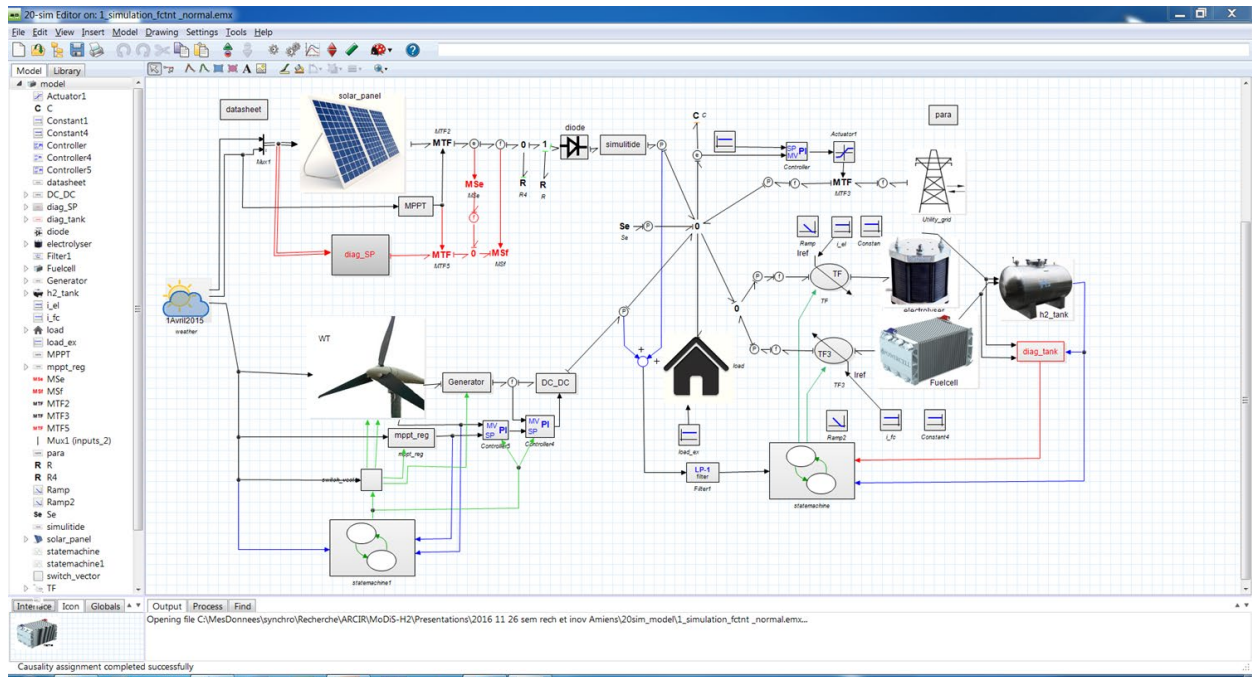


Figure 3.20 : Le modèle global implémenté sous 20-sim.

5.2. Conception automatisés de modèles

Les travaux réalisés dans le cadre du projet MoDis-H2 le montrent, intégrer la simulation dans le développement d'un projet complexe est un avantage concurrentiel pour toute entreprise industrielle car elle permet la validation, le diagnostic et le contrôle de la conception d'un grand système sans grandes dépenses pour des tests en conditions réelles. Elle permet également de tester différents modes de défaillance en toute sécurité. Générer des modèles manuellement à partir de schémas industriels reste cependant une étape consommatrice de temps et source d'erreur. C'est pourquoi, un outil de génération automatique de modèles pour la simulation, la commande et le diagnostic de système hybride pour des applications à des systèmes mécatroniques principalement ferroviaires a été développé dans le cadre de la thèse de Béranger Six [Six, 2018]. Ce travail que j'ai co-encadré avec Belkacem Ould Bouamama, a été réalisé dans le cadre d'un partenariat industriel avec la société CCAMY Systèmes.

Pour des raisons évidentes de confidentialité, les algorithmes proposés dans cette thèse ne peuvent être détaillés. L'architecture générale de l'outil proposé, nommé Emulatio®, est donnée Figure 3.21 [Six and co, 2020].

Chaque composant d'un schéma industriel (électriques, pneumatiques, hydrauliques) est comparé à une librairie BGH d'éléments BG incluant les jonctions contrôlées nécessaires à la représentation des commutateurs. Les connexions entre les éléments du schéma industriel sont également prises en compte et transformées en liens entre éléments BGH. Des règles

existent pour vérifier la cohérence du BGH ainsi obtenu (un composant électrique ne peut par exemple, pas être connecté directement à un composant hydraulique). On obtient ainsi un BG acausal (les causalités ne sont pas affectés aux bond) exprimé dans un langage spécifique appelé Hybrid Bond Graph Modeling Language (HBGML).

L'étape suivante consiste à affecter les causalités pour un maximum de bonds. Des algorithmes sont proposés pour résoudre les conflits causaux. On obtient un BGH causal. Celui peut être transformé en schéma-blocs à des fins de simulation ou exploité pour générer les relations de redondances analytiques généralisées (RRAG) et une matrice de signatures de fautes (FSM) nécessaires si l'on veut faire du diagnostic.

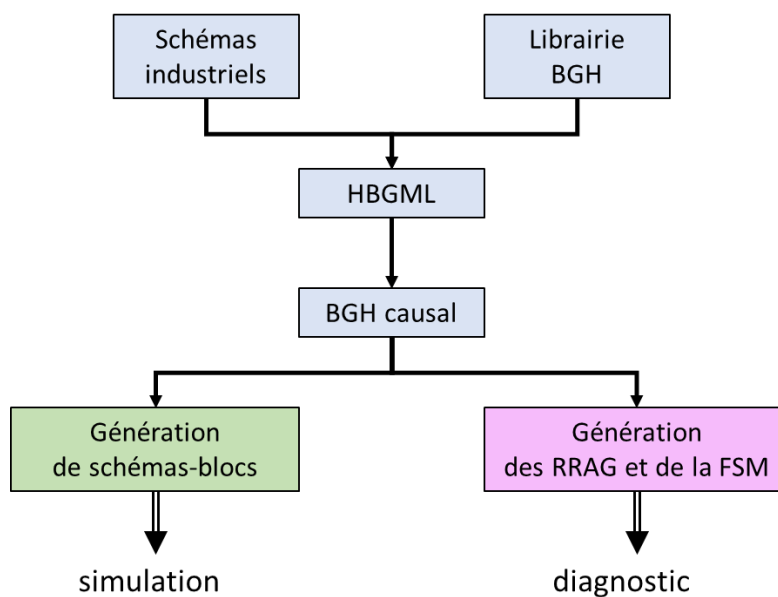


Figure 3.21 : Schéma de principe du logiciel Emulio®.

Conclusion

1. Résumé des différentes contributions

Dans ce mémoire de recherche, j'ai voulu montrer comment les travaux que j'ai menés depuis ma thèse de doctorat concourent à améliorer la sûreté de fonctionnement des systèmes automatisés et plus particulièrement, celle des systèmes que j'ai définis comme hybrides car présentant à la fois une dynamique continue et une dynamique discrète. La dynamique discrète est due à la présence de commutateurs qui permettent de mettre en service ou de déconnecter des composants en fonction des conditions internes et externes au système. Un système est conçu pour répondre à des objectifs d'utilisation. Il repose pour ce faire sur un ensemble de composants qui transforment des données d'entrées en données de sorties via une trajectoire définie par une loi physique. Plusieurs facteurs peuvent modifier le comportement du système au cours du temps. Trois au moins peuvent être cités. Le premier est une modification volontaire de la part de l'utilisateur des objectifs à réaliser par le système. Ceci se traduit par de nouvelles valeurs à atteindre en sortie. Le deuxième est lié la modification des valeurs des entrées du système. Les trajectoires doivent alors être adaptées si l'on veut garantir des sorties constantes. Le troisième est lié à la modification d'une loi physique associé à un composant suite à la défaillance totale ou partielle de ce composant. Cette modification doit être compensée par d'autres composants si l'on veut garder des sorties constantes.

Pour prendre en compte ses multiples possibilités de fonctionnement, le bond graph piloté par événements (EDHBG) est proposé. Il représente d'un point de vue fonctionnel, l'ensemble des services et leur structuration en modes de fonctionnement. Il définit également les conditions de passage d'un mode vers un autre en fonction d'un modèle comportemental défini par le bond graph. Le bond graph offre une représentation énergétique des procédures mises en

œuvre pour transformer données d'entrées en données de sorties. Son aspect causal, permet d'évaluer en temps réel, si la valeur d'une sortie peut être atteinte ou non, en fonction de la valeur d'une entrée et en fonction d'un dysfonctionnement détecter et éventuellement localiser par ce même bond graph.

Un résumé plus précis des contributions associées à chaque chapitre est maintenant donné.

1.1. Contributions scientifiques liées au chapitre 1

Le chapitre 1 présente le concept d'instrument intelligent et le modèle générique de composant. Il définit les notions de services, missions et mode de fonctionnement.

Les contributions associées à ce chapitre sont les suivantes.

- La définition d'une architecture fonctionnelle pour décrire un instrument intelligent. Celle-ci a été discutée dans le cadre d'échanges avec le groupe de travail « capteurs intelligents » du CIAME (Comité Interprofessionnel pour l'Automatisation et la Mesure) intégré à l'APIST (Association pour la Promotion de l'Instrumentation Scientifique et Technique). L'architecture proposée définit les fonctions des capteurs intelligents tout en offrant une méthodologie d'évaluation. L'ensemble des résultats est publié dans un ouvrage de synthèse [Robert et al, 93].

Dans le cadre de collaborations avec plusieurs services médicaux du CHRU de Lille, l'architecture fonctionnelle proposée à contribuer à l'amélioration de la surveillance de l'anesthésie [Gehin, 94], de la surveillance de la fonction ventilatoire du nouveau-né [Logier et al. 93a] et de la surveillance du phénomène d'ischémie myocardique [Logier et al., 94].

Elle a également conduit à la conception et à la réalisation d'un capteur dédié à la mesure du débit des écoulements libres [Hamri, 98] dans le cadre d'une action intégrée menée avec le Centre de Recherche de l'Ecole Supérieure des Technologies d'Oujda (Maroc).

- La définition d'un modèle générique de composant reposant sur les notions de services et de modes de fonctionnement. Les concepts liés à la gestion des modes [A.L. Gehin et al, 95] ont été discutés dans le cadre du groupe de travail « Modes de marche » de la commission « Systèmes Automatisés de Production » de l'EXERA (Association des Exploitants d'Equipements de Mesure, de Régulation et d'Automatisme). Après avoir travaillé sur deux cas d'études : une plate-forme pétrolière et une cellule flexible de manipulation du bois, j'ai participé à la rédaction d'un guide méthodologique pour la spécification des modes de marches d'un système automatisé de production.

La relation service – mode de fonctionnement a été exploitée de manière théorique pour élaborer d'une part, des alarmes significatives et synthétiques et pour étudier d'autre part,

la reconfigurabilité des systèmes automatisés. Les résultats théoriques obtenus en termes de filtrage d'alarmes ont directement été appliqués à la surveillance des centrales nucléaires dans le cadre de deux contrats industriels successifs [**Craye et co, 1998**]. Les approches proposées pour analyser les possibilités de reconfiguration d'un système automatisé ont été discutées dans le cadre du groupe de travail COSY (COntrol of complex SYstems) soutenu par l'European Science Foundation. Les résultats de ce groupe de travail ont été publiés, entre autres dans un ouvrage de synthèse [Lunze et al, 00]. L'implémentation de la méthode proposée a été réalisée et validée dans le cadre du projet européen CHEM (Advanced Decision Support System in Chemical/petrochemical Industries), projet du 5ème PCRD (Programme Cadre de Recherche et de Développement de l'Union Européenne).

- La définition d'un langage de description en vue de favoriser l'interopérabilité et l'interchangeabilité des instruments [**Bayart et al, 96**]. Ce dernier a été validé dans le cadre du projet européen IDMAP (Intelligent Devices for on-line and real-time monitoring, diagnosis and control of Machining Processes), projet du 4ème PCRD, visant à standardiser les équipements de supervision et de monitoring des machines-outils [**Gehin et Staroswiecki, 04**].

Ce langage standardisé a également permis à la société ERIS Automatisation de développer un système industriel de supervision pouvant s'appliquer à des métiers aussi différents que le contrôle d'accès, la gestion des bâtiments ou la supervision des décors et des spectacles dans les bâtiments. Le logiciel mis en œuvre a été enrichi d'un service de contrôle/commande distribué, directement bâti sur la représentation externe standardisée d'un composant intelligent [**Aïtouche et al, 02**].

1.2. Contributions scientifiques liées au chapitre 2

Le chapitre 2 montre comment le modèle comportemental Bond Graph, si on lui associe une interprétation fonctionnelle, peut être utilisé pour évaluer la disponibilité des services et des missions.

Les contributions sont les suivantes.

- Une interprétation fonctionnelle du Bond Graph. Chaque nœud du Bond Graph correspond à un service élémentaire ou à un connecteur et chaque bond décrit la relation liant données produites et consommées par les services.
- L'exploitation des relations structurelles et causales du Bond Graph pour générer des indicateurs de défauts à partir de la recherche de l'existence de relations de redondance analytique. Ces indicateurs de défauts permettent d'évaluer la disponibilité des services

élémentaires puis par un raisonnement ascendant d'évaluer la possibilité, pour le système, de rendre telle ou telle mission.

L'idée de représenter la structure d'un système par un graphe a été développée dans la thèse de Mohamed Assas [Assas, 02], thèse que j'ai co-encadrée avec Marcel Staroswiecki. Dans le cadre de ce travail, les notions d'observabilité, de commandabilité, de surveillabilité et de reconfigurabilité structurelles ont été définies [Staroswiecki et Gehin, 01], [Gehin et Dulac, 05].

La possibilité de générer des indicateurs de défauts, soit par un modèle analytique, soit par un raisonnement qualitatif ont fait l'objet de discussions lors de mes participations dans le cadre du groupe de travail européen Bridge soutenu par le réseau MONET (European Network of Excellence on Model Based Systems and Qualitative Reasoning). Une installation pilote, disponible au laboratoire et représentant à échelle réduite, une centrale thermique, a servi de support à la comparaison des différentes méthodes.

Je me suis également rapprochée, dans les années 2008-2010, du groupe de travail national « Ingénierie de la Commande et de la Supervision des systèmes à événements discret (INCOS) », soutenu par le GdR MACS, pour voir comment les approches diagnostic, développées dans un premier temps pour les systèmes continus, pouvaient s'appliquer aux systèmes discrets [Hu et al., 08], [Hu et al., 09].

- La définition d'un nouvel outil, le bond graph signé, pour détecter des fautes multiples à partir d'un raisonnement abductif. Cet outil a été développé dans le cadre de la thèse de Nizar Chatti [Chatti, 13]. J'ai co-encadré cette thèse avec Belkacem Ould Bouamama. Les résultats théoriques ont été appliqués sur deux systèmes physiques de complexité différentes :
 - Une pile à combustible à membrane échangeuse de protons dans le cadre de l'ANR « Prognostic and health management (Propice) » [Ould Bouamama et al, 2014].
 - Un véhicule électrique autonome conçu et réalisé dans le cadre du projet Interreg Européen « Intelligent Transportation for Dynamic Environment (INTRADE) » [Chatti et al, 2012].

1.3. Contributions scientifiques liées au chapitre 3

Le chapitre 3 définit les outils facilitant la modélisation, le diagnostic et la gestion des modes de fonctionnement d'un système hybride.

Les contributions sont les suivantes.

- La notion de jonction contrôlée est ajoutée à la librairie des éléments Bond Graph. Elle permet de représenter les deux états possibles d'un commutateur. La représentation des

systèmes dynamiques hybride via un formalisme unique, le Bond Graph Hybride, est alors possible.

- Un automate est ajouté au Bond Graph Hybride. Cet automate pilote les jonctions contrôlées en fonction des objectifs à réaliser, de la qualité des entrées et des défauts constatés. Ce nouveau formalisme est nommé Bond Graph piloté par événements ou Event Driven Hybride Bond Graph (EDHBG).
- La méthode permettant de générer les relations de redondance analytique (RRA) à partir du bond graph classique est généralisée au bond graph hybride. On obtient des relations de redondance analytique généralisées (RRAG) faisant apparaître des variables booléennes dont la valeur dépend des signaux de commande envoyés aux jonctions contrôlées.
- Pour faciliter la détection et l'isolation de défaut en ligne, le bond graph diagnostiqueur est proposé. Ce dernier reçoit directement les valeurs mesurées sur le système et montre l'évolution de la valeur des résidus via des capteurs virtuels judicieusement positionnés à certaines jonctions du bond graph. L'explication mathématique des RRA n'est alors plus du tout nécessaire. Ce qui constitue un avantage majeur de la méthode proposée.
- L'implémentation d'un diagnostiqueur construit sur une transformation linéaire (LFT) du BG accroît la robustesse de l'approche proposée. Une plage de valeur peut être définie pour certains paramètres du système plutôt qu'une valeur précise **[Abdallah et co, 18]**.
- L'EDHBG et le BG diagnostiqueur associé ont été appliqués, à une plate-forme réelle (échelle laboratoire) de gestion de production et d'utilisation d'hydrogène vert. L'ensemble de ces travaux constituent la thèse d'Ibrahim Abdallah [Abdallah, 2017], thèse que j'ai co-encadrée avec Belkacem Ould-Bouamama.
- Les financements pour développer et installer cette plate-forme ont été acquis dans le cadre du projet régional « Modélisation et Diagnostic des Systèmes multi-sources pour le stockage d'Hydrogène (MoDiS H2.). J'ai été la responsable scientifique et l'animatrice de ce projet. Ce projet est né de ma participation au groupe de travail « Hydrogène » mis en place par la région « Les Hauts-de-France ».
- Une implémentation informatique de l'EDHBG a été proposée dans la thèse de Béranger Six [Six, 2018], thèse que j'ai co-encadrée avec Belkacem Ould-Bouamama. Les résultats ont été appliqués à un système ferroviaire **[Six et co, 20]**. Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'un contrat industriel avec la société CCAMY Systèmes. J'ai co-dirigé, avec M. Ould-Bouamama, ce contrat. Il a été obtenu suite à l'organisation d'un séminaire dédié aux systèmes hybrides, lui-même proposé à l'issue d'une rencontre avec des membres de la société, lors de journées industrielles organisées par l'école Polytech'Lille.

2. Recherches en cours et futures

a. Vérification de modèle à base de bond graph

L'EDHBG a pour avantage d'intégrer dans un même formalisme le diagnostic et la gestion des modes de fonctionnement. Il permet d'évaluer lorsqu'une défaillance est constatée, ou lorsqu'une entrée n'est pas dans la plage des valeurs attendues, l'ensemble des missions pouvant être satisfaites par le système. Ces possibilités sont plus ou moins définies par l'utilisateur lors de la conception du système. L'approche pourrait être améliorée, en s'inspirant des travaux menés dans le cadre de la thèse d'He-xuan Hu [Hu, 2009], thèse que j'ai co-encadrée avec Mireille Bayart. Les systèmes considérés dans les travaux de M. Hu, sont des systèmes continus, évoluant sur événements, décrits par des graphes d'états, autrement dit, des systèmes que nous avons appelés par la suite des systèmes hybrides. Un raisonnement logique, basé sur la théorie de Reiter [Reiter, 87], est proposé pour tester l'hypothèse de certaines défaillances et identifier des fautes qui peuvent être multiples [Hu et al, 2009a], [Hu et al, 2009b]. Le Bond Graph Signé présenté dans le chapitre 2 de ce mémoire, s'inspire du même raisonnement et facilite l'implémentation du diagnostic de fautes multiples.

Suite à l'apparition de défauts, le graphe d'état proposé pour décrire le système hybride est automatiquement mis à jour. L'approche model checking est ensuite proposée pour vérifier si le graphe états-transitions, rendant compte des réelles possibilités du système, satisfait ou non des missions formulées via la logique temporelle [Hu et al, 2009ca], [Hu et al, 2008]. En utilisant le Bond Graph, et en exprimant chaque mission sous forme d'une expression entre variables énergétiques, le même type de raisonnement pourrait être implémenté pour déduire à chaque instant les possibilités qu'un système a, de satisfaire les objectifs qui lui sont attribués.

b. Pronostic

Comme expliqué tout au long de ce mémoire, l'apparition d'un défaut diminue de façon plus ou moins importante la sûreté de fonctionnement d'un système. Un défaut sera, par exemple, qualifié de peu sévère s'il entraîne uniquement une dégradation de la qualité de service et/ou de la disponibilité de la fonction (le service n'est plus réalisé selon sa version nominale mais l'est par la mise en place d'une version dégradée). A l'opposé, un défaut sera, par exemple, qualifié de sévère, si les missions qui permettent de garantir la sécurité des utilisateurs et de l'environnement ne peuvent plus être assurées.

Le pronostic est une activité permettant d'évaluer la durée pendant laquelle un système peut continuer à assurer ses fonctions avec la qualité requise. Si aucune action particulière n'est engagée, cette durée, appelée « durée de vie restante » ou « Remaining Useful Life (RUL)»

diminue au cours du temps consécutivement à l'usure des composants. Il existe parfois, pour certains composants, des modèles mathématiques, dits modèles de dégradation, exprimant l'importance de l'usure en fonction de la durée de fonctionnement. La durée de vie restante (RUL) peut alors être calculée. Si les modèles de dégradation ne sont pas connus, ou si les dégradations sont accélérées suites à l'apparition de défauts ou suite à des conditions de fonctionnement inappropriées, l'estimation de la RUL doit être réalisée par un autre moyen. Cette estimation est nécessaire si on veut garantir une qualité de service satisfaisante en planifiant, par exemple, des opérations de maintenance et surtout si on veut assurer la sécurité des utilisateurs et de l'environnement en évitant que l'apparition d'un défaut conduise à des défaillances catastrophiques. Là, encore, l'activité de pronostic permettra de mettre en place une action correctrice.

Les travaux menés dans le cadre de la thèse de Manarshhjet Singh [Singh, 2021], thèse que j'ai co-encadré avec Belkacem Ould Bouamama, propose une métrique commune pour réaliser à la fois les activités de diagnostic et de pronostic. Cette métrique est l'activité énergétique calculée à partir du Bond Graph. L'originalité de l'approche est que la détection et la localisation d'un défaut n'est pas un préalable au pronostic, comme dans la plupart des approches classiques. La métrique proposée est un indicateur dynamique permettant de prédire le futur état du système et par voie de conséquence de détecter éventuellement un défaut.

L'activité énergétique d'un système est la quantité d'énergie qui est à la fois stockée (reçue) et produite (fournie) par un composant sur une période de temps. Elle est définie par la relation 4.1. Elle est toujours positive et ne fait que croître avec le temps.

$$EA = \int_a^{a+\Delta t} |puissance|. dt \quad (4.1)$$

L'activité énergétique peut être calculée à partir des variables d'effort et de flux associées aux liens du BG, comme le montre la relation 4.2 ou même en faisant intervenir les lois constitutives des éléments BG, comme le montre, l'exemple décrit par la relation 4.3.

$$EA = \int_a^{a+\Delta t} |e(t). f(t)|. dt \quad (4.2)$$

$$\begin{array}{l} \begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \text{---} \\ \xleftarrow{f} \end{array} R \\ e = \Phi_R(f) \end{array} \quad EA = \int_a^{a+\Delta t} |\Phi_R(f). f(t)|. dt \quad (4.3)$$

Une dégradation ou un défaut au niveau d'un composant se traduit par une modification de la valeur d'un de ses paramètres. La loi physique (loi constitutive) qui lui est associée et qui

représente son comportement en l'absence de défaillance n'est plus représentative du comportement réel de ce composant. La valeur du paramètre Φ_R , utilisée dans l'expression 4.3 n'est, par exemple, plus égale à la valeur utilisée par le modèle de bon fonctionnement si une canalisation est partiellement obstruée. Il en résulte une modification en amplitude et en fréquence des échanges énergétiques entre composants. Pour que ces modifications soient indépendantes de la quantité d'énergie reçue en entrée par le système, plus que l'activité énergétique elle-même, c'est sa répartition au niveau des composants du système qui est intéressante. Celle-ci est déterminée par l'index d'activité énergétique EAI_i associé à chaque composant i et donné par la relation 4.4 où n est le nombre de composants constituant le système.

$$EAI_i = \frac{EAI_i}{\sum_{i=1}^n EAI_i} \quad (4.4)$$

Une fois les défauts détectés et localisés via une analyse fréquentielle des index d'activité énergétique, l'étape suivante consiste à évaluer la date de fin de vie, date à laquelle le composant ne pourra plus assurer sa mission. Il faut, pour ce faire, avoir au préalable défini les conditions de fin de vie. Nous les avons pour le moment, établies en termes de déviation maximale acceptable pour chaque paramètre définissant la loi constitutive d'un composant. L'estimation de la dynamique de la dégradation (vitesse à laquelle la valeur du paramètre intervenant dans la loi constitutive est modifiée), associée au seuil maximal acceptable, permet de calculer à chaque instant la durée restante de bon fonctionnement.

La méthode proposée a été appliquée avec succès à un système masse-ressort-amortisseur [Singh et al., 2020] et à un système de régulation de niveau avec prise en compte des incertitudes paramétriques.

c. La production d'hydrogène vert et son utilisation

Une véritable dynamique de recherche se développe, au niveau du laboratoire, dans le domaine des énergies renouvelables. Cette dynamique est née suite à la mise en place de la plate-forme de production et d'utilisation d'hydrogène vert, financée par le projet MoDiS-H₂, l'Université de Lille et l'école Polytech'Lille. Les résultats du projet MoDiS-H₂ nous ont permis, en particulier, d'être partenaire du projet européen Interreg 2 mers E2C, de déposer plusieurs demandes d'ANR en 2020, d'obtenir les financements pour deux thèses et un stage de recherche niveau Master.

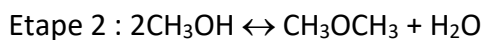
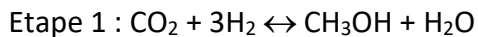
Le projet « Electrons to high value chemical products » (E2C)

Le projet Européen Interreg E2C vise à développer les technologies Power-to-X qui permettent aux industries chimiques de valoriser une partie du dioxyde de carbone (CO₂) qu'elles

produisent en carburants en utilisant les énergies renouvelables. On contribue ainsi à réduire l’empreinte carbone globale. Au niveau du laboratoire, quatre enseignants-chercheurs, 2 doctorants, 1 post-doctorat (1 an) travaillent sur le projet.

Le projet se découpe en deux grandes parties.

- La première partie, appelée conversion indirecte, consiste à produire du diméthyle éther (DME) à partir du CO₂ capté dans l’atmosphère et d’hydrogène produit à partir d’énergies renouvelables via l’électrolyse de l’eau. Le DME est un carburant de formule chimique CH₃-O-CH₃ produit selon deux étapes. Dans la première, le CO₂ est hydrogéné pour former du méthanol, dans la seconde, le méthanol est déshydraté pour former du DME.



Parce que ces réactions ne rejettent que de l’eau, ne produisent pas d’oxyde d’azote et de particules, le DME est un carburant beaucoup plus propre que le gasoil. Des constructeurs de véhicules lourds s’y intéressent.

- La deuxième partie, appelée conversion directe, consiste à produire de l’acide formique à partir du CO₂. L’acide formique produit peut ensuite servir de carburant pour une pile à combustible et fournir ainsi de l’électricité. Au même titre que l’hydrogène, il constitue un moyen de palier les intermittences des sources d’énergie renouvelables. L’acide formique, de formule CH₂O, peut être produit via une membrane échangeuse d’ions (même principe que l’électrolyse de l’eau) dont l’équation bilan se résume à :



Là encore, aucun déchet particulier n’est rejeté dans l’atmosphère.

Pour convaincre l’industrie d’investir dans ces nouvelles technologies, qu’elles concernent la conversion directe ou indirecte du CO₂, il est nécessaire de développer les techniques liées à l’électrolyse et à la catalyse, d’en réduire les coûts et de développer des démonstrateurs et simulateurs sur lesquels des calculs de dimensionnement et de rentabilités pourront être effectués.

Fortes des compétences acquises dans la réalisation du projet MoDiS-H2, nos contributions dans ce projet doivent conduire à la production de deux livrables.

- Le premier est le développement d’un outil qui permette de modéliser, simuler et évaluer les performances d’un électrolyseur de technologie PEM.
- Le deuxième est une étude complète sur les méthodes de modélisation, de simulation et contrôle des procédés mis en œuvre pour les conversions directes et indirectes du CO₂.

Le premier livrable a été fourni fin décembre 2020 [**Sood et al, 2021**].

L'outil Bond Graph est utilisé pour fournir un modèle générique décrivant le comportement dynamique d'un électrolyseur. La modélisation est modulaire. Les différents sous-systèmes intervenant dans le processus d'électrolyse sont d'abord identifiés et connectés entre eux via des variables énergétiques. Le BG et les équations mathématiques qui en sont dérivées sont ensuite utilisées pour décrire le comportement dynamique de chaque sous-système. Des règles de connexion sont définies et utilisées pour construire le BG global. L'électrolyseur disponible au laboratoire permet de valider le modèle proposé [Sood et al, 2020].

Sur la base du modèle BG, différentes relations de redondance analytique sont construites. Elles permettent de détecter des défauts tels la corrosion de la membrane, la dégradation du catalyseur, une obstruction partielle du flux de réactant, un assèchement de la membrane ...

Les vitesses selon lesquelles les valeurs des résidus s'écartent des valeurs nominales sont ensuite utilisées pour estimer les durées de vie restantes suite à l'apparition d'un défaut.

En parallèle de tous ces outils théoriques, une plate-forme de simulation et de démonstration est construite autour du site pilote dont nous disposons. Les modules Bond Graph sont automatiquement traduits en schémas blocs en vue de leur simulation sous Matlab-Simulink, de manière similaire à ce qui a été proposé dans la thèse de Béranger Six.

La généralité des modèles proposés permet de tester différents types d'électrolyseurs. Ils peuvent, en particulier, être de technologie PEM ou AEM et d'échelle allant du modèle de laboratoire au modèle industriel.

d. Gestion optimale des modes de fonctionnement en fonction de données prédictives

L'idée d'intégrer des données prédictives dans la gestion des modes de fonctionnement d'un système automatisé est développée dans la thèse de Rim ABDALLAH. Cette thèse a débuté en octobre 2020. Je la co-encadre avec M. Jean-Yves DIEULOT. L'application visée est d'optimiser les modes de fonctionnement d'une station de production et de stockage d'hydrogène vert pour alimenter une flotte de véhicules partagés.

Le travail s'articule selon trois parties. Dans un premier temps, les besoins en énergie d'un véhicule seront déterminés en fonction d'un parcours GPS (relief, vitesse, type de véhicule, etc.). Dans un deuxième temps, il s'agit de prédire la quantité d'hydrogène qu'il est possible de produire en fonction de données climatiques. Dans un troisième temps, il s'agit d'adapter la production d'hydrogène en fonction des prévisions météorologiques et des demandes de mises en service des véhicules avec pour objectif de prolonger la durée de vie des composants impliqués dans la chaîne de production, en particulier celle des électrolyseurs.

Bibliographie

- Abdallah I. - Event-Driven Hybrid Bond Graph - Application: Hybrid Renewable Energy System for Hydrogen Production and Storage – Thèse de Doctorat, CRISAL, Université de Lille, Novembre 2017.
- Abdallah I., Gehin A.L and Ould Bouamama B. “On-line robust graphical diagnoser for hybrid dynamical systems”, *Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 69, pp. 36-49, DOI: 10.1016/j.engappai.2017.12.002, March 2018.
- Aïtouche A., Gehin A.L, Flix N., Dumortier G., “Generic control / command distributed system - Application to the supervision of moving stage sets in theaters”, *European Journal of Control*, January 2002.
- Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. - *Wireless sensor networks: a survey* - *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking archive*, Vol. 38, N. 4, pp. 393-422, 2002
- Assas M. – *Analyse de la tolérance aux fautes : Approches fonctionnelle et structurelle*. Thèse de Doctorat, LAIL, Université de Lille 1, décembre 2002.
- Bayart M., Conrard B., Chovin A., Robert M. – *Capteurs et actionneurs intelligents – Techniques de l'ingénieurs*, S 7 520, 2005.
- Bemporad A., Heemels W., Vejdemo -Johansson M. - *Networked Control Systems* - vol. 406 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Springer-Verlag, 2010
- Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. – *Diagnosis and Fault-Tolerant Control* – Springer, 2006.
- Borutzky W. - Discontinuities in a bond graph framework - *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 332, pp. 141-154, 1995.
- Chatti N., Ould Bouamama B., Gehin A.-L., Merzouki R. - *Signed Bond Graph for multiple faults diagnosis* - *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 36, pp. 134 – 147 DOI : 10.1016/j.engappai.2014.07.018, November 2014.
- Chatti N., Gehin A.L., Ould Bouamama B., Merzouki R., “Functional and behavioural models for the supervision of an intelligent and autonomous system” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol 10 , pp. 431 – 445, DOI : 10.1109/TASE.2012.2211350, September 2012.

- Chatti N. – Contribution à la supervision des systèmes dynamiques à base des Bond Graphs Signés – Thèse de Doctorat, LAGIS, Université de Lille 1, décembre 2013.
- Craye E, Gehin A.L., Ould Bouamama B., Staroswiecki M., Toguyeni A. - Analyse du RCV et filtrage d'alarmes - Contrat EDF, Ref P31/BO2970/EP885, 1998
- Dulmage A.L., Mendelson N.S. – Covering a bipartite graph – Canadian Journal of Mathematics, 10, pp. 517-534, 1958.
- Dauphin-Tanguy G. - *Les Bond Graphs* - Hermes Sciences Publications, 2000.
- Gehin A.L, Staroswiecki M. - *Reconfiguration Analysis using Generic Component Models* - International Journal IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, part A: Systems and Humans, Vol. 38, N°3, pp 575- 583, may 2008.
- Gehin A.L., Dulac M. “System Reconfigurability Analysis Using Structural Approach”, 13th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'05, 26-29 June, Limassol, Cyprus.
- Gehin A.L, Staroswiecki M. , *Towards the definition of standardised machine tool monitoring system*, 7th IFAC Symposium on Cost Oriented Automation, COA 2004, 6-9 june, pp. 251-256, Gatineau (Canada).
- Gehin A.L, Bayart M. - *Operating Modes of a Distributed Intelligent Automated Production System* -IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE SMC 1995, October 22-27, pp. 1333-1338, Vancouver (Canada).
- Gehin A.L. - *Analyse fonctionnelle et modèle générique des capteurs intelligents – Application à la surveillance de l'anesthésie* - Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, 1994.
- Gehin A.L., R. Logier, M. Bayart, M. Staroswiecki, M. Delecroix, D. Cantineau - *Data validation for improving Anesthesia Supervision*, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE SMC'93, October 17-20, Le Touquet (France).
- Hamri H, **Gehin A.L**, Kanev Z., Staroswiecki M., Application of the Smart Sensor Concepts to the Monitoring of Free Surface Flows, *IMACS International Conference on Computational Engineering in Systems Application* CESA'98, April 1-4, Nabeul-Hammamet (Tunisia).
- Hu H. - Modèle formel pour intégrer le diagnostic de fautes multiples et la reconfiguration.– Thèse de Doctorat, LAGIS, Université de Lille, Décembre 2009.
- H Hu, A.-L. Gehin, M. Bayart - An Extended Qualitative Multi-faults Diagnosis from First Principles I - Theory and Modelling, in 48th IEEE Conference on Decision and Control, CDC 2009a, December 16-18, Shanghai, China.
- H Hu, A.-L. Gehin, M. Bayart - An Extended Qualitative Multi-faults Diagnosis from First Principles II - Algorithm and Case Study, in 48th IEEE Conference on Decision and Control, CDC 2009b, December 16-18, Shanghai, China.
- Hu H., Gehin A.L., Bayart M., Relation between diagnosis and diagnoses obtained from subsystems, 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM 2009, june 3-

- 5 2009c, Moscow, Russia.
- Hu H., Gehin A.L., Bayart M., "A Merge Method for Decentralized Discrete-Event Fault Diagnosis", Third International Conference on Internet Monitoring and Protection, ICIMP 2008, June 29 - July 5, Bucharest, Romania.
- ISO/CEI 7498-1 - *Technologies de l'information — Interconnexion de systèmes ouverts (OSI) — Modèle de référence de base: Le modèle de base — Partie 1* – Norme ISO, 1994.
- Logier R., Gehin A.L., Bayart M., Couvreur M., Staroswiecki M., Delecroix M., Bertrand M. - *Detection of transient myocardial ischemia by numerical processing of electrocardiographic signal* - IMACS International Symposium on Signal Processing, Robotics and Neural Networks SPRANN
- Logier R., Gehin A.L., Bayart M., Staroswiecki M. - Automated monitoring of respiratory mechanics in mechanically ventilated children - Proceedings of IEEE Systems Man and Cybernetics Conference - SMC, Le Touquet, France, 1993a, pp. 172-175 vol.3.
- Logier R., Arcas group, Gehin A.L., M. Bayart, M. Couvreur, M. Staroswiecki - *A new tool for respiratory monitoring and pulmonary mechanics measurements in mechanically ventilated children* - 15th Annual International Conference, IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1993b, October 28-31, San Diego (USA).
- Lunze J., Askari-Marnani J., Cela A., Frank P. M., Gehin A.L., Heiming B., Lemos M., Marcu T., Rato L., Staroswiecki M. - *Three Tank Control Reconfiguration* – In: Aström, Albertos, Blanke, Isidori, Schaufelberg, Sanz (eds) *Control of Complex Systems*, Springer,) Springer, pp 241-283, 2000.
- Merzouki R., Samantaray A., Pathak P., Ould Bouamama B., *Intelligent Mechatronic Systems - Modeling, Control and Diagnosis*, Springer, 2013.
- Mosterman P. J., Biswas G., Modeling discontinuous behavior with hybrid bond graphs, Proceedings of the Intelligence Conference on Qualitative Reasoning, Amsterdam, the Netherlands, 1995, pp. 139–147.
- Ould Bouamama B, Gehin A.L, Staroswiecki M. – *Alarm filtering by component modelling and Bond Graph Approach* – 4th IFAC Workshop on On-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries, CHEMFAS 2001, 8-9th June, Seoul, Korea
- Ould Bouamama B., Samantary A.K., Medjaher K., Staroswiecki M. et Dauphin-Tanguy G. - *Model builder using Functional and bond graph tools for FDI design* - Control Engineering Practice, Vol. 13, pp. 875-89, 2004.
- Ould-Bouamama B., Samantaray A.K. and Staroswiecki M. - *Software for supervision system design in process engineering* - IFAC World Congress, pp. 691 - 695, 2006a.
- Ould Bouamama B., Dauphin-Tanguy G. - *Modélisation par bond graph - Éléments de base pour l'énergétique* – Techniques de l'Ingénieur, BE8280, 2006b.
- Ould-Bouamama B., Chatti N. Gehin A.L., SBG for health Monitoring of Fuel Cell System, In: Hamdan M., Hejase H., Noura H., Fardoun A. (eds) ICREGA'14 - Renewable Energy: Generation and Applications. Springer Proceedings in Energy. Springer, pp. 73-85, 2014.
- Paynter H. – *Analysis and design of engineering systems*. MIT press, 1961.

- Reiter R. – A theory of diagnosis from first principles – Artificial Intelligence, Vol. 32, N°1, pp. 57-95, 1987.
- Robert M., Marchandiaux M., Porte M. – *Capteurs intelligents et Méthodologie d'Evaluation* – Hermès 1993.
- Staroswiecki M., Gehin A.L, “From Control to Supervision”, Annual Reviews in Control, Vol. 25, pp 1-11, [https://doi.org/10.1016/S1367-5788\(01\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S1367-5788(01)00002-5), 2001.
- Staroswiecki M., Bayart M., Gehin A.L. - *Mode management in a distributed intelligent automated production system* - IFAC Conference on Algorithms and Architectures for Real Time Control, AARTC 1995, May 31, June 1-2, pp. 341-348, Ostend (Belgium).
- Staroswiecki M., Bayart M. – *Actionneurs Intelligents* – Hermès, 1994.
- Singh Manarshhjet, Energy Activity : a common metric to perform diagnosis and prognosis, Thèse de Doctorat, CRISTAL, Université de Lille, Avril 2021.
- Singh M, Gehin A.L., Ould Bouamama B., Prognosis and Health Management using Energy Activity, IFAC World Congress, pp.10445-10452. July 11-17, 2020.
- Six B., Génération automatique de modèles pour la supervision des systèmes dynamiques hybrides : application aux systèmes ferroviaires, Thèse de Doctorat, CRISTAL, Université de Lille, Septembre 2018.
- Six B, Ould Bouamama B., Gehin A.L., “Model builder for diagnosis and simulation of hybrid dynamic systems: Application to railway rolling stock” Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, pp. 1-18, DOI: 10.1177/0037549720958399, October 2020.
- Sood S., Prakash O., Boukerdja M., Ould-Bouamama B., Dieulot, J. Y. Bressel M., Gehin A.L. “Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyser System Performance and Lifetime Modelling Simulation Tool” – Livrable D1.3.1 – European Interreg Project E2C – 97 pages – Confidential – Janvier 2021.
- Sood S., Prakash O., Boukerdja M., Ould-Bouamama B., Dieulot, J. Y. Bressel M., Gehin A.L., Generic Dynamical Model of PEM Electrolyser under Intermittent Sources. *Energies* 2020, 13, 6556. doi.org/10.3390/en13246556
- Sueur C., Dauphin-Tanguy G. - *Bond graph approach for structural analysis of MIMO linear systems* - Journal of the Franklin Institute, N°328, pp.55-70, 1991.
- Thiriet J.M. – Sûreté de Fonctionnement de systèmes d'automatisation à intelligence distribuée – Mémoire d'HDR, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2004.
- Thoma J.U - *Introduction to Bond graphs and their Applications* - Pergamon Press, 1975.
- Toguyeni A, Gehin A.L, Dangoumau N., Craye E. – Methodology of Development of Toolbox TB7.2 – Contrat IMS CHEM, IFP, Paris, Mars 2002.

Bibliographie

Toguyeni A, Gehin A.L, Dangoumau N., Craye E. – Design Specification of Toolbox TB7.2 – Contrat IMS
CHEM, IFP, Paris, Juin 2001.