

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

Présenté Pour l'obtention du Diplôme de

MAGISTER

Option : Automatique

Par

Aggoune Lakhdar

Thème

**Modélisation et Diagnostic du Système de Traitement Biologique
de la Station d'Epuration par l'Approche Bond-Graph**

Soutenu le 17/02/ 2008

Devant le Jury

M. Mostefai	Prof	Université de Sétif	Président
M. Khemliche	M.C	Université de Sétif	Rapporteur
A. Khellaf	Prof	Université de Sétif	Examineur
A. Lamamra	M.C	Université de Sétif	Examineur
D. Haddad	Directeur Station d'Epuration	Ain-Sféha Sétif	Invité

Dédicaces

*A mes très chers
parents.*

A ma tante Chérifa.

A mes frères et sœurs.

*A tous ceux que
j'aime.*

Remerciements

J'exprime ma profonde gratitude et toute ma reconnaissance envers mon encadreur, docteur **Mabrouk Khemliche**, Maître de Conférences à l'Université de Sétif, pour sa patience, ses avis, ses conversations, son soutien et sa confiance, dont j'ai bénéficié à tous leurs égards.

Je tiens également à remercier le professeur **M. Mostefai**, de l'Université de Setif, le professeur **A. Khellaf**, de l'Université de Setif, le docteur **A. Lamamra**, Maître de Conférences à l'Université de Sétif et Monsieur **D. HADDAD** Directeur de la station d'épuration Ain-Sféha Sétif, qui ont gentiment accepté de participer à mon jury de soutenance.

Je tiens également à remercier mes amis : Sofiane, Fayçal B, Abdelhak, Sana, Fouzia, Adbelaziz, Samir, Fayçal M, Raouf, Brahim, Toufik, pour leur soutien inconditionnel.

Enfin, je dédie ce mémoire à tous les membres de ma famille. Je les remercie du fond du cœur pour l'amour qu'ils me donnent abondamment.

Au dessus de tout, je remercie le Seigneur, Dieu Tout Puissant, car ces travaux ne peuvent pas être réalisés sans son aide.

ملخص :

حاليا تشخيص الأعطاب شيء أساسي لصيانة وفعالية الأنظمة و كذلك لحماية المحيط و المحافظة عليه. هذه المذكرة تهتم بكشف و حصر أعطاب محطة تصفية المياه المستعملة باستخدام طريقة خطوط الربط، هذه الطريقة استخدمت للحصول على نموذج الظاهرة الهيدروليكية للمحطة ، إن استعمال الخصائص البنوية و السببية مكننا من استخراج البواقي. لضمان مراقبة المحطة بأقل عدد ممكن من الملتقطات استعملنا خوارزمية لوضعها. الهدف من وراء استخدام طريقة خطوط الربط هو استعمال نفس المنهجية للحصول على النموذج و البواقي ووضع الملتقطات.

كلمات رئيسية: عملية الحصول على النموذج ، التشخيص، خطوط الربط، كشف و حصر الأعطاب، البواقي ، وضع الملتقطات ، محطة تصفية المياه المستعملة.

Résumé :

Le diagnostic de défauts est aujourd'hui primordial pour la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et l'efficacité des systèmes ainsi que pour la sécurité ou la protection de l'environnement. Ce mémoire porte sur la détection et la localisation des défaillances de la station d'épuration par l'approche bond graph. Cette approche est utilisée pour modéliser le phénomène hydraulique de la station d'épuration. L'utilisation des propriétés structurelles et causales de l'outil bond graph nous permet la génération des relations de redondance analytique (résidus ou indicateurs de défaut). On s'intéresse aux défauts du processus, on utilise un algorithme de placement de capteurs qui assure la surveillance du processus avec le minimum de capteurs. Le but de l'utilisation de l'outil bond graph est d'utiliser le même outil pour la modélisation, la génération des RRAs et le placement de capteurs.

Mots clés : Modélisation, Diagnostic, Bond graph, Résidus, Détection et Localisation de défauts, Placement de capteurs, Station d'épuration.

Abstract :

The diagnosis of faults is today primordial for reliability, the availability, the maintainability and the efficiency of systems and so for the security or the environment protection. This work relates to detection and localization of the purification station failures by bond graph approach. This approach is used for modelling the hydraulic phenomenon of this station. The use of the structural and causal properties of bond graph tool allow to the generation of the analytical redundancy relations (residuals or fault indicators). We are interested in the faults of the process; we used an algorithm of sensors placement for the monitoring of the process with optimal number of sensors. The aim of the use of the bond graph tool is from the same tool we assure the modelling, the ARR generation and the sensors placement.

Key words: Modelling, Diagnosis, Bond graph, Residuals, Faults Detection and Localization, Sensors placement, Station of purification.

Table des matières

Nomenclature	1
Liste des figures	4
Liste des tableaux	6
Introduction générale	7
Chapitre 1 : Notions sur la modélisation des systèmes dynamiques	
1.1 Introduction	9
1.2 Notion de système	9
1.3 Notion de modèle	10
1.3.1 Modèle d'état	12
1.3.2 Modèle d'entrée sortie	13
1.3.3 Représentation multi - modèle	13
1.3.4 Modèles de règles	13
1.3.5 Modèles de fichiers	14
1.3.6 Modèles graphiques	14
1.4 Principes de la modélisation	17
1.4.1 Schéma de principe de l'installation	17
1.4.2 Schéma fonctionnel de l'installation	17
1.4.3 Ecriture du modèle	19
1.4.4 Identification des paramètres d'un modèle	19
1.5 Utilité des modèles	21
1.5.1 Connaissance scientifique	21
1.5.2 Commande de processus	21
1.5.3 Diagnostic	22
1.6 Notion de simulation	22
1.7 Conclusion	23
Chapitre 2 : Description de la station d'épuration	
2.1 Introduction	24
2.2 Définitions	24
2.2.1 Eaux usées	24
2.2.2 L'équivalent - habitant (EH)	25
2.2.3 La station d'épuration	25
2.3 Implantation de la station	25
2.4 Les pollutions redoutées provenant des eaux usées	26
2.5 Procédé de traitement des eaux usées	26
2.5.1 Les Prétraitements	27
2.5.2 Traitement primaire	30
2.5.3 Traitement biologique	31
2.6 Les performances épuratoires	34
2.7 Les sous produit de l'épuration	34
2.7.1 Les eaux usées après traitement	34
2.7.2 Les boues d'épuration	36

2.8 Conclusion	39
Chapitre 3 : Modélisation bond graph de la station d'épuration	
3.1 Introduction	40
3.2 L'outil bond graph	43
3.2.1 Les variables généralisées	43
3.2.2 Les éléments bond graphs	43
3.2.2.1 Éléments actifs	44
3.2.2.2 Éléments passifs	44
3.2.2.3 Détecteurs	45
3.2.3 Éléments de jonction	45
3.2.4 La causalité	47
3.2.4.1 Procédure d'affectation de la causalité	49
3.2.5 Construction d'un modèle bond graph à partir d'un système physique	46
3.3 Outil de simulation	46
3.4 Modélisation bond graph de la station d'épuration	52
3.4.1 Bond graph à mots	53
3.4.2 Modèle bond graph	53
3.4.3 Mise sous forme d'équation d'état	54
3.4.4 Simulation	57
3.5 Conclusion	60
Chapitre 4 : Les approches usuelles de diagnostic	
4.1 Introduction	61
4.2 Les nouveaux enjeux industriels	61
4.2.1 Les enjeux socio-économiques actuels	62
4.2.2 Les réponses et évolutions actuelles	62
4.3 L'évolution de la fonction maintenance	65
4.3.1 Définitions et concepts généraux	65
4.3.2 Les différentes formes de maintenance	67
4.3.2.1 La maintenance corrective	67
4.3.2.2 La maintenance préventive	68
4.4 Les techniques de mesures en diagnostic	69
4.4.1 Analyse vibratoire	70
4.4.2 Analyse thermographique	70
4.4.3 Analyse des lubrifiants et des particules d'usure	71
4.4.4 Analyse des paramètres de fonctionnement du procédé	72
4.5 Les différentes étapes du diagnostic	72
4.5.1 Acquisition de données	72
4.5.2 Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts	73
4.5.3 Etape de détection	74
4.5.4 Etape de localisation	74
4.5.5 Etape de prise de décision	74
4.6 Classification des méthodes de diagnostic	74
4.6.1 Méthodes sans modèle analytique	75
4.6.1.1 Analyse fréquentielle	75
4.6.1.2 Redondance matérielle	76
4.6.1.3 Capteurs spécifiques	76
4.6.1.4 Réseaux de neurones artificiels	76
4.6.1.5 Systèmes d'inférence flous	77

4.6.1.6 Reconnaissance de formes	78
4.6.2 Méthodes basées sur les modèles analytiques	78
4.6.2.1 Espace de parité	79
4.6.2.2 Observateurs	79
4.6.2.3 Estimation paramétrique	79
4.7 Diagnostic par bond graph	80
4.7.1 L'approche qualitative pour le diagnostic en utilisant le bond graph	81
4.7.2 L'approche quantitative pour le diagnostic en utilisant le bond graph	82
4.8 Conclusion	82

Chapitre 5 : Application

5.1 Introduction	83
5.2 Génération de relations de redondance analytique par bond graph	83
5.3 Matrice de signature des défaillances	83
5.4 Algorithme de placement de capteurs	84
5.5 Application	86
5.6 Simulation	90
5.6.1 Réponse des résidus à une fuite dans le réservoir T1	90
5.6.2 Réponse des résidus à un blocage de la vanne V1	91
5.6.3 Réponse des résidus à une fuite dans le réservoir T2	92
5.6.4 Réponse des résidus à un blocage de la vanne V2	93
5.6.5 Réponse des résidus à une fuite dans le réservoir T3	94
5.6.6 Réponse des résidus à un blocage de la vanne V3	95
5.6.7 Réponse des résidus à une fuite dans le réservoir T4	96
5.7 Conclusion	97
Conclusion Générale	99
Bibliographie	100

Annexes

Annexe A : Formalisme Bond Graph	103
A.1 Eléments passifs	103
A.2 Eléments multiports	103
A.3 Construction d'un modèle bond graph	104
A.3.1 Modélisation d'un système électrique	104
A.3.2 Modélisation d'un système mécanique de translation	105
A.4	105
Causalité	
A.4.1 Chemin causal	106
A.4.2 Boucle causale	108
A.4.2 Boucle causale	108
A.5 Obtention d'un modèle mathématique	108
A.5.1 Equation d'état	108
A.5.2 Fonction de transfert	109
A.6 Analyses structurelles	110
A.6.1 Ordre d'un modèle	110
A.6.2 Rang de la matrice d'état	110
A.6.3 Observabilité	110
A.6.4 Commandabilité	111

A.6.5 Exemple	112
Annexe B : Les valeurs des paramètres utilisées dans la simulation	114
Annexe C : Schémas blocs des résidus utilisés pour la simulation des défaillances ...	115

Nomenclature

Symboles [unités]	Description
Âge des boues	temps, exprimé en jours, correspondant au nombre de jours nécessaires statistiquement au renouvellement total de la population bactérienne dans le système d'épuration. Ce temps est calculé en divisant la masse totale de boue présente dans la station, par la masse de boue traitée (extraite) en moyenne par jour.
Bactérie	organisme vivant microscopique formé d'une seule cellule individualisée et apte à se reproduire.
Biodégradable	dégradation sous l'action du métabolisme d'organismes vivants de la matière organique.
Biofilm	un biofilm est une couche de micro-organismes, contenus dans une matrice solide, se formant sur des surfaces en contact avec de l'eau.
Biomasse	masse totale de la matière vivante.
BG	Bond Graph.
Boue activée	amas biologique (floc) formé, au cours du traitement d'une eau usée, par la croissance de bactéries et d'autres micro-organismes en présence d'oxygène dissous et par les diverses MES (végétaux, sables,...).
Clarificateur	ouvrage dans lequel s'effectue la séparation des phases solide et liquide, par sédimentation des matières décantables (décantation des floes).
DBO [gO₂.L⁻¹]	Demande biochimique en oxygène : masse d'oxygène dissous nécessaire à l'oxydation biologique pendant cinq jours, des matières organiques contenues dans l'eau.
DCO [gO₂.L⁻¹]	Demande chimique en oxygène : masse d'oxygène dissous nécessaire à la l'oxydation chimique des matières organiques et/ou inorganiques contenues dans l'eau.
Décantation	(procédé de séparation par gravité des matières solides sédimentables) : élimination de solides en suspension de densité supérieure à celle de l'eau par l'action exclusive de la force de la gravité.
De	Détecteur (capteur) d'effort.
Df	Détecteur (capteur) de flux.

Symboles [unités]	Description
Déshydratation	action d'enlever l'eau mélangée ou combinée avec un corps, de dessécher. Ensemble des techniques destinées à réaliser cette opération.
<i>e</i>	effort.
Épaississement des boues	(épaississeur) : premier stade de réduction du volume des boues à traiter visant à augmenter la concentration des boues.
Eutrophisation	apport en excès de substances nutritives (nitrates et phosphates) dans un milieu aquatique pouvant entraîner la prolifération des végétaux aquatiques (fleur d'eau). Ces végétaux aquatiques sont de gros consommateurs d'oxygène et ils asphyxient les autres formes de vie aquatique.
Floc	on s'intéresse ici au floc bactérien, formé par l'agglomération de bactéries et de matières organiques et minérales. La taille est de l'ordre du micron (de 10 à 100µm). D'une façon plus générale, on le définit comme l'ensemble des particules macroscopiques formées dans un liquide par floculation (séparables par sédimentation ou flottation).
Floculation	formation de grosses particules, par agglomération de petites particules ; sous l'action de moyens mécaniques, physiques, chimiques ou biologiques.
Flottants	(matières flottantes) : matières solides qui stagnent à la surface de l'eau. Les flottants peuvent être composés de corps gras, de déchets non ou insuffisamment piégés dans l'étape de dégrillage (papiers, plastiques, filasses, etc.), d'amas bactériens (floc filamenteux ou non).
<i>f</i>	flux.
MES [mg.L⁻¹]	Matières en suspension : concentration en matières solides (organiques et minérales) contenues dans un liquide. Elles sont déterminées par filtration ou centrifugation, puis séchage dans des conditions définies et contrôlées (étuve à 105 °C).
Matières organiques	désigne l'ensemble des substances d'origine biologique et autres substances oxydables contenues dans un effluent.

Symboles [unités]	Description
<p>Matières sèches [g.L⁻¹]</p> <p><i>MSe</i></p> <p><i>MSf</i></p> <p>Photosynthèse</p> <p>r</p> <p><i>Se</i></p> <p><i>Sf</i></p> <p>Turbide</p>	<p>concentration en matières solides et solubilisées dans un liquide. Elles sont déterminées directement par séchage (étuve à 105 °C) d'un échantillon brut d'eau ou de boues dans des conditions définies et contrôlées. Les MS se distinguent des MES par la fraction des sels dissous qui peuvent représenter 20-30 % des MES.</p> <p>source d'effort modulée.</p> <p>source de flux modulée.</p> <p>synthèse de matières organiques à partir de gaz carbonique et d'eau, en présence de lumière par des organismes vivants utilisant des pigments photochimiques.</p> <p>résidu.</p> <p>source d'effort.</p> <p>source de flux.</p> <p>(turbidité) : réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes (MES).</p>

Liste des figures

Figure 1.1 : Diagramme fonctionnel d'un système	10
Figure 1.2 : Schéma fonctionnel d'une régulation	14
Figure 1.3 : Représentation de l'équation $y = ax$ par Graphe de fluence	15
Figure 1.4 : Description d'un interrupteur idéal par réseau de Pétri	15
Figure 1.5 : GIC : (a) processeur causal et (b) processeur rigide	16
Figure 1.6 : Méthodologie de la modélisation	18
Figure 1.7 : Principe de l'identification	20
Figure 2.1 : Fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées	27
Figure 2.2 : Dégrilleur courbe d'une station d'épuration	28
Figure 2.3 : Flottation des graisses par injection de fines bulles	29
Figure 2.4 : L'opération de dessablage- déshuilage	30
Figure 2.5 : Décanteurs d'une station d'épuration	31
Figure 2.6 : Bassin d'aération	31
Figure 2.7 : Répartition par secteur et localisation des expériences mondiales les plus importantes en réutilisation des eaux usées	35
Figure 3.1 : Étapes de modélisation par bond graph	42
Figure 3.2 : transfert de puissance de A vers B	43
Figure 3.3 : Tétraèdre de Paynter	45
Figure 3.4 : Règles de causalité	47
Figure 3.5 : Fenêtre du module BondPad	50
Figure 3.6 : Fenêtre du simulateur	51
Figure 3.7 : Fenêtre de compilation	51
Figure 3.8 : Fenêtre des courbes	52
Figure 3.9 : schéma simplifié de la station d'épuration	53
Figure 3.10 : Bond graph à mots du processus	53
Figure 3.11 : Modèle bond graph du processus	54
Figure 3.12 : Modèle bond graph de la station d'épuration généré en utilisant Symbols 2000	57
Figure 3.13 : La réponse du processus avec les vannes V1, V2 et V3 sont fermées	58
Figure 3.14 : La réponse du processus avec les vannes V2 et V3 sont fermées et la vanne V1 est ouverte.....	58
Figure 3.15 : La réponse du processus avec les vannes V1 et V2 sont ouvertes et la vanneV3 est fermée	59
Figure 3.16 : La réponse du processus avec les vannes V1, V2 et V3 sont ouverts.....	59
Figure 4.1 : Automatisation Intégrée	63
Figure 4.2 : Introduction d'outils de surveillance, de diagnostic et d'aide à la décision au niveau de la supervision	64
Figure 4.3 : Les différentes formes de maintenance [AFN94]	69
Figure 4.4 : Les différentes étapes du diagnostic	73
Figure 4.5 : Estimation paramétrique pour le diagnostic de défauts	79
Figure 4.6 : Représentation bond graph d'un système de surveillance.....	80
Figure 5.1 : Modèle bond graph du processus avec des détecteurs virtuels	86
Figure 5.2 : Réponse des résidus à la fuite dans C1	91
Figure 5.3 : Réponse des résidus au blocage de V1	92
Figure 5.4 : Réponse des résidus à la fuite dans C2	93
Figure 5.5 : Réponse des résidus au blocage de V2	94

Figure 5.6 : Réponse des résidus à la fuite dans C3	95
Figure 5.7 : Réponse des résidus au blocage de V3	96
Figure 5.8 : Réponse des résidus à la fuite dans C4	97
Figure A.1 : Exemple d'un élément multiport	104
Figure A.2 : Exemple de simplification des jonctions	105
Figure A.3 : Chemin causal simple	106
Figure A.4 : Chemin causal mixte	106
Figure A.5 : Chemin causal indirect	106
Figure A.6 : Boucle causale entre R_1 et C_1	108
Figure A.7 : Chaîne d'action	108
Figure A.8 : Exemple	112
Figure A.9 : Schéma bloc déduit à partir du modèle bond graph	113
Figure A.10 : Schéma bloc pour obtenir V_{C1}	113
Figure C.1 : Schéma bloc du résidu r_1	115
Figure C.2 : Schéma bloc du résidu r_2	116
Figure C.3 : Schéma bloc du résidu r_3	117
Figure C.4 : Schéma bloc du résidu r_4	118

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Equivalences des variables généralisées dans des domaines physiques	44
Tableau 3.2 : Éléments de base du bond graph	46
Tableau 3.3 : Éléments de jonction du bond graph	47
Tableau 3.4 : Règles d'affectation de la causalité	48
Tableau 3.5 : Equations correspondantes au modèle bond graph	55
Tableau 4.1 : Illustration des définitions à l'aide d'un moteur de ventilateur	67
Tableau 5.1 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison [1 0 1 1 1 1 1]	88
Tableau 5.2 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison [1 0 1 0 1 1 1]	89
Tableau 5.3 : Matrice de signature de défaillance de la combinaison [1 0 1 0 1 0 1]	89
Tableau 5.4 : Résultats du placement de capteurs	90
Tableau A.1 : Transmittance des éléments passifs linéaires	107
Tableau B.1 : Les paramètres utilisés dans la simulation	114

Introduction générale

Introduction générale

Le domaine de contrôle des procédés a particulièrement explosé dans les 30 dernières années avec l'automatisation des processus complexes. Grâce aux progrès réalisés dans la commande distribuée d'effectuer des prédictions basées sur des modèles (commande prédictive), les bénéfices acquis par les industries telles que, chimiques, pétrochimiques ont été énormes. Toutefois, une tâche importante au sein des unités industrielles demeure une activité manuelle effectuée par l'opérateur humain. C'est la tâche de répondre aux événements anormaux qui surviennent sur le procédé. Ceci implique la détection à temps d'un événement anormal, en diagnostiquant ses causes et une prise de décision en retour, qui soit appropriée de sorte à ramener le procédé dans un état normal et sécurisé (supervision).

Des statistiques industrielles montrent que 70% des accidents industriels sont causés par des erreurs humaines. Ces événements anormaux ont eu des impacts d'ordre économique, mais surtout des impacts sur la sécurité et l'environnement. Malgré les avancées effectuées sur les commandes par ordinateur des unités chimiques, le fait de l'accident le plus récent sur l'usine AZF à Toulouse, avec 29 morts et plus de 50 personnes gravement blessées, pose le problème du développement des techniques de supervision. Les autres accidents récents les plus spectaculaires sont celui de l'Union Carbide à Bhopal en Inde et d'Occidental Petroleum à Piper Alpha ou encore l'explosion d'une unité de Kuwait Petrochemical à la raffinerie de Mine Al-Ahmedi refinery en juin 2000, laquelle causa près de 100 millions de dollars de dommages. De plus, des statistiques industrielles ont montré que de petits accidents sont très fréquents tous les jours, occasionnant des pertes économiques importantes.

Le traitement des eaux usées est sous une pression croissante pour produire une eau de plus grande qualité. Ceci représente une économie en terme de réutilisation de ces eaux mais aussi en terme de respect de l'environnement. L'objectif de notre travail est l'utilisation de l'outil bond graph pour la modélisation et la surveillance d'une station d'épuration.

Ce mémoire s'articule sur cinq chapitres, le premier chapitre rappelle les enjeux de la modélisation des systèmes dynamiques, les notions de système et de modèle sont détaillées.

Le deuxième chapitre nous donne une description de la station d'épuration à boues activées. Dans cette section nous détaillons le principe de fonctionnement d'une telle station, la réutilisation des eaux épurées et la production des boues.

Le chapitre trois est consacré à la modélisation bond graph du phénomène hydraulique de la station d'épuration. Les principes de la méthodologie bond graph sont rappelés dans cette section.

Le quatrième chapitre rappelle les principaux enjeux industriels actuels et la maintenance des outils. Quelques techniques de mesures permettant de représenter l'état de fonctionnement d'un procédé industriel sont présentées.

Nous présentons les différentes méthodes de diagnostic classées suivant deux catégories : les méthodes à base de modèles et les méthodes sans modèles. Comme notre méthodologie pour la surveillance de la station d'épuration est basée sur l'approche bond graph, nous détaillons dans cette section la surveillance par bond graph.

Dans le cinquième chapitre nous réalisons une architecture d'instrumentation placée sur le modèle de la station afin d'assurer sa surveillance. Dans cette section nous utilisons l'outil bond graph pour la génération des relations de redondance analytique et pour le placement de capteurs. Les résultats de simulation montre l'efficacité de la méthodologie employée.

Une conclusion, des travaux réalisés et publiés à partir des résultats de modélisation et de surveillance ainsi que des perspectives clôturent ce modeste travail.

Chapitre 1

1.1 Introduction :

La phase de modélisation est essentielle dans le processus d'analyse et de synthèse d'un système de commande. En automatique, le modèle mathématique d'un système dynamique est défini comme un ensemble d'équations qui représentent le comportement dynamique du système avec la précision souhaitée. Le processus de modélisation consiste premièrement en l'identification du système et de ses composants élémentaires. Le modèle mathématique idéal est obtenu en écrivant les lois physiques régissant le comportement du système. Quelle que soit la nature physique du système à étudier, cette étape résulte en l'écriture des équations différentielles et algébriques (linéaires, non linéaires, à coefficients constants ou variant dans le temps) qui forment l'expression mathématique du comportement idéal du système. Un certain nombre d'hypothèses de travail sont ainsi formulées définissant la classe des modèles utilisés. L'ultime phase consiste alors à mettre en œuvre des méthodes d'analyse permettant le passage de ces modèles mathématiques vers des modèles particulièrement dédiés à l'automatique.

La démarche globale peut ainsi se résumer de la manière suivante :

1. Définir le système à étudier et ses composants élémentaires.
2. Formuler le modèle mathématique idéal et dresser la liste des hypothèses à retenir.
3. Ecrire les lois physiques régissant le comportement du système et les équations différentielles et algébriques associées.
4. Définir le modèle dédié à l'automatique.

La complexité du modèle résultant va conditionner le choix des méthodes d'analyse et de synthèse qu'il sera possible de lui appliquer. Il est donc très important d'établir un bon compromis entre la précision du modèle et sa complexité [3]. Ce chapitre a pour but de donner les principes de base de la modélisation des systèmes dynamiques et les différentes manières que peut avoir un modèle d'un système.

1.2 Notion de système :

Nous parlerons de systèmes chaque fois que l'on sera capable, sur une entité donnée, de distinguer des entrées et des sorties liées par causalité. Par le terme de causalité, nous voulons simplement dire qu'une action sur les entrées engendre une réaction sur les sorties. Cette notion de système est donc très générale et peut s'appliquer pratiquement à tout ce que nous entoure [37].

Il est courant de représenter un système à l'aide d'un diagramme, dit diagramme fonctionnel, traduisant une relation de cause à effet entre les entrées et les sorties. La figure 1.1 fournit un exemple d'une telle représentation.

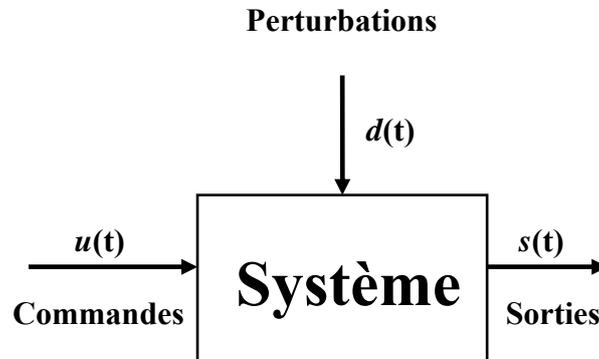


Figure 1.1 : Diagramme fonctionnel d'un système [37]

Dans ce diagramme, le rectangle représente le système considéré, les flèches représentent des grandeurs physiques (tension, courant, force, vitesse...). On distingue les entrées permettant d'agir sur le système et les sorties représentant les réponses à ces sollicitations. De façon plus précise, on distingue :

- Les actions volontaires, encore appelées commandes, notées u .
- Les actions involontaires, encore appelées perturbations, notées d .
- Les réponses aux sollicitations externes (u et d), ce sont les sorties notées y .

Les grandeurs appliquées aux entrées permettent de faire évoluer le système. Les grandeurs de sortie, conséquences des entrées rendent compte de cette évolution; mais les entrées et les sorties à elles seules ne suffisent pas à caractériser l'évolution du système, il faut y ajouter les états. Les états sont des variables internes constituant la mémoire du système, elles condensent toute l'information sur son passé. Il suffit de connaître l'état du système à un instant initial quelconque pour prédire son comportement futur, sous l'action d'entrées connues [3], [5], [38] et [40].

1.3 Notion de modèle :

Le modèle d'un système est une structure mathématique qui, soumise aux mêmes signaux d'action que le système réel, reproduit le comportement d'une expérience. C'est-à-dire que les variables calculées à partir du modèle sont voisines des valeurs mesurées sur le processus. Il faut toujours rester prudent sur l'aptitude d'un modèle à reproduire la réalité. En

effet, si le modèle a été validé à partir d'une expérience, il se peut que, pour d'autres conditions d'expérience, le modèle ne fournisse plus des résultats voisins des mesures. Il est d'usage de parler d'un modèle établi pour un domaine de fonctionnement donné et dans un cadre d'hypothèse. Un modèle, quelle que soit la valeur du signal appliqué à l'entrée, donnera un résultat; le système réel, lui, peut exploser ! La réalité physique d'un phénomène est généralement très complexe, et bien souvent, on est amené à faire des hypothèses simplificatrices pour traduire cette réalité en équations. L'aptitude d'un modèle à décrire une expérience sera sa qualité essentielle, mais, dès à présent, retenons que le modèle exact n'existe pas. Le modèle doit satisfaire deux exigences opposées : reproduire la réalité le plus précisément possible et avoir une structure mathématique la plus simple possible (pour une utilisation aisée). Un modèle reste un compromis dans un ensemble de contraintes.

La modélisation est une discipline qui requiert des connaissances dans de nombreux domaines de la physique. Elle fait appel aux compétences des ingénieurs de nombreuses spécialités. Elle fait apparaître les relations de cause à effet entre les variables d'entrée et de mesure [38].

La modélisation d'un phénomène peut s'effectuer selon des degrés de connaissances divers. L'utilisateur souhaite ce degré de connaissance le plus élevé possible, mais la complexité de la réalité physique permet au mieux d'obtenir un modèle approximatif; ceci nous conduit à classer les modèles.

Les modèles les plus riches d'information sont appelés des **modèles de connaissance**. Ils sont obtenus à partir des lois de la physique et apportent une connaissance complète sur les variables internes du système. Par exemple, pour un circuit électrique constitué d'éléments passifs tels que résistances, condensateurs et bobines, les lois d'ohms permettent de connaître les intensités des courants ainsi que les différences de potentiel pour tous les composants, quelque soit la structure du circuit. Les paramètres du modèle ont une interprétation physique : résistance en ohm, capacité en microfarad et inductance en millihenry [37] et [38].

Un **modèle de représentation** est un modèle dont le comportement externe est analogue à celui du système, sans que les mécanismes internes aient été complètement expliqués. Cela revient à considérer le système objet comme une boîte noire dont on ne cherche pas à détailler les mécanismes internes. On ne prend en considération que les causes (entrées) et les effets (sorties) [37], [38] et [40].

La modélisation d'un système complexe conduit quelquefois à un **modèle mixte**. Certaines parties sont décrites par un modèle de connaissance, mais pour d'autres un modèle

de représentation est utilisé. On parle alors de boîte grise pour qualifier le modèle obtenu. La construction d'un modèle boîte grise repose sur l'utilisation systématique des connaissances a priori sur le processus et des données expérimentales[37], [38] et [40].

1.3.1 Modèle d'état :

Une large classe de systèmes a la propriété de pouvoir être décrite par un nombre fini de grandeurs appelées variable d'état. Ces variables permettent de déterminer les évolutions futures du système à partir des états initiaux et des grandeurs externes d'entrées. Une représentation d'état ou modèle d'état est un ensemble fini d'équations différentielles du premier ordre reliant des grandeurs scalaires, divisées en variables internes (ou variables d'état) et en variables externes comprenant les grandeurs d'entrée et de sortie. De façon plus précise, le comportement dynamique d'un système de degré n peut être décrit à l'aide de n variables indépendantes notées $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$ appelées variables d'état, avec $t \in \mathbf{R}$ dans le cas continu. Les évolutions des variables d'état à partir d'un instant initial t_0 ne dépendent que des valeurs initiales $x_1(t_0)$, $x_2(t_0)$, ..., $x_n(t_0)$ et des grandeurs de commandes appliquées à partir de l'instant t_0 . En d'autres termes, l'état du système à un instant t quelconque ne dépend que de l'état initial (ce sont les conditions initiales) à un instant t_0 quelconque et des entrées appliquées sur l'intervalle de temps t_0 à t . Les variables d'état, aussi appelées variables internes du système, représentent l'information minimale nécessaire à la prédiction du comportement futur du système. Les variables d'état correspondent aux sorties des éléments de stockage d'énergie potentielle et cinétique, ce sont les sorties des intégrateurs du schéma de simulation analogique [37] et [40].

D'une manière générale, un système à temps continu d'ordre n peut être représenté par un modèle d'état de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t), u(t)) \end{cases} \quad (1.1)$$

Où $x(t) \in \mathbf{R}^n$ désigne le vecteur d'état, $u(t) \in \mathbf{R}^m$ est le vecteur des entrées permettant de modifier l'état du système, $y(t) \in \mathbf{R}^p$ est le vecteur des sorties. Les champs de vecteurs $f(x(t), u(t))$ et $h(x(t), u(t))$ sont, respectivement, les fonctions d'évolution et de sortie de $\mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^m$ dans \mathbf{R}^n et \mathbf{R}^p respectivement. Un cas particulier, d'une grande importance pratique,

est celui des systèmes linéaires. Un système est dit linéaire s'il vérifie le principe de superposition. On a dans ce cas :

$$\begin{cases} f(x(t), u(t)) = Ax(t) + Bu(t) \\ h(x(t), u(t)) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (1.2)$$

Où $A \in R^{n \times n}$ est la matrice d'état ou d'évolution, $B \in R^{n \times m}$ est la matrice d'entrée, $C \in R^{p \times n}$ est la matrice de sortie ou d'observation et $D \in R^{p \times m}$ est la matrice de transmission directe des entrées sur les sorties. La matrice D est généralement nulle, car, pour un système réel, les sorties ne peuvent, en général, pas réagir instantanément aux variations des entrées.

1.3.2 Modèle d'entrée sortie :

Une représentation très utilisée dans le cadre de l'étude des systèmes linéaires est la représentation par fonction de transfert et sa généralisation au cas multivariable par matrice de transfert. Dans le cas monovarié (une entrée et une sortie), la fonction de transfert représente la transformée de Laplace de la réponse impulsionnelle du système, calculée pour des conditions initiales nulles. La généralisation de cette définition au cas multivariable conduit à la notion de matrice de transfert [37] et [40].

1.3.3 Représentation multimodèle :

Tout modèle a un domaine de validité limité. Cette limitation provient soit des hypothèses simplificatrices formulées lors de l'élaboration d'un modèle, soit des conditions expérimentales d'obtention des données nécessaires à l'identification des paramètres d'un modèle. Il peut aussi s'agir d'un choix délibéré d'adopter une structure de représentation simple, linéaire le plus souvent, valable seulement au voisinage d'un point de fonctionnement.

Afin d'obtenir une représentation d'un système valable dans un large domaine de fonctionnement, il peut être intéressant de combiner judicieusement un ensemble de modèles simples, valable localement (modèles locaux). On définit alors un multimodèle comme étant la combinaison d'un nombre fini de modèles simples [37].

Sur le plan conceptuel, cette approche consiste à représenter un système, aussi compliqué soit-il, par une combinaison de N modèles simples. Plus la réalité considérée sera compliquée, plus la représentation qu'on tire sera complexe, et plus il faudra multiplier les modèles simples. Finalement, cette approche consiste à représenter un système réel compliqué par un modèle complexe résultant de l'assemblage d'un nombre fini de modèles simples.

1.3.4 Modèles de règles :

Ce type de modèles correspond à une description par un ensemble de règles Si ... alors. Ce genre de modèles se prête assez bien à une exploitation mettant en œuvre les techniques décisionnelles de l'intelligence artificielle et de la logique floue [40].

1.3.5 Modèles de fichiers :

Ce type de modèles est constitué d'informations sous formes de tableaux de données reliant l'évolution des sorties du processus à l'évolution des entrées pour différentes classes d'entrées. Ces modèles sont considérés le plus souvent comme étant le point de départ afin d'élaborer des modèles plus évolués [40].

1.3.6 Modèles graphiques :

Ces modèles sont très aisés à manipuler et possèdent des propriétés remarquables susceptibles d'aider à la modélisation et parfois ils sont capables de valider même cette modélisation. Les principaux types de modèles graphiques sont :

1. Schéma fonctionnel :

Appelé aussi schéma bloc est une description directe des divers éléments du processus étudié, faisant ou non intervenir les différentes relations mathématiques mises en œuvre [3].

Cette méthode a pour avantage de représenter graphiquement la hiérarchie d'un système en montrant les variables d'entrée et de sortie.

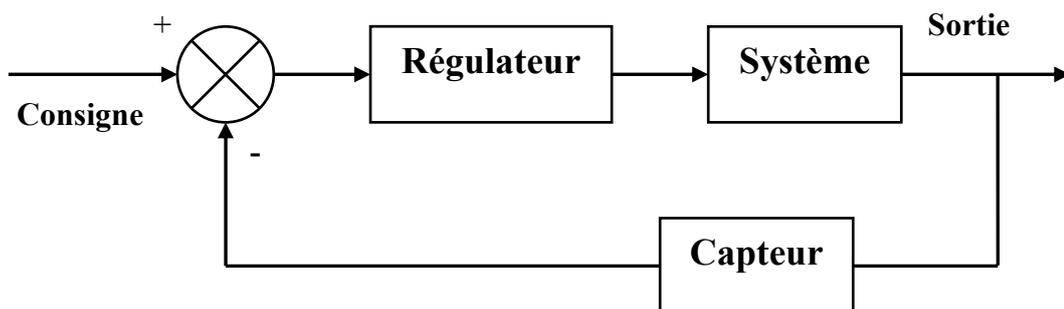


Figure 1.2 : Schéma fonctionnel d'une régulation [3]

2. Graphes de fluence:

Les graphes de fluence ont pour objet de donner une image concrète à un système d'équations linéaires. Au lieu d'écrire à titre d'exemple l'équation:

$$y = a x \quad (1.3)$$

On dessine le diagramme de la figure 1.3.

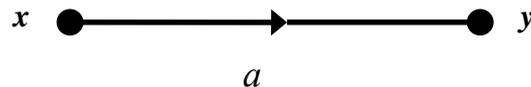


Figure 1.3 : Représentation de l'équation $y = a x$ par graphe de fluence [3]

Les graphes de fluence correspondent à une représentation proche de celle des schémas fonctionnels. Les deux représentations sont d'ailleurs des représentations duales. Leur intérêt apparaît principalement au niveau de la modélisation des systèmes linéaires afin de pouvoir leur appliquer le théorème de superposition [3].

3. Les réseaux de Pétri et les Grafjets :

Ces représentations sont adaptées particulièrement aux processus à événements discrets dont le nombre d'état est fini. Elles sont très importantes, principalement dans la caractérisation des systèmes logiques, des systèmes de fabrication automatisée et des ateliers flexibles [20]. Les réseaux de Pétri sont introduits par G. Petri dans sa thèse de doctorat en 1962. Les états stables sont appelés places et les conditions de passage d'une place à l'autre sont nommées les transitions. Prenons l'exemple d'un interrupteur idéal commandable par un signal g . Si l'interrupteur est fermé, il impose une tension nulle à ses bornes. S'il est ouvert, il impose un courant nul dans la branche dans laquelle il est inséré.

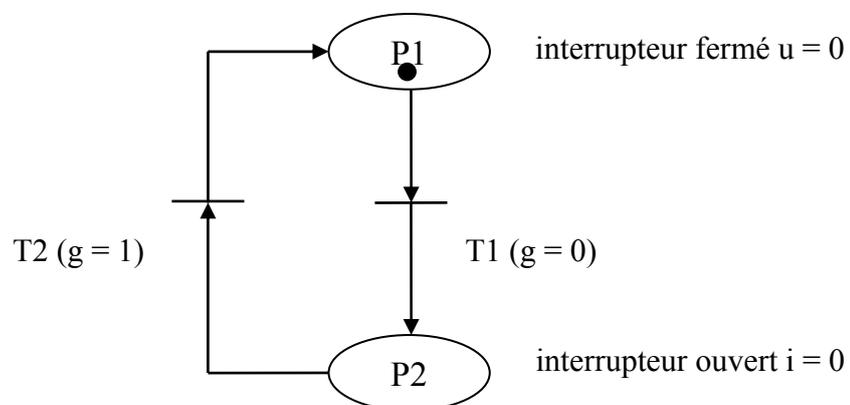


Figure 1.4 : Description d'un interrupteur idéal par réseau de Pétri [20]

4. Les bonds graphs :

L'outil bond graph (BG) fondé par H. Paynter (1961) est un langage graphique de modélisation des systèmes dynamiques. Le modèle bond graph peut être considéré comme intermédiaire entre le système physique et le modèle qui lui est associé. La méthodologie bond graph possède deux particularités importantes, la première est son caractère unifié à tous les domaines de la physique et la deuxième est son approche structurée et modulaire de modélisation des systèmes pluridisciplinaires [5], [9], [36] et [38].

La méthodologie bond graph est basée sur les principes suivants :

- La représentation des transferts énergétiques entre composants ou sous systèmes à l'aide de liens de puissance portant des variables complémentaires, effort et flux, dont le produit représente la puissance instantanée échangée.
- Une organisation en éléments passifs, éléments actifs et éléments de jonction, conservateurs de puissance formant la structure du modèle.
- L'encapsulation dans les composants des lois mathématiques représentatives de leurs comportements internes et externes.
- La visualisation graphique des interactions entre composants à l'aide de traits de causalité.

5. Graphe Informationnel Causal (GIC) :

Cette méthode a été formalisée par J.P. Hautier et J. Faucher. Elle permet de visualiser les transferts d'informations dans le système. Cette méthode utilise la notion des variables généralisées d'effort et de flux. Le GIC traite des informations portées par les variables et orientées par la causalité de la cause vers l'effet. Les transformations d'information sont effectuées par des processeurs. Pratiquement, la sortie du processeur ne dépend donc que des valeurs présentes et passées de ses entrées [13]. Il existe deux types de processeurs:

- Processeur causal : la sortie est nécessairement une fonction de l'état énergétique. La relation est alors orientée par la causalité temporelle.
- Processeur rigide : la sortie est une fonction instantanée de l'entrée.

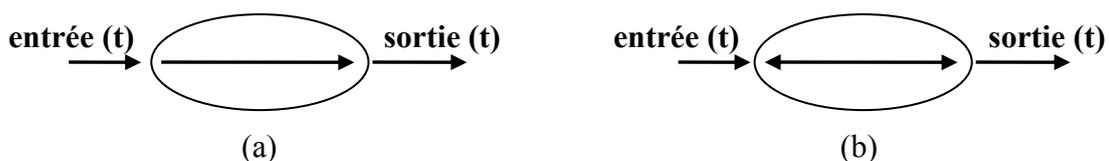


Figure 1.5 : GIC : (a) processeur causal et (b) processeur rigide [13]

La vocation principale des GIC est la synthèse de lois de commande obtenue par inversion du graphe. Le GIC peut être obtenu de façon systématique à partir du Bond Graph.

6. Puzzle :

Ce formalisme a été proposé par H. Piquet, H. Foch et H. Demni. A la base, il s'agit là d'un formalisme dédié à la conception (au sens de la synthèse) plus qu'à l'analyse de système. En réponse à un cahier des charges, les objectifs sont de guider le concepteur pour définir une structure dont chaque élément constitutif fonctionne et s'associe à ses voisins dans des conditions physiquement acceptables. Le principe est de modéliser chaque élément du système par une pièce de puzzle qui "s'emboîte" avec ses éléments périphériques si les règles d'association physique sont respectées : la causalité intégrale est obligatoire. Chaque côté de puzzle comporte simultanément deux informations : les variables généralisées d'effort e et de flux f . Grâce à ces notions, la méthode puzzle permet d'obtenir un modèle homogène d'un système multidomaine. Il existe d'autres outils de modélisation graphique comme le graphe biparti, le digraphe [13].

1.4 Principes de la modélisation :

Jusqu'à présent, différents types de représentations mathématiques, susceptibles de modéliser le comportement d'un système dynamique ont été présentés. Cette partie traite de l'obtention pratique d'une telle représentation. L'organigramme de la figure 1.6 présente les différentes étapes permettant l'obtention d'un modèle représentatif du système étudié. Ces différentes étapes sont détaillées dans les paragraphes suivants :

1.4.1 Schéma de principe de l'installation :

Un système est généralement conçu pour assurer une fonction principale bien définie. Le schéma de principe est une représentation simplifiée du système physique tel qu'il se présente (ou se présentera) dans la réalité. Il permet de comprendre le fonctionnement du système et la façon dont est assurée la fonction principale. Il permet à ce titre la communication entre les différents acteurs prenant part à la conception ou à la réalisation du produit. C'est une ébauche de solutions techniques durant la phase de conception d'un système [37].

1.4.2 Schéma fonctionnel de l'installation :

La représentation par schéma (ou diagramme) fonctionnel permet d'illustrer le fonctionnement et les relations entre les divers constituants du système; allié à une

représentation par schéma de principe, elle permet une vue claire et globale des différentes fonctions que doit assurer le système pour satisfaire à la réalisation de l'objectif ultime. C'est une étape utile à la recherche d'un modèle mathématique qui servira à simuler le système et à synthétiser les lois de commande.

Un diagramme fonctionnel possède certain nombre de blocs matérialisant les différentes fonctions assurées par l'installation. Ces différents blocs ou fonctions établissent des relations de causalités entre les variables d'entrée et de sortie. L'obtention d'une représentation mathématique du système va alors consister à expliciter ces différentes relations à l'aide des lois de la physique auxquelles tout système réel est nécessairement soumis [37].

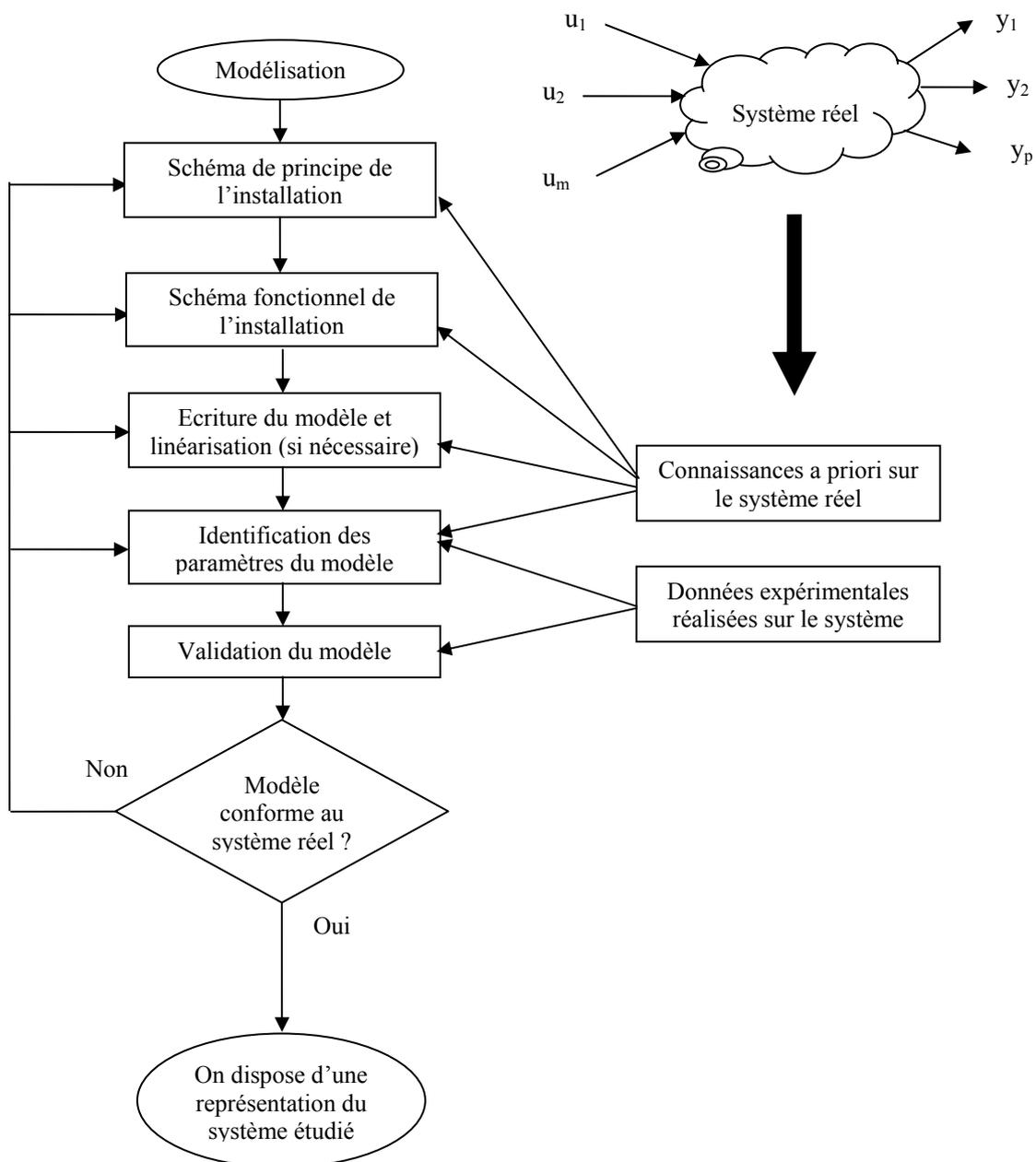


Figure 1.6 : Méthodologie de la modélisation

1.4.3 Ecriture du modèle :

L'obtention d'un modèle de l'installation est réalisée à partir des connaissances disponibles sur les différents blocs du schéma fonctionnel et de leurs interactions. L'expression formelle de ces blocs dépend du type de connaissance dont on dispose, elle peut être analytique (modèle dynamique ou statique), numérique (tableau de valeurs, interpolateur), symbolique (base de règles). Dans le cadre des modèles de connaissances les différentes expressions mathématiques relatives aux différents blocs du schéma fonctionnel sont obtenues à partir des lois et des principes fondamentaux de la physique (mécanique, thermodynamique, électromagnétisme). Précisons que, dans le but d'obtenir un modèle qui soit le plus simple possible, on a intérêt à formuler le maximum d'hypothèses simplificatrices, réalistes sur le plan pratiques [37].

1.4.4 Identification des paramètres d'un modèle :

L'identification d'un système consiste à rechercher un modèle de représentation permettant de décrire le comportement entrée-sortie du système étudié. Dans le cas où l'on dispose d'un modèle de connaissance, l'identification peut être utilisée pour estimer les paramètres intervenant dans le modèle.

1. Principe de l'identification :

D'un point de vue pratique, l'identification est utilisée pour obtenir, à l'aide d'un modèle mathématique, une représentation approximative d'un système inconnu. Le problème se pose généralement de la façon suivante : étant donné un ensemble de mesures entrée/sortie réalisées sur un processus de nature quelconque (physique, chimique, biologique, économique), on suppose qu'il existe une relation déterministe entre les entrées et les sorties mesurées. Le problème est alors de rechercher une forme mathématique de cette relation, valable dans le domaine où les mesures ont été réalisées. En d'autres termes, il s'agit de construire un modèle entrées/sorties du processus étudié, à partir des mesures disponibles. Ceci peut être obtenu en paramétrant correctement le modèle, défini généralement à l'aide d'une fonction de transfert (continue ou discrète), de façon à ce qu'il approche au mieux le comportement du système inconnu [5], [37] et [40].

La figure 1.7 présente le principe général de l'identification. La structure du modèle ayant été choisie, l'algorithme d'identification va modifier les paramètres du modèle de façon à minimiser l'erreur d'estimation ε au sens d'un critère généralement quadratique. L'identification d'un système comporte trois étapes essentielles :

- La caractérisation, c'est-à-dire le choix de la structure du modèle.

- L'identification, c'est-à-dire la détermination des valeurs numériques des paramètres du modèle.
- La validation, c'est-à-dire la vérification de la bonne qualité du modèle vis-à-vis du système réel.

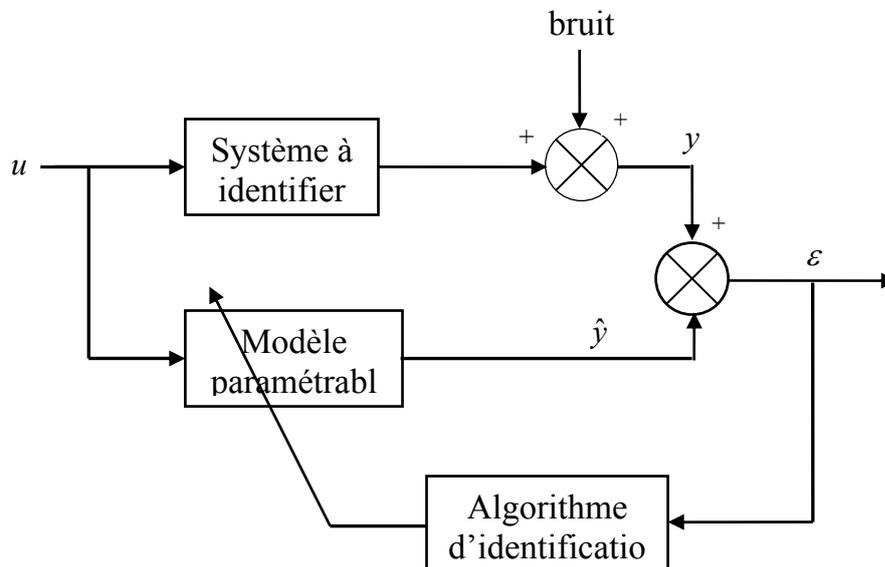


Figure 1.7 : Principe de l'identification [37]

2. Principales méthodes d'identification :

Il existe de nombreuses méthodes d'identification, aucune n'est universelle, chacune possède des avantages et des inconvénients. On peut citer quelques-unes de ces méthodes sans prétendre à l'exhaustivité.

- **Analyse indicielle :** Cette méthode est très utilisée car elle est très simple à mettre en œuvre. Elle est basée sur l'étude graphique de la réponse à un échelon du système étudié. Le modèle ainsi obtenu peut servir d'initialisation pour des méthodes numériques plus précises.
- **Analyse harmonique :** Cette méthode consiste à relever le gain et la phase en sortie du système étudié, soumis à une excitation sinusoïdale. Le diagramme de Bode peut alors être exploité directement pour réaliser la synthèse d'un correcteur, sans nécessairement passer par un modèle paramétrique du système.
- **Méthode de corrélation :** Cette méthode repose sur les propriétés de fonction de corrélation de signaux particuliers utilisées pour exciter le système étudié. On montre que la fonction de corrélation entrée/sortie d'un système linéaire, excité à l'aide d'un bruit blanc (signal dont le spectre est constant), est égale à la réponse impulsionnelle du système.

- **Méthode d'estimation** : Cette méthode consiste à rechercher un algorithme de calcul du vecteur paramètre du modèle, optimal au sens de l'extrémalisation d'un certain critère de performance (maximum de vraisemblance, moindre carré).

1.5 Utilité des modèles :

1.5.1 Connaissance scientifique :

Bien que ce mot n'ait pas été utilisé, toute démarche scientifique a toujours tendance à obtenir des modèles. Lorsque la complexité des phénomènes (grand nombre de variables) ou leurs complications (relations intriquées, en pratique non linéaires, entre ces variables) augmente, l'esprit humain se trouve rapidement limité dans sa capacité à intégrer toutes ces informations et à reconnaître une cohérence ou une stationnarité structurelle invariante dans tous les comportements constatés. Il est donc nécessaire d'avoir recours à une aide méthodologique et à un support matériel approprié (calculateurs).

L'application première des modèles est en effet d'aider le processus à la découverte scientifique. Notons, de plus, que les techniques modernes de construction (conception assistée par ordinateur CAO) utilisent fondamentalement des modèles mathématiques décrivant le fonctionnement du processus qu'il faut construire et dont on cherche à optimiser les paramètres, afin de satisfaire un certain critère de qualité, tout en respectant des contraintes.

Bien que la modélisation ne soit pas suffisante ici, elle est absolument nécessaire à la CAO si elle veut remplir pleinement son rôle. Les modèles de connaissance sont, dans ce cas, souvent nécessaires [30].

1.5.2 Commande de processus :

S'il s'agit de commander un processus simple (réguler le débit d'une vanne par exemple), la modélisation n'est pas nécessaire et une adaptation locale heuristique d'un régulateur simple suffit largement.

S'il s'agit d'un processus plus complexe, à plusieurs entrées et sorties (multivariable), où l'on recherche un certain comportement optimal, alors il est beaucoup plus économique et plus sûr de procéder autrement. Cela consiste à établir un modèle du processus à commander puis à concevoir, à l'aide de ce modèle, une simulation du régulateur qui, une fois spécifié et optimisé, sera implanté à coup sûr sur le site. La modélisation est donc là économiquement nécessaire. Les modèles de représentation y sont souvent suffisants [30].

1.5.3 Diagnostic :

A caractérisation donnée, les paramètres d'un processus objet peuvent jouer le rôle d'identificateur de ce processus et peuvent permettre ainsi de le distinguer d'un autre processus de même caractérisation mais dont les valeurs numériques des paramètres sont différentes. Le processus de modélisation et d'identification peut alors être interprété comme une technique de réduction de l'information qui donnerait une fiche signalétique d'identité suffisante pour discriminer les objets entre eux.

En particulier, si le processus évolue dans le temps soit par vieillissement, soit par usure progressive, les paramètres de son modèle comportemental évoluent également et peuvent inversement être un indicateur qui permet de diagnostiquer l'état du processus à un instant donné [30].

1.6 Notion de simulation :

La simulation est une expérience menée sur un modèle. Elle permet dans un premier temps de valider le modèle en comparant les résultats de l'expérience et de la simulation, puis une extrapolation des conditions d'expérience dans un cadre limité. La simulation d'un système en temps continu est généralement obtenue par un algorithme d'intégration numérique ; l'utilisateur doit choisir celui qui est le mieux adapté (méthode, pas de calcul et précision).

La simulation apporte un grand nombre d'avantages par rapport à une démarche basée sur l'expérience. En premier lieu, nous trouvons la répétitivité : les mêmes causes produisent les mêmes effets; les conditions de la simulation prennent en compte l'ensemble des variables d'entrées et d'environnement. On peut aussi s'affranchir de l'effet des perturbations, mettre en évidence l'influence de chaque variable d'entrée et chaque paramètre du modèle. La conception d'un nouveau type d'avion ou de voiture ne serait plus possible sans l'apport de la simulation. Les constructeurs souhaitent atteindre l'objectif *right at first*, c'est-à-dire un choix et un dimensionnement des composants par la simulation qui conduisent à un prototype « bon dès la première expérience ».

La simulation permet d'étudier des phénomènes pour lesquels l'expérience n'est pas possible; lorsque le système présente une dynamique très lente (climatologie) ou bien très rapide (phénomène de combustion-explosion). Le temps de simulation ne dépend que de la complexité du modèle, du choix et des réglages de l'algorithme d'intégration numérique et des performances de la machine informatique qui exécute la simulation.

Toutefois, la simulation peut apporter des désillusions. Elle peut ne pas être validée par l'expérience suite à un mauvais choix ou un excès d'hypothèses simplificatrices. La dynamique du phénomène peut requérir un algorithme d'intégration numérique particulier. D'une façon générale, toutes les omissions et les approximations dans la phase de modélisation vont creuser l'écart entre l'expérience et la simulation [38].

1.7 Conclusion :

La modélisation est une activité essentielle dans le processus de conception d'un système, car elle est à la fois le support pour l'analyse et la synthèse. Dans ce chapitre nous avons donné les principales notions concernant la modélisation des systèmes dynamiques.

Nous avons montré qu'un système peut être décrit par un modèle de connaissance (boîte blanche) ou un modèle de représentation (boîte noire). Nous avons ensuite donné les différentes représentations que peut avoir un modèle. Nous avons enfin donné une définition à la notion de simulation.

Chapitre 2

2.1 Introduction :

La notion d'épuration des eaux et le concept d'assainissement qui lui est associé ont évolué au cours des dernières décennies. Initialement conçu comme un concept de santé publique, l'assainissement des eaux usées a durant longtemps consisté à évacuer les eaux usées le plus loin et le plus rapidement possible des agglomérations. Il s'agissait d'éviter la stagnation des eaux putrides près des habitations et à éloigner ainsi les risques sanitaires associés, ainsi que les inconvénients les plus manifestes (détritus, odeurs, ...). Cette pratique a conduit durant les années 1960-1970 à la généralisation du «tout à l'égout ». Elle représente à présent un confort que peu seraient prêts à remettre en cause, même si l'assainissement collectif n'est pas la seule façon de pratiquer puisqu'il existe également des possibilités d'assainissement individuel ou semi collectif.

Cependant, cette facilité a eu aussi pour conséquence de concentrer des rejets polluants sur des points précis du réseau hydrographique (sorties des collecteurs) alors qu'ils étaient dispersés auparavant sur des zones plus vastes. Il s'en est suivi une dégradation des milieux aquatiques et la notion d'assainissement a dû être élargie pour répondre à ces nouveaux problèmes. A présent l'assainissement des eaux usées pourrait être défini comme l'ensemble des techniques destinées à collecter les eaux, les évacuer et les traiter jusqu'à un niveau acceptable par le milieu récepteur. Dans la pratique cela consiste à fixer des normes de rejets de manière à garantir les différents usages de l'eau (eaux potabilisables, eaux de baignade, ...) [25].

Le concept d'assainissement s'est progressivement modifié au cours des dernières années. Les premières stations d'épuration visaient à réduire principalement la pollution visible (les matières en suspension), puis la pollution organique. A présent, de plus en plus de stations nouvelles sont équipées d'un traitement tertiaire visant à éliminer l'azote et le phosphore. Ce chapitre sera consacré à la description de la station d'épuration, son principe de fonctionnement et les sous produits de l'épuration.

2.2 Définitions :

2.2.1 Eaux usées :

Eaux non traitées rejetées après utilisation domestique ou industrielle. Aussi appelées eaux résiduaires. Après utilisation, les eaux dites "usées" ne sont pas directement envoyées dans la nature. Elles sont collectées et acheminées par un réseau d'égouts vers une station d'épuration qui élimine toutes les substances néfastes aux milieux naturels [19], [24] et [25].

2.2.2 L'équivalent-habitant (EH) :

L'EH est une unité conventionnelle qui représente le flux moyen de charge polluante, engendrée par habitant et par jour, dans un volume de 180 litres d'eau usée, c'est-à-dire la production d'un habitant en un jour [1], [21] et [24].

Le nombre d'EH d'une agglomération peut être supérieur à son nombre d'habitants, car cette dernière peut accepter de faire transiter dans son réseau d'assainissement des eaux usées d'origines différentes (celle d'une entreprise agro-alimentaire par exemple). L'EH est également, l'unité dans laquelle s'expriment les flux de pollution et les capacités de traitement et permet donc de déterminer le dimensionnement d'une station d'épuration.

2.2.3 La station d'épuration :

Une station d'épuration est une usine de traitement des eaux usées destinée à les rendre propres à être rejetées sans inconvénients majeurs dans le milieu naturel et rejoindre le cycle de l'eau. Il ne s'agit en aucun cas d'une usine de traitement des eaux naturelles, de surface ou issues d'un captage, en vue de leur potabilisation et de leur fourniture aux besoins de la société [24], [25] et [29].

2.3 Implantation de la station :

La station d'épuration est un outil fondamental pour la protection des milieux naturels. La valorisation de l'image de la station passe par un ensemble de dispositions qui sont à prendre en considération dès l'élaboration du projet en commençant par le choix de l'emplacement du site [29].

A cet égard, quelques règles doivent être rappelées :

- éviter les zones inondables entraînant parfois des dysfonctionnements pendant de longues périodes ; sinon veiller à mettre les équipements électriques hors de l'eau.
- éviter de construire à proximité d'habitations, de zones d'activités diverses (sportives, touristiques, industrielles, ...).
- s'éloigner le plus possible des zones de captage même si le périmètre de protection est respecté.
- réaliser des études géotechniques (vérification de l'imperméabilité par exemple pour un lagunage). La portance du sol (tenue des ouvrages et des canalisations de liaison) et les qualités de sol conditionnent beaucoup le coût du génie civil.

- prendre des précautions particulières lorsqu'un aquifère se situe à faible profondeur (clapets en fond de bassins, ...).
- ne pas implanter les ouvrages dans les zones plantées d'arbres à feuilles caduques (lit bactérien, lagunage, bassin d'aération...);
- penser aux extensions ou aux aménagements futurs (disponibilité et réservations de terrains).

2.4 Les pollutions redoutées provenant des eaux usées :

L'épuration n'est pas destinée à produire de l'eau potable mais à réduire les pollutions issues des eaux usées. Plusieurs phénomènes polluants sont redoutés [18].

- **Les matières en suspension**, les rejets des eaux usées apportent avec eux des quantités de matières en suspension et de micro organismes générant de la turbidité et surtout, une grande consommation d'oxygène. Cette contamination est liée à l'oxydation de la matière organique contenue dans les eaux usées et de l'ammonium présent lui aussi dans les eaux usées et produit par la dégradation de la partie azotée de la matière organique. Ces matières provoquent la mort des poissons et empêchent la lumière solaire de pénétrer dans les eaux.
- **Les substances à effets toxiques**, c'est à dire des substances qui peuvent entraîner une mortalité immédiate ou des effets néfastes différés sur les milieux aquatiques telles que métaux toxiques.
- **Les composés azotés et matières phosphorées**, responsables de l'eutrophisation des rivières (développement incontrôlé des végétaux).
- **Les matières oxydables**, qui consomment de l'oxygène et entraînent l'asphyxie de divers vivants.

2.5 Procédé de traitement des eaux usées :

Les eaux usées, qu'elles soient d'origine domestique ou industrielle, sont collectées par un réseau d'assainissement complexe pour être traitées dans une station d'épuration avant d'être rejetées dans le milieu naturel. En station, les traitements varient en fonction de la nature de ces eaux usées et de la sensibilité à la pollution du milieu récepteur. Aujourd'hui, les stations d'épuration sont devenues des usines de dépollution, compactes, couvertes, désodorisées, automatisées. Elles mettent en œuvre des traitements de plus en plus performants, capables d'éliminer à la fois la pollution carbonée, l'azote et le phosphore. Ces

usines sont dimensionnées pour traiter une certaine charge de pollution et assurer un rejet conforme aux normes de rejet [4]. De l'entrée de la station jusqu'au rejet dans le milieu naturel, les différentes étapes du traitement des eaux usées et les principales tâches effectuées sont les suivantes (voir figure 2.1) :

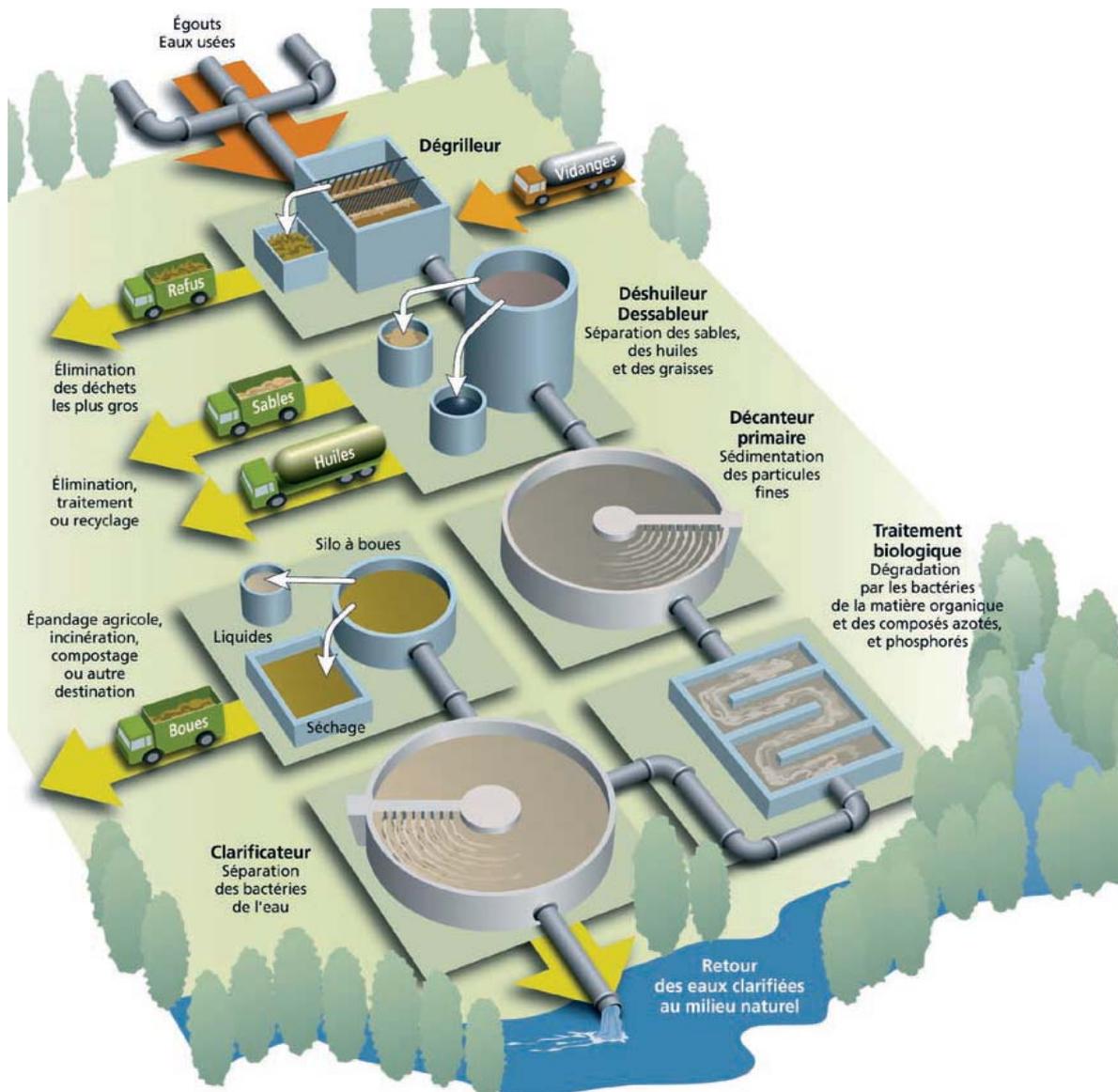


Figure 2.1 : Fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées

2.5.1 Les Prétraitements :

Les prétraitements sont indispensables au bon fonctionnement de la station mais génèrent de fortes contraintes d'exploitation (récupération des refus, salubrité, entretien, ...).

1. Dégrillage :

A l'arrivée, l'eau usée en provenance des égouts passe entre les barreaux métalliques d'une grille (ou d'un tamis) qui retiennent les déchets volumineux (papiers, feuilles, matières

plastiques, objets divers...) et l'effluent est relevé jusqu'au niveau de l'usine à l'aide de pompes [4]. Les dégrilleurs assurent la protection des équipements électromécaniques et réduisent les risques de colmatage des conduites mises en place dans la station d'épuration. Le plus souvent il s'agit de grilles qui récupèrent les déchets plus ou moins volumineux entraînés par les eaux s'écoulant dans les canalisations d'assainissement. Une grande diversité de grilles est disponible sur le marché (droite, courbe, nettoyage amont, aval, ...) [29].

Les performances d'un dégrilleur (manuel ou autonettoyant) se caractérisent par son espacement entre barreaux (voir figure 2.2).

L'écartement des barreaux de la grille est défini par le choix de la taille et de la nature des objets acceptés par la station. On cherche aussi un compromis entre espacement des barreaux et quantité des déchets à évacuer (nettoyage fréquent de la grille). Un espacement de 10mm maximum est quelquefois utilisé (dégrillage fin) pour protéger des filières de traitement des eaux ou des boues spécifiques (décantation lamellaire, centrifugation, ...). Plus communément, l'espacement des barreaux est de 2,0 à 2,5cm pour un dégrilleur mécanique et 3 à 4cm pour un dégrilleur manuel.



Figure 2.2 : Dégrilleur courbe d'une station d'épuration

2. Dessablage - Déshuilage :

Le dessableur est un ouvrage dans lequel les particules denses, dont la vitesse est inférieure à 0,3 m/s, vont pouvoir se déposer. Il s'agit principalement des sables. Il est en effet souhaitable de les récupérer en amont de la station plutôt que de les laisser s'accumuler en certains points (bassin d'aération, ...) où ils engendrent des désordres divers. Par ailleurs, ils limitent la durée de vie des pièces métalliques des corps de pompe ou d'autres appareillages (effet abrasif, ...) [29].

Le dégraisseur a pour objet la rétention des graisses par flottation naturelle ou accélérée par injection de fines bulles comme le montre la figure 2.3. Les teneurs en graisses sont appréciées analytiquement par la mesure des MEH (Matières Extractibles à l'Hexane). Ces matières grasses sont susceptibles de nuire à la phase biologique du traitement (mousses, ...).

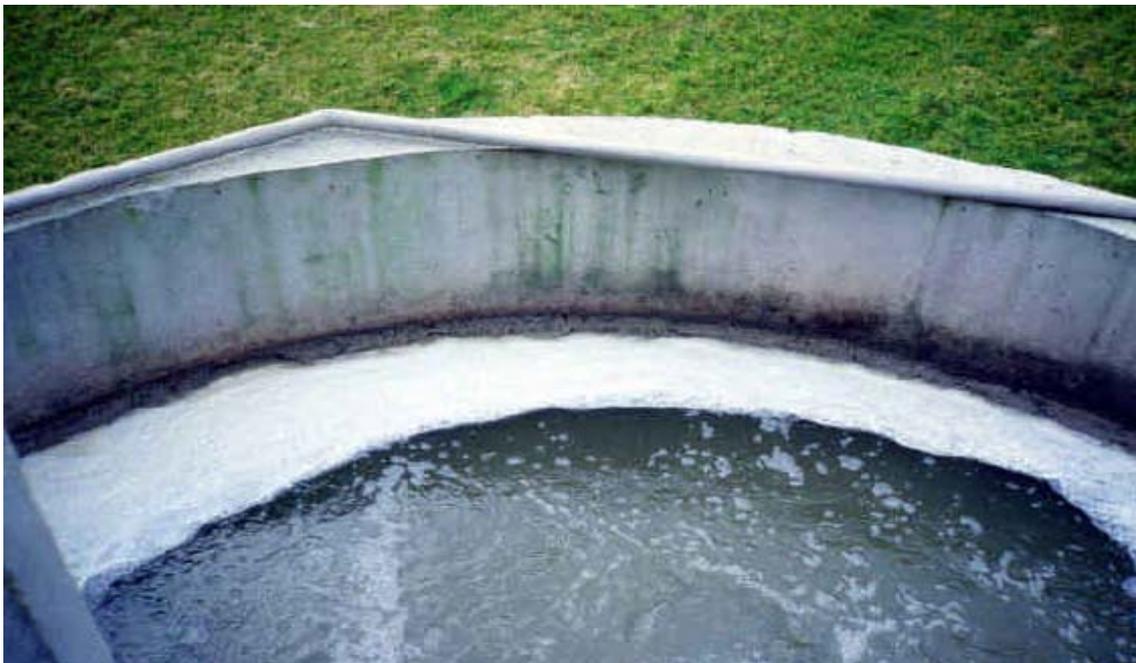


Figure 2.3 : Flottation des graisses par injection de fines bulles

90% des particules de taille supérieure ou égale à 200 μm (sables) doivent être éliminées dans le dessableur.

Les graisses contribuent pour une part significative à la DCO (Demande Chimique en Oxygène) des eaux résiduaires (1g MEH = 2,8g DCO – environ 16g MEH / hab / jour, 35 % de la DCO de l'eau brute est due aux graisses).

Bien que l'efficacité mesurée des dégraisseurs en entrée de la station ne soit pas très importante (de l'ordre de 5 à 25 % pour des eaux résiduaires domestiques), la présence de cet

ouvrage reste en général indispensable; excepté s'il est prévu un décanteur primaire ou un décanteur-digesteur, ou une zone de contact munis d'un dispositif de reprise des flottants.

Les fonctions de dessablage-dégraissage sont assurées simultanément (ouvrage combiné) ou séparément (ouvrages séparés pour les toutes petites collectivités).

Sur les petites installations, le dessablage est effectué dans les canaux longitudinaux fonctionnant alternativement. Les dessableurs longitudinaux ont des performances étroitement liées au régime hydraulique prévalant dans le canal, et à la régularité des nettoyages. Toutefois, l'intérêt de ces dessableurs statiques de ce type est limité.

Le remplacement du dégraisseur-dessableur par des tamis peut être envisagé dans les cas de réseau apportant peu de sables (réseau séparatif) et peu de graisses.

La figure 2.4 montre L'opération de dessablage- déshuilage simultané.



Figure 2.4 : L'opération de dessablage- déshuilage

Le dessablage est réalisé dans la partie inférieure du bassin. La pente ne doit pas être inférieure à 50°. Les sables seront récupérés par un dispositif de type bédoué (insufflation d'air) plus économique qu'une reprise par pompe (fonctionnement en continu souvent nécessaire).

Les huiles et les graisses remontent en surface sont raclées selon le principe de l'écumage.

2.5.2 Traitement primaire :

La décantation primaire s'effectue dans des bassins, le plus souvent de formes circulaires, mais il existe bien d'autres types de décanteurs. Elle permet d'éliminer 70 % environ des matières minérales et organiques en suspension qui se déposent au fond du bassin où elles constituent les boues dites primaires. Celles-ci sont récupérées par raclage au fond du

bassin et envoyées dans des épaisseurs pour y être traitées. Une extraction régulière des boues est nécessaire afin de maintenir un faible volume de boue au fond du décanteur. Le maintien d'une concentration en boue inférieure à 15g.l^{-1} permet de limiter le temps de séjour de la boue [29]. Les performances de la décantation peuvent être améliorées par l'adjonction de produits chimiques (sulfate d'alumine, chlorure ferrique ...). Cette technique qu'on appelle floculation permet de capter 90 % des matières en suspension. La figure 2.5 montre des décanteurs d'une station d'épuration. Le décanteur primaire ayant souvent vocation à être une étape de finition des prétraitements, les flottants devront être évacués régulièrement vers la filière boue et non retournés en tête de la station [4].



Figure 2.5 : Décanteurs d'une station d'épuration

2.5.3 Traitement biologique :

Après décantation, l'effluent est introduit dans des bassins équipés de dispositifs d'aération (turbines, insufflation d'air...) où des microorganismes, naturellement présents dans l'effluent, dégradent les matières organiques dissoutes. L'air insufflé leur fournit l'oxygène nécessaire pour respirer et ils se développent en se nourrissant de la pollution organique (voir figure 2.6). Ces microorganismes exercent également un effet physique de rétention de la pollution par leur propension à se rassembler en flocons [4].



Figure 2.6 : Bassin d'aération

Les techniques de traitement biologique les plus couramment employées sont [24] :

- **Les boues activées (bactéries libres) :** Dans ces procédés, les bactéries se développent dans des bassins alimentés d'une part en eaux usées à traiter et d'autre part en oxygène par des apports d'air. Les bactéries, en suspension dans l'eau des bassins, sont donc en contact permanent avec les matières polluantes dont elles se nourrissent et avec l'oxygène nécessaire à leur assimilation. Les principes de fonctionnement diffèrent suivant que l'objectif est de traiter le carbone ou le carbone et l'azote et/ou le phosphore : en pratique, il s'agit de permettre la sélection des espèces de bactéries capables soit de transformer le carbone en CO_2 , soit de transformer l'azote en nitrates puis les nitrates en azote gaz (N_2), soit de stocker le phosphore. Dans tous les cas, la séparation de l'eau traitée et de la masse des bactéries se fait dans un ouvrage spécifique appelé "clarificateur".
- **Le lagunage naturel :** Les lagunes sont constituées de plans d'eau peu profonds, en général au nombre de trois. L'apport d'oxygène naturel, par échange avec l'atmosphère ou par photosynthèse des algues de surface, peut être complété exceptionnellement par des aérateurs pour stimuler l'activité biologique et diminuer les surfaces. Les bassins de traitement des eaux usées éliminent essentiellement les polluants carbonés. Les bassins suivants, dits d'affinage (eau déjà traitée), peuvent en outre permettre l'élimination des contaminants biologiques par l'action du rayonnement solaire. Les lagunes présentent l'inconvénient d'occuper des surfaces très importantes et d'avoir des performances très variables en fonction des conditions climatiques. Elles ont l'avantage d'être rustiques et peu coûteuses en fonctionnement, et de s'intégrer assez harmonieusement dans le paysage.
- **Les biofiltres et les lits bactériens (bactéries fixées) :** Le principe de ces procédés consiste à faire percoler l'eau à traiter à travers un matériau sur lequel se développent les bactéries qui constituent alors un biofilm sur ce support. Le type de matériau varie suivant les procédés : les lits bactériens utilisent des galets ou des supports alvéolaires, les biofiltres utilisent des matériaux de plus petite taille : des argiles cuites, des schistes, du polystyrène, des graviers ou des sables. Les biofiltres permettent généralement des traitements plus intensifs et plus poussés que les lits bactériens classiques, plus rustiques dans leur conception et dans leur exploitation. L'avantage des biofiltres est de

pouvoir traiter les matières polluantes carbonées et éventuellement azotées, dans un volume beaucoup plus faible que dans le cas de procédés à cultures libres, avec des rendements similaires. Mais les biofiltres sont plus coûteux en investissement et plus délicats en fonctionnement.

- **Les disques biologiques :** Ces procédés consistent à alimenter en eau usée, préalablement décantée voire tamisée, une cuve contenant des disques en rotation sur un axe horizontal. Ces disques sont les supports d'un développement de microorganismes épurateurs (biofilm). Le mélange d'eau traitée et de biofilm décroché est dirigé ensuite vers un clarificateur pour la séparation des phases.
- **Les procédés membranaires :** Les procédés membranaires sont des réacteurs de boues activées fonctionnant généralement à très faible charge, d'où des âges de boues élevés, et dont la séparation floc / liquide interstitiel s'effectue par micro-filtration au travers de membranes de très faible porosité : entre 0,1 et 0,4 μ m. Les technologies actuelles utilisent principalement les membranes immergées dans les boues activées et la distinction entre les différents procédés du marché se fait aujourd'hui principalement par le type de membranes (fibres ou plaques). L'intérêt de ces procédés réside pour l'essentiel : dans la très bonne qualité des eaux traitées et dans la réduction de l'emprise au sol de l'installation qui s'explique par l'absence de clarificateur et la réduction de la taille du bassin biologique.
- **Les SBRs (sequential batch reactors / bassins à alimentation séquencée) :** Le SBR est un réacteur à boue activée où les fonctions de traitement biologique et de clarification sont assurées dans le même ouvrage et par une alimentation séquencée. Le principe de base du SBR se différencie peu d'une boue activée conventionnelle, les besoins en oxygène et en agitation sont les mêmes. En théorie, le SBR peut donc être mis en œuvre pour toute application mettant en jeu des boues activées pour le traitement du carbone, de l'azote et du phosphore. Dans la pratique, le SBR est utilisé pour traiter des effluents résiduels urbains mais aussi des effluents industriels.

1. Clarification et rejet des effluents :

La clarification permet de séparer par décantation l'eau épurée des boues secondaires issues du traitement biologique. Cette décantation se fait dans des ouvrages spéciaux, le plus souvent circulaires, appelés clarificateurs ou décanteurs secondaires [4].

Une partie des boues secondaires est évacuée en aval vers le traitement des boues; l'autre partie est recyclée vers le bassin d'aération pour maintenir la masse biologique nécessaire au fonctionnement de l'installation. Dans la plupart des cas, l'effluent peut être rejeté dans le milieu naturel après la clarification.

2. Traitements complémentaires :

Pour obtenir une épuration plus poussée, notamment lorsque la sensibilité du milieu récepteur l'exige (zone de baignade, vie piscicole, prise d'eau potable en aval de la station...), il peut être nécessaire d'effectuer des traitements complémentaires du type [4] :

- Filtration sur lit de sable.
- Désinfection par le chlore ou d'autres produits oxydants.
- Elimination de l'azote.
- Elimination du phosphore.

2.6 Les performances épuratoires :

Il faut distinguer les performances épuratoires des stations et l'efficacité globale de l'assainissement au niveau du bassin. Elles sont fixées soit en concentrations maximales, calculées en sortie de station, soit en rendement minimal calculé en faisant le rapport entre la pollution sortante et la pollution entrante.

Les paramètres suivis pour toutes les stations sont la demande biochimique en oxygène et la demande chimique en oxygène pour mesurer la pollution organique, ainsi que les matières en suspension.

Dans le cas général, le rendement n'a qu'une valeur très relative, calculée par rapport aux seules matières organiques. Deux paramètres sont exclus dans ce calcul. Il s'agit d'une part de l'azote ou du phosphore, pris en compte dans les seules zones sensibles aux risques d'eutrophisation, et d'autre part du risque bactériologique qui n'est pas pris en compte, sauf indirectement par l'évaluation de la matière organique résiduelle [25].

2.7 Les sous produits de l'épuration :

2.7.1 Les eaux usées après traitement :

1. La qualité des eaux rejetées :

Une idée largement répandue dans le public et qu'il convient de corriger est que l'épuration des eaux est destinée à produire de l'eau potable. Les eaux épurées sont renvoyées vers les rivières et réintègrent ainsi le cycle de l'eau. Plus en aval, l'eau de la même rivière

pourra éventuellement être pompée pour la production d'eau potable : elle subira alors une série de traitements destinés à atteindre les normes de qualité relatives à l'eau potable, évidemment différentes des normes de rejets des effluents traités.

Les eaux rejetées dans des milieux sensibles (Les plans d'eau, les estuaires et les eaux côtières difficilement renouvelées) sont débarrassées des nutriments (azote et/ou phosphore) causes de l'eutrophisation.

Les eaux rejetées dans des milieux qui ne sont pas sensibles sont débarrassées de l'essentiel de leurs matières en suspension et de leur matière organique, afin de limiter les risques d'asphyxie des cours d'eau (la matière organique consomme l'oxygène) et leur dégradation visuelle [1], [8], [16], [19] et [25].

2. La réutilisation des eaux usées :

Réutiliser les eaux usées consiste à récupérer les eaux issues des stations d'épuration, les stocker et les utiliser pour des usages variés qui n'exigent pas de l'eau potable : arrosage en milieu urbain, utilisations industrielles, irrigation agricole.

La réutilisation des eaux usées est une pratique très répandue dans les régions du monde affectées par des pénuries de ressources en eau. Elle est aussi utilisée afin d'éviter un prélèvement excessif sur d'autres ressources, soit dans le but d'éviter des rejets d'eaux usées dans un milieu fragile. [21]

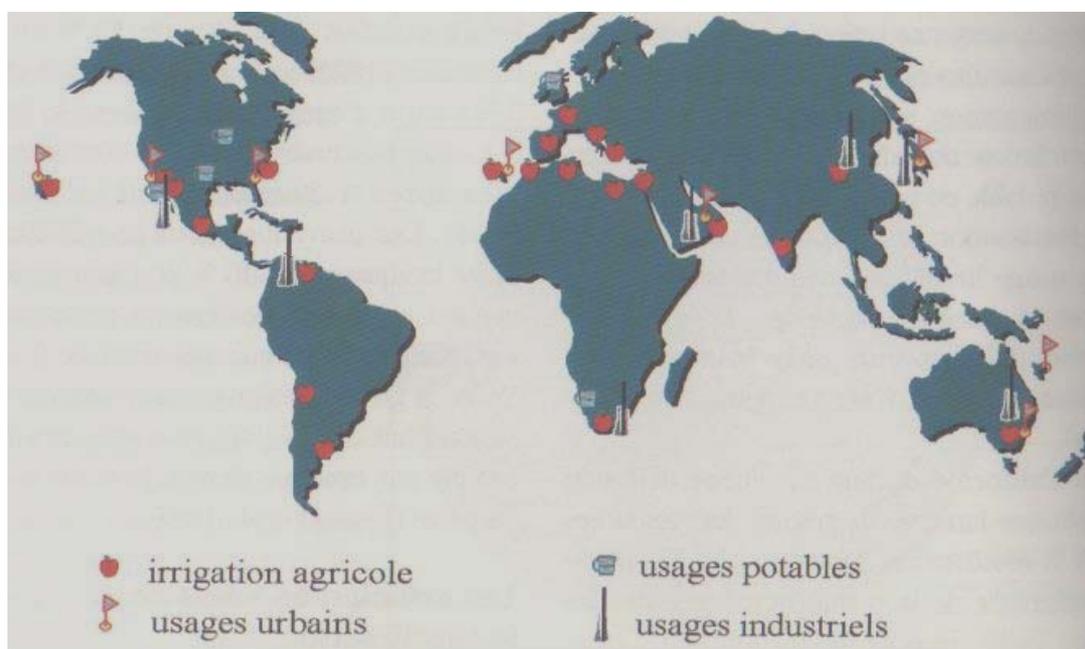


Figure 2.7 : Répartition par secteur et localisation des expériences mondiales les plus importantes en réutilisation des eaux usées

La figure 2.7 résume les principales voies de réutilisation dans les pays ayant une expérience significative dans ce domaine. Il apparaît que la réutilisation pour l'irrigation est essentiellement présente dans les pays réputés agricoles mais dont les ressources hydriques sont faibles, comme le bassin méditerranéen, le Sud des Etats-Unis [21].

2.7.2 Les boues d'épuration :

1. La production de boues :

Les boues sont les sous produits recueillis au cours des différentes étapes de la dépollution des eaux usées. Les boues sont constituées d'eau et de matières minérales et organiques sous forme de matières en suspension ou de matières dissoutes. Les traitements des eaux usées en station d'épuration génèrent plusieurs sortes de sous-produits. Il y a, d'une part, les refus de dégrillage, les matières de dessablage, les matières grasses du déshuilage qui ont éliminés dans le circuit des déchets municipaux, et, d'autre part, les boues qui résultent de dépôts des matières organiques et minérales.

Une station d'épuration génère deux catégories de boues. Les boues de traitement primaires produites par décantation des matières en suspension; les boues issues du traitement biologique formées par les bactéries qui se sont nourries de matières organiques contenues dans les eaux usées.

1m³ d'eaux usées domestiques donne, après traitement, 350 à 400g de boues de matières sèches.

On mesure la quantité de boues par leur siccité c'est à dire par la part des matières sèches qu'elles contiennent : 1.000 habitants génèrent 73.000m³/an d'eau usées qui produisent après dépollution 15 à 25 tonnes de matières sèches. Une usine de 500.000 équivalents/habitants produit environ 30 tonnes de matières sèches par jour. Elle doit donc évacuer chaque jour 100 tonnes de boues à 30% de siccité [25].

Les possibilités d'utilisation des boues sont les suivantes : la mise en décharge pour 20 à 25 %, la valorisation agricole pour 60 % et l'incinération pour 15 à 20 %.

2. Les caractéristiques des boues :

Les boues se composent d'eau et de matières organiques et minérales qui séchées produisent des matières sèches (MS). Les boues sont ensuite dirigées vers trois filières : la mise en décharge, l'élimination (incinération), la valorisation agricole.

Quelle que soit la destination finale, les boues en sortie de station subissent des traitements préalables consistant à réduire les volumes. Le volume des boues est lié à leur teneur en eau ou, inversement, leur teneur en matières sèches, dite aussi siccité. Une boue

brute sans traitement contient 1 % de MS, une boue épaissie contient 5 % de MS. Une boue déshydratée contient 25 % de MS. Une boue sèche contient 90 % de MS [25].

La pratique la plus simple et la plus courante consiste à épandre les boues sur des terres cultivées. C'est ce qu'on appelle l'épandage agricole. Cet épandage est lié à la valeur agronomique des boues d'épuration. A l'inverse, les boues contiennent aussi des éléments indésirables qui doivent être contrôlés et limités [24].

- **L'intérêt agronomique des boues :**

En premier lieu, les boues sont utilisées comme engrais. Les plantes fabriquent leurs aliments à partir du carbone et de l'oxygène de l'air par le mécanisme de la photosynthèse. Mais il leur faut aussi de l'eau et des nutriments qu'elles prélèvent dans le sol (azote, phosphore, potassium...) ainsi que des oligo-éléments qui sont des éléments traces qui doivent être consommés en très petites quantités (fer, manganèse, cuivre...).

La matière sèche contenue dans les boues renferme la plupart de ces éléments nutritifs utiles aux plantes, notamment l'azote, le phosphore et le calcium.

Certaines boues ont ainsi des compositions voisines de celles des engrais achetés pour l'agriculture. Elles présentent un intérêt d'autant plus grand que les boues livrées gratuitement par les producteurs des boues. La valorisation agricole des boues peut même constituer une économie par rapport à l'achat de fertilisant.

En second lieu, les boues sont utilisées comme amendement. Le rôle de l'amendement n'est pas d'apporter des éléments nutritifs aux plantes mais d'améliorer la structure du sol. Les amendements agissent sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol. Ils permettent de réduire l'acidité du sol, de réduire la battance des sols limoneux (séchage du sol à l'origine de la formation de croûtes). Ils améliorent ainsi la structure du sol et entretiennent la teneur du sol en humus [25].

- **Les contaminants chimiques:**

Les contaminants chimiques sont essentiellement les métaux lourds présents dans les boues sous forme d'éléments traces. Il s'agit essentiellement du cadmium, du mercure, du plomb, du zinc. L'essentiel des contaminations chimiques vient des rejets industriels et dans une moindre mesure des rejets domestiques (utilisation de solvants de déchets de bricolage...) [25].

- **Les microorganismes :**

Enfin, les boues contiennent des milliards de microorganismes vivants dont une partie est pathogène : virus, bactéries, champignons. La plupart viennent des excréments d'origine humaine ou animale.

Il faut cependant noter que l'épandage des boues d'épuration ne constitue pas des circonstances favorables à la survie des microorganismes pathogènes qui sont pour la plupart mal adaptés au milieu extérieur. L'épandage accélère leur destruction en les soumettant aux variations climatiques et aux effets du sol. La plupart des microorganismes ont une durée de vie limitée dans le sol. Seuls certains organismes comme les vers parasites peuvent prendre des formes de résistance [24] et [25].

3. La valorisation agricole des boues :

Cette valorisation suppose de faire la part entre l'intérêt agronomique des boues et des éléments indésirables, tels que les métaux lourds et les contaminations pathogènes.

D'une part, les contaminations chimiques doivent être évitées par une action de prévention visant à réduire les rejets polluants. Cela suppose une bonne connaissance du milieu pour identifier les principaux rejets polluants industriels. Les contaminations d'origine domestique sont moins importantes mais plus difficiles à maîtriser. La prévention passe par une action de sensibilisation, pour éviter les rejets toxiques dans les eaux usées (solvants, peintures, acides...). On citera aussi le cas des pollutions artisanales ou issues des professions libérales, notamment des rejets mercuriels issus des cabinets dentaires (liés à l'utilisation d'amalgames dentaires) qui représentent des masses insoupçonnées.

Les microorganismes microbiologiques ne peuvent être prévenues en amont des rejets puisque les éléments pathogènes sont indissociables des rejets des eaux domestiques. L'élimination des risques passe cette fois par les procédés de traitement des eaux usées sous forme de stabilisation. Une montée en température accompagnée, le cas échéant, de la transformation du milieu pour le rendre impropre à la survie des microorganismes ce qui permet de détruire ces éléments indésirables.

La valorisation agricole des boues a été le moyen le plus simple et le plus courant d'utiliser ces boues. D'une part, les gestionnaires des stations trouvaient un moyen économique d'évacuer les boues. D'autre part, même si la profession agricole s'en défend souvent, les boues présentent un intérêt agronomique pour l'agriculteur dans la mesure où les boues peuvent avoir des caractéristiques voisines de celles des engrais [25].

4. L'élimination des boues :

Il existe plusieurs situations où la valorisation agricole n'est pas possible : boues en trop grandes quantités, manque de surfaces d'épandage, refus d'épandage, ou plus généralement, qualité insuffisante des boues et des sous produits (teneurs en métaux lourds). Dès lors que la mise en décharge n'est plus possible, la solution ultime consiste à éliminer les boues. Cette élimination peut passer par le traitement thermique.

Le traitement thermique le plus courant consiste à incinérer les boues, préalablement séchées, soit dans des installations dédiées à l'incinération des boues, soit en co-incinération avec d'autres déchets (ordures ménagères) [25].

2.8 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la description de la station d'épuration, son principe de fonctionnement et son apport à l'environnement.

Lorsque nous ouvrons le robinet à la maison, l'eau potable provient d'une centrale de production souvent appelée usine de filtration. Cette eau vient d'un cours d'eau ou d'un lac et subit différentes étapes de traitement qui visent à la rendre propre à la consommation humaine.

Après son utilisation, l'eau devient impropre et s'écoule dans un réseau de drainage appelé réseau d'égout. Ces eaux usées constitueraient une source de pollution si elles étaient rejetées directement dans un cours d'eau. Elles doivent donc être traitées avant leur rejet au fleuve. Voilà le rôle de la station d'épuration.

La station d'épuration ne produit pas une eau potable. Son but est de rendre les eaux usées acceptables par l'environnement.

Chapitre 3

3.1 Introduction :

Parmi les objectifs de l'automatique, l'un concerne la recherche de moyens de commande pour des systèmes physiques qui sont souvent de différentes natures : électrique, mécanique, hydraulique, thermique, etc. La modélisation du système est alors la première étape de l'élaboration d'une loi de commande. Le modèle qui permet de décrire la réalité physique est généralement obtenu sur la base d'une description idéalisée du système et seuls les phénomènes dominants sont souvent pris en compte.

Dans bien des cas, les automaticiens utilisent des modèles mathématiques, qui malgré leur flexibilité perdent rapidement la signification physique du système et ne permettent pas généralement de faire un retour sur le modèle pour affiner la modélisation ou améliorer la conception du système pour simplifier sa commande.

Par ailleurs, la nature multidisciplinaire des systèmes ne permet pas facilement la communication entre les experts des différents domaines. D'ailleurs les automaticiens se spécialisent de plus en plus dans un seul domaine particulier. Il y a là une nécessité prononcée d'un langage de modélisation répondant à ces besoins pour optimiser cette étape importante de modélisation.

Un des outils répondant à ces critères est le bond graph ou graphe à Liens. En effet, ce langage est basé principalement sur la notion de transfert de puissance entre les différentes parties ou composants du système et sur la transformation de l'énergie dans ces composants (dissipation, stockage, conversion du domaine énergétique). Ces différents phénomènes qui sont analogues dans tous les domaines physiques sont codés graphiquement. Le caractère unifié du bond graph constitue un langage de communication universel entre les experts de différentes disciplines. Grâce à cette décomposition et la représentation graphique, il est facile de décomposer le système en parties ou sous-systèmes et de faire un retour sur n'importe quel sous-système pour améliorer sa conception ou tenir compte d'un phénomène physique négligé ou non pris en compte. Le modèle bond graph peut être alors considéré comme un modèle intermédiaire entre le système physique et le modèle mathématique qui lui est associé [2].

On distingue quatre niveaux de modélisation : technologique, physique, mathématique, et algorithmique. Ces quatre niveaux peuvent être représentées par le bond graph [36].

1. Le niveau technologique de la modélisation est présenté en bond graph par le bond graph à mots (word bond graph). Ce niveau de modélisation consiste à construire l'architecture du système par l'assemblage de différents sous-systèmes qui échangent de la puissance. L'interconnexion des composants est assurée par un couple de

- variables (effort et flux). Les éléments de base sont des processus technologiques simples (échangeur de chaleur, bouilleur, conduite...).
2. Le niveau physique consiste à analyser les phénomènes physiques qui seront pris en considération dans la modélisation (inertie, frottement, compressibilité,...) et à reproduire l'architecture du système graphiquement, avec un langage unique pour tous les domaines physiques où apparaissent les échanges de puissance entre éléments. A ce niveau, la modélisation s'appuie sur une description énergétique des phénomènes physiques. On introduit les concepts fondamentaux de la physique : dissipation d'énergie, transformation, accumulation, sources, etc... Les variables manipulées ont une sémantique physique forte : énergie, puissance, effort, flux, etc... C'est à ce niveau qu'intervient la prise en compte des bilans d'énergies, de matières, de quantités de mouvements.
 3. Le niveau mathématique en bond graph consiste à écrire les lois constitutives des composants ou des phénomènes, en tenant compte des causalités affectées. Les éléments de base de ce niveau sont des opérateurs mathématiques : intégrateurs, dérivateurs et fonctions algébriques. Le modèle mathématique est sous forme d'équations (algébriques, différentielles ou algébro-différentielles) ou de matrice de transfert dans le cas linéaire. Les modèles obtenus sont linéaires ou non linéaires, et la propriété de non linéarité du modèle peut être identifiée comme liée à la structure et/ou aux composants. Les équations d'état sont déduites directement en parcourant le bond graph. Le nombre de variables d'état (qui apparaissent sur le bond graph sous forme dérivée et qui sont des variables d'énergie) est égal au nombre d'éléments C et I mis en causalité intégrale.
 4. Le niveau algorithmique est lié directement au traitement de l'information. Les concepts manipulés sont donc des concepts informatiques. Ce niveau nous indique comment sont calculés les modèles. C'est pourquoi nous considérons que ce niveau se confond presque avec le niveau mathématique. Les notions de causalité (relation de cause et effet) jouent un rôle important à ce niveau et permettent d'orienter la programmation du modèle vers une simulation plus robuste. Tout concepteur sait qu'il est plus simple de calculer numériquement l'intégrale que la dérivée. Ce niveau nous permet donc de représenter l'algorithme du modèle et la manière dont celui-ci doit être calculé. Ce problème est résolu en bond graph par une assignation systématique de la causalité représentée par un trait perpendiculaire au lien. L'analyse de la structure graphique du modèle bond graph fournit donc une connaissance a priori sur la

résolution mathématique du problème. L'affectation des causalités n'est pas une procédure naturelle mais souvent imposée par l'ingénieur pour résoudre les problèmes numériques.

La méthodologie de modélisation par bond graph avec les différentes étapes est représentée sur la figure 3.1.

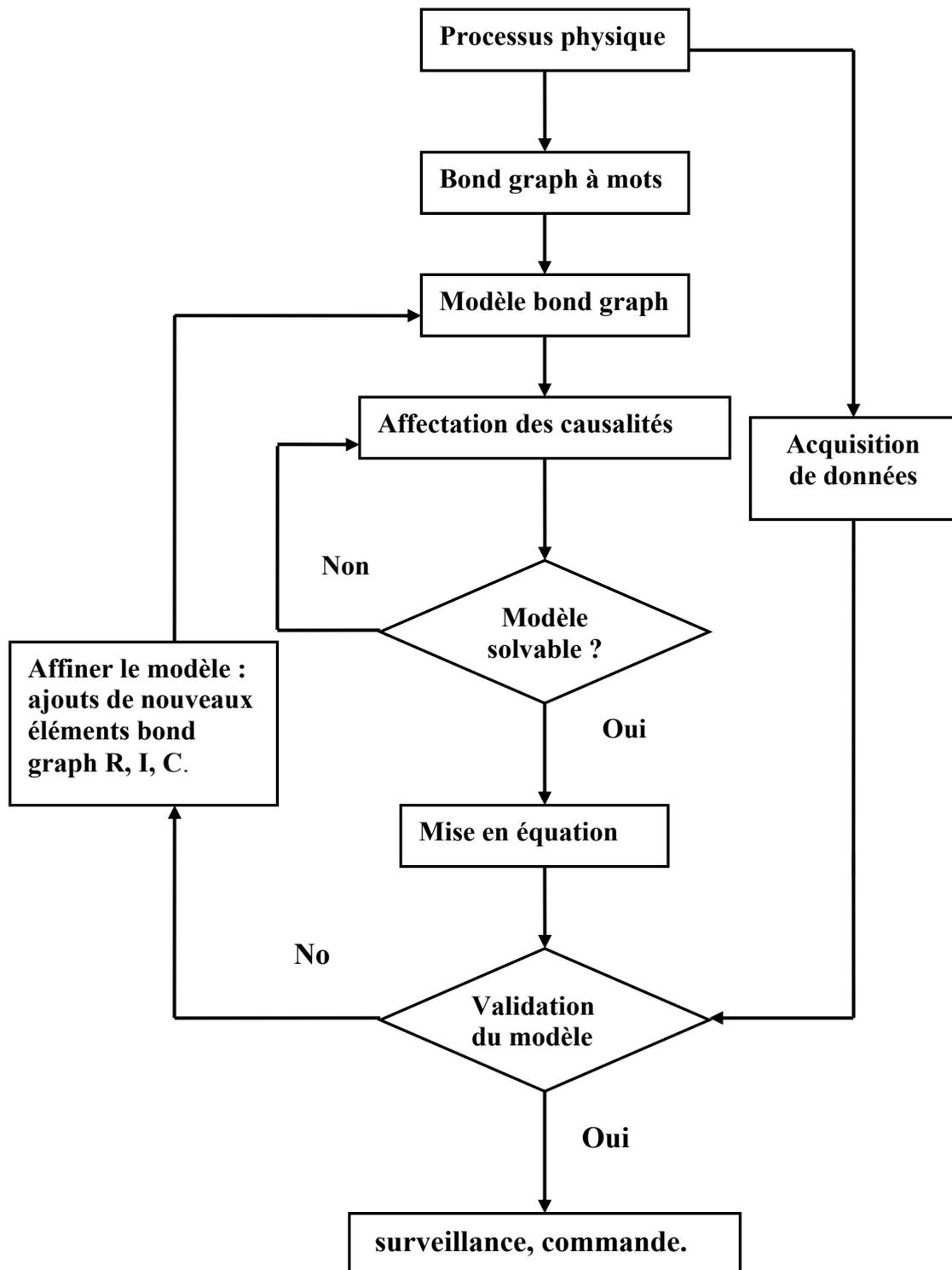


Figure 3.1 : Étapes de modélisation par bond graph

Ce chapitre a pour but de décrire l'élaboration du modèle bond graph de la station d'épuration. Dans la première partie, nous décrivons l'outil bond graph et son adéquation avec la modélisation recherchée. Puis, nous étudions la modélisation de la station d'épuration.

3.2 L'outil bond graph :

L'outil bond graph est maintenant utilisé régulièrement dans les grandes entreprises, en particulier dans l'industrie automobile (PSA, Renault, Ford, Toyota, General Motors,...).

Cette méthode illustre les transferts énergétiques dans le système en utilisant des liens de puissance (bond en anglais). Un lien de puissance est symbolisé par une demi flèche, dont l'orientation indique le sens de transfert de puissance. Ainsi la figure 3.1 représente le transfert de puissance du sous-système A vers le sous-système B [5], [9], [36] et [38].

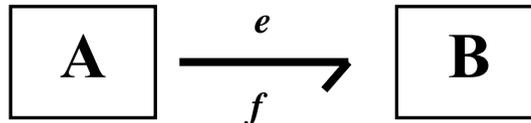


Figure 3.2 : transfert de puissance de A vers B

Une des caractéristiques fondamentales du formalisme bond graph est son aspect unifiant, quel que soit le domaine physique d'application (électrique, mécanique, hydraulique, chimique,...). Nous pouvons visualiser les transferts énergétiques dans les systèmes multidomains grâce aux variables généralisées présentées dans le paragraphe suivant.

3.2.1 Les variables généralisées :

Chaque lien de puissance véhicule deux informations simultanément : l'effort e et le flux f (voir figure 3.2). Ce sont les variables généralisées de puissance (leur produit étant la puissance transférée). Nous utilisons aussi des variables généralisées d'énergie : le moment p (l'intégrale de l'effort par rapport au temps) et le déplacement q (l'intégrale du flux par rapport au temps). Nous présentons dans le tableau 3.1 les variables associées aux variables généralisées dans plusieurs domaines physiques.

3.2.2 Les éléments bond graphs :

Nous utilisons les éléments pour représenter des phénomènes qui lient les variables généralisées. Nous pouvons les séparer en trois catégories.

Domaine	Effort e	Flux f	Moment p	Déplacement q
Electrique	Tension u [Volt]	Courant i [Ampère]	Flux magnétique Φ [Weber]	Charge q [Coulomb]
Mécanique Translation	Force F [N]	Vitesse v [m / s]	Impulsion p [N.s]	Déplacement x [m]
Mécanique Rotation	Couple C [N.m]	Vitesse angulaire w [Rad / s]	Impulsion angulaire h [N.s]	Angle θ [Rad]
Hydraulique	Pression P [Pa]	Débit volumique \dot{V} [m ³ /s]	Impulsion de pression Γ [Pa.s]	Volume V [m ³]
Chimique	Potentiel Chimique μ [J/ mole]	Flux molaire \dot{n} [mole/s]		Masse molaire m [g /mole]
Thermique	Température T [K]	Flux d'entropie \dot{S} [J/(K.s)]		Entropie S [J/K]

Tableau 3.1 : Equivalences des variables généralisées dans des domaines physiques

3.2.2.1 Éléments actifs :

Les éléments actifs sont des sources d'effort ou de flux. Ces dernières peuvent avoir une valeur indépendante de toute influence extérieure (par exemple la pesanteur) symbolisées par Se pour des sources d'effort ou Sf pour des sources de flux, ou modulée selon un signal (symbolisées par MSe ou MSf). Ces éléments fournissent la puissance (positive ou négative) au système. Par conséquent, le sens de la demi flèche sortant de l'élément est obligatoire.

3.2.2.2 Éléments passifs :

Le tétraèdre de Paynter présenté par la figure 3.3 illustre les relations entre les variables généralisées en passant par les éléments passifs (R, I, C).

Ceux-ci peuvent être de caractéristique linéaire ou non linéaire. Dans cette section, nous ne parlons que des éléments passifs ayant un seul lien de puissance entrant. Nous les appelons éléments passifs monoports.

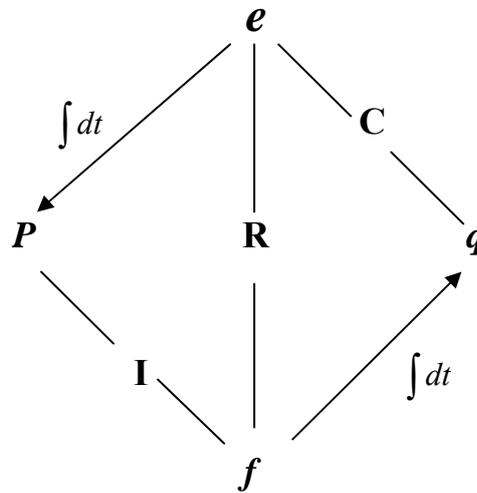


Figure 3.3 : Tétraèdre de Paynter

Un élément R est dissipatif d'énergie. Les éléments I et C sont les éléments de stockage d'énergie. L'énergie stockée est définie par l'expression suivante :

$$E(t) = \int_0^t e(\tau) f(\tau) d\tau + E(0) \quad (3.1)$$

Les éléments passifs consomment la puissance et la transforment soit en énergie dissipée dans les éléments R , soit en énergie stockée dans les éléments I (énergie cinétique) et C (énergie potentielle). L'orientation de la demi flèche est donc entrante vers l'élément.

3.2.2.3 Détecteurs :

Nous utilisons les détecteurs d'effort (De) et de flux (Df) pour mesurer les variables correspondantes dans un modèle bond graph. Nous les considérons idéaux: ils ne consomment pas de la puissance; nous utilisons donc un lien de type signal (une flèche).

Le Tableau 3.2 résume les éléments bond graphs avec des exemples dans quelques domaines physiques.

3.2.3 Éléments de jonction :

Les éléments de jonction, notés 1, 0, TF et GY servent à coupler les éléments R , C , I et les sources, et composent la structure de jonctions correspondant à l'architecture du modèle étudié. Ils sont conservatifs de puissance.

La jonction 0 sert à coupler des éléments soumis au même effort. Les relations qui la caractérisent sont :

- Égalité des efforts pour tous les liens ayant une extrémité sur la jonction.
- Somme algébrique des puissances = 0.

Élément	Symbole	Loi générique	Exemples
Eléments actifs	$S_e \longrightarrow$	e indépendant de f	Générateur de tension idéal
	$S_f \longrightarrow$	f indépendant de e	Générateur de courant idéal
Eléments passifs monoports	$\longrightarrow R$	$\phi_R(e, f) = 0$	Résistance électrique, frottement, amortisseur, restriction hydraulique
	$\longrightarrow I$	$\phi_I(p, f) = 0$	Bobine, inertie, masse
	$\longrightarrow C$	$\phi_C(e, q) = 0$	Condensateur, ressort, élasticité, réservoir
Détecteurs	$\longrightarrow D_e$		Voltmètre, manomètre
	$\longrightarrow D_f$		Ampèremètre, tachymètre

Tableau 3.2 : Éléments de base du bond graph

La jonction 1 sert à coupler des éléments parcourus par le même flux. Les relations qui la caractérisent sont :

- Égalité des flux pour tous les liens ayant une extrémité sur la jonction.
- Somme algébrique des puissances = 0.

L'élément TF est un élément 2-port, conservatif de puissance, il intervient dans la modélisation des transformateurs électriques, des leviers, des systèmes d'engrenages, des systèmes de poulies... Il est aussi utilisé pour modéliser les changements de domaines physiques qui se font sans perte de puissance.

L'élément GY est aussi un élément 2-port, conservatif de puissance, il intervient dans la modélisation des moteurs à courant continu, des capteurs à effet Hall. Il est aussi utilisé pour modéliser les changements de domaines physiques qui se font sans perte de puissance.

Le tableau 3.3 présente le symbole et la loi générique de chaque type de jonction. Les coefficients a_i correspondent à l'orientation de la demi flèche ($a_i = +1$ si celle-ci entre dans la jonction et $a_i = -1$ si elle sort de la jonction).

Elément	Symbole	Loi générique	Exemples
Jonctions		$f_1 = f_2 = \dots = f_n$ $\sum_{i=0}^n a_i e_i = 0$	couplage en parallèle en mécanique, en série en électrique et hydraulique.
		$e_1 = e_2 = \dots = e_n$ $\sum_{i=0}^n a_i f_i = 0$	couplage en série en mécanique, en parallèle en électrique et hydraulique.
		$e_1 = m e_2$ $f_2 = m f_1$	transformateur électrique, levier, réducteur mécanique, couplage de systèmes physiques
		$e_1 = r f_2$ $e_2 = r f_1$	moteur à courant continu, couplage de systèmes physiques.

Tableau 3.3 : Eléments de jonction du bond graph

3.2.4 La causalité : L'outil bond graph permet de décrire la causalité qui régit la relation énergétique attachée au lien celle-ci est représentée par une barre à l'extrémité de la flèche. Cette représentation des relations cause-effet constitue une qualité très appréciable de l'outil bond graph pour la compréhension des systèmes. Si on suppose deux éléments A et B qui échangent de la puissance (voir figure 3.4), deux cas sont possibles :

1. A applique un effort à B et B renvoie un flux fonction de cet effort.
2. A applique un flux à B et B renvoie un effort fonction de ce flux.

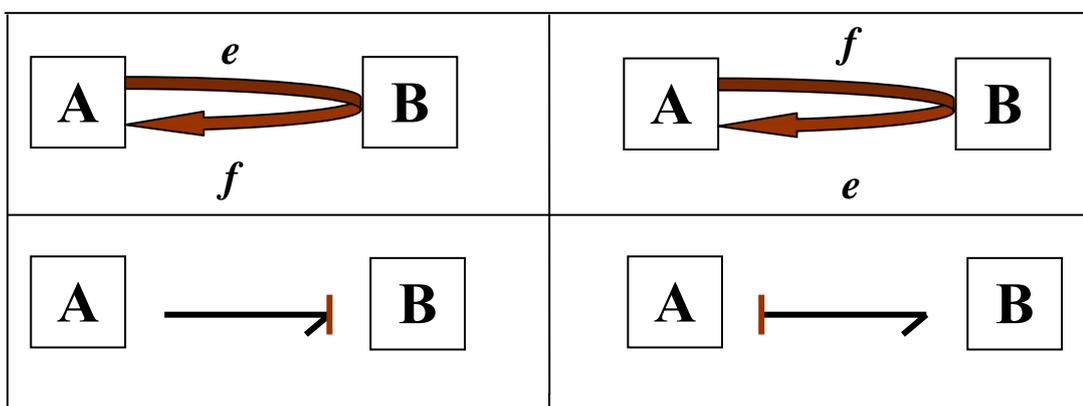


Figure 3.4 : Règles de causalité

Par convention, le trait causal se trouve du côté de l'élément qui reçoit l'effort. Il ne faut pas confondre le sens de la demi flèche qui indique le sens de transfert de la puissance. Le tableau 3.4 présente les règles d'affectation de la causalité.

Elément	Causalité	Symbole	Loi générique
Eléments actifs	obligatoire	$Se \longrightarrow \text{I}$	e imposé par Se
		$Sf \longleftarrow \text{I}$	f imposé par Sf
Eléments passifs	intégrale	$\longrightarrow \text{I}$	$f_I = \psi_I(\int e_I(\tau)d\tau)$
		$\longleftarrow \text{C}$	$e_C = \psi_C(\int f_C(\tau)d\tau)$
	dérivée	$\longleftarrow \text{I}$	$e_I = \psi_I^{-1}\left(\frac{df_I}{dt}\right)$
		$\longrightarrow \text{C}$	$f_C = \psi_C^{-1}\left(\frac{de_C}{dt}\right)$
	arbitraire (cas linéaire) ou non arbitraire (cas non linéaire)	$\longleftarrow \text{R}$	$e_R = Rf_R$ $e_R = \psi_R(f_R)$
		$\longrightarrow \text{R}$	$f_R = \frac{1}{R} e_R$ $f_R = \psi_R^{-1}(e_R)$
Jonctions	restriction de causalité	<p>1 trait causal loin de J-1</p>	$\begin{cases} f_1 = f_i \\ \vdots \\ f_n = f_i \end{cases}$ $a_i e_i = -a_1 e_1 - \dots - a_n e_n$
		<p>1 trait causal près de J-0</p>	$\begin{cases} e_1 = e_i \\ \vdots \\ e_n = e_i \end{cases}$ $a_i f_i = -a_1 f_1 - \dots - a_n f_n$
			$e_1 = m e_2$ $f_2 = m f_1$
			$e_2 = m^{-1} e_1$ $f_1 = m^{-1} f_2$
			$e_1 = r f_2$ $e_2 = r f_1$
			$f_1 = r^{-1} e_2$ $f_2 = r^{-1} e_1$

Tableau 3.4: Règles d'affectation de causalité

3.2.4.1 Procédure d'affectation de la causalité :

1. Affecter la causalité aux sources, et répercuter sur l'environnement en respectant les restrictions de causalité.
2. Mettre tous les éléments **I** et **C** en causalité intégrale, et affecter la causalité obligatoire sur les éléments **R** non linéaires; répercuter sur l'environnement.
3. Affecter les causalités aux jonctions **0**, **1**, **TF**, **GY**.
4. Affecter les causalités aux éléments **R** linéaires en fonction des possibilités restantes.
5. Rechercher les conflits de causalité. En cas de conflit, reprendre en 2 et modifier la causalité sur l'élément **I** ou **C** origine de conflit.

3.2.5 Construction d'un modèle bond graph à partir d'un système physique :

Les procédures de constructions diffèrent sensiblement selon les domaines physiques considérés. Dans le cas d'un système hydraulique, la procédure est la suivante :

1. Fixer un sens de circulation pour le fluide. Il sera pris comme sens de transfert de la puissance.
2. Rechercher tous les noeuds de pressions différentes. Placer une jonction 0 par noeud.
3. Placer une jonction 1 entre deux jonctions 0 et y attacher les éléments soumis à la différence de pressions correspondantes.
4. Relier les jonctions par des liens, en respectant le sens de transfert de la puissance.
5. Choisir une pression de référence (pression atmosphérique en général) et supprimer les jonctions 0 qui y sont associées, ainsi que tous les liens qui y sont attachés. Simplifier si possible.

3.3 Outil de simulation :

Il existe plusieurs logiciels de modélisation et de simulation par bond graph. Symbols 2000, 20-Sim et Camp-G sont les plus connus et les plus utilisés. Parmi eux nous avons opté pour Symbols 2000 (SYstem Modelling through BOND graph Language and Simulation) qui fonctionne sous l'environnement de C++ Builder [23].

Les caractéristiques principales du logiciel Symbols 2000 sont les suivantes :

1. Deux niveaux d'interconnexion sont pris en compte : le niveau des équations et le niveau graphique et structurel.
2. Adapte la causalité (en ajoutant ou en supprimant des capteurs, composants, etc.).

3. Traite les systèmes multi énergies et permet de créer des modèles dynamiques à partir du schémas technologique.
4. Introduit des défaillances dans le modèle.
5. Facilite le regroupement des sous modèles pour construire de nouvelles classes de composants.

Symbols 2000 contient plusieurs algorithmes d'intégration avancés, il garantit une simulation rapide et donne des résultats satisfaisants. La construction de tous les modèles dans un chemin graphique est réalisée d'une manière très facile par l'utilisation du module BondPad, les sous modèles sont combinés dans un modèle global. Symbols 2000 contient des modèles génériques (capsules) qui permettent de construire un modèle complexe.

Symbols 2000 est composé des modules suivants :

- **Le module BondPad :**

C'est le premier module qu'un utilisateur doit rencontrer pour modéliser un système, la tâche entière de la modélisation est accomplie dans ce module.

Quand on ouvre BondPad, la fenêtre principale apparaît comme le montre la figure 3.5. La zone d'objet contient les outils de dessin et de modification du modèle bond graph et contient aussi une bibliothèque de capsules. Les capsules et les outils disponibles dans la zone d'objet permettent de concevoir un modèle bond graph dans la zone de dessin. La zone d'expression permet d'afficher les équations correspondantes au modèle bond graph.

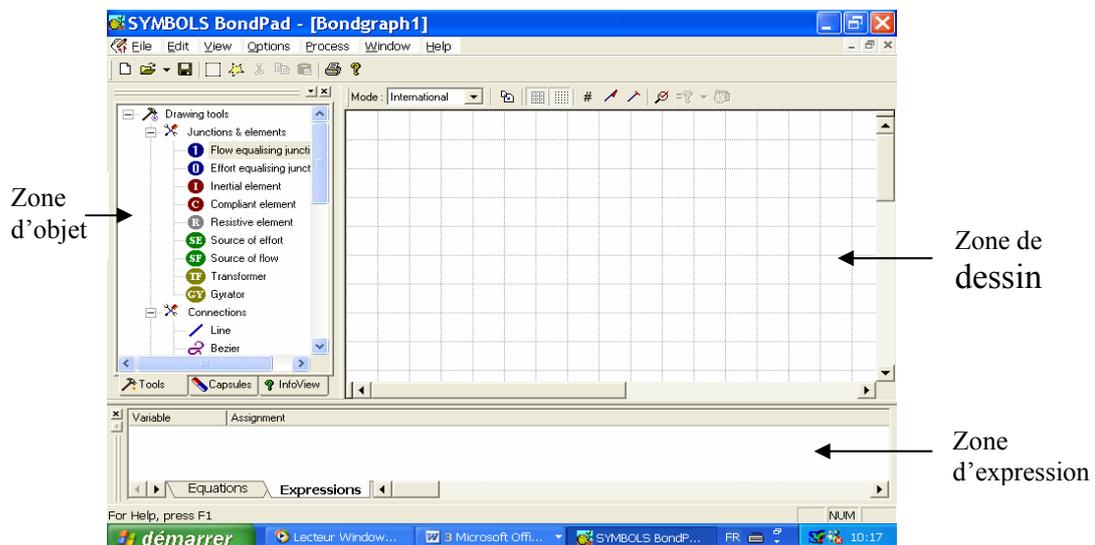


Figure 3.5: Fenêtre du module BondPad

- Le module du simulateur :

Le module du simulateur permet de résoudre les équations dynamiques dans lequel les utilisateurs peuvent intervenir pour la simulation. La fenêtre du simulateur est montrée ci-dessous:

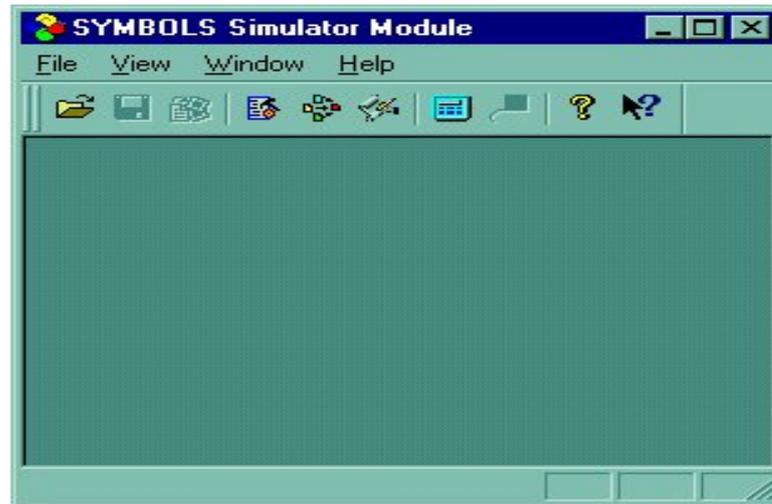


Figure 3.6: Fenêtre du simulateur

Le point d'entrée du simulateur est le « fichier de définition de module » (fichier.sym) généré à partir du module BondPad. Ce fichier doit être compilé pour créer un fichier d'expérimentation du simulateur. Une fois la compilation démarrée, l'état de compilation, les messages d'erreurs et d'avertissement sont affichés par la fenêtre de compilation comme le montre la figure 3.7.

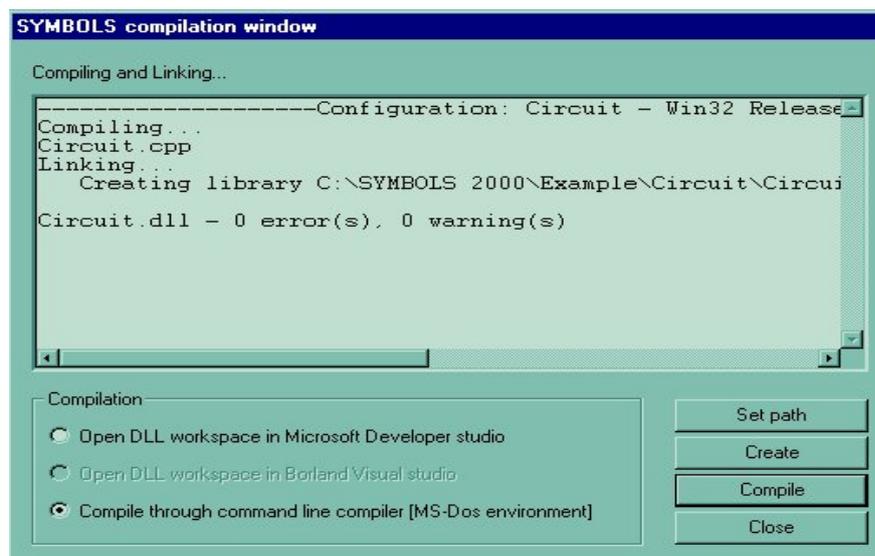


Figure 3.7 : Fenêtre de compilation

Après la compilation, il faut passer par trois étapes pour tracer les courbes de simulation :

1. Affecter les valeurs des composants.
2. Affecter les valeurs initiales et les valeurs finales des courbes de simulation.
3. Appuyer sur la commande 'START' pour faire la simulation.

Les courbes tracées sont montrées dans la figure 3.8.

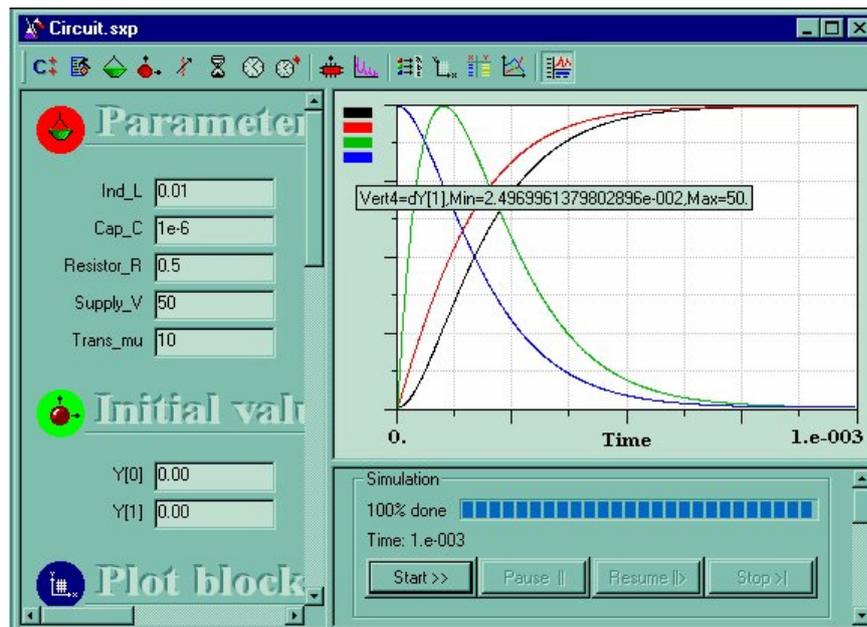


Figure 3.8 : Fenêtre des courbes

Notons que Symbols 2000 contient aussi un module de commande qui nous permet de faire l'analyse des systèmes linéaires continus ou discrets. Dans ce module le système étudié doit être décrit par sa fonction de transfert ou par son modèle d'état.

3.4 Modélisation bond graph de la station d'épuration :

Dans ce mémoire, on a réalisé la modélisation du phénomène hydraulique de la station d'épuration. La figure 3.9 décrit le synoptique simplifié de la station.

L'eau est pompée vers le premier réservoir par une pompe. Le régulateur **PI** a pour but de maintenir à une valeur constante le niveau d'eau, mesuré par le capteur de pression, dans le réservoir T1 en agissant sur la pompe. Les réservoirs T2, T3 et T4 sont alimentés en eau à travers les vannes V1, V2 et V3. Ces vannes sont commandées par un opérateur par des régulateurs de type tout ou rien. Une vanne est laissée fermée jusqu'à l'achèvement d'une étape de traitement.

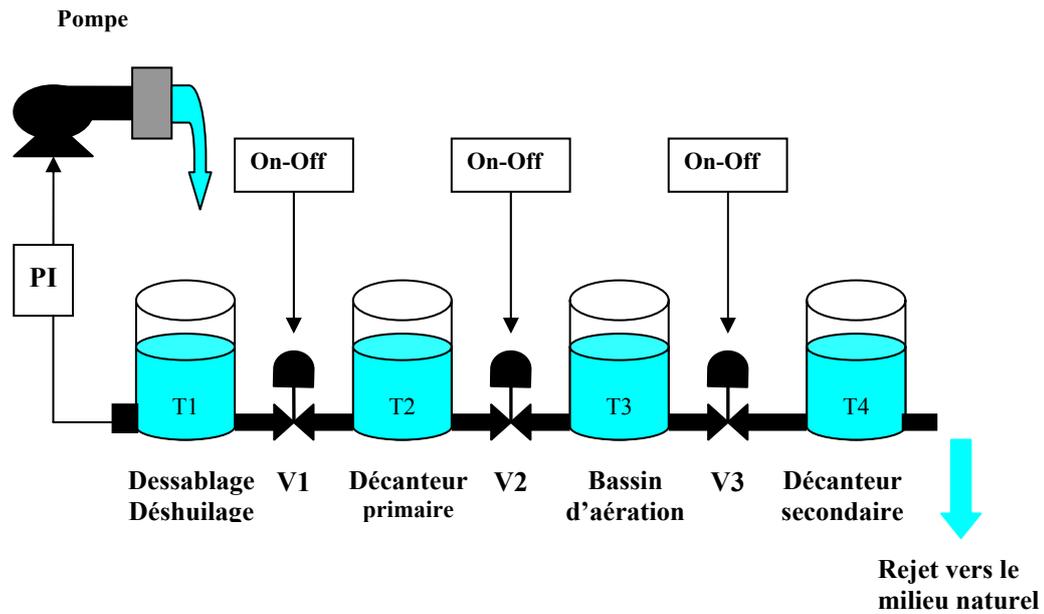


Figure 3.9 : Schéma simplifié de la station d'épuration

3.4.1 Bond graph à mots :

Le bond graph à mots représente le niveau technologique de la modélisation [36]. Dans cette étape, on décompose le système global en sous-systèmes simples, comme est représenté sur la figure 3.10.

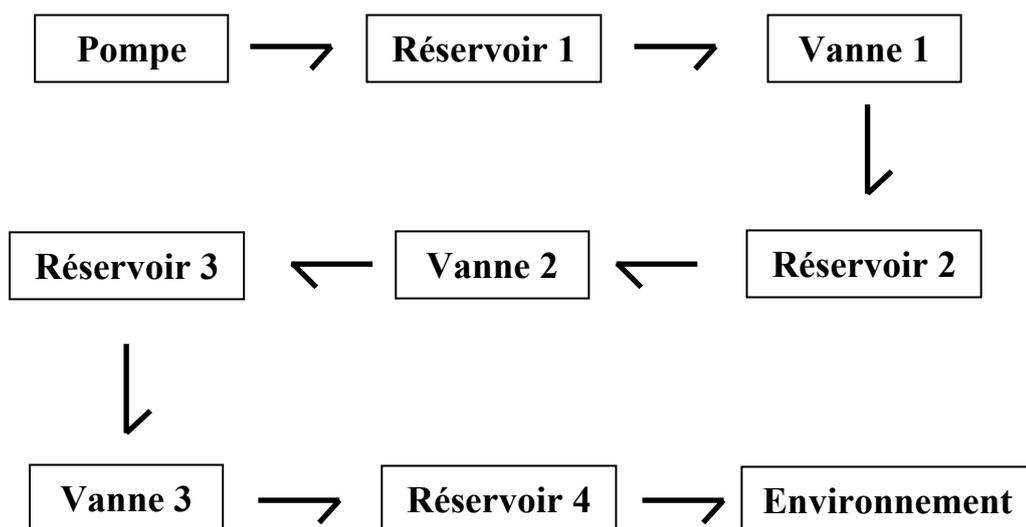


Figure 3.10 : Bond graph à mots du processus

$$x = \begin{bmatrix} p_I \\ q_C \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Par conséquent,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} e_I \\ f_C \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Lois de structure	Lois constitutives des éléments
<p style="text-align: center;">Jonction 0 : C1</p> $\begin{cases} e_1 = e_3 = \{e_2\} \\ f_2 = f_1 - f_3 \end{cases} \quad (3.4)$	<p style="text-align: center;">Elément C : C1</p> $\begin{cases} \dot{q}_2 = f_2 \\ e_2 = \frac{1}{C1} \int f_2 dt = \frac{q_2}{C1} \end{cases} \quad (3.11)$
<p style="text-align: center;">Jonction 1 : R1</p> $\begin{cases} f_3 = f_5 = \{f_4\} \\ e_4 = e_3 - e_5 \end{cases} \quad (3.5)$	<p style="text-align: center;">Elément R : R1</p> $f_4 = \frac{1}{R1} e_4 \quad (3.12)$
<p style="text-align: center;">Jonction 0 : C2</p> $\begin{cases} e_5 = e_7 = \{e_6\} \\ f_6 = f_5 - f_7 \end{cases} \quad (3.6)$	<p style="text-align: center;">Elément C : C2</p> $\begin{cases} \dot{q}_6 = f_6 \\ e_6 = \frac{1}{C2} \int f_6 dt = \frac{q_6}{C2} \end{cases} \quad (3.13)$
<p style="text-align: center;">Jonction 1 : R2</p> $\begin{cases} f_7 = f_9 = \{f_8\} \\ e_8 = e_7 - e_9 \end{cases} \quad (3.7)$	<p style="text-align: center;">Elément R : R2</p> $f_8 = \frac{1}{R2} e_8 \quad (3.14)$
<p style="text-align: center;">Jonction 0 : C3</p> $\begin{cases} e_9 = e_{11} = \{e_{10}\} \\ f_{10} = f_9 - f_{11} \end{cases} \quad (3.8)$	<p style="text-align: center;">Elément C : C3</p> $\begin{cases} \dot{q}_{10} = f_{10} \\ e_{10} = \frac{1}{C3} \int f_{10} dt = \frac{q_{10}}{C3} \end{cases} \quad (3.15)$
<p style="text-align: center;">Jonction 1 : R3</p> $\begin{cases} f_{11} = f_{13} = \{f_{12}\} \\ e_{12} = e_{11} - e_{13} \end{cases} \quad (3.9)$	<p style="text-align: center;">Elément R : R3</p> $f_{12} = \frac{1}{R3} e_{12} \quad (3.16)$
<p style="text-align: center;">Jonction 0 : C4</p> $\begin{cases} e_{13} = e_{15} = \{e_{14}\} \\ f_{14} = f_{13} + f_{15} \end{cases} \quad (3.10)$	<p style="text-align: center;">Elément C : C4</p> $\begin{cases} \dot{q}_{14} = f_{14} \\ e_{14} = \frac{1}{C4} \int f_{14} dt = \frac{q_{14}}{C4} \end{cases} \quad (3.17)$

Tableau 3.5 : Equations correspondantes au modèle bond graph

Le modèle bond graph de la figure 3.7 conduit aux relations indiquées au tableau 3.5. Puisque le modèle bond graph possède quatre éléments en causalité intégrale, le vecteur d'état comporte quatre composantes. Le vecteur d'état est donc $x = [q_2 \ q_6 \ q_{10} \ q_{14}]^T$.

- Calculons $\frac{dq_2}{dt}$:

$$\dot{q}_2 = f_2 = MSf - f_3 \quad \text{d'après (3.4).}$$

$$\dot{q}_2 = MSf - \frac{1}{R1} e_4 = MSf - \frac{1}{R1} (e_3 - e_5) \quad \text{d'après (3.5) et (3.12).}$$

En tenant compte de (3.4), (3.6), (3.11) et (3.13) il vient :

$$\dot{q}_2 = MSf - \frac{1}{R1} \left[\frac{q_2}{C1} - \frac{q_6}{C2} \right] \quad (3.18)$$

- Calculons $\frac{dq_6}{dt}$:

$$\dot{q}_6 = f_6 = \frac{1}{R1} e_4 - \frac{1}{R2} e_8 \quad \text{d'après (3.6), (3.5), (3.7), (3.9) et (3.11).}$$

En tenant compte de (3.11), (3.13) et (3.15) il vient :

$$\dot{q}_6 = \frac{1}{R1} \left[\frac{q_2}{C1} - \frac{q_6}{C2} \right] - \frac{1}{R2} \left[\frac{q_6}{C2} - \frac{q_{10}}{C3} \right] \quad (3.19)$$

- Calculons $\frac{dq_{10}}{dt}$:

$$\dot{q}_{10} = f_{10} = \frac{1}{R2} e_8 - \frac{1}{R3} e_{12} \quad \text{d'après (3.8), (3.7), (3.9), (3.14) et (3.16)}$$

En tenant compte de (3.13), (3.15) et (3.17) il vient :

$$\dot{q}_{10} = \frac{1}{R2} \left[\frac{q_6}{C2} - \frac{q_{10}}{C3} \right] - \frac{1}{R3} \left[\frac{q_{10}}{C3} - \frac{q_{14}}{C4} \right] \quad (3.20)$$

- Calculons $\frac{dq_{14}}{dt}$:

$$\dot{q}_{14} = f_{14} = \frac{1}{R3} e_{12} + Sf \quad \text{d'après (3.10), (3.9) et (3.16).}$$

En tenant compte de (3.15) et (3.17) il vient :

$$\dot{q}_{14} = \frac{1}{R3} \left[\frac{q_{10}}{C3} - \frac{q_{14}}{C4} \right] + Sf \quad (3.21)$$

Les équations (3.18), (3.19), (3.20) et (3.21) conduisent à l'équation d'état :

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_2 \\ \dot{q}_6 \\ \dot{q}_{10} \\ \dot{q}_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R1C1} & \frac{1}{R1C2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{R1C1} & \frac{1}{C2} \left(-\frac{1}{R1} - \frac{1}{R2} \right) & \frac{1}{R2C3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R2C2} & \frac{1}{C3} \left(-\frac{1}{R2} - \frac{1}{R3} \right) & \frac{1}{R3C4} \\ 0 & 0 & \frac{1}{R3C3} & \frac{-1}{R3C3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_2 \\ q_6 \\ q_{10} \\ q_{14} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} MSf \\ Sf \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Si nous mesurons les pressions, voici l'équation de sortie :

$$y = \begin{bmatrix} \frac{1}{C1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_2 \\ q_6 \\ q_{10} \\ q_{14} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

3.4.4 Simulation :

Le modèle bond graph construit en utilisant Symbols 2000 est montré à la figure 3.12.

Une fois validé, ce modèle est utilisé pour la simulation.

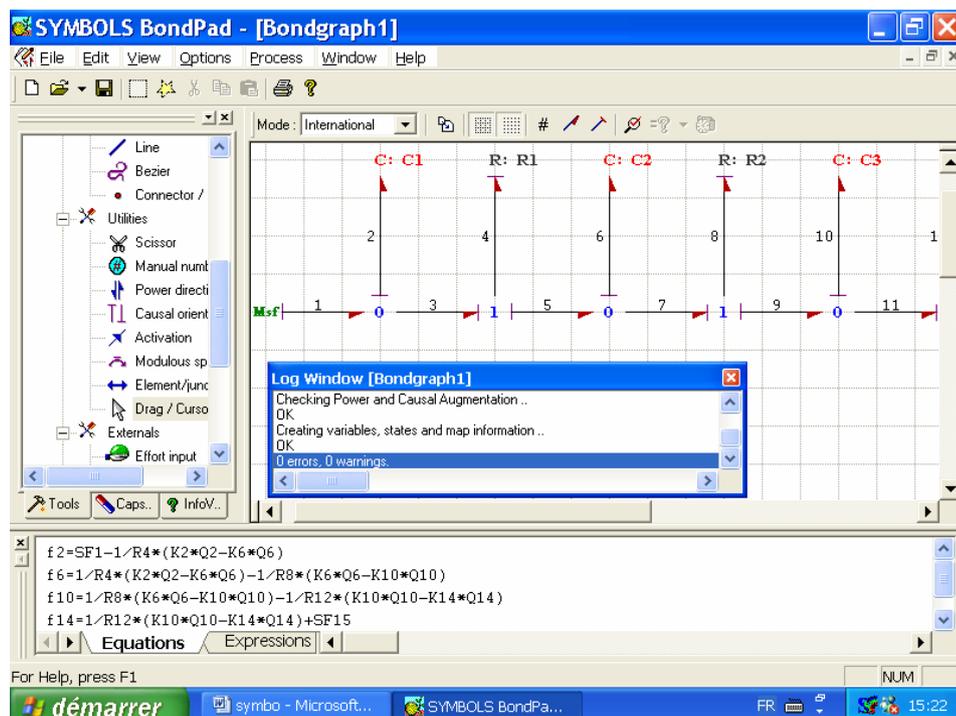


Figure 3.12 : Modèle bond graph de la station d'épuration généré en utilisant Symbols 2000

Les figures 3.13, 3.14, 3.15 et 3.16 représentent l'évolution de la pression au fond de chaque réservoir. Il y a plusieurs cas selon qu'une vanne soit fermée ou ouverte. Les paramètres utilisés pour la simulation sont donnés en annexe.

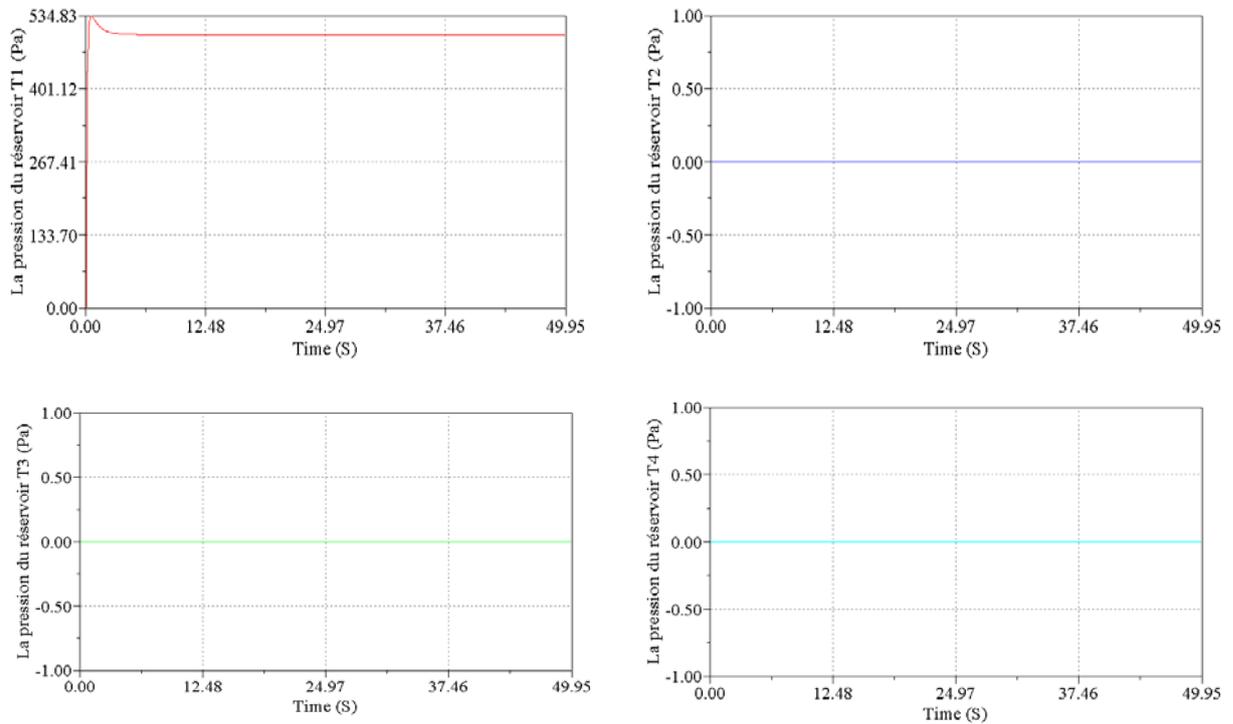


Figure 3.13 : La réponse du processus avec les vannes V1, V2 et V3 fermées

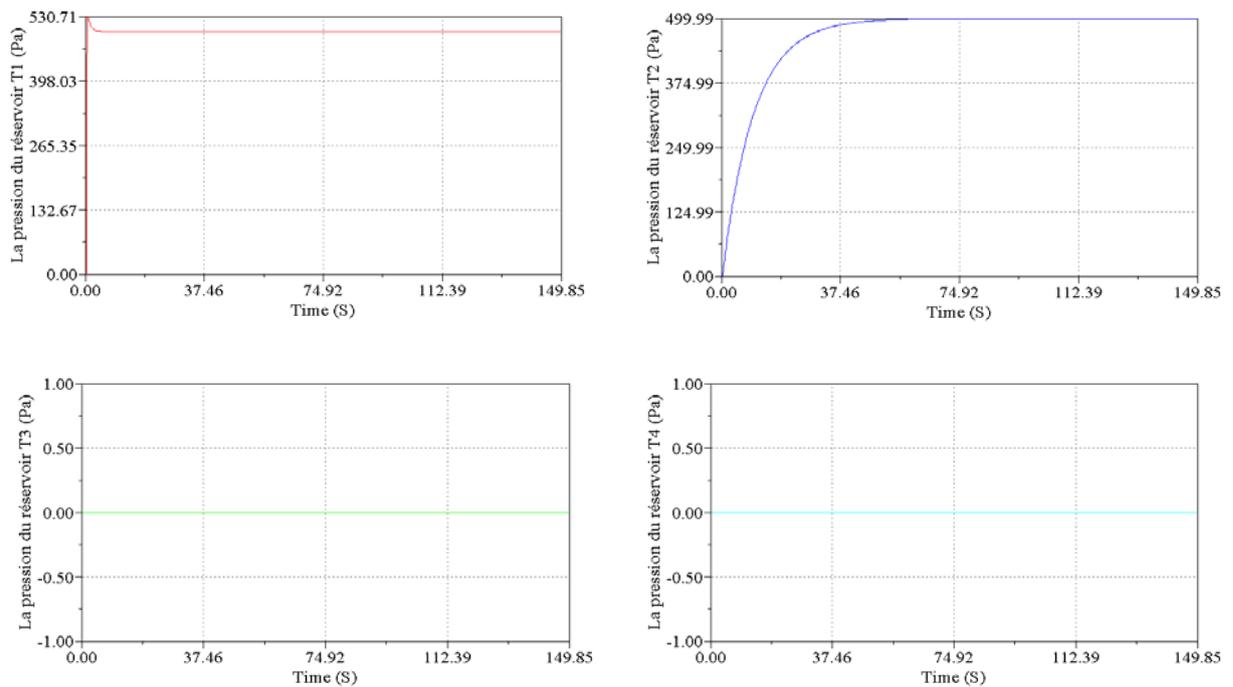


Figure 3.14 : La réponse du processus avec les vannes V2 et V3 fermées
et la vanne V1 ouverte

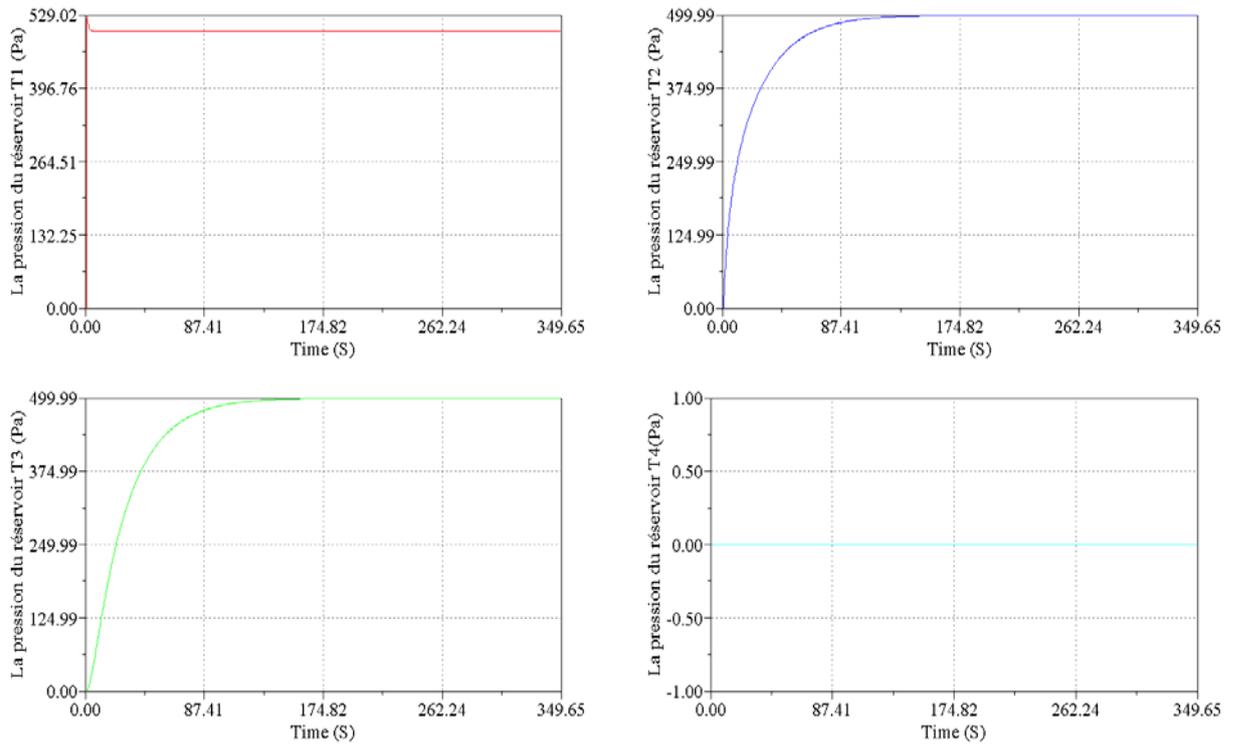


Figure 3.15 : La réponse du processus avec les vannes V1 et V2 ouvertes

et la vanne V3 fermée

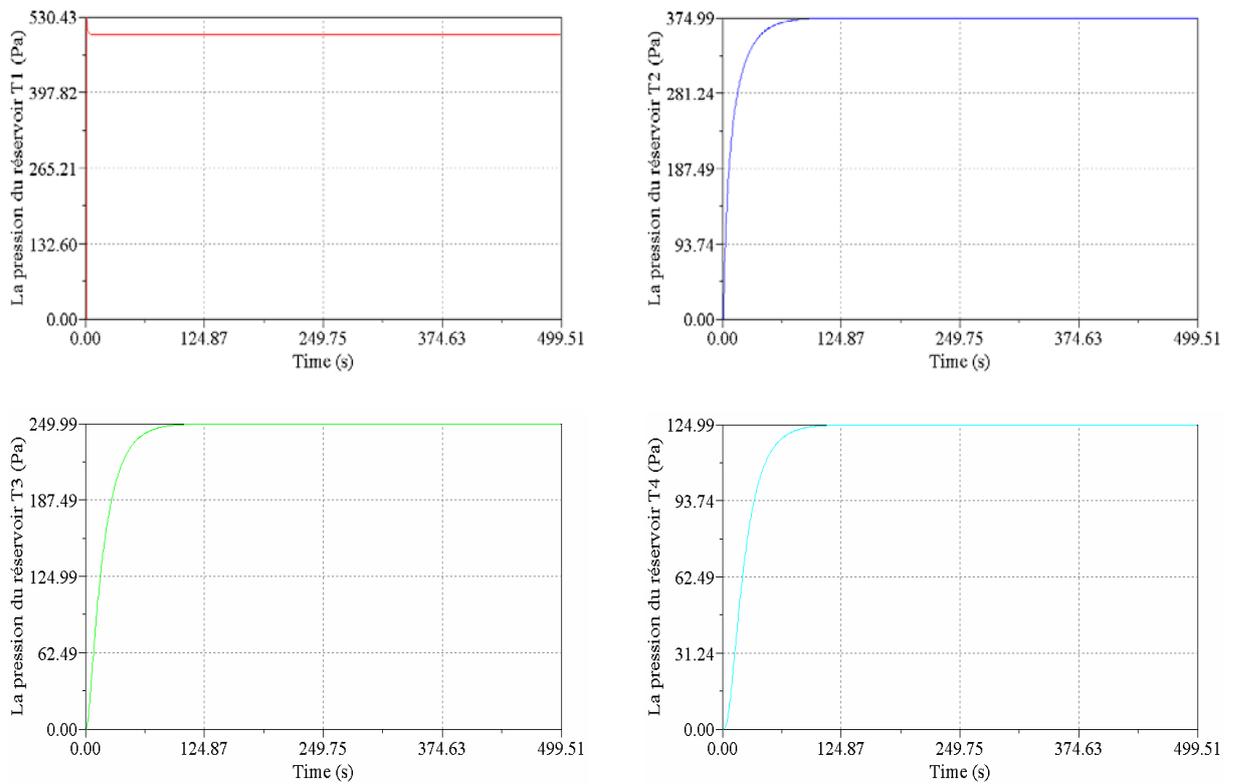


Figure 3.16 : La réponse du processus avec les vannes V1, V2 et V3 ouvertes

On constate que la pression au fond du réservoir T1 se stabilise à 500 Pa (la consigne) quelque soit les états des vannes.

La pression au fond des réservoirs T2, T3 et T4 se stabilise à différentes valeurs avec le changement du temps de réponse pour chaque cas.

3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons montré pourquoi l'utilisation du formalisme bond graph. Il constitue en effet, un outil favorisant l'échange interdisciplinaire et la capitalisation de connaissance. Nous avons donné les principes de modélisation par bond graph.

Nous avons ensuite modélisé le phénomène hydraulique de la station d'épuration par bond graph. Ce modèle a été simulé par le logiciel Symbols 2000 pour plusieurs cas de fonctionnements. Par ces essais, nous constatons que ce modèle a un comportement quasi identique du système réel. Nous utiliserons dans la suite ce modèle pour la surveillance de la station.

Chapitre 4

4.1 Introduction :

A l'heure actuelle, les entreprises de nombreux secteurs d'activité (automobile, sidérurgie, chimie, ...) sont de plus en plus soumises à la concurrence du marché. Afin de répondre aux attentes du client en terme de quantité et qualité des produits, et de délais, les sociétés technologiques engendrent des systèmes de production de complexité croissante et dont elles sont pleinement dépendantes. L'automatisation des processus industriels a eu pour vocation d'optimiser la productivité en implantant des commandes performantes. Malheureusement, cette complexité a également engendré des dysfonctionnements qui viennent enrayer leur bon fonctionnement. Pour atteindre leurs objectifs de productivité et économiques, les entreprises se doivent de redéfinir leurs priorités, ce qui entraîne une mutation de certaines fonctions clés. Les tâches de maintenance ont ainsi pris une importance non négligeable dans la « bonne marche » des entreprises en garantissant le bon fonctionnement des outils de production [22].

Dans ce chapitre nous présentons les nouveaux enjeux des entreprises du monde industriel, tout en décrivant quelques réponses actuelles pour respecter ces nouvelles attentes. Nous décrivons alors l'évolution de la fonction maintenance qui a connu une forte mutation depuis qu'elle est considérée comme un des facteurs majeurs dans la maîtrise de l'outil de production et qui a désormais un rôle préventif dans le maintien de l'état de fonctionnement des systèmes de production. On présente aussi les différentes méthodes utilisées en diagnostic des systèmes physiques.

4.2 Les nouveaux enjeux industriels :

La production en milieu industriel est caractérisée par une complexité toujours croissante des systèmes de production et des objectifs de plus en plus exigeants. Sur le plan économique, la considération des coûts de production, du rendement ou du respect des délais sont autant de facteurs qui, dans ce contexte actuel si concurrentiel, influent sur la compétitivité des entreprises.

Sur le plan technique, les contraintes essentielles portent sur la diversité, la complexité et la qualité des produits, et donc sur le développement des technologies de l'informatisation et de l'automatisation. Par ailleurs, dans ce monde concurrentiel où l'on est à la recherche permanente d'une meilleure productivité et qualité à moindre coût, il ne faut pas oublier d'assurer la sûreté de fonctionnement qui a pour vocation de garantir la sécurité des biens, des

personnes, mais aussi de l'environnement. Les entreprises doivent donc désormais faire face à différents enjeux socio-économiques pour assurer leur avenir [22].

4.2.1 Les enjeux socio-économiques actuels :

Dans un monde industriel, où les gains de productivité représentent un souci quotidien pour les dirigeants, l'amélioration permanente de la productivité de l'outil de production est un enjeu pour la survie et la pérennité des entreprises. On vise sans cesse à produire mieux, plus, à moindre coût et plus sûrement. La productivité d'une ressource de production s'exprime souvent en termes de disponibilité, de performance ou de fiabilité, et de taux de qualité. La **disponibilité** exprime l'aptitude d'un bien de production à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné. La **performance** ou plutôt la fiabilité exprime l'aptitude à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné. Et enfin, le taux de **qualité**, exprime l'aptitude d'un matériel à fabriquer des produits dits de 1^{er} choix.

Dans le prolongement de ce besoin permanent d'accroître la productivité, on assiste à une complexification des outils de production qui engendre une nécessité de sûreté de fonctionnement. En effet, il s'agit de préserver à la fois la sécurité des opérateurs, mais aussi d'éviter la détérioration des matériels, tout en réduisant les coûts économiques qui découlent des perturbations et aléas qui surviennent en production. Dans ce sens, la complexité croissante des systèmes de production impose également une meilleure maîtrise de ceux-ci.

Pour répondre à ces enjeux, il faut d'une part maîtriser le fonctionnement de l'outil de production, et d'autre part suivre l'état de fonctionnement de celui-ci, afin de définir les actions correctives permettant de rétablir un état de fonctionnement optimal lors des situations de dysfonctionnement. Ces constats sur les besoins d'augmentation de la productivité, de maîtrise des procédés et de sûreté des biens et des personnes, ont naturellement conduit à la mise en œuvre de nouveaux outils de supervision des systèmes de production [22] et [40].

4.2.2 Réponses et évolutions actuelles :

Au cours de ces dernières années, des évolutions importantes ont marqué la conception des systèmes automatisés. Le terme « système industriel » a pris une toute autre dimension, on entend désormais par système, un ensemble d'éléments interagissant entre eux mais aussi avec l'extérieur dans le but d'assurer une mission globale qui va désormais au-delà du simple fait de produire. Dans ce sens, la tâche de supervision des systèmes industriels, qui vise à surveiller et gérer l'exécution des opérations d'un système, est devenue aujourd'hui une nécessité absolue pour les entreprises. Cette approche, qui considère les systèmes de

production non seulement sous l'angle de leur commande mais également sous des aspects de supervision est couramment reprise sous la dénomination d'**Automatisation Intégrée**, et se traduit par une structure hiérarchisée (figure 4.1). Dans cette structure, les deux premiers niveaux correspondent respectivement aux couches traditionnelles d'instrumentation, et de régulation du système. [22]

L'évolution des algorithmes de commande, avec l'apparition des Systèmes Numériques de Commande (SNC) a permis la mise en place de postes de conduite où les informations sur le procédé sont accessibles à l'opérateur par des synoptiques. Toutefois, les SNC sont essentiellement utilisés dans le cadre de la commande des processus continus et les informations sont souvent restreintes au fonctionnement instantané du système, certains signaux étant directement comparés à des valeurs limites et traduits en terme d'alarmes.

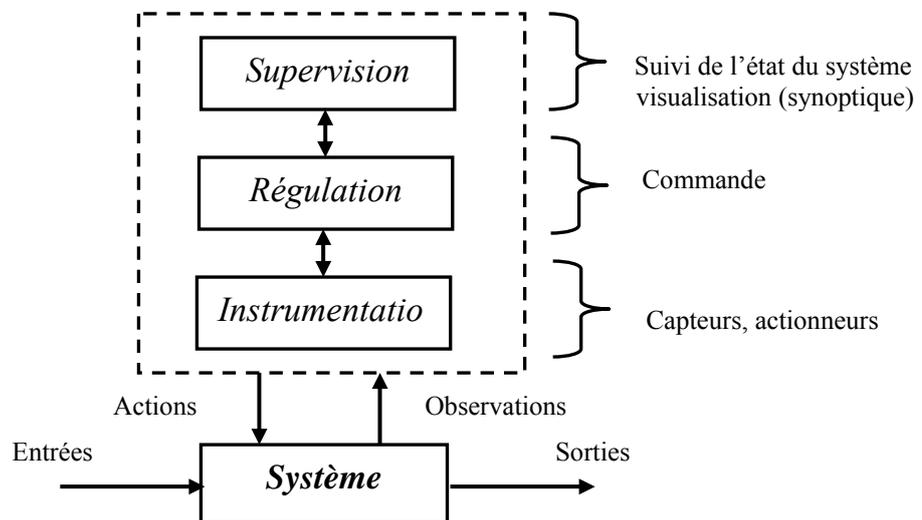


Figure 4.1 : Automatisation Intégrée

Le système SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) est un système de télécommande s'appuyant sur un ensemble d'outils informatiques interconnectés permettant d'automatiser et de surveiller à distance les opérations d'exploitation. Depuis le centre de contrôle, l'opérateur dispose d'informations sur le fonctionnement actuel du système (commandes, signaux de capteurs, ...), mais aussi sur les rendements, les cadences, les temps d'arrêts ou encore la gestion des rebuts. Par ailleurs, au sein de ces systèmes, on dispose d'outils de contrôle tels que la maîtrise statistique des procédés (Statistical Process Control) qui vise à garantir le niveau de qualité requis et à mettre en place une traçabilité des produits, via des indices d'aptitude et des cartes de contrôle. Au milieu de toutes ces informations, l'opérateur choisit et visualise le synoptique et les informations dont il a besoin, puis après

analyse, décide des actions à prendre pour maintenir la qualité de production et le bon état de fonctionnement du système : c'est ce que l'on appelle la **supervision**.

L'introduction des SNC ou des SCADA, auxquels on a adjoint les Interfaces Homme Machine (IHM), a considérablement amélioré le fonctionnement et la conduite des systèmes industriels. Toutefois, dans un premier temps, ces nouveaux systèmes se sont limités à un « simple partage » d'informations entre l'opérateur et le système de production. La demande croissante de rentabilité, de fiabilité, de respect des délais ou encore de sûreté de fonctionnement a justifié l'intérêt grandissant porté à des méthodes encore plus avancées de conduite incluant notamment des techniques de détection de défauts et de prise de décisions, afin de mieux maîtriser les périodes de production et de réduire les temps d'indisponibilités. Ainsi, les outils classiques de supervision doivent être complétés par des outils de **surveillance**, de **diagnostic** et **d'aide à la décision** qui s'intègrent à la supervision (figure 4.2).

La supervision consiste à gérer et surveiller l'exécution d'une opération ou d'un travail accompli par un homme ou une machine, puis à proposer des actions correctives si besoin. La surveillance est une opération de recueil en continu des signaux et commandes d'un procédé afin d'en reconstituer l'état de fonctionnement réel. Ainsi, la **surveillance** utilise les données provenant du système pour représenter l'état de fonctionnement puis en détecte les évolutions. Le **diagnostic** identifie la cause de ces évolutions, puis le module **d'aide à la décision** propose des actions correctives. [22]

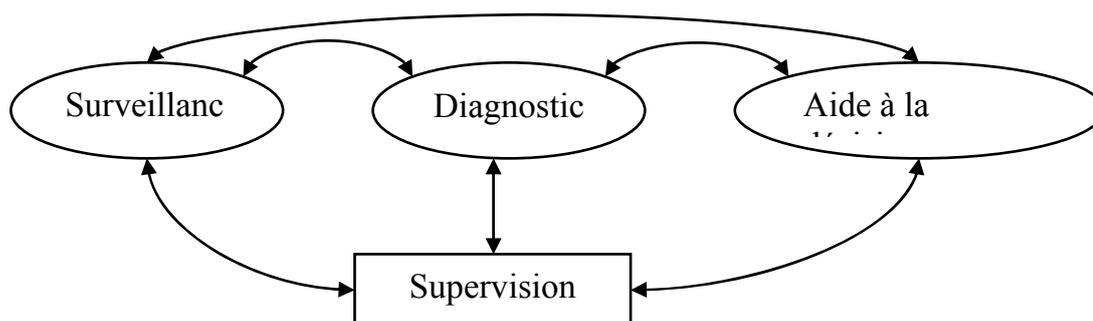


Figure 4.2 : Introduction d'outils de surveillance, de diagnostic et d'aide à la décision au niveau de la supervision

L'impératif de sûreté de fonctionnement, lié aux enjeux économiques en cas d'incidents ou de pannes, impose une maîtrise importante de ces techniques de surveillance et de diagnostic de défauts. En effet, en raison de la complexité des systèmes industriels, du

principe de disponibilité maximale et de compétitivité des entreprises, la surveillance, le diagnostic et l'aide à la décision sont devenus des techniques très importantes et s'insèrent dans toute la chaîne de production d'un produit, de la conception à la maintenance [22].

4.3 L'évolution de la fonction maintenance :

La complexité croissante des matériels, l'évolution des modes de production et des comportements face aux enjeux des entreprises en terme de productivité, de qualité, de coûts et de délais ont favorisé considérablement le développement et l'essor de la fonction maintenance. Longtemps considéré comme un poste de frais pour l'entreprise, la maintenance est désormais perçue comme un élément contribuant à favoriser la rentabilité de l'outil de production, un élément de qualité, et plus généralement comme un prolongement logique de l'activité de fabrication. La **maintenance industrielle** est ainsi devenue une fonction stratégique des entreprises, et comprend l'ensemble des techniques destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou des conditions données de sûreté pour accomplir une fonction requise.

D'un point de vue organisationnel et structurel, on entend actuellement beaucoup parler de la Gestion Productive des Actifs (GPA), version enrichie des systèmes de Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO). Celle-ci met l'accent sur le rendement des biens de production et leur capacité à produire des biens et des services de qualité, en d'autres termes sur l'obligation de résultats. De même, des outils comme la «Totale Productive Maintenance» (TPM) visent à sensibiliser tous les acteurs de la production à l'amélioration de la performance des ressources de production, toujours avec l'objectif d'obtenir un rendement maximum, d'optimiser les coûts d'exploitation et d'augmenter la maîtrise des outils de production. Toutes ces approches visent à une meilleure réactivité via la mise en place de **différentes formes de maintenance**. Avant de présenter les différentes typologies de maintenance, il est toutefois utile de préciser quelques définitions et concepts généraux sur la terminologie utilisée [40].

4.3.1 Définitions et concepts généraux :

La difficulté majeure rencontrée lors de la description des concepts et de la terminologie utilisée dans le monde de la maintenance provient du fait que l'on peut aborder ce problème de différentes manières selon l'origine et la formation des intervenants. De plus, les différences sont très subtiles et subjectives et ces définitions peuvent différer d'une entreprise à l'autre.

1. Composant (*Component*) :

Un composant est un organe technologique représentant une partie du processus industriel (pompe, vanne, conduite, ...) [40].

2. Défaut (*Fault*) :

Le terme défaut est généralement défini comme une imperfection physique liée à la conception ou la mise en œuvre du dispositif. Un défaut peut rester caché pendant un certain temps avant de donner lieu à une défaillance [40].

3. Défaillance (*Failure*) :

Une défaillance définit une anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique, c'est-à-dire caractérise son incapacité à accomplir certaines fonctions qui lui sont assignées.

Les défauts incluent les défaillances mais la réciproque n'est pas vraie. Un système peut remplir sa fonction tout en présentant une anomalie de comportement. Par exemple, une machine électrotechnique peut produire un bruit anormal tout en entraînant correctement une charge, en supposant que telle soit sa fonction. Le bruit anormal est un défaut qui peut permettre de présager d'une défaillance à venir. La recherche de défauts est donc fondamentale en diagnostic [37] et [40].

4. Panne (*Break-down*) :

La panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir la fonction vitale. Il est clair que dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation du dispositif à accomplir sa fonction, on déclarera le dispositif en panne. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une défaillance [40].

5. Résidu (*Residual*) :

Un résidu ou indicateur de faute exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle (supposées décrire correctement le processus) [35] et [37].

6. Diagnostic (*Diagnosis*) :

L'opération de diagnostic consiste à identifier la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'observations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. Il s'agit donc de travailler sur les relations de causalité liant les effets (symptômes observés sur le système) et les causes (défauts du système). L'objectif d'un système de diagnostic est alors de rendre compte de l'apparition d'un défaut le plus rapidement possible (c'est-à-dire avant qu'il n'entraîne des dommages importants à travers des défaillances) [40].

7. Perturbation :

C'est l'entrée du système physique qui n'est pas une commande. Autrement dit, c'est une entrée non contrôlée [35].

Ces notions sont illustrées à partir de l'exemple d'un moteur devant assurer une fonction de ventilation (tableau 4.1) [35].

Définition illustrée	Evénement (exemple)	Ecart au comportement nominal (courant, vitesse)	Aptitude à remplir la fonction de ventilation
Perturbation	Variation de température extérieure (normal).	Petit	Totale
Défaut	Fort échauffement (anormal).	Moyen	Totale
Défaillance	Déclenchement intermittent d'un relais thermique stoppant le ventilateur jusqu'à ce que la température du moteur redescende à un niveau acceptable.	Grand	Partielle
Panne	Suite aux forts échauffements répétitifs, les isolants sont progressivement endommagés: un court-circuit apparaît; le moteur ne peut plus tourner jusqu'à ce qu'une réparation soit effectuée.	Grand	Nulle

Tableau 4.1 : Illustration des définitions à l'aide d'un moteur de ventilateur

4.3.2 Les différentes formes de maintenance :

D'après la norme AFNOR-NF-X60-010 [AFN94], la maintenance industrielle peut se décliner sous différentes formes selon les situations.

Les différentes formes de maintenance sont réparties en deux catégories (figure 4.3) selon la présence ou non d'une défaillance au moment considéré : on parle de **maintenance corrective** si une défaillance est a priori présente et de **maintenance préventive** sinon.

4.3.2.1 La maintenance corrective :

La maintenance corrective est souvent perçue comme la forme primaire par excellence de la maintenance car l'intervention a lieu « en urgence » une fois la défaillance survenue. La logique de cette politique de maintenance est assez simple : lorsqu'une machine est défectueuse, il faut la réparer, ce qui sous-entend que si elle fonctionne, on n'y « touche » pas.

Sur ce principe, la maintenance corrective regroupe l'ensemble des activités réalisées après la défaillance de l'outil de production. Cette politique regroupe une part importante des opérations de maintenance au cours desquelles le technicien de maintenance joue un rôle important puisque faute d'autodiagnostic (aide à la décision), c'est lui qui établit un diagnostic et décide des actions correctives.

Sous cette forme de maintenance, on distingue généralement deux niveaux selon la nature des opérations réalisées. On parle de **maintenance palliative** lorsque l'intervention a un caractère provisoire dans le sens où elle nécessitera forcément une intervention ultérieure. Par opposition, une opération de **maintenance curative** se caractérise par la recherche des causes initiales de la défaillance et par la réalisation des opérations visant à rendre le système opérationnel et ainsi éviter toute nouvelle occurrence de cette défaillance [40].

4.3.2.2 La maintenance préventive :

Par opposition à la maintenance corrective, la maintenance préventive regroupe les opérations de maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance de l'outil de production, opérations réalisées avant l'occurrence de toute défaillance qui viendrait entraver la production. Ce concept de maintenance est basé sur une inspection périodique de l'outil de production selon des critères prédéterminés, afin de juger de ce bon état de fonctionnement. Parmi les techniques de maintenance préventive, on distingue trois niveaux. En **maintenance préventive systématique**, l'entretien est réalisé selon un échancier établi sur la base de critères d'usure tels que des heures de fonctionnement (en référence au MTTF (Mean Time To Failure) ou au MTBF (Mean Time Between Failure)) ou une quantité produite, qui permettent de déterminer des périodicités d'intervention. Les opérations d'entretien se traduisent par le remplacement systématique d'un certain nombre de composants identifiés par cet échancier. En **maintenance préventive conditionnelle**, le principe de périodicité des interventions est conservé, mais le remplacement des composants est conditionné par la comparaison du résultat de vérification permettant d'évaluer le niveau de dégradation à un critère d'acceptation pré-établi. Les variables statistiques (MTBF, MTTF) utilisées en maintenance préventive systématique font donc place à des variables actualisées de l'état du système, telle que la valeur d'un jeu mécanique ou un niveau de vibrations. Enfin, la dernière forme de maintenance préventive est connue à la fois sous le nom de **maintenance prévisionnelle** et de **maintenance prédictive**. En maintenance prédictive, le principe consiste à assurer un suivi continu, et non plus périodique, de l'état de fonctionnement de l'outil de production. L'objectif de la maintenance prédictive est alors de maîtriser au mieux les comportements passés et présents du système afin de prévoir les défaillances futures, et donc

de maîtriser la globalité du processus de dégradation et de réduire les temps d'indisponibilité.

Pour la maintenance d'un outil de production, différentes stratégies de maintenance sont donc envisageables. Chaque forme de maintenance dispose toutefois de ses avantages et de ses inconvénients. Cependant, en raison de la complexité des systèmes industriels, la tendance actuelle est davantage au développement de la maintenance préventive et surtout de la maintenance prédictive, même s'il y a toujours un compromis à établir en fonction du système surveillé, de la complexité des techniques à mettre en œuvre, et de leurs coûts [37].

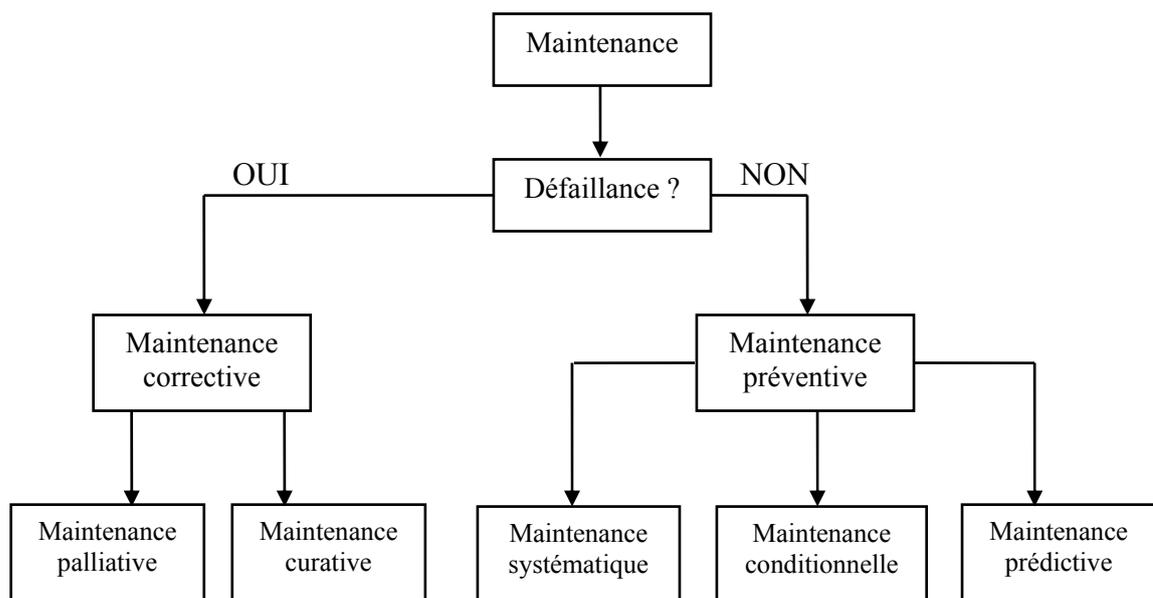


Figure 4.3 : Les différentes formes de maintenance [AFN94]

4.4 Les techniques de mesure en diagnostic :

La mise en œuvre des nouvelles formes de maintenance nécessite l'utilisation de techniques de mesure permettant d'apprécier l'état de fonctionnement d'un système. Cette image de l'état de fonctionnement du procédé est souvent définie à l'aide de signatures.

Ces signatures doivent contenir l'information pertinente pour la détection d'une anomalie. Bien entendu, plus le système sera complexe, plus l'obtention et l'exploitation de ces signatures seront difficiles. Nombreuses sont les techniques de mesures qui peuvent être utilisées dans un programme de maintenance. Toutefois, nous ne tenons pas ici à faire une présentation exhaustive de celles-ci mais uniquement à sensibiliser le lecteur sur celles utilisées actuellement en maintenance. Dans ce sens, les principales techniques non destructives utilisées pour l'obtention des signatures sont l'analyse vibratoire, l'analyse

thermographique, l'analyse des lubrifiants et des particules d'usure, et enfin l'analyse des paramètres de fonctionnement du procédé.

4.4.1 Analyse vibratoire :

L'analyse vibratoire s'est rapidement imposée comme la technique de mesure incontournable en maintenance, notamment des systèmes mécaniques. Le principe général consiste à utiliser l'information vibratoire émanant soit d'un équipement mécanique dynamique (machines tournantes) soit d'un matériel statique (structure, tuyauterie) afin d'en déterminer l'état. Les signaux vibratoires sont relevés à partir d'accéléromètres disposés au plus proche des endroits critiques et orientés selon l'information recherchée.

Les techniques d'analyse vibratoire sont montrées parfaitement fiables et précises pour la détection des comportements anormaux des systèmes de production. Toutefois, il ne faut pas oublier que les coûts de l'instrumentation nécessaire au recueil des données mais aussi d'analyse sont assez élevés, ce qui a pour effet de limiter la généralisation de ces techniques. Une première analyse consiste à déterminer l'énergie dissipée sous forme de vibrations dans une bande de fréquences donnée. La seconde consiste à travailler sur une bande de fréquences plus localisée, afin de ne considérer qu'une partie de l'outil de production. Enfin, une troisième catégorie d'analyse consiste à travailler sur une représentation spectrale de la vibration engendrée par l'outil de production ou l'un de ses composants.

L'analyse vibratoire permet d'identifier une dégradation de l'outil de production avant qu'un incident ne se produise. Selon la qualité des relevés vibratoires et de la pertinence de l'analyse, elle permet de spécifier le ou les composant(s) qui commencent à se détériorer [40].

4.4.2 Analyse thermographique :

L'analyse thermographique fait également partie des techniques de mesure employées pour la surveillance des systèmes industriels. La thermographie permet la mesure de températures au moyen d'une caméra (mesure de rayonnements) et d'un thermographe (température). L'analyse thermographie consiste à mesurer l'intensité des émissions de rayons infrarouges d'un système afin d'en déterminer les conditions opératoires.

Par conséquent, la détection de l'échauffement d'un composant (anomalie thermique telle qu'un point chaud) permet d'identifier un défaut, et dans certaines situations d'en localiser la cause. L'analyse thermographique peut s'appliquer à différents domaines industriels (mécanique, électrique, électronique, thermique, ...), mais nécessite, dans la plupart des situations, une connaissance digne du système étudié pour analyser l'image thermique.

Dans un programme de maintenance, on peut recourir à l'utilisation de la thermographie pour contrôler l'efficacité thermique de certains procédés, basés sur les transferts ou la conservation de la chaleur, notamment dans les industries chimiques et métallurgiques. La thermographie est ainsi utilisée pour la détection de pertes de chaleur ou de fuites sur des conduites ou sur des parois de fours calorifugés. Au-delà de ces applications de la thermographie à la maintenance des systèmes thermiques, il en existe des applications dans les domaines électriques et mécaniques [22].

4.4.3 Analyse des lubrifiants et des particules d'usure :

L'ensemble des techniques d'analyse des lubrifiants et d'analyse des particules d'usure est souvent repris sous la dénomination de tribologie. Ainsi, les analyses d'échantillons d'un fluide lubrifiant permettent de déterminer les caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant et d'identifier de manière précoce une usure des éléments mécaniques en contact. Les techniques d'analyse permettent de mettre en évidence deux facteurs prépondérants dans la qualité d'un lubrifiant : sa dégradation et sa contamination.

La **dégradation** d'un lubrifiant est généralement due à des actions combinées de l'oxygène de l'air et des températures élevées. L'analyse de la dégradation de l'huile s'intéresse à la quantification de ses propriétés caractéristiques telles que sa viscosité ou son acidité. Le suivi des propriétés du lubrifiant est essentiellement utile pour ajuster les périodes de renouvellement ou d'appoint sans pour autant permettre la prédiction d'usure des pièces mécaniques.

La **contamination** du lubrifiant provient quant à elle soit de particules d'usure des pièces en contact, soit d'une pollution par des particules solides en provenance de l'extérieur, ou encore par de l'eau. La présence de particules au sein du lubrifiant est souvent la conséquence d'usures anormales de certains composants du système. Les techniques qui permettent de mesurer le niveau de contamination d'un lubrifiant sont multiples. Nous ne citerons en exemple que la technique classique du comptage de particules qui constitue souvent la première analyse. L'avantage de l'étude de la contamination des huiles émane du fait qu'elle permet de déceler et de localiser l'usure prématurée d'un composant d'une installation à partir d'une analyse approfondie sur l'origine des particules d'usure présentes dans le lubrifiant. Cette analyse s'effectue par l'étude de la composition des particules, mais aussi de leur forme et de leur taille.

Toutefois, l'étape préalable à l'étude de la dégradation et/ou de la contamination du lubrifiant consiste à prélever un échantillon du lubrifiant. L'acquisition d'échantillons valides

constitue souvent une limite à ces analyses. En effet, cette opération doit être effectuée avec soin, de façon à obtenir des échantillons très représentatifs de l'état du lubrifiant qui circule dans l'installation. Ainsi, même si toutefois on commence à voir apparaître des procédés d'analyse des lubrifiants utilisables en ligne, la méthode et la fréquence des prélèvements constituent toujours une des difficultés dans la mise en œuvre de ces analyses [22].

4.4.4 Analyse des paramètres de fonctionnement du procédé :

Les techniques d'évaluation de l'état de fonctionnement d'un outil de production énumérées ci-dessus sont des techniques très spécifiques suivant l'équipement. A côté de celles-ci, il est possible d'analyser un ensemble de paramètres, directement dépendant de l'état de fonctionnement du procédé, et que l'on peut répertorier en deux catégories. Tout système de production agit directement sur un ensemble de variables propres à son principe de fonctionnement : les grandeurs physiques. En effet, sur la majorité des procédés industriels, on dispose d'un ensemble de mesures et d'informations, notamment celles nécessaires à la commande du processus. Selon les procédés, des mesures de tensions, pressions, débits, températures... constituent de bons indicateurs quant à l'évolution de l'état de fonctionnement d'un système dans le temps. De nombreux indicateurs pertinents peuvent alors être extraits de ces signaux par analyses temporelles ou fréquentielles. De plus, ces informations ont l'avantage indéniable d'être plus facilement interprétables et exploitables en terme de détection de dysfonctionnement, mais aussi et surtout de localisation et d'identification de la cause. Par ailleurs, quand ces informations sont nécessaires à la conduite du procédé, elles sont à fortiori présentes et sont donc accessibles à moindre coût [22].

4.5 Les différentes étapes du diagnostic :

Le diagnostic d'un système industriel nécessite un certain nombre d'étapes résumées dans la figure 4.4 [37].

4.5.1 Acquisition de données :

La procédure de diagnostic nécessite de disposer d'information sur le fonctionnement du système à surveiller. Ces informations sont recueillies lors d'une phase d'acquisition de données suivie d'une validation. Cette étape implique donc l'utilisation de capteurs qui permettent de mesurer les différentes variables des processus. L'instrumentation du système à surveiller n'entraîne pas obligatoirement de coût supplémentaire dans la mesure où celle-ci est de toute façon nécessaire pour réaliser la commande automatique de processus. [37]

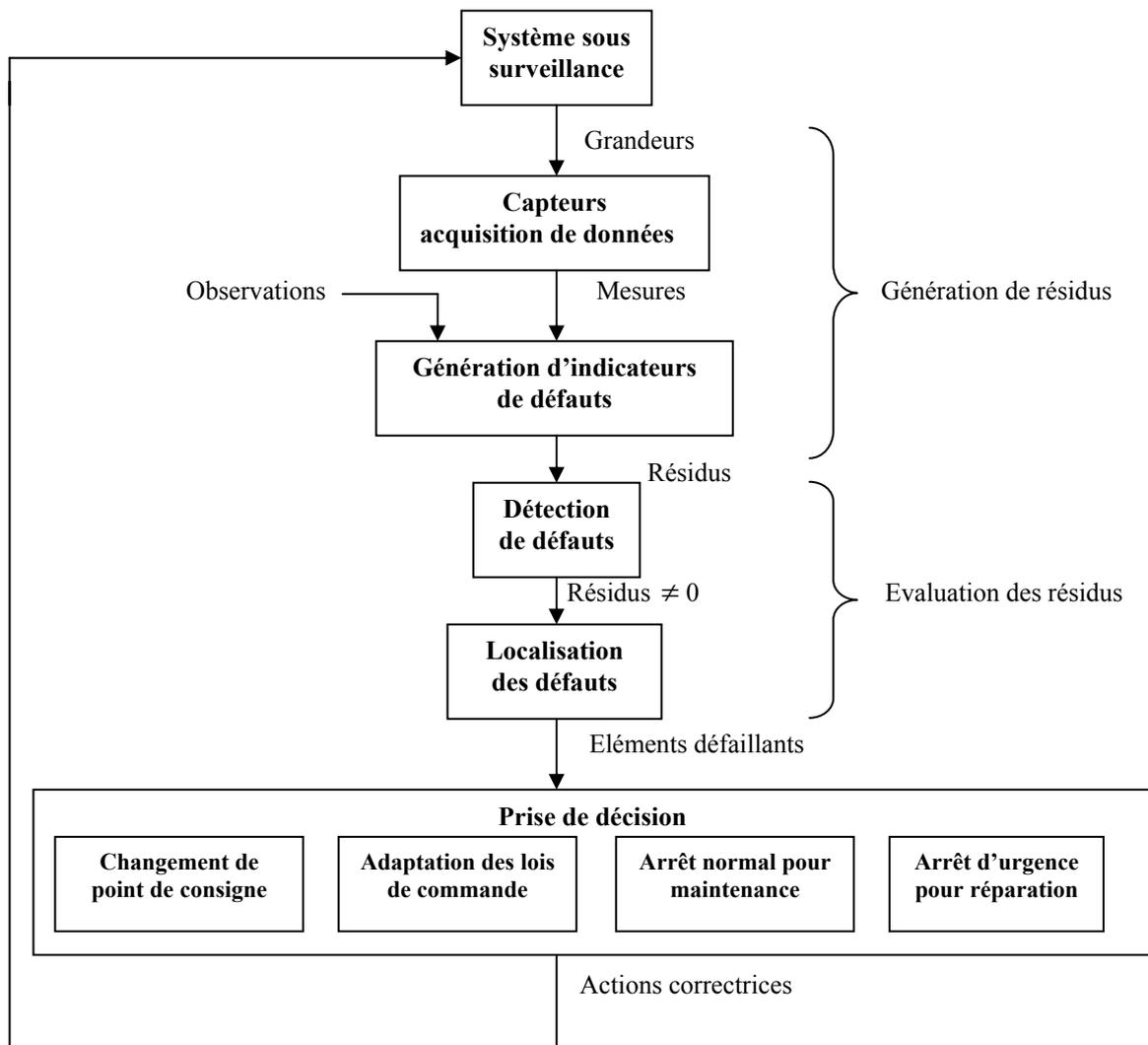


Figure 4.4 : Les différentes étapes du diagnostic

4.5.2 Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts :

A partir des mesures réalisées et des observations issues des opérateurs en charge de l'installation, il s'agit de construire des indicateurs permettant de mettre en évidence les éventuels défauts pouvant apparaître au sein du système. Dans le domaine du diagnostic, les indicateurs de défauts sont couramment dénommés les résidus. Un résidu représente un écart entre les grandeurs estimées et mesurées. De ce point de vue, le terme de résidu est tout à fait justifié car l'étape d'élaboration d'indicateurs de défauts consiste finalement, quelle que soit la méthode employée, à comparer le comportement réel du système à un comportement de référence. Cet écart de comportement doit donc être idéalement nul en l'absence de défaut et différent de zéro dans le cas contraire.

4.5.3 Etape de détection :

Cette étape doit permettre de décider si le système se trouve ou non dans un état de fonctionnement normal. On pourrait penser qu'il suffit de tester la non nullité des résidus pour décider de l'apparition d'un défaut. En pratique, le problème n'est pas si simple, car les grandeurs mesurées sont toujours entachées de bruits. D'autre part, le système surveillé est toujours soumis à des perturbations non nécessairement mesurables, le modèle utilisé, n'est qu'une représentation toujours imparfaite de la réalité, de sorte que les résidus peuvent être non nuls en l'absence de défaut. Par conséquent, cette étape fait le plus souvent appel aux tests statistiques ou, de manière plus simple, est réalisée à l'aide d'un seuillage.

4.5.4 Etape de localisation :

Il s'agit, à partir des résidus détectés non nuls statistiquement, de localiser le défaut, c'est-à-dire de déterminer le ou les éléments défectueux. On appelle signature d'un défaut l'effet de celui-ci sur un ou plusieurs résidus. Si l'on dispose de la connaissance de la signature des défauts, il est possible, à partir de celle-ci, de remonter des effets (résidus non nuls) aux causes (les éléments défectueux).

4.5.5 Etape de prise de décision :

Le fonctionnement incorrect du système étant constaté, il s'agit de décider de la marche à suivre afin de conserver les performances souhaitées d'un système sous surveillance. Cette prise de décision doit permettre de générer, éventuellement sous le contrôle d'un opérateur humain, les actions correctrices nécessaires à un retour à la normale du fonctionnement de l'installation. Ces actions peuvent être : l'adaptation paramétrique de la loi de commande dans le but de conserver les performances de l'installation, un changement de point de consigne afin de compenser l'effet d'un défaut, une procédure normale d'arrêt ou encore un arrêt d'urgence en cas de détection d'une anomalie sévère mettant en danger les personnes ou le matériel, etc.

4.6 Classification des méthodes de diagnostic :

Dans ce paragraphe, on présente différentes méthodes utilisées en diagnostic des systèmes physiques. Le domaine était très vaste, des choix arbitraires ont été faits. Le but n'est donc pas de faire une synthèse exhaustive de l'existant, mais de montrer la richesse des possibilités qui s'offrent au concepteur de système de diagnostic. En effet, différents types d'algorithmes de détection dédiés aux systèmes physiques ont été conçus par les chercheurs

de la communauté de l'automatique. Néanmoins, on s'est astreint à balayer le large spectre des techniques actuellement utilisées en diagnostic, à savoir [37]:

- Méthodes sans modèle analytique.
- Méthodes basées sur les modèles analytiques.

Actuellement, on s'oriente vers des systèmes de diagnostic mettant en œuvre différentes techniques de détection. En effet, chacune d'entre elles est plus ou moins bien adaptée pour appréhender tel ou tel type de défaut. Par exemple, on s'orientera vers les méthodes à base d'estimation paramétrique lorsqu'on souhaite localiser un défaut qui se manifeste par une variation des paramètres du modèle identifié.

4.6.1 Méthodes sans modèle analytique :

4.6.1.1 Analyse fréquentielle :

Une première approche du traitement du signal repose sur l'analyse fréquentielle (transformée de Fourier). Elle est très utilisée pour la détection de phénomènes périodiques comme en analyse vibratoire. Le contenu spectral des signaux est utilisé pour détecter des défauts dans les machines électriques tels que les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les décentrages, les courts-circuits dans les bobinages. Avec le développement des applications à vitesse variable, les recherches actuelles portent plus particulièrement sur les méthodes adaptées à la caractérisation de signaux non stationnaires : temps fréquence, temps-échelle.

L'analyse du spectre des signaux issus des capteurs permet de déterminer très efficacement l'état de l'installation sous surveillance. Les signaux sont ici tout d'abord analysés en état normal de fonctionnement. Ensuite, toute déviation des caractéristiques fréquentielles d'un signal est reliée à une situation de panne (le problème, c'est qu'un changement de consigne modifie les caractéristiques fréquentielles et cela n'a rien d'un défaut). Cette approche possède l'avantage d'être relativement simple à mettre en pratique, mais l'inconvénient d'être assez sensible aux bruits de mesure quand ceux-ci coïncident avec la zone fréquentielle d'intérêt. De plus, un échantillonnage fréquent est nécessaire pour permettre de reconstituer le signal de départ tout en minimisant la perte de fréquence [35], [26] et [27].

4.6.1.2 Redondance matérielle :

Cette méthode consiste à multiplier physiquement les capteurs critiques d'une installation. Un traitement des signaux issus des éléments redondants effectuée des

comparaisons et distingue l'élément défectueux en cas d'incohérence. Cette méthode est pénalisante en termes de poids, puissance consommée, volume et coût (d'achat et de maintenance). Elle est donc essentiellement réservée aux cas où la continuité de service est obligatoire (l'aérospatiale, le nucléaire). En effet, elle apporte l'avantage, une fois la défaillance détectée et localisée, de pouvoir utiliser la partie de l'équipement encore saine mais cette technique ne s'applique généralement que sur des capteurs [37] et [40].

4.6.1.3 Capteurs spécifiques :

Des capteurs spécifiques peuvent également être utilisés pour générer directement des signaux de détection ou connaître l'état d'un composant. Par exemple, les capteurs de fin de course, d'état de fonctionnement d'un moteur ou de dépassement de seuils sont largement employés dans les installations industrielles, ils sont dits capteurs - détecteurs [35].

4.6.1.4 Réseaux de neurones artificiels :

Quand la connaissance sur le procédé à surveiller n'est pas suffisante et que le développement d'un modèle du procédé est impossible, l'utilisation de modèle dit « boîte noire » peut être envisagée. Pour cela des réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été utilisés. Leur application dans les domaines de la modélisation, de la commande et du diagnostic a largement été rapportée dans la littérature.

Un RNA est en fait un système informatique constitué d'un nombre de processeurs élémentaires (ou nœuds) interconnectés entre eux qui traite de façon dynamique l'information qui lui arrive à partir des signaux extérieurs.

De manière générale, l'utilisation des RNA se fait en deux phases. Tout d'abord, la synthèse du réseau est réalisée et comprend plusieurs étapes : le choix du type de réseau, du type de neurones, du nombre de couches, des méthodes d'apprentissage. L'apprentissage permet alors, sur la base de l'optimisation d'un critère, de reproduire le comportement du système à modéliser. Il consiste en la recherche d'un jeu de paramètres (les poids) et peut s'effectuer de deux manières : supervisée (le réseau utilise les données d'entrée et de sortie du système à modéliser) et non supervisée (seules les données d'entrée du système sont fournies et l'apprentissage s'effectue par comparaison entre exemples) quand les résultats d'apprentissage obtenus par le RNA sont satisfaisants, il peut être utilisé pour la généralisation. Il s'agit ici de la deuxième phase où de nouveaux exemples qui n'ont pas été utilisés pendant l'apprentissage sont présentés au RNA pour juger de sa capacité à prédire les comportements du système modélisé [22], [35] et [37].

Comme il a été dit précédemment, les RNA peuvent être utilisés pour le diagnostic des défaillances. Leur faible sensibilité aux bruits de mesure, leur capacité à résoudre des problèmes non linéaires et multivariés, à stocker la connaissance de manière compacte, à apprendre en ligne et en temps réel, sont en effet autant de propriétés qui les rendent attrayants pour cette utilisation. Leur emploi peut alors se faire à trois niveaux :

- Comme modèle du système à surveiller en état normal et générer un résidu d'erreur entre les observations et les prédictions,
- Comme système d'évaluation de résidus pour le diagnostic,
- Comme système de détection en une étape (en tant que classificateurs).

4.6.1.5 Systèmes d'inférence flous :

Pendant les vingt dernières années, les systèmes d'inférence floue (SIF) dont les bases relèvent de la théorie des ensembles flous de Zadeh sont devenus très populaires. Les applications dans le traitement du signal, la modélisation, la commande, la supervision de procédés et la prise de décision démontrent la capacité des SIF à traiter des problèmes non linéaires grâce à l'utilisation de connaissances expertes.

La structure de base d'un SIF est constituée de [22], [35] et [37] :

- Un univers de discours qui contient les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie à des classes. Ces fonctions peuvent avoir différentes formes, les plus usuelles étant les formes triangulaires, trapézoïdales, et gaussiennes,
- Une base de connaissance qui regroupe les règles liant les variables d'entrée et de sortie sous la forme « Si...Alors... »,
- Un mécanisme de raisonnement qui base son fonctionnement sur la logique du *modus ponens* généralisé.

Les SIF peuvent être qualifiés de méthode « boîte grise ». En effet, ils explicitent la connaissance experte sous la forme de règles d'inférence, tout en classant les entrées et les sorties de façon qualitative. Ils effectuent également des calculs sur la base de poids et de fonctions fixées de façon à faire correspondre des comportements observés sans qu'il y ait de signification physique explicite. Le mode de fonctionnement d'un SIF permet donc de manier ensemble des quantités et des symboles pour faire des calculs et d'expliquer le cheminement parcouru pour obtenir un résultat. D'autre part, les tâches de diagnostic reposent sur des quantités d'heuristiques difficiles à formaliser dans un modèle mathématique :

- La corrélation entre des variables très différentes,
- Des observations qualitatives (par exemple : couleur, bruit),

- Des intuitions, liées à des statistiques (par exemple : tel appareil pose plus de problèmes qu'un autre...) difficilement quantifiables mais pourtant très efficaces.

4.6.1.6 Reconnaissance de formes :

La reconnaissance de formes regroupe l'ensemble des méthodes permettant la classification automatique d'objets, suivant sa ressemblance par rapport à un objet de référence. L'objectif est de décider, après avoir observé un objet, à quelle forme celui-ci ressemble le plus. Une forme est définie à l'aide de p paramètres, appelés descripteurs, qui sont les composantes d'un vecteur forme que nous noterons \mathbf{X} . La résolution d'un problème de reconnaissance de formes nécessite [22] et [37] :

- La définition précise des l classes entre lesquelles va s'opérer la décision. Cette étape est liée à la nature des objets à classer et est donc spécifique au problème posé,
- Le choix d'un jeu de caractères pertinents pour la discrimination des vecteurs de formes. Malheureusement, il n'existe pas de méthodes systématiques permettant de choisir les paramètres les plus appropriés à la résolution d'un problème donné. Par conséquent, seule une bonne connaissance du problème à résoudre peut permettre un choix adéquat des paramètres de forme. Notons enfin que le nombre de caractères fixe la dimension de l'espace de représentation. Ceci peut représenter une contrainte sévère dans un contexte de traitement en temps réel des objets à classer,
- L'élaboration d'un classificateur permettant l'affectation d'une forme observée à l'une des classes. Le classificateur est généralement établi à l'aide d'un ensemble d'apprentissage constitué de formes pour lesquelles on connaît l'appartenance aux différentes classes.

4.6.2 Méthodes basées sur les modèles analytiques :

La plupart des méthodes de détection et de diagnostic en ligne s'appuient sur les mesures. Il existe des méthodes qui utilisent plus de connaissances que celles apportées par les seuls capteurs physiques.

Ces connaissances peuvent en particulier provenir de la connaissance du comportement entrée /sortie d'un procédé ou des processus qui en gouverneraient l'évolution. Cette connaissance est généralement exprimée sous forme de modèles mathématiques.

Parmi les différentes méthodes de détection utilisant des modèles mathématiques, nous trouverons principalement l'espace de parité, les Observateurs et l'estimation paramétrique.

4.6.2.1 Espace de parité :

L'approche la plus classique est celle dite de l'espace de parité. Les relations de parité utilisent la redondance directe au moyen de relations algébriques statiques liant les différents signaux ou la redondance temporelle issue de l'utilisation de relations dynamiques. Le terme « parité » a été emprunté au vocabulaire employé pour les systèmes logiques où la génération de bits de parité permet la détection d'erreur [37].

4.6.2.2 Observateurs :

La génération de résidus à l'aide d'une estimation d'état consiste à reconstruire l'état ou, plus généralement, la sortie du processus à l'aide d'observateurs et à utiliser l'erreur d'estimation comme résidu. Cette méthode s'est beaucoup développée car elle donne lieu à la conception de générateurs de résidus flexibles [27] et [37].

4.6.2.3 Estimation paramétrique :

L'approche d'estimation paramétrique considère que l'influence de défauts se reflète sur les paramètres et non pas uniquement, comme c'est le cas des observateurs, sur les variables du système physique. Le principe de cette méthode consiste à estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en évaluant la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé. L'estimation paramétrique possède l'avantage d'apporter de l'information sur l'importance des déviations (figure 4.5).

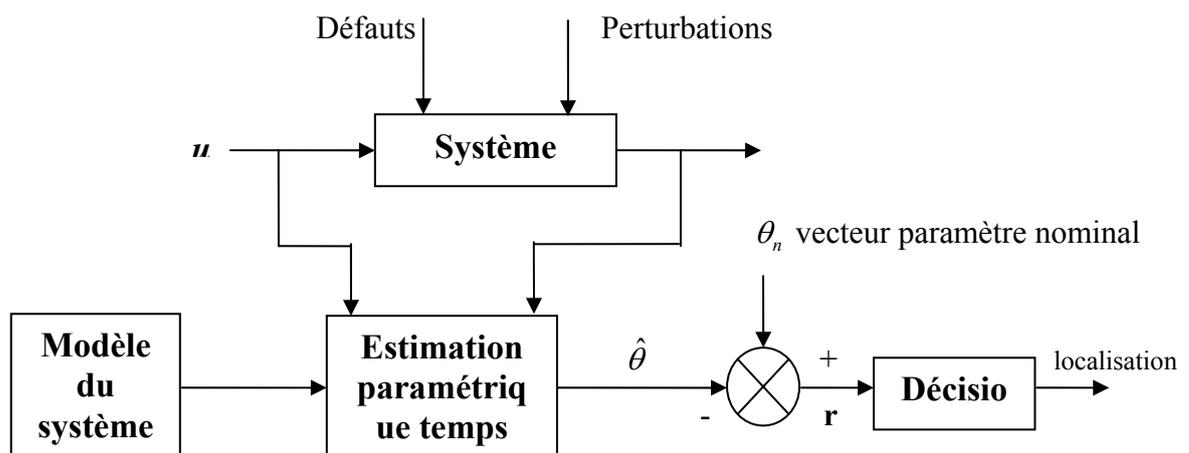


Figure 4.5 : Estimation paramétrique pour le diagnostic de défauts

4.7 Diagnostic par bond graph :

D'un point de vue, d'une représentation par une approche bond graph, un système de surveillance peut être illustré par la figure 4.6. [12]

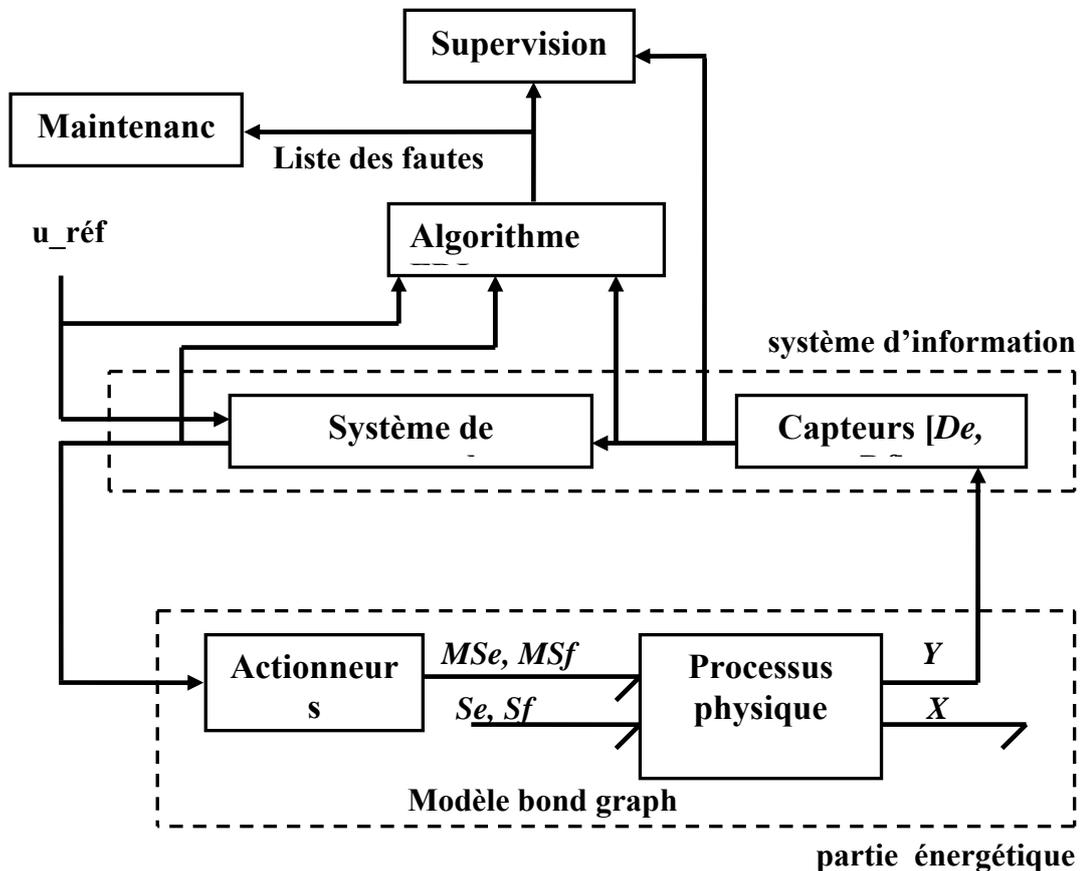


Figure 4.6 : Représentation bond graph d'un système de surveillance

On distingue essentiellement deux parties : l'une concerne le transfert de la puissance et de l'énergie (formée par le processus et l'ensemble des actionneurs), alors que la seconde représente les signaux (le système d'information, c'est à dire les capteurs et le système de régulation).

Le modèle bond graph représente la partie énergétique du système. Le processus est modélisé généralement par les éléments bond graph usuels (R , C , I , et les jonctions). Les actionneurs (pompe, source thermique, ...) sont modélisés par des sources (d'effort ou/et de flux). Les sources peuvent être simples (Se , Sf) ou modulées (MSe , MSf), c'est-à-dire commandées par un signal externe fourni par un contrôleur ou un opérateur. Les capteurs et le système de commande forment le système d'information. Dans le premier système (énergétique), la puissance échangée est représentée par une demi-flèche (un lien de

puissance) traduite par les variables d'effort et de flux. Dans le second système (système d'information) la puissance échangée est négligeable, elle est alors représentée par un lien d'information (flèche) qui est le même utilisé dans les blocs diagrammes classiques.

Les algorithmes de surveillance (de détection et d'isolation de fautes FDI) reçoivent les informations en ligne issues des capteurs (détecteurs d'effort De et de flux Df) et délivrent au système de supervision les alarmes. Les informations sur l'état des éléments défaillants sont transmises au service de maintenance [7], [12] et [23].

On distingue principalement deux approches bond graph pour la surveillance des processus: l'approche quantitative et l'approche qualitative.

4.7.1 L'approche qualitative pour le diagnostic en utilisant le bond graph :

Cette approche ne nécessite pas un modèle très précis. Contrairement aux représentations de connaissances conventionnelles permettant de décrire la structure du système et son état par le biais de divers outils (schéma bloc, équations différentielles, ...), les bond graphs qualitatifs ne décrivent explicitement que la localisation des composants du système et leurs interconnexions. La surveillance basée sur la modélisation par bond graph qualitatif s'avère plus simple en comparaison avec les méthodes quantitatives car elle ne nécessite pas un modèle précis.

Ces modèles qualitatifs sont construits sans aucune considération des paramètres du système. Ils se basent sur des valeurs qualitatives (à la place des valeurs numériques) définies par l'ensemble $\{[1] [+] [0] [-] [-1] [?]\}$ représentant la qualité de la déviation dans l'espace des mesures par rapport au fonctionnement normal. Les opérateurs sont ainsi qualitatifs, ils peuvent être définis en utilisant les opérateurs des nombres réels : $\{+, -, \times, \div, =\}$. On résout alors un système d'équations qualitatives pour déterminer l'origine des défaillances. D'autres études utilisent les graphes causaux temporels pour isoler les pannes en tenant compte de la dynamique d'occurrence de la faute. D'autres utilisent une analyse qualitative des équations d'état linéaires pour déterminer les causes possibles d'une défaillance [14] et [33]. L'avantage que présente cette approche est qu'elle ne nécessite pas une connaissance profonde de la structure du système ni des grandeurs numériques des paramètres. Toutefois cette approche devient complexe pour les processus multi - énergie et présente d'autres inconvénients comme la non détection des défaillances des capteurs et la difficulté de déterminer les valeurs limites inférieures et supérieures des déviations.

4.7.2 L'approche quantitative pour le diagnostic en utilisant le bond graph :

Le principe de cette approche est de comparer le comportement normal du processus à celui du modèle numérique. Contrairement à l'approche qualitative, l'approche quantitative se base sur des lois physiques et nécessite donc une connaissance profonde sur la structure du système et les valeurs numériques des paramètres. Les modèles quelque soient leurs formes (fonction de transfert, équations d'état, ...) sont obtenus sur la base des lois physiques (lois des premiers principes) ou sur la base d'une identification statistique des paramètres. Depuis 1995 on utilise directement le modèle bond graph quantitatif pour la conception du système de surveillance [7], [12] et [33].

Les avantages que présente cette approche par rapport aux approches basées sur les observateurs sont : la simplicité de la compréhension des relations de redondance analytique (RRA) puisqu'elles correspondent à des relations et des variables qui sont affichées par le modèle bond graph, image du processus physique, ces relations sont déduites directement de la représentation graphique, elles peuvent être générées sous forme symbolique et donc adaptées à une implémentation informatique.

4.8 Conclusion :

L'objectif du diagnostic est de détecter rapidement les divers défauts existant sur un procédé pour éviter la dégradation de ses performances et augmenter la sécurité des opérateurs et de l'environnement. Ce chapitre a fourni une présentation succincte des différentes techniques de maintenance et de diagnostic les plus utilisées. Le critère principal de classification des méthodes de diagnostic est basé sur le type de connaissance, on a distingué deux types d'approches : les méthodes avec ou sans modèle. Utilisant l'outil bond graph, nous avons rappelé l'approche qualitative et l'approche quantitative pour la surveillance des systèmes physiques.

Chapitre 5

5.1 Introduction :

La procédure de diagnostic nécessite de disposer d'informations sur le fonctionnement du système à surveiller. Ces informations sont recueillies à travers des capteurs permettant de mesurer les différentes variables des processus. L'instrumentation du système à surveiller n'entraîne pas obligatoirement de coût supplémentaire dans la mesure où celle-ci est nécessaire pour réaliser la commande automatique de processus. On distingue deux grandes classes de capteurs en Bond graph : les détecteurs d'efforts **De** (capteur de pression, capteur de température, voltmètre...) et les détecteurs de flux **Df** (capteur de débit, ampèremètre...).

Dans ce chapitre on s'intéresse à la surveillance de la station d'épuration, on utilise l'outil bond graph pour la génération de relations de redondance analytique (résidus) et on utilise un algorithme de placement de capteurs sur le modèle bond graph qui assure la surveillance des composants du système avec le minimum de capteurs.

5.2 Génération de relations de redondance analytique par bond graph :

La génération des RRAs par la méthodologie bond graph repose sur l'élimination des variables inconnues dans les lois de structure de jonction (jonctions 0, 1, TF et GY) par le parcours de chemins causaux, plusieurs relations entre les différents flux et effort peuvent être établies. Les variables connues K sont celles des détecteurs et des sources et les variables inconnues X sont celles des liens de puissances dans les éléments C, I et R. L'élimination des variables inconnues est systématique sur un modèle bond graph grâce à ses propriétés causales et au parcours des chemins causaux. La procédure de génération des RRAs à partir d'un modèle bond graph est [33] :

1. Mettre le modèle bond graph en causalité intégrale préférentielle,
2. Écrire les lois de structure au niveau des jonctions et exprimer les variables inconnues en fonction des variables connues en suivant les chemins causaux possibles,
3. Pour toute équation de jonction 0 et 1 contenant un détecteur une relation de redondance analytique est déduite.

5.3 Matrice de signature des défaillances :

La structure des RRAs forme une matrice binaire S_{ij} qui nous renseigne sur la sensibilité des résidus aux défaillances des composants du processus physique. Les éléments de la matrice sont définis comme suit:

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si la } i^{\text{ème}} \text{ RRA contient des variables du } j^{\text{ème}} \text{ composant.} \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases} \quad (5.1)$$

La matrice S_{ij} est appelée la matrice de signature des défaillances qui fournit la logique pour la localisation des défaillances détectées durant le fonctionnement du système. L'objectif de la procédure de localisation (isolation) est de fournir à l'opérateur la liste des composants défaillants. Chaque composant a une signature représentée par un vecteur colonne de la matrice. Une défaillance d'un composant est détectable si la variable associée au composant est présente dans au moins une RRA (ou résidu r correspondant). Cette défaillance est localisable si et seulement si sa signature est unique, i.e. différente des signatures des autres composants [23].

5.4 Algorithme de placement de capteurs :

Nous utilisons les détecteurs d'effort (De) et de flux (Df) pour mesurer les variables correspondantes dans un modèle bond graph. Nous les considérons idéaux : ils ne consomment pas de puissance; nous utilisons donc un lien de type signal (une flèche). Le but est d'obtenir un placement optimal de capteurs qui assure la surveillance des composants c'est à dire assurer la détectabilité et l'isolabilité des défaillances des composants. On admet que les défauts sur les composants ne sont pas multiples, les sources et les capteurs ne sont pas défaillants [17].

On a un modèle bond graph d'un processus physique. On suppose que les capteurs ne sont pas encore placés sur le modèle bond graph. Les variables booléennes x_i et y_j correspondant au placement d'un capteur sur une jonction tel que :

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{si le } i^{\text{ème}} \text{ capteur est placé à la } i^{\text{ème}} \text{ jonction "0".} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5.2)$$

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{si le } j^{\text{ème}} \text{ capteur est placé à la } j^{\text{ème}} \text{ jonction "1".} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5.3)$$

Soient : N_0 le nombre de jonctions ‘‘0’’.

- N_1 le nombre de jonctions ‘‘1’’.
- n_i le nombre de liens attachés à la $i^{\text{ème}}$ jonction ‘‘0’’ ($i = 1, \dots, N_0$).
- m_j le nombre de liens attachés à la $j^{\text{ème}}$ jonction ‘‘1’’ ($j = 1, \dots, N_1$).
- e et f représente l’effort et le flux respectivement.

Les équations de la $i^{\text{ème}}$ jonction ‘‘0’’ sont :

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{n_i} a_k f_k = 0 & \text{où } a_k = \begin{cases} 1 & \text{si le demiflèche est vers la jonction.} \\ -1 & \text{sinon.} \end{cases} \\ e_k = e_{C_i} \quad k = 1, \dots, n_i - 1 \end{cases} \quad (5.4)$$

Les équations de la $j^{\text{ème}}$ jonction ‘‘1’’ sont :

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^{m_j} a_l e_l = 0 & \text{où } a_l = \begin{cases} 1 & \text{si la demi flèche est vers la jonction.} \\ -1 & \text{sinon.} \end{cases} \\ f_l = f_{R_j} \quad l = 1, \dots, m_j - 1 \end{cases} \quad (5.5)$$

L’ensemble des variables connues K contient les détecteurs et les sources :

$$K = \{M S_e \cup M S_f \cup D_e \cup D_f \cup S_e \cup S_f\} \quad (5.6)$$

L’ensemble des variables inconnues X est composé des liens de puissances dans les éléments C , I et R :

$$X = \{e_1, f_1\} \cup \{e_2, f_2\} \cup \dots \cup \{e_{ne}, f_{ne}\} / X \in \mathfrak{R}^{2 \times ne} \quad (5.7)$$

Où ne est le nombre de liens de puissances dans les éléments C , I et R .

Les variables inconnues peuvent être calculées par le parcours des chemins causaux.

Pour la jonction ‘‘0’’ et la jonction ‘‘1’’ les variables inconnues sont calculées comme suit :

$$\begin{cases} f_{C_i} = \phi_{C_i} [s \{(1-x_i) e_{C_i} + x_i D e_i\}]; \quad i = 1, \dots, N_0 \\ e_{C_i} = \frac{1}{s} (1-x_i) \phi_{C_i}^{-1} f_{C_i} + x_i D e_i \end{cases} \quad (5.8)$$

Où s est la variable de Laplace.

$$\begin{cases} e_{R_j} = \phi_{R_j} [(1-y_j) f_{R_j} + y_j D f_j]; \quad j = 1, \dots, N_1 \\ f_{R_j} = (1-y_j) \phi_{R_j}^{-1} e_{R_j} + y_j D f_j \end{cases} \quad (5.9)$$

5.5 Application :

Le modèle bond graph du processus avec des détecteurs virtuels est donné sur la figure 5.1. Ce modèle est composé de quatre jonctions **0** ($\mathbf{0}_{C1}$, $\mathbf{0}_{C2}$, $\mathbf{0}_{C3}$ et $\mathbf{0}_{C4}$), trois jonctions **1** ($\mathbf{1}_{R1}$, $\mathbf{1}_{R2}$ et $\mathbf{1}_{R3}$), sept composants (C_1 , R_1 , C_2 , R_2 , C_3 , R_3 et C_4) et deux sources MSf et Sf . Le but est d'assurer la surveillance des composants avec le minimum de capteurs. On suppose un placement virtuel des détecteurs De et Df sur toutes les jonctions et que les capteurs et les sources ne sont pas défaillants. L'ensemble des variables connues est $K = \{MSf, Sf, De_1, Df_1, De_2, Df_2, De_3, Df_3, De_4\}$ et l'ensemble des variables inconnues est $X = \{e_2, f_2, e_4, f_4, e_6, f_6, e_8, f_8, e_{10}, f_{10}, e_{12}, f_{12}, e_{14}, f_{14}\}$.

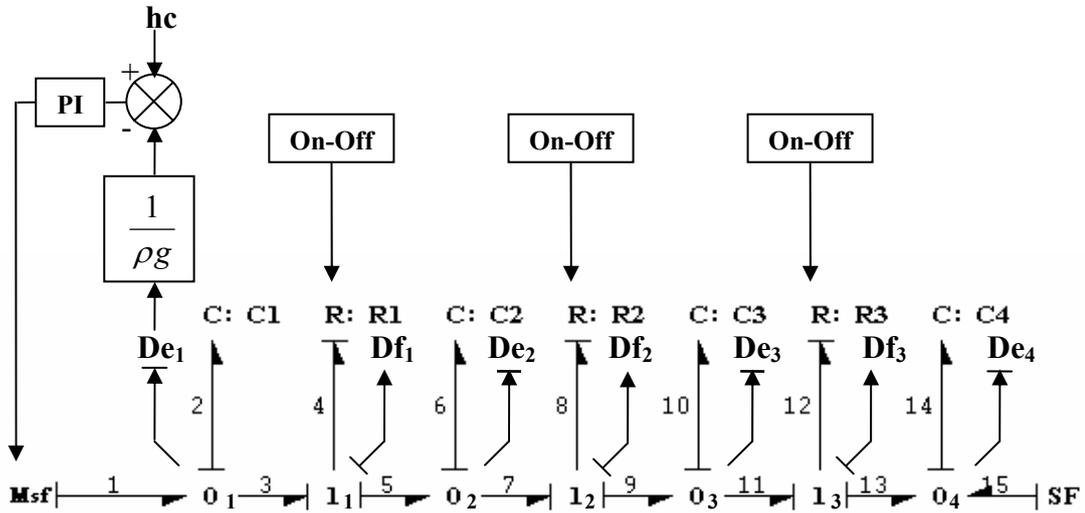


Figure 5.1 : Modèle bond graph du processus avec des détecteurs virtuels

Les équations des jonctions sont :

- Pour la jonction $\mathbf{0}_{C1}$ nous avons :

$$\begin{cases} f_1 - f_2 - f_3 = 0 & \text{et } e_1 = e_3 = \{e_2\} \\ f_1 = MSf & \text{et } f_2 = f_{C1} = \phi_{C1} \left[s \left\{ (1-x_1)e_2 + x_1 De_1 \right\} \right] \\ e_2 = e_{C1} = \frac{1}{s} (1-x_1) \phi_{C1}^{-1} f_2 + x_1 De_1 \end{cases} \quad (5.10)$$

- Pour la jonction $\mathbf{1}_{R1}$ nous avons :

$$\begin{cases} e_3 - e_4 - e_5 = 0 \text{ et } f_3 = f_5 = \{f_4\} \\ e_4 = e_{R1} = \phi_{R1}[(1-y_1)f_4 + y_1 Df_1] \\ f_4 = f_{R1} = (1-y_1)\phi_{R1}^{-1} e_4 + y_1 Df_1 \end{cases} \quad (5.11)$$

- Pour la jonction $\mathbf{0}_{C2}$ nous avons :

$$\begin{cases} f_5 - f_6 - f_7 = 0 \text{ et } e_5 = e_7 = \{e_6\} \\ f_6 = f_{C2} = \phi_{C2} \left[s \left\{ (1-x_1)e_6 + x_2 D e_2 \right\} \right] \\ e_6 = e_{C2} = \frac{1}{s} (1-x_2) \phi_{C2}^{-1} f_6 + x_2 D e_2 \end{cases} \quad (5.12)$$

- Pour la jonction $\mathbf{1}_{R2}$ nous avons :

$$\begin{cases} e_7 - e_8 - e_9 = 0 \text{ et } f_7 = f_9 = \{f_8\} \\ e_8 = e_{R2} = \phi_{R2}[(1-y_2)f_8 + y_2 Df_2] \\ f_8 = f_{R2} = (1-y_2)\phi_{R2}^{-1} e_2 + y_2 Df_2 \end{cases} \quad (5.13)$$

- Pour la jonction $\mathbf{0}_{C3}$ nous avons :

$$\begin{cases} f_9 - f_{10} - f_{11} = 0 \text{ et } e_9 = e_{11} = \{e_{10}\} \\ f_{10} = f_{C3} = \phi_{C3} \left[s \left\{ (1-x_3)e_{10} + x_3 D e_3 \right\} \right] \\ e_{10} = e_{C3} = \frac{1}{s} (1-x_3) \phi_{C3}^{-1} f_{10} + x_3 D e_3 \end{cases} \quad (5.14)$$

- Pour la jonction $\mathbf{1}_{R3}$ nous avons :

$$\begin{cases} e_{11} - e_{12} - e_{13} = 0 \text{ et } f_{11} = f_{13} = \{f_{12}\} \\ e_{12} = e_{R3} = \phi_{R3}[(1-y_3)f_{12} + y_3 Df_3] \\ f_{12} = f_{R3} = (1-y_3)\phi_{R3}^{-1} e_{12} + y_3 Df_3 \end{cases} \quad (5.15)$$

- Pour la jonction $\mathbf{0}_{C4}$ nous avons :

$$\begin{cases} f_{13} - f_{14} + f_{15} = 0 \text{ et } e_{13} = e_{15} = \{e_{14}\} \\ f_{15} = S f \text{ et } f_{14} = f_{C4} = \phi_{C4} \left[s \left\{ (1-x_4)e_{14} + x_4 D e_4 \right\} \right] \\ e_{14} = e_{C4} = \frac{1}{s} (1-x_4) \phi_{C4}^{-1} f_{14} + x_4 D e_4 \end{cases} \quad (5.16)$$

A partir des équations aux jonctions on obtient le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} MSf - \phi_{C1} [s\{(1-x_1)e_2 + x_1De_1\}] - (1-y_1)\phi_{R1}^{-1} e_4 - y_1 Df_1 = 0 \\ \frac{1}{s}(1-x_1)\phi_{C1}^{-1} f_2 + x_1 De_1 - \phi_{R1} [(1-y_1)f_4 + y_1 Df_1] - \frac{1}{s}(1-x_2)\phi_{C2}^{-1} f_6 - x_2 De_2 = 0 \\ (1-y_1)\phi_{R1}^{-1} e_4 + y_1 Df_1 - \phi_{C2} [s\{(1-x_2)e_6 + x_2De_2\}] - (1-y_2)\phi_{R2}^{-1} e_8 - y_2 Df_2 = 0 \\ \frac{1}{s}(1-x_2)\phi_{C2}^{-1} f_6 + x_2 De_2 - \phi_{R2} [(1-y_2)f_8 + y_2 Df_2] - \frac{1}{s}(1-x_3)\phi_{C3}^{-1} f_{10} - x_3 De_3 = 0 \\ (1-y_2)\phi_{R2}^{-1} e_8 + y_2 Df_2 - \phi_{C3} [s\{(1-x_3)e_{10} + x_3De_3\}] - (1-y_3)\phi_{R3}^{-1} e_{12} - y_3 Df_3 = 0 \\ \frac{1}{s}(1-x_3)\phi_{C3}^{-1} f_{10} + x_3 De_3 - \phi_{R3} [(1-y_3)f_{12} + y_3 Df_3] - \frac{1}{s}(1-x_4)\phi_{C4}^{-1} f_{14} - x_4 De_4 = 0 \\ (1-y_3)\phi_{R3}^{-1} e_{12} + y_3 Df_3 - \phi_{C4} [s\{(1-x_4)e_{14} + x_4De_4\}] + Sf = 0 \end{array} \right. \quad (5.17)$$

A partir des variables binaires x_i ($i=1, 2, 3, 4$) et y_j ($j=1, 2, 3$) nous pouvons déterminer la structure finale du système de surveillance.

Pour la combinaison $[x_1 y_1 x_2 y_2 x_3 y_3 x_4] = [1 0 1 1 1 1 1]$ on obtient les résidus suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = MSf - \phi_{C1} [sDe_1] - \phi_{R1}^{-1} (De_1 - De_2) \\ r_2 = \phi_{R1}^{-1} (De_1 - De_2) - \phi_{C2} [sDe_2] - Df_2 \\ r_3 = De_2 - \phi_{R2} [Df_2] - De_3 \\ r_4 = Df_2 - \phi_{C3} [sDe_3] - Df_3 \\ r_5 = De_3 - \phi_{R3} [Df_3] - De_4 \\ r_6 = Df_3 - \phi_{C4} [sDe_4] + Sf \end{array} \right. \quad (5.18)$$

La matrice de signature des défaillances correspondante est donnée au tableau 5.1.

	ϕ_{C1}	ϕ_{R1}	ϕ_{C2}	ϕ_{R2}	ϕ_{C3}	ϕ_{R3}	ϕ_{C4}
r_1	1	1	0	0	0	0	0
r_2	0	1	1	0	0	0	0
r_3	0	0	0	1	0	0	0
r_4	0	0	0	0	1	0	0
r_5	0	0	0	0	0	1	0
r_6	0	0	0	0	0	0	1

Tableau 5.1 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison $[1 0 1 1 1 1 1]$

Les signatures des défauts sont différentes et ne sont pas nulles, donc les composants $C_1, R_1, C_2, R_2, C_3, R_3$ et C_4 sont surveillables.

Pour la combinaison $[x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ x_3 \ y_3 \ x_4] = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1]$ on obtient les résidus suivants :

$$\begin{cases} r_1 = MSf - \phi_{C1}[sDe_1] - \phi_{R1}^{-1}(De_1 - De_2) \\ r_2 = \phi_{R1}^{-1}(De_1 - De_2) - \phi_{C2}[sDe_2] - \phi_{R2}^{-1}(De_2 - De_3) \\ r_3 = \phi_{R2}^{-1}(De_2 - De_3) - \phi_{C3}[sDe_3] - Df_3 \\ r_4 = De_3 - \phi_{R3}[Df_3] - De_4 \\ r_5 = Df_3 - \phi_{C4}[sDe_4] + Sf \end{cases} \quad (5.19)$$

La matrice de signature des défaillances correspondante est donnée au tableau 5.2.

	ϕ_{C1}	ϕ_{R1}	ϕ_{C2}	ϕ_{R2}	ϕ_{C3}	ϕ_{R3}	ϕ_{C4}
r ₁	1	1	0	0	0	0	0
r ₂	0	1	1	1	0	0	0
r ₃	0	0	0	1	1	0	0
r ₄	0	0	0	0	0	1	0
r ₅	0	0	0	0	0	0	1

Tableau 5.2 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison [1 0 1 0 1 1 1]

Les signatures des défauts sont différentes et ne sont pas nulles, donc les composants C₁, R₁, C₂, R₂, C₃, R₃ et C₄ sont surveillables.

- Pour la combinaison $[x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ x_3 \ y_3 \ x_4] = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]$ on obtient les résidus suivants :

$$\begin{cases} r_1 = MSf - \phi_{C1}[sDe_1] - \phi_{R1}^{-1}(De_1 - De_2) \\ r_2 = \phi_{R1}^{-1}(De_1 - De_2) - \phi_{C2}[sDe_2] - \phi_{R2}^{-1}(De_2 - De_3) \\ r_3 = \phi_{R2}^{-1}(De_2 - De_3) - \phi_{C3}[sDe_3] - \phi_{R3}^{-1}(De_3 - De_4) \\ r_4 = \phi_{R3}^{-1}(De_3 - De_4) - \phi_{C4}[sDe_4] + Sf \end{cases} \quad (5.20)$$

La matrice de signature des défaillances correspondante est donnée au tableau 5.3.

	ϕ_{C1}	ϕ_{R1}	ϕ_{C2}	ϕ_{R2}	ϕ_{C3}	ϕ_{R3}	ϕ_{C4}
r ₁	1	1	0	0	0	0	0
r ₂	0	1	1	1	0	0	0
r ₃	0	0	0	1	1	1	0
r ₄	0	0	0	0	0	1	1

Tableau 5.3: Matrice de signature de défaillance de la combinaison [1 0 1 0 1 0 1]

Les résultats du placement de capteurs pour différentes combinaisons sont donnés au tableau 5.4.

Nombre de capteurs	Combinaisons	Composants surveillables	Composants détectables
6	[1011111]	C ₁ , R ₁ , C ₂ , R ₂ , C ₃ , R ₃ , C ₄	ϕ
6	[0111111]	C ₂ , R ₂ , C ₃ , R ₃ , C ₄	C ₁ , R ₁
5	[1010111]	C ₁ , R ₁ , C ₂ , R ₂ , C ₃ , R ₃ , C ₄	ϕ
5	[1001111]	C ₃ , R ₃ , C ₄	C ₁ , R ₁ , C ₂ , R ₂
5	[1011011]	C ₁ , R ₁ , C ₂ , R ₂ , C ₃ , R ₃ , C ₄	ϕ
5	[1100111]	C ₁ , R ₃ , C ₄	R ₁ , C ₂ , R ₂ , C ₃
5	[1011101]	C ₁ , R ₁ , C ₂ , R ₂ , C ₃ , R ₃ , C ₄	ϕ
4	[1010101]	C ₁ , R ₁ , C ₂ , R ₂ , C ₃ , R ₃ , C ₄	ϕ
4	[1010110]	C ₁ , R ₁ , C ₂ , R ₂ , C ₃	R ₃ , C ₄
4	[1011001]	C ₁ , R ₁ , C ₂	R ₂ , C ₃ , R ₃ , C ₄
4	[1001101]	C ₃ , R ₃ , C ₄	C ₁ , R ₁ , C ₂ , R ₂
4	[1100101]	C ₁ , R ₃ , C ₄	R ₁ , C ₂ , R ₂ , C ₃
4	[0110101]	C ₂ , R ₂ , C ₃ , R ₃ , C ₄	C ₁ , R ₁
4	[1000111]	R ₃ , C ₄	C ₁ , R ₁ , R ₂ , C ₃
3	[1010100]	C ₁ , R ₁	C ₂ , R ₂ , C ₃ , R ₃
3	[1011000]	C ₁ , R ₁ , C ₂	R ₂ , C ₃
3	[1000101]	R ₃ , C ₄	C ₁ , R ₁ , R ₂ , C ₃

Tableau 5.4 : Résultats du placement de capteurs

On remarque que la combinaison qui assure la surveillance des composants avec le minimum de capteurs est [1010101].

5.6 Simulation :

On a introduit une défaillance au niveau de chaque composant pour tester la sensibilité des résidus. Deux types de défaillance sont simulés. Le premier consiste en une fuite d'eau dans les réservoirs (C₁, C₂, C₃ et C₄) durant un intervalle de temps allant de 100 à 1000 s. Le deuxième type concerne un blocage partiel dans les vannes (R₁, R₂ et R₃) pendant l'intervalle de temps allant de 100 à 1000 s [34].

5.6.1 Réponse des résidus à une fuite dans le réservoir T1 :

La figure 5.2 montre la réponse des résidus à cette fuite. On constate que le résidu r_1

présente une déviation par rapport à son état initial entre les instants $t = 100s$ et $t = 1000s$ et les résidus r_2 , r_3 et r_4 retournent à leurs état initial après un court changement. Si on se réfère à la signature du composant C1 donnée au tableau 5.3 on constate que ce résultat est conforme à ce qui est prévu; c'est à dire qu'en cas de défaillance du composant C1 seul le résidu r_1 sera sensible à cette fuite.

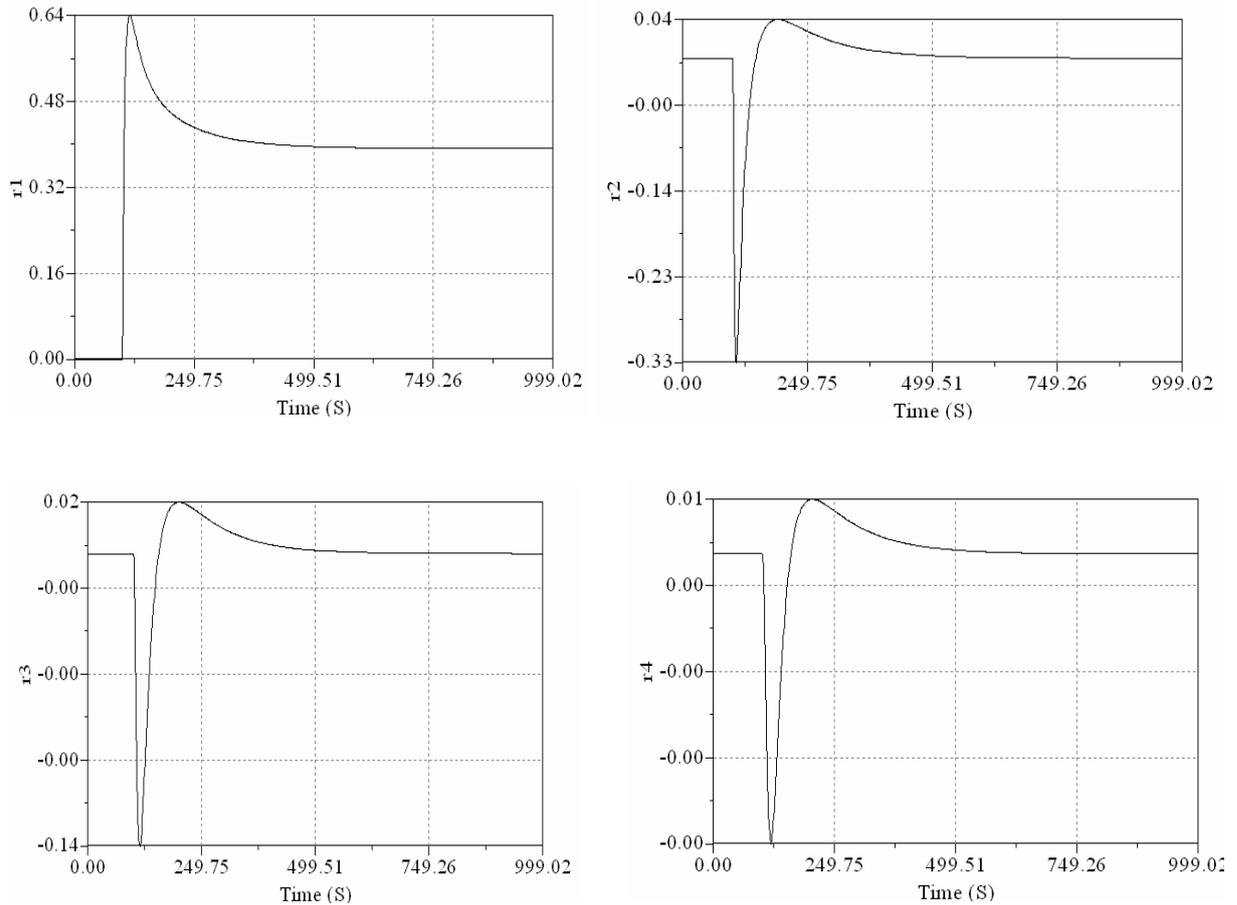


Figure 5.2 : Réponse des résidus à la fuite dans C1

5.6.2 Réponse des résidus à un blocage de la vanne V1 :

La figure 5.3 montre la réponse des résidus à ce blocage. On constate que les résidus r_1 et r_2 présentent une déviation par rapport à leur état initial entre les instants $t = 100s$ et $t = 1000s$ et les résidus r_3 et r_4 présentent une faible déviation. Si on se réfère à la signature du composant R1 donnée au tableau 5.3 on constate que ce résultat est conforme à ce qui est prévu; c'est à dire qu'en cas de défaillance du composant R1 les résidus r_1 et r_2 seront sensibles à ce blocage.

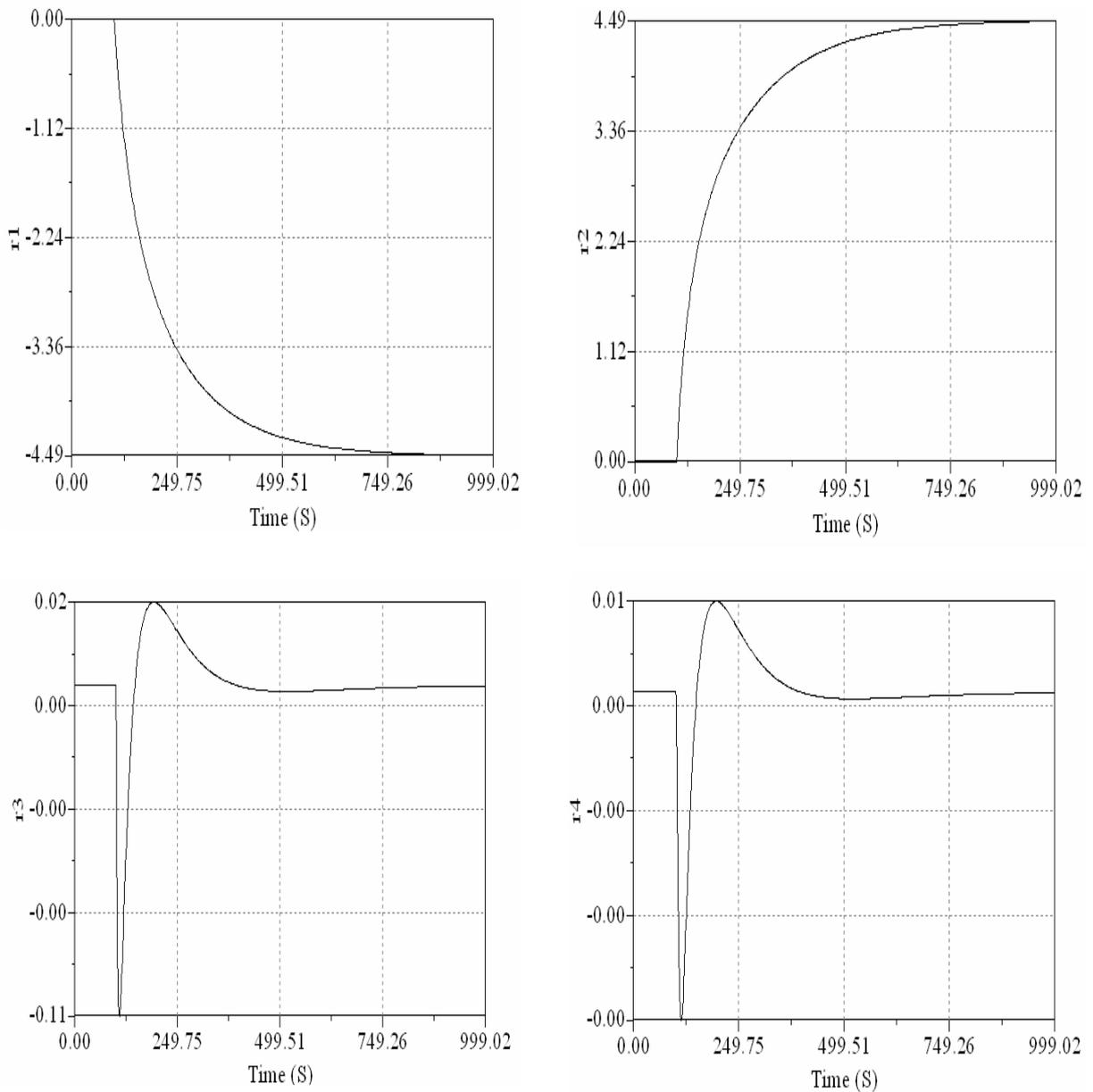


Figure 5.3 : Réponse des résidus au blocage de V1

5.6.3 Réponse des résidus à une fuite dans le réservoir T2 :

La figure 5.4 montre la réponse des résidus à cette fuite. On remarque que le résidu r_2 présente une déviation par rapport à son état initial durant l'intervalle de temps allant de 100s à 1000s et les résidus r_1 , r_3 et r_4 présentent une faible déviation avant qu'ils retournent à leurs état initial. Si on se réfère à la signature du composant C2 donnée au tableau 5.3 on constate que ce résultat est conforme à ce qui est prévu; c'est à dire qu'en cas de défaillance du composant C2 seul le résidu r_2 sera sensible à cette fuite.

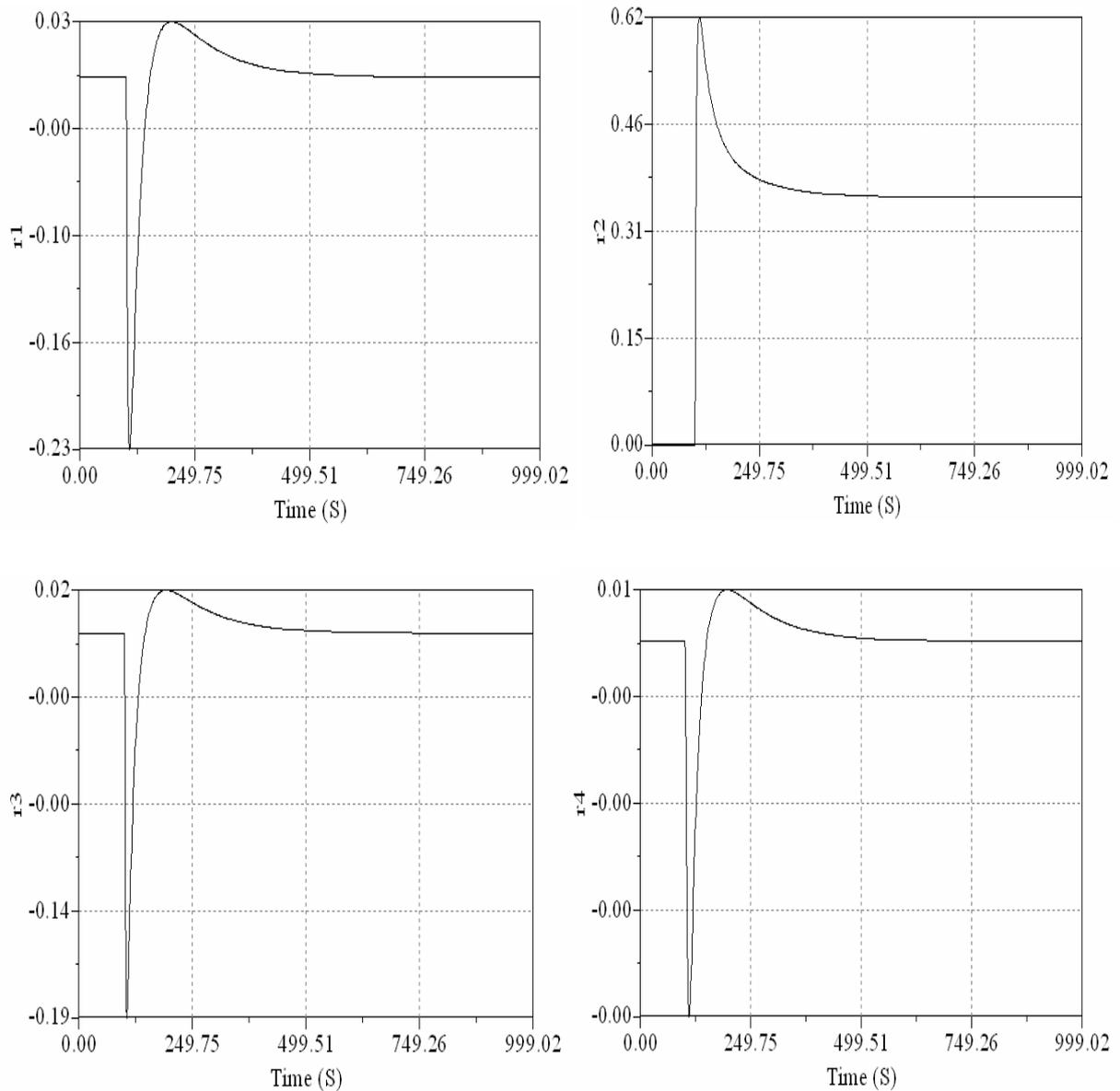


Figure 5.4 : Réponse des résidus à la fuite dans C2

5.6.4 Réponse des résidus à un blocage de la vanne V2 :

La figure 5.5 montre la réponse des résidus à ce blocage. On constate que les résidus r_2 et r_3 présentent une déviation par rapport à leurs état initial pendant l'intervalle de temps allant de $t = 100s$ à $t = 1000s$ et les résidus r_1 et r_4 présentent une faible déviation avant qu'il retournent à leur état initial. Si on se réfère à la signature du composant R2 donnée au tableau 5.3 on constate que ce résultat est conforme à ce qui est prévu; c'est à dire qu'en cas de défaillance du composant R2 les résidus r_2 et r_3 seront sensibles à ce blocage.

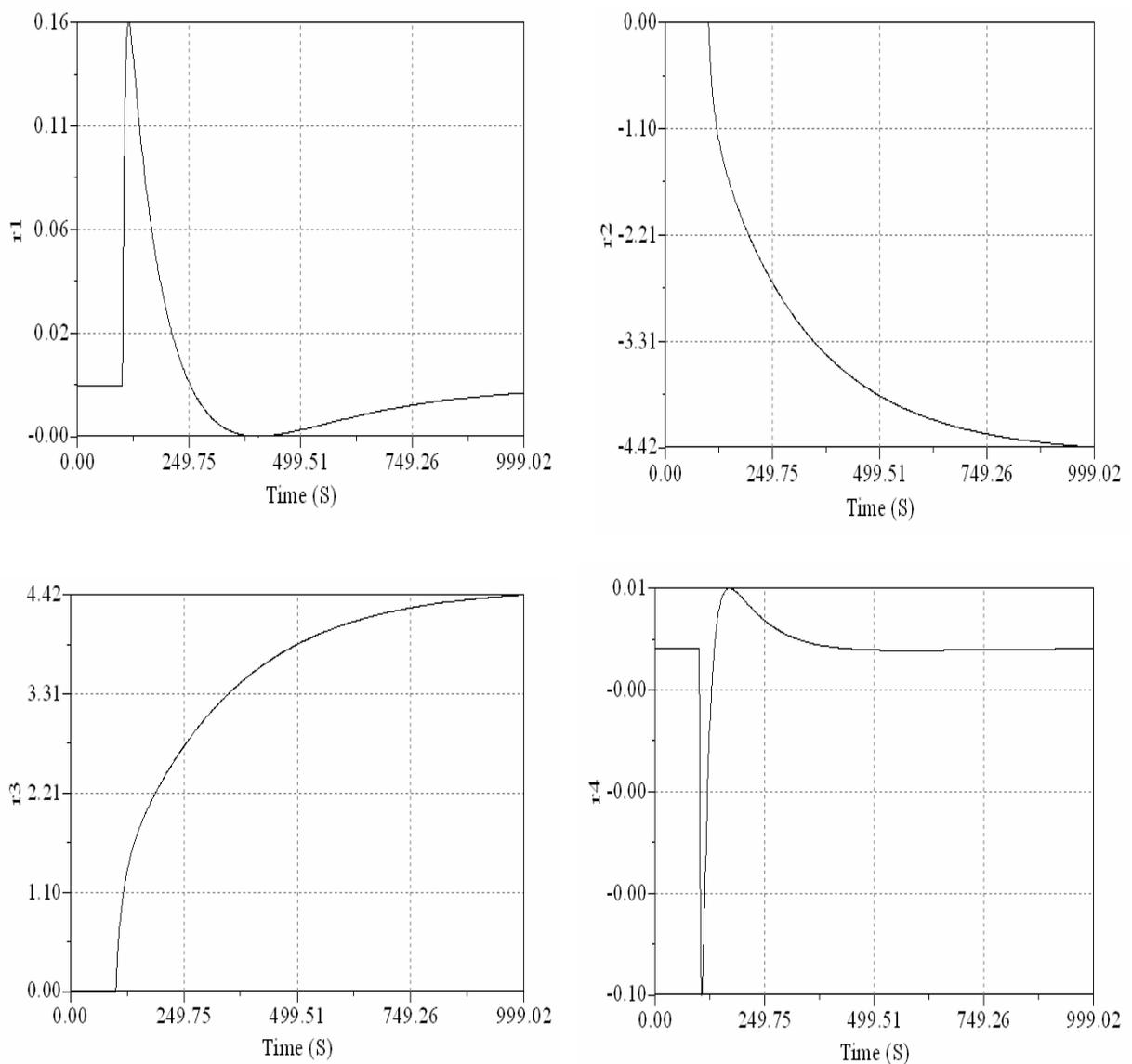


Figure 5.5 : Réponse des résidus au blocage de V2

5.6.5 Réponse des résidus à une fuite dans le réservoir T3 :

La figure 5.6 montre la réponse des résidus à cette fuite. On remarque que le résidu r_3 présente une déviation par rapport à son état initial pendant l'intervalle de temps allant de 100s à 1000s et les résidus r_1 , r_2 et r_4 présentent une faible déviation avant qu'ils retournent à leur état initial. Si on se réfère à la signature du composant C3 donnée au tableau 5.3 on constate que ce résultat est conforme à ce qui est prévu; c'est à dire qu'en cas de défaillance du composant C3 seul le résidu r_3 sera sensible à cette fuite.

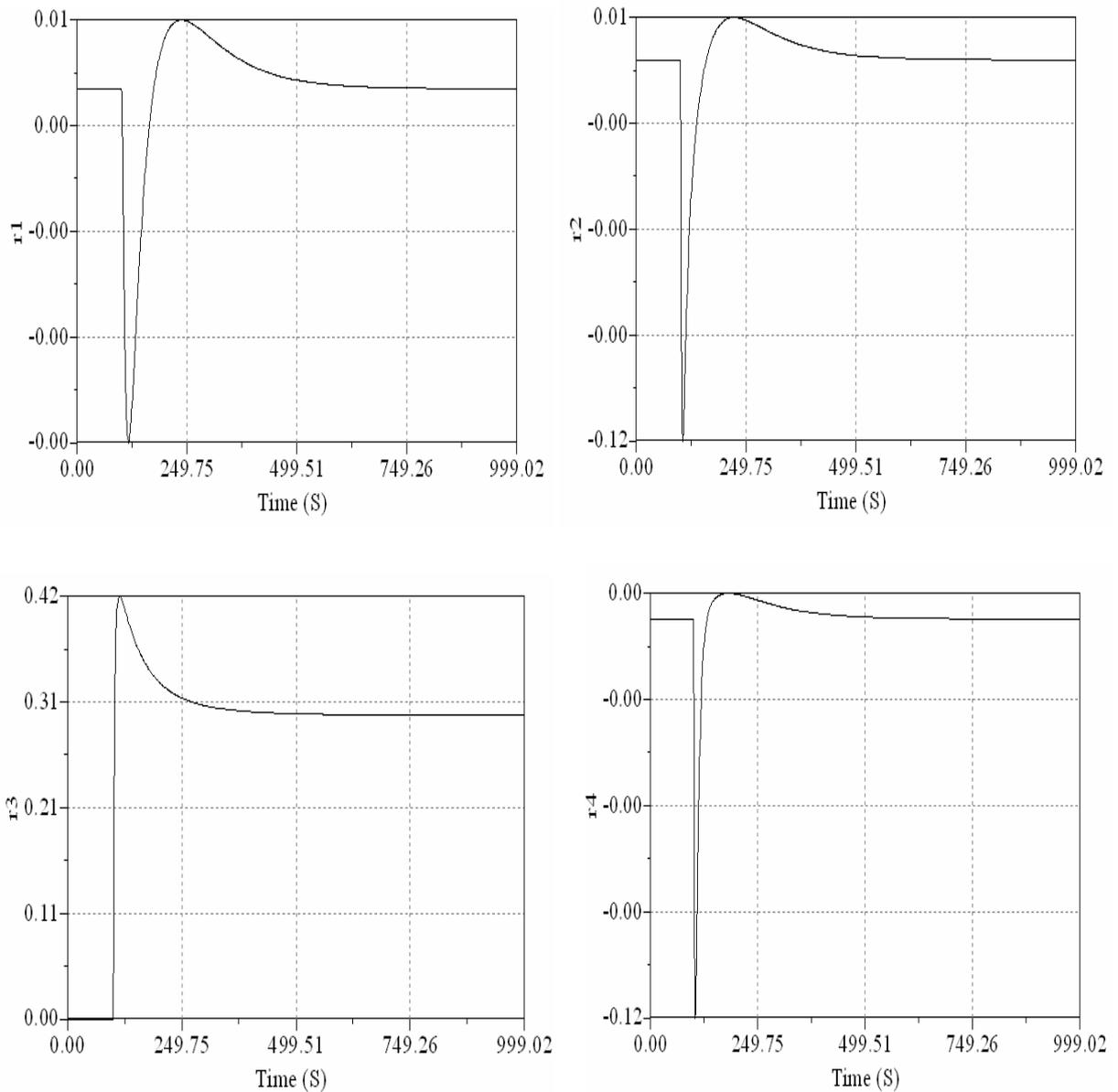


Figure 5.6 : Réponse des résidus à la fuite dans C3

5.6.6 Réponse des résidus à un blocage de la vanne V3 :

La figure 5.7 montre la réponse des résidus à ce blocage. On constate que les résidus r_3 et r_4 présentent une déviation par rapport à leur état initial pendant l'intervalle de temps allant de $t = 100s$ à $t = 1000s$ et les résidus r_1 et r_2 présentent une faible déviation. Si on se réfère à la signature du composant R3 donnée au tableau 5.3 on constate que ce résultat est conforme à ce qui est prévu; c'est à dire qu'en cas de défaillance du composant R3 seuls les résidus r_3 et r_4 seront sensibles à ce blocage.

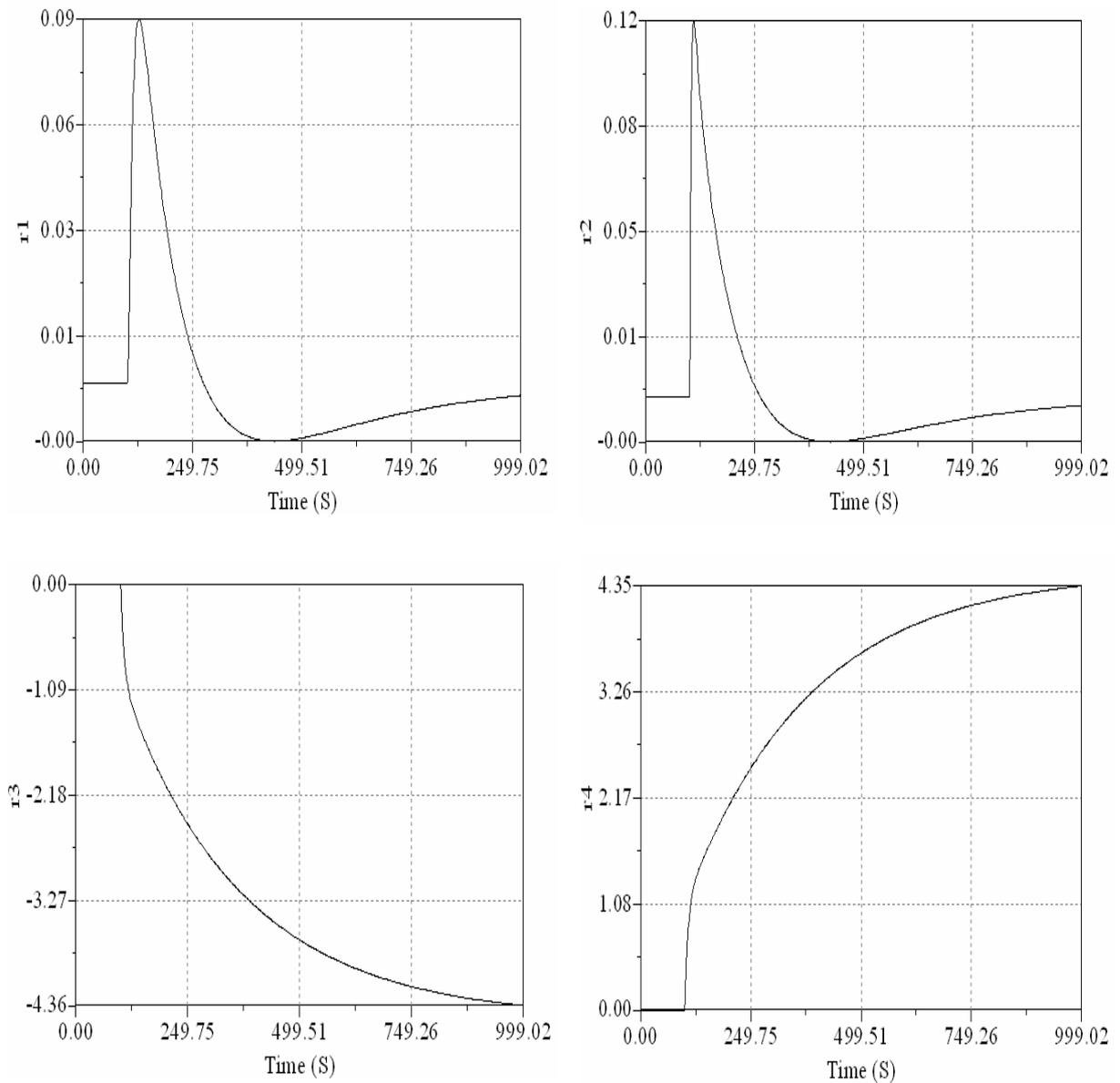


Figure 5.7 : Réponse des résidus au blocage de V3

5.6.7 Réponse des résidus à une fuite dans le réservoir T4 :

La figure 5.8 montre la réponse des résidus à cette fuite. On remarque que le résidu r_4 présente une déviation par rapport à son état initial pendant l'intervalle de temps allant de 100s à 1000s et les résidus r_1 , r_2 et r_3 présentent une faible déviation puis retournent à leur état initial. Si on se réfère à la signature du composant C4 donnée au tableau 5.3 on constate que ce résultat est conforme à ce qui est prévu; c'est à dire qu'en cas de défaillance du composant C4 seul le résidu r_4 sera sensible à cette fuite.

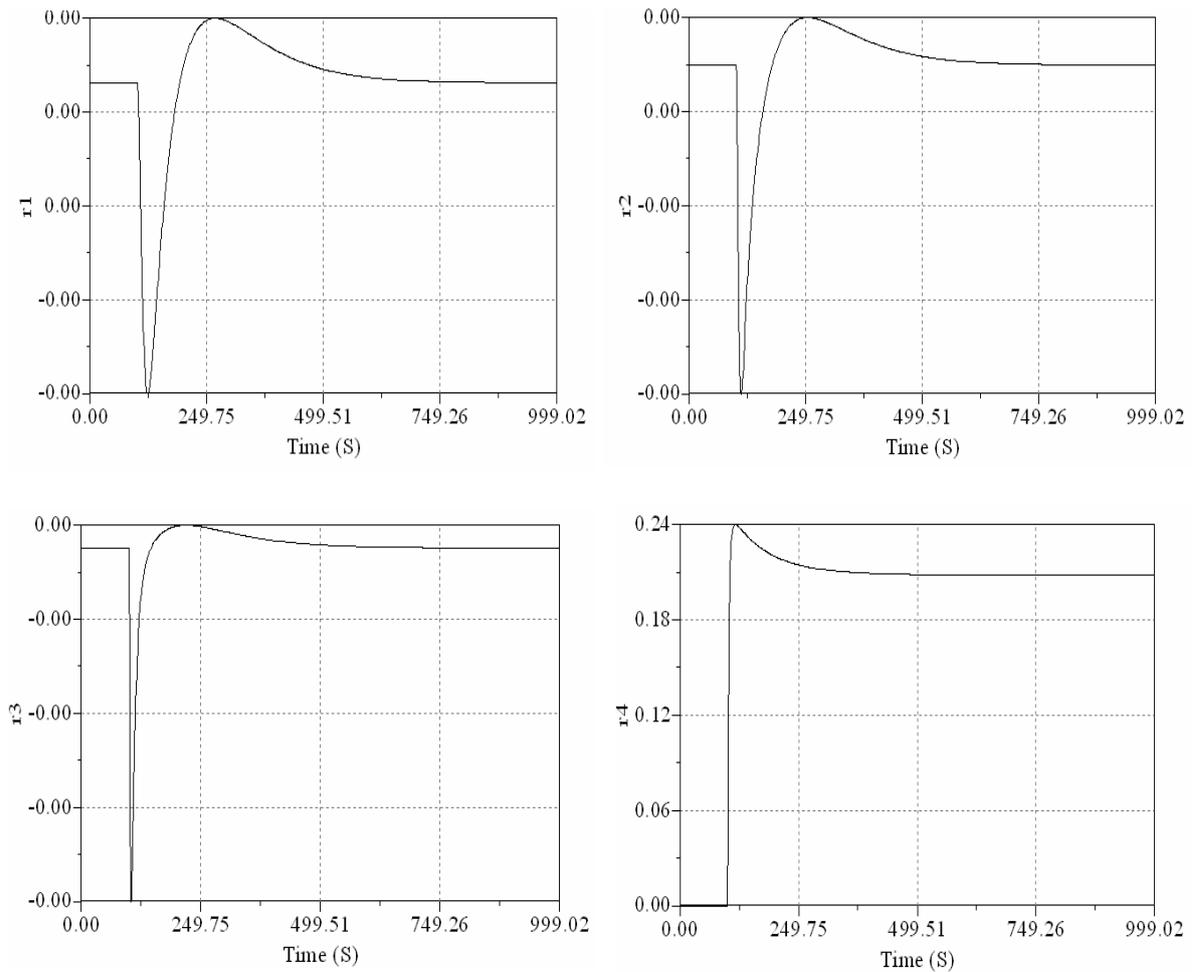


Figure 5.8 : Réponse des résidus à la fuite dans C4

5.7 Conclusion :

L'outil bond graph, par ses propriétés structurelles et causales d'une part et par son caractère multidisciplinaire pour la réalisation de modèles d'une manière générique d'autre part, est introduit en génie des procédés pour l'analyse et la surveillance des processus. Dans ce chapitre nous avons utilisé les propriétés structurelles et causales du formalisme bond graph pour la génération des relations de redondance analytique. Pour la tâche du placement de capteurs en vue de la surveillance des composants, l'algorithme utilisé s'est avéré efficace. C'est une technique qui assure la surveillance avec le minimum de capteurs.

Nous avons enfin introduit des défaillances pour tester la sensibilité des résidus. Les résultats de simulation montrent l'efficacité de l'approche utilisée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire représentent une contribution de l'outil bond graph pour la modélisation et la surveillance des systèmes présents en génie des procédés. Dans le présent travail, nous avons utilisé l'outil bond graph pour la modélisation et la surveillance du phénomène hydraulique de la station d'épuration des eaux usées. La stratégie de diagnostic et la forme sous laquelle la connaissance est disponible conditionnent les méthodes utilisées pour concevoir les algorithmes de surveillance. Selon le type de connaissance, le critère de classification des méthodes de surveillance distingue entre deux types d'approches (les méthodes avec ou sans modèle).

Notre contribution concerne les méthodes à base de modèle. Nous avons utilisé un seul outil pour la modélisation, la génération des indicateurs de défaillances (résidus), l'analyse de la surveillabilité et le placement de capteurs en vue de satisfaire le cahier des charges pour la surveillance. La génération des relations de redondance analytique par l'approche bond graph présente quelques caractéristiques intéressantes : elles sont simples à comprendre, puisqu'elles correspondent à des relations et des variables qui sont affichées par le modèle bond graph image du processus physique, ces relations sont déduites directement de la représentation graphique, elles peuvent être générées sous forme symbolique et donc adaptées à une implémentation informatique.

Les *résultats* obtenus ont fait l'objet de trois articles dont deux déjà communiqués respectivement à la conférence nationale de Skikda COME'07 et à la conférence internationale de Sétif CIP'07.

Comme *perspectives* et durant ce travail nous avons relevé quelques points que nous souhaitons développer plus tard: Dans ce travail, nous avons modélisé le phénomène hydraulique de la station épuration. Nous projetons alors étendre notre travail à la modélisation du phénomène chimique et utiliser ce modèle à la surveillance de la qualité des eaux épurées. Les RRAs générées dans le présent travail sont déterministes ne tenant pas compte des incertitudes des paramètres. L'outil bond graph permet de rajouter graphiquement ces incertitudes et de générer ainsi des RRAs robustes par rapport aux incertitudes paramétriques. Ainsi, dans la procédure de décision nous pouvons déterminer des seuils de déclenchement adaptatifs.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] G. Abdelkader : Epuration biologique des eaux usées Tome 2. Office des publications universitaires, 1984.
- [2] A. Achir : Contribution à l'étude de la propriété de platitude sur des modèles bond graphs non linéaires. Thèse de Doctorat université de Lille, 2005.
- [3] D. Arzelier : Représentation et analyse des systèmes linéaires. LAAS-CNRS, <http://www.laas.fr/~arzelier>.
- [4] H. Aussel et al : Le traitement des eaux usées. Institut national de recherche et de sécurité (<http://www.inrs.fr>), 2004.
- [5] P. Borne et al : Modélisation et identification des processus Tome 2. Technip, Paris, 1992.
- [6] F. Busson et al : Sensor failures detection in steam condensers. 3rd IFAC Workshop, on-line fault detection and supervision in the chemical process industries, vol 2, 4-5 june 1998, IFP, Solaize (Lyon), France.
- [7] F. Busson : Les bond graphs multiénergies pour la modélisation et la surveillance en génie des procédés. Thèse de Doctorat université de Lille, 2002.
- [8] E. Ckeneelder : Gestion des eaux usées urbain. Hermes, Paris, 1995.
- [9] G. Dauphin-Tanguy : Les bond graphs en mécanique. Les Techniques de l'Ingénieur n° S7222.
- [10] B. Decotte : Identifiabilité structurelle de modèles bond graphs. Thèse de Doctorat université de Lille, 2002.
- [11] I. Dif et al : Détection et localisation des défauts par l'approche bond graph. Proceedings du premier congrès international sur le génie électrique, CIGE'04, 206-210, Sétif, Algérie, 10-12 Octobre, 2004.
- [12] W. Elostá : Surveillabilité structurelle et platitude pour le Diagnostic des modèles bond graphs couplés. Thèse de Doctorat université de Lille, 2005.
- [13] G. Gandanegara : Méthodologie de conception systémique en Génie Électrique à l'aide de l'outil Bond Graph. Application à une chaîne de traction ferroviaire. Thèse de Doctorat université de Toulouse, 2003.
- [14] C. Ghiaus : Fault diagnosis of air conditioning systems based on qualitative bond graph. ELSEVIER Energy and Buildings 30, (1999) 221–232.
- [15] H. Hernández : Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable. Thèse de Doctorat université de Toulouse, 2006.

- [16] P. Hubert : Une introduction à la gestion de l'eau. Ellipses, Paris, 1984.
- [17] M. Khemliche et al : Sensor placement for component diagnostability using bond graph. *ELSEVIER Sensors and Actuators A* 132, (2006) 547–556.
- [18] L. Lardon : Représentation et gestion des incertitudes pour le diagnostic par la théorie de Dempster-Shafer : Application aux procédés biologiques. Thèse de Doctorat université de Montpellier, 2004.
- [19] C. Laurent : Epuration des eaux. Dinod, 1998.
- [20] P. Lautier : Modélisation des convertisseurs à découpage pour la conception et la commande : Application à l'onduleur. Thèse de Doctorat université de Lyon 1, 1998.
- [21] V. Lazarova et al : La réutilisation des eaux usées : Un enjeu de l'an 2000. CIRSEE - Lyonnaise des Eaux, 1998.
- [22] C. Lurette : Développement d'une technique auto-adaptative pour la classification dynamique de données évolutives : Application à la supervision d'une presse hydraulique. Thèse de Doctorat université de Lille, 2003.
- [23] K. Medjaher : Contribution de l'outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision des processus industriels. Thèse de Doctorat université de Lille, 2005.
- [24] Ministère de l'Agriculture et de la Pêche : Dysfonctionnements biologiques des stations d'épuration : origines et solutions. Document technique FNDAE n° 33, 2005.
- [25] M.G. Miquel : La qualité de l'eau et de l'assainissement en France. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2003.
- [26] A. Molina : Méthodologie pour le placement des capteurs à base de méthodes de classification en vue du diagnostic. Thèse de Doctorat université de Toulouse, 2005.
- [27] W. Nuninger : Stratégie de diagnostic robuste à l'aide de la redondance analytique. Thèse de Doctorat université de Lorraine, 1997.
- [28] B. Ould Bouamama et al : Model builder using functional and bond graph tools for FDI design. *ELSEVIER Control Engineering Practice* 13, (2005) 875–891.
- [29] J. Pronost et al : Stations d'épuration : dispositions constructives pour améliorer leur fonctionnement et faciliter leur exploitation. Office International de l'Eau, 2002.
- [30] J. Richalet : Modélisation et identification des processus. *Les Techniques de l'Ingénieur* n° R7140.
- [31] M. Rivera : Modélisation des systèmes dynamiques à topologie variable. Thèse de Doctorat université de Lyon 1, 2005.
- [32] R. Saisset : Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Thèse de Doctorat université de Toulouse, 2004.

- [33] A.K. Samantaray et al: Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation. ELSEVIER Simulation Modelling Practice and Theory 14, (2006) 237–262.
- [34] K. Sia and A. Naamane: Bond graph: a suitable tool for component faults diagnosis. <http://www.scs.org/archives/authors>.
- [35] S. Taouaf : Diagnostic logique des systèmes complexes dynamiques dans un contexte multi agent. Thèse de Doctorat université de Grenoble 1, 2005.
- [36] J. Thoma et B. Ould Bouamama : Modelling and simulation in thermal and chemical engineering. Bond graph approach. Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- [37] R. Toscano : Commande et diagnostic des systèmes dynamiques. Ellipses, Paris, 2005.
- [38] M. Vergé et D. Jaume : Modélisation structurée des systèmes avec les bond graphs. Technip, Paris, 2004.
- [39] M. Vergé : Modélisation pour l'ingénieur : Approche par bond graph. 6^{ème} congrès européen de science des systèmes 19-22 septembre 2005.
- [40] G. Zwingelstein : Diagnostic des défaillances. Hermes, Paris, 1995.

Annexes

Annexe A

Formalisme Bond Graph

Nous avons brièvement présenté quelques notions importantes du formalisme bond graph dans le Chapitre 3. Les informations plus détaillées se trouvent dans cette annexe.

A.1 Éléments passifs :

Pour les éléments I et C , l'énergie stockée est définie comme :

$$E(t) = \int_0^t e(\tau) f(\tau) d\tau + E(0) \quad (\text{A.1})$$

Pour un élément I monoport, nous avons la loi caractéristique suivante :

$$f_I = \psi_I \left(\int e_I dt \right) = \psi_I(p) \quad (\text{A.2})$$

L'équation (A.1) devient alors :

$$E_I(p) = \int_{p_0}^{p} f_I(p) dp + E_I(p_0) \quad (\text{A.3})$$

La loi caractéristique d'un élément C monoport est la suivante :

$$e_C = \psi_C \left(\int f_C dt \right) = \psi_C(q) \quad (\text{A.4})$$

En utilisant l'équation (A.4), nous pouvons réécrire l'équation (A.1) de la manière suivante :

$$E_C(q) = \int_{q_0}^{q} e_C(q) dq + E_C(q_0) \quad (\text{A.5})$$

A.2 Éléments multiports :

Dans certains cas, la modélisation par les éléments monoports ne peut pas être utilisée, cause de couplages énergétiques au sein du phénomène étudié. Des éléments passifs multiports, ayant plusieurs liens de puissance entrants, sont nécessaires. Les lois qui les caractérisent sont matricielles.

Considérons l'exemple d'un ensemble de bobines liées par des inductances mutuelles non négligeables (voir Figure A.1).

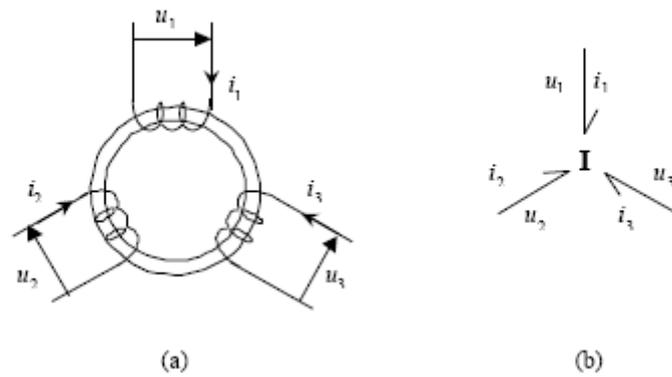


Figure A.1 : Exemple d'un élément multiport : (a) schéma physique et (b) bond graph associé

L'équation caractéristique de cet élément multiport est :

$$\mathbf{F} = \mathbf{L} \mathbf{I} \quad (\text{A.6})$$

Avec

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix}, \mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 \end{bmatrix}$$

Le terme ϕ_i représente le flux magnétique de la bobine i , L_i correspond à l'inductance propre de la bobine i et M_{ij} associée à l'inductance mutuelle entre les bobines i et j .

L'énergie stockée dans cet élément est formulée de la manière suivante :

$$E_l = \frac{1}{2} \mathbf{F}^T \mathbf{L}^{-1} \mathbf{F} \quad (\text{A.7})$$

A.3 Construction d'un modèle bond graph :

Nous avons décrit la procédure de construction d'un modèle bond graph à partir d'un système hydraulique dans le chapitre 2. Nous présentons ici les procédures en électrique et mécanique.

A.3.1 Modélisation d'un système électrique :

La procédure est la suivante :

1. A partir d'un schéma électrique, fixer le sens du courant (transfert de puissance) dans le circuit.

2. Déterminer les noeuds qui ont un potentiel différent et introduire une jonction 0 pour chacun d'eux.
3. Mettre une jonction 1 entre deux jonctions 0 et y attacher les éléments qui se situent entre les noeuds correspondants.
4. Mettre le sens de la demi-flèche en suivant le sens du courant (pour un élément passif, l'orientation de la demi-flèche est fixée entrante tandis qu'elle est sortante pour un élément actif).
5. Pour un circuit présentant un potentiel de terre explicite, supprimer toutes les jonctions 0 représentant ce potentiel. Dans un autre cas, choisir un noeud de référence (ou plusieurs), puis supprimer les jonctions correspondantes.
6. Simplifier le bond graph si possible.

A.3.2 Modélisation d'un système mécanique de translation :

La procédure est la suivante :

1. Fixer un axe de référence pour les vitesses et déterminer le sens de transfert de la puissance.
2. Pour chaque vitesse différente, introduire une jonction 1 et y connecter les éléments correspondants.
3. Déterminer les relations entre vitesses, et les représenter à l'aide des jonctions 0 placées entre les jonctions 1 correspondant aux vitesses impliquées dans les relations.
4. Orienter les demi-fleches en considérant le sens de transfert de puissance.
5. Supprimer les jonctions 1 associées aux noeuds de vitesse nulle.
6. Simplifier le bond graph si possible (voir Figure A.2).

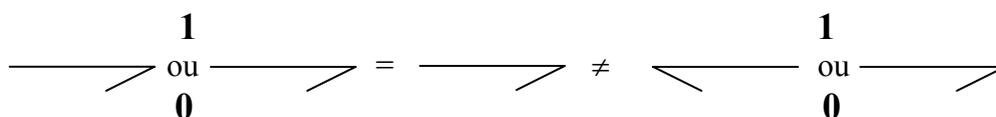


Figure A.2 : Exemple de simplification des jonctions

A.4 Causalité : chemins causaux, boucles causales et chaînes d'action :

En parcourant la causalité dans un bond graph, nous pouvons déterminer les chemins

causaux, les boucles causales et les chaînes d'actions. En fait, ces notions illustrent les couplages entre les éléments dans le modèle. Nous les présentons dans les sections suivantes.

A.4.1 Chemin causal :

Définition A.1 :

Un chemin causal direct est un chemin allant d'un élément vers un autre en ne traversant que des éléments de jonction.

Un chemin causal direct est dit simple s'il est parcouru en suivant toujours la même variable (voir Figure A.3). Il existe donc deux chemins causaux simples passant par les mêmes liens mais en suivant différentes variables, soit l'effort, soit le flux.

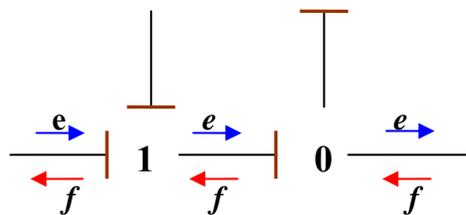


Figure A.3 : Chemin causal simple

Un chemin causal direct est dit mixte si son parcours comporte un élément GY qui impose le changement de variable suivie.

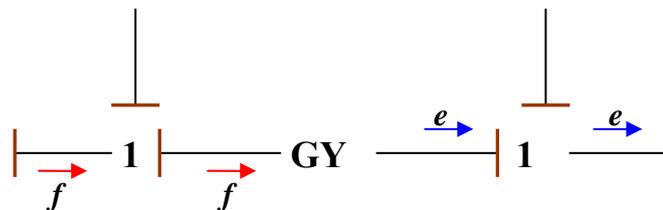


Figure A.4 : Chemin causal mixte

Un chemin causal est indirect lorsqu'il passe par des éléments passifs (R, I, C).

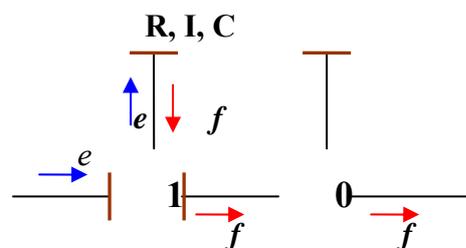


Figure A.5 : Chemin causal indirect

Le gain d'un chemin causal se calcule à l'aide des équations suivantes.

- Pour un chemin causal simple ou mixte :

$$T = (-1)^{n_0+n_1} \prod_i (m_i)^{k_i} \prod_j (r_j)^{l_j} \quad (\text{A.8})$$

avec

n_0 et n_1 : nombre de changements d'orientation aux jonctions 0 (respectivement 1) quand on suit la variable flux (respectivement effort).

m_i : module de l'élément TF_i traversé avec $k_i = +1$ ou -1 selon la causalité appliquée.

r_j : module de l'élément GY_j traversé avec $l_j = +1$ ou -1 selon la causalité appliquée.

- Pour un chemin causal indirect, le gain des éléments traversés doit être pris en compte.

$$T = (-1)^{n_0+n_1} \prod_i (m_i)^{k_i} \prod_j (r_j)^{l_j} \prod_e g_e \quad (\text{A.9})$$

Où

g_e : gain de l'élément passif e (transmittance entrée-sortie) traversé.

En effet, le gain d'un élément passif est déterminé par sa causalité (voir Tableau 3.4 du Chapitre 3). Dans le cas linéaire, la transmittance est définie au Tableau A.1, où s représente la variable de Laplace.

Elément	Type de causalité	Gain	Type de causalité	Gain
R	résistance	$G_R(s) = R$	conductance	$G_R(s) = \frac{1}{R}$
I	intégrale	$G_I(s) = \frac{1}{I s}$	dérivée	$G_I(s) = I s$
C	intégrale	$G_C(s) = \frac{1}{C s}$	dérivée	$G_C(s) = C s$

Tableau A.1 : Transmittance des éléments passifs linéaires

A.4.2 Boucle causale :

Définition A.2 :

Une boucle causale est un chemin causal fermé partant de la sortie d'un élément R , I ou C , et revenant à l'entrée de cet élément sans parcourir le même lien en suivant la même variable plus d'une fois.

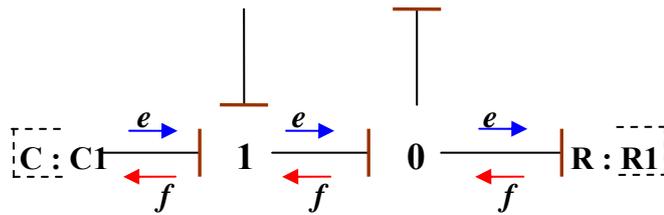


Figure A.6 : Boucle causale entre R_1 et C_1

La formule générale du gain d'une boucle causale est définie par l'équation (A.10).

$$B = (-1)^{n_0+n_1} \prod_i (m_i^2)^{k_i} \prod_j (r_j^2)^{l_j} \prod_e g_e \quad (\text{A.10})$$

Le terme g_e correspond au gain de tous les éléments passifs qui composent la boucle.

A.4.3 Chaîne d'action :

Définition A.3 :

Une chaîne d'action est un chemin causal entre une source et une sortie (ou détecteur).

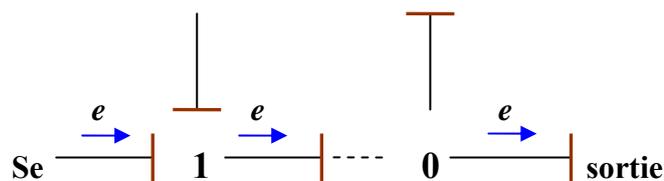


Figure A.7 : Chaîne d'action

A.5 Obtention d'un modèle mathématique :

En utilisant les notions de chemins causaux, boucles causales et chaînes d'action, nous pouvons déduire l'équation d'état et la fonction de transfert du modèle d'une manière systématique.

A.5.1 Equation d'état (cas où tous les éléments I et C sont en causalité intégrale) :

Pour déduire l'équation d'état, nous calculons les gains statiques (sans le terme s) des chemins causaux, boucles causales et chaînes d'action. Considérons le modèle général suivant :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX + DU \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Le vecteur X contient les variables d'énergie des éléments dynamiques (I et C) en causalité intégrale.

Les éléments des matrices **A**, **B**, **C** et **D** sont déterminés comme suit :

- L'élément a_{ii} (diagonale de **A**) est la somme des gains statiques de boucles causales entre l'élément dynamique associé à X_i et les éléments résistifs.
- L'élément a_{ij} ($i \neq j$) est la somme des gains de chemins causaux partant de l'élément dynamique associé à X_j vers l'élément dynamique associé à X_i , multipliée par le gain de l'élément associé à X_j .
- L'élément b_{ik} est la somme des gains de chaînes d'actions partant de la source k vers l'élément dynamique associé à X_i .
- L'élément c_{ji} est la somme des gains de chemins causaux partant de l'élément dynamique associé à X_i vers la sortie j , multipliée par le gain de l'élément dynamique associé à X_i .
- L'élément d_{jk} est la somme des gains de chaînes d'actions partant de la source k vers la sortie j .

A.5.2 Fonction de transfert :

La fonction de transfert d'une sortie y par rapport à une entrée e peut être déterminée en appliquant la **règle de Masson** au modèle bond graph. Cette fonction s'écrit :

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{\sum_i T_i(s) D_i(s)}{D(s)} \quad (\text{A.12})$$

avec

$$D(s) = 1 - \sum_i B_i + \sum_{i,j} B_i B_j - \sum_{i,j,k} B_i B_j B_k + \dots \quad (\text{A.13})$$

où

$\sum_i B_i$ somme des gains de toutes les boucles causales et des mailles dans le modèle bond graph.

$\sum_{i,j} B_i B_j$ somme des produits 2 à 2 des gains de boucles causales disjointes (voir Définition A.4).

$T_i(s)$ gain de la $i^{\text{ème}}$ chaîne d'action.

$D_i(s)$ se calcule comme $D(s)$ en enlevant la $i^{\text{ème}}$ chaîne d'action du modèle.

Définition A.4 :

Deux boucles causales sont disjointes s'il n'y a aucun lien ni jonction en commun parcouru en suivant la même variable. Cette définition peut aussi être appliquée à 2 chemins causaux disjoints.

A.6 Analyses structurelles :**Notations :**

Nous notons BGI (respectivement BGD) le modèle bond graph obtenu lorsque la causalité intégrale (respectivement dérivée) est préférentiellement appliquée aux éléments dynamiques.

Rappelons que ces derniers sont les éléments I et C .

En utilisant ces notations, nous pouvons déduire directement de l'architecture du bond graph les notions suivantes :

A.6.1 Ordre d'un modèle :

L'ordre d'un modèle bond graph (n) est le nombre d'éléments dynamiques en causalité intégrale dans le BGI.

A.6.2 Rang de la matrice d'état :

Le rang BG de la matrice d'état est défini comme :

$$\text{Rang}_{BG}(\mathbf{A}) = n - q \quad (\text{A.14})$$

où

n l'ordre du modèle.

q le nombre d'éléments dynamiques qui restent en causalité intégrale dans le modèle BGD.

Remarque :

Ce rang BG est le vrai "rang de \mathbf{A} ", à cause des propriétés causales du modèle bond graph.

A.6.3 Observabilité :

Un modèle est structurellement observable si et seulement si :

1. Tous les éléments dynamiques en causalité intégrale sont causalement liés à un détecteur dans le modèle BGI.
2. Tous les éléments dynamiques admettent une causalité dérivée dans le modèle BGD. S'il existe des éléments dynamiques restant en causalité intégrale, la dualisation des détecteurs D_e et D_f doit permettre de les mettre en causalité dérivée.

La dualisation consiste à changer la variable d'un élément ou d'une jonction par sa variable duale. Par exemple, la dualisation d'un détecteur d'effort donne un détecteur de flux, la dualisation d'une jonction 0 donne une jonction 1.

Pour rendre un modèle observable structurellement :

- Il suffit d'un détecteur placé n'importe où, si tous les éléments dynamiques admettent une causalité dérivée dans le modèle BGD.
- Il faut au moins k détecteurs bien placés, si k éléments dynamiques restent en causalité intégrale dans le modèle BGD. Le bon positionnement est déterminé en fonction du placement des détecteurs dont la dualisation permet de changer la causalité de ces éléments dynamiques.

A.6.4 Commandabilité :

Un modèle est structurellement commandable en état si et seulement si :

1. Tous les éléments dynamiques en causalité intégrale sont causalement liés à une source de commande MSe ou MSf dans le modèle BGI.
2. Tous les éléments dynamiques admettent une causalité dérivée dans le modèle BGD. S'il existe des éléments dynamiques restant en causalité intégrale, la dualisation des sources de commande MSe et MSf doit permettre de les mettre en causalité dérivée.

Pour rendre un modèle commandable structurellement :

- Il suffit d'une source de commande placée n'importe où, si tous les éléments dynamiques admettent une causalité dérivée dans le modèle BGD.
- Il faut au moins k sources de commande bien placées, si k éléments dynamiques restent en causalité intégrale dans le modèle BGD. Le bon positionnement est déterminé en fonction du placement des sources dont la dualisation permet de changer la causalité de ces éléments dynamiques.

A.6.5 Exemple :

Considérons un système électrique du 3^{ème} ordre présenté par la figure A.8.

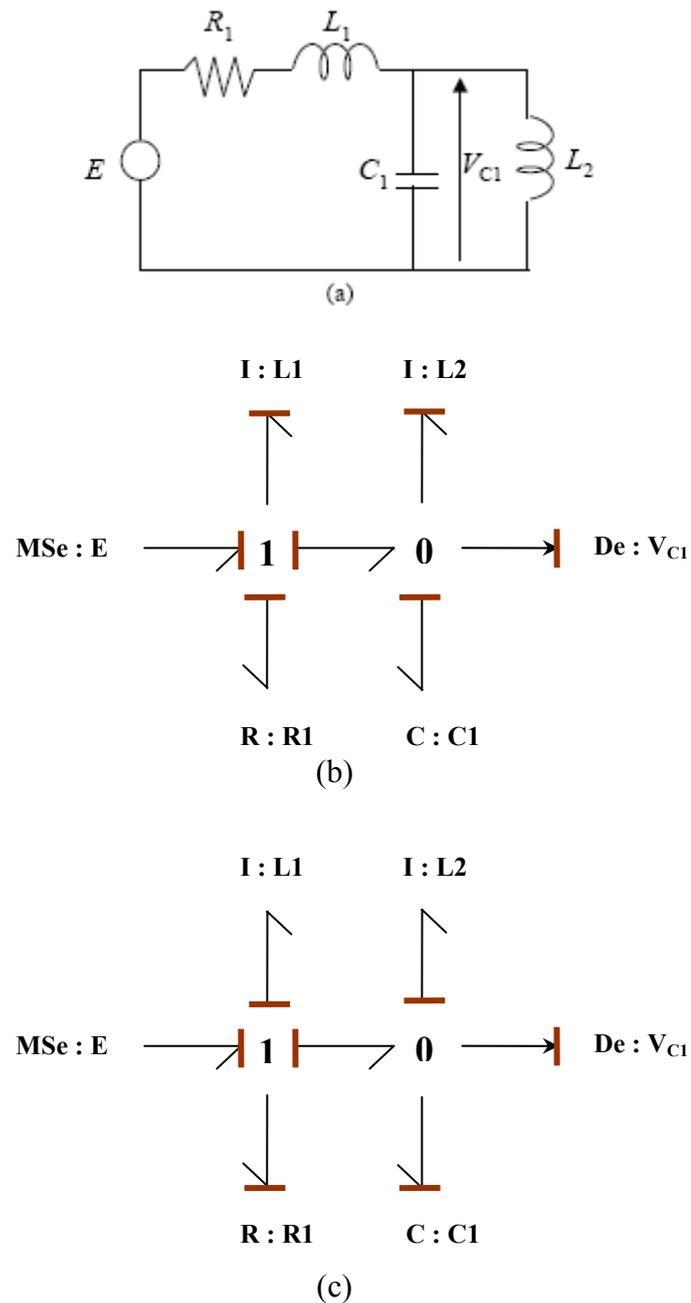


Figure A.8 : Exemple : (a) circuit électrique, (b) bond graph associé (BGI), (c) BGD

A partir du modèle bond graph, nous déduisons les propriétés suivantes :

Ordre du modèle 3 (BGI).

Rang de la matrice d'état 3 (BGD).

Observabilité Il suffit d'un seul détecteur. Assuré par $De : V_{C1}$.

Commandabilité Il suffit d'une source de commande. Assurée par $MSe : E$.

Par ailleurs, nous pouvons déduire directement le schéma bloc global à partir du modèle bond graph causal. Il existe deux lignes d'information : une pour les variables de flux et une autre pour les variables d'effort. En effet, nous illustrons les lois caractéristiques des jonctions avec des noeuds (pour représenter les variables communes), des sommateurs (pour représenter la relation entre les variables dans le cas d'un jonction 0 ou 1) ou des gains (dans le cas d'un TF ou GY). Les lois caractéristiques des éléments passifs R , I , C sont ensuite mises pour relier les variables. Le schéma bloc de notre exemple est présenté par la figure A.9.

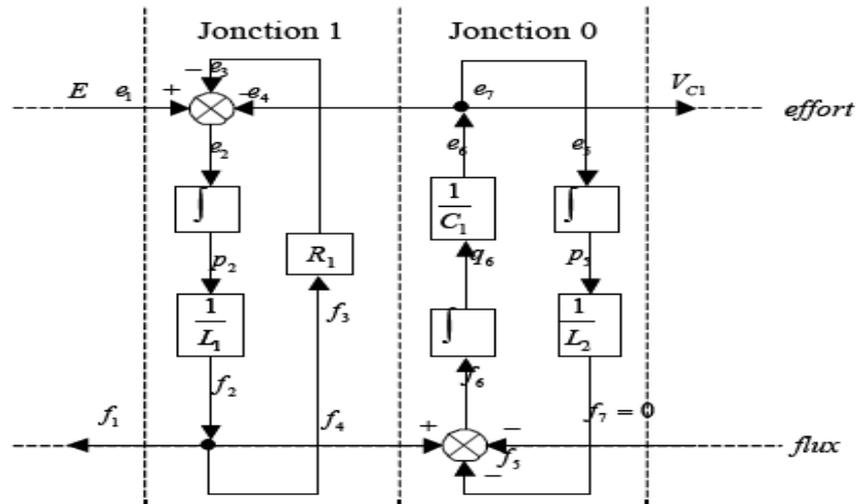


Figure A.9 : Schéma bloc déduit à partir du modèle bond graph

Pour obtenir la sortie V_{C1} , il suffit de redessiner ce schéma en enlevant les variables nulles (f_7) ou non intéressantes (f_1). Nous obtenons le schéma bloc illustré par Figure A.10.

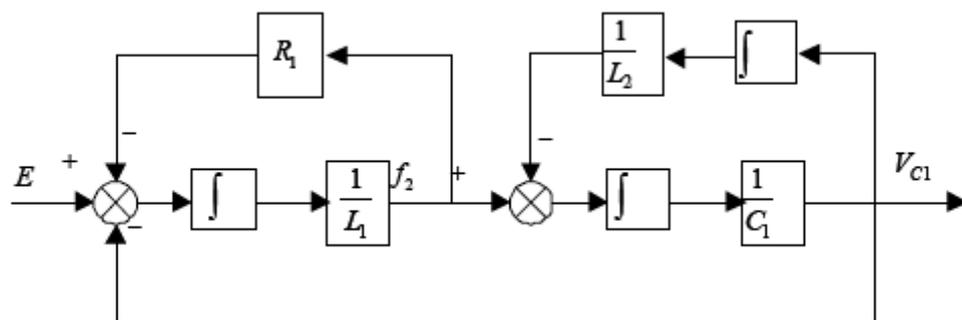


Figure A.10 : Schéma bloc pour obtenir V_{C1}

Annexe B

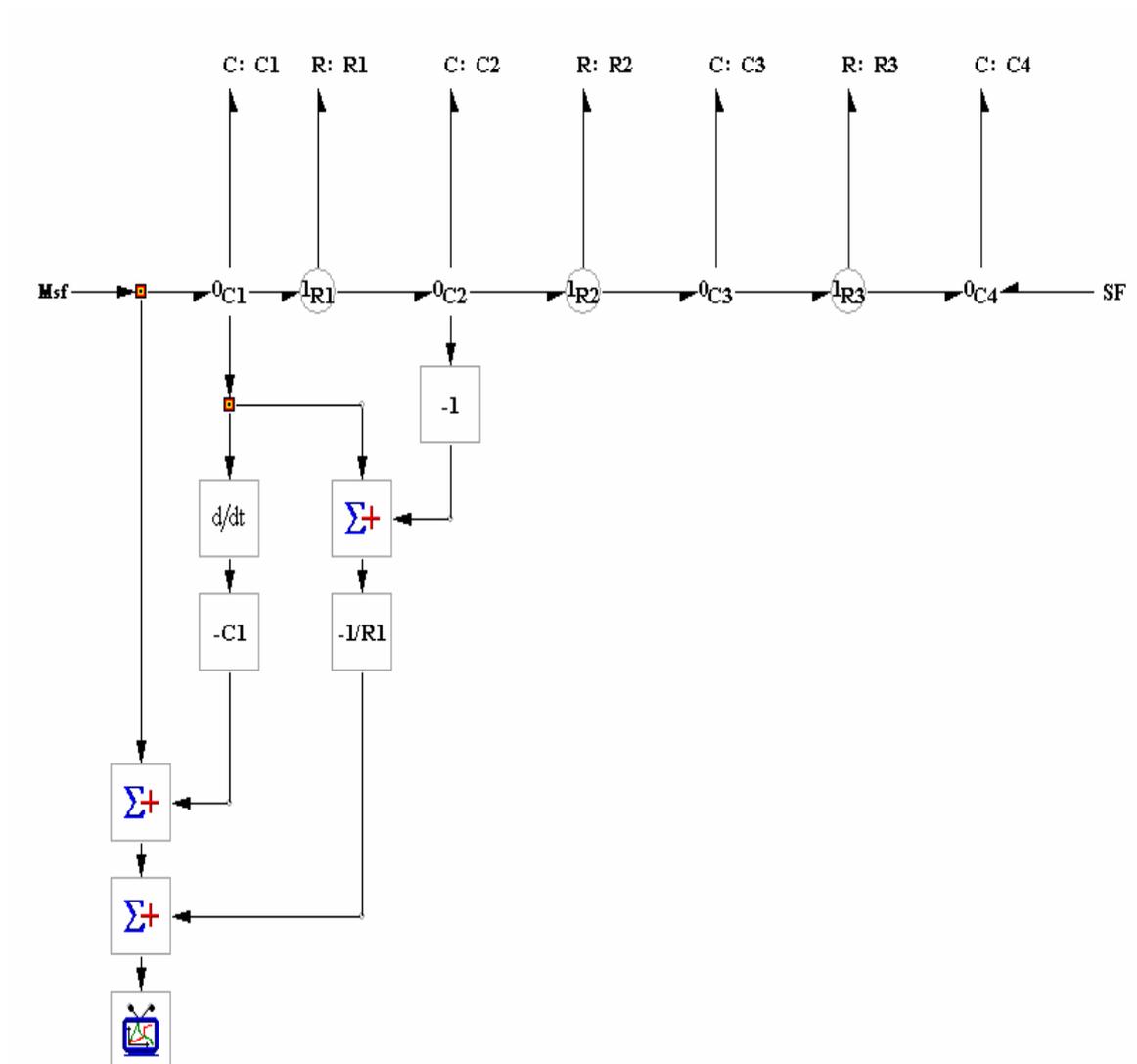
Les valeurs des paramètres utilisées dans la simulation

Paramètre	Description	Valeur	Unité
A1	Section du réservoir T1	1	m ²
A2	Section du réservoir T2	1	m ²
A3	Section du réservoir T3	1	m ²
A4	Section du réservoir T4	1	m ²
Cd1	Coefficient de décharge de la vanne V1	0.01	$\sqrt{Kg.m}$
Cd2	Coefficient de décharge de la vanne V2	0.01	$\sqrt{Kg.m}$
Cd3	Coefficient de décharge de la vanne V3	0.01	$\sqrt{Kg.m}$
ρ	Masse volumique du fluide	1000	Kg.(m ³) ⁻¹
g	Constante de gravité	9.81	m.s ²
Pc	Consigne de pression	500	Pa
q	Le débit de la pompe	0.5	m ³ .s ⁻¹
Kp	Gain de l'action proportionnelle du PI	1	
KI	Gain de l'action intégrale du PI	0.1	
R	Résistance hydraulique	$\frac{\sqrt{\Delta P}}{Cd}$	(Pa/(m ³ /s))
C	Accumulateur hydraulique	$\frac{A}{\rho.g}$	(m ³ /Pa)

Tableau B.1 : Les paramètres utilisés dans la simulation

Annexe C

Schémas blocs des résidus utilisés pour la simulation des défaillances

Figure C.1 : Schéma bloc du résidu r_1

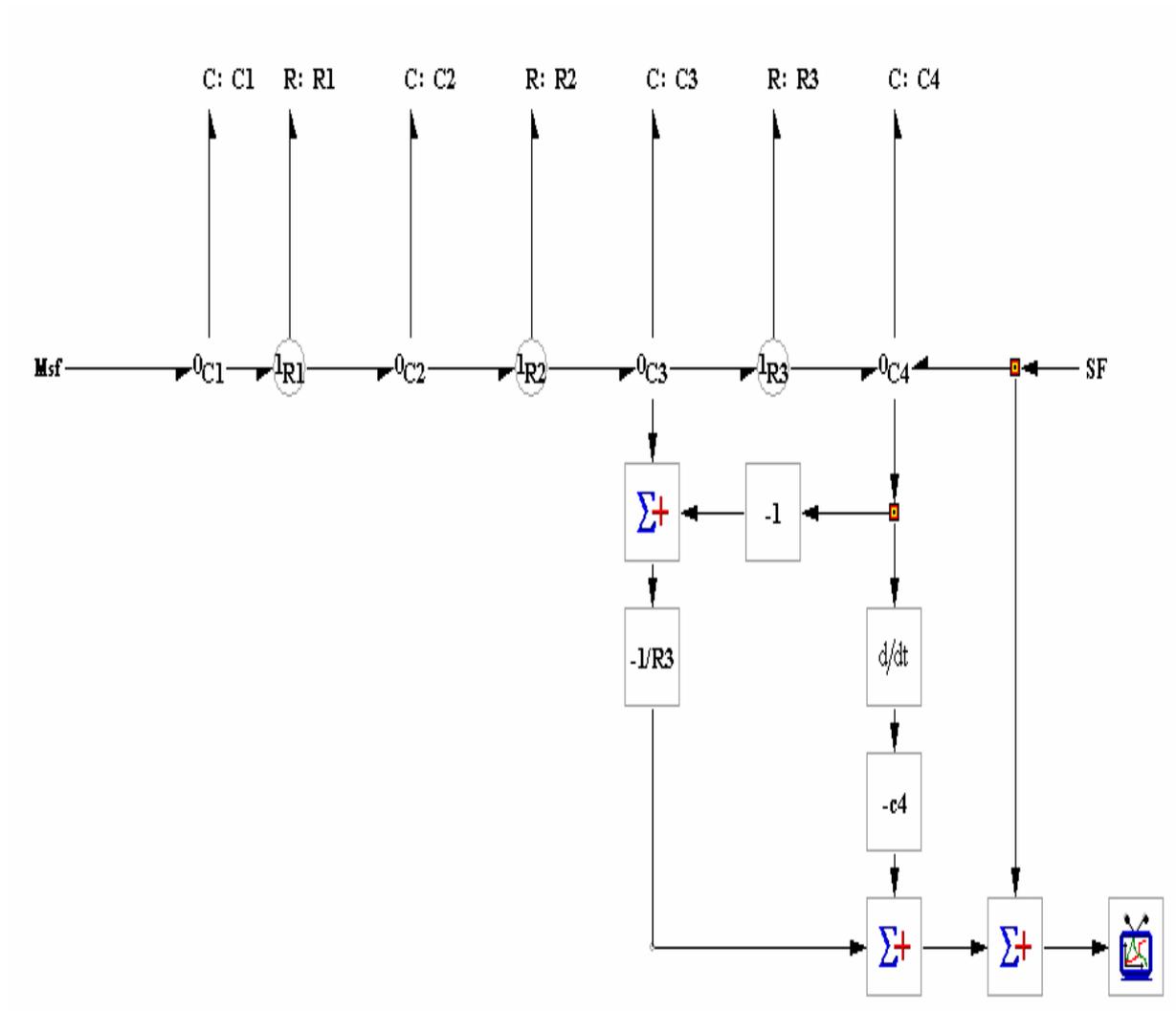


Figure C.4 : Schéma bloc du résidu r_4