
INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

L'évolution des technologies a engendré un accroissement du niveau d'automatisation et, en conséquence, une augmentation de la complexité des procédés et de la probabilité d'occurrence de défaillances. L'efficacité et la sûreté des systèmes industriels sont ainsi devenues indissociables et la présence des opérateurs humains reste encore indispensable pour prendre en charge la surveillance et assurer le fonctionnement du procédé.

Les systèmes industriels sont en effet devenus de plus en plus complexes avec l'automatisation des boucles de contrôle, l'introduction des microprocesseurs à différents niveaux et, plus récemment, l'informatisation hiérarchisée et distribuée. De fait cette évolution a complexifié la tâche de diagnostic des installations industrielles. En effet les procédures de diagnostic de défauts dans les systèmes physiques deviennent très complexes dès que les systèmes considérés ne sont plus élémentaires. Ce qui rend normale et même légitime le vouloir des entreprises d'acquérir un système efficace de surveillance afin d'améliorer la sécurité des personnels et d'assurer une fiabilité et une disponibilité accrues de leur outil de production. En effet, vu l'effort financier consenti à l'acquisition d'une chaîne de fabrication performante, un dysfonctionnement réduisant même momentanément la production est très préjudiciable.

Pour que les méthodes de diagnostic puissent s'appliquer à des systèmes complexes, il est crucial de concevoir des méthodologies à un environnement bien défini. Ainsi implémenter ces méthodologies, les systèmes de diagnostic doivent être conçus pour supporter de nombreuses procédures se déclenchant les unes les autres et fonctionnant souvent en parallèle. De nombreux tests de détection, appelés aussi tests de cohérence ou tests de consistance, orientés bon ou mauvais fonctionnement, reposant sur différents modèles, doivent être réalisés. Certains de ces tests peuvent être effectués en permanence, d'autres déclenchés par d'autres tests. A un niveau supérieur, les résultats des tests de détection doivent être interprétés pour conduire à un diagnostic tenant compte du passé du système surveillé.

En effet, le diagnostic des défaillances des équipements d'un système industriel est un métier complexe qui exige des compétences multidisciplinaires. Pour ce faire,

l'opérateur est amené à manipuler un ensemble d'informations représentant son savoir faire combiné avec une connaissance relative au processus pour aboutir à un diagnostic, en tenant compte de toutes les contraintes de production.

En plus des différents problèmes qui relèvent de la complexité accrue des équipements, l'établissement d'un diagnostic repose fréquemment sur des stratégies de raisonnement permettant de guider la recherche relevant de l'expertise humaine.

En effet, le diagnostic et la supervision des systèmes, disciplines dont la problématique est abordée à la fois par la communauté de l'intelligence artificielle et par celle de l'automatique, sont devenues des domaines de recherche d'autant plus actifs que la diversité et la complexité des problèmes ne cessent de croître

1 Objectifs du mémoire

Compte tenu des difficultés inhérentes à la tâche de diagnostic, l'aide informatique est indispensable. Toutefois pour ce type d'applications informatiques, des limitations apparaissent à l'usage des approches algorithmiques classiques. Pour pallier cet inconvénient, l'intelligence artificielle a pour objectif de reproduire les comportements dits intelligents, et d'approcher pour ce faire des modes de représentation de connaissances et de résolution de problèmes voisins de ceux qui sont les nôtres. En effet, l'objectif de notre travail est de concevoir un système de diagnostic fiable permettant d'appréhender les systèmes dynamiques complexes. Tous nos travaux ont pour origine un problème concret et se sont faits pour beaucoup d'entre eux en collaboration étroite avec l'industrie. Notre recherche s'est effectuée au sein du Laboratoire d'Automatique et Productique dans le cadre de deux projets, le premier intitulé « Les techniques de l'intelligence artificielle au profit de modèles d'aide au diagnostic pour un système intégré à la production » identifié sous le code J-0501/02/03/1999 et le second identifié sous le code J0501/02/10/03 et intitulé « Les nouvelles technologies pour la maîtrise de la sûreté des installations industrielles par l'expertise, le diagnostic et la maintenance ». Les différents problèmes que nous avons abordé peuvent être classés selon le domaine d'application concerné.

Les applications récentes axées sur le développement des systèmes à base de connaissances pour le diagnostic tendent à s'orienter vers des techniques d'acquisition des connaissances basées sur la modélisation et les connaissances profondes. Pour notre étude, nous nous intéressons plus précisément aux systèmes faisant appel à la modélisation

fonctionnelle et matérielle. L'objectif de ce travail est le développement d'un modèle de simulation capable de générer les informations reproduisant le comportement du système dans des conditions qui correspondent au fonctionnement normal et au fonctionnement en mode dégradé. Le simulateur dynamique associé à G2 sert comme support à cette réalisation.

2 Organisation du mémoire

L'organisation de la présente thèse suit la démarche adoptée lors de la réalisation de notre travail. L'environnement de notre étude est donc tout d'abord détaillé, les approches retenues sont introduites et leur choix s'est clairement justifié dans la première partie. La seconde partie, quant à elle, illustre à travers des applications industrielles, la mise en oeuvre de l'approche proposée pour l'aide au diagnostic. Nous avons tout d'abord travaillé dans le cadre de cette thèse sur le chauffe eau solaire, exemple à caractère purement pédagogique. La laiterie Aurès et la Société des CIMents de Ain Touta (SCIMAT) ont été des champs d'applications privilégiés pour la validation de l'approche développée. Dans chacun des cas, l'application se base sur les principales étapes dont l'enchaînement permet de modéliser le système afin d'en réaliser une implantation opérationnelle.

2.1 Partie I : Diagnostic industriel et Systèmes à base de connaissances

Nous rappelons dans **le chapitre I** la terminologie adoptée aux différents termes liés au diagnostic. Nous avons ensuite posé et positionné le problème du diagnostic des systèmes de production, au sein d'une stratégie de surveillance et supervision soit dans le cadre de la problématique S^3

La grande diversité des technologies des systèmes industriels ne permet pas d'utiliser une méthode universelle qui posséderait tous les avantages et aucun inconvénient. Une présentation des trois grandes familles de méthodes de diagnostic s'avère indispensable. Nous dressons dans une première étape un état de l'art sur les méthodes utilisées, tel est l'objectif du **chapitre II**. La solution la plus apparente pour contourner les limites des méthodes utilisées séparément est la complémentarité ou le développement des approches hybrides. Ces approches ont trouvé une large diffusion ces dernières années dans les domaines aussi bien académique qu'industriel.

Compte tenu des difficultés inhérentes à la tâche, l'aide informatique est indispensable. Toutefois pour ce type d'applications informatiques, des limitations apparaissent à l'usage des approches algorithmiques classiques. Pour pallier cet inconvénient, l'intelligence artificielle a pour objectif de reproduire les comportements dits intelligents, et d'approcher pour ce faire des modes de représentation de connaissances et de résolution de problèmes voisins de ceux qui sont les nôtres

Parmi les différentes approches permettant de développer des systèmes d'aide au diagnostic, nous nous sommes, intéressés au diagnostic industriel par approche à base de connaissances : thème du **chapitre III**. La synthèse effectuée aborde les différentes approches utilisées pour la conception de ces systèmes. Ceci a permis de mettre en exergue les mérites de l'approche par modélisation.

L'utilisation des modèles de sûreté de fonctionnement est alors envisagée pour le processus d'acquisition des connaissances.

2.2 Partie II : Applications Industrielles

Notre travail s'inscrit dans une perspective globale qui consiste à concevoir et réaliser des systèmes d'aide au diagnostic de pannes pour les procédés Industriels. La laiterie Aurès et la Cimenterie de Ain Touta nous ont servi de champ d'application .

Dans une première étape, notre effort a porté sur la recherche d'un support de modélisation à travers une démarche permettant de guider l'acquisition des connaissances et déterminer la conceptualisation du domaine. Dans la deuxième étape et pour aboutir à une mise en oeuvre opérationnelle dans le cadre du projet, notre étude a porté sur la fonction d'aide au diagnostic. Les solutions envisagées pour ce module appartenant au système expert nous ont conduit à introduire les connaissances acquises sur le système et les raisonnements adoptés pour établir le diagnostic.

Le chapitre IV est divisé en deux parties, une partie reprend certains aspects positifs du diagnostic précoce et présente l'approche d'acquisition des connaissances et la stratégie de diagnostic développée. De plus, il présente DIAPASE (DIAGnostic Par Système Expert) le module de diagnostic conçu et développé dans le cadre de cette thèse. Il est réalisé grâce au système de génération de systèmes expert G2. La deuxième partie concerne l'exemple à caractère pédagogique du chauffe eau solaire .

En effet, l'élaboration d'un diagnostic nécessite plusieurs opérations, comme : l'inférence des causes possibles des symptômes, la collecte des données relatives aux symptômes et aux caractéristiques du cas à traiter, l'exécution de tests, la prise en compte

des interactions entre les causes, la prise en compte de l'histoire du système, le raisonnement à partir de la théorie ou des connaissances causales générales sur le système à diagnostiquer.

Le chapitre V concerne l'acquisition des connaissances et le diagnostic des défaillances au sein de la Laiterie Aurès. Il expose non seulement les solutions conduisant à l'établissement d'un diagnostic, mais définit également les règles génériques pour guider le parcours le long de l'AdD(Arbre de Défaillances).

Ce chapitre est également spécifique à la maquette employant le générateur de systèmes expert G2 réalisée. Ceci afin de pouvoir estimer les critères de faisabilité des solutions proposées. De même il concerne l'établissement d'une structure générique permettant lors du passage au développement du prototype industriel, du module de diagnostic "DIAPASE", d'introduire les connaissances descriptives relatives au domaine.

Enfin, le thème du **chapitre VI** détaille la mise en œuvre d'un exemple d'application industrielle au sein de la SCIMAT par l'outil de développement, G2, il illustre la démarche permettant de représenter et de modéliser les connaissances relatives au domaine à étudier soit l'atelier de clinkérisation ainsi que le raisonnement adopté pour établir le diagnostic des défaillances exploitant l'expérience des experts. Les différentes expressions des résultats considérées sont présentées

2.3 Conclusion et perspectives

Enfin, la dernière partie de ce mémoire est réservée à la conclusion. Elle permet de faire un bilan des recherches effectuées et des perspectives des travaux futurs qu'il convient d'entreprendre

Pour les systèmes de production, la Surveillance/Supervision a été introduite pour prendre en compte les objectifs de sûreté de fonctionnement au niveau de l'exploitation de ces systèmes. Ainsi, en présence de défaillances, ce module doit réagir et reconfigurer aussi bien le procédé que la commande afin de chercher à poursuivre le plan de production. Une modélisation fonctionnelle et une architecture de production tolérante ont été proposées Ceci est réalisé en vue de la construction d'un module de Surveillance/Supervision permettant ainsi de préserver une continuité de service en présence de défaillances.

CHAPITRE I

Le diagnostic dans le cadre de la problématique S^3

CHAPITRE I.

Le diagnostic dans le cadre de la problématique S^3

Résumé : ce chapitre est présenté en deux parties. Dans la première partie, on abordera succinctement les systèmes de production, quand à la deuxième partie elle sera consacrée non seulement à la sûreté, la surveillance et la supervision mais surtout à la position du diagnostic dans le cadre de cette problématique que nous résumons sous l'appellation S^3 .

En effet, les objectifs de cette initiative se déclinent suivant ces trois principaux concepts (la sûreté, la surveillance et la supervision) scientifiques bien identifiées, qui sont celles autour desquelles s'articule toute approche de conception intégrée de systèmes sûrs de fonctionnement.

En effet la recherche dans ce domaine permet de mettre en œuvre la politique de conduite déterminée en amont, de détecter toute déviation par rapport à un ou plusieurs objectifs prédéterminés, de proposer un diagnostic et enfin une aide à la reprise.

1.1 Problématique et objectifs de S³

1.1.1 Introduction

La recherche dans le domaine de la sûreté, la surveillance et la supervision des systèmes de production que nous résumons sous l'appellation S³ permet de mettre en œuvre la politique de conduite déterminée en amont, de détecter toute déviation par rapport à un ou plusieurs objectifs prédéterminés, de proposer un diagnostic et enfin une aide à la reprise

En effet, initialement, l'étude d'un système lors de sa phase de conception se limite uniquement à l'aspect sûreté. Cependant avec le développement rapide de l'électronique et de l'informatique, le traitement de l'information issue de l'instrumentation des processus joue un rôle important pour **la surveillance du fonctionnement** (détection et diagnostic de défaillances) et **la supervision** (maintenance conditionnelle, accommodation aux défaillances), de celui-ci d'où la nécessité d'étudier, à toutes les étapes de conception, d'exploitation, voire de démantèlement d'un système, les problématiques de sûreté, surveillance et supervision.

En raison de la diversité des systèmes concernés par cette problématique et de la multiplicité des objectifs poursuivis, celle-ci attire des chercheurs de différentes communautés: automatique, traitement du signal, statistiques, fiabilité, intelligence artificielle, etc.

Cependant, les techniques utilisées reposent sur soit les techniques de l'intelligence artificielle, méthodes puissantes qui peuvent prendre en compte des phénomènes très diverses, soit les modèles formels tels que les automates ou les réseaux de Petri. Ces derniers constituent des outils qui reposent sur des modèles graphiques certes faciles à analyser mais présentent un inconvénient de taille comme celui de l'explosion du nombre d'états pour les systèmes complexes [Starosweiki, 98].

1.1.2 Objectifs de l'action incitative S³

Les objectifs dans le domaine de la sûreté, la surveillance et la supervision des systèmes de production se déclinent suivant trois problématiques scientifiques bien identifiées, qui sont celles autour desquelles s'articule toute approche de conception intégrée de systèmes sûrs de fonctionnement:

1. **Sûreté:** Il s'agit de la fiabilité technique et humaine d'un processus. La conception d'un système sûr de fonctionnement doit évaluer les risques de défaillances matérielles, logicielles et humaines, ainsi que les conditions environnementales.
2. **Surveillance:** C'est le traitement de l'ensemble des informations concernant le fonctionnement d'un processus, issues des instruments de mesure et émises par l'opérateur, pour la détection, la localisation et le diagnostic de défaillances, et pour le suivi des conditions de fonctionnement liées au vieillissement des composantes du processus et au changement de l'environnement.
3. **Supervision:** En fonctionnement normal, le dispositif de supervision assure la planification de la maintenance en fonction des résultats de surveillance. Suite à la détection d'une défaillance, le dispositif de supervision réagit pour l'accommodation de la défaillance, à l'aide des informations fournies par l'étude de sûreté et par le dispositif de surveillance. Les interventions peuvent être
 - la reconfiguration de la commande,
 - la reconfiguration du processus lui-même, ou
 - la reconfiguration des objectifs du fonctionnement du processus.

Avec comme but ultime la recherche de méthodologie de conception et de gestion de systèmes sûrs de fonctionnement, les principaux objectifs de S³ sont:

1. La mise en évidence des complémentarités des approches apportées dans le cadre d'une conception intégrée;
2. L'émergence de l'unité des concepts mis en œuvre pour établir un corpus scientifique cohérent relatif à la conception intégrée de systèmes sûrs de fonctionnement;

A travers ces objectifs, notre but est d'essayer d'optimiser les méthodes existantes et le développement de nouvelles approches permettant de répondre aux exigences croissantes de sûreté de fonctionnement pour des systèmes de plus en plus complexes.

1.2 De la sûreté de fonctionnement des systèmes de production

1.2.1 Introduction

Tout Système de Production (SdP) a pour objectif de transformer sous certaines conditions un élément initial en un élément final, afin que sa valeur par rapport à certains critères soit augmentée. La transformation n'atteint ses objectifs que si les informations relatives à cette transformation sont toutes correctement déterminées et traitées.

Les SdP auxquels nous nous intéressons sont industriels. Il est toutefois important de noter que la plupart des concepts évoqués ci dessous peuvent s'étendre à n'importe quel système de production [Pierreval, 97] :

- Les matières d'œuvre et les produits composés des entités à transformer et des entités transformées (matières premières, énergie, données, autres produits...)
- Le procédé, partie opératoire ou processus de fabrication, regroupe les entités de transformation. Ces transformations peuvent porter sur la structure des produits, sur leur composition ou sur leur position.
- La conduite regroupe les entités de gestion qui se divisent en deux parties. Une partie matérielle constituée par des ordinateurs, des automates... et une partie logicielle, constituée par des programmes ou des hommes par exemple.

1.2.2 Les systèmes de production complexes

Le concept de complexité est couramment associé aux SdP, pour traduire les effets des tendances actuelles du monde de la production : complexité, variété et variabilité accrue des produits à fabriquer, évolution technologique, automatisation, informatisation, réduction des délais commerciaux et des coûts. Ce concept apparaît clairement comme multidimensionnel et demande à ce titre, à être précisé.

La complexité d'un SdP peut être expliquée à travers une présentation des facteurs liés *aux produits à réaliser*, *facteurs intrinsèques au procédé*, *facteurs intrinsèques liés à la conduite* et *facteurs liés à l'environnement* du SdP. Ces derniers constituent une des composantes principales de la complexité globale des SdP, puisque le contexte influe sur le produit, le procédé et la conduite.

1.2.3 Système de production réel

Il ressort de la description précédente, qu'un SdP n'atteint pas ces objectifs lorsque les matières d'œuvre sont inadéquates, le procédé ou la conduite inadaptés. L'existence d'écarts possibles n'est évidemment pas sans conséquences sur la structure d'un SdP. La figure 1.1 représente le schéma d'un système de production réel, compte tenu des facteurs précédents.

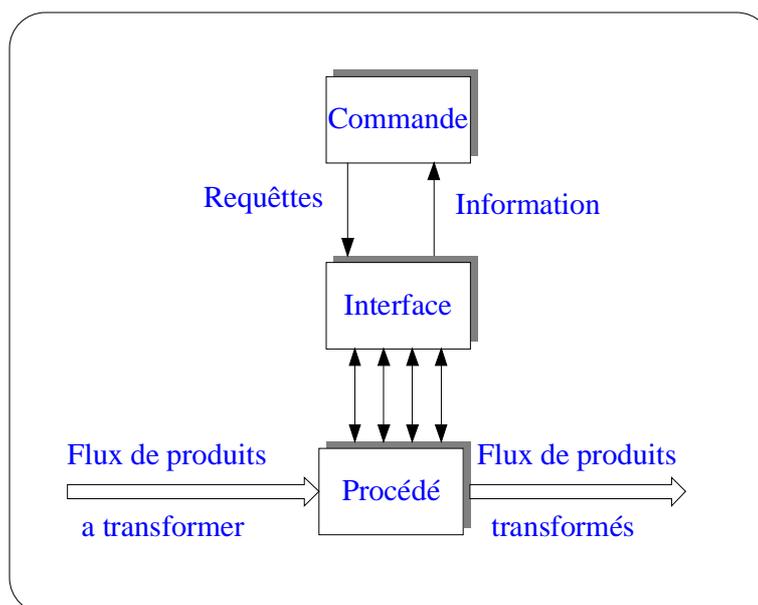


Fig.1.1. Schéma d'un système de production réel

1.2.4 Vers un système de production sûr de fonctionnement

1.2.4.1 Introduction

La recherche de l'accroissement des performances des systèmes de production, les exigences de fonctionnalité, de qualité, de coût, de sécurité de plus en plus contraignantes sont autant d'éléments qui justifient des besoins en sûreté de fonctionnement.

La sûreté de fonctionnement dont l'objectif est l'identification, l'analyse, l'évaluation et la hiérarchisation des défaillances a été définie pour un système quelconque. Ce concept a ensuite été adapté aux systèmes informatiques, aux systèmes électroniques, mécaniques [Villemeur, 88] et progressivement, il s'est imposé à la plupart des secteurs d'activité. Nous nous intéressons à son application dans le cadre des SdP

1.2.4.2 Concepts de base

La sûreté de fonctionnement est une nouvelle discipline, l'ingénieur dans ce domaine est appelé à utiliser une certaine terminologie constituée de beaucoup de termes appartenant à la vie courante. Aussi avant d'aborder notre étude, il est judicieux voir indispensable de donner les définitions exactes des termes colportés dans cette science afin d'éviter les confusions et les redondances de langage.

Nous présentons les concepts les plus utilisés dans le cadre de notre étude. **L'Annexe A** propose un lexique établi pour les termes rencontrés dans le cadre de la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels.

La sûreté de fonctionnement intègre dans une même démarche, les aspects fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité, certains y ajoutent la qualité. Chacun de ces termes est défini dans la norme française X60-500 [Rouchouse, 93]. Elle s'intéresse autant au système matériel qu'aux opérateurs humains en interaction avec le système. Ces attributs caractérisent des propriétés différentes mais complémentaires qui peuvent prendre plus ou moins d'importance selon les applications auxquelles le système est destiné

1.2.4.3 Caractérisation de la sûreté de fonctionnement

Le terme **Sûreté de Fonctionnement** (SdF) est multi facette. Il recouvre trois classes de notions : les entraves, les mesures et les moyens. La figure 1.2 résume les différents aspects exposés de la sûreté de fonctionnement.

Les entraves à la SdF regroupent tous les éléments venant altérer la production. *Les mesures*, ou les attributs, de la SdF expriment à la fois les propriétés attendues du SdP et leur appréciation effective et enfin, *Les moyens* qui constituent les méthodes et les techniques pour conférer au système de production l'aptitude à délivrer le service spécifié, et d'autre part pour donner confiance en cette aptitude, c'est à dire la valider.

Les moyens d'obtention de la SdF peuvent se résumer dans l'évitement de la création d'entraves et à la correction d'entraves lorsque ces dernières n'ont pas pu être évitées. Aussi, deux types de traitement sont alors préconisés :

- la prévention de fautes : ce type d'approche consiste notamment à développer des outils de modélisation capables de considérer plus d'informations, avec des règles d'utilisation plus strictes, ce qui limite les fautes d'utilisation. Malheureusement, il n'est pas possible d'éliminer toutes les fautes puisque le cycle de développement de ces outils est lui-même entaché de fautes. Ce qui signifie que les outils développés ne seront peut-être pas totalement adaptés au problème auquel ils sont appliqués. Des défaillances peuvent alors se produire, qu'il faut traiter avec des méthodes correctives.
- la tolérance aux défaillances: elle assure que le système fournit le produit prévu en dépit de défaillances. Il s'agit de traitements appliqués aux défaillances. Ils doivent corriger la défaillance, soit en réparant l'élément défaillant, soit en utilisant des redondances (de matériel, de logiciel...). Dans la mesure du possible, la faute doit aussi être corrigée de manière à ce qu'elle ne provoque plus de défaillance.

A ces traitements d'obtention de SdF d'un système, viennent s'ajouter *les moyens* pour déterminer le degré de la SdF du système de production ainsi conçu, et donc indiquer s'il

est possible d'avoir confiance dans l'aptitude du système à délivrer un service conforme au service spécifié. Ces traitements n'agissant pas sur le système, ils ne participent pas directement à l'amélioration de la SdF. Ils y contribuent toutefois lorsque les résultats qu'ils fournissent sont utilisés pour modifier le système avant son utilisation définitive.

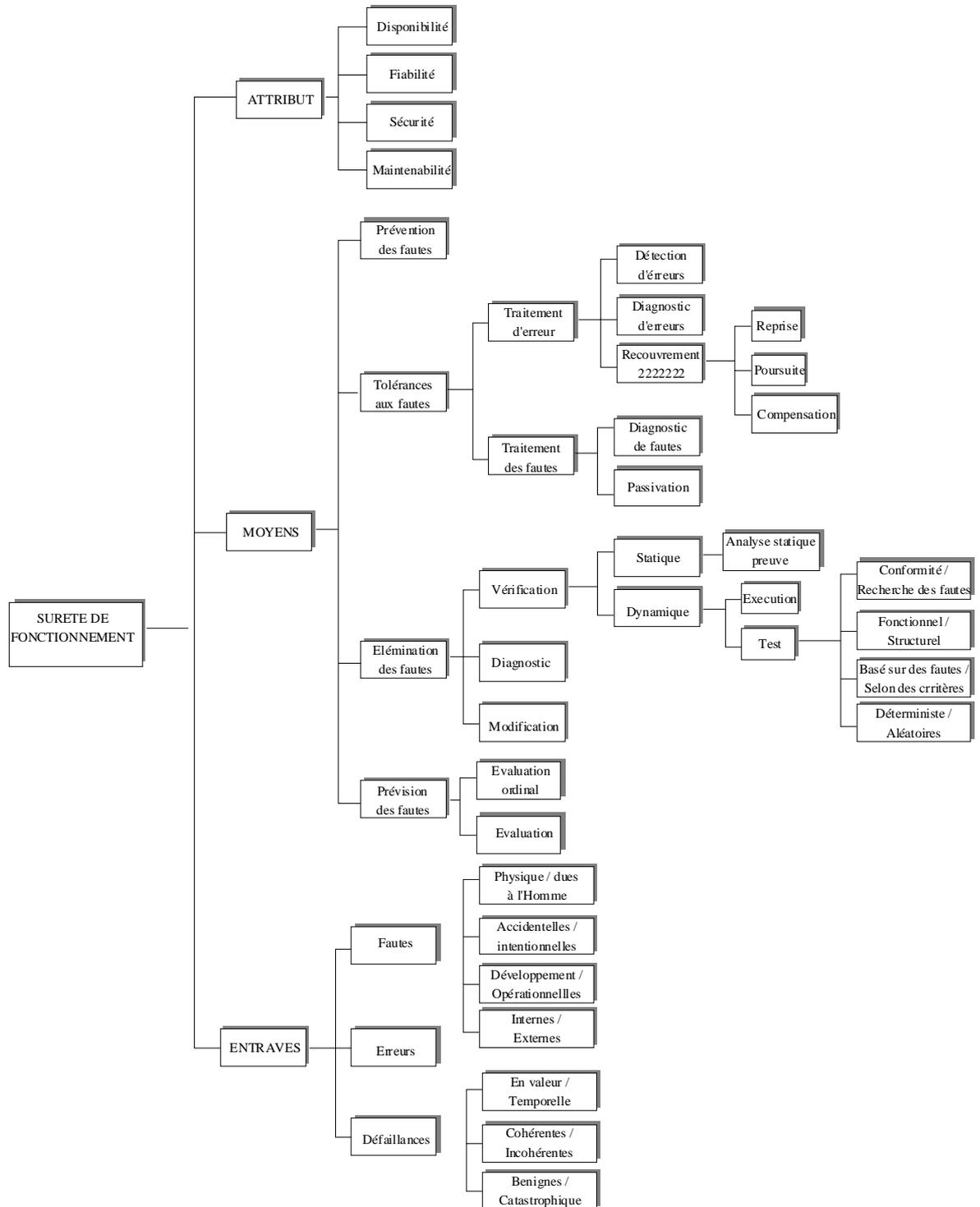


Fig.1.2. Arbre de la sûreté de fonctionnement

Ces moyens qui constituent la validation sont :

1. l'élimination de fautes, qui s'appuie en particulier sur la vérification du système à l'aide de méthodes statiques (preuves, analyse) ou dynamique (test, exécution symbolique),
2. la prévision de fautes et de défaillances, qui s'appuie sur l'estimation par évaluation (simulation) de la création, de la présence et conséquences de fautes et donc de défaillances

1.2.4.4 Conclusion

La SdF vise notamment à mettre en évidence dès la phase de conception, les meilleurs sécurité-fiabilité et disponibilité-productivité qui conduiront à des systèmes de production à la fois non dangereux et rentables en quantité et en qualité.

Un système qui a un fonctionnement sûr est ainsi un système qui réalise ce pourquoi il a été conçu, sans incident mettant sa rentabilité en question et sans incident mettant la sécurité en jeu [Bergot et al, 95].

1.3 Application de la SdF aux systèmes de production

Dans les travaux récents concernant la SdF des systèmes de production, suivant que l'on s'intéresse au système au niveau conception ou au niveau exploitation, deux grandes actions complémentaires se dégagent :

1.3.1 L'action d'analyse et d'évaluation

L'action d'analyse et d'évaluation relève des techniques d'évaluation de performances des systèmes. Elle constitue un support au dimensionnement et aux prises de décision. Il s'agit d'une méthodologie d'analyse et d'évaluation des indicateurs caractéristique de la SdF.

Pour tout système et notamment les SdP, une conception basée sur une évaluation rigoureuse des fonctions remplies par ce système constitue un maillon essentiel pour le développement d'un système sûr de fonctionnement.

1.3.2 L'action de conduite

Ce volet concerne le pouvoir de réaction des SdP. Cela consiste à améliorer les paramètres de sûreté, par le développement de différentes politiques d'actions de

compensation et de reprise en cas de défaillance. C'est ce qui correspond à la surveillance, supervision, la gestion des aléas, la gestion des modes, les stratégies de maintenance corrective, la sécurité opérationnelle,...en faisant participer l'opérateur humain à l'ensemble ou à une partie de ces fonctions. L'objectif final est l'exploitation sûre d'un système de production.

Les travaux sur la maintenance ont pour objectif d'affecter à une architecture donnée la meilleure politique de maintenance à appliquer sur une machine précise à un instant donné et dans des conditions prédéterminées. Ainsi, la prise en compte des politiques de maintenance permet de garantir la disponibilité et la durabilité du système [Brunet et al, 90]

L'objectif principal de l'intégration d'un module de surveillance temps réel est de détecter et de localiser les défaillances qui peuvent affecter les performances du système en termes de productivité et de sûreté c'est-à-dire de la disponibilité.

1.3.3 Réactivité face aux défaillances

Cette réactivité consiste après chaque défaillance, à générer une séquence de commande (de reprise ou de compensation) correspondant aux nouveaux objectifs, compatibles avec l'état réel instantané du système et vérifiant les contraintes de sûreté. Son principe de base repose sur la possibilité de tirer profit de la modification du système afin d'assurer un mode de fonctionnement convenu du système perturbé. Cela permet ainsi de préserver une continuité de service en présence de défaillances.

Si la topologie des SdP (discrets, continus ou hybrides) induit des spécifications structurelles particulières, les moyens mis en place pour la supervision ou pour la maintenance conservent néanmoins des fonctionnalités identiques (détection, diagnostic, décision, application). Les problèmes doivent être étudiés selon cette hiérarchie et avant tout traités au stade de la conception de façon à inclure capteurs et système de traitement de l'information dans une approche système globale. La maîtrise de la disponibilité d'un SdP est ainsi peut être schématisée par la figure 1.3.

1.4 Une conduite temps réel des systèmes industriels

1.4.1 Introduction

Dans le concept d'automatisation intégrée, on assiste à un niveau supérieur de la conduite et de la supervision des systèmes complexes et/ou de grande taille. Il s'agit des

activités de surveillance, détection de défaut, diagnostic et prise de décisions, impliquant un haut niveau cognitif et généralement confiées à un opérateur ou à une équipe d'opérateurs humains dans un poste ou une salle de contrôle.

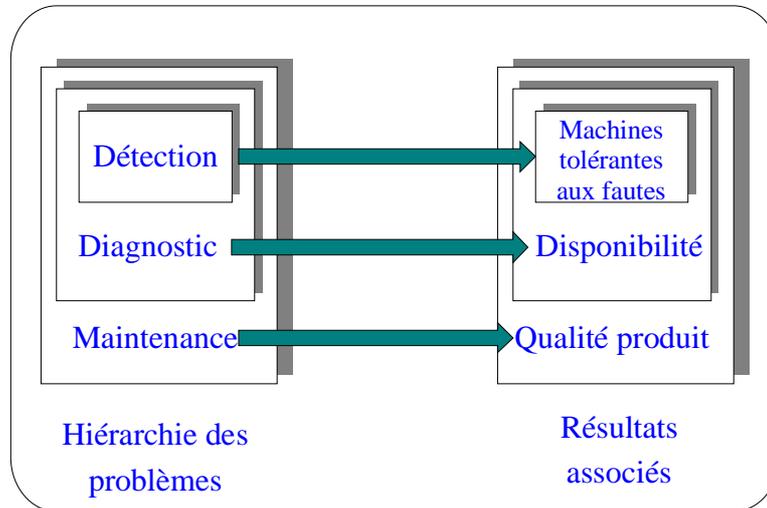


Fig.1.3. Maîtrise de la disponibilité

1.4.2 Représentation des différents niveaux de contrôle

Le contrôle des procédés est souvent représenté par une pyramide répartie en différents niveaux. (Figure 1.4)

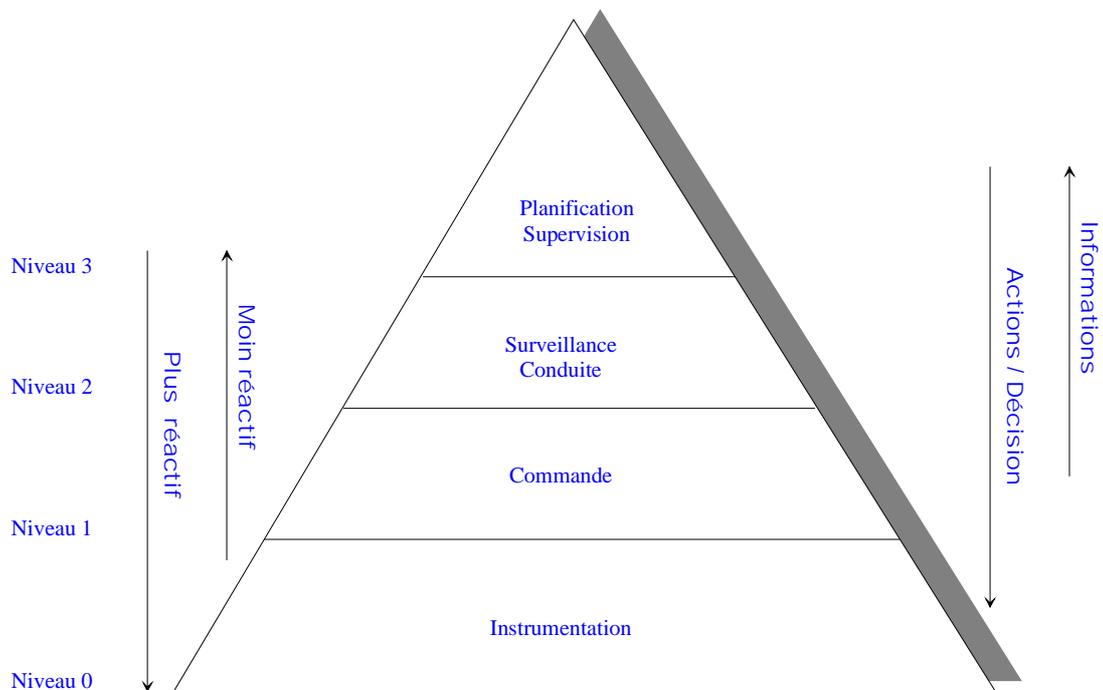


Fig.1.4. Hiérarchisation du contrôle des procédés

En bas se trouvent les ateliers, avec leurs capteurs et leurs actionneurs, puis en remontant se trouvent la régulation, les automatismes de base, la coordination d'atelier, etc. Tout en haut apparaît la supervision, qui prend de plus en plus d'importance dans tous les types d'industrie. Cette supervision, si elle ne prend dans la pyramide que le volume le plus faible, la pointe, est probablement le domaine le plus vaste

1.4.3 Structure d'un système de conduite réactive

Un système de conduite réactive s'appuie sur les fonctions suivantes :

- L'envoi des consignes vers le procédé dans le but de provoquer son évolution.
- L'acquisition des mesures ou de comptes rendus permettant de vérifier que les consignes envoyées vers le procédé produisent exactement les effets escomptés.
- L'envoi vers le procédé d'ordres prioritaires permettant de déclencher des procédures de sécurité (arrêts d'urgence par exemple).
- L'acquisition de mesures ou d'informations permettant de reconstituer l'état réel du procédé et /ou du produit.
- La recherche des causes de l'apparition d'un fonctionnement ne correspondant plus à ce qui est attendu.
- La recherche de conséquences de l'apparition d'un fonctionnement non prévu ou non contrôlé.
- L'élaboration de solutions permettant de pallier le fonctionnement non prévu.
- Le choix d'une solution curative en optimisant un sous - ensemble de critères le plus souvent locaux (durée, coût financier,...).
- La modification des modèles utilisés pendant le fonctionnement prévu pour revenir justement à ce fonctionnement : changement de la commande, réinitialisations, relaxations des contraintes, etc.
- La collaboration avec les opérateurs humains pour les prises de décision critiques, pour le recueil d'informations non accessibles directement et pour l'exploitation de la solution curative envisagée ou appliquée.

Nous pouvons remarquer que parmi ces fonctionnalités certaines entraînent une action directe sur le procédé, d'autres ne concernent que la transformation d'information tandis que d'autres sont caractérisées par la mise en œuvre d'un processus décisionnel et une modification des objectifs au cours du fonctionnement. A partir de ces fonctionnalités on peut faire dégager trois principaux concepts à savoir, la commande, la surveillance et la

supervision. Nous examinons chacun de ces trois concepts afin de situer la fonction « diagnostic ». Cependant un intérêt particulier est accordé à la surveillance et la supervision des systèmes de production

1.4.3.1 La commande

Le rôle de la commande est de faire exécuter un ensemble d'opérations au procédé en fixant des consignes de fonctionnement en réponse à des ordres d'exécution. Il peut s'agir de réaliser (figure 1.5) :

- une séquence d'opérations constituant une gamme de fabrication dans le but de fabriquer un produit en réponse à une demande client,
- une séquence d'actions correctives destinées à rendre au système de production toutes ou partie des fonctionnalités requises pour assurer sa mission.
- des actions prioritaires et souvent prédéfinies sur le procédé dans le but d'assurer la sécurité de l'installation et du personnel,
- des opérations de test, de réglage, de nettoyage permettant de garantir que le système de production pourra continuer d'assurer sa mission.

Dans cette définition, la commande regroupe toutes les fonctions qui agissent directement sur les actionneurs du procédé. On y retrouve naturellement ce que l'on a coutume d'appeler :

- le fonctionnement en l'absence de défaillance,
- la reprise ou gestion des modes,
- les traitements d'urgence,
- une partie de la maintenance corrective.

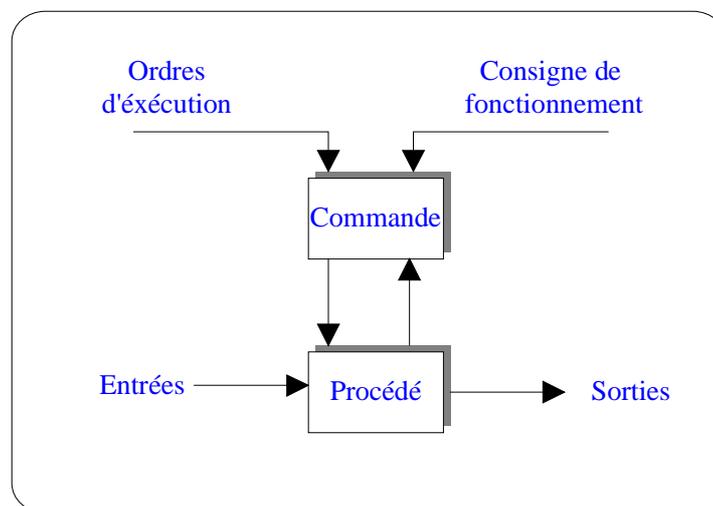


Fig.1.5. Commande d'un procédé

1.4.3.2 La surveillance - Conduite

La surveillance consiste non seulement à recueillir en permanence tous les signaux en provenance du procédé et de la commande mais aussi de reconstituer l'état réel du système commandé. De plus, elle assure toutes les inférences nécessaires pour produire les données utilisées pour dresser des historiques de fonctionnement et cas échéant, pour mettre en œuvre un processus de traitement de défaillance.

Dans cette définition, la surveillance est limitée aux fonctions qui collectent des informations, les archivent, font des inférences, etc. sans agir réellement ni sur le procédé ni sur la commande. La surveillance a donc un rôle passif vis-à-vis du système de commande et du procédé.

1.4.3.3 Supervision - Planification

La supervision consiste à contrôler et surveiller l'exécution d'une opération ou d'un travail effectué par d'autres sans rentrer dans les détails de cette exécution. La supervision recouvre l'aspect fonctionnement normal et anormal :

En **fonctionnement normal**, son rôle est surtout de prendre en temps réel les dernières décisions correspondant aux degrés de liberté, exigés par la flexibilité décisionnelle. Pour cela elle est amenée à faire l'ordonnancement temps réel, de l'optimisation, à modifier en ligne la commande et à gérer le passage d'un algorithme de surveillance à l'autre.

En **présence de défaillance**, la supervision va prendre toutes les décisions nécessaires pour le retour vers un fonctionnement normal. Après avoir déterminé un nouveau fonctionnement, il peut s'agir de choisir une solution curative, d'effectuer des réordonnements « locaux », de prendre en compte la stratégie de surveillance de l'entreprise, de déclencher des procédures d'urgence, etc.

Le concept de la supervision s'applique dans un cadre hiérarchique à deux niveaux au moins.

- à un niveau très local la supervision peut disparaître complètement (tout est prévu et figé à l'avance : la supervision est intégrée à la commande).
- à des niveaux très abstraits, la supervision devient prépondérante par rapport à la commande et à la surveillance.

1.5 De la surveillance d'un Système de production.

1.5.1 Introduction

La surveillance d'un procédé regroupe l'ensemble des traitements temps réel concernant les défaillances du procédé. Il s'agit de **détecter**, en temps réel, tous les comportements anormaux ou non nominaux (panne de machine...) et d'effectuer un **diagnostic** [Zamaï, 1997].

La surveillance du procédé permet de donner l'état exact de système de production, qui permettra de prendre les décisions les plus pertinentes possibles [Champagnat, 1998].

Afin de répondre à ces objectifs, la surveillance est décomposée en sous systèmes de détection/filtrage et de diagnostic. Nous allons définir les composants de ces deux sous systèmes qui s'articulent généralement autour des phases représentées sur la figure 1.6.

L'objectif de cette partie est de situer la surveillance dans le cadre de la problématique S³ et de présenter les techniques les plus courantes en surveillance d'équipements industriels. Dans la littérature associée à ce domaine, on peut trouver plusieurs définitions quelquefois divergentes. C'est pourquoi nous nous positionnons, en donnant des définitions des mots clés qui sont utiles pour la compréhension de ce document.

1.5.2 Les méthodologies de surveillance

1.5.2.1 Introduction

La détection et le diagnostic de pannes, que nous appelons aussi la surveillance, sont des tâches primordiales pour la supervision de procédés industriels. On peut distinguer deux types de surveillances, l'un détecte rapidement des défaillances graves pour assurer la sécurité, l'autre détecte des dégradations lentes pour optimiser la maintenance. La maintenance décidée par le deuxième type de surveillance est appelée maintenance conditionnelle, à l'opposé de la maintenance systématique préprogrammée. Les méthodes que nous proposons sont plus adaptées à la maintenance conditionnelle qui vise à améliorer le rendement de production sans le faire au détriment de la sécurité.

Les méthodologies de surveillance peuvent être divisées en deux grandes catégories : les méthodologies qui se basent sur l'existence d'un modèle formel de l'équipement à surveiller (analytiques des domaines de l'automatique, du traitement du signal et de la statistique), et les méthodologies qui se basent uniquement sur l'analyse des variables de

surveillance ainsi que sur les connaissances a priori des experts humains (celles du domaine de l'intelligence artificielle et celles basées sur des méthodes.)

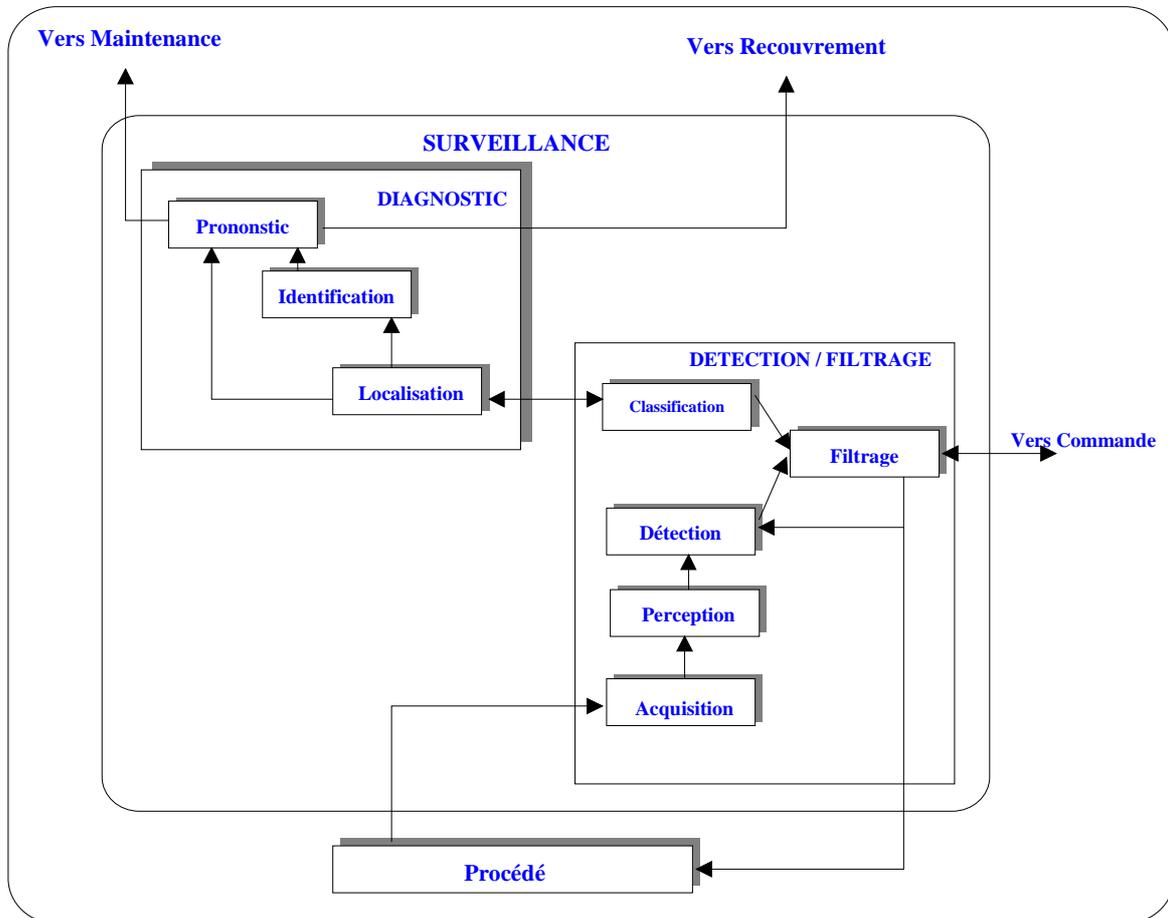


Fig.1.6. Domaine de la Surveillance [Berruet,98]

1.5.2.2 La surveillance avec modèle

La surveillance avec modèle [Dash et al., 00] se base sur l'existence d'un modèle formel de l'équipement et utilise généralement les techniques de l'automatique [Combacau, 91]. Les méthodes qui se basent sur une modélisation de l'équipement sont naturellement tributaires de l'existence ainsi que de la qualité d'une modélisation physique de l'équipement. Ce modèle servira de référence pour un fonctionnement nominal et tout écart par rapport au point de fonctionnement nominal est synonyme de défaillance. L'inconvénient de ces techniques est l'existence d'incertitudes de modélisation qui sont dues au fait que la modélisation physique ne prend pas en considération tous les paramètres et les aléas qui peuvent influencer sur une information d'un paramètre de surveillance. Ces incertitudes de modélisation sont généralement prises en compte par le modèle d'une manière explicite (additive ou multiplicative). Si la modélisation de composants est

souvent réalisable, un problème délicat concerne la modélisation de toute une machine complexe ou d'un procédé entier. Ceci nous conduit à la remarque suivante : lorsque l'on veut surveiller un équipement (ou un système) sur lequel on ne dispose que de très peu d'informations physiques, on peut se poser la question de savoir s'il serait intéressant de prendre le risque d'investir dans l'élaboration d'un modèle de l'équipement, ou bien d'utiliser les deuxièmes méthodologies qui ne se basent pas sur l'existence d'une modélisation physique.

1.5.2.3 La surveillance sans modèle

Cette catégorie de méthodologie est plus intéressante dès lors qu'un modèle de l'équipement est inexistant ou difficile à obtenir [Dash et al., 00]. Dans ce cas, on utilise les outils de la statistique et de l'Intelligence Artificielle. Les techniques de surveillance sans modèle sont divisées en deux parties.

- La première partie correspond aux outils statistiques et de traitement du signal qui sont généralement qualifiés d'outils de traitement de bas niveau, parce qu'ils sont en contact direct avec le signal capteur, et ne servent généralement que pour la génération d'alarmes brutes, sans aucune information concernant leur signification.
- La deuxième partie est celle des techniques dites de haut niveau et qui sont plutôt orientées vers la communication avec l'expert. Celles-ci représentent les techniques de l'*Intelligence Artificielle (IA)* et servent comme outil de base pour l'aide à la décision. Leur réponse est donc plus élaborée que celle des techniques de bas niveau. Cette réponse peut être obtenue soit à partir des données brutes venant directement des variables de surveillance, soit à partir des données traitées venant des sorties des traitements de bas niveau. Le rôle que peut jouer un expert humain reste tout de même indispensable si l'on veut concevoir un outil de surveillance avec les techniques de l'Intelligence Artificielle.

Notons que les deux approches Automatiques / Intelligence Artificielle peuvent être combinées pour profiter de certains avantages de chacune et avoir ainsi une certaine complémentarité [Dubuisson, 01]. Les méthodes de l'Automatique, en particulier les méthodes statistiques du traitement du signal, sont par nature proches du système surveillé puisqu'elles travaillent directement à partir des données issues des capteurs; elles sont ainsi principalement utilisées pour la génération d'alarmes. Les méthodes de l'Intelligence Artificielle sont quant à elles, plus tournées vers la communication avec l'opérateur et se

focalisent plus sur la transformation d'un ensemble d'informations brutes et non reliées entre elles en une information interprétable directement par l'opérateur chargé de la conduite; elles sont donc utilisées pour l'interprétation des alarmes et l'aide à la décision [Basseville et al., 96].

D'autres réflexions sur la complémentarité entre ces deux domaines peuvent être trouvées dans [Dubois et al, 94]. On peut citer également quelques travaux où les deux techniques Automatique/Intelligence Artificielle ont été conjointement utilisées : [Katsillis et al., 97], [Loiez, 97], [Hines et al., 95], [Vemuri, 97], [Vemuri et al., 98].

1.5.3 Surveillance d'un SdP

La surveillance d'un système physique a besoin des informations délivrées par des capteurs. La défaillance de l'un d'entre eux peut engendrer le dysfonctionnement de l'installation en conduisant à une altération de ses performances. Une procédure de surveillance doit donc être apte à traiter un défaut affectant aussi bien le système physique proprement dit, que l'un de ses organes de conduite (actionneur, capteur d'instrumentation). Cependant, la complexité et la taille de l'installation, ainsi que la gravité des risques encourus et des conséquences potentielles augmentent la quantité d'information à analyser, rendant souvent la surveillance complexe pour un opérateur humain. Il s'avère par conséquent très utile d'adjoindre à l'opérateur une aide à la décision, voire de rendre la surveillance automatique. L'intérêt est aussi de permettre l'amélioration de la disponibilité des installations en remplaçant, par exemple, les politiques de maintenance programmée par des stratégies de maintenance conditionnelle prenant en compte l'état effectif du système physique. Nous nous intéressons dans ce travail à la surveillance et au diagnostic des SdP. Nous indiquons dans ce qui suit les raisons qui conduisent à le surveiller.

1.5.4 SdP, Pourquoi les surveiller ?

Les principales raisons qui conduisent à surveiller un système sont :

- La conduite: qu'il s'agit d'optimiser et qui est une tâche en ligne, par exemple, l'aide à la conduite d'un haut fourneau doit fournir à l'opérateur de conduite les outils nécessaires à la prise de décision d'actions visant à faire fonctionner le procédé au mieux (production maximale, sécurité, non dégradation des équipements). Ceci passe par la surveillance du procédé afin de détecter toutes anomalies de fonctionnement et l'identifier aussi bien que possible.

- Un service qu'il faut assurer c'est le cas d'un réseau de télécommunications par exemple. La aussi la capacité à détecter, localiser et diagnostiquer les évènements indésirables, et à y réagir, est un enjeu crucial.
- La maintenance, qui a pour objet le remplacement ou la réparation d'équipements usés ou défectueux, et que l'on souhaite optimiser. Elle s'effectue le plus souvent hors-ligne. La maintenance corrective intervient après la détection et la localisation d'un défaut : la maintenance préventive est elle le plus souvent systématique. Cependant, la maintenance conditionnelle, qui est une alternative, à la maintenance systématique fait l'objet d'une demande croissante dans un grand nombre d'applications industrielles, par exemple, pour les machines de production d'énergie. Cette maintenance est basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système, afin de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive, elle impose donc des traitements en- ligne, au moins en partie.

Nous n'aborderons pas dans la suite les enjeux économiques, technologiques et environnementaux de la surveillance, qui sont liés à des impératifs de sécurité (des hommes et des matériels) et de protection de l'environnement, et à la recherche de gains de productivité

1.5.5 Conclusion

Il est important de remarquer que, si conduite et maintenance sont des opérations qui s'inscrivent dans le temps de manière différent, la surveillance qu'elles impliquent peut être de la même nature, en-ligne (figure 1.7), pour les deux objectifs. En effet, le choix d'une approche en-ligne ou hors-ligne pour la surveillance dépend non seulement de l'objectif, conduite ou maintenance, mais également des ordres de grandeur relatifs des constantes de temps du système, des différents types d'événements à surveiller, et aussi de l'échantillonnage des mesures disponibles.

1.6 Organisation générale d'un système de surveillance

La surveillance d'un procédé regroupe l'ensemble des traitements temps réel concernant les défaillances du procédé. Il s'agit de **détecter**, en temps réel, tous les comportements anormaux ou non nominaux (panne de machine...) et d'effectuer un **diagnostic** [Zamaï, 97].

La surveillance du procédé permet de donner l'état exact de système de production, qui permettra de prendre les décisions les plus pertinentes possibles [Champagnat, 98].

Afin de répondre à ces objectifs, la surveillance est décomposée en sous systèmes de détection/filtrage et de diagnostic. Nous allons définir les composants de ces deux sous systèmes qui s'articulent généralement autour des phases représentées sur la figure 1.7

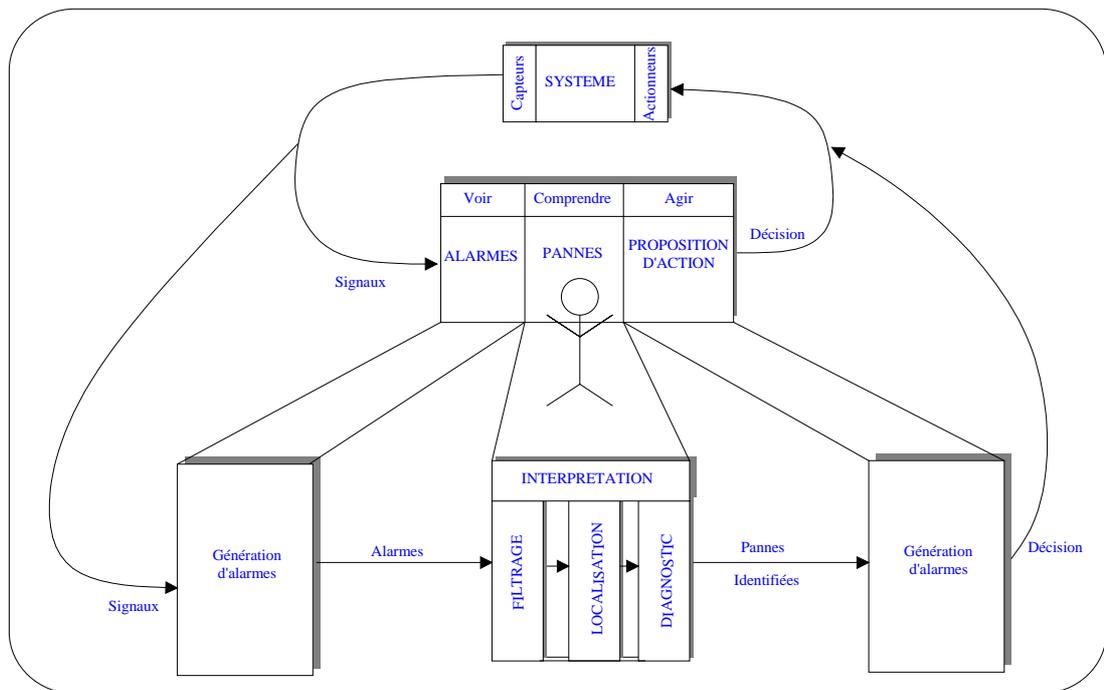


Fig.1.7. Architecture générale d'un système de surveillance en-ligne

1.6.1 Sous-système de détection/filtrage

Le sous-système de détection/filtrage est fortement dépendant de la contrainte temps réel [Berruet, 98]. Ce sous-système comporte plusieurs fonctions élémentaires :

- L'**acquisition** a pour rôle d'acquérir les données pertinentes du procédé. Elle peut être périodique ou événementielle.
- La **perception** est conçue comme une fonction de compression d'informations puisqu'elle extrait, à partir des données issues d'un capteur, les indicateurs de défaut pertinents nécessaire à la détection parce que ces données sont souvent entachées d'erreurs.
- La **détection** signale les anomalies rencontrées au niveau du procédé. Elle vise à déterminer si l'état courant du système et de ces éléments est normal ou anormal ;

ceci par comparaison des informations générées par les phases précédentes, à des états de référence.

- Le **filtrage** a pour fonction de s'assurer que la commande envoyée au procédé est saine c'est-à-dire compatible avec l'état de ce dernier.
- La **classification** évalue le degré de sévérité des anomalies détectées au niveau du procédé. Cela permet de savoir si le système a assez de temps pour lancer une procédure complète de diagnostic ou s'il doit prendre immédiatement des mesures afin de garantir la sécurité sur le plan humain comme sur le plan des machines.

1. 6.2 Sous-système de diagnostic

Le diagnostic de pannes dans les installations industrielles est le processus qui, à partir des symptômes observés, permet l'identification des causes à l'origine des dysfonctionnements et d'incriminer le (ou les) composant (s) en panne du système.

A partir des symptômes détectés par le sous-système de détection/filtrage le sous-système de diagnostic va déterminer plus précisément la cause initiatrice de la défaillance, et évaluer la propagation de cette même défaillance.

Ce sous-système peut se décomposer en trois fonctions [Berruet, 98] :

- La **localisation** détermine le sous-ensemble fonctionnel défaillant et progressivement affine cette détermination pour désigner l'organe ou dispositif élémentaire défectueux.
- L'**identification** donne les causes qui ont engendré la ou les défaillances constatées.
- Le **pronostic** s'intéresse à la propagation des défaillances. Il indique les conséquences inéluctables et mesure celles qui peuvent être anticipés de façon à ne pas solliciter les sous-systèmes de la ressource défaillante. Le pronostic est une étape sans laquelle la prise de décision n'est pas faisable.

La surveillance consiste donc à détecter la défaillance et en faire un diagnostic, la supervision et la maintenance, à l'issue des décisions entreprises, ont le pouvoir de lancer les actions répondant aux stratégies de reprise souhaitées.

A l'issue de sa conception, il est possible de déterminer si un système est diagnosticable, c'est à dire susceptible d'être soumis à un diagnostic. Pour cela, il doit être muni d'organes d'observation (capteurs) et d'un système d'analyse pour étudier les informations qu'il fournit. Ce système peut être l'homme (l'opérateur, l'analyste ou autre).

1.7 De la Supervision des systèmes de production

1.7.1 Buts de la supervision

Les buts de la supervision sont multiples. On peut citer [Bousson, 93], [Champagnat, 98] :

- la mise en œuvre de la politique de conduite définie par la gestion prévisionnelle en aidant les opérateurs humains à prendre des décisions et en envoyant les ordres adéquats aux contrôleurs locaux (pilotage en temps réel),
- la détection de toute déviation, que ce soit par rapport à la politique de gestion ou bien par rapport à un modèle de fonctionnement normal du système de production,
- un diagnostic en cas de déviation,
- une aide à la reprise et à des actions de compensation (réactivité),
- la mise en œuvre de procédures assurant la sécurité opérationnelle (sécurité des opérateurs et du système en cas de défaillance grave).

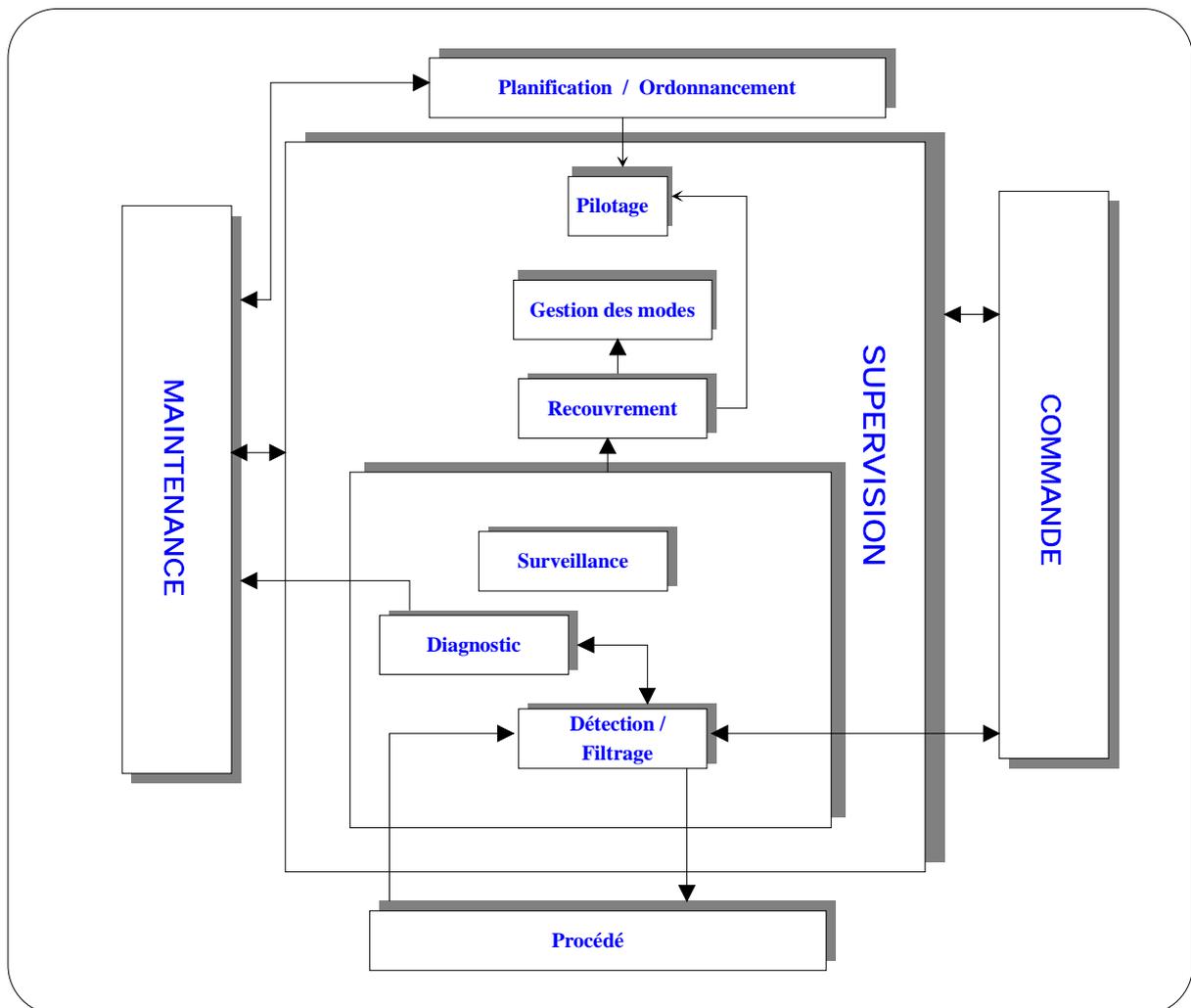


Fig.1.8. Domaine de la Supervision [Berruet,98]

1.7.2 Les apports d'un système de supervision

Un système de supervision est efficace s'il regroupe toutes les informations nécessaires pour accélérer les prises de décision ou pour rendre les décisions plus pertinentes :

- les actions de maintenance seront déclenchées plus rapidement et les chances de succès de la première intervention augmentent,
- la régulation sera possible grâce à des boucles de réaction adaptées aux fonctions supervisées,
- l'information permettra d'éviter l'amplification d'une perturbation ou de préparer les mesures de compensation,
- l'échantillonnage des mesures permettra de comprendre un comportement, de définir un modèle

La supervision, c'est l'outil d'accélération et d'amélioration de la décision de l'homme. La supervision s'inscrit dans un objectif d'amélioration de la productivité et de la qualité de service. Un processus mature appelle un système de supervision et réciproquement, un système de supervision permet d'améliorer le processus :

En temps réel, les décisions sont meilleures grâce à la connaissance complète et rapide du contexte :

- des automates peuvent prendre en compte les actions réflexes et répétitives,
- l'homme analyse les phénomènes en minimisant les déplacements, et prend les mesures correctives en télécommandant les actionneurs,
- la réaction à la situation observée est plus rapide (diminution des temps d'analyse et de mise en œuvre) et plus efficace (pilotage précis d'actionneurs performants).

En temps différé, l'analyse des situations vécues permet une capitalisation et une formalisation des actions à déclencher dans chaque contexte :

- les procédures formalisent le savoir –faire,
- la fonction de l'opération se professionnalise.

En temps ultérieur, des réalisations complémentaires amélioreront le système de supervision :

- les procédures et le savoir –faire pourront être partiellement converties en automates,

- le périmètre supervisé pourra être élargi ou enrichi pour approfondir encore les données utiles à la prise de décision.

Les possibilités offertes par les nouvelles technologies ont largement contribué à l'amélioration des systèmes de supervision au moyen d'un certain nombre de modules essentiels, tant en termes d'observation du processus que d'action sur celui-ci.

1.7.3 Représentation du système de supervision

Un système de supervision peut être représenté par le rattachement des différents modules [Duthoit, 97], [Chartres, 97] comme le montre la figure 1.9

- 1- *L'aide à la décision* : en temps réel, le système propose à l'opérateur un ensemble d'actions possibles. Le choix proprement dit reste généralement effectué par l'opérateur.
- 2- *Les simulateurs de décision* : ils permettent de projeter dans le future les répercussions d'une action ; l'opérateur peut alors évaluer la pertinence de la mesure qu'il comptait prendre. Ces simulations sont basées sur des modèles de comportement du processus supervisé
- 3- *Une base d'expérience* : qui permet de mémoriser des situations les modèles de comportement, les paramètres variables qui interviennent sur la simulation.

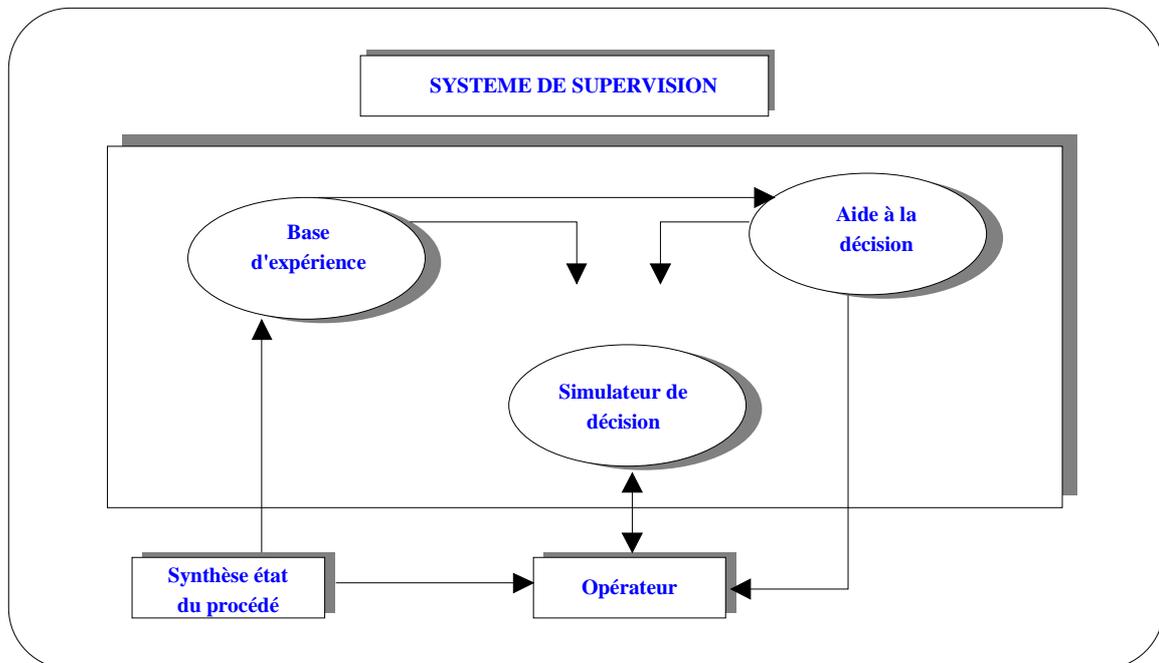


Fig.1.9. Modules essentiels d'un système de supervision

1.8 Problème de diagnostic industriel

1.8.1 Introduction

Le diagnostic des systèmes suscite, depuis une trentaine d'années, un intérêt croissant tant au niveau du monde industriel que de la recherche scientifique. A l'origine, le diagnostic se limitait aux applications industrielles à haut niveau de risque pour la communauté comme le nucléaire ou l'aéronautique [Potter et al, 77] [Daly et al, 79] [Desai et al, 79], ainsi qu'aux secteurs d'activité de pointe tels que l'industrie de l'armement ou l'aérospatial [Desai et al, 76], [Deckert et al, 77]. Les premiers travaux concernant le thème diagnostic datent du début des années 1970, résumés notamment dans l'article de synthèse de [Willsky, 76]. En raison de l'intérêt croissant suscité dans le monde industriel, le diagnostic est devenu peu à peu un thème de recherche à part entière

La recherche dans le domaine du diagnostic industriel a connu une évolution accélérée durant ces deux dernières décennies, que se soit sur le plan théorique ou sur le plan pratique. L'intérêt croissant porté aux problèmes du diagnostic tient du fait que l'une des principales préoccupations du milieu industriel est l'augmentation de l'efficacité et du rendement, en termes de coûts et de délais [Haton, 83]. De plus, le diagnostic trouve des applications diverses dans tous les secteurs tels que l'industrie, la médecine, l'administration, etc.....Ainsi, avec cet intérêt accru, s'est développée une littérature abondante dédiée au diagnostic industriel. De nombreux ouvrages de référence parmi lesquels [Zwingelstein, 95], [Dubuisson, 90] et [Halme and al, 91], consacrés à la résolution de divers problèmes, ont été publiés.

1.8.2 Diagnostic

L'objectif de la fonction diagnostic est de rechercher les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une observation particulière. Cette fonction se décompose en deux fonctions élémentaires : localisation et identification.

A partir de l'observation d'un état de panne, la fonction diagnostic est chargée de retrouver la faute qui en est à l'origine. Ce problème est difficile à résoudre. En effet si, pour une faute donnée, il est facile de prédire la panne résultante, la démarche inverse qui consiste à identifier la faute à partir de ses effets, est beaucoup plus ardue. Une défaillance peut généralement être expliquée par plusieurs fautes. Il s'agit alors de confronter les observations pour fournir la bonne explication (Figure 1.10).

La localisation permet de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant et l'identification de la cause consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale. Ces causes peuvent être internes (sous-ensembles défaillants faisant partie de l'équipement), ou bien externes à l'équipement.

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) réalisée à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test [Afnor, 88]. Il consiste à observer les symptômes de défaillance et Identifier la cause à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur des observations.

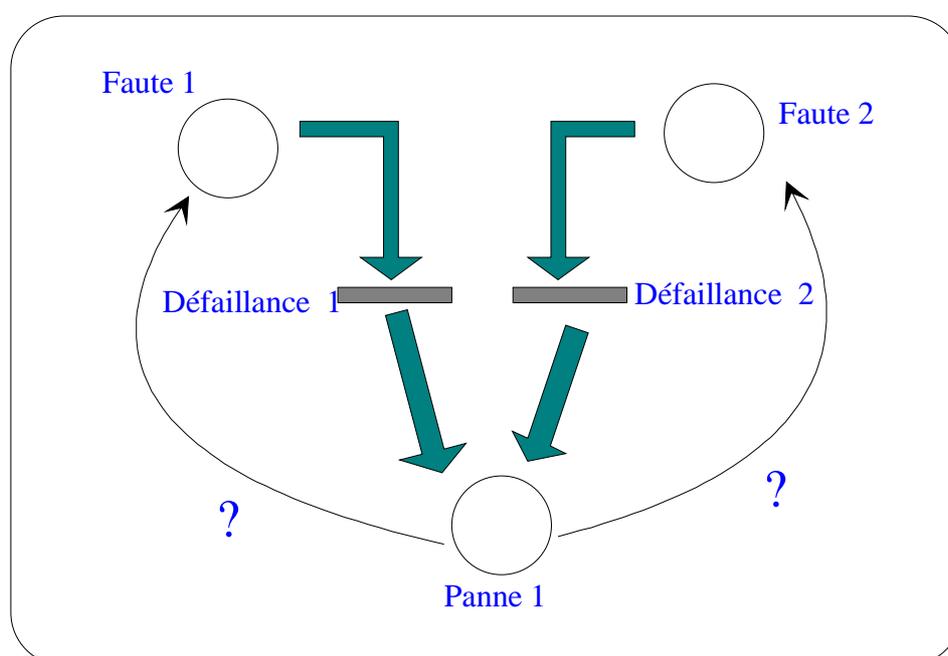


Fig.1.10. Difficulté du diagnostic.

Remarque : Deux fautes peuvent conduire à la même panne ce qui rend très compliqué l'opération inverse à savoir le diagnostic

1.8.3 Terminologie propre au diagnostic

Il semble intéressant, dans un premier temps, de rappeler les principaux termes utilisés en diagnostic des systèmes. Reposant principalement sur le travail effectué par [Milne, 87], [Isermann, 96] et [Ballé, 00] et [Ploix, 98], ainsi que sur l'étude d'ouvrages synthétiques tels que [Brunet et al, 1990] [Zwingelstein, 95] des définitions des concepts coïncidant avec notre acception sont proposées afin de clarifier la suite de ce document. Ce travail nous paraît nécessaire car il est courant de trouver dans la littérature internationale

des définitions différentes d'une même notion, notamment lorsque ces notions sont employées par deux communautés. Par exemple la terminologie suggérée par [Isermann, 96] et [Ballé, 97] n'est pas toujours compatible avec les définitions mathématiques de Reiter. La terminologie suivante est adoptée :

- *Système physique*: Un système physique est un ensemble d'éléments (composants, constituants) interconnectés ou en interaction organisés pour réaliser une fonction.
- *Composant* : Un composant est une partie du système choisie selon des critères liés à la modélisation. En tout premier lieu, le comportement de référence de ce composant est bien adapté dans le sens où il peut être défaillant ou servir de support à la propagation de pannes dans le système. Un composant doit être simple à modéliser dans le sens où cela doit être naturel : il peut s'agir d'un composant (physique ou logique) complet du système ou d'une partie parfaitement délimitée de ce composant, d'un groupe de composants. Le comportement du composant élémentaire n'est pas décomposable ou alors cette décomposition n'est pas souhaitée, il constitue une « brique » du comportement du système.
- *Modèle*: Un modèle d'un système physique est une description de sa structure et une représentation comportementale ou fonctionnelle de chacun de ses composants [Milne, 87].
- *Une représentation comportementale* est constituée de relations entre diverses variables du système, appelées classiquement relations de causes à effets.
- *Une représentation fonctionnelle* est plus abstraite puisqu'elle ne s'adresse qu'aux objectifs présumés que le système physique doit remplir.
- *Le niveau structurel*, quant à lui, s'appuie sur la structure réelle du système physique et décrit les interconnexions entre ses différents éléments ou constituants. il permet de déterminer l'élément affecté par le défaut
- *Les niveaux comportemental et fonctionnel* comprennent des relations entre des grandeurs physiques (variables) et permettent de mettre en évidence la présence d'un événement anormal ou anomalie.

L'intérêt de cette décomposition est de rappeler que, puisqu'un modèle contient toute l'information relative à un système physique, il est utilisable ensuite par la procédure de diagnostic.

- *Défaut* :
 - Tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence, lorsque celui-ci est en dehors des spécifications [Afnor, 94].
 - N'importe quel état indésirable d'un composant ou d'un système. Un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance (IEEE, 88).
 - Déviation non permise d'au moins une propriété ou un paramètre caractéristique du système des conditions acceptables ou (et) standards [Isermann et Ballé, 97].
 - C'est l'écart existant entre la valeur réelle d'une caractéristique du système et sa valeur nominale
 - Un défaut est une anomalie de comportement au sein d'un système physique localisée au niveau d'un composant [Ploix, 98].

La définition de l'AFNOR rattache la notion de défaut à celle de déviance d'une caractéristique d'un phénomène, subordonnant ainsi cette notion à l'existence d'une référence absolue. Cependant, dans le cas général, il y a plusieurs modèles de référence, s'exprimant en terme de relations entre des phénomènes, pouvant représenter un même phénomène. La notion de défaut ne serait donc plus à rattacher à celle de phénomène, mais à celle de modèle ce qui n'est pas conforme aux autres définitions. Celles données par le dictionnaire IEEE et par Isermann et al rapprochent bien défaut de comportement; cependant, les qualificatifs indésirables ou non permis appartiennent au jugement. La notion de défaut est donc voisine de celle de défaillance mais comme le souligne le dictionnaire IEEE, un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance. Défaut, lié au comportement, est plus général que défaillance, liée aux fonctions puisqu'elles sont une abstraction du comportement tel qu'il est conçu téléologiquement. La description comportementale est plus détaillée que la description fonctionnelle et l'inclut donc. De la même manière, la notion de défaut inclut celle de défaillance; un défaut n'altère pas nécessairement le fonctionnement d'un système physique mais peut présager d'une défaillance à venir.

- *Défaillance* : définit une anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique [Ploix, 98], c'est-à-dire caractérise son incapacité à accomplir certaines fonctions qui lui sont assignées.
- État d'incapacité à réaliser une fonction normale de façon adéquate [Webster's.96].

- Altération ou cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques [Afnor, 94].
- La cessation de la capacité d'un système physique ou d'un dispositif à accomplir ses fonctions [IEEE,88].
- Interruption permanente de la capacité d'un système à assurer une fonction requise dans des conditions opérationnelles spécifiées [Isermann and al, 97].

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. Une classification à été faite et ce selon plusieurs paramètres [Mouss et al, 05].

- *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. [Zwingelstein, 95].

Si nous écartons la possibilité d'erreur de conception, la définition précédente implique que toute défaillance entraîne une panne. La défaillance correspond à un événement et la panne à un état. Sur le plan temporel, la défaillance correspond à une date et la panne à une durée comprise entre la date d'occurrence de la défaillance et la date de fin de réparation.

- *Symptôme*: caractère distinctif d'un état fonctionnel anormal [Ploix et al , 00] et [Ploix , 01].
- *Résidu* : Souvent, lorsque le modèle comportemental de référence est analytique, les signaux porteurs de signes ou de symptômes sont appelés résidus parce qu'ils résultent d'une comparaison entre un comportement réel et un comportement de référence.
- *Diagnostic*: est un état expliqué d'un système physique compatible avec les informations disponibles sur le comportement réel du système et avec le modèle de comportement de référence disponible. Habituellement, le diagnostic est exprimé par les états des composants [Reiter, 87] ou les états des relations de description du comportement [Cassar et al, 94].

- *Perturbation*: Entrée du système physique qui n'est pas une commande. Autrement dit, c'est une entrée non contrôlée.

1.9 Surveillance et diagnostic des SdP

Le diagnostic s'intègre dans le cadre plus général de la surveillance et de la supervision. Le diagnostic à base de modèles trouve sa place dans les démarches "qualité" des entreprises et s'inscrit dans la sûreté de fonctionnement. La fonction d'une opération de diagnostic est de déterminer les composants ou organes défaillants d'un système physique. Elle peut intervenir à plusieurs stades :

- Les contrôles "qualité" : Il s'agit de tester des produits afin de garantir que leurs caractéristiques sont conformes à des spécifications.
- La supervision : consiste à doter les systèmes physiques d'une intelligence en les équipant de dispositifs étudiant en temps réel leur comportement pour produire automatiquement un diagnostic qui sera fourni et exploité par l'opérateur.
- La maintenance prédictive. Il s'agit de déceler des dérives de comportements d'un système physique avant qu'une fonction ne soit altérée afin de remplacer les organes dégradés avant qu'ils ne tombent en panne.
- L'aide au diagnostic : permet d'aider un opérateur à remonter aux organes défectueux.

Dans un grand nombre d'applications industrielles, une demande croissante est apparue en matière de remplacement des politiques de maintenance curative par des stratégies de maintenance préventive. Cette mutation d'une situation où on « *subit les pannes* » à une situation où on « *maîtrise les pannes* », nécessite quelques moyens technologiques ainsi que la connaissance de techniques d'analyse appropriées. La fonction *surveillance* en continu de l'évolution de l'équipement à travers des données quantifiables et qualifiables permet ainsi de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive et d'écartier les fausses alarmes qui peuvent ralentir la production [Basseville, 96]. De nombreux auteurs ont abordé le domaine de la surveillance industrielle mettant ainsi en évidence l'intérêt croissant manifesté par la communauté scientifique et les industriels par rapport à cette problématique. Nous pouvons citer sans souci d'exhaustivité les travaux suivants : [Combacau, 91], [Devauchelle, 91], [Toguyeni, 92], [Poulard, 96], [Cussenot, 96], [Evsukoff, 98], [Weber, 99], [Zhang, 99], [Combastel, 00] et [Lefebvre, 00].

1.10 Le diagnostic industriel dans le cadre de la supervision

1.10.1 Introduction

La fonction de diagnostic se trouve parmi les objectifs de la surveillance qui, à son tour, s'inscrit dans un processus global de supervision. Pour piloter le système de production, le niveau supervision s'appuie sur la fonction de surveillance. Cette fonction a pour but de surveiller le procédé à travers les informations provenant du niveau inférieur et de surveiller l'exécution du plan à partir des informations du niveau supérieur.

1.10.2 Le diagnostic de conduite

Le diagnostic réalisé dans le cadre de la surveillance du processus consiste principalement à localiser les éléments défectueux qui sont responsables de la perte des fonctions nécessaires au fonctionnement de l'installation, ceci en vue d'engager, en appliquant les procédures de conduite spécialisées, les actions permettant de ramener au mieux le système dans un état normal, tant du point de vue du potentiel productif que du respect des contraintes de sécurité ; ces actions peuvent être des opérations de maintenance opérationnelle (reconfigurations matérielles ou logicielles) ou l'émission des ordres d'arrêt des parties lésées du processus en vue du lancement des opérations correctives.

L'aide à la conduite se caractérise par des temps d'intervention et de réaction très courts qui imposent le recours au traitement en temps réel. Le problème consiste donc à surveiller des signaux qui évoluent généralement rapidement en fonction du temps, pour détecter des incidents d'exploitation et les résoudre c'est à dire reprendre l'exploitation.

Les techniques comme l'identification, l'estimation des paramètres, les diagrammes causes –conséquences, la reconnaissance des formes, les réseaux de neurones, les systèmes à base connaissances peuvent être utilisés.

1.10.3 Le diagnostic prédictif

Le diagnostic réalisé dans le cadre de la maintenance préventive (appelé diagnostic prédictif ou conditionnelle) consiste à diagnostiquer l'état de dégradation pour prévenir une défaillance.

L'aide à la maintenance conditionnelle se caractérise par des temps d'intervention relativement longs permettant le traitement en temps différé. Le problème consiste à surveiller des signaux qui évoluent généralement lentement en fonction du temps et à discriminer entre le vieillissement du matériel et l'apparition d'une défaillance.

Les techniques comme le traitement du signal, l'analyse de signatures, l'analyse de retour d'expérience, la modélisation mathématique, la reconnaissance des formes, les réseaux de neurones, les systèmes à base de connaissances peuvent être utilisés

1.10.4 Le diagnostic correctif

Le diagnostic réalisé dans le cadre de la maintenance corrective (appelé diagnostic correctif) consiste à localiser l'origine de la panne à partir des informations initiales (symptômes) et éventuellement des mesures complémentaires (test, observation, etc.). Le degré de finesse et plus important que pour l'aide à la conduite, c'est la raison pour laquelle on le trouve en amont, après avoir pris la décision d'arrêter le processus. Plus précisément le diagnostic de conduite implique en général une défaillance fonctionnelle alors que le diagnostic correctif indique la défaillance structurelle (élément en cause).

L'aide à la maintenance corrective se caractérise par l'arrêt du processus industriel, laissant ainsi toute la latitude au diagnostic. Le problème consiste à localiser l'origine de la panne à partir des informations initiales (symptômes) et éventuellement de mesures complémentaires. Le degré de finesse est ici plus important que pour l'aide à la conduite. En effet, le diagnostic pour l'aide à la conduite indique une défaillance fonctionnelle, alors que le diagnostic pour l'aide à la maintenance corrective indique une défaillance structurelle (élément en cause).

L'importance croissante de la fonction maintenance en industrie a entraîné l'apparition d'outils informatiques destinés à l'amélioration de sa productivité en termes de détection et réparation rapide donc d'amélioration du temps d'indisponibilité par une bonne organisation de la maintenance.

Ces exigences nécessitent un système de maintenance réactif et fiable. La difficulté rencontrée lors de l'informatisation de la maintenance corrective réside dans l'opération de diagnostic qui est un acte intelligent (raisonnement logique) et qui ne correspond à aucun algorithme mathématique. L'expert dispose d'un ensemble d'informations qui combinées avec la connaissance du processus qu'il possède, vont lui permettre d'aboutir à un diagnostic. Cette tâche est donc difficilement automatisable par des techniques classiques.

Pour ce type de diagnostic, les techniques des études de fiabilité, reconnaissance des formes, réseaux de neurones, système à base de connaissances peuvent être utilisées. La Figure 1.11 montre les différentes composantes d'un système de supervision. Le diagnostic et la supervision continus d'un système industriel permettent d'améliorer la productivité par l'augmentation de la disponibilité.

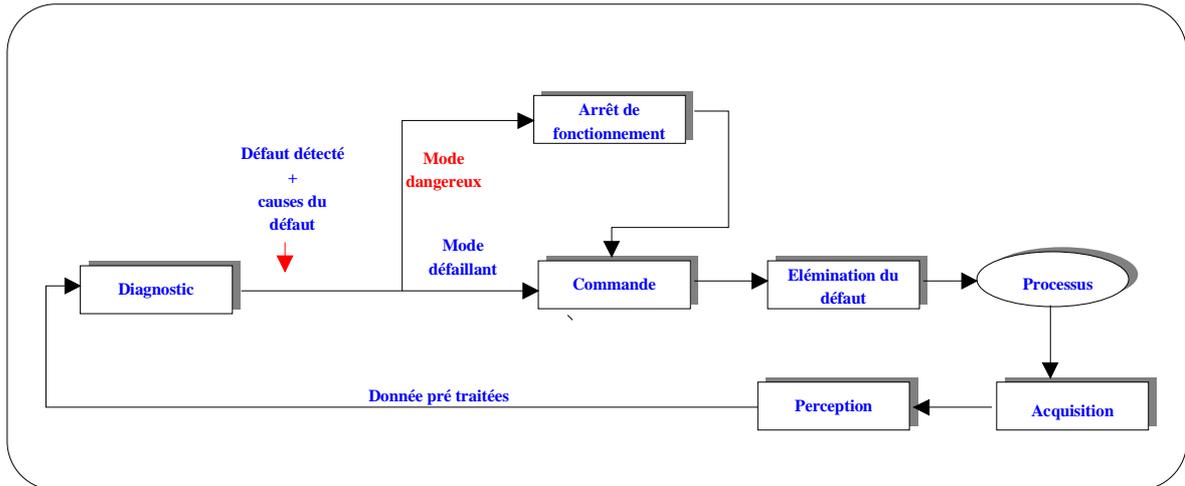


Fig.1.11. Système de supervision traitant l'apparition d'un défaut.

1.11 Comment aborder un problème de diagnostic des défaillances ?

Le diagnostic est une chaîne complexe où aucune action n'est indépendante de celle qui la précède comme de celle qui la suit [Dubuisson, 90]. Il demande l'exploitation de toute la connaissance "accessible" existante sur le système. Il convient de distinguer la connaissance "accessible" et la connaissance "disponible". La première repose sur les instruments d'observation dont on dispose, qu'ils agissent sur le présent ou sur le passé, c'est-à-dire qu'elle est basée sur toute l'information que recueillent les capteurs. La seconde quant à elle, concerne l'ensemble des informations qu'on pourrait atteindre s'il n'existait aucune limitation physique ou technologique.

La conception des solutions relatives aux problèmes posés doit répondre aux trois points essentiels de la surveillance : la détection, le diagnostic, la reprise. Ceci nécessite l'élaboration de modèles de bon fonctionnement et, également de modèles de pannes dans la majorité des cas.

La détection est pratiquement fondée sur une comparaison, en temps réel, du comportement effectif du système surveillé avec celui d'un modèle de bon comportement. La détection consiste à remarquer une incohérence entre le comportement du système physique et celui du modèle.

Le diagnostic, lui, est souvent fondé sur la recherche d'une cohérence entre le comportement (ou l'état) du système physique et celui d'un modèle de panne correspondant à des connaissances profondes.

La pratique du diagnostic industriel s'inscrit dans le processus de conduite de l'entreprise. En effet, les activités de conduite et de maintenance du processus industriel conduisent à entreprendre en pratique des opérations de diagnostic qui sont de nature très différentes et souvent conditionnées par la spécificité des systèmes et des moyens disponibles.

Les systèmes industriels sont caractérisés par une complexité importante (technologie d'automatisation, interactions importantes opérateurs-processus) qui complique davantage la tâche de l'opérateur chargé du diagnostic. Pour pallier cette difficulté, l'aide informatique devient indispensable et un large éventail de techniques ont été utilisées pour automatiser le diagnostic des systèmes industriels. A chaque type de diagnostic est associé un ensemble de techniques utilisables.

CHAPITRE II

Classification des méthodes de diagnostic.

CHAPITRE II.

Classification des méthodes de diagnostic

Résumé : *Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'état de l'art proprement dit des méthodes de diagnostic. Après une présentation de l'organisation du diagnostic, nous proposons une classification selon des principales approches de diagnostic : approche orientée mauvais /bon fonctionnement et approche de diagnostic interne /externe*

La grande diversité des technologies des systèmes industriels ne permet pas d'utiliser une méthode universelle qui posséderait tous les avantages et aucun inconvénient. Une présentation des trois grandes familles de méthodes de diagnostic s'avère donc indispensable. Nous présentons les méthodes par modélisation fonctionnelle et matérielle ou basées sur le mode de raisonnement, celles par modélisation physique et enfin par les dernières analyse des signatures externes.

2.1 Organisation de la procédure de diagnostic

La procédure de diagnostic de défaillances et de dégradations susceptibles d'affecter les différentes entités d'un processus industriel s'articule autour des étapes suivantes:

- L'extraction des informations nécessaires à la mise en forme des caractéristiques associées aux fonctionnements normaux et anormaux, à partir de moyens de mesures appropriées ou d'observations réalisées lors des rondes par le personnel de surveillance.
- L'élaboration des caractéristiques et signatures associées à des symptômes révélateurs de défaillances et de dégradations en vue de la détection d'un dysfonctionnement.
- La détection d'un dysfonctionnement par comparaison avec des signatures associées à des états de fonctionnements normaux et la définition d'indicateurs de confiance dans la détection.
- La mise en œuvre d'une méthode de diagnostic de la défaillance ou de la dégradation à partir de l'utilisation des connaissances sur les relations de cause à effet.
- La prise de décision en fonction des conséquences futures des défaillances et des dégradations. Cette prise de décision peut conduire à un arrêt de l'installation si les conséquences de la défaillance sont importantes pour la sécurité des personnes et des biens ou à une reconfiguration du fonctionnement du procédé pour éviter une perte de production en attendant le prochain arrêt de production le plus propice aux opérations de maintenance corrective.

La figure 2.1 représente l'ensemble des tâches à réaliser pour assurer un fonctionnement satisfaisant d'un processus industriel. Le flux d'information traversant ces différentes phases subit des transformations au niveau de chaque étape, jusqu'à la prise de la décision finale

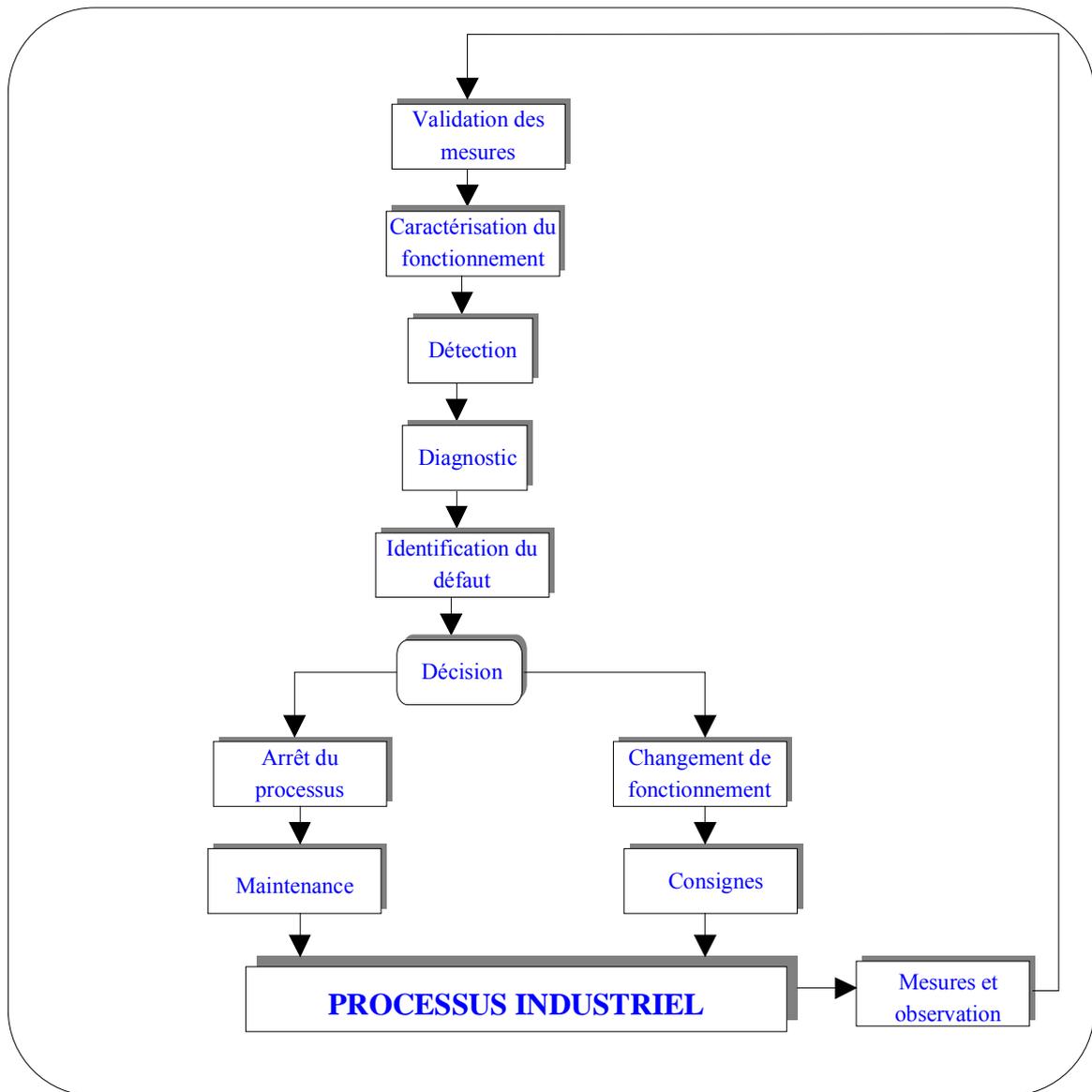


Fig.2.1. Différentes Phases du Diagnostic Industriel

2.2 Classification des méthodes de diagnostic

2.2.1 Introduction

Les méthodes de diagnostic de défaillances et de dégradations utilisées dans les différents secteurs industriels sont très variées et tiennent compte de la spécificité des matériels qui constituent leurs procédés. De plus, la grande diversité des technologies des systèmes industriels (mécanique, thermique, électrique, électronique, numérique...) ne permet pas d'utiliser une méthode universelle qui posséderait tous les avantages et aucun inconvénient. Aussi, plusieurs classifications des techniques du diagnostic ont été

proposées dans la littérature. C'est pour cela nous avons partagé les méthodes en trois grandes classes :

2.2.2 Classification par approche de diagnostic interne /externe

Cette classification consiste à séparer le diagnostic interne et le diagnostic externe [Zwingelstein, 95].

- *Le diagnostic externe (boite noire)* ne repose que sur la connaissance des grandeurs d'entrée/sortie du système. Citons : analyse des données, analyse statistique, reconnaissance des formes, réseaux de neurones, traitement du signal, diagnostic flou, systèmes experts à connaissances de surface. Elles s'appliquent dans les situations où la modélisation des mécanismes reliant les causes des défaillances et des dégradations ne sont pas d'intérêt économique compte tenu des enjeux recherchés.
- *Le diagnostic interne (boite blanche ou transparente)* repose sur des analyses topologiques (structurelles) ou fonctionnelles détaillées du système. Citons : Identification, estimation des paramètres, tests d'hypothèse, modélisation, reconnaissance des formes, analyse de systèmes, systèmes experts à connaissances profondes.

Les méthodes de diagnostic interne présentent une meilleure voie pour établir un diagnostic car elles s'appuient sur des modèles simulant le fonctionnement des matériels. La connaissance de ces modèles qui se basent de plus en plus sur les techniques de la valeur et de l'analyse fonctionnelle permettent d'utiliser des raisonnements inductifs ou déductifs pour identifier les causes de défaillance.

2.2.3 Classification par approche orientée mauvais /bon fonctionnement

Une autre typologie vise à séparer les approches utilisables à partir d'une expérience sur les défaillances du processus industriel, des approches applicables aux nouveaux systèmes [Chatain, 93].

2.2.3.1 Les approches orientées mauvais fonctionnement

Ces approches (MF) peuvent être assimilées aux techniques de diagnostic internes et externes reposant sur des analyses de mauvais fonctionnement. Une différenciation est faite entre les méthodes numériques et les méthodes symboliques.

Cette approche s'appuie principalement sur la liste des symptômes, la liste des défaillances et les liens entre les symptômes et les défaillances (figure 2.2). Elle est basée sur l'exploitation des relations de cause à effet entre les défaillances et les observations et fait appel aux connaissances de dysfonctionnement des systèmes, qui sont extraites d'historique d'exploitation ou d'analyses issues des études de sûreté de fonctionnement. Leur mise en œuvre nécessite l'encodage de listes exhaustives de symptômes, défaillances et liens symptômes-défaillances, ce qui pose des problèmes d'extraction des connaissances ou d'acquisition des données historiques pour tous les modes de fonctionnement en particulier pour des systèmes nouveaux.

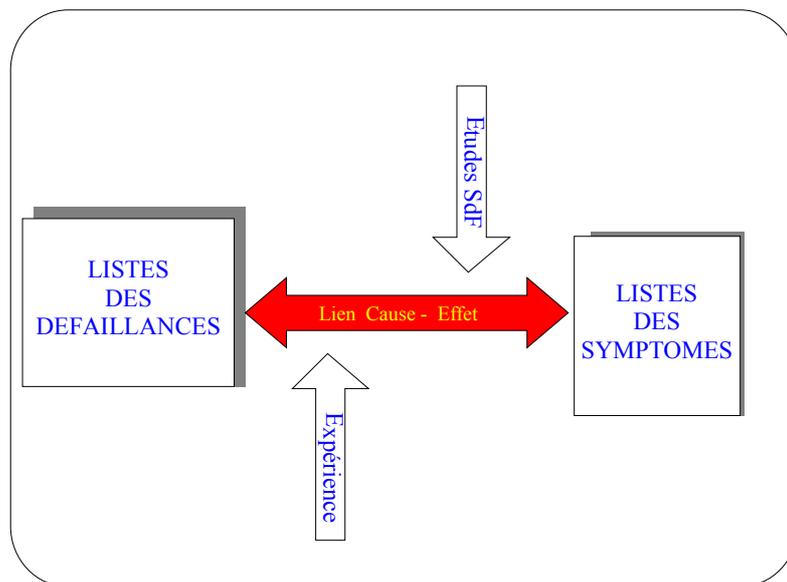


Fig.2.2. Principe de l'approche "mauvais" fonctionnement

2.2.3.2 Les approches orientées bon fonctionnement

Ces approches (BF) s'appuient sur une description profonde du système à diagnostiquer et sur une observation de son comportement : si le comportement observé diffère du comportement prévu (à partir de sa description), le problème du diagnostic consiste à déterminer quels composants du système, en les supposant défaillants, peuvent expliquer la différence entre les comportements observés et les comportements corrects. Il faut donc déduire une différence de structure à partir de la différence de comportement. Dans cette approche les symptômes sont listés mais les liens et les défaillances sont déduites à l'aide du modèle comme l'illustre la figure 2.3.

A la différence de la première approche, pour résoudre le problème de diagnostic, les seules connaissances sont la description du système (connaissances structurelles, fonctionnelles, ...) et de son comportement observé. Le raisonnement se fait à partir des

observations disponibles prélevées sur le système réel et de prédictions obtenues par simulation grâce au modèle du système. Toute différence relevée entre les observations et les prédictions est perçue comme un dysfonctionnement au niveau du système réel.

Ces contradictions décelées entre les observations et les prédictions sont appelées symptômes et reflètent la présence d'une ou plusieurs défaillances. Suivant le type de raisonnement mis en œuvre, les connaissances comportementales utilisées pour la prédiction des valeurs peuvent être plus ou moins profondes.

Le diagnostic s'intègre dans le cadre plus général de la surveillance et de la supervision [Combastel, 00].

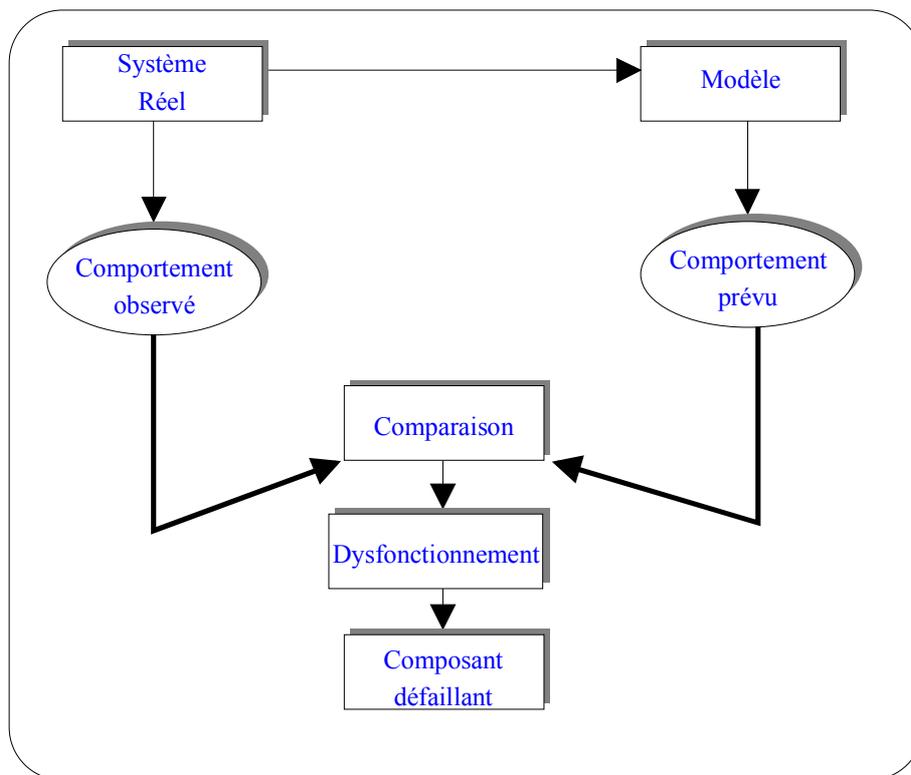


Fig.2.3. Principe de l'approche "bon" fonctionnement

2.2.3.3 Conclusion

Dans une approche orientée BF, le modèle utilisé décrit le fonctionnement normal sans défaut de tout ou partie du système à diagnostiquer. La non-cohérence avec un modèle de BF permet de montrer qu'une observation n'appartient pas au domaine de bon fonctionnement associé au modèle. Cela revient à résoudre un problème de détection sur tout ou partie du système physique à diagnostiquer. Un ensemble de modèles BF relatifs à plusieurs sous-systèmes permet de détecter la présence de défauts dans chacun des sous-systèmes modélisés, pris indépendamment. Une approche BF multi-modèles permet donc

de déterminer les sous-systèmes en défaut, ce qui correspond à un premier niveau de localisation.

Dans une approche orientée MF, le modèle utilisé décrit un fonctionnement anormal du système physique à diagnostiquer. Par exemple, un modèle décrivant le comportement du système en présence d'un défaut particulier est un modèle MF. La non-cohérence avec un modèle de mauvais fonctionnement permet de montrer qu'une observation n'appartient pas au domaine de mauvais fonctionnement associé au modèle. Cela revient à rejeter la possibilité d'occurrence de la ou des anomalies décrites par le modèle MF. Une approche MF s'inscrit donc dans une démarche de localisation.

Même si une approche BF multi-modèles peut résoudre un problème de localisation, une approche BF (mono-modèle) résout fondamentalement un problème de détection, alors qu'une approche MF résout un problème de localisation. La figure 2.4. permet de donner un bilan sur les approches BF et MF.

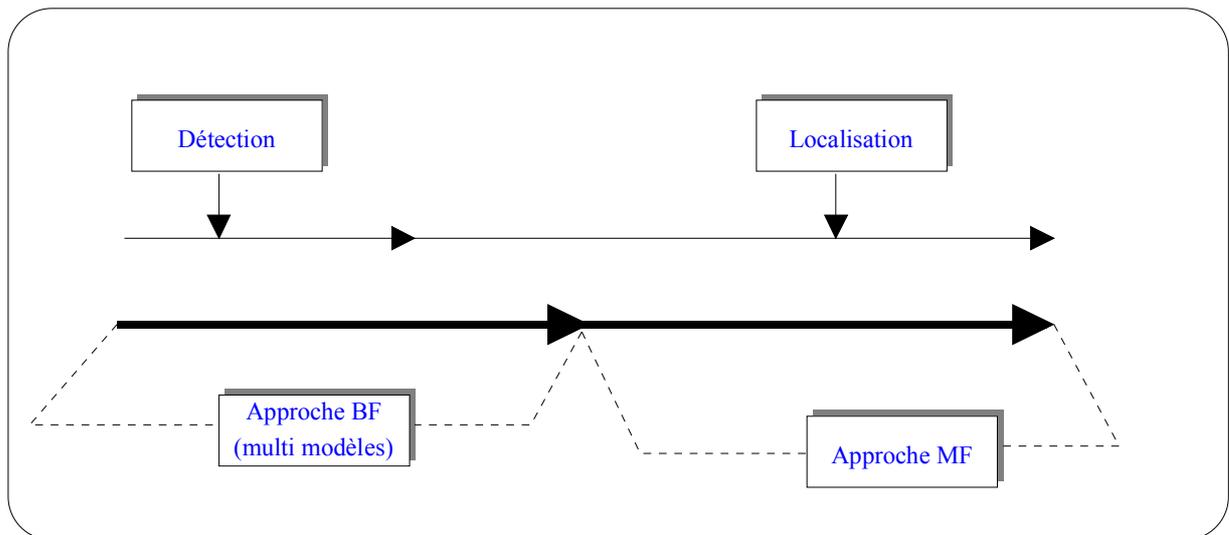


Fig.2.4. Bilan sur les approches BF et MF

Les techniques de diagnostic employées dans les applications industrielles proviennent des domaines tels que la simulation, la modélisation, l'analyse statistique ou de l'intelligence artificielle. Nous décrivons, dans le cadre du diagnostic interne, l'approche par modélisation qui repose sur les méthodes issues de l'analyse des systèmes ou sur les méthodes de modélisation physique. Dans le cadre du diagnostic externe, on retrouve les techniques de reconnaissance des formes et les réseaux de neurones. Enfin, l'approche à base de connaissances qui correspond à des méthodes externes ou internes de diagnostic suivant la nature des connaissances utilisées est présentée.

L'analyse des implantations des systèmes d'aide au diagnostic dans les différents secteurs industriels [Zwingelstein, 95] fait ressortir que la majorité d'entre eux font appel aux systèmes experts suivis par ceux basés sur la reconnaissance des formes. Par contre les réseaux de neurones se diffusent plus lentement dans le secteur industriel.

2.3 Les principales méthodes de diagnostic

2.3.1 Introduction

Les méthodes de diagnostic des défaillances utilisées dans les différents secteurs industriels sont très variées. Leur principe général consiste à confronter les données relevées au cours du fonctionnement réel du système avec la connaissance que l'on a de son fonctionnement nominal ou de ses fonctionnements défaillants. La forme, sous laquelle se présente la connaissance sur le système, conditionne les différentes méthodes utilisées pour le diagnostic. Elles peuvent être groupées en trois grandes familles : les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle ou méthodes basées sur le mode de raisonnement, les méthodes de diagnostic par modélisation physique et enfin les méthodes de diagnostic par analyse des signatures externes.

D'autres classifications comme celle présentée dans [Venkatasubramanian et al, 03a], [Venkatasubramanian et al, 03b] et [Venkatasubramanian et al, 03b] qui repose sur le type d'information introduite initialement dans le système du diagnostic existent.

2.3.2 Méthodes basées sur le mode de raisonnement

L'analyse des systèmes est un processus orienté vers l'acquisition et le traitement d'informations spécifiques au système et pertinentes vis-à-vis d'un objectif donné, ce processus aboutit à l'obtention d'un modèle du système ; la modélisation, résultat de l'analyse fonctionnelle et /ou dysfonctionnelle [Chatain, 93] et [Zwingelstein, 95], permet en particulier la résolution des problèmes de diagnostic des défaillances.

2.3.2.1 Méthodes d'analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle permet d'établir de façon lisible et exhaustive les relations fonctionnelles à l'intérieur et à l'extérieur du système à travers la description du comportement du système sous l'angle structurel et fonctionnel. Elle constitue particulièrement un préalable de l'analyse de la valeur et de la sûreté de fonctionnement en apportant les bases concrètes, logiques et exhaustives à leur mise en œuvre.

Les méthodes les plus courantes sont celle qui reposent sur une décomposition arborescente (Figure 2.5) pour représenter le fonctionnement d'un système. Cette décomposition sert à visualiser et établir les liens entre les différentes fonctions remplies par le système et elle est guidée par la mise en oeuvre des méthodes d'analyse fonctionnelle.

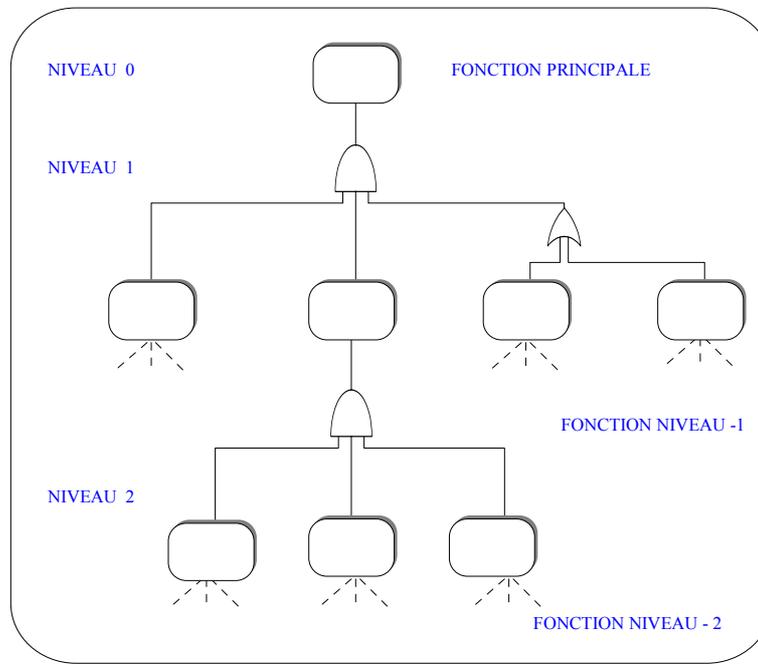


Fig.2.5. Arbre fonctionnel

Cependant, en raison de la diversité des matériels rencontrés dans les processus industriels complexes (matériels mécaniques et électriques, régulations,...), il n'existe pas de méthode unique d'analyse fonctionnelle.

Les particularités des méthodes que nous avons utilisées permettent de réaliser ultérieurement une analyse dysfonctionnelle fiable et exhaustive. En effet, par la structuration et la clarté qu'elles apportent dans la compréhension du fonctionnement du système, elles présentent des avantages indiscutables pour faciliter la recherche des liens entre les causes et les effets de défaillances. En plus, notre choix dépend étroitement de l'objectif visé, celui de la réalisation du diagnostic des défaillances

Les systèmes modernes sont de plus en plus complexes et font souvent appel à de nombreuses disciplines technologiques (automatique, informatique, électronique, mécanique,...). Il est donc nécessaire de recourir à plusieurs outils de description fonctionnelle pour les modéliser :

Ainsi, à titre d'exemple, nous présentons la méthode SADT (Structured Analysis and Design Technic)

SADT, sera utilisée pour la modélisation de notre système. Les apports essentiels de l'utilisation de SADT relèvent de la simplicité de communication, la modularité, et la hiérarchie offerte par son langage, elle permet surtout la représentation des flux.

SADT [I.G.L. Technology, 89] et [Lissandre, 91] est une méthode d'analyse structurée permettant de représenter graphiquement tout processus de traitement d'informations ou activités. Bien qu'elle permet également de modéliser l'ensemble des données d'un système (on parle alors de datagrammes), son usage pour l'analyse des systèmes physiques de production se limite aux activités.

Le principe de base repose sur la décomposition hiérarchique du système étudié en activités. Un modèle SADT est composé de diagrammes d'activités appelés actigrammes (figure 2.6) qui contiennent des boîtes interconnectées, pour lesquelles on représente l'activité (traitement) et les données telles que : les *Entrées* sont transformées en *Sorties*, par le *Mécanisme* (support de l'activité) et sous l'influence des *Contrôles*. Le système est alors désigné globalement par un actigramme contenant une seule boîte.

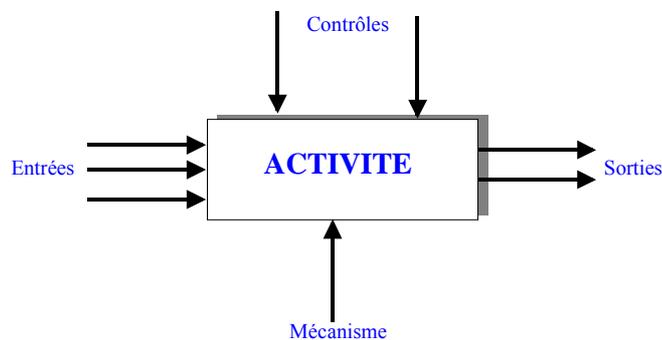


Fig.2.6. Boîte d'actigramme

Cette activité va être décomposée en sous-activités pouvant être à nouveau décomposées, ceci permet d'aboutir progressivement à une définition du système représentée sur plusieurs plans (Figure 2.7), avec la précision et la clarté recherchée.

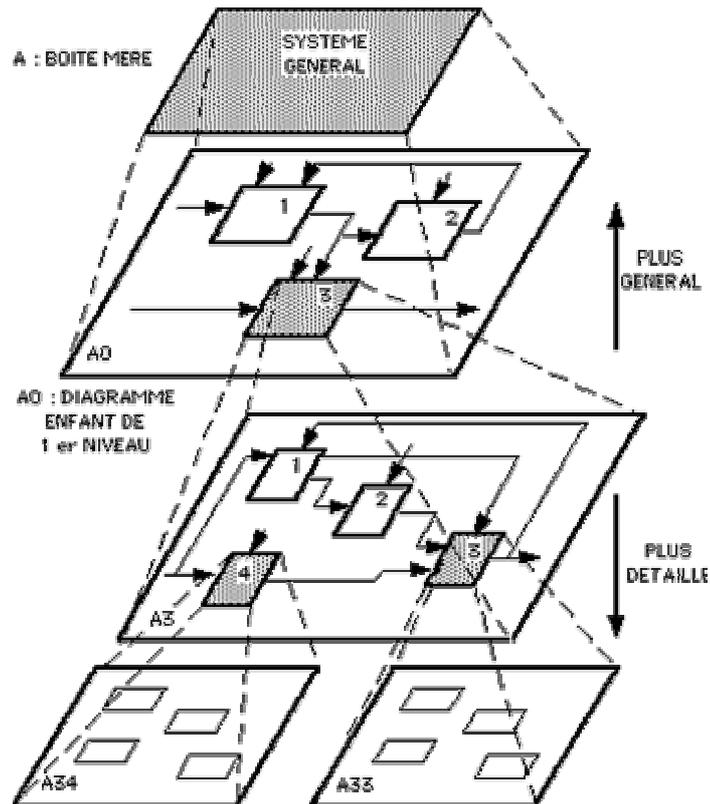


Fig. 2.7. Modèle SADT

2.3.2.2 Méthodes d'analyse dysfonctionnelle

L'analyse dysfonctionnelle s'appuie sur une méthodologie rigoureuse et des outils puissants qui permettent la modélisation des défaillances fonctionnelles. Ainsi, les méthodes mises au point pour les études des risques et de la sûreté de fonctionnement permettent la résolution des problèmes de diagnostic de défaillances. Le principe de ces méthodes consiste à établir a priori et de manière formelle les liens entre les causes et leurs effets mesurables par les opérateurs ou les systèmes de traitement de l'information.

2.3.2.2.1 Méthodes déductives

Les méthodes déductives de diagnostic correspondent à une approche ascendante où l'on identifie toutes les combinaisons d'événements élémentaires possibles qui entraînent la réalisation d'un événement unique indésirable, dans cette catégorie on trouve la méthode des Arbres de Défaillances ou **AdD**

L'AdD [Limnios, 91] et [Villemeur, 88] est une technique d'analyse basée sur un raisonnement déductif ayant pour objectif de représenter graphiquement au moyen d'une structure arborescente et des portes logiques les diverses combinaisons possibles d'événements qui entraînent la réalisation d'un événement unique non souhaité.

La construction d'un arbre de défaillance utilise un symbolisme spécifique (fig 2.8) et s'appuie sur des principes et des règles précises. Sa mise en oeuvre commence avec l'identification de l'événement indésirable ensuite la recherche des événements intermédiaires pouvant conduire à son occurrence. Cette procédure est répétée jusqu'à atteindre les événements élémentaires appelés événements de base.

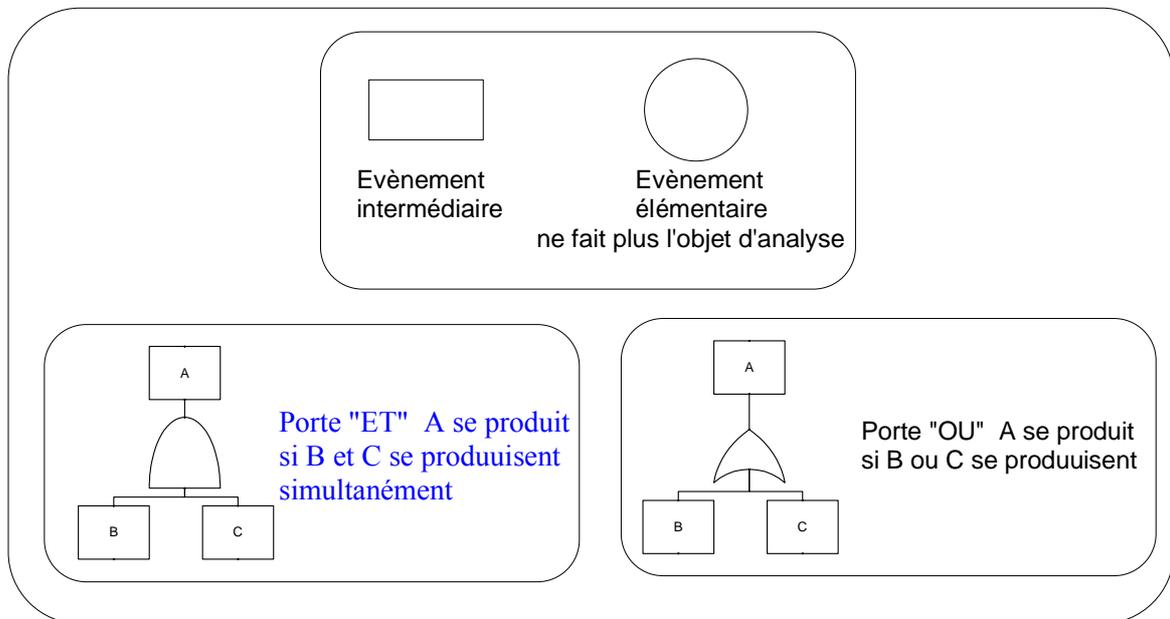


Fig.2.8. Éléments de base pour le développement du modèle Arbre de Défaillance

Ainsi, l'arbre de défaillance est constitué de niveaux successifs d'événements, tels que, chaque événement à un niveau donné est généré à partir de combinaisons logiques d'événements de niveau inférieur (fig 2.9)

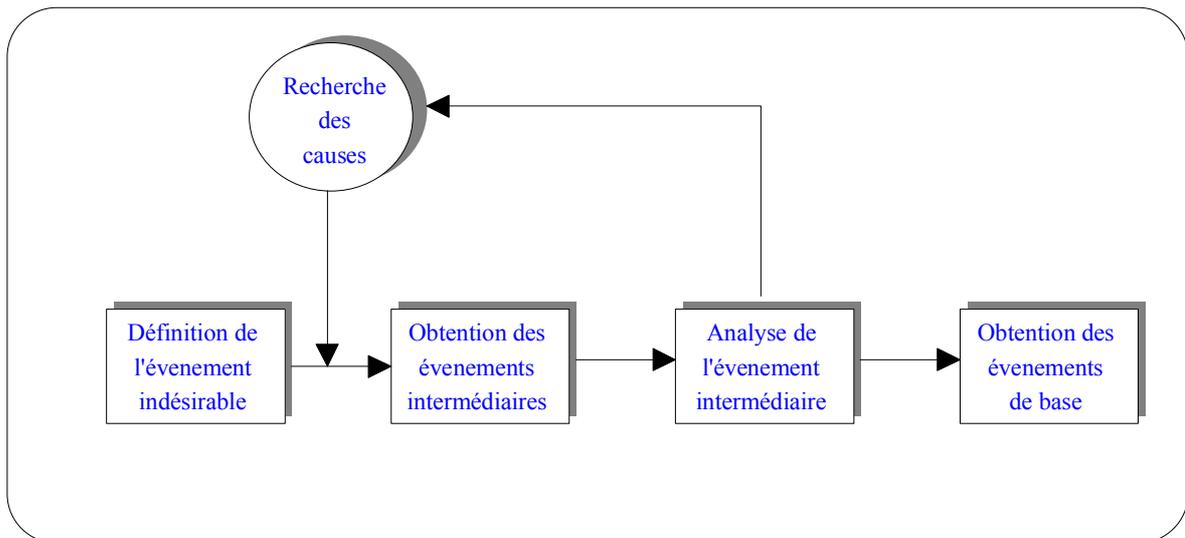


Fig.2.9. Elaboration de l'Add

L'analyse à base d'AdD se compose de 4 étapes [Venkatasubramanian et al, II, 03]: la définition du système, la construction de l'AdD proprement dite, l'évaluation qualitative et enfin l'évaluation quantitative qui consiste à trouver les coupes minimales : l'ensemble minimal des évènements qui entraîne la défaillance du système. La probabilité d'occurrence des évènements élémentaires est utilisée pour calculer la probabilité de défaillance du système.

Le diagnostic avec les AdD est formulé comme une recherche dans un espace d'état fini contenant l'ensemble des défaillances. À partir de l'état initial (évènement racine), l'algorithme de recherche applique les opérateurs logique et transforme l'état initial à un résultat à déduire, ensuite les différents chemins possibles sont parcourus pour aboutir à un évènement élémentaire vérifié à l'instant considéré, si il n'y a aucune alors le système est en état normal de fonctionnement [Bentrcia, et al, 04] et [Nold, 91] .

2.3.2.2 Méthodes inductives

Pour les méthodes inductives, la démarche est bien sur inversée puisque l'on part de l'évènement indésirable et l'on recherche ensuite par une approche descendante toutes les causes possibles. A titre d'exemple nous exposons la méthode la plus couramment utilisée l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et de leur Criticité)

L'AMDEC est une méthode d'analyse critique qui consiste à identifier de façon inductive et systématique les risques des dysfonctionnements d'un système puis d'en rechercher les origines et leurs conséquences [Mouss, 02] et [Villemeur, 88]

Avant d'aborder l'analyse proprement dite, il est indispensable de définir le système et la phase de fonctionnement pour laquelle l'étude sera menée, et d'identifier les fonctions des éléments du système tout en fixant le niveau de décomposition. La mise en oeuvre de l'analyse consiste à analyser les mécanismes de défaillances et ce à travers :

- L'identification des modes de défaillance de tous les éléments du système.
- La recherche des causes possibles de défaillance, pour chaque mode de défaillance identifié.
- La recherche des effets sur le système et sur l'utilisateur, pour chaque combinaison cause-mode de défaillance.
- La recherche des détections possibles, pour chaque combinaison cause-mode de défaillance.

L'analyse se poursuit par l'évaluation de la criticité des défaillances de chaque combinaison cause-mode-effet et la proposition des actions ou mesures correctives destinées à diminuer la criticité des défaillances. Les résultats de l'analyse sont présentés sous forme d'un tableau à colonnes [Union Technique de l'Électricité, 86] et [Mouss et al, 04] regroupant les principaux critères analysés (figure 2.10).

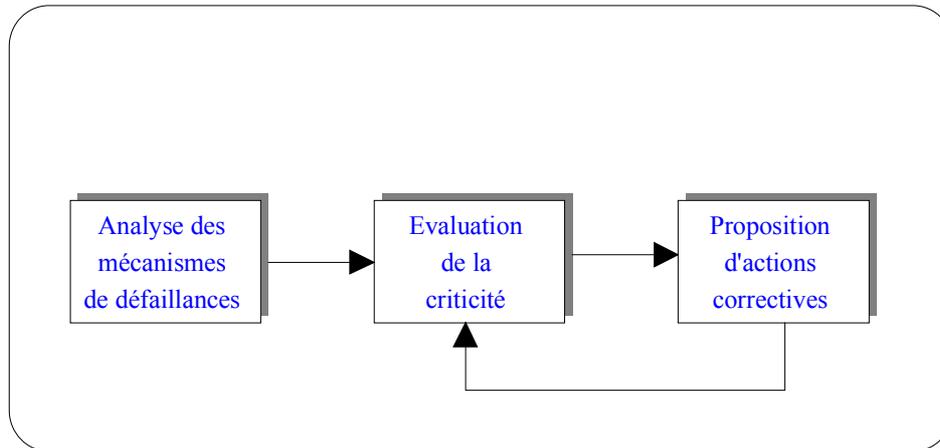


Fig.2.10.Elaboration de l'AMDEC

2.3.3 Modélisation physique

2.3.3.1 Introduction

Contrairement à la modélisation des connaissances issues de l'analyse des systèmes, la modélisation physique des processus prend en compte les équations régissant les phénomènes internes par la représentation du comportement dynamique.

L'identification est fondée sur la détermination d'un modèle mathématique pour différents couples d'entrées/sorties et au sens d'un critère donné.

Les méthodes de diagnostic par modélisation physique proviennent des domaines de l'automatisation des procédés et de la simulation numérique. Elles impliquent une connaissance approfondie du fonctionnement et la profondeur du diagnostic fourni par ces méthodes dépendra du degré de finesse de la modélisation retenue [Brunet, 90].

Dans le domaine de l'automatisme, la détection des problèmes de défaillance et de pannes est connue sous le nom de détection et identification de défaillances basée sur un modèle. Toutes les méthodes de diagnostic sont structurées en deux étapes, la première génère une différence entre l'état actuel et l'état prévu, cette différence est nommée aussi un résidu, la deuxième étape est le choix d'une règle de décision pour le diagnostic. La détection des résidus nécessite un mécanisme de redondance.

2.3.3.2 Redondance analytique

Il existe deux types de redondance : redondance analytique et redondance physique. La redondance physique est basée sur la redondance des capteurs. Elle a été utilisée largement dans le domaine du contrôle des systèmes à hauts risques tel que les aéroports et les navettes spatiales, mais son utilisation reste limitée à cause des coûts supplémentaires et l'espace additionnel nécessaire.

La redondance analytique est basée sur un ensemble d'équations mathématiques reliant l'état du système aux variables d'entrées et de sorties. Un schéma général concernant son utilisation est présenté sur la figure 2.11. L'idée de base de la redondance analytique est de comparer le comportement actuel du système avec son modèle pour l'identification. Une différence identifiée comme résidu peut être utilisée pour la détection des défaillances. Les résidus devront être proches du zéro lorsqu'il n'y a pas de défaillance. La génération de tel résidu est basée sur un modèle dérivé analytiquement [Chiang et al, 00].

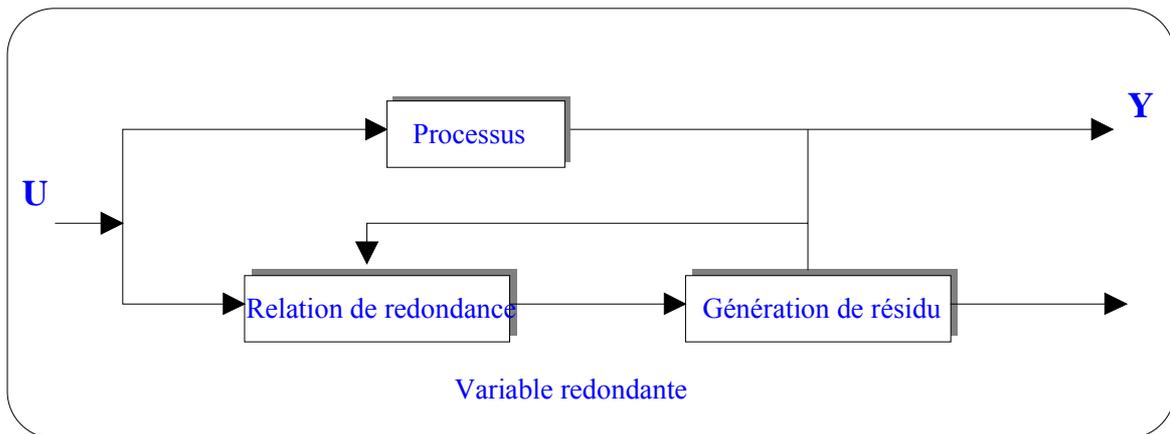


Fig.2.11. Principe des méthodes basées sur la redondance analytique

Les méthodes basées sur la redondance analytique donnent des résidus qui sont insensibles aux incertitudes et le contraire pour les défaillances. Une des techniques bien connues pour réaliser cette indépendance est la séparation des perturbations. Dans cette approche toutes les incertitudes sont traitées comme des perturbations et des filtres sont conçus pour séparer l'effet des défaillances et des perturbations pour permettre leur distinction [Venkatasubramanian and al, 03a].

2.3.3.3 Estimation de paramètres

Le diagnostic de changement de paramètres qui ne sont pas mesurés directement demande une méthode d'estimation du paramètre en ligne. Des modèles paramétriques précis sont nécessaires, généralement exprimés sous formes d'équation différentielle ordinaires ou partielles. Les défaillances causées par des changements des paramètres liées

au temps peuvent être traitées par la méthode d'estimation de paramètres. La procédure est comme suit : Obtenir le modèle du processus en se basant seulement sur les entrées et les sorties mesurées sous la forme

$$Y(t)=f(u(t), \theta) \quad (2.1)$$

Les paramètres du modèle θ sont estimées à l'aide des valeurs de $y(t)$ et $u(t)$. θ est relié aux paramètres réels du processus par $\theta=g(\varphi)$, le changement dans le paramètres φ donné par $\Delta\varphi$ est calculé par cette relation ensuite une règle de décision est utilisée [Venkatasubramanian and al 03a].

2.3.4 Méthodes de diagnostic par analyse des signatures externes

Ces méthodes s'appliquent dans les situations où la modélisation des mécanismes reliant les causes des défaillances n'est pas techniquement possible. Elles sont basées sur le retour d'expérience. Parmi ces méthodes on trouve la reconnaissance des formes, les réseaux de neurones et les systèmes à base de connaissances.

2.3.4.1 Reconnaissance des formes

Méthodes de diagnostic par analyse des signatures externes s'appliquent dans les situations où la modélisation des mécanismes reliant les causes des défaillances n'est pas techniquement possible. Elles sont basées sur le retour d'expérience. En effet, le diagnostic des défaillances est essentiellement un problème de classification [Venkatasubramanian and al, 03c], donc sa traduction sous forme d'un problème classique de reconnaissance de forme est possible.

Les méthodes de reconnaissance des formes sont des outils performants lorsqu'on s'intéresse à une automatisation du diagnostic des systèmes industriels, ceci en raison de leur capacité à réaliser la discrimination des signatures externes généralement interprétées par les spécialistes des matériels surveillés. En effet certaines de ces méthodes sont implantées dans des systèmes de surveillance vibratoire des machines tournantes [Dubuisson, 90].

La reconnaissance des formes est une science de définition d'algorithmes qui permettent de classer les objets (ou formes) par comparaison à des prototypes (objets types). Il s'agit de définir à quelle forme-type une forme observée ressemble le plus. Le processus de reconnaissance des formes s'effectue souvent en deux étapes :

- étape d'apprentissage qui consiste à déterminer l'espace de représentation, à définir l'espace de décision (classes) et à mettre au point une règle de discrimination aboutissant à des frontières de décision entre les classes;
- étape de décision qui consiste à associer un nouveau vecteur à l'une des classes pré-définies en appliquant la règle de décision élaborée lors de l'étape d'apprentissage.

Le diagnostic par reconnaissance des formes consiste à déterminer le degré de similarité entre des formes fournies par des capteurs et des formes obtenues préalablement par apprentissage, ce qui permet de détecter l'apparition d'un défaut et d'apprécier le degré de bon fonctionnement du système.

2.3.4.2 Réseau de neurones

Les principes de fonctionnement des réseaux de neurones sont inspirés du cerveau humain. Le calcul neuromimétique, né du rapprochement de la biologie et de l'informatique, présente des perspectives d'applications particulièrement intéressantes pour l'aide au diagnostic. En effet, cette méthode possède des propriétés similaires à celles de reconnaissance des formes pour la classification automatique de signatures [Dubuisson, 90], [Bergot, 95] et [Zwingelstein, 95] .

Un réseau de neurones artificiels est composé d'automates connectés en réseau et fonctionnant en parallèle dans lequel les connexions contiennent la connaissance du domaine particulier. Les décisions sur une connaissance sont prises dans les interconnexions et en relation avec les fonctions de transition.

Par ailleurs, un intérêt considérable a été accordé à l'application des réseaux de neurones pour le diagnostic des défaillances dans la littérature [Zwingelstein, 95]. Ils ont été proposées pour les problèmes d'approximation de fonction et de classification. Les réseaux de neurones utilisés pour le diagnostic sont classées selon deux critères : l'architecture du réseaux (sigmoïde, radial. etc) et la stratégie d'apprentissage (supervisé ou non supervisé).

Dans l'apprentissage supervisé, le réseau est configuré ce qui signifie que le problème est réduit à l'estimation des poids de connexions (figure. 2.12). Les poids sont ajustées en utilisant explicitement la différence entre les valeurs actuelles et désirées pour guider la recherche. Ce qui fait des réseaux à apprentissage supervisé un bon choix pour la classification des défaillances, car le réseau est capable d'établir des frontières de classification dans l'espace. La stratégie la plus redondante pour l'apprentissage supervisé est l'algorithme de retro propagation. Des modifications ont été proposées pour les réseaux

standards tel que l'utilisation des fonctions radiales, ce qui permet de générer des espaces de décision bornés [Chebira, 02].

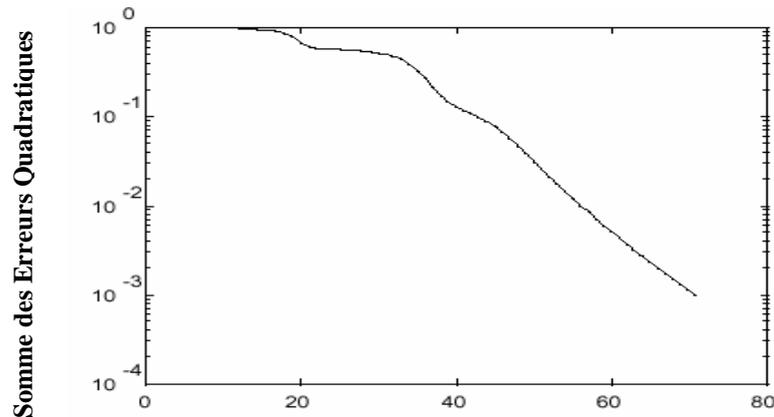


Fig.2.12. Diminution de l'erreur quadratique avec le temps d'apprentissage

2.3.4.3 Systèmes experts ou systèmes a base de connaissance

L'extraction des caractéristiques qualitatives basées sur des règles est largement utilisé dans les systèmes experts. Un système expert est un système spécialisé qui résout les problèmes dans un domaine d'expertise spécifique. Les étapes principales dans le développement d'un système expert sont :

- Acquisition de connaissance.
- Choix de représentation de la connaissance.
- Codage des connaissances sous forme d'une base de connaissance.
- Développement du moteur d'inférence et les interfaces d'entrées/ sorties.

Il existe de nombreux articles qui traitent de l'application des systèmes experts dans le diagnostic des défaillances [Lunze, 91], [Hogan et al, 91] et [chiang et al, 00]. La figure 2.13 présente la structure générale d'un système expert pour la surveillance industrielle [Bose, 88].

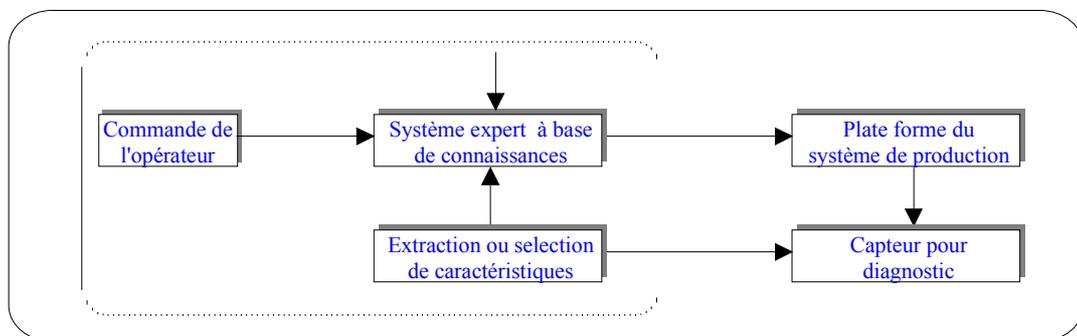


Fig. 2.13. Structure générale d'un système expert temps réel pour la surveillance.

Le diagnostic industriel est devenu depuis la dernière décennie un des domaines privilégiés d'applications pour les systèmes à base de connaissances ou systèmes experts [Zwingelstein,, 95]. Ceci confirme que la nature du problème à résoudre lors de l'établissement d'un diagnostic relève particulièrement bien des possibilités de l'intelligence artificielle. En effet, les systèmes possèdent la propriété essentielle de pouvoir restituer à des non-experts les connaissances acquises par les spécialistes d'un domaine technique précis. Dans la plupart des cas, les connaissances utilisées pour le développement d'un système expert d'aide au diagnostic reposent sur des relations entre les causes et les effets observés pour chaque défaillance. Avec ce mode de connaissance, les systèmes experts d'aide au diagnostic appartiennent à la famille des méthodes de diagnostic externe.

Cependant, l'utilisation de modélisation fonctionnelle décrivant les comportements détaillés des composants de systèmes complexes permet également le développement de systèmes experts appartenant à la famille des méthodes de diagnostic interne [Zwingelstein,, 95].

Contrairement aux méthodes précédemment décrites, les systèmes à base de connaissances, au moyen des éléments relatifs à la résolution d'un problème, sont capables de reproduire les différentes étapes du raisonnement conduit pour établir un diagnostic.

L'analyse et la modélisation des connaissances constituent des éléments majeurs lors du développement des systèmes experts. Cependant, différents types de connaissances sont modélisables et formulables dans ces systèmes d'aide au diagnostic. Le développement des applications dans ce domaine a mis en évidence la nécessité de s'orienter vers les techniques de diagnostic basés sur la modélisation et les connaissances profondes. En particulier, l'utilisation de la modélisation fonctionnelle décrivant les comportements détaillés des composants du système.

2.4 Conclusion

Les méthodes de diagnostic présentées dans ce chapitre ont pour finalité d'aider les exploitants à prendre rapidement des décisions sûres pour optimiser la disponibilité des moyens de production.

L'analyse des implantations des systèmes d'aide au diagnostic dans les différents secteurs industriels fait ressortir que la majorité d'entre eux font appel aux systèmes experts suivis par ceux basés sur la reconnaissance des formes. Par contre les réseaux de neurones se diffusent plus lentement dans le secteur industriel [Zwingelstein, 1995].

Les partisans de l'approche à base de connaissances en diagnostic argumentent sur le fait qu'elle répond bien aux problèmes soulevés :

- manipulation d'une grande quantité d'information, d'où risque d'explosion combinatoire que les systèmes experts savent dominer,
- manipulation de données non homogènes,
- manipulation de données incomplètes,

Notre objectif dans ce cadre consiste à définir une approche pratique pour la réalisation d'un système à base de connaissances pour l'aide au diagnostic des défaillances et ce à partir de l'acquisition des connaissances issues de l'analyse fonctionnelle et matérielle. Elles seront extraites précisément des modèles de sûreté de fonctionnement.

En effet, la démarche d'analyse de sûreté de fonctionnement est extrêmement puissante pour la résolution des problèmes de diagnostic de défaillances des procédés industriels. Les connaissances contenues dans les modèles de sûreté de fonctionnement, en plus de la nature même du problème à résoudre, justifient l'approche adoptée dans notre travail.

CHAPITRE III
Systèmes à base de
connaissances et diagnostic

CHAPITRE III.

Systèmes à base de connaissances et diagnostic

Résumé : Dans ce chapitre nous présentons dans une première étape les systèmes à base de connaissances (BC) et d'autre part l'outil de développement utilisé : G2, le générateur de système expert.

Les approches de diagnostic à base de connaissances comme l'approche empirique, l'approche à base de modèle l'approche mixte sont également présentées

Le système expert G2 est considéré comme un environnement de programmation général utilisant conjointement une programmation à base de règles, une programmation orientée-objets, et ne programmation procédurale

3.1 Introduction

Les capacités offertes par les systèmes à base de connaissances (BC) ne peuvent que confirmer l'intérêt de leur utilisation pour le diagnostic et plus généralement dans les domaines touchant à la vie industrielle.

Parmi les travaux de recherche oeuvrant dans cette optique, c'est-à-dire pour la réalisation des systèmes à base de connaissances pour le diagnostic, nous nous intéressons particulièrement à l'analyse et la modélisation des connaissances relatives à un système pour le diagnostic ultérieur de ses défaillances.

En effet, la résolution du problème de diagnostic dans le cadre de l'approche à BC fait appel aux connaissances relatives au système qui sont de natures différentes. Les systèmes à BC pour le diagnostic utilisent d'une part, des connaissances profondes qui décrivent le fonctionnement, la structure et le comportement et d'autre part, des connaissances de surface qui caractérisent les liens entre les défaillances et les observations.

3.2 Les systèmes à base de connaissances

3.2.1 Introduction

Les systèmes experts ou systèmes à base de connaissances [Black, 88][Pomerol, 88] sont des systèmes informatiques relevant des techniques de l'intelligence artificielle, destinés à résoudre un problème précis à partir d'une analyse et d'une représentation des connaissances et du raisonnement d'un (ou plusieurs) spécialiste(s) de ce problème.

3.2.2 Structure d'un système à BC

La structure de ces systèmes diffère notablement de celle des systèmes informatiques classiques, un parallèle avec un système classique fait mieux ressortir les différences essentielles (Tableau 3.1.). La nouveauté réside dans la différence des démarches.

ANALYSE	Interprétation	Analyse de données (quantitatives, qualitatives, visuelles,...) dans le but de dégager leur signification.
	Diagnostic	Identification de l'organe (mécanique, humain) hors d'état ou en fonctionnement anormal.
	Contrôle (monitoring)	Surveillance et interprétation de données et de signaux.
	Prévision	Indication du futur prévisible à partir de données présentes et passées.
SYNTHESE	Planification	Détermination de choix d'actions en vue d'atteindre des buts fixés.
	Conception	Élaboration et configuration de matériel ou de produit en respectant certaines contraintes.
ANALYSE ET SYNTHESE	Formation	Enseignement.

Tab.3.1. Typologie des applications des systèmes experts

Le regroupement des applications par grandes catégories consiste indépendamment du secteur dans lequel les projets ont vu le jour, à caractériser le type de problème traité, autrement dit à définir la tâche réalisée par le système. Dans ce contexte, le tableau 3.2 illustre la définition de la typologie

Système classique Traitement de données	Système symbolique Traitement de connaissances
Données en général des valeurs numériques	Faits données Connaissances opérateurs de transformation de faits

Programme Algorithme de résolution	Contrôle (moteur d'inférences) Programme effectuant la recherche de la solution
--	---

Tab. 3.2. Structures des systèmes classique et symbolique

Dans l'informatique classique, on effectue la description de la méthode complète de résolution du problème, avec l'enchaînement de toutes ses étapes, c'est l'algorithme que la machine exécute pas à pas. Dans cette nouvelle discipline, on fournit au système des composants élémentaires de résolution du problème, à charge pour lui d'en assurer l'enchaînement approprié pour parvenir à la solution.

Un système expert est conçu suivant une architecture particulière (Figure 3.1.) composée principalement des éléments suivants :

Une base de connaissances : C'est un regroupement des connaissances (description des objets, lois et principes, règles de l'art, méthodes et éléments de raisonnement,...) relatives à la résolution des problèmes d'un domaine technique particulier.

Un mécanisme de contrôle (ou moteur d'inférence) : C'est un programme effectuant la recherche d'une solution d'un problème donné (défini par le contenu d'une base de faits) en sélectionnant et appliquant des opérateurs contenus dans la base de connaissances.

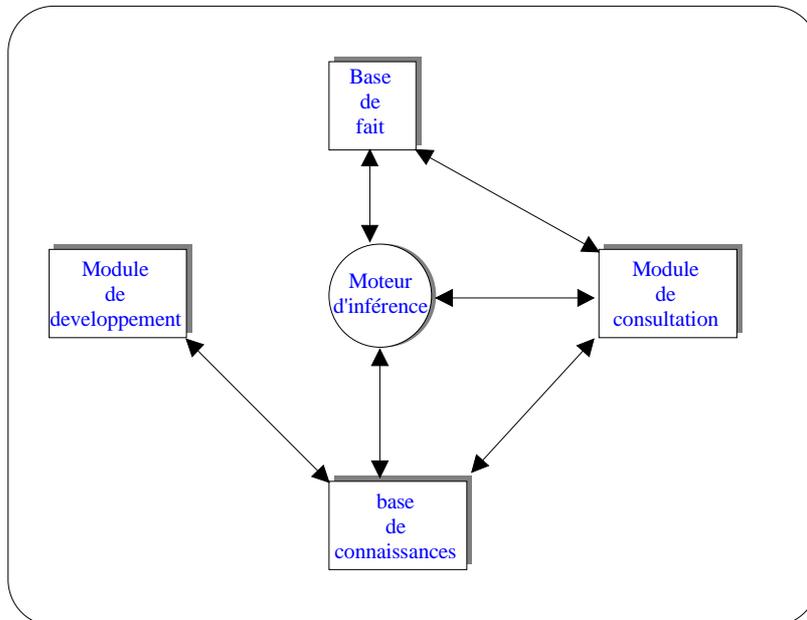


Fig.3.1. Architecture d'un système expert

Une base de faits : Contenant les données (informations) relatives à un problème particulier. La base de faits peut-être assimilable à une mémoire temporaire ; partant d'une situation initiale, son contenu évolue en fonction des inférences du mécanisme de contrôle jusqu'à la résolution (ou l'échec).

Ainsi, sur la décomposition structurelle on voit apparaître les deux grands thèmes techniques de l'intelligence artificielle : La représentation des connaissances et le contrôle.

3.2.3 Les phases de développement d'un système à base de connaissances

La démarche d'ensemble du développement consiste, à partir d'un objectif à satisfaire pour lequel on envisage le développement d'un système expert, à réaliser un produit logiciel qui résolve le mieux possible le problème posé, lequel produit devra ensuite «vivre» (validation, installation, utilisation, formation, maintenance ...).

Le développement d'applications a mis en évidence la nécessité d'une séparation claire entre un indispensable «modèle» des connaissances de l'expert (connaissances profondes ou superficielles) et les «formalismes» dont on usera pour mettre en œuvre ce modèle de manière opérationnelle.

Le développement d'un système à base de connaissance se réalise en deux phases :
phase d'acquisition des connaissances,
phase de représentation de ces connaissances pour la réalisation du système expert.

La figure 3.2 présente les différentes étapes de développement d'un système à base de connaissances ou système expert.

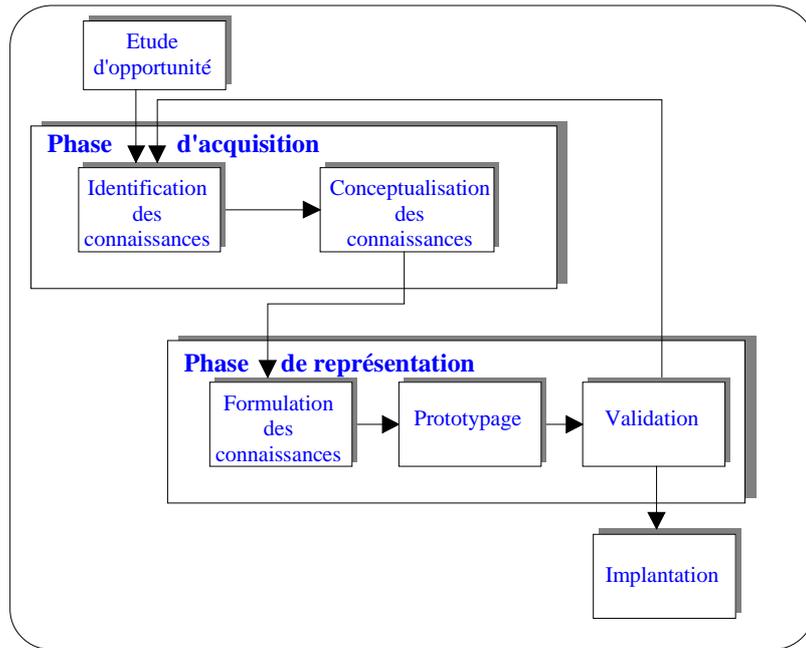


Fig. 3.2. Étapes de développement d'un système à base de connaissances

3.3 Les techniques de contrôle

3.3.1 Principe de fonctionnement du mécanisme de contrôle

Selon des stratégies diverses, généralement indépendantes du domaine d'application, le mécanisme de contrôle utilise les connaissances représentatives d'un savoir-faire, les interprète et les enchaîne jusqu'à satisfaire des conditions d'arrêt significatives.

La résolution d'un problème se construit de manière incrémentale au travers d'une succession de cycles de base dits d'évaluation-exécution composés de l'enchaînement des séquences suivantes [Farenny et al , 87] (Figure 3.3)

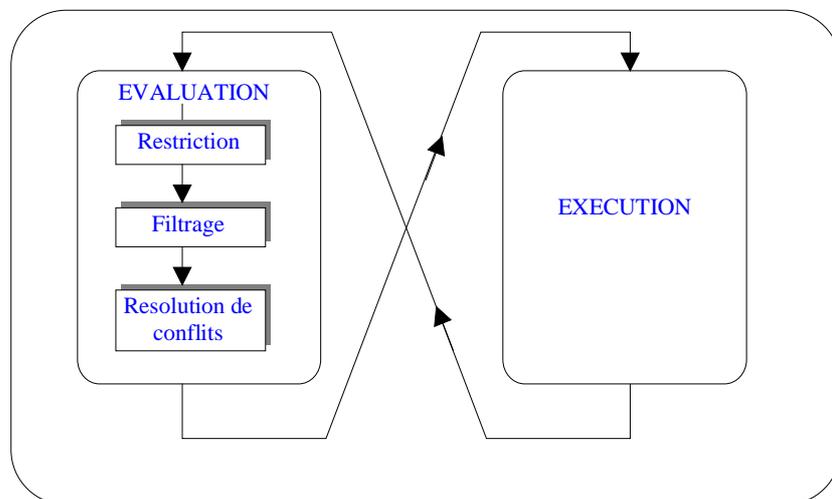


Fig. 3.3. Représentation du cycle de base d'un moteur d'inférences

3.3.2 Modes de contrôle

Le raisonnement réalisé par un moteur d'inférences se schématise généralement sous la forme d'un arbre ET/OU ou d'un graphe d'états. Le déplacement dans l'espace des sous solutions potentielles (ou sous-buts) ainsi représenté pourra s'effectuer en fonction d'une ou plusieurs stratégies de contrôle inhérentes au moteur et suivant deux sens de parcours possibles : le *Chaînage avant (forward chaining)*, démarche qualifiée d'ascendante (*bottom-up*) ou guidée par les données (*data driven*) et le *Chaînage arrière (backward chaining)*, démarche de type descendante (*top-down*) ou guidée par les buts. Certains systèmes intègrent ces deux types de chaînages. En effet, ils offrent la possibilité d'utiliser en alternance le chaînage avant et le chaînage arrière (chaînage mixte).

3.3.3 Stratégies de contrôle

Les différents modes de contrôle spécifiant le sens d'invocation des règles n'ont en fait qu'une incidence partielle sur la détermination de l'enchaînement des règles. Afin d'ordonner et de limiter les choix potentiellement applicables, différentes stratégies de contrôle plus ou moins complexes leur sont toujours superposées¹. Les principales sont les *stratégie irrévocable ou par tentatives* : Une stratégie est dite irrévocable si le déclenchement des opérateurs en phase d'exécution s'effectue sans remise en cause. En particulier, s'il n'existe plus d'opérateurs déclenchables, aucun retour arrière n'est effectué et le processus de recherche s'arrête. A l'inverse, la stratégie est dite par tentatives si le déclenchement des opérateurs s'effectue en considérant le cycle précédent (c'est-à-dire le dernier choix effectué).

Recherche en profondeur d'abord ou en largeur d'abord : Le principe de la recherche en largeur d'abord consiste à déclencher successivement toutes les règles compatibles avec l'état de la base de faits avant de les adjoindre aux faits initiaux et de les utiliser pour déclencher d'autres règles. Ainsi, la base de faits s'enrichit de la totalité des nouveaux faits déduits, ceci permet d'accroître les possibilités de recherches de solutions à un problème donné.

Par ailleurs, le mécanisme de contrôle fonctionne de façon monotone lorsque aucun des faits qu'il a établis n'est remis en question et si l'ajout de nouveaux faits n'introduit aucune contradiction. Dans certains cas, notamment lors de l'établissement de diagnostics, cette caractéristique devient limitative, on a recours alors à la mise en oeuvre du raisonnement

¹ Le moteur d'inférences n'étant pas à concevoir pour notre étude, alors cet aspect ne sera pas abordé.

non monotone. Les méta connaissances peuvent être définies comme des connaissances sur les connaissances. Dans le cas d'un système expert deux classes de méta connaissances peuvent être discriminées : les méta connaissances sur les objets du domaine et les méta connaissances sur les stratégies de résolution applicables sur, ou à partir des objets.

3.4 Les techniques de représentation des connaissances

3.4.1 Introduction

Représenter les connaissances pour un système expert consiste à transcrire sous une forme symbolique exploitable par un système informatique les différents concepts déterminés lors de la phase d'acquisition des connaissances. Les approches les plus importantes sont les représentations procédurales, les représentations à base de logique, les règles de production et les représentations utilisant l'héritage des propriétés.

3.4.2 Représentations procédurales

Dans ce type de représentation proche de l'algorithmique, la base de connaissances se compose de procédures définissant d'une manière précise les méthodologies de résolution de problèmes. De même que pour les langages de programmation classiques pour lesquels données et traitements sont étroitement liés, la connaissance et les processus de contrôle qui lui sont attachés sont imbriqués. Par opposition, dans la programmation déclarative, au lieu que la connaissance soit imbriquée de façon plus ou moins implicite dans le processus de résolution, elle est déclarée de façon autonome dans une formalisation proche de celle qui est familière au spécialiste humain [Domine, 88].

Les avantages de représentation procédurale sont d'une part la facilité d'expression des heuristiques, d'autre part la facilité de propagation des faits. Ces deux avantages sont dus au fait que le raisonnement peut être clairement guidé. Les principaux inconvénients sont le manque de flexibilité et de modularité dus à une définition de la connaissance a priori.

3.4.3 Représentations à base de logique

Toute expression dans un système logique est une combinaison qui respecte les règles de la syntaxe. Cependant une théorie logique admissible ne considère pas le contenu de cette expression mais sa valeur de vérité. En logique classique, cette valeur est prise dans un ensemble à deux éléments (VRAI, FAUX).

Les représentations basées sur la logique propositionnelle (ordre 0) [Hery, 93a] ou la logique des prédicats (ordre 1) [Hery, 93b] sont largement utilisées en intelligence artificielle, notamment dans les applications de démonstration des théorèmes et les systèmes experts.

- **La logique des propositions** : La logique classique traite de propositions qui sont en générale des énoncés de faits, l'association de propositions est possible par l'utilisation des connecteurs de la logique mathématique (ET, OU, NON, équivalence, implication).

En pratique, ces langages permettent de décrire les connaissances (et leur utilisation) dans des domaines qu'on peut appeler non génériques, c'est-à-dire où les propriétés sont particulières à chaque objet, et non caractéristique de classes d'objets.

- **La logique des prédicats** : La logique des prédicats, comme la logique des propositions, se propose de formaliser la structure du langage et du raisonnement usuel. Plus précisément, la logique des prédicats prolonge la logique des propositions par la prise en compte, outre des connecteurs logiques, de la notion de variable et de quantification (existentielle et universelle).

En pratique, on modélise en logique des prédicats un domaine où interviennent des connaissances de nature générique, structurelle. Parmi les contreparties principales de cette plus grande souplesse de représentation l'accroissement de la difficulté et du temps des opérations de filtrage.

3.4.4 Les règles de production

Les règles de production sont des déclarations de la forme « SI condition (s) Alors action (s) » dont la signification est immédiate : la vérification des prémisses contenues dans la partie gauche de la règle conduit à l'exécution des opérations de la partie conclusion ou partie droite, c'est-à-dire une nouvelle situation s'établit lorsque la situation de la partie si est reconnue par le système.

La règle de production est la composante « représentation des connaissances » d'un modèle général de raisonnement appelé système de production. Parmi les avantages reconnus aux règles de production, on cite : La modularité pratiquement la plus extrême, le caractère naturel de l'expression des connaissances.

En contrepartie, certaines limitations apparaissent à l'usage des règles de production comme le manque de structuration des connaissances limite les représentations de classifications hiérarchiques ou contextuelles et favorise les redondances d'informations et la mauvaise lisibilité du raisonnement et de cohérence de la base de connaissances.

3.4.5 Systèmes à héritage

Les systèmes utilisant les mécanismes d'héritage permettent la représentation de concepts de l'univers réel par des types abstraits regroupant des propriétés partagées par un ensemble d'individus ou d'objets. Les propriétés communes sont alors factorisées hiérarchiquement des plus générales vers les plus spécifiques. L'arborescence ainsi créée facilite le partage de la connaissance par héritage ainsi que les processus de recherche d'informations. La notion d'héritage est essentiellement employée dans les réseaux sémantiques et les représentations à base d'objets.

- Un réseau sémantique [Ermine, 89] est un formalisme de représentation des connaissances dont la caractéristique de base est d'utiliser un réseau (graphe) composé de noeuds reliés par des arcs orientés ou non pour représenter le domaine. Les noeuds et les arcs sont en général étiquetés. Aux premiers sont associés les objets (concepts, événements, situations), et aux seconds des relations entre ces objets.
- Les représentations en objets structurés sont nées de la conjonction d'idées de plusieurs sources. Elles ont reçu des appellations très diverses telles que: schémas, frames, scripts, prototypes, objets.

Dans le formalisme objet [Barthes, 90], un univers de référence est modélisé par un ensemble d'entités autonomes pouvant communiquer entre elles et possédant une existence réelle dans la base de connaissances ; les objets. L'objet se compose d'une partie statique décrivant un ensemble de données et d'une partie dynamique précisant les procédures de manipulation de ces données. Une telle organisation permet ainsi l'exploitation de la connaissance suivant un mode procédural-déclaratif. La structuration et la manipulation de la base de connaissances s'appuient quant à elle sur les notions de hiérarchies d'objets et d'héritage déjà présentes dans les réseaux sémantiques.

3.4.6 Les représentations hybrides

Les représentations hybrides permettent de se libérer d'un formalisme unique de représentation des connaissances et d'en faire coexister plusieurs au sein d'un même système. En effet, elles permettent d'associer à la structuration des classes d'objets, la souplesse de description et l'accès à l'information des frames, la déclarativité des différentes logiques, l'efficacité des procédures et la modularité des règles de production.

Il est à remarquer que ces caractéristiques se retrouvent de plus en plus fréquemment dans les générateurs de systèmes experts¹ commerciaux. En particulier le générateur de systèmes experts (*expert system shell*) G2 utilisé dans le cadre de nos applications industrielles.

3.5 Conclusion

Par opposition aux systèmes informatiques classiques, les travaux de recherche en intelligence artificielle ont donné naissance à des systèmes capables de simuler les raisonnements humains. Ils sont caractérisés d'une part par la recherche d'un chemin, raisonnement, vers un objectif au lieu d'exécuter un algorithme, calcul. D'autre part, ils permettent de manipuler des symboles de connaissances.

Dans le cadre de nos applications, il apparaît clairement que cette approche correspond parfaitement aux exigences des tâches qu'on se propose de modéliser. En effet, pour établir un diagnostic, il est nécessaire d'effectuer des raisonnements et de manipuler des connaissances de natures diverses.

3.6 Le diagnostic et l'approche à base de connaissance.

3.6.1 Introduction

Le diagnostic est l'un des plus larges domaines d'application des systèmes à BC. Ces derniers possèdent une propriété essentielle de pouvoir restituer à des non experts les connaissances acquises par les spécialistes d'un domaine technique précis. Ainsi, dans un grand nombre de travaux de recherches [Chittaro, 92], [El Ayeb, 91], [El Ayeb, 94] et [Struss, 92], différentes approches ont été proposées pour le développement des SBC pour le diagnostic, nous essayons de définir dans ce qui suit les principaux concepts relatifs à ce domaine.

¹ Pour plus d'informations, se reporter à [Levine, 89] et [Pomerol, 88].

3.6.2 Le problème du diagnostic

Un problème de diagnostic commence avec l'observation d'un comportement anormal, le but étant d'identifier la (es) cause (s) à l'origine de cette déviation en vue de trouver le remède approprié. L'accomplissement de cette tâche² requiert la connaissance du système à diagnostiquer et des observations reliées au comportement de ce système.

A partir de ces données, le mécanisme d'inférences³ cherche à identifier le diagnostic possible, c'est-à-dire les causes de déviation du comportement normal du système (Figure 3.3.). Cette recherche s'effectue selon une stratégie dont les caractéristiques sont préalablement définies par le concepteur du système de diagnostic.

A travers la mise en oeuvre d'une stratégie de diagnostic, nous essayons de reproduire l'attitude et le raisonnement de l'expert humain (par exemple le spécialiste de dépannage d'un type de matériel) lors de la réalisation de son diagnostic

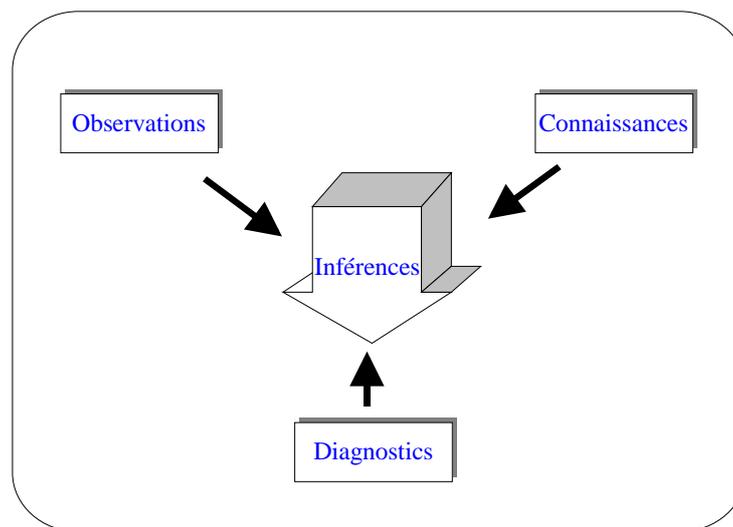


Fig.3.4. La tâche de diagnostic

Cependant, le choix des stratégies à adopter lors des applications est conditionné par la nature et l'organisation des connaissances acquises ou disponibles. Ainsi, la modélisation des connaissances du système et le raisonnement mis en oeuvre au cours du diagnostic sont des concepts étroitement liés.

3.6.3 Modélisation des connaissances et stratégies de raisonnement

La mise en oeuvre du diagnostic basé sur l'exploitation des relations de cause à effet dite connaissance de surface entre les défaillances et les observations, consiste à

² Par l'homme ou le système informatique.

résoudre le problème inverse de la relation de la cause à l'effet, connaissant principalement l'effet par les symptômes observables. Toutefois, d'autres techniques de raisonnement ont été proposées dans la littérature lorsque les connaissances de dysfonctionnements du système ne sont plus fournies de manière explicite. Une description des connaissances profondes du système (structure, comportement, fonction) est dans ce cas exploitée.

En effet, l'obtention de la formalisation de la connaissance relative à un système pour le diagnostic ultérieur de ses défaillances passe par quatre niveaux de modélisation (Figure 3.4), le passage étant possible d'un niveau à celui immédiatement supérieur [Chatain, 93] et [Milne, 87]. Comme toute typologie, en pratique les frontières ne sont pas aussi nettes et les applications font souvent coopérer plusieurs niveaux de connaissances (structure et fonction par exemple).

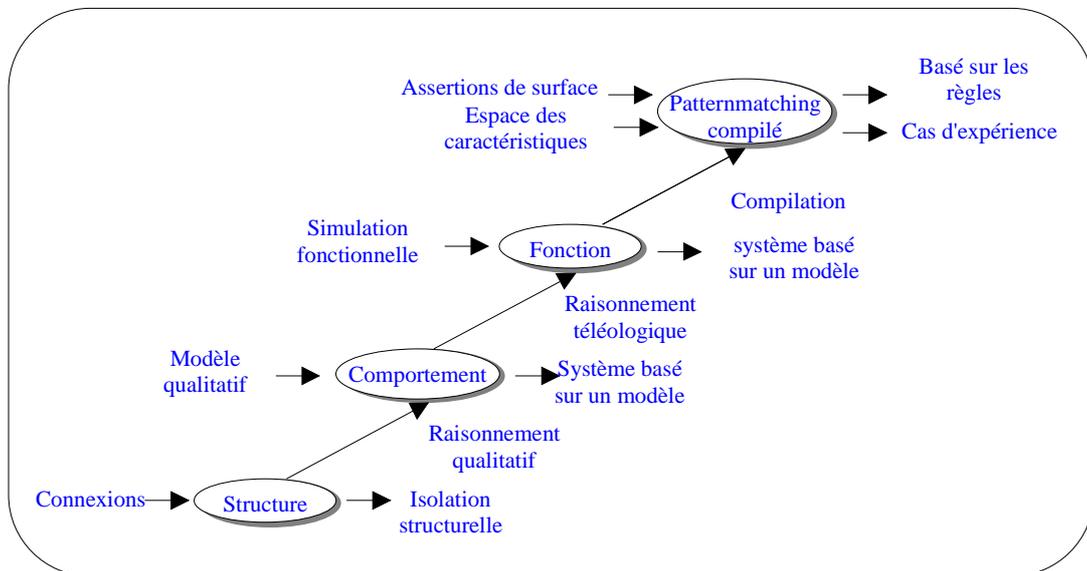


Fig.3.5. Les niveaux de modélisation du diagnostic

La structure : Cette connaissance relative à la topologie du système décrit les composants et leurs connexions. On retrouve ce type de connaissances précisément dans les schémas de principe (électrique, pneumatique,...).

Le comportement : Cette connaissance s'occupe des interactions entre les composants du système en terme de quantités physiques qui caractérisent leurs états (variables et paramètres) et les lois qui gèrent leur fonctionnement. Le comportement est décrit sous forme d'un modèle qualitatif.

La fonction : Cette connaissance concerne les rôles des composants dans les processus physiques auxquels ils appartiennent, elle relie le comportement du système aux buts qui lui sont assignés. Les fonctions sont décrites sous forme d'états de comportements et de

³ Lorsque le système à base de connaissances est utilisé pour la résolution du problème.

transitions (interprétées soit comme une fonction de comportement, soit comme un état de comportement plus détaillé). Cette représentation hiérarchique permet de décrire les fonctions du système à partir de la structure et des fonctions des composants.

Le pattern-matching compilé utilise des connaissances associatives sous forme de règles de production encodant des assertions de surface ou à l'aide d'autres approches basées sur l'expérience (historique ou espace des caractéristiques). Les connaissances empiriques concernent la représentation explicite des propriétés du système à travers des assertions empiriques. Cette connaissance s'obtient à partir de l'observation, de l'expérimentation, et de l'expérience. Elle peut comporter également la compétence acquise par les experts humains suite à leur interaction avec le système.

Ainsi, plusieurs possibilités sont offertes pour concevoir des systèmes de diagnostic. La figure 3.4 illustre, en particulier, les relations qui existent entre les différentes stratégies de raisonnement. Il est possible donc de concevoir un système de diagnostic (à base de règles, à base d'un modèle, ou d'isolation structurelle,...) en se basant sur les connaissances d'un même niveau, en plus du passage permis d'un niveau à un autre en adoptant les raisonnements indiqués.

Le passage de la structure au comportement est possible via un raisonnement qualitatif exploitant une représentation du comportement des composants.

Le passage aux fonctions à partir du comportement nécessite un raisonnement téléologique, c'est à dire la prise en compte des intentions pour lesquelles le système est utilisé. Ce type de raisonnement s'appuie sur les buts assignés au système par son concepteur et les conditions opérationnelles permettant leur réalisation.

Une compilation des connaissances fonctionnelles permet de passer au niveau pattern-matching. Une autre possibilité consiste à compiler des connaissances de modélisation en connaissances de pattern-matching.

3.7 Les approches de diagnostic à base de connaissances

3.7.1 Introduction

De nombreuses recherches, théoriques et appliquées, ont été consacrées au diagnostic par systèmes à base de connaissances. Cependant, ces travaux peuvent être affectés soit à la classe des approches empiriques dite de première génération, celle des approches à base de modèles, ou bien celle des approches mixtes.

3.7.2 L'approche empirique

Les systèmes à base de connaissances dits de première génération [Hery et al, 94] se donnent pour objectif de reproduire les connaissances et les raisonnements exprimés par les experts humains. L'inconvénient de cette approche réside surtout dans la nature des connaissances formalisées : ce sont des connaissances de surface correspondant à une compilation d'expérience et de savoir-faire. De ce fait, les systèmes de première génération sont en général difficiles à valider et à faire évoluer, et leurs performances sont par nature bornées par celles de l'expert consulté.

L'approche empirique utilise des règles de production (heuristiques) et manipule des connaissances de surface (shallow knowledge), des relations du type symptômes-défaillances. Ce type de systèmes experts consiste à identifier les composants en panne, sans passer par l'étape de spécification de l'équipement, mais plutôt en exploitant les connaissances de dysfonctionnement que sont les relations de causes à effets entre les pannes potentielles et les symptômes. Le diagnostic se fait alors par analogie avec des cas rencontrés. Soit «S» l'ensemble des symptômes et «P» l'ensemble des pannes. Le mécanisme de diagnostic peut être schématisé comme suit :

Partant d'un ensemble de symptômes donnés par l'utilisateur, (S_i, \dots, S_j) inclus dans «S » et en utilisant les relations de cause à effets entre pannes et symptômes, le processus de diagnostic tente de construire une chaîne d'inférence filtrant progressivement les éléments de l'ensemble des pannes «P». En cas de succès, cette stratégie débouchera sur le sous-ensemble des pannes qui ont la plus forte association avec les symptômes au départ.

Les systèmes experts de première génération continuent encore à être utilisées pour l'aide au diagnostic malgré les faiblesses qui peuvent être résumées comme suit [Marrakchi, 86], [Jaume, 91], [Isermane, 92], [Bousson, 93], [Chalal, 94]; [Khoualdi, 94] : Le système ne peut diagnostiquer que des pannes précédemment analysées par l'expert. Il n'est donc pas possible au système de prédire un dysfonctionnement qui pourrait avoir lieu. Le système est incapable de reconnaître des pannes multiples aussi bien dans le cas de pannes multiples indépendantes que dépendantes. Il est difficile, voire impossible de décrire toutes les combinaisons possibles des pannes multiples pouvant se produire dans une installation donnée.

Hormis des explications superficielles basées sur les relations (causes–effets) préexistantes, le système est incapable de fournir une explication concernant les causes à l'origine du dysfonctionnement.

Un système expert de première génération n'est pratiquement pas générique. La base de connaissance est conçue pour des cas précis. Le système est très peu évolutif et son application à d'autres installations entraîne une grande modification de cette base de connaissances.

L'approche empirique correspond à un diagnostic guidé par l'expérience puisqu'on explique un cas de panne donné par analogie avec les cas prévus dans le système, mais il existe des cas où l'expérience s'avère insuffisante.

Afin d'éviter les inconvénients des systèmes de première génération, on modélise non pas les connaissances immédiatement fournies par l'expert (connaissances de surface), mais plutôt les connaissances profondes qui justifient ces dernières. Ces systèmes dits de seconde génération [David et al, 93] et [Tzafestas, 91] sont caractérisés par une grande robustesse : ils peuvent souvent répondre à des situations imprévues.

3.7.3 L'approche à base de modèle

Afin d'éviter les inconvénients des systèmes de première génération, on modélise non pas les connaissances immédiatement fournies par l'expert (connaissances de surface), mais plutôt les connaissances profondes qui justifient ces dernières. Ces systèmes dits de seconde génération [David et al, 93] et [Tzafestas, 91] sont caractérisés par une grande robustesse : ils peuvent souvent répondre à des situations imprévues.

L'approche à base de modèle correspond à la seconde génération de systèmes experts utilisant des connaissances profondes (Deep Knowledge), c'est-à-dire qu'ils disposent d'un modèle structurel et fonctionnel du processus.

Dans cette approche, un modèle de comportement normal fournit les valeurs de référence qui sont comparées avec les valeurs observées. Cette approche diffère de la première notamment en ne prenant pas en considération des informations sur le comportement défaillant. Le diagnostic est basé sur la cohérence entre les observations et les sorties du modèle [Evsukoff, 98].

La technique par les modèles exige la spécification du comportement normal des composants. Suivant cette approche, diagnostiquer un composant pour savoir s'il est en panne ou non revient à comparer le comportement observé ou réel du composant considéré avec son comportement spécifié. Deux démarches sont utilisées selon le niveau de diagnostic que l'on désire effectuer : Une *approche par mise en évidence des caractéristiques structurelles et fonctionnelles du matériel* qui est particulièrement bien adaptée en diagnostic des systèmes élaborés par l'homme pour les quels l'architecture

fonctionnelle et structurelle est claire et explicitée. *Une approche par la modélisation du processus observé* s'emploie dans des domaines scientifiques et techniques à fort niveau de modélisation où l'on peut modéliser les lois fondamentales des domaines technologiques mis en jeu. On peut donc l'appliquer, lors de diagnostic relevant du contrôle d'exécution et du contrôle du bon fonctionnement d'un processus.

3.7.4 L'approche mixte

L'approche mixte, ou modèle hybride pour le diagnostic, fait coopérer des connaissances profondes et des connaissances de surface afin de remédier aux inconvénients des autres approches, empiriques et à base de modèle, prises séparément tout en cumulant les avantages [El Ayeb, 94] et [Bousson, 93]. Les systèmes de diagnostic utilisant l'intelligence artificielle tendent actuellement vers non seulement l'intégration de données numériques et symboliques, l'intégration de différentes techniques de raisonnement mais aussi l'intégration de la notion de temps réel et du contenu temporel de l'information.

D'après [Gondran, 94], les applications récentes ont abandonné l'approche système expert de première génération pour les systèmes de seconde génération, basés sur la modélisation et les connaissances profondes. Néanmoins, les systèmes de première génération sont jusqu'à ce jour utilisés dans de nombreuses applications industrielles de grande envergure¹. En effet quel que soit le degré de sophistication des techniques utilisées pour la conception des systèmes de seconde génération, l'apport réel ne peut être évalué qu'en terme de rentabilité au niveau industriel.

Les systèmes de diagnostic utilisant l'intelligence artificielle tendent actuellement vers l'intégration de données numériques et symboliques, l'intégration de différentes techniques de raisonnement et l'intégration de la notion de temps réel et du contenu temporel de l'information

L'objectif d'un système de diagnostic est de rendre compte de l'apparition d'un défaut le plus rapidement possible avant qu'il n'entraîne des dommages importants comme par exemple des défaillances fonctionnelles et le plus précisément possible en donnant les informations qui faciliteront les réparations [Weber, 99].

En effet, un procédé industriel a différentes phases de fonctionnement, ceci impose au système de diagnostic temps-réel de pouvoir fournir un diagnostic quelle que soit la phase de fonctionnement du procédé. Les actions effectuées par le système sur le procédé

surveillé peuvent donner lieu en retour, après un temps plus ou moins long, à des informations.

Le système de diagnostic doit être capable de reconnaître ces informations et leurs effets sur le procédé pour suggérer, si besoin, de nouvelles actions.

Les capteurs peuvent être eux-mêmes défectueux et générer des informations erronées. Le système doit assurer la réponse la plus précise possible [Khoualdi, 94].

3.7.5 Caractérisation relative au diagnostic

3.7.5.1 Introduction

Les premiers systèmes de diagnostic utilisant les techniques de l'I.A se sont basés sur les relations de cause à effet fournies souvent par les experts du domaine considéré. Ces connaissances sont représentées (encodées) essentiellement par des règles de production. En plus des difficultés inhérentes aux systèmes de première génération, en général, les systèmes de diagnostic en particulier posent certains problèmes :

Ils ne peuvent plus prévenir toutes les pannes pouvant avoir lieu dans le processus.

Ces systèmes sont incapables de reconnaître les pannes multiples quelles soient dépendantes ou indépendantes.

Ces systèmes ne sont plus en mesure d'expliquer les causes à l'origine du dysfonctionnement constaté.

L'effort fourni pour analyser les situations de pannes est spécifique au système à diagnostiquer, et il est nécessaire de reprendre entièrement l'analyse pour d'autres installations.

Afin d'améliorer les performances des systèmes de diagnostic et d'éviter les inconvénients de l'approche précédente, on modélise des connaissances plus profondes que celles codées dans les systèmes de production basés principalement sur les relations de cause à effet (connaissances de surface). En effet, en se basant sur le système physique lui-même, on représente explicitement les lois et les principes physiques, les relations structurelles entre les composants ainsi que les connaissances fonctionnelles et comportementales. Cette analyse approfondie conduit à l'obtention d'un modèle profond du système à diagnostiquer.

Les systèmes de diagnostic basés sur la structuration des connaissances profondes utilisent plusieurs types de modèles, caractérisés par une représentation mathématique,

¹ Pour plus d'informations, se reporter à [Milne, 91].

géométrique ou symbolique. Cette organisation spécifique est censée capturer les connaissances profondes relatives au système.

Plusieurs modèles peuvent être utilisés. En général, les systèmes de diagnostic utilisent une combinaison de ces modèles pour représenter les connaissances profondes. Ils sont classés à partir du formalisme de représentation en quatre types de modèles [Sudduth, 91]

Modèles basés sur les contraintes

Le modèle est présenté sous forme de contraintes, ou des relations mathématiques entre des éléments du système (états et paramètres) qui permettent de restreindre le comportement. Ceci diffère de la représentation du comportement sous forme de règles comme le cas des systèmes de diagnostic de première génération. Dans les modèles basés sur les contraintes, les règles proviennent des contraintes imposées sur le comportement du système par les lois physiques gouvernant le processus, et non plus par les réponses observées sur le processus en simulant certaines conditions de défaillances.

Modèles basés sur les primitives

Pour ces modèles, un ensemble de primitives est utilisé pour décomposer le système en sous-systèmes représentant des modèles de base du comportement du système. Pour un processus complexe, ceci implique que les fonctions du système de haut niveau sont représentées par des relations de bas niveau obtenues à partir des lois physiques décrivant le comportement du système.

Modèles qualitatifs et graphiques

Les mesures qualitatives ne sont pas prises en compte pour modéliser le système, et un manque de précision se présente lors de la description de la réponse du système. Par exemple, pour chaque mesure est associée une variable discrète qui sera comparée (égale, inférieure, ou supérieure) avec la valeur d'état prédite. La détection des dysfonctionnements est basée uniquement sur les connaissances qualitatives relatives au processus, et non pas sur les valeurs numériques.

Les modèles graphiques tentent de représenter le comportement en se basant sur les relations de causalité à travers les composants du système en supposant que la propagation des défaillances suit les chemins de connectivité. Cette représentation est généralement

sous forme d'une structure géométrique reliant les composants du système. Les chemins de causalité des événements sont donc définis à travers cette représentation.

Il existe différents modèles, notamment les formes arborescentes (arbres de défaillance, arbres d'événement, arbres de but, arbres de succès, arbres de réponse). Chaque type caractérise un aspect particulier selon lequel la causalité suit la connectivité. En plus, le type de la structure de l'arborescence dépend de l'objectif visé par le concepteur du système de diagnostic.

3.8 L'outil de développement : le générateur de systèmes experts G2

3.8.1 Les fonctionnalités du système expert G2

G2 est un générateur de systèmes expert, c'est-à-dire un outil dont le domaine d'application n'est pas déterminé à l'avance. De façon plus pratique, le système expert G2 peut être considéré comme un environnement de programmation général utilisant conjointement une programmation à base de règles, une, une programmation orientée-objets, et ne programmation procédurale [Gensym, 95a]

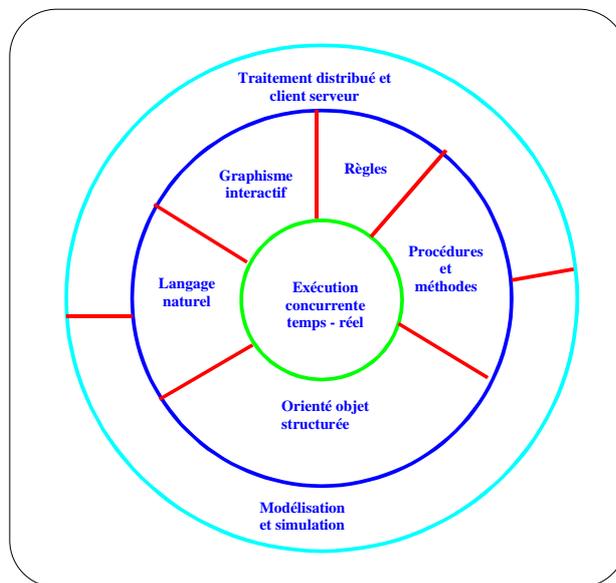


Fig. 3.6. L'intégration des différentes technologies dans la structure du G2

En plus, le système offre des possibilités graphiques non-négligeables [Gensym, 97]. Pour plus de détails, les caractéristiques générales du générateur de systèmes experts G2 sont présentées en Annexe B.

3.8.2 Représentation de la connaissance

Dans G2 la représentation de la connaissance combine la représentation orientée-objets et les facilités graphiques offertes par le système expert. Plusieurs types de données de base sont utilisables par G2 à savoir : les nombres, le type logique (booléen ou flou), le type symbolique (une énumération de types), le type texte et les listes

Ces données sont, soit des variables dont la valeur est modifiable, soit des paramètres auquel cas leur valeur est fixe. La connaissance est représentée graphiquement à base d'objets structurés inclus dans des diagrammes hiérarchiques à plusieurs niveaux. Le niveau le plus élevé est la classe d'objets. Elle regroupe plusieurs éléments ayant les mêmes propriétés. Chaque objet est défini à l'intérieur de la classe de définition dans laquelle sont mentionnés la classe supérieure de l'objet, ses attributs et l'icône graphique le représentant.

L'attribut d'un objet est constitué de descriptions, formules ou fonctions. Le nombre d'attributs est variable selon le type d'objet. Des objets appartenant à une même classe ont au moins la même valeur pour un attribut (les attributs concernant la classe supérieure commune). Chaque objet est représenté par un icône graphique. Deux objets peuvent être connectés de deux manières différentes ; soit de manière graphique au moyen d'une connexion G2, soit de manière relationnelle (G2 relations). La connexion graphique est assez pratique puisqu'elle ne nécessite aucune modification ou définition supplémentaire une fois le lien graphique effectué et permet d'obtenir le modèle de fonctionnement avec la représentation graphique.

Il est possible de garder une trace des valeurs prises par une variable au cours d'une simulation sous forme d'historique.

Des modèles dynamiques associés aux objets, permettent de représenter leur comportement au cours du temps. Ce comportement peut être représenté graphiquement sous plusieurs formes différentes : courbe temporelle, tableaux, historique des variables...

3.8.3 Programmation procédurale

Quant aux possibilités de programmation procédurale, G2 permet de définir des fonctions à l'aide d'un langage comme le langage C ou le langage Pascal. Une procédure possède des arguments, des variables locales et peut retourner une ou plusieurs valeurs. Les arguments, les variables locales et/ou les valeurs retournées peuvent être numériques, symboliques logiques ou de type texte. Il est possible d'utiliser conjointement divers types de données dans une même procédure, ce qui permettra de spécifier les relations mixtes.

Avant d'exploiter ces caractéristiques sur des applications industrielles, nous présentons la stratégie de diagnostic développée. Pour la représentation et l'organisation des connaissances à l'intérieur du G2, il est nécessaire de recueillir des informations sur les propriétés structurelles et fonctionnelles du procédé.

De plus G2 dispose de puissants moyens de représentation de la connaissance lui permettant de répondre aux exigences des systèmes industriels complexes. Il permet une représentation hybride de la connaissance à la fois à l'aide d'objets et de règles. Ces deux formalismes permettent à l'utilisateur de représenter d'une part les connaissances descriptives du domaine, d'autre part les connaissances actives modélisant le raisonnement.

Le formalisme objet⁵ de G2 repose sur la définition de classes et d'instances de classes, ou objets «physiques». Les règles peuvent être regroupées ensembles ou associées à : un objet spécifique, une classe d'objets, ou une catégorie définie par l'utilisateur. En plus de l'invocation des règles par chaînage avant et chaînage arrière, le moteur d'inférences utilise d'autres techniques utiles dans le raisonnement.

Le système dispose également d'une interface de développement graphique, une interface utilisateur interactive, une interface de communication, un simulateur dynamique et il est doté de plusieurs mécanismes permettant le fonctionnement en temps réel.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé d'une manière explicite les systèmes à base de connaissances et les techniques de contrôle et les techniques de représentation des connaissances. Nous avons également mis en exergue les mérites de l'approche retenue. En effet, il apparaît clairement qu'elle correspond parfaitement aux exigences des tâches qu'on se propose de modéliser pour établir un diagnostic. Comme nous utilisons donc pour l'implémentation tout au long du projet, l'outil d'aide au développement de systèmes à base de connaissances G2 [Gensym Corporation, 95a] qui est disponible au niveau du laboratoire et acquis dans le cadre d'un projet de recherche et de coopération inter-universitaire [Mouss, 97]. Il nous a semblé indispensable de le présenter. Le générateur de système Expert G2, permet une représentation hybride de la connaissance à la fois à l'aide d'objets et de règles.

⁵ La notion d'objet permet de structurer et de modéliser la connaissance

CHAPITRE IV

***Acquisition des
Connaissances et Stratégie
de Diagnostic***

CHAPITRE IV.

Acquisition des Connaissances et Stratégie de Diagnostic

Résumé : *Dans le nouveau contexte industriel, les entreprises subissent de grandes pressions de la part de leurs clients. Ces derniers deviennent de plus en plus exigeants et demandent, en outre, des produits et des services de bonne qualité, à moindre coût, livrés rapidement et au bon moment et un service après-vente défiant la compétition. Pour satisfaire la demande en qualité et en quantité tout en respectant les délais de livraison et les coûts, l'entreprise manufacturière doit disposer d'un outil de production fiable, donc bien entretenu.*

Les entreprises sont de plus en plus sensibilisées à l'importance des coûts induits par les défaillances accidentelles des systèmes de production. Alors que la maintenance, jusqu'à très récemment, était considérée comme un centre de coûts, nous sommes de plus en plus conscients qu'elle peut contribuer d'une manière significative à la performance globale de l'entreprise. La complexité des mécanismes de dégradation des équipements a fait en sorte que la durée de vie de ces derniers a toujours été traitée comme une variable aléatoire. Cet état de fait a incité plusieurs entreprises à adopter des approches plutôt réactives, n'étant pas en mesure de justifier économiquement les avantages que peut procurer la mise en place d'une maintenance préventive.

Face à cette bivalence structurelle et d'importance primordiale de la production et de la maintenance puisque la longévité du premier dépend de la bonne mise en œuvre du second, ce chapitre est présenté en deux parties. Dans la première partie, on abordera succinctement **les systèmes de production**, quand à la deuxième partie elle sera consacrée à **la maintenance des systèmes de production**

4.1 Introduction

Nous n'allons pas reprendre certains aspects positifs du diagnostic précoce mais nous dirons dans ce cadre, que permettre à un opérateur qui gère une installation complexe de prendre la bonne décision et au bon moment est déjà un atout en lui-même. Permettre à l'unité d'engranger des points en productivité est un aspect qui ne saurait être rejeté. C'est dans cet état d'esprit que nous avons cherché à valider la stratégie de diagnostic que nous avons développée.

La conception du système expert d'aide au diagnostic est effectuée grâce à l'outil de réalisation de systèmes experts et, d'autres parts, par la stratégie particulière de développement. Hormis l'objectif fixé par le projet, aucune restriction n'a été imposée pour la mise en oeuvre de notre étude, ainsi nous considérons que la phase de conception est une étape créative. Cependant, il est assez difficile de fixer des règles précises et immuables ; de plus, les orientations sont nombreuses et il est également indispensable de tenir compte des divers modules qui seront impérativement en interaction lors du fonctionnement du futur système expert. C'est pourquoi, nous avons recherché des solutions qui, tout en considérant de tels problèmes, permettent de garder un certain degré de liberté dans le développement de l'application.

4.2 Elaboration du diagnostic

4.2.1 Introduction

L'élaboration d'un diagnostic nécessite généralement plusieurs opérations, comme : l'inférence des causes possibles des symptômes, la collecte des données relatives aux symptômes et aux caractéristiques du cas à traiter, l'exécution de tests, la prise en compte des interactions entre les causes, la prise en compte de l'histoire du système, le raisonnement à partir de la théorie ou des connaissances causales générales sur le système à diagnostiquer. Deux approches pour l'implantation d'un système d'aide au diagnostic

4.2.2 Les systèmes statiques d'aide au diagnostic

L'approche statique considère le procédé à l'arrêt suite à une panne, et /ou dans un état particulier complètement décrit et non évolutif, et a pour objectif de localiser le composant défectueux le plus rapidement possible pour minimiser le coût d'arrêt de l'installation ou dans certains cas pour éviter un arrêt. Le système raisonne donc à partir de données appelées données statiques [Coudouneau and al, 91]. SEDIAG est un système expert

développé par Marrakchi [Marrakchi, 86], il permet la description d'une installation, et le lancement de sessions de diagnostic suite à l'apparition d'un dysfonctionnement, en se basant sur des connaissances de surfaces et des connaissances profondes.

4.2.3 Les systèmes dynamiques d'aide au diagnostic

L'approche dynamique vise l'aide au diagnostic dans le cas où le procédé continue à fonctionner éventuellement en mode dégradé. Ce cas vise à la fois les pannes matérielles et les perturbations. Il nécessite un raisonnement sur des données dynamiques. Ce type système d'aide au diagnostic prend en compte la dimension temporelle. L'approche adoptée pour traiter le problème du temps consiste à voir l'évolution d'un dispositif comme une suite d'états de ce dispositif. Ainsi, mémoriser l'évolution d'un dispositif consiste à échantillonner cette évolution et à mémoriser chacun de ces échantillons. Les changements d'états seront considérés à des intervalles du temps bien déterminés.

4.2.4 Conclusion

Dans un système de diagnostic générique, la base de connaissance contient à la fois des connaissances statiques et des connaissances dynamiques. La figure 4.1 représente un système de diagnostic des défaillances où on peut identifier trois niveaux de modélisation. Le premier niveau représente le modèle du système physique et son système de contrôle ; le deuxième niveau est un modèle de comportement du système physique (comportement normal et comportement anormal) ; le dernier niveau représente le modèle du raisonnement pour le diagnostic (stratégie).

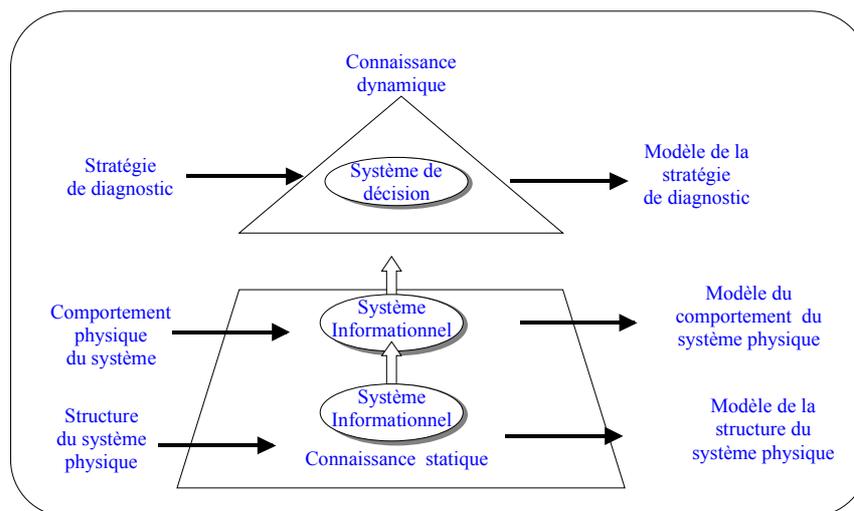


Fig.4.1. Connaissance dynamique connaissance statique dans un système de diagnostic [Coudouneau and al, 91]

Les deux premiers modèles composent la connaissance statique de l'installation industrielle, le troisième représente la connaissance dynamique de l'expert pour le diagnostic.

4.3 Stratégie de diagnostic développée

4.3.1 Introduction

La stratégie développée pour nous permettre d'établir le diagnostic des défaillances a été conduite en utilisant les études de la sûreté de fonctionnement et spécialement l'AMDEC et l'AdD. En effet partant de la définition du diagnostic que nous présentons comme l'action de déterminer l'origine d'une défaillance d'après ses symptômes et ceci en analysant les effets et en définissant précisément la ou les causes, il est établi en faisant un parcours de l'AdD. Nous partons de l'évènement sommet qui est considéré comme vrai et nous vérifions à chaque fois les éléments qui composent un parcours menant à un élément défaillant

Piloter un système inclut automatiquement une conduite sans erreurs. Rendre le système complètement automatisé nécessite un investissement assez lourd que certaines unités de production ne sont pas prêtes d'engager. Ainsi nous avons saisi l'opportunité de certains avantages offerts par G2 pour réduire au maximum certaines erreurs imputables à de mauvaises manipulations lors du pilotage du système de production et ceci afin de réduire le temps nécessaire au diagnostic (nous réduisons le temps d'indisponibilité de l'outil de production en effet la MDT (Mean Down Time) se trouve fortement réduite. On élimine ainsi des recherches de certaines défaillances imputables à ces erreurs de manipulation lors du pilotage du système de production. Certaines opérations non conformes au bon déroulement du processus seront ainsi interdites avec en appoint l'affichage d'un message d'avertissement.

Ces défaillances que l'on peut classer dans la catégories d'erreurs humaines ne seront pas prise en considération lors de la recherche des causes des dysfonctionnement (gain de temps appréciable quant on parle de système à temps réel).

4.3.2 DIAPASE : DIAgnostic Par Système Expert

DIAPASE est le module que nous avons développé à l'aide du système de génération des systèmes experts G2. Nous présentons dans ce qui suit certain de ces aspects les plus prépondérants.

4.3.3 Procédure de diagnostic

Pour illustrer la méthodologie mise au point, nous considérons l'AdD représenté sur la figure 4.2. Pour un intervenant en maintenance et ne connaissant pas de surcroît l'outil de sûreté de fonctionnement, la situation à gérer se présente sous la forme d'un arbre d'évènement (AdE) à vérifier.

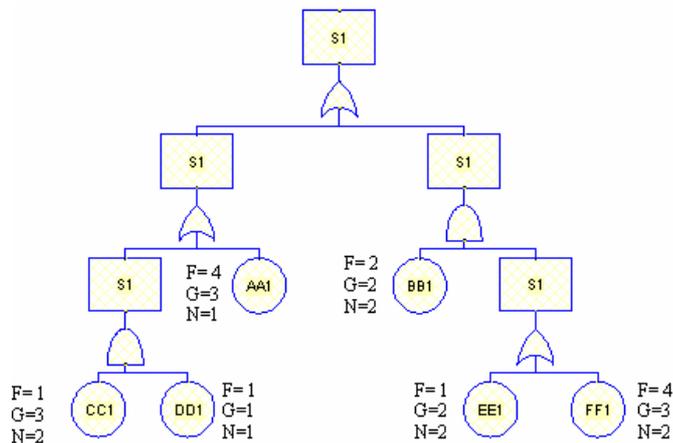


Fig.4.2. Exemple d'illustration d'un AdD

L'implémentation de AdD se fait en deux étapes. La première relative à son introduction au sein de la BC. La convivialité recherchée lors de l'élaboration de l'interface de communication implantée au niveau de DIAPASE permet et de manière simple l'introduction de tout AdD.

- Création d'un AdD : Il suffit de choisir sur la barre d'outil, l'onglet « AdD » (figure 4.3) et de cliquer sur « créer » qui fait apparaître la boîte de dialogue de création (figure 4.4)

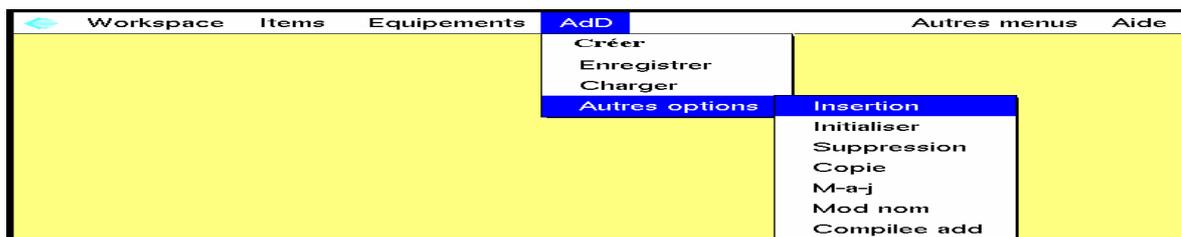


Fig.4.3. Barre d'outil module DIAPASE : création d'un AdD

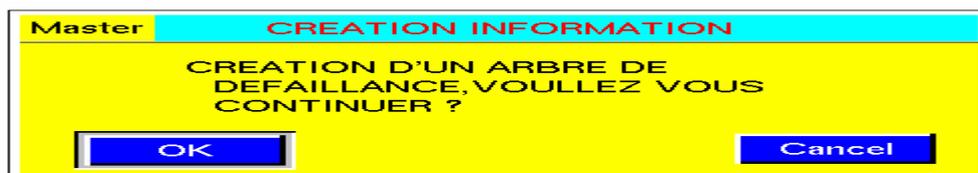


Fig.4.4. Boîte de dialogue création d'un AdD

- Introduction des évènements de l'AdD : Les évènements sont :
 - soit intermédiaires (S1, E1, E2, E3, E4) qui ne nécessitent que la connaissance des évènements qu'ils vont générer et que nous nommons « successeurs » (figure 4.5 et 4.6)
 - soit de base (AA1, BB1, CC1, DD1, EE1, FF1) qui demandent les paramètres F, G, N, le composant concerné par la défaillance et les actions ou opérations. Le paramètre C est directement déterminé grâce à une procédure externe (figure 4.7).

Master Information

Nom:

Composant Suspect:

Actions Ou Operations:

Statu: Defaillance Elementaire
 Defaillance Intermediaire

OK Apply Cancel

Fig.4.5. Informations relatives à un évènement intermédiaire

Master Successeurs-Information

Nom du Successeur:

Status: Encore
 Stop

OK Apply Cancel

Fig.4.6. Informations relatives aux successeurs

Master Information

Defaillance:

Composant Suspect:

Actions Ou Operations:

F: G: N:

Status: Defaillance Elementaire
 Defaillance Intermediaire

OK Apply

Fig.4.7. Informations relatives à un évènement de base

- Création de chemins : La procédure d'implémentation de l'AdD permet en même temps de générer des listes (que l'on nommera chemins). Ces chemins représentent toutes les possibilités de parcourir l'AdD en partant de l'évènement sommet pour aboutir à un évènement de base. Ce qui donne pour notre exemple (Tableau 4.1)

Nom du chemin	Évènements successifs
Chemin 0	S1 – E1 – AA1
Chemin 1	S1 – E1 – E3 – CC1
Chemin 2	S1 – E1 – E3 – DD1
Chemin 3	S1 – E2 – BB1
Chemin 4	S1 – E2 – E4 – EE1
Chemin 5	S1 – E2 – E4 – FF1

Tab.4.1. Différents chemin des possibilités de défaillance

Les possibilités ainsi offertes vont être classées en fonction des paramètres N et C. Une nouvelle réorganisation des chemins est faite en tenant compte des critères de classement suivant :

- Phase 1 classification pour N= 2 et les valeurs décroissantes de C
- Phase 2 classification pour N= 1 et les valeurs décroissantes de C

Remarque

Cette classification est faite pour pouvoir garder un sens à la fonction « real time » de G2. Nous commençons par chercher les défaillances les moins décelables et le plus grave et fréquente

Ainsi trois procédures au niveau de DIAPASE vont générer trois nouvelles listes.

1. Première liste « LIST-C » : Cette liste représente les chemins prioritaires à vérifier lors du lancement de la procédure de diagnostic. Ceci nous donne pour l'exemple alors le tableau 4.2

Ordre des chemins	Nom du chemin
Premier chemin à vérifier	Chemin 5
Second chemin à vérifier	Chemin 3
Troisième chemin à vérifier	Chemin 1
Quatrième chemin à vérifier	Chemin 4
Cinquième chemin à vérifier	Chemin 0
Sixième chemin à vérifier	Chemin 2

Tab.4.2. Classement des différents chemins

2. Seconde liste « LIST-TAUX » : Cette liste contient les deux paramètres de classement des chemins et est mise à jour chaque fois que les valeurs F, G, N et C sont changés et permet alors de réorganiser la liste List-C indispensable pour le diagnostic
3. Troisième liste « LIST-ELEM » : Cette liste est surtout indispensable pour l'aide au diagnostic, en effet sur le schéma synoptique de l'installation apparaît un message

définissant la défaillance alors qu'une procédure, permettant de visualiser à l'aide d'une flèche clignotante le composant siège du défaut, est lancé.

- Action ou opération : Au niveau de chaque défaillance (élémentaire ou intermédiaire) l'onglet « Action ou opération » nous permet d'introduire des tests qui vont nous permettre de parcourir l'AdD tel que le ferait un expert en maintenance pour retrouver une panne.

4.3.4 Exemple d'illustration

Pour illustrer cette stratégie, nous considérons l'exemple représentant la phase de remplissage d'une cuve à eau (Figure 4.8). Le remplissage de la cuve T01 nécessite l'ouverture de la vanne V01 et la mise sous tension de la pompe P01.

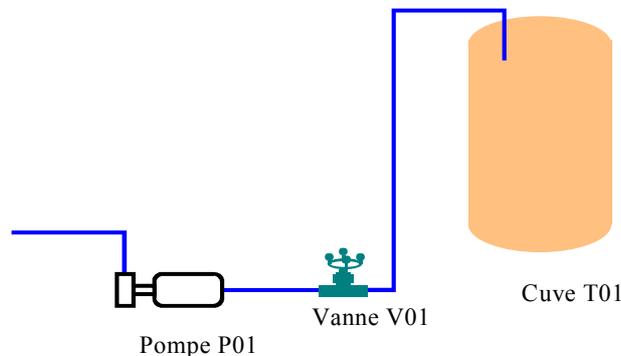


Fig. 4.8. Exemple d'illustration de la stratégie

L'absence d'eau au niveau de la cuve est considérée comme évènement indésirable (Figure 4.9). Ainsi le système présente 5 chemins possibles (flèches sombres). Pour retrouver le composant dont la défaillance est responsable du non remplissage de la cuve, il faut valider l'un de ces chemins. Pour valider un chemin il est nécessaire de valider tous les évènements qui composent ce chemin (valider est pris dans le sens où l'évènement est vrai).

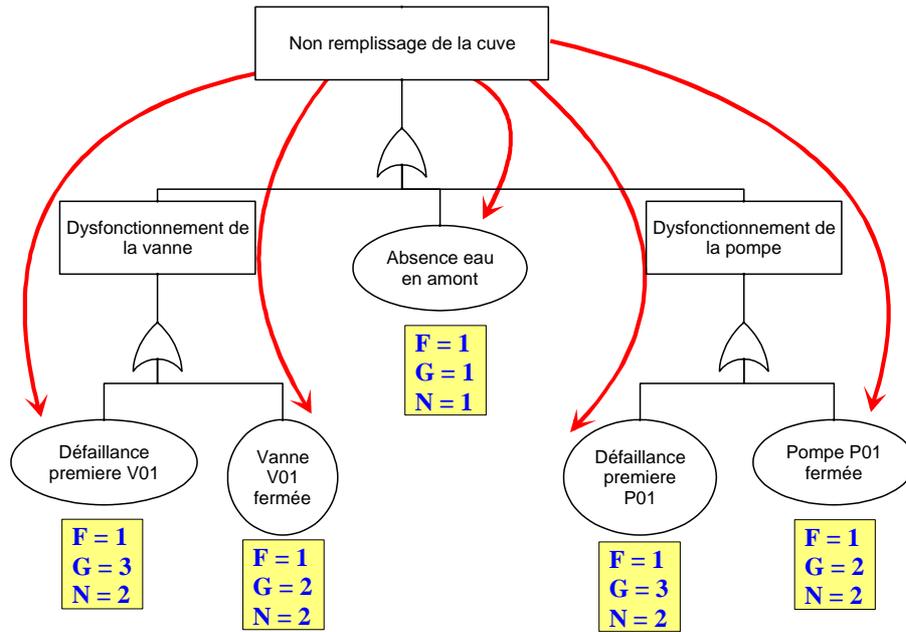


Fig.4.9. Différents scénarii de défaillances

Ainsi nous avons les chemins

Chemins	Eléments
00	Nom remplissage de la cuve/Dysfonctionnement de la vanne/Défaillance première de la vanne V01
01	Nom remplissage de la cuve/Dysfonctionnement de la vanne/Vanne V01 fermée
02	Nom remplissage de la cuve – Absence eau en amont
03	Nom remplissage de la cuve/Dysfonctionnement de la pompe/Défaillance première de la pompe P01
04	Nom remplissage de la cuve/Dysfonctionnement de la pompe /Pompe P01 fermée

Tab.4.3. Différents chemins relatif à l'exemple

La classification nous donne alors :

Ordre des chemins	Nom du chemin
Premier chemin à vérifier	Chemin 00
Second chemin à vérifier	Chemin 03
Troisième chemin à vérifier	Chemin 01
Quatrième chemin à vérifier	Chemin 04
Cinquième chemin à vérifier	Chemin 02

Tab.4.4. Classification des chemins relatif à l'exemple

Les figures 4.9.a et 4.9.b représentent les espaces de travail générés par DIAPASE a près introduction de l'AdD relatif à notre exemple

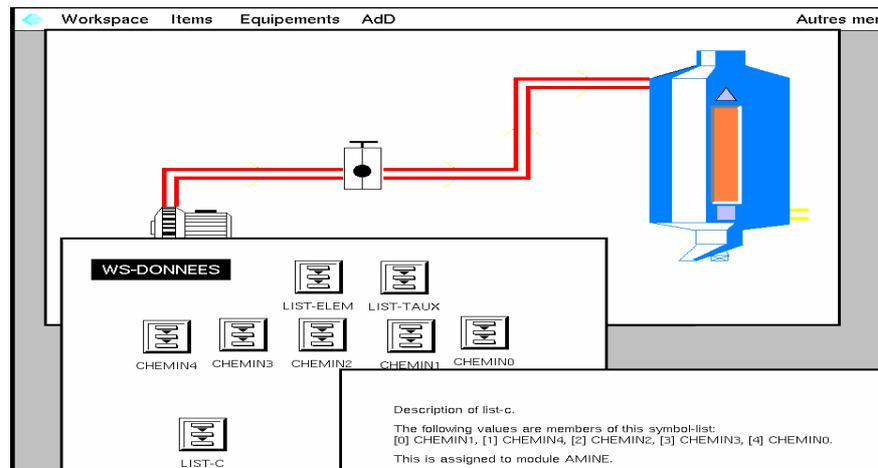


Fig.4.9.a. Création des différents chemins et des listes

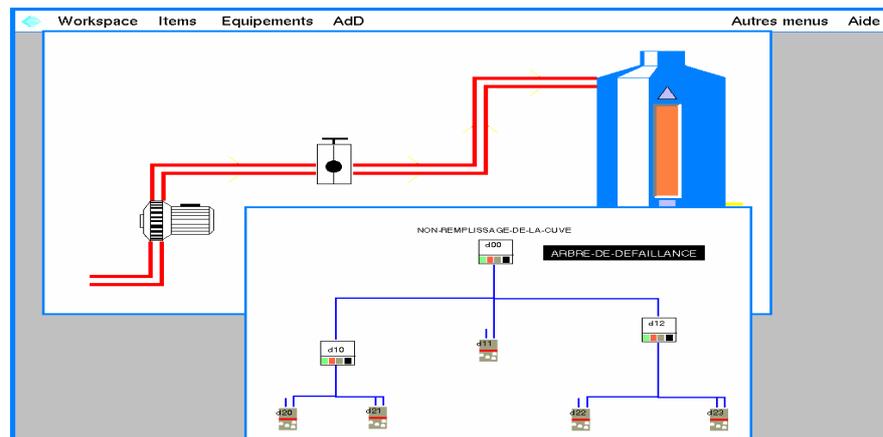


Fig.4.9.b. AdD au niveau de la base de connaissances

Aussi, les deux évènements, dysfonctionnement de la vanne V01 et la vanne V01 est en position fermée (représentant le chemin) sont à valider. Les tests sont alors établis pour savoir si cette suite d'évènement est vraie. Ce que nous pouvons résumer, en considérant « de » et « ds » respectivement le débit entrée et sortie de la vanne V01 et « E » l'état de l'équipement (mauvais fonctionnement ou bon fonctionnement) et « S » son statut, sa position (ON ou OFF), l'organigramme de la figure 4.10.

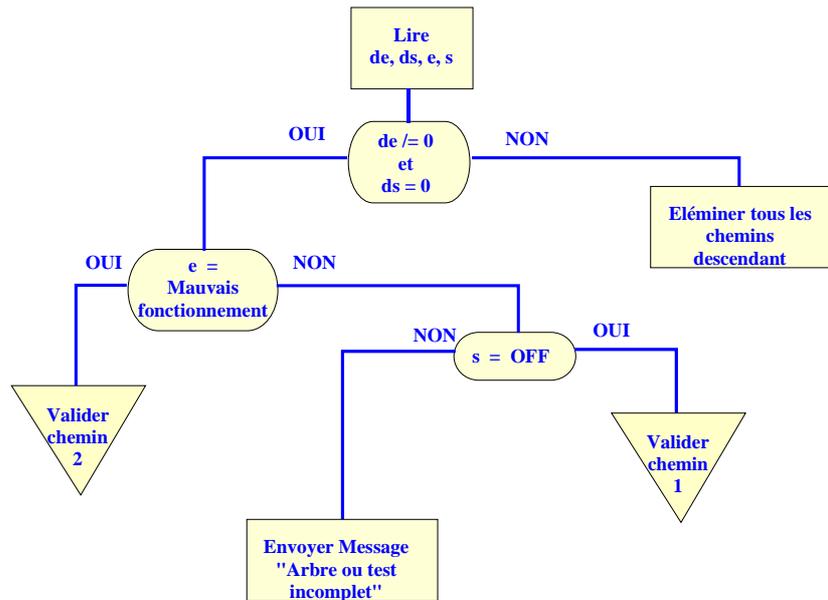


Fig.4.10. Organigramme de détection d'une défaillance

Lors de l'écriture du test, DIAPASE crée une procédure appelée « Opération XXX-N ». Ainsi chaque élément de l'AdD est en relation directe avec une procédure qui se déclenche si l'élément de l'arbre fait partie d'un chemin figurant dans le classement préétabli.

4.3.5 Conclusion

Dans le cadre de nos recherches, nous avons utilisé trois champs d'application. Nous exposons dans un premier temps la démarche proposée à un chauffe eau solaire au niveau de l'unité de recherche de l'Université de Batna

4.4 Élaboration d'un modèle et simulation sur G2 : Chauffe eau solaire

4.4.1 Introduction

L'objectif de cette phase est la simulation par le générateur de Systèmes Experts G2 d'un système de production d'eau chaude afin de visualiser son comportement dynamique et mesurer ses performances élaborer un modèle de pilotage et de diagnostic des dysfonctionnements.

4.4.2 Principe de fonctionnement

Le rayonnement solaire échauffe un fluide caloporteur circulant dans l'absorbeur d'un capteur. Ce fluide constitué d'eau et d'antigel (pour éviter que ce fluide ne gèle en hiver) capte la chaleur solaire et la transmet au niveau de l'unité de stockage. Cette circulation est forcée, en effet ce fluide circule grâce à une pompe.

Un capteur de température situé au niveau du capteur plan donne la température du fluide caloporteur T1, un autre capteur mesure la température de l'eau d'utilisation T2 au niveau du réservoir de stockage. La pompe est activée dès que la différence de température atteint un ΔT donné. D'une manière générale un système de production d'eau chaude sanitaire est tel que représenté sur la figure 4.11

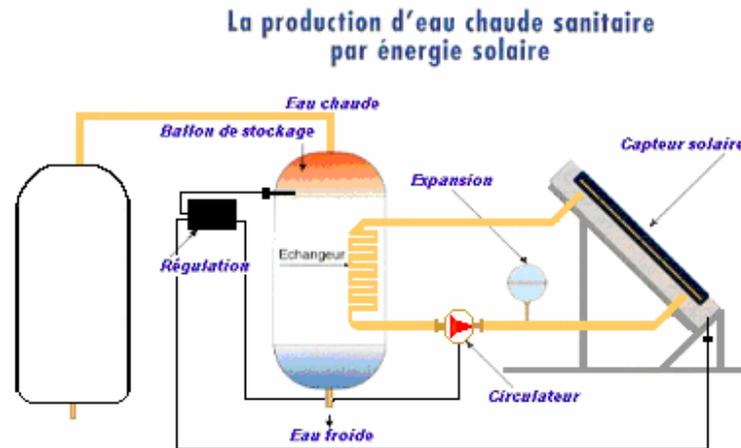


Fig.4.11. Schéma de principe

4.4.3 Système Physique

Le système physique tel qu'il existe au niveau de l'unité de recherche est représenté sur la figure 4.12

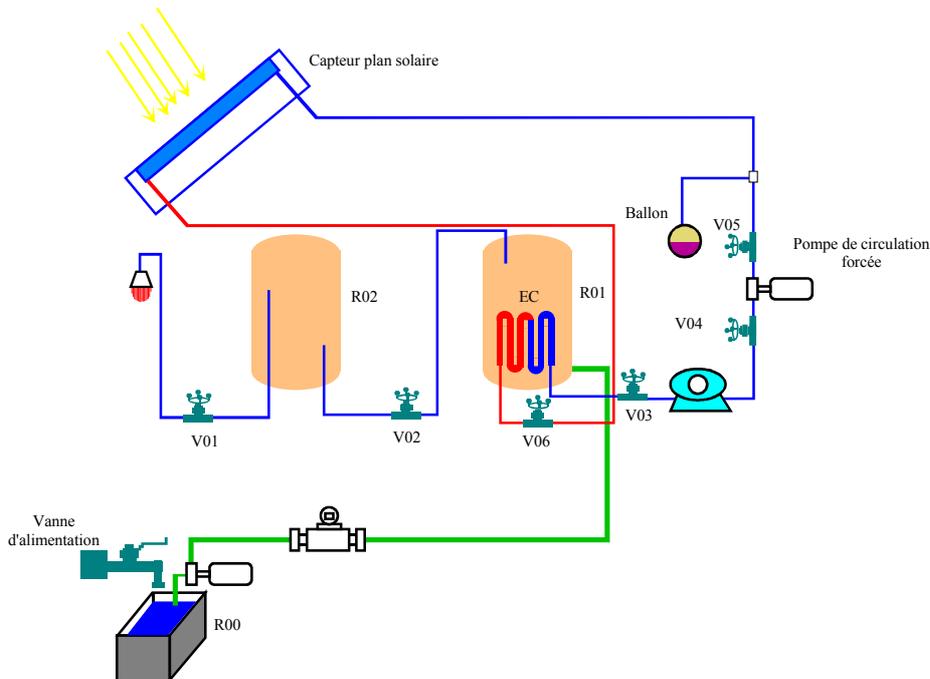


Fig. 4.12. Schéma du système physique

L'élaboration de la base de connaissance au sein de G2 nécessite dans un premier temps une connaissance approfondi du matériel composant le système physique. Une décomposition matérielle est alors établie. Cette description est utile pour l'étude de sûreté de fonctionnement nécessaire à l'élaboration du diagnostic (figure 4.13.a). Une description fonctionnelle est également réalisée (figure 4.13.b).

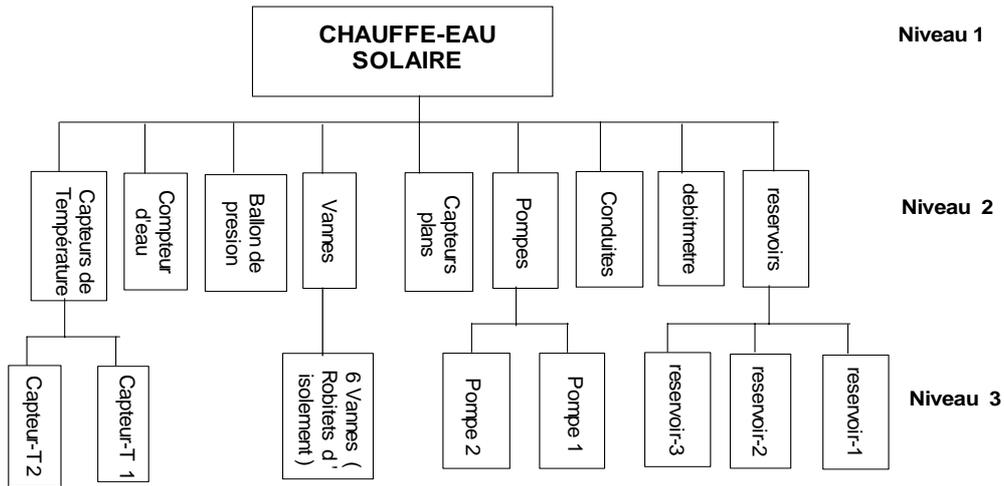


Fig.4.13.b Décomposition fonctionnelle

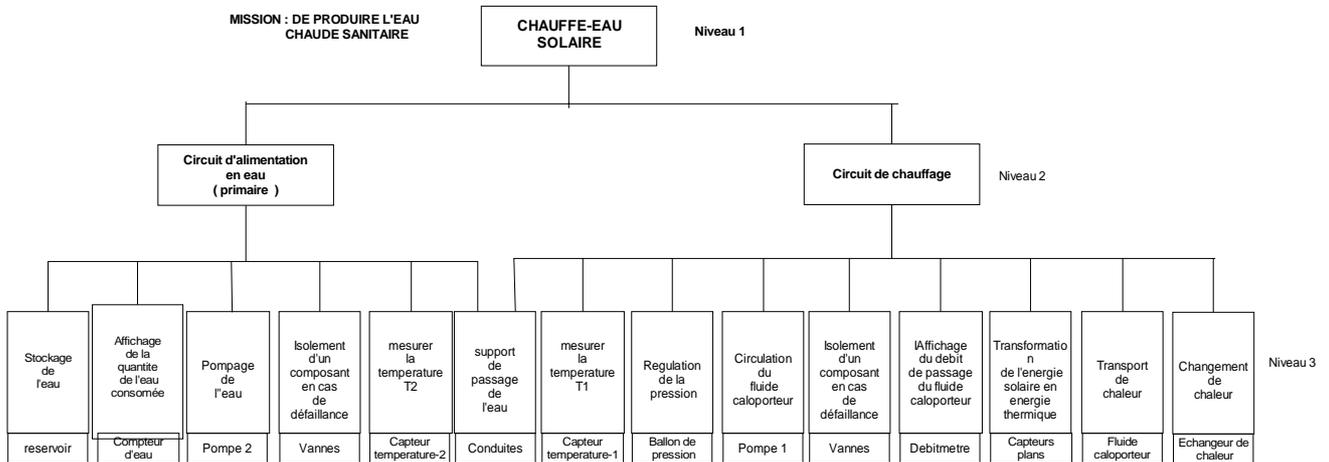


Fig.4.13.b Décomposition fonctionnelle

4.4.4 L'élaboration du Modèle

Compte tenu des différentes conduites introduites au sein de la base de connaissances définies pour permettre la circulation des différents fluides et des paramètres

de simulation retenus et suite au bilan énergétique des capteurs, les paramètres les plus importants sont les différentes températures des fluides identifiées pour la simulation

L'équation de conservation de l'énergie est traduite de la manière suivante :

$$Q_a = Q_u + P \quad [4.1]$$

Q_a : Puissance de l'énergie solaire absorbée à chaque instant de la journée,

Q_u : Puissance utile

P : Pertes de chaleur

D'autres part :
$$Q_a = \beta \cdot A_c \cdot G \quad [4.2]$$

A_c : Surface de l'absorbeur,

G : Intensité du rayonnement solaire

β : Coefficient d'absorption du rayonnement solaire

Et

$$P = A_c \cdot K(T_{abs} - T_{ae}) \quad [4.3]$$

T_{ae} : Température ambiante extérieure,

T_{abs} : Température locale de l'absorbeur,

K : Coefficient d'échange thermique global.

Pour le bilan du fluide caloporteur on distingue deux cas :

- Dans le cas où le circulateur est mis en marche la puissance utile transmise au fluide caloporteur est exprimée par la relation suivante :

$$T_{SC} = \left[\frac{\beta \cdot G}{M \cdot C_p} \right] + T_{EC} \quad [4.4]$$

T_{EC} : Température d'entrée dans les capteurs plans,

T_{SC} : Température de sortie dans les capteurs plans,

M : Débit massique traversant le capteur,

C_p : Chaleur massique du fluide caloporteur.

- Dans le cas où le circulateur est en arrêt, la puissance apportée par le rayonnement solaire va réchauffer le fluide contenu dans les capteurs plans, donc entre deux instants on peut écrire l'équation suivante :

$$\int_{T_{EC}}^{T_{SC}} m_c C_p dT = \int_{t_1} Q_u dt \quad \rightarrow \quad m_c C_p (T_{SC} - T_{EC}) = Q_u t$$

Alors
$$T_{SC} = \left[\frac{\beta \cdot A_C \cdot G \cdot t}{m_c \cdot C_p} \right] + T_{EC} \quad [4.5]$$

m_c : Masse du fluide caloporteur dans les capteurs,

Pour ce qui est de l'échange de chaleur au niveau du réservoir nous avons :

Suite au bilan énergétique des échangeurs, l'évaluation des températures :

T_{SR} : Température de sortie du réservoir 1,

T_{SE} : Température de sortie de l'échangeur

Suivant la méthode de **NUT** on aboutit à des T_{SE} et T_{SR} comme suit :

$$T_{SE} = T_{EE} - \varepsilon_c (T_{EE} - T_{ER}) \quad [4.6]$$

$$T_{SR} = T_{ER} + \left(\frac{m_E \cdot C_{pE}}{m_R \cdot C_{pR}} \right) \cdot (T_{EE} - T_{SE}) \quad [4.7]$$

T_{EE} : Température d'entrée dans l'échangeur,

T_{ER} : Température d'entrée dans le réservoir

m_E : Débit de circulation du circuit fermé,

m_R : Débit de circulation du circuit ouvert.

C_{pE} : Chaleur massique du fluide caloporteur,

C_{pR} : Chaleur massique de l'eau.

$$\varepsilon_c = \frac{1 - e^{\frac{(-K_G S)}{m_E C_{pE}} (1 + \frac{m_R C_{pR}}{m_E C_{pE}})}}{1 + \frac{m_E C_{pE}}{m_R C_{pR}}} \quad [4.8]$$

S : Surface d'échange et K_G : Coefficient global d'échange.

$$K_G = \frac{1}{\left(\frac{S_e}{S_i h_i} \right) + S_e \cdot \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi K L} + \left(\frac{1}{h_e} \right)} \quad [4.9]$$

S_e : Surface extérieur,

S_i : Surface intérieur,

h_e : Coefficient extérieur d'échange par conduction,

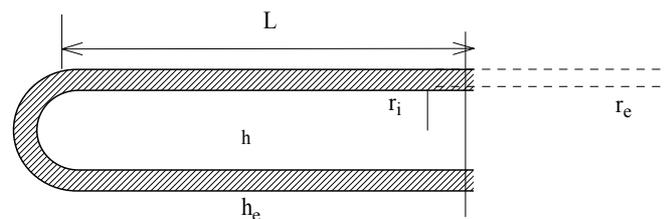
h_i : Coefficient intérieur d'échange par conduction,

r_e : Rayon extérieur,

r_i : Rayon intérieur,

L : Longueur

K : Coefficient d'échange par conduction.



Ainsi nous pouvons au niveau des sous tables des variables définissant ces paramètres introduire ces formules nécessaires à la simulation.

4.5 Implémentation de la base de connaissances en vu du diagnostic

4.5.1 Introduction

La seconde phase du travail est la génération de cette BC. Comme celle-ci est généralement utilisée par un non informaticien, nous avons cherché dans un premier temps à la rendre très conviviale.

Aussi, nous avons générer un menu d'utilisation que nous avons appelé « barre d'outil ». Ce menu principal est généré dès le lancement de la BC. Il présente deux aspects. Le premier qui se veut général et est donc repris intégralement à travers nos différentes applications et se présente comme sur la figure 4.14. Le second développé suivant chaque application.

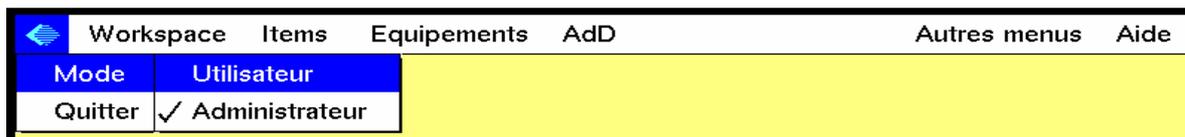


Fig.4.14. Représentation de la barre d'outil

4.5.2 Premier menu d'utilisation

Sur ce premier menu d'utilisation de la barre d'outil nous avons placé les possibilités suivantes

- Onglet symbole gensym : Il nous permet de passer du mode administrateur au mode utilisateur.

En effet notre BC possède 2 modes d'intervention. Le premier est le mode « Administrateur » dans lequel l'utilisateur de la BC à toute la latitude d'intervention pour changer ou modifier les paramètres des classes. Le second mode est celui d'un utilisateur « End User » dans lequel il n'a qu'une intervention réduite de la BC. L'opérateur peut consulter la BC pendant la simulation et suivre ainsi l'évolution des paramètres soit à l'aide de graphes ou de tableaux. Lorsque un phénomène intervient et nécessitant l'intervention de l'opérateur, un message apparaît dans lequel est précisé la nature du phénomène et l'action à entreprendre. Nous représentons sur la figure 4.14.a la différence qui apparaît au niveau des tables d'un même composant suivant que l'on soit en mode administrateur ou utilisateur.

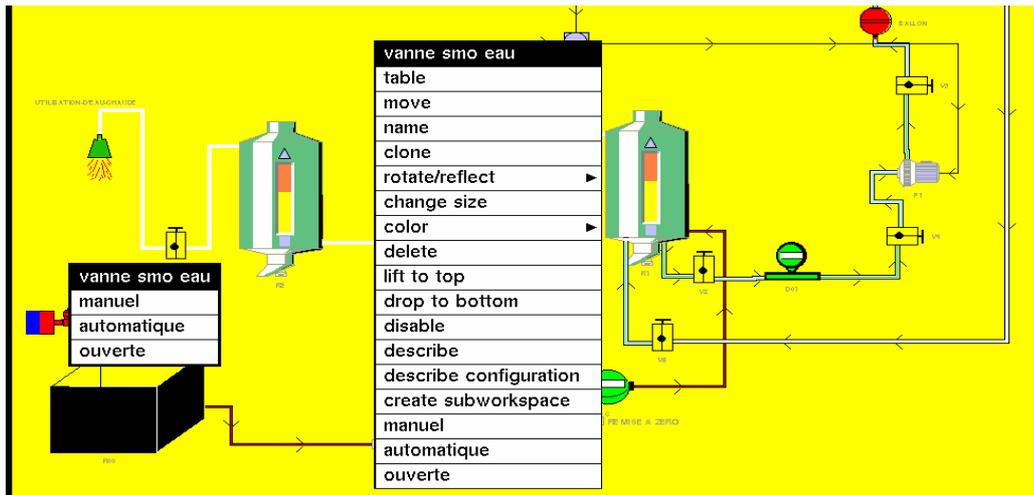


Fig.4.14.a Différence entre les deux types de mode

- Onglet Workspace : Il nous permet de créer, d'effacer ou de fermer un espace de travail ou bien de naviguer à travers les espaces de travail de la BC (Figure 4.15)

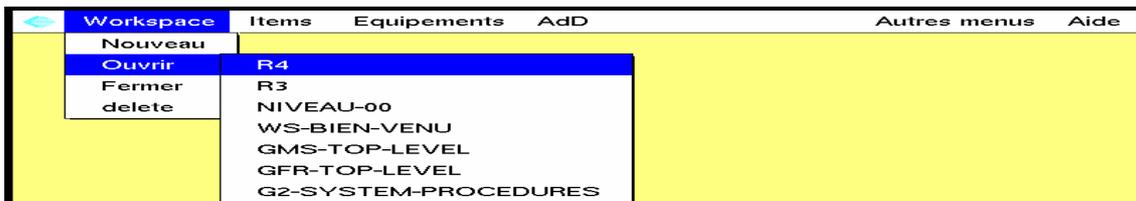


Fig. 4.15. Représentation de la barre d'outil – Workspace -

- Onglet Item : Il permet d'accéder directement aux objets se trouvant dans la BC (Figure 4.16) .

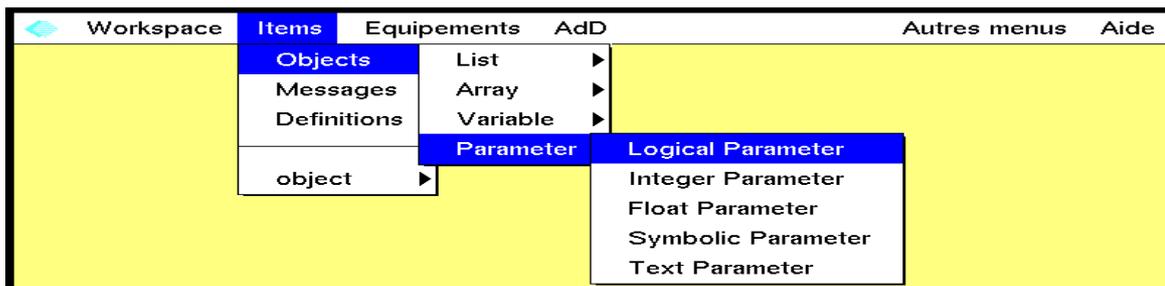


Fig.4.16. Représentation de la barre d'outil – Items -

- Onglet équipement : Il nous permet de créer directement une instance des classes existantes (Figure 4.17)

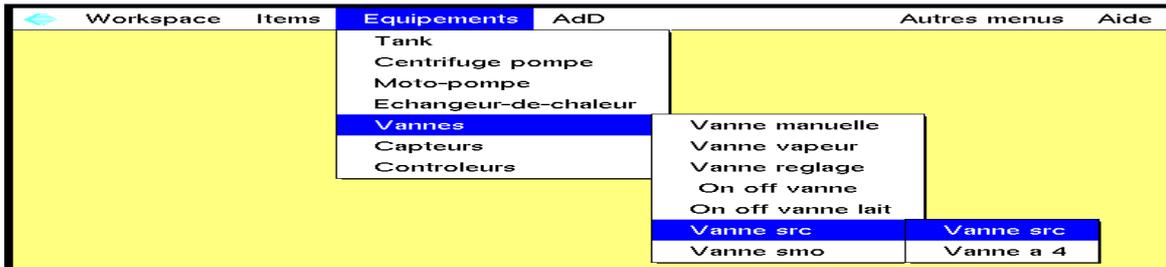


Fig. 4.17. Représentation de la barre d’outil – équipements -

- Onglet AdD : Il nous permet de générer un AdD. Son utilisation est détaillée dans le cadre de la procédure de diagnostic (Figure 4.18).

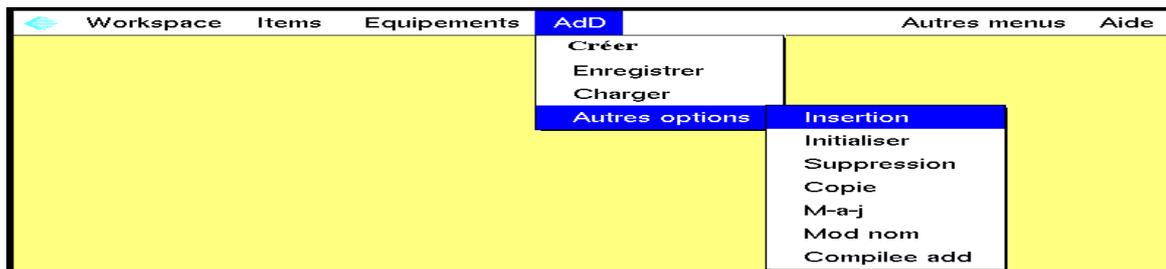


Fig.4.18. Représentation de la barre d’outil – AdD-

- Onglet autre menu : Il permet de passer du menu principal a celui de l’application (Figure 4.19)

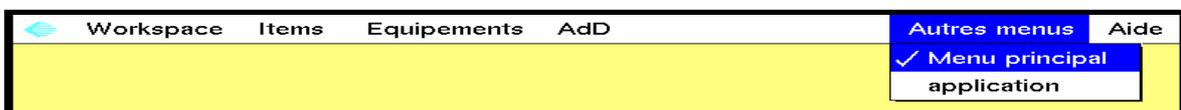


Fig.4.19. Représentation de la barre d’outil – Autres menus -

4.6 Présentation de la barre d’outil – application -

La seconde partie de la barre d’outil est dédiée entièrement à la conduite et la surveillance du système. Ainsi, elle est spécifique au système étudié. Dans le cadre de notre application, elle représentée par :

- L’onglet « Soleil » : Il permet d’afficher le schéma synoptique du système de production et de lancer la procédure de diagnostic (Figure 4.20)

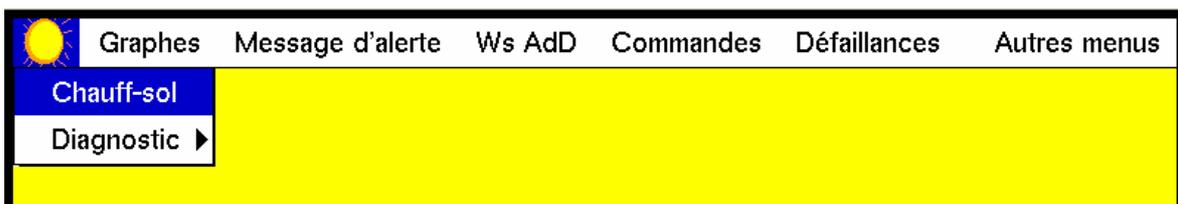


Fig. 4.20. Représentation de la barre d’outil – application-

- Onglet Graphes : Il permet un affichage de tous les graphes donnant la situation du système (Figure 4.21)

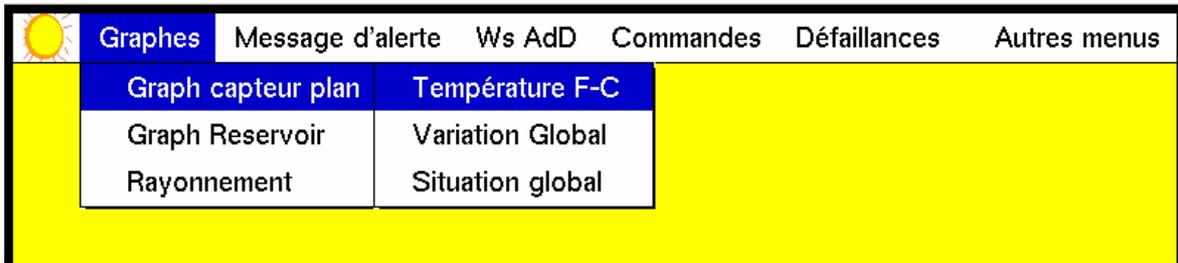


Fig. 4.21. Représentation de la barre d’outil – graphes-

- Onglet Message d’alerte : Il permet d’afficher les messages d’alerte (Figure 4.22)

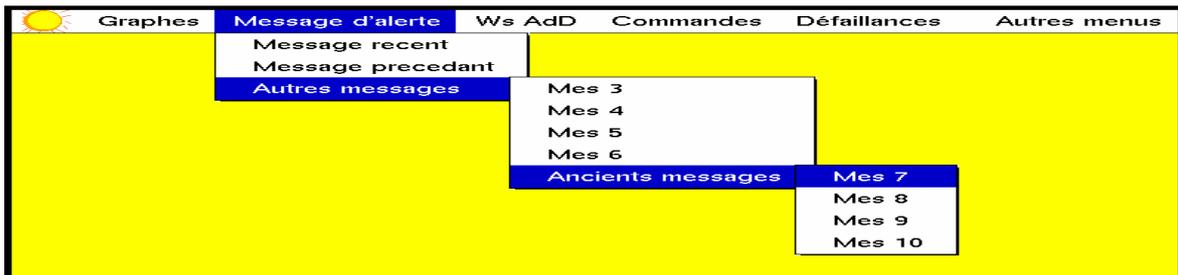


Fig.4.22. Représentation de la barre d’outil – message d’alerte-

- Onglet Ws Add : Il affiche l’AdD et les données nécessaires au diagnostic (Figure 4.23)



Fig.4.23. Représentation de la barre d’outil – Ws Add -

- Onglet Commande : Il permet au niveau de la simulation, la commande des composants telle que les vannes et les pompes (figure 4.24)



Fig.4.24. Représentation de la barre d’outil – Commandes-

- Onglet Défaillance : Il permet surtout pour la validation du diagnostic de générer une défaillance au niveau de chaque composant (Figure 4.25)

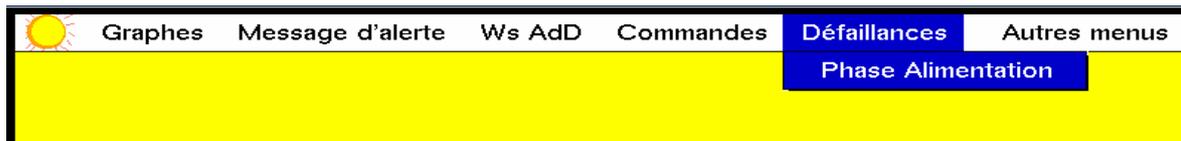


Fig. 4.25. Représentation de la barre d'outil – Défaillance –

4.7 Génération des classes

4.7.1 Introduction

La décomposition matérielle établie précédemment (cf figure 4.13.a) nous permet dans un premier temps de représenter tous les équipements. Chaque classe représente un composant. Pour chaque composant ainsi représenté, nous définissons alors tous les attributs qui nous serviront par la suite au niveau de la simulation (figure 4.26)

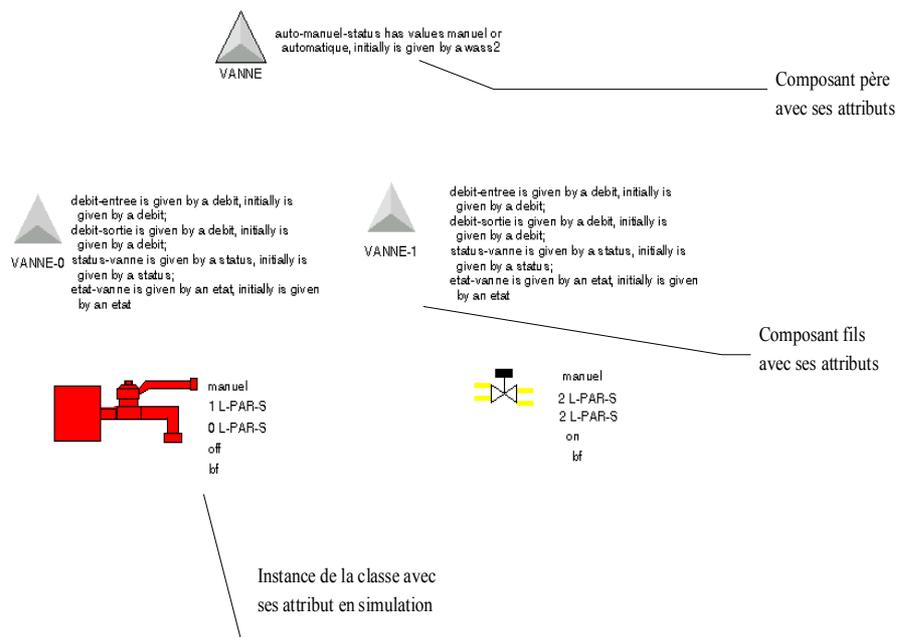


Fig.4.26. Exemple de définition des classes dans la BC

L'ensemble des classes générées pour cette application est représenté sur les deux figures 4.27et 4.28

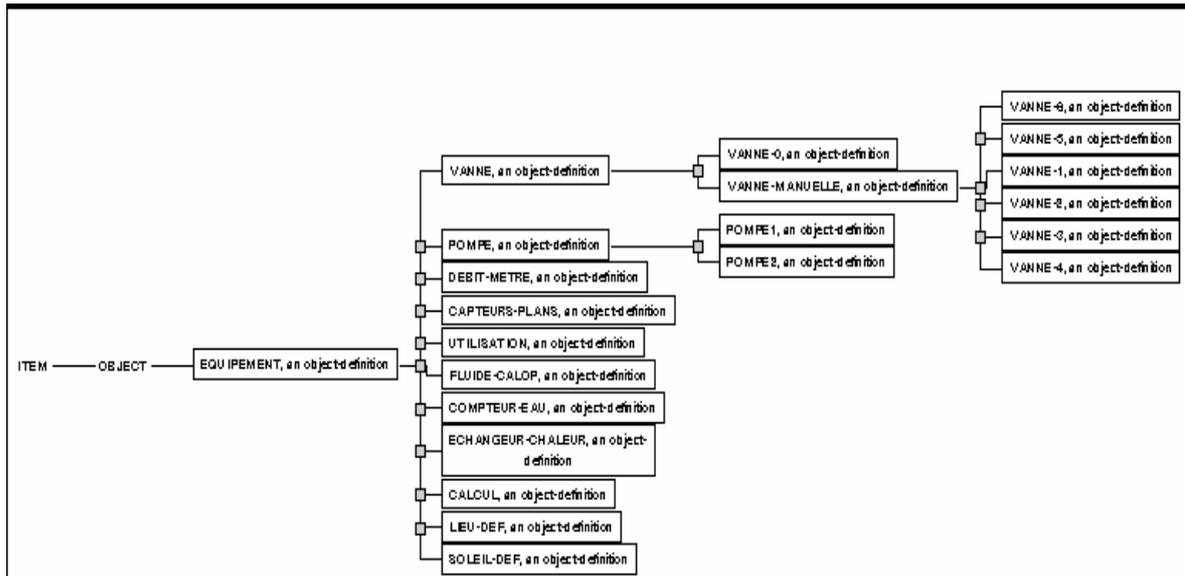


Fig.4.27. Hiérarchisation des différente classes dans la BC

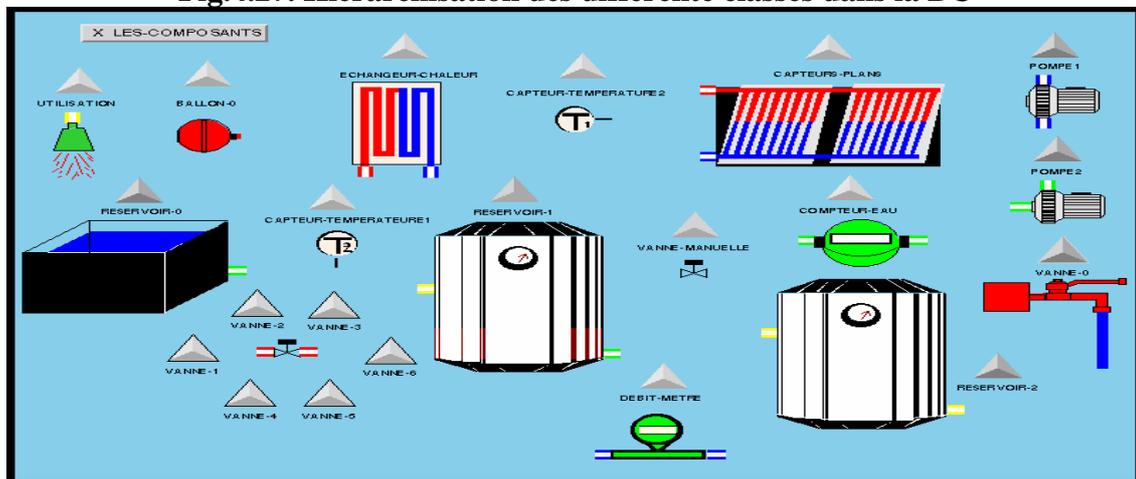


Fig.4.28. Classes et instances pour la simulation

4.7.2 Génération des variables

Pour la conduite et la simulation avec G2, nous avons utilisé globalement deux types de variables

- Variables quantitatives : Pour la simulation des attribut tel que la température, le débit etc....
- Variables symboliques : Pour la simulation des attribut tel que l'état de l'équipement.

Chaque attribut défini au niveau d'un objet se trouvera alors dans deux situations :

1. Possède une valeur constante que nous pouvons déclarer au niveau de la définition de l'attribut ou bien nous le fixons au niveau de la variable qui le gère (figure 4.29.a)

2. L'attribut est géré par une expression de simulation que nous introduisons au niveau de l'onglet « Formula » (Figure 4.29.b)

VANNE00, a vanne-0	
Notes	OK
Item configuration	none
Names	VANNE00
Auto manuel status	****
Debit entree	1 L-PAR-S
Debit sortie	0 L-PAR-S
Status vanne	off
Etat vanne	bf

a debit, the debit entree of VANNE00	
Options	do not forward chain, breadth first backward chain
Notes	OK
Item configuration	none
Names	none
Tracing and breakpoints	default
Data type	l-par-s
Initial value	none
Last recorded value	1 L-PAR-S, valid indefinitely
History keeping spec	do not keep history
Validity interval	supplied
Formula	1 l-par-s
Simulation details	no simulation formula yet
Initial value for simulation	default
Data server	inference engine
Default update interval	1 second

Fig.4.29.a. Exemple d'instance et de variable régissant un attribut avec valeur fixe

VANNE02, a vanne-2	
Notes	OK
Item configuration	none
Names	VANNE02
Auto manuel status	manuel
Debit entree	2 L-PAR-S
Debit sortie	2 L-PAR-S
Status vanne	on
Etat vanne	bf

a debit, the debit entree of VANNE02	
Options	do not forward chain, breadth first backward chain
Notes	OK
Item configuration	none
Names	none
Tracing and breakpoints	default
Data type	l-par-s
Initial value	none
Last recorded value	2 L-PAR-S, valid indefinitely
History keeping spec	do not keep history
Validity interval	supplied
Formula	(if the niveau-eau of reservoir02 <= 0 then 0 else 2 l-par-s)
Simulation details	no simulation formula yet
Initial value for simulation	default
Data server	inference engine
Default update interval	1 second

Fig.4.29.b. Exemple d'instance et de variable régissant un attribut par une règle

L'introduction au sein de la BC des composants avec leurs attributs et la génération d'instance nous a permis de représenter le système tel qu'il puisse être conduit (figure 4.30).

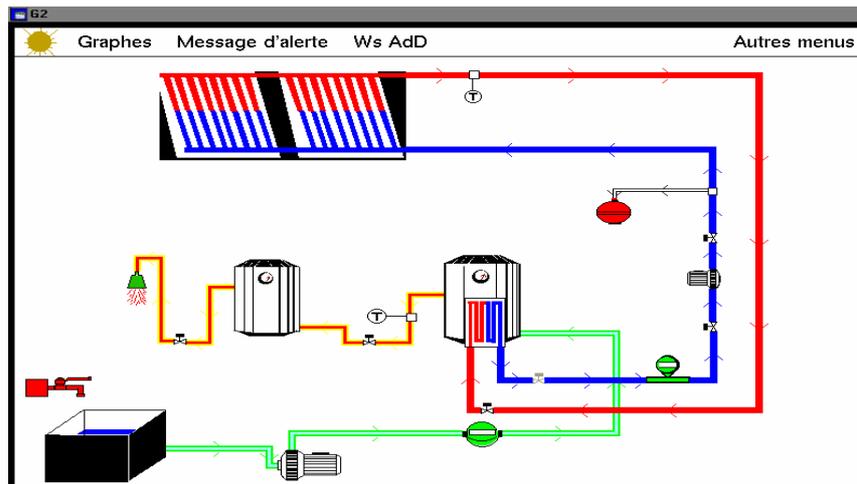


Fig.4.30. Vue générale du système dans la BC

4.8 Conduite du système dans la BC

Pour la conduite du système, nous avons établi au sein de la barre d'outil les possibilités d'intervention de l'opérateur sur le système selon 3 axes :

1. **Conduite et surveillance de certains paramètres :** L'opérateur peut à chaque instant visualiser sur un graphe les variations de température, et de niveau (figure.4.31.a et figure 4.31.b)

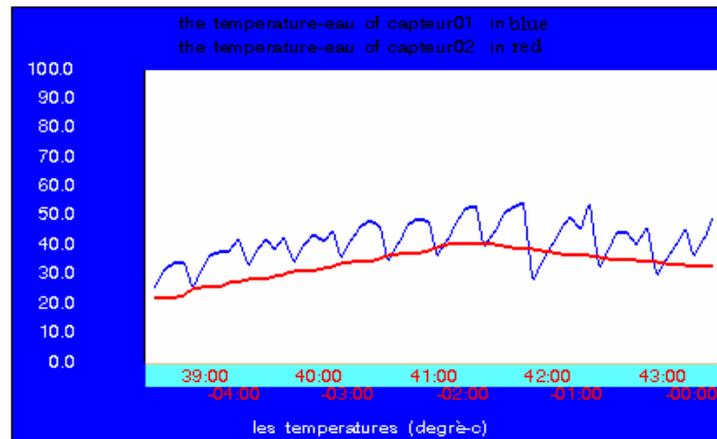


Fig.4.31.a. Variation de la température des deux capteurs

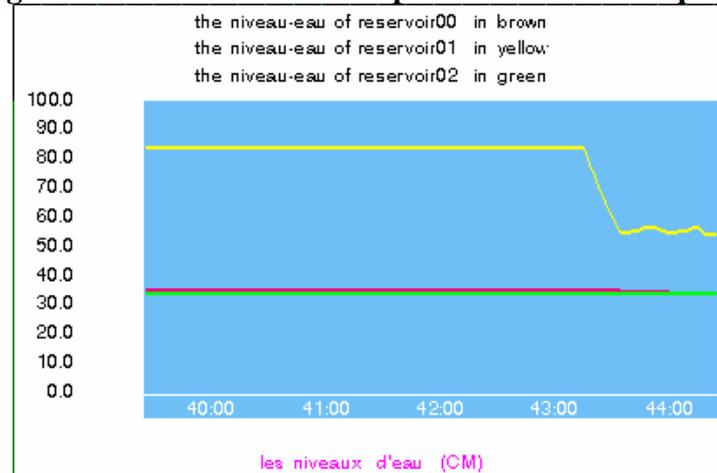


Fig.4.31.b. variation du niveau d'eau dans les trois réservoirs

2. **Commande des composants du système**

L'opérateur peut à tout nomment intervenir sur le statut de chaque composant telle que la commande des vannes ou des pompes ou bien changer les paramètres concernant le capteur plan telle que la longitude, l'altitude. Cette commande peut se faire selon deux approches (figure 4.32.a et figure 4.32.b)

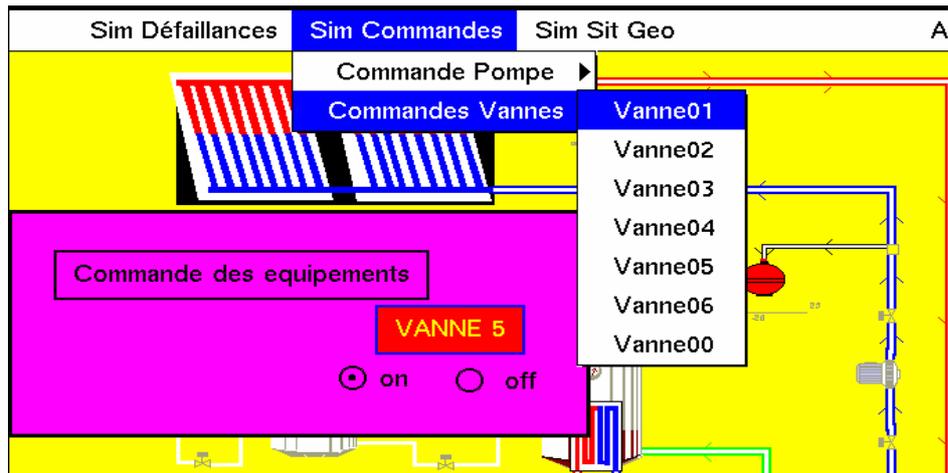


Fig. 4.32.a Commande d'une vanne

En mode utilisateur l'opérateur en cliquant sur l'objet lui peut alors changer son statut



Fig. 4.32.b Commande d'une vanne mode utilisateur

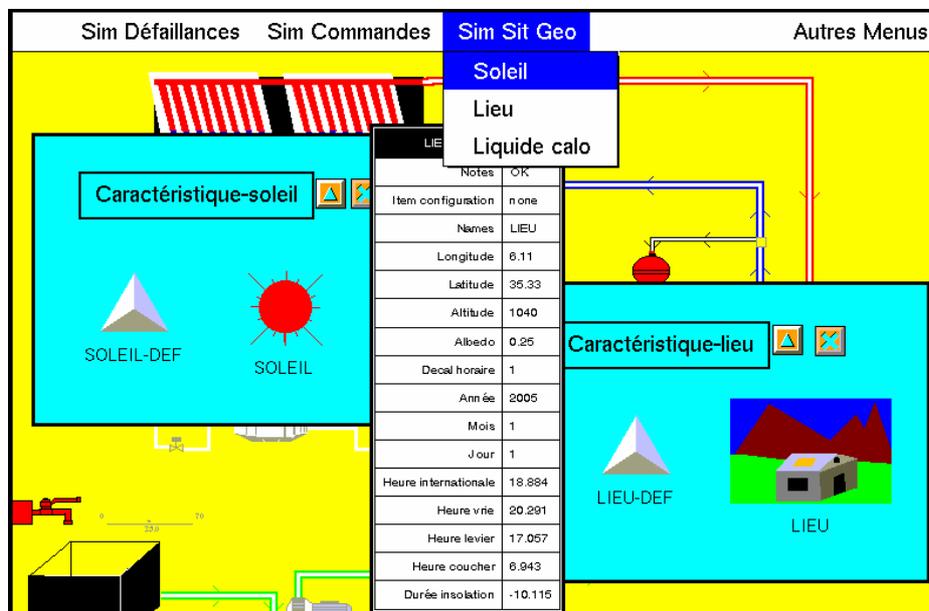


Fig. 4.33. Variation des caractéristiques du lieu d'implantation

4.9 Comparaison des résultats et validation du modèle

Afin de valider le module de diagnostic des défaillances, nous avons simulé pour chaque composant une défaillance ou un mode de défaillance (figure 4.33)



Fig.4.34. Simulation d'une défaillance au sein du système

En passant en mode de fonctionnement MBF (Mauvais fonctionnement, vanne Fermée) ou MBO (mauvais fonctionnement, vanne ouverte) les attributs de ces composants vont alors prendre des valeurs aléatoires créant ainsi un dysfonctionnement au sein de la simulation. La figure 4.35 montre le comportement d'un composant lors de la simulation des défaillances. Ainsi à gauche sur le schéma la vanne est ouverte (status on) et son état est bon fonctionnement (bf) ainsi son débit de sortie est différent de zéro, sur la partie droite en modifiant son état (mbf) et bien soit toujours ouverte (status on) son débit de sortie est égale à zéro.

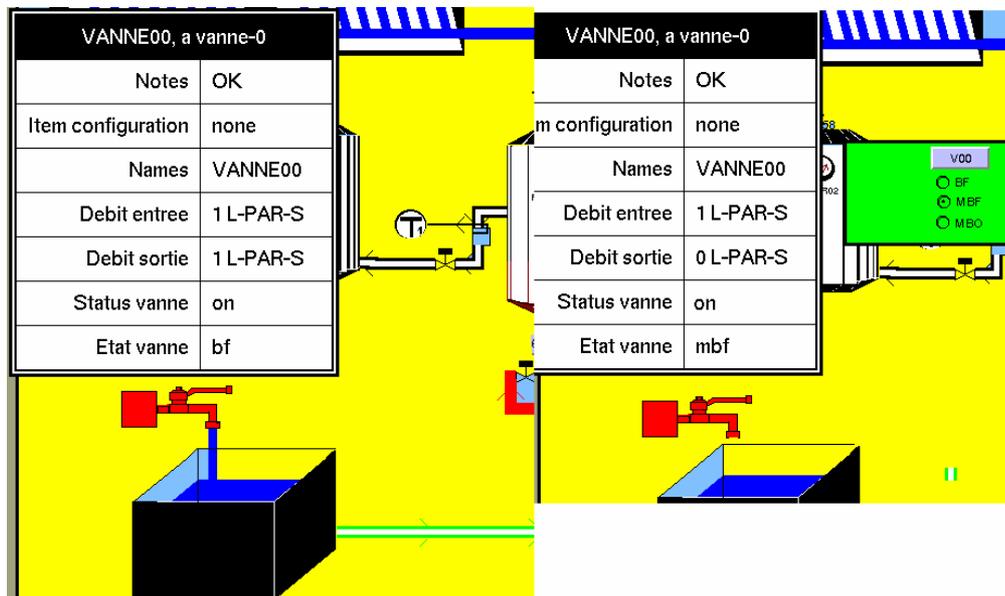


Fig.4.35. Conséquence d'une défaillance sur un composant

4.10 Conclusion

Dans le cadre de nos recherches, nous avons utilisé trois champs d'application à savoir

1. Un chauffe eau solaire au niveau de l'unité de recherche de l'Université de Batna

2. Le sous système de pasteurisation de la Laiterie des Aurès.
3. Le sous système de clinkérisation de la SCIMAT de Ain Touta

Nous avons travaillé sur le chauffe eau solaire et le sous système de pasteurisation de la Laiterie des Aurès, ceci est dû au fait que les deux systèmes sont assez proches d'un point de vue matériel.

Nous avons étendu l'étude à une cimenterie (aspect conduite et surveillance) surtout pour la présence de deux types de matière s'écoulant (gaz et solide) en effet nous remarquons que dans les deux premiers cas, nous avons une circulation d'un liquide seulement. Le chauffe eau solaire a fait l'objet du présent chapitre. Le sous système de pasteurisation de la Laiterie Aurès et celui de clinkérisation de la SCIMAT de Ain Touta feront l'objet des deux chapitres suivants

CHAPITRE V

Acquisition des

Connaissances et

Diagnostic des défaillances

au sein de la Laiterie Aurès

CHAPITRE V

Acquisition des Connaissances et Diagnostic des défaillances au sein de la Laiterie Aurès

Résumé : Ce chapitre est divisé en deux parties. La première est réservée à la présentation générale de la Laiterie Aurès, son organisation et son outil de production. La deuxième est consacrée exclusivement à la démarche adoptée pour l'analyse et la présentation des connaissances.

En effet, la taille et la complexité du fonctionnement des équipements de la laiterie ne permettent pas facilement une connaissance analytique et exhaustive. En conséquence, la modélisation de l'installation pour le diagnostic des défaillances demande un très lourd effort d'investissement. Nous terminons le chapitre par le module de diagnostic.

5.1 Introduction

Bien plus que tout autre secteur industriel, les industries agro-alimentaires représentent des enjeux économiques et stratégiques considérables. Ce tissu industriel se répartit sur l'ensemble du territoire national et son objectif principal est de satisfaire à une demande de plus en plus forte du consommateur au niveau du marché local. Ainsi, l'augmentation de la productivité à travers l'amélioration du taux d'utilisation des capacités installées est l'un des vecteurs principaux du succès et de la pérennité de ces entreprises.

Dans le contexte ci dessus la Laiterie Aurès, a été prise comme lieu d'application de notre étude. Nous essayons, à travers cette application, d'illustrer la mise en oeuvre de l'approche système expert dans le but d'établir un diagnostic.

5.2 Présentation générale

Nous décrivons notre système à partir du contexte industriel qui le caractérise du point de vue : produits élaborés, organisation de la production, et enfin système physique c'est-à-dire le procédé proprement dit.

5.2.1 Les produits

La taille de la laiterie permet une production journalière d'environ 150 000 litres de produits laitiers, assurée par le roulement de deux équipes. Les divers produits élaborés se répartissent dans les catégories suivantes: 1) les laits : pasteurisé (lait de consommation), stérilisé, fermenté (leben), 2) les yaourts : étuvé, brassé, 3) la pâte fraîche (fromage), et l'huile de beurre (smen).

La préparation de ces produits doit être conforme aux délais de production et aux formules de base établies. Aussi, les matières premières proviennent essentiellement de l'importation. La partie transformation de l'installation regroupe plusieurs sections destinées à la fabrication des divers produits et comporte les divisions suivantes : reconstitution, réception du lait cru, conditionnement des produits, entrepôt des diverses matières premières, du matériel d'entretien et d'emballage, centrale de nettoyage, et laboratoire.

5.2.2 Organisation de la production

La différenciation en types de produits explique l'organisation de la production que l'on peut décrire de façon séquentielle (Figure 5.1.), chaque séquence correspond à une sous-unité fonctionnelle.

- La **réception** du lait cru (fourni par les éleveurs locaux), le lait en poudre et les diverses matières premières proviennent de l'entrepôt de stockage. Pour la préparation des divers produits, on utilise soit du lait reconstitué (lait en poudre reconstitué), soit un mélange du lait cru standardisé et du lait reconstitué, en proportions variables (max. 20 % de lait frais). Dans cette étape, une certaine quantité de lait de reconstitution/standardisation est destinée au développement de ferments indispensables ultérieurement lors de la préparation des yaourts et du lait fermenté.
- Le **prétraitement** du lait de reconstitution/standardisation qui consiste d'abord en l'adjonction d'une certaine quantité de matière grasse (M.G.L.A) selon le produit fabriqué. Ce dernier est ensuite homogénéisé avant d'être refroidi et introduit enfin dans des cuves de stockage intermédiaire.
- La **pasteurisation** des divers produits, les cuves de stockage intermédiaire sont raccordées à l'un des trois groupes de pasteurisation :
 - groupe de pasteurisation pour les produits fermentés,
 - groupe de pasteurisation pour le lait pasteurisé et le lait stérilisé,
 - groupe de pasteurisation pour la pâte fraîche.

L'ensemble des pasteurisateurs auxquels on ajoute toute la cuverie de stockage avant conditionnement. Les équipements de préparation-distribution des ferments ainsi que les autres ingrédients se trouvent dans le même lieu dit atelier de production.

- Le **conditionnement** des produits s'effectue dans des lignes indépendantes :
 - Pour les laits : pasteurisé, fermenté, et stérilisé, le conditionnement suit le même processus.
 - Pour les yaourts ainsi que la pâte fraîche, chaque produit correspond à une machine de conditionnement.
 - Pour l'huile de beurre, une ligne indépendante permet le conditionnement de l'élément de base unique de ce produit qui est la M.G.L.A.

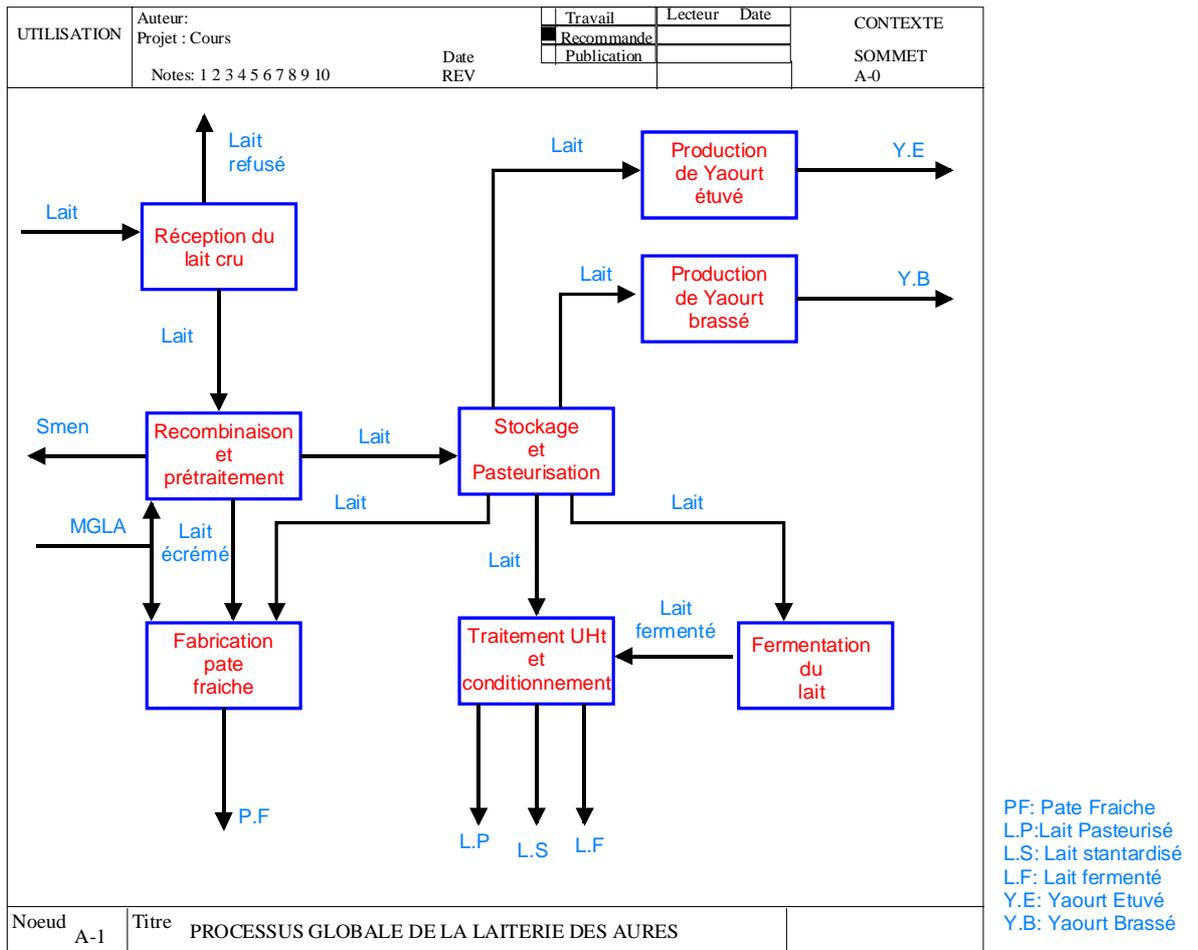


Fig.5.1. Organigramme du processus : diagramme simplifié

5.2.3 L'outil de production

L'étude a porté sur l'ensemble des équipements de l'unité de production. Dans une première constatation le procédé se caractérise par la présence simultanée des aspects continus et discrets, en ce sens, on peut le qualifier d'hybride. L'aspect continu se manifeste lorsqu'on traite, transporte, stocke les matières, il s'agit alors de mesurer des températures, des débits, des pressions, etc. ; de les contrôler et de les réguler. L'aspect discret apparaît dès que la matière soumise aux opérations d'élaboration a donné naissance aux divers produits que l'on traite dans un processus de fabrication dont les phases ou étapes sont fortement mécanisées.

La **Technologie d'automatisation** : Avec les nouvelles technologies, les outils de production évoluent. Les machines isolées, n'assurant qu'un nombre restreint d'opérations de transformation du produit et disposant entre elles d'une certaine autonomie temporelle, sont peu à peu remplacées par de véritables processus industriels assurant de façon continue (ou quasi continue) les différentes opérations de transformation [Neboit et al, 90].

Du point de vue technique, cette évolution des systèmes de production est rendue possible par trois facteurs : nouvelles formes d'outils de production (machines-transferts), performances et accessibilité supérieure des automates, et l'informatisation.

Par rapport à la structuration hiérarchisée du système intégré de production (S.I.P) [Verge et al, 89], le procédé auquel nous nous intéressons est structuré en deux niveaux (Figure 5.2), donc l'absence d'une commande centralisée (niveau 2). En plus, certaines opérations sont élaborées manuellement par les opérateurs au niveau des divers ateliers car l'automatisation de ces tâches n'est pas techniquement ou économiquement réalisable.

Ainsi, les moyens de production de la laiterie du point de vue technologie d'automatisation sont conçus autour de divers sous-systèmes modulaires et plusieurs types d'automatismes coexistent, à savoir :

- Les systèmes électroniques (les compresseurs d'air et frigorifiques, l'équipement de production de la vapeur et des machines de conditionnement).
- Les automatismes classiques à relais.
- La logique programmable est également présente à travers des automates au niveau du procès pour le contrôle-commande des opérations de nettoyage (CIP) ainsi que certaines fonctions d'activation des moteurs pour la production, aussi au niveau des lignes de conditionnement des yaourts et de la pâte fraîche.

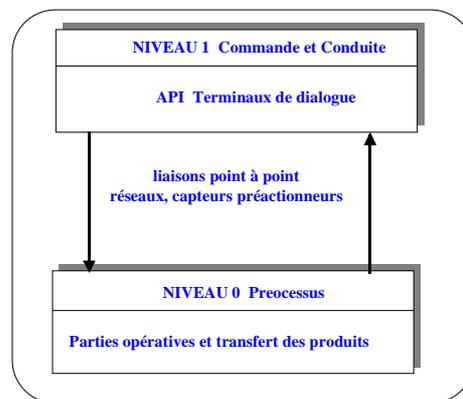


Fig.5.2. La structure de l'unité

Étant donné que le diagnostic fait partie des activités de la maintenance, l'un des axes de notre étude préliminaire porte sur la politique de maintenance au niveau de la laiterie. Ainsi, par rapport aux différentes formes reportées dans la littérature¹, nous avons constaté que pour assurer la maintenance des équipements du procédé, les interventions planifiées au niveau du service méthodes-maintenance permettent la mise en oeuvre d'une

politique préventive assez pauvre, en plus les opérations correctives généralement de type curatif sont caractérisées par une efficacité et rapidité assez faible entraînant des arrêts de production significatifs [Mouss et al , 00 a] et[Mouss et al , 00 b].

5.3 Analyse des connaissances au sein de la laiterie Aurès

5.3.1 Introduction

La taille et la complexité du fonctionnement des équipements de la laiterie ne permettent pas facilement une connaissance analytique et exhaustive. En conséquence, la modélisation de l'installation pour le diagnostic ultérieur des défaillances demande un très lourd effort d'investissement de la part des cognitiens. Toutefois le processus d'acquisition des connaissances peut être réduit considérablement s'il est guidé par une démarche méthodologique appropriée ; en plus, si certains paramètres nécessaires pour les schémas de représentation des connaissances sont clairement définis. Le diagnostic est basé sur la réutilisation des modèles élaborés lors de l'analyse de sûreté de fonctionnement.

Avant d'aborder la démarche proposée, il est impératif de fixer l'objectif de l'analyse de sûreté de fonctionnement.

5.3.2 Objectif

Contrairement aux industries à haut risque, les systèmes de production en général et les procédés agro-alimentaires en particulier ne présentent pas des dangers au cours de leur exploitation. Ainsi, la composante sécurité des biens et des personnes n'est pas prise en considération au cours de cette analyse. En effet, si on considère l'aspect sécurité du consommateur, on s'aperçoit que celle-ci est garantie en phase de prévention par la mise en oeuvre de consignes d'hygiène strictes à travers :

- La mise au point de technologies spéciales évitant les points de rétention et isolant le milieu opératoire du monde ambiant.
- La réalisation de structures et équipements supportant les opérations de nettoyage en place (CIP), d'aseptisation, etc.

Quant au contrôle et la garantie de la sécurité, ils reposent sur la fonction laboratoire, une composante incontournable qui permet de gérer les résultats d'analyses des échantillons du prélèvement.

¹ Se reporter à [Boucly, 90] [Monchy, 95].

Ainsi, le but de l'analyse des moyens et équipements de production effectuée est l'amélioration de la disponibilité (fiabilité + maintenabilité) à travers la maîtrise des défaillances. Les modèles réalisés au cours de cette analyse sont exploités pour l'identification et le diagnostic des dysfonctionnements toujours dans le cadre des objectifs d'obtention du rendement global maximum de l'outil de production.

5.3.3 La démarche adoptée au sein de la laiterie Aurès

Nous décrivons dans ce qui suit la démarche pratique comprenant les modalités de recueil, d'analyse et de structuration des connaissances relatives au système étudié en vue de l'élaboration d'un outil d'aide au diagnostic des dysfonctionnements [Mouss et al , 00 c] et [Mouss et al , 00 d]. Les différentes étapes de l'analyse peuvent être structurées en deux phases principales: *Analyse du fonctionnement et Analyse du dysfonctionnement*

5.3.3.1 Analyse du fonctionnement

5.3.3.1.1 Introduction

Cette phase débute par une étape préliminaire d'analyse technique et consiste en la prise de connaissance du système de production schématisé de manière générale (Figure 5.3.a. et 5.3.b.) en considérant le triptyque : produit – processus - équipement. Ainsi, les informations concernant le système physique (ou processus), les produits fabriqués, l'organisation des ateliers ou des zones, les processus (ou sous-processus) et les cycles de fabrication doivent être précisés. Il est également indispensable d'identifier :

- Les conditions d'exploitation du système et l'environnement du système pour connaître ses délimitations et l'influence des facteurs extérieurs.
- Les différentes opérations de maintenance d'entretien et correctives réalisées par le service maintenance.
- L'inventaire des moyens de mesure, cette instrumentation est pertinente pour avoir accès à l'information indispensable pour la mise en oeuvre du diagnostic.

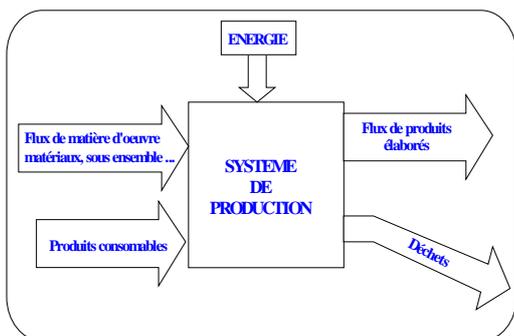


Fig.5.3.a. Système de production

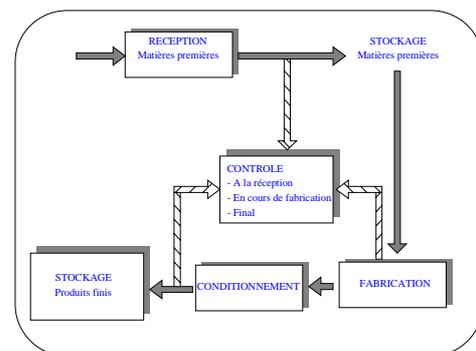


Fig.5.3.b. Ligne de production

L'étude se poursuit par la mise en oeuvre des méthodes d'analyse fonctionnelle, l'objectif étant de décomposer le système sous l'angle structurel et fonctionnel et d'établir le modèle fonctionnel du système qui sera à la base de l'analyse des dysfonctionnements.

Les systèmes modernes sont de plus en plus complexes et font souvent appel à de nombreuses disciplines technologiques (automatique, informatique, électronique, mécanique,...). Il est donc nécessaire de recourir à plusieurs outils de description fonctionnelle pour les modéliser. Des flux sans cesse croissants de matières et d'informations de diverses natures transitent au sein du SdP.

5.3.3.1.2 SADT une méthode d'acquisition des connaissances

La démarche que nous avons adoptée pour l'acquisition des connaissances est basée sur l'outil d'analyse fonctionnelle, la méthode SADT (Chapitre II). Cette étape permet d'explicitier les fonctionnalités du procédé et les différentes informations utiles au diagnostic et constitue la base de l'élaboration des modèles du bon fonctionnement des éléments constituant le système (Figure 5.4).

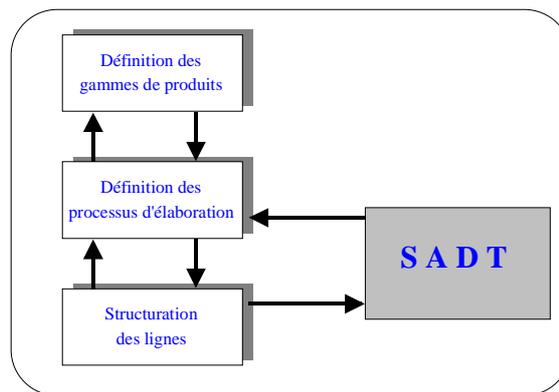


Fig.5.4. Analyse fonctionnelle par SADT

Les diagrammes SADT composent un modèle hiérarchisé qui modélise à la fois la hiérarchie fonctionnelle et les liens vers le matériel par les mécanismes et des flux (boucles de régulation). Ainsi, si on désigne le système global par un actigramme, l'activité va être décomposée en sous-activités et ainsi de suite, jusqu'à l'obtention d'un arbre fonctionnel (Figure 5.5).

En parallèle avec la décomposition fonctionnelle, la décomposition structurelle (Figure 5.6.) prend en compte les notions de système, sous-système, groupements de matériels, qui accomplissent les fonctions. En effet, pour assurer les objectifs fonctionnels, le processus fait appel à l'ensemble des mécanismes supports des activités.

Le modèle fonctionnel résultant à l'issue de cette étape d'analyse est représenté sous forme arborescente, où chaque unité fonctionnelle représente la mission réalisée par le système, les sous-systèmes, les groupements, les ensembles, les sous-ensembles,..., et les composants.

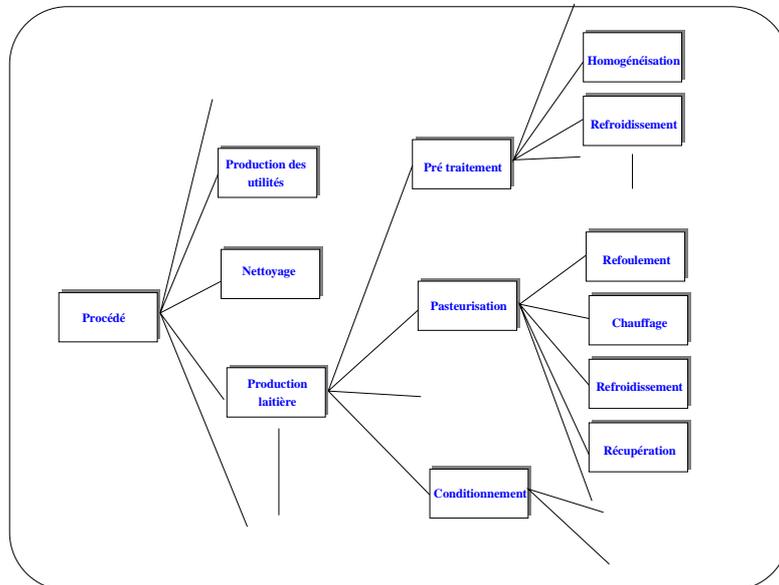


Fig.5.5. Décomposition hiérarchique du procédé

Les procédés industriels sont caractérisés par un ensemble d'opérations élémentaires et processus de base, en plus des moyens de contrôle, d'instrumentation et de surveillance. Il est donc nécessaire d'adopter une approche hiérarchique permettant de mieux appréhender ces systèmes, en particulier pour parvenir à maîtriser leur complexité

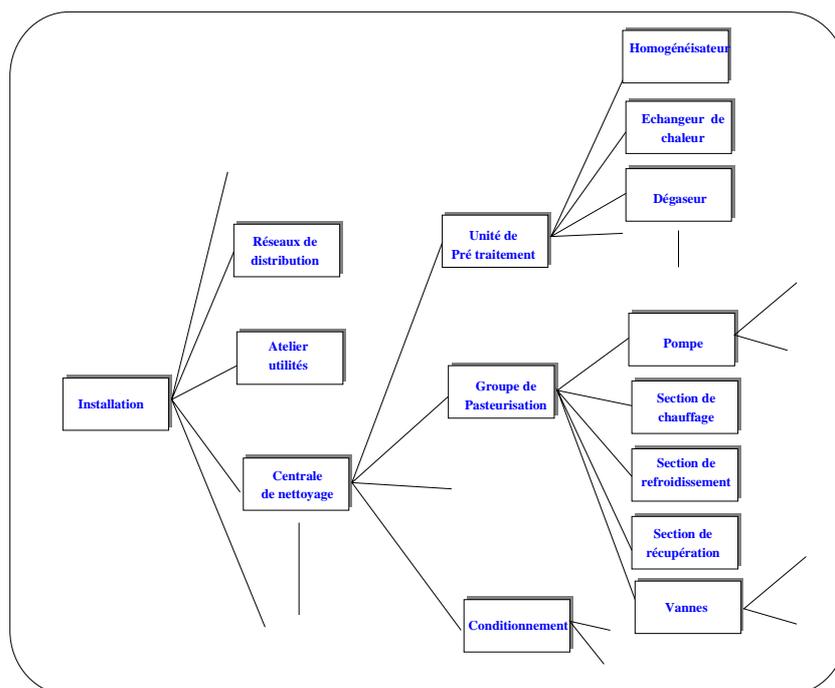


Fig.5.6. Décomposition hiérarchique de l'installation

Pour modéliser notre système, nous utilisons une représentation sous forme d'arbre fonctionnel structuré sur deux niveaux (Figure 5.7.). Ce modèle s'inspire fortement de la structure des arbres de but et des arbres de succès (*Goal Tree-Success Tree*) [Chen and al, 90] et [Teixeira and al, 93].

La construction du modèle débute avec l'identification des unités fonctionnelles (ou processus) et leurs objectifs fonctionnels, utilisant le principe qu'un processus est en fonctionnement normal lorsque les objectifs pour lesquels il a été conçu sont atteints à travers l'aptitude des unités fonctionnelles à accomplir correctement leurs fonctions.

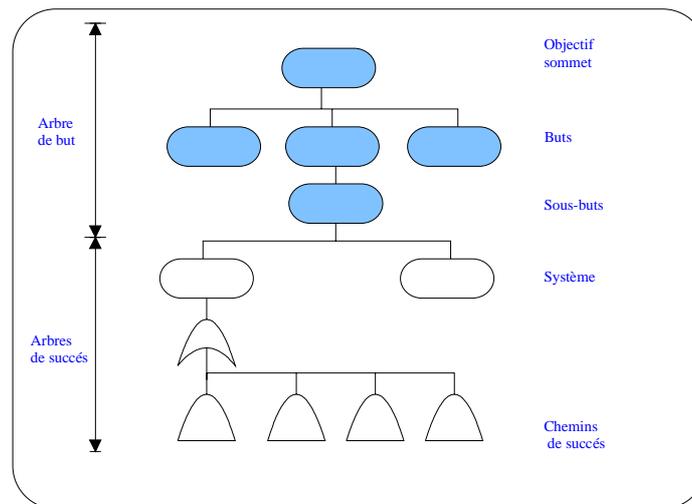


Fig.5.7. Structure typique du modèle fonctionnel

L'objectif sommet doit être explicitement défini, ensuite il est systématiquement décomposé en objectifs plus détaillés. Pour assurer l'exhaustivité de cette présentation, l'identification des objectifs¹ est basée sur la logique suivante:

- La relation d'ascendance explique pourquoi une fonction est requise.
- La relation de descendance explique comment cette fonction est accomplie.

Lorsqu'il n'est pas possible de décomposer, le développement des chemins de succès commence en considérant les équipements assurant les fonctions identifiées plus haut, les conditions opératoires du processus ainsi que les activités des opérateurs.

Dans notre application, l'exigence majeure à prendre en compte pour élaborer le modèle du processus au niveau des unités fonctionnelles est basée sur la mission d'optimisation de la production du système, cet objectif² permet d'assurer la performance économique (production optimale) et le contrôle de qualité, c'est-à-dire maintenir la qualité requise.

¹ Dans le cas d'un système physique, un objectif est précisément une fonction.

² Rappelons que les contraintes de sécurité ne sont pas introduites.

5.3.3.2 Analyse des dysfonctionnements

Cette étape a pour objectif l'identification des dysfonctionnements pouvant affecter la mission du système, elle s'effectue à travers la mise en oeuvre de l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et leurs criticité et l'élaboration des arbres de défaillance qui modélisent l'enchaînement causal des événements conduisant à l'occurrence des situations indésirables.

Cette analyse est grandement facilitée par la connaissance des modèles structurels et fonctionnels de l'installation. Ceux-ci permettent de recenser toutes les défaillances envisageables. En effet, le principe de décomposition fonctionnelle est indispensable pour éclaircir les notions de défaillance, de leurs causes et de leurs effets.

Ainsi, les modèles fonctionnels élaborés dans la phase d'analyse fonctionnelle servent de base pour l'élaboration des modèles dysfonctionnels. En particulier, au niveau des unités fonctionnelles, l'identification des états défaillants (ou dégradés) sources d'événements indésirables est obtenue à partir du modèle fonctionnel qui représente la forme duale de l'arbre de défaillance. Les modes de défaillance pris en compte dans le modèle réalisé sont issus des états défaillants (ou dégradés) relatifs aux équipements et composants (capteurs, vannes, pompes,...) et les erreurs humaines. Leur propagation conduit successivement à l'occurrence des anomalies (température élevée, débit insuffisant,...) au niveau du processus analysé.

5.3.4 Conclusion

De nombreuses méthodes mises au point pour les études de sûreté de fonctionnement peuvent être utilisées avec profit pour le diagnostic de défaillances de processus industriels. Ainsi, la réutilisation des modèles tels que l'AMDEC, l'AdD, ou les graphes dirigés signés (*signed digraphs*) [Andow, 91], [Kont, 93], [Kramer and al, 87], [Narayanan and al, 87], [Schwarzblat and al, 85] et [Sellali et al, 92] pour la génération des bases de connaissances des systèmes d'aide au diagnostic permet d'économiser le grand effort fourni pour l'acquisition des connaissances. En effet, la plupart des connaissances indispensables pour l'identification des causes de défaillances sont déjà modélisées par l'analyste lors de l'élaboration des modèles de sûreté de fonctionnement.

5.4 Présentation des connaissances

5.4.1 Introduction

Pour établir un diagnostic, c'est-à-dire la recherche des causes à l'origine d'un dysfonctionnement constaté, nous utilisons les modèles élaborés en phase d'analyse des connaissances. La démarche utilisée qui consiste à effectuer une analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle du système nous permet d'apporter les éléments nécessaires à la modélisation des connaissances structurelles, fonctionnelles, et comportementales du système à diagnostiquer.

Ainsi, cette analyse nous a permis dans un premier temps de décomposer le système sous l'angle structurel et fonctionnel et d'établir des modèles hiérarchisés du processus et de l'installation. Pour représenter le modèle fonctionnel, les informations suivantes sont à considérer : sous-processus, état (phase de fonctionnement du processus), mode de défaillance, détection (alarme), relation (relation entre détection et mode de défaillance). Les relations causales entre l'ensemble des modes de défaillance composent un graphe de propagation des défaillances, les liens sont augmentés par la probabilité de propagation de la défaillance, la durée de propagation et enfin le type de causalité (deux types de causalité sont distinguées : relation ET et relation OU). Pour la représentation du modèle structurel, il est nécessaire de considérer les informations suivantes : sous-système (descendant) et l'état défaillant. Pour modéliser les dysfonctionnements, la démarche d'analyse des connaissances aboutit à l'élaboration d'un arbre de défaillance pour chaque unité fonctionnelle appartenant au procédé. La structure graphique arborescente nous permet de distinguer trois niveaux : un niveau racine, un niveau intermédiaire, et un niveau terminal.

Un événement sommet est un événement qui n'a pas de père (ascendant) et qui possède des fils (descendants). Un événement intermédiaire est un événement qui possède des pères et des fils. Un événement terminal ne possède que des pères.

Pour représenter l'AdD, deux concepts sont distingués et décrits par la suite, à savoir : les concepts événement et porte. D'une façon générale, un événement est caractérisé par les informations suivantes : nom de l'événement, description de l'événement, noms des événements fils (descendants), noms des événements pères (ascendants), logique (relation logique entre l'événement et ses ascendants : ET, OU), valeur de certitude (sûre ou probable), etc.

5.4.2 Représentation des connaissances dans G2

L'application ci-dessous est présentée dans le but d'illustrer la démarche proposée. Les supports sur lesquels nous nous sommes basés comportent : la documentation technique fournie par le constructeur, les plans d'ensemble, les plans détaillés et les notices techniques de fonctionnement. Les procédures de maintenance ne sont disponibles que pour certains équipements. Cependant, les dossiers machine et historique sont souvent mal documentés. Notons également que les participants rassemblent le personnel du service de maintenance (bureau de méthodes) et celui chargé de la conduite du procédé.

Le processus global simulé au niveau de la BC de G2 est composé des sous unités fonctionnelles suivantes :

5.4.2.1 Réception du lait de cru

L'unité possède deux lignes de réception du lait de cru. La première pour la réception du lait à partir de camion citerne d'où le lait est extrait et envoyé vers le tank T00. Il est ensuite dirigé vers l'échangeur pour y être refroidi avant d'être stocké dans le tank T5. La seconde ligne de réception est destinée aux fournisseurs utilisant des bidons. Après un pesage, le lait est alors refroidi et stocké dans le tank T5. Le lait non conforme est stocké au niveau du tank T5 avant d'être réexpédié. Ce lait de vache peut alors soit servir à la fabrication de la pâte fraîche soit être pasteurisé dans l'état et conditionné comme lait de vache pasteurisé ou bien utilisé avec le lait reconstitué (figure 5.8)

5.4.2.2. Reconstitution du lait en poudre

Un tank tampon « 010-08 » permet d'avoir un stock d'eau traitée nécessaire à la reconstitution. En fonction de la quantité de poudre disponible au niveau du tri blinder « 010-03 » l'opérateur fixe la quantité d'eau nécessaire au niveau du contrôleur « R-CONT2 » qui fermera automatiquement la vanne « 010-01 » une fois la quantité d'eau nécessaire comptabilisé.

Une fois chauffé à 55 °C, l'eau est envoyée vers l'échangeur à plaques « 010-02 ». Elle est dirigée ensuite vers l'un des mélangeurs « T10 » ou « T11 » et circule alors à travers les vannes et la pompe « 010-17 » et le tri blinder pour emporter de la poudre de lait. Une fois la reconstitution terminée, le lait est évacué vers le stockage à travers la pompes « 010-15 ». Les figures 5.9.a et 5.9.b représentent les deux parcours du lait durant les phases de reconstitution « a » et d'évacuation « b ».

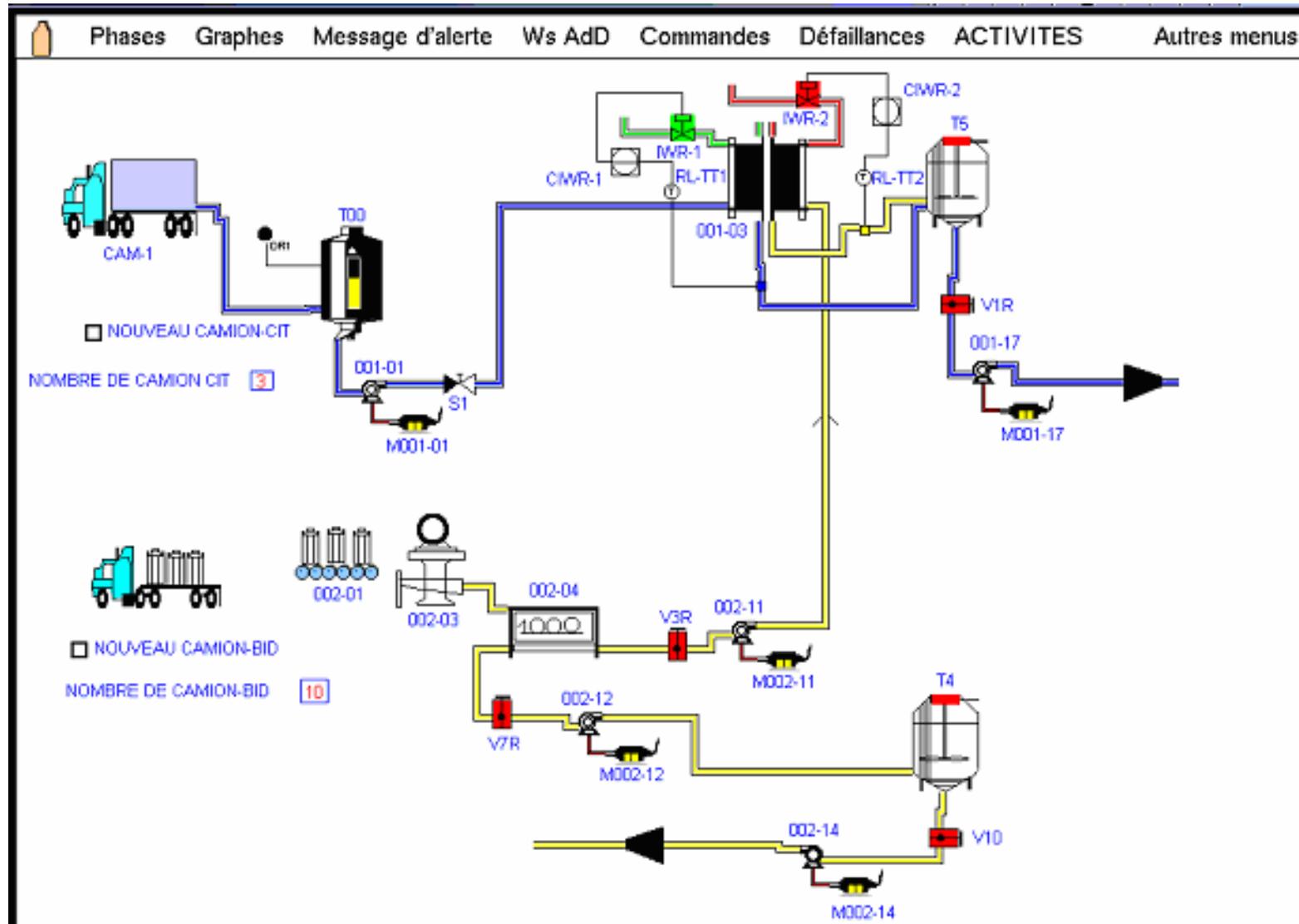


Fig.5.8. Réception du lait de vache

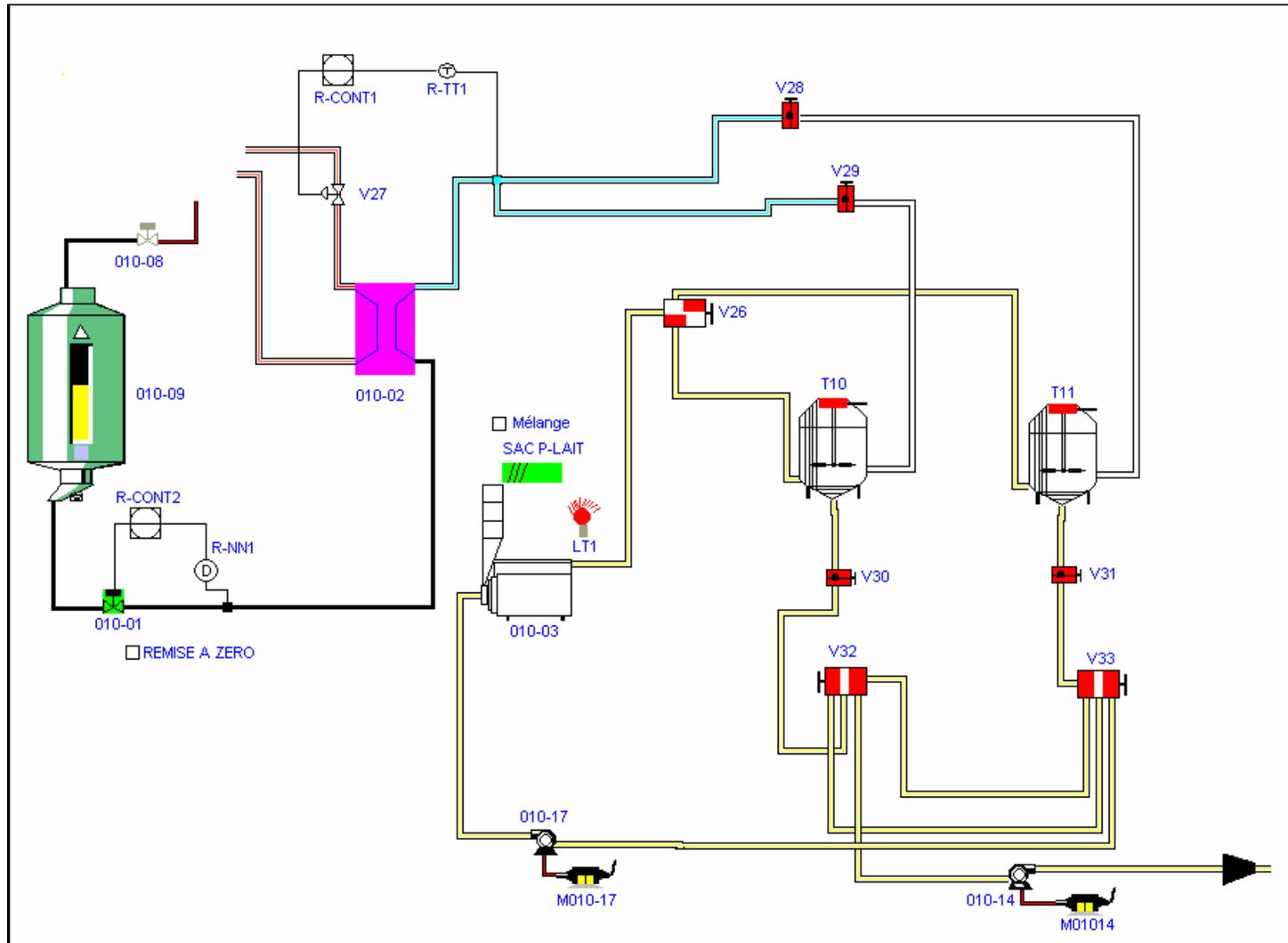


Fig.5.9.Reconstitution du lait en poudre

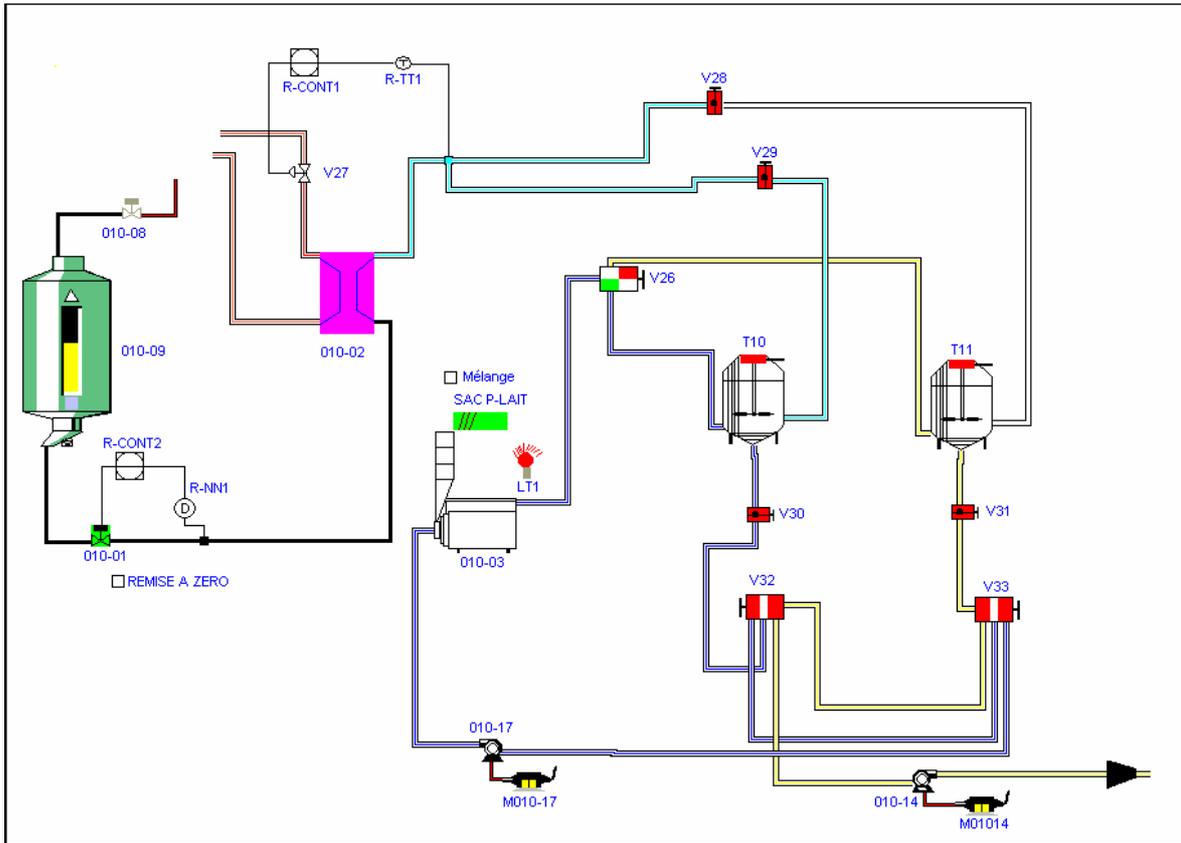


Fig. 5.9.a. Phase de reconstitution

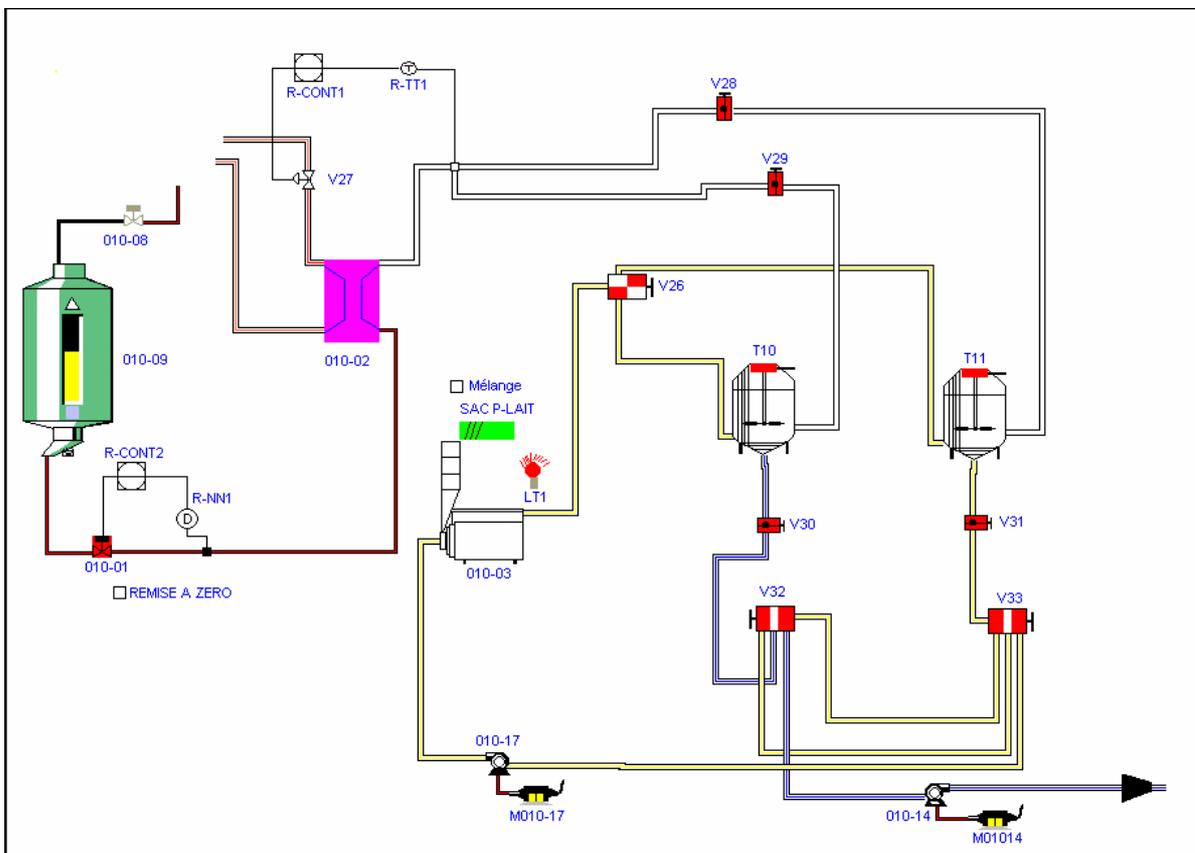


Fig. 5.9.b. Phase d'évacuation

5.4.2.3 Écrémage du lait

Le lait de vache réceptionné est envoyé vers un échangeur à plaques à travers un système de régulation de débit. Une fois chauffé, il est dirigé vers un séparateur 001-12 d'où la crème sera extraite. Le lait repart alors vers l'échangeur pour y être refroidi et stocké au niveau du tank 001-13. (Figure. 5.10).

5.4.2.4 Recombinaison

La phase de recombinaison est seulement nécessaire dans le cas où au niveau de la reconstitution du lait en poudre, l'opérateur n'utilise pas du lait à 26 %. Dans ce cas seulement l'adjonction de M.G.L.A est nécessaire. Le lait provenant d'un tank tampon passe par un échangeur à plaques pour y être chauffé, ensuite il passe par un dégaseur. A la sortie, il est mélangé avec de la M.G.L.A pour passer ensuite par un homogénéisateur pour être ensuite refroidi au niveau de l'échangeur et envoyé pour le stockage (Figure .5.11)

5.4.2.5 Stockage

La laiterie Aurès possède des tanks permettant de passer d'une phase vers un autre. Trois tanks permettent de recevoir le lait après homogénéisation. Le lait est envoyé pour un prétraitement et ensuite pour une pasteurisation (soit pour la fabrication du lait standardisé soit le lait fermenté « Leben »). Le lait venant du prétraitement est stocké dans deux tanks (T20 – T21) pour partir ensuite vers la pasteurisation. (Figure .5.12)

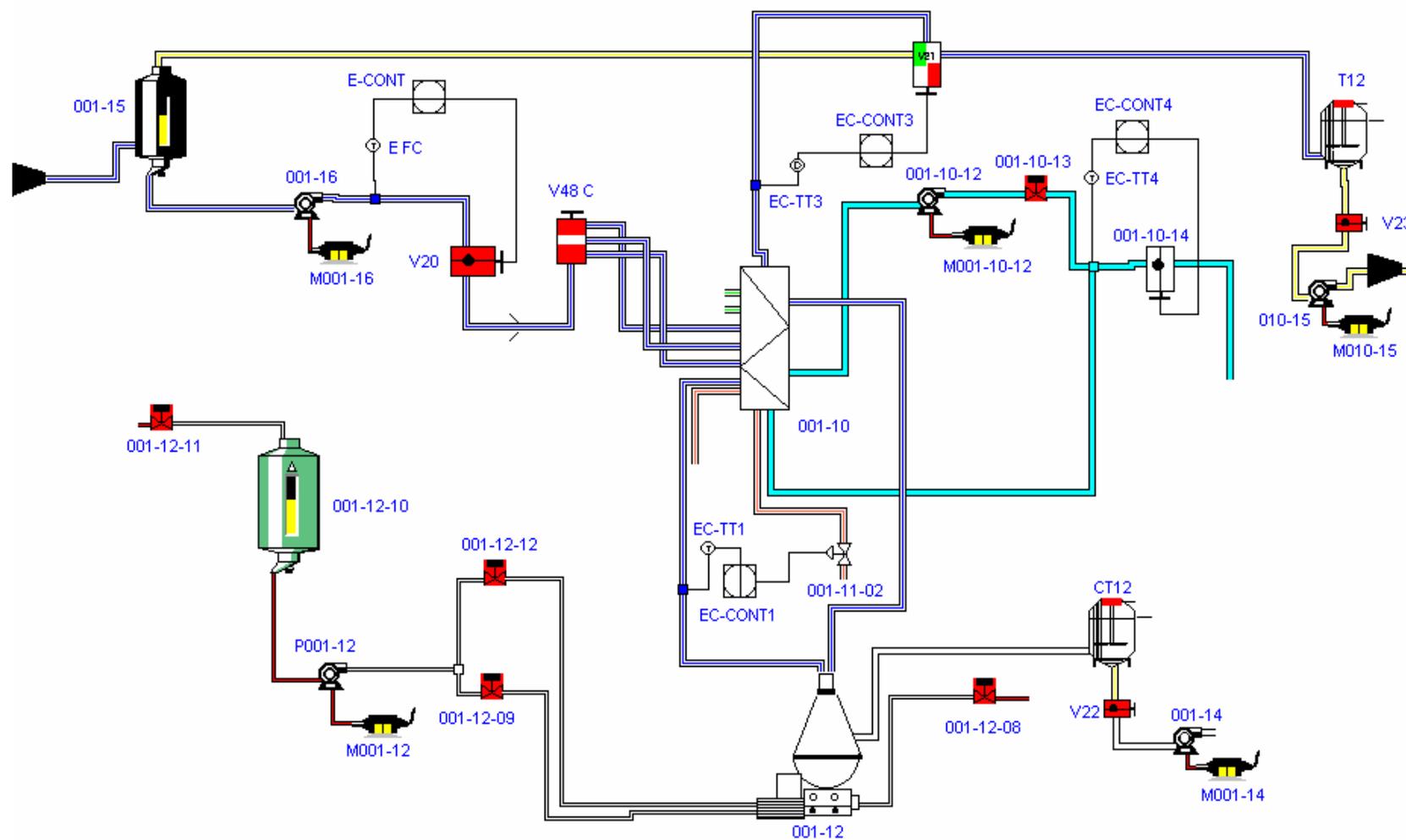


Fig.5.10. Écrémage du lait

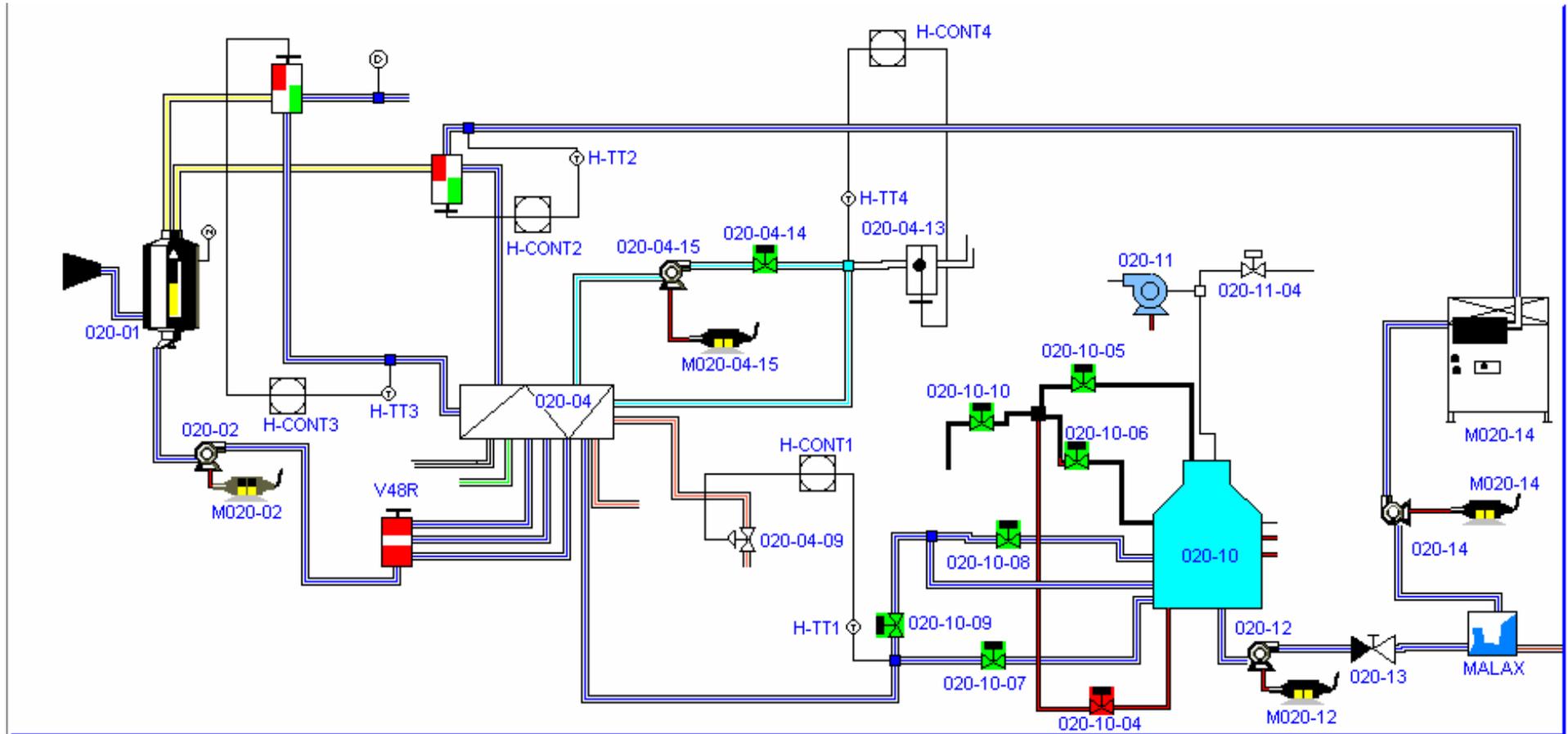


Fig.5.11. Recombinaison

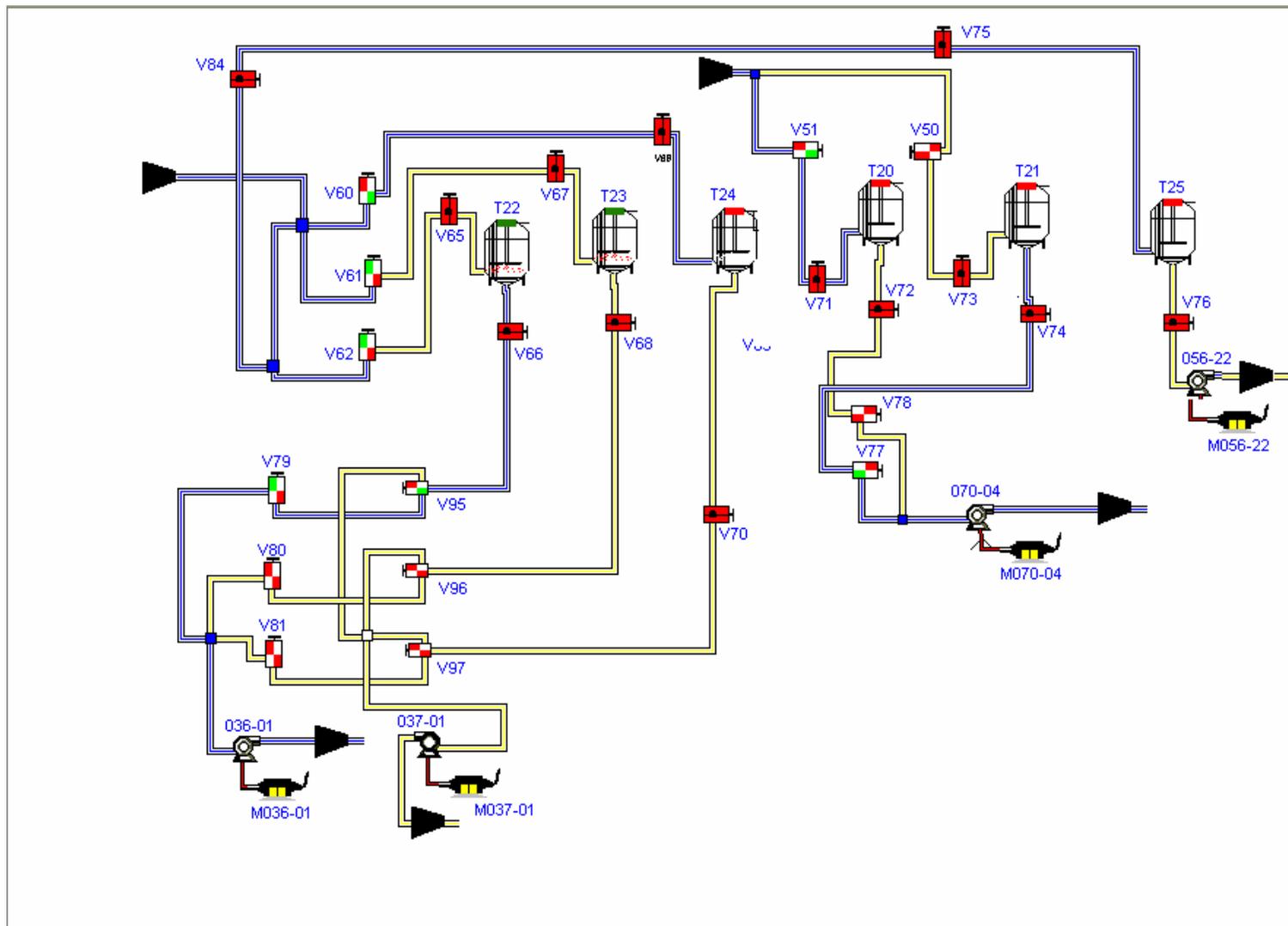


Fig.5.12. Stockage

5.4.2.6 Pasteurisation

Le lait venant d'une unité précédente en l'occurrence du stockage après prétraitement arrive au niveau du bac tampon « T01 ». Lorsqu'on débute une phase de pasteurisation, la pompe « P01 » est actionnée, elle aspire alors le lait pour l'envoyer à travers la vanne V2 vers l'échangeur de chaleur à plaques. Le lait ainsi chauffé arrive au niveau de la vanne « V5 » commandé par le contrôleur « R-Cont2 » qui envoie le lait en fonction de sa température (entre 90° et 95 °C) vers l'échangeur pour y être refroidit sinon vers le tank « T01 » pour un nouveau cycle de chauffage. Une fois refroidit le lait arrive au niveau de la vanne « V7 » commandé par le contrôleur « R-Cont-3 ». Si la température du lait est comprise entre 4° et 6°C le lait est envoyé vers la vanne « V9 » (Figure.5.13). Dans le cas contraire le lait est réinjecter pour un nouveau refroidissement.[Mouss and al , 00 a], [Mouss and al , 00 b] et [Mouss and al , 01]

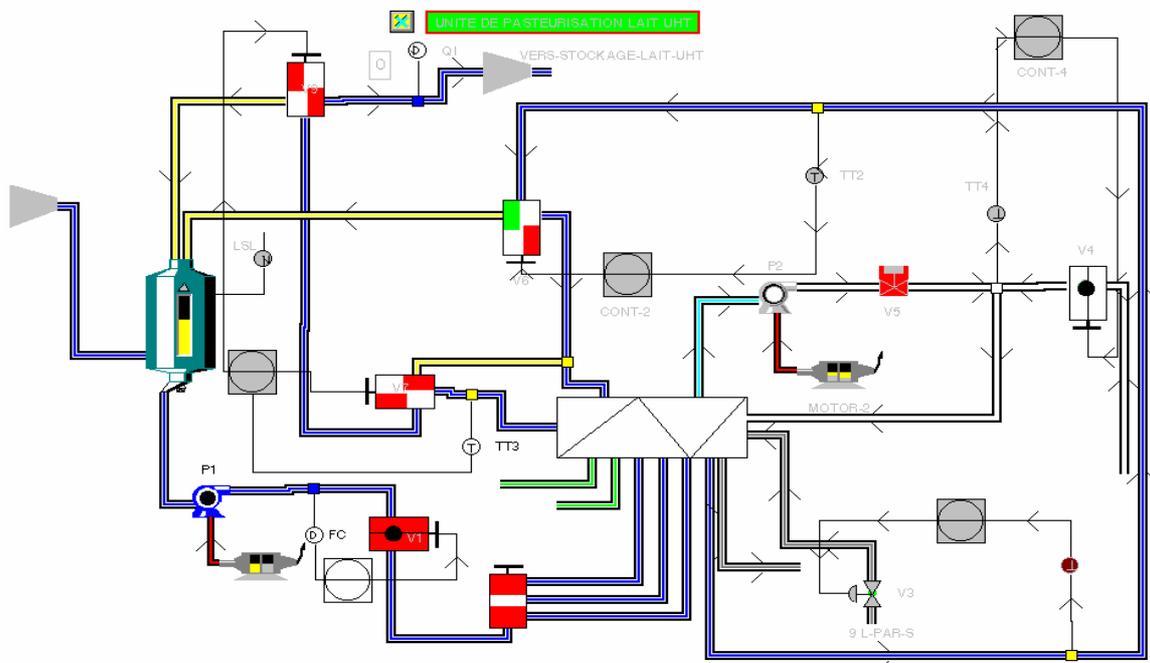


Fig.5.13. Pasteurisation

Comme l'échangeur à plaques est une partie centrale et intervient dans beaucoup de processus nous présentons ici le principe de fonctionnement du plus complexe qui existe au niveau de la laiterie c'est-à-dire celui à 5 étages Il est composé de plusieurs niveaux : le chauffage de l'eau, le chauffage du lait, le pré chauffage du lait, le pré refroidissement du lait et enfin le refroidissement du lait (figure 5.14)

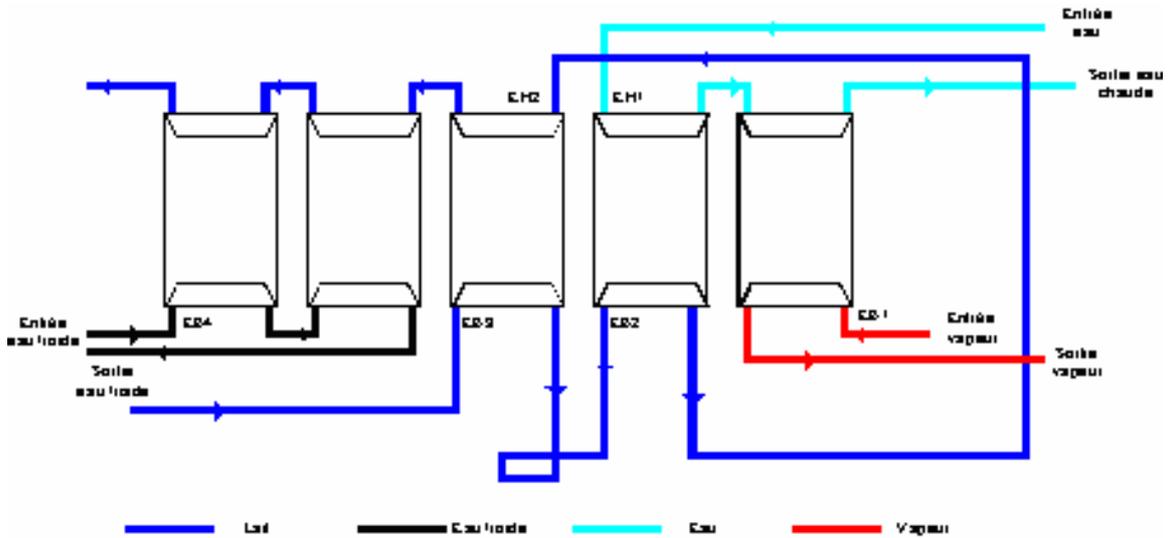


Fig.5.14.Échangeur de chaleur

La vapeur arrive au niveau de l'échangeur (point d'entrée EB1) va chauffer l'eau qui elle circule dans l'autre sens (point d'entrée EH1). Cette eau chauffée va à son tour chauffer le lait (point d'entrée EB2). Comme le lait va être par la suite refroidit, le lait chaud va servir pour son propre pré chauffage (point d'entrée EH2 et EB3). Le lait partiellement refroidit sera amener à la température désirée grâce à de l'eau froide (point d'entrée EB5).

5.4.3 Le modèle dans la base de connaissance G2

Nous avons montré dans le troisième chapitre comment nous pouvons au sein de la base de connaissance de G2 définir une simulation. Celle-ci est régit en majeure partie par les formules décrites au niveau des variables et des règles de production. La seconde approche que nous avons développée constitue une approche procédurale. En effet le sous système est entièrement régit par des procédures [Mouss and al , 00 c]. Dans la partie qui suit nous présentons un exemple de la conduite du système géré par cette approche.

Dans un premier temps nous avons ainsi apporté une modification à la barre d'outil en ajoutant une troisième ligne relative exclusivement à la simulation(Fig.5.15).

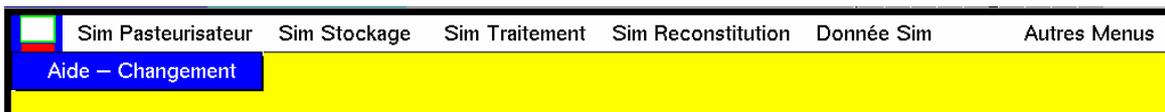


Fig.5.15. Vue générale de la barre d'outil pour la simulation

Chaque onglet permet alors de démarrer la simulation relative à une sous unité fonctionnelle.

- Sim pasteurisation : Pour la simulation de la phase de pasteurisation nous avons la possibilité d'alimenter le tank tampon, de démarrer la phase de pasteurisation proprement dite ou de mettre fin à celle-ci (Fig.5.16).

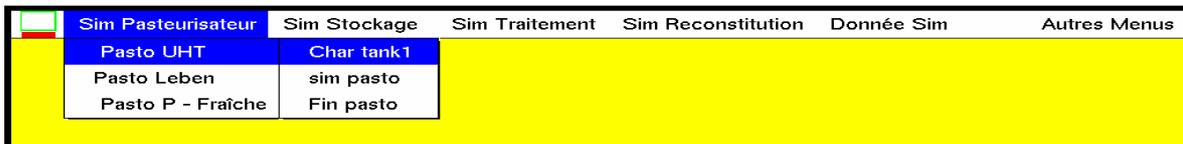


Fig.5.16. Possibilité de simulation pour la pasteurisation

- Sim Stockage : Nous avons introduit trois possibilités. Soit nous stockons pour une future pasteurisation, soit pour une fabrication de pâte fraîche ou enfin pour un prétraitement (Fig.5.17).

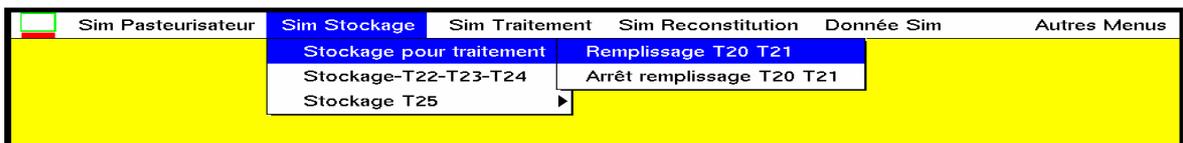


Fig.5.17. Simulation des phases de stockage

- Sim traitement : Nous avons la possibilité de charger les tanks de traitement (cela revient au vidange des tanks au niveau du stockage), de démarrer une phase de traitement de l'arrêter en cas de problème ou enfin évacuer le lait une fois le traitement terminé (Fig.5.18).

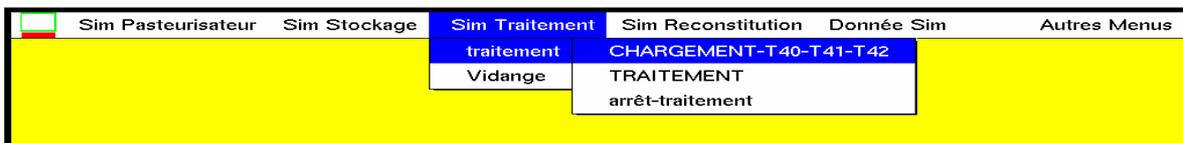


Fig.5.18 Simulation des phases traitement

- Sim reconstitution : On peut démarrer soit une phase de reconstitution du stock d'eau traité nécessaire à la reconstitution du lait soit placer une quantité de poudre de lait ce qui entraîne automatiquement une phase de reconstitution suivi d'une phase d'évacuation du lait reconstitué (Fig.5.19).

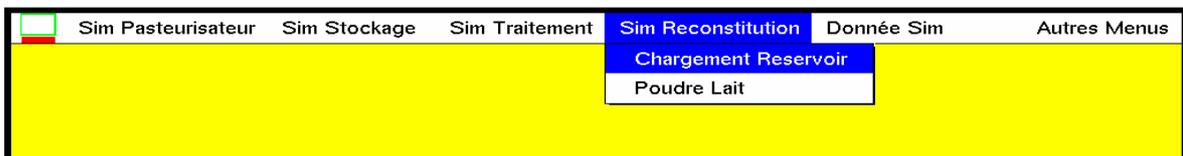


Fig.5.19. Simulation des phases reconstitution

- Donnée sim : L'opérateur ou l'utilisateur de la BC peut alors à tout moment afficher les données relatifs à une phase de simulation ayant lieu (Fig.5.20)..

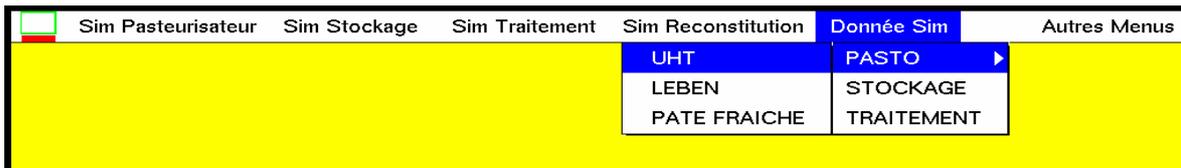


Fig.5.20. Accéder aux données de simulation

Nous présentons ainsi, un exemple de la situation que peut gérer un opérateur (figure 5.21),

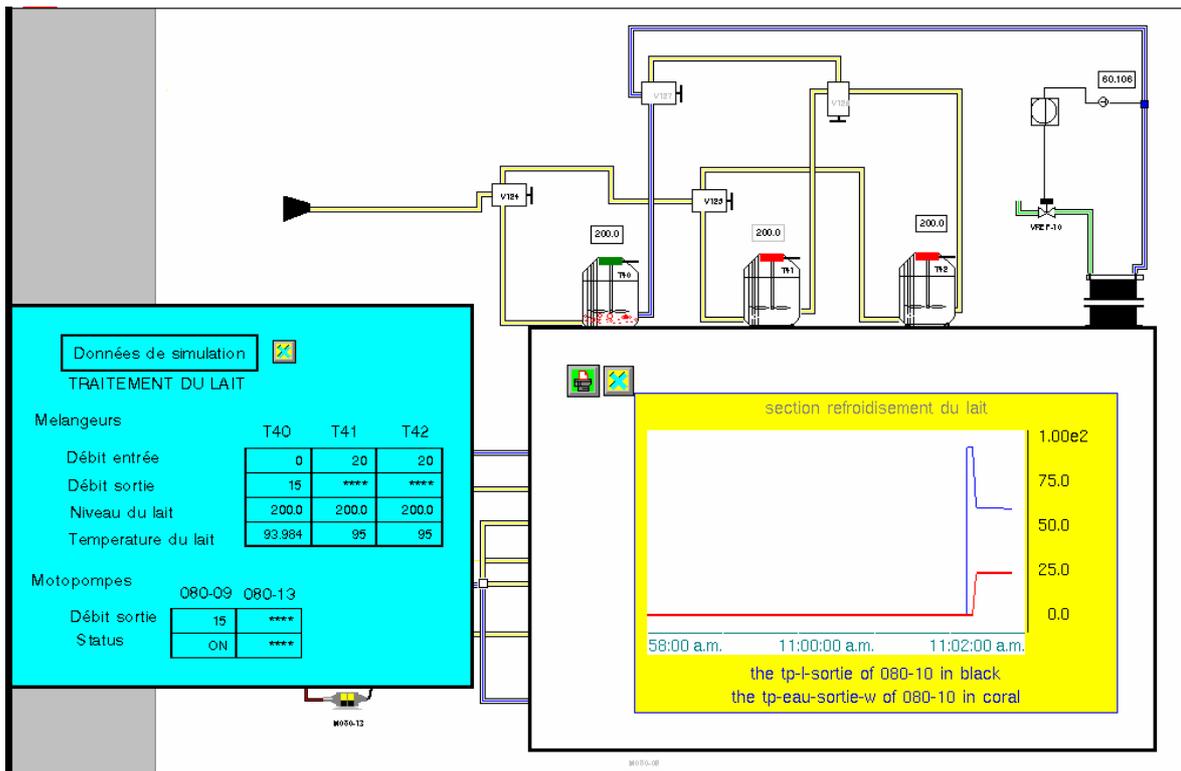


Fig.5.21. Présentation des données de simulation

Toujours dans son aspect conduite et surveillance, la BC telle que nous l'avons défini permet à un opérateur de gérer au mieux l'évolution des situations.

Le lancement de la procédure générale va faire appel à d'autres procédures dont l'ensemble permettra de simuler une phase de fonctionnement de la laiterie des Aurès à titre d'exemple nous présentons sur l'organigramme de la figure 5.22 représentant les séquences et le déclenchement des différentes procédures. Les différents rectangles représentent des procédures devant effectuer des tâches bien précises.

Le Démarrage Pasto-UHT est une procédure globale de liaison avec la barre d'outil et qui permet de lancer la procédure principale de simulation appelée « SIM – PAST ». Cette dernière fait appel aux procédures :

- INITIAL : permet de fixer les variables en fonction des différentes possibilités telle que le numéro du tank et les différentes températures au niveau de l'échangeur.
- SIM TANK : permet de calculer le niveau, le volume et les températures en fonction des différentes entrées.
- SIM CONNECTION : établit les connexions nécessaires, définit la continuité au niveau des différents paramètres
- SIM POMPE : simule le fonctionnement d'une pompe (ouverture fermeture mauvais fonctionnement)
- SIM VANNE : est une procédure identique à la précédente mais relative aux vannes
- SIM CONTS : Simule le comportement d'un contrôleur en définissant les ordres à envoyer
- SIM CAPTS : Simule le comportement d'un capteur de température.
- SIM PAST 1 : est une procédure générale qui en faisant appel aux procédures « SIM CONTROLLEUR » « CAPTS » et « ECCH2 » permet de simuler le comportement de l'échangeur à plaque déterminant ainsi les différentes températures aux différents niveaux.

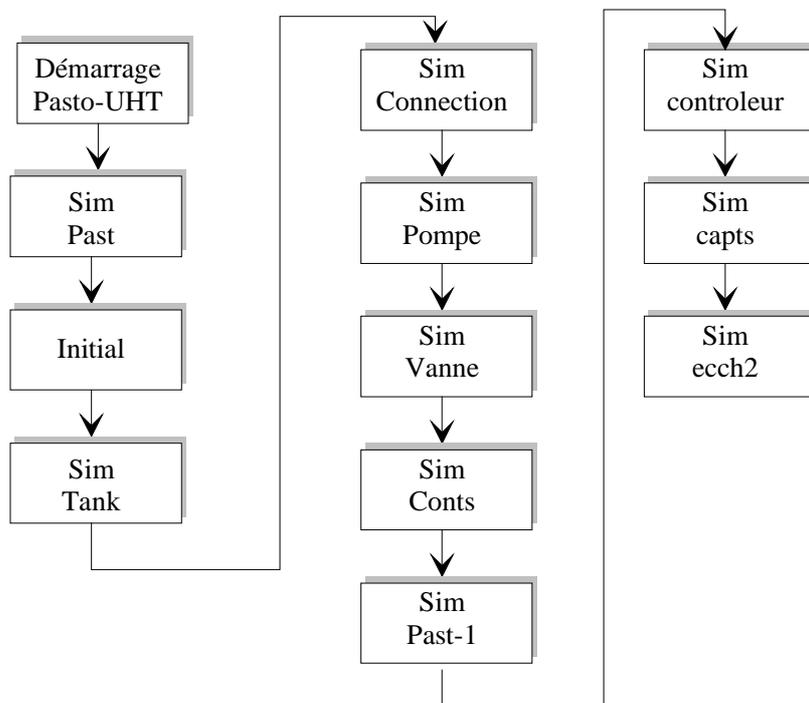


Fig.5.22 Suite des procédures

Les différentes procédures ont été établies avec un souci majeur d'éviter toute opération non conforme ou impossible pouvant entraîner une perte de matière première. Dans le cas où l'opérateur, suite à une fausse manœuvre enclenche une opération interdite ou prématurée, la manœuvre est annulée et l'opérateur reçoit un message d'alerte lui expliquant l'erreur commise telle que présentée sur la figure 5.23. [Mouss and al , 00 d].

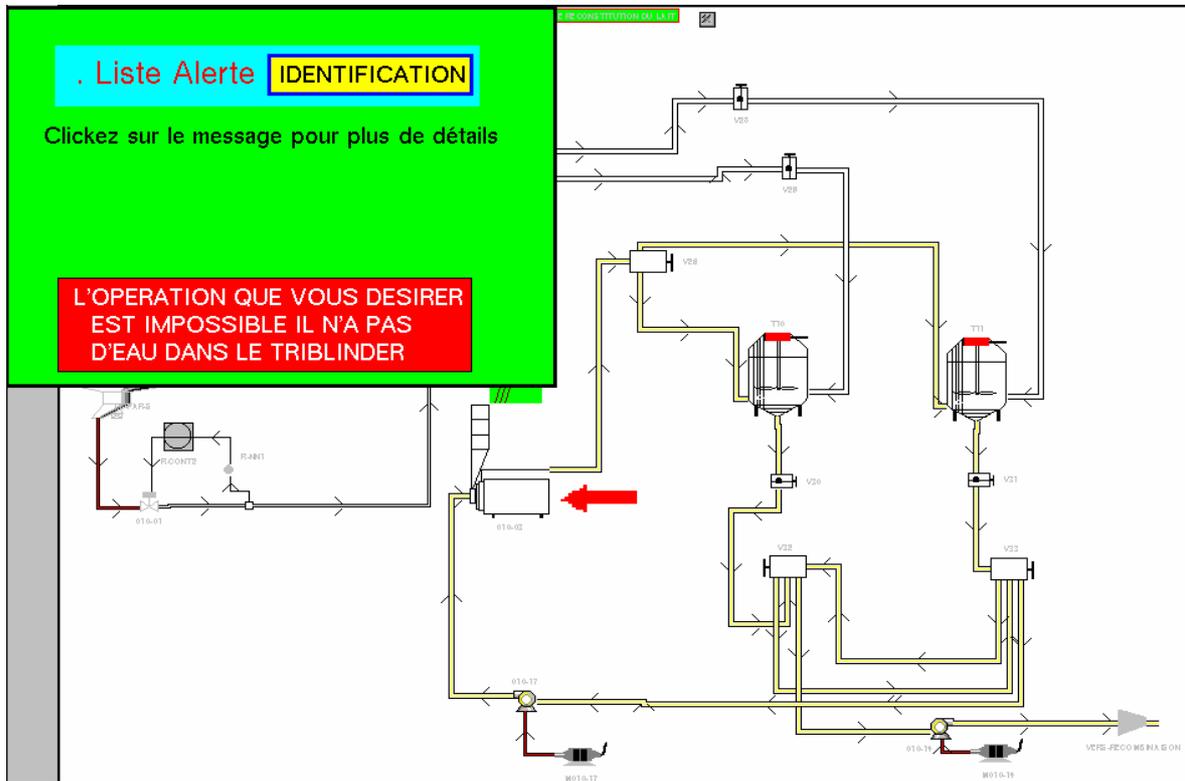


Fig.5.23 Message d'alerte et blocage d'une opération

Dans un autre cas de figure, l'opérateur reçoit un message de confirmation d'une opération demandée (figure 5.24) soit un message de fin de l'opération demandée (figure 5.25)

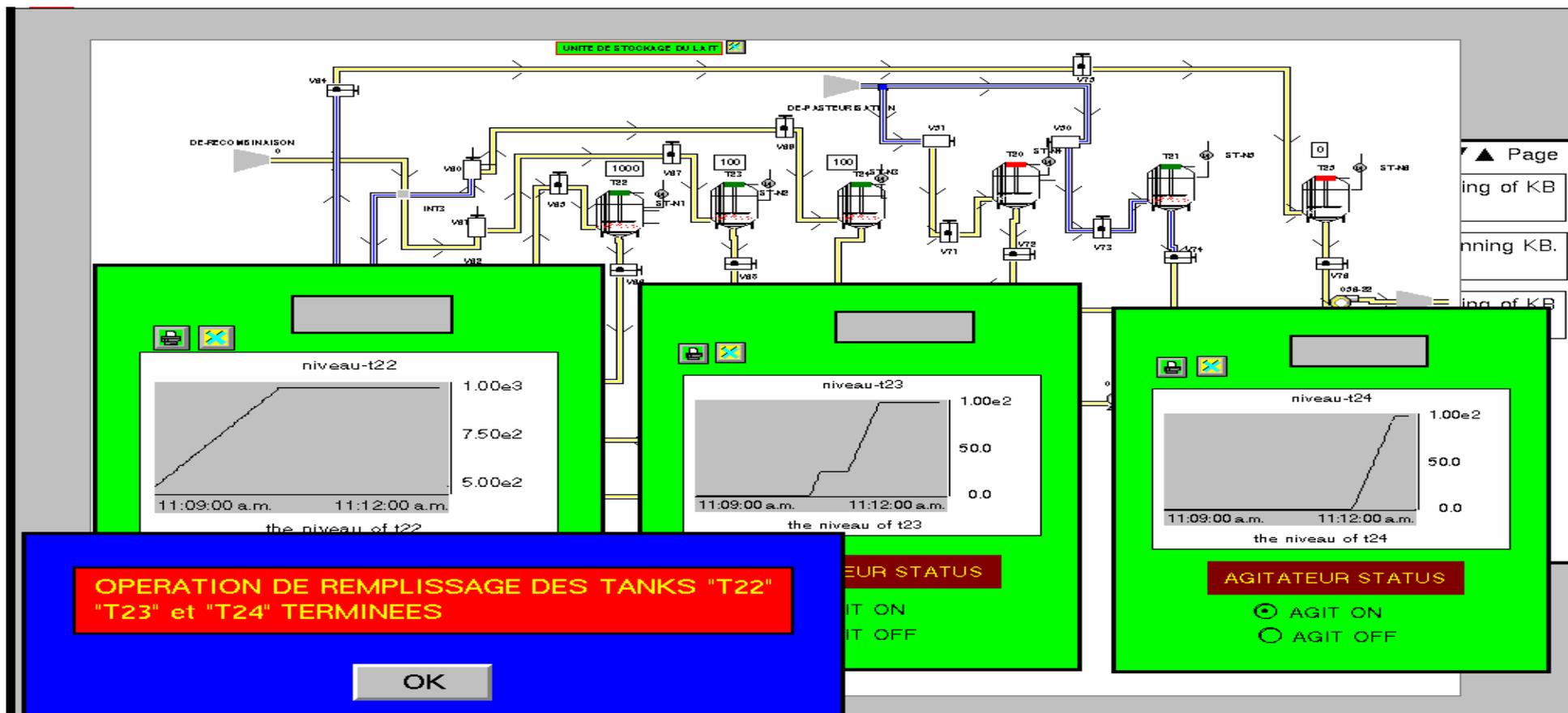


Fig.5.24. Message et information sur la conduite du système

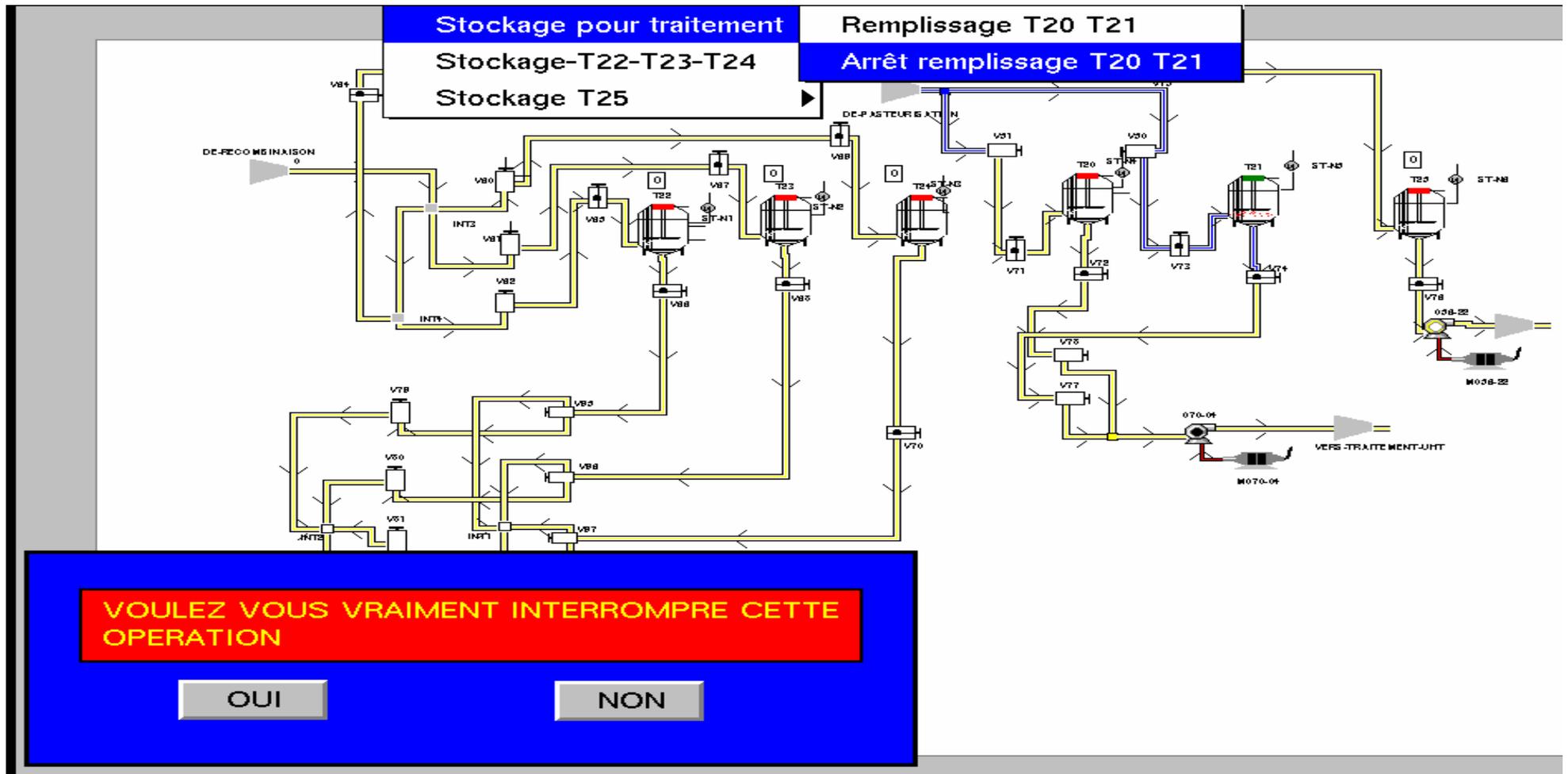


Fig.5.25. Message de confirmation d'une opération

5.5. Module d'aide au diagnostic

5.5.1 Introduction

La recherche d'une augmentation de la qualité et de la rapidité du diagnostic conduit à la diminution des temps d'indisponibilité de l'outil de production. Notre objectif à travers la conception du système d'aide au diagnostic est d'aider les exploitants de la laiterie Aurès dans leurs tâches de diagnostic des problèmes survenant au niveau du procédé et d'aide à leur résolution.

Dans ce qui suit, nous analyserons d'abord le contexte dans lequel s'intègre le système d'aide au diagnostic, puis nous développerons les aspects méthodologiques qui permettent d'élaborer une solution qui répond aux besoins et contraintes de l'exploitation du procédé auquel nous nous intéressons.

5.5.2 Contexte d'utilisation

Pour la réalisation du système expert d'aide au diagnostic de pannes, il est impératif de tenir compte de certains problèmes liés à l'exploitation, au diagnostic et des contraintes liées au procédé et aux futurs utilisateurs. Ainsi, pour des raisons d'exploitation, le système expert implémenté sur micro-ordinateur doit être mis à la disposition des équipes de maintenance dans un local contenant l'équipement mais sans connexion avec celui-ci, il fonctionne également en temps différé. En plus, son interface doit être parfaitement adaptée aux besoins des opérateurs qui n'ont pas nécessairement une formation informatique et ne sont pas familiarisés avec l'utilisation d'un ordinateur.

5.5.3 Objectif

L'objectif de l'intégration du système expert par rapport aux moyens existants (schémas de câblage, outils de mesure, manuels de réparation, etc.) est le fait de permettre une assistance efficace dans l'identification la plus précise possible des éléments défaillants. Il apparaît ainsi comme un support méthodologique et complémentaire aux aides dont disposent les techniciens de maintenance et les opérateurs de conduite. L'utilisateur fait appel au système après avoir constaté l'apparition des symptômes de pannes (messages, alarmes, voyants,...), le système de diagnostic oriente la recherche de la panne suivant une démarche exploitant les relations de causalité entre les dysfonctionnements de l'équipement.

5.5.4 Réalisation

Nous avons déjà présenté le fonctionnement du module DIAPASE dans le chapitre III, nous reprenons ici certains de ses aspects lors de son implantation dans le modèle simulé.

L'opérateur peut utiliser le module de DIAPASE:

- soit en automatique, dans ce cas la procédure de lancement du diagnostic est activé par une règle qui devient vrai dès l'apparition d'une défaillance (dans notre cas nous considérons l'absence de lait pasteurisé comme défaillance majeure)

- soit manuellement, dans ce cas c'est l'opérateur qui lance la procédure de diagnostic (cliquer sur le bouton "Diag-X" (figure 5.26)

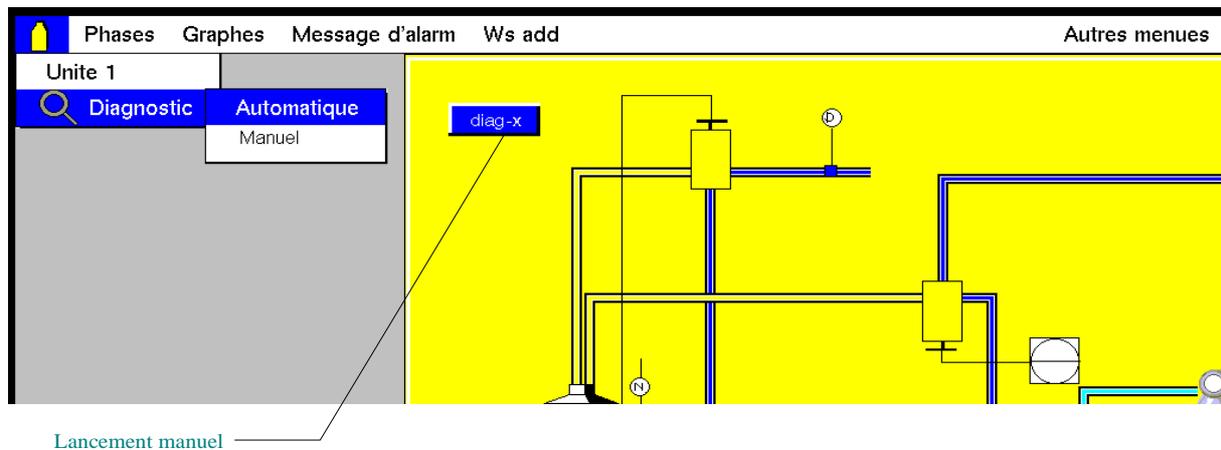


Fig.5.26 Lancement de la procédure de diagnostic

Dans les deux cas la procédure de diagnostic est une suite d'actions représentées par l'organigramme de la figure 5.27.

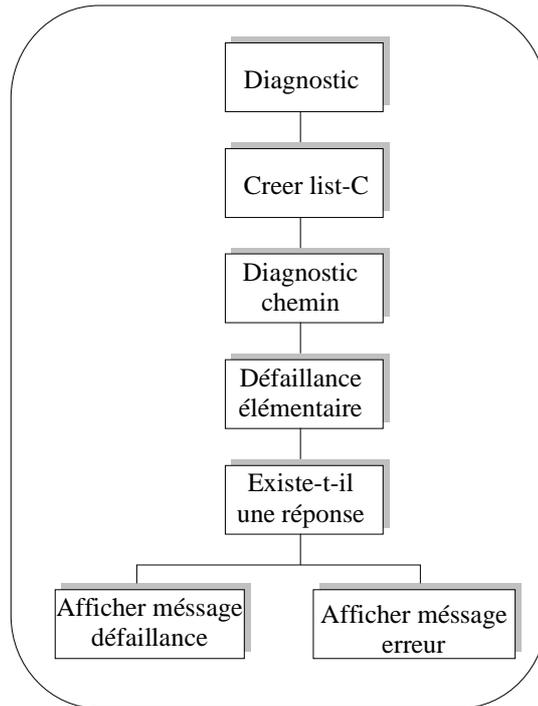


Figure 5.27. Organigramme d'une procédure de diagnostic

Diagnostic est une procédure générale qui lance la phase de diagnostic en faisant appel à d'autres procédures :

- Créer list-C : Cette procédure va générer une liste représentant tous les chemins pouvant créer le dysfonctionnement constaté.
- Diagnostic chemin et défaillance élémentaire sont deux procédures qui fonctionnent en alternance (la première phase du chemin existe si la défaillance élémentaire en faisant appel à la procédure opération a une réponse)
- Existe-t-il une réponse : Permet de générer une réponse positive si toutes les procédures opérations figurant sur un chemin ont été vérifiées.

Quand la recherche des causes de la défaillance élémentaire cause de ce dysfonctionnement global est trouvée, DIAPASE informe l'utilisateur en déclenchant une alarme ayant deux composantes

- Un message décrivant la nature de la défaillance.
- Une flèche clignotante indiquant la localisation du composant défaillant sur le schéma synoptique de l'installation

Nous représentons sur les figures suivantes deux types de défaillances générées par l'opérateur et détectées par le système (figure 5.28 a et b).

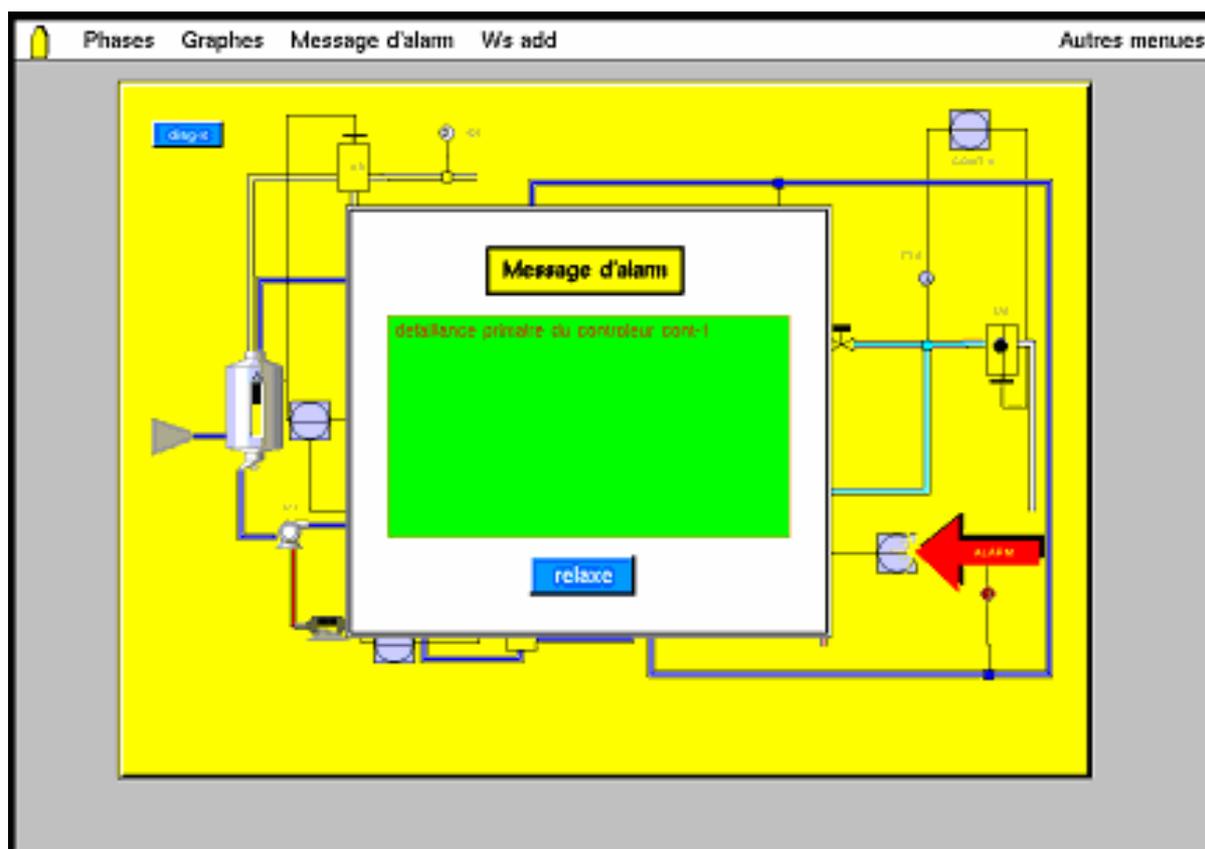


Fig. 5.28-a. Exemple de message d'alarme

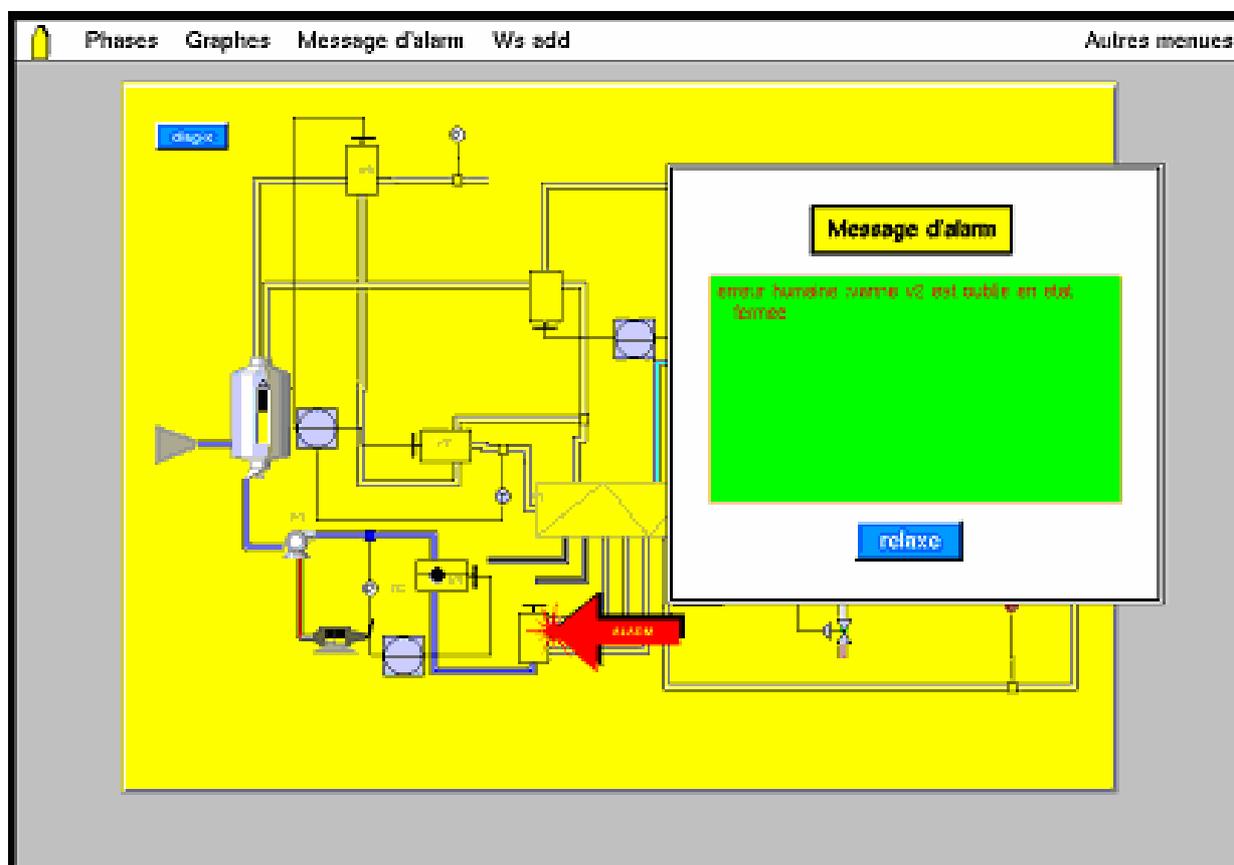


Fig. 5.28-b. Exemple de message d'alarme

Dans le cas où la recherche est infructueuse, ceci apparaît si le test du sommet d'un sous arbre est vrai mais les tests qui suivent ne le sont pas (Figure 5.29). Il apparaît donc nécessaire d'enrichir ses connaissances sur le système physique et augmenter les informations sur les dysfonctionnements ce qui nous permet alors de générer d'autres sous arbres. La possibilité d'augmenter les connaissances au niveau dysfonctionnel est présentée dans l'annexe E.

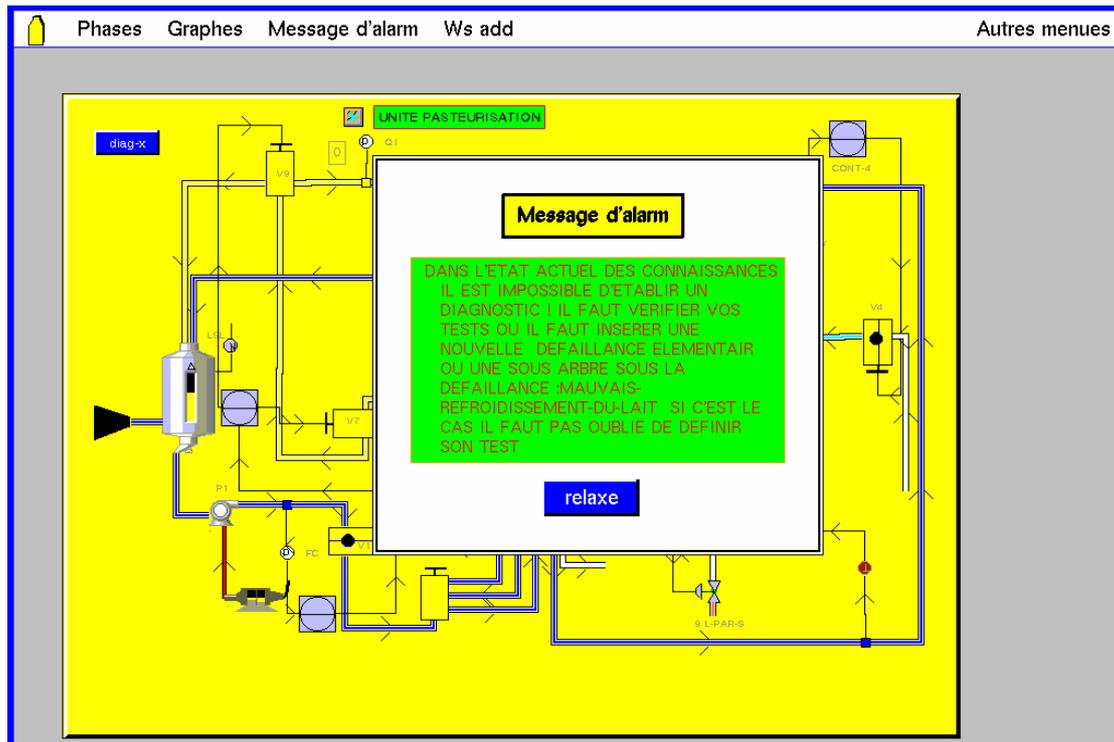


Figure 5.29 Exemple d'alarme pour une recherche infructueuse

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les solutions qui permettent d'établir un diagnostic. Des règles génériques ont été définies pour guider le parcours le long de l'arbre de défaillance. Celui-ci est représenté en utilisant le formalisme objet. L'une des particularités de ce mode de représentation concerne la modularité. Il est en effet possible d'ajouter ou de modifier des connaissances avec un minimum de répercussions.

De manière à pouvoir estimer les critères de faisabilité des solutions proposées, une maquette employant le générateur de systèmes experts G2 est réalisée. Nous nous sommes intéressés particulièrement dans le cadre de cette application à notre module de diagnostic "DIPASE", où notre objectif consiste à établir une structure générique de manière que lors du

passage au développement du prototype industriel, il suffit d'introduire les connaissances descriptives relatives au domaine.

CHAPITRE VI
Modélisation et Simulation
d'un Procédé Industriel par
G2

CHAPITRE VI

Modélisation et Simulation d'un Procédé Industriel par G2

Résumé : *Dans ce chapitre, nous détaillons la mise en œuvre d'un exemple d'application industrielle par l'outil de développement, G2. Nous illustrons la démarche permettant de représenter et de modéliser les connaissances relatives au domaine à étudier soit l'atelier de clinkérisation de la SCIMAT ainsi que le raisonnement adopté pour établir le diagnostic des défaillances exploitant l'expérience des experts. Les différentes expressions des résultats considérées dans ce chapitre vont permettre de tester d'une part les formalismes de représentation des connaissances et d'autre part les performances de modélisation du générateur de systèmes experts G2.*

6.1 Introduction

Dans le contrôle des procédés complexes, la connaissance profonde n'est souvent pas disponible complètement. Par contre, il est possible de la définir, en partie, à l'aide de différents modèles. Le choix de modèles appropriés s'avère capital pour le diagnostic. Même pour des systèmes simples, un tel modèle s'avère très complexe parce qu'il doit permettre de donner une information sur l'ensemble des anomalies [Combastel, 00].

Dans les salles de contrôle de systèmes industriels complexes, ainsi que dans certains engins de transport, la tendance actuelle consiste à assister l'opérateur humain à l'aide d'outils basés de plus en plus sur des techniques d'intelligence artificielle [Kolski, 97]. Ces outils ont pour rôle d'assister l'opérateur lors de sa démarche de résolution de problèmes. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre application industrielle

6.2 Modélisation et simulation du procédés de fabrication du clinker

6.2.1 Présentation et caractéristiques du procédé industriel

Notre application est illustrée sur un procédé industriel de fabrication du ciment. Cette installation fait partie de la cimenterie de Ain- Touta (SCIMAT). Cette cimenterie d'une capacité de 2.500.000 t/an (2 fours) est composée de plusieurs unités qui déterminent les différentes phases du processus de fabrication du ciment.

La carrière d'où sont extraites les matières premières (argile et calcaire), les stations de concassage destinées à réduire la taille des blocs de matières (calcaire et argile 1 000 t/h, les ajouts 150 t/h). L'atelier de broyage de cru est composé de deux broyeurs de 140t/h chacun. L'atelier de cuisson regroupe deux fours dont le débit clinker est de 1560t/h. Le broyage de ciment comprend deux broyeurs de 100t/h chacun. Les expéditions du ciment s'effectuent à partir de deux stations, une pour les camions et une pour les wagons.

La description complète des différents aspects des procédés de transformation nécessite différents types d'informations représentant les éléments de base pour la modélisation et la simulation du procédé.

6.2.2 Le processus de fabrication du ciment

6.2.2.1 Élaboration du clinker

Chacune des opérations impliquées dans le processus de fabrication de ciment est

importante et doit être correcte, faute de quoi le ciment risque de ne pas avoir la qualité exigée pour son emploi. Cependant la cuisson est sans doute l'opération la plus sensible et la plus importante. En effet, la cuisson ou la clinkérisation est l'opération au cours de laquelle s'effectuent les réactions chimiques essentielles. Elle détermine en grande partie la qualité du ciment. Les autres opérations y participent également, mais il n'est pas toujours possible de remédier aux défauts de la cuisson. Celle-ci participe à raison de 60 % au coût de la production du ciment, et détermine de façon conséquente la consommation d'énergie (notamment l'énergie calorifique). En plus, le clinker est l'élément de base pour la fabrication des différents types de ciment. D'après l'étude [Bouhanik, 2001], on peut déduire que l'installation de cuisson est le système le plus important et le plus sensible aux défaillances d'où il est déterminant de la qualité du ciment à produire.

Le clinker est produit à partir de matériaux calcaires (80% essentiellement CaCO_3) et argileux (20% dont 14% de SiO_2 , 4% de Al_2O_3 et 2% de Fe_2O_3). Dans le procédé par voie sèche, la matière première (en poudre) est préchauffée dans les cyclones (800°C) par les gaz issus du four de cuisson puis, arrive partiellement décarbonatée, dans le four de cuisson (four rotatif court de 50 à 80 m). Le mélange entre alors en fusion et forme un granulé appelé clinker. Il s'agit de réactions en général endothermique et principalement à l'état solide, vers 1450°C (clinkérisation), entre CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 .

Ce procédé est le plus utilisé car il est le plus économe en énergie (750 kcal/kg de clinker) mais il nécessite la mise en œuvre de moyens importants de captation des poussières.

6.2.2.2 Description du processus de clinkérisation

Dans tous les systèmes de fours, les matières premières sont soumises au même traitement : réchauffement, calcination, cuisson et refroidissement. L'atelier de cuisson représente la partie centrale de la cimenterie. Il est composé de deux lignes de cuisson en tout point identiques et complètement indépendantes du point de vue fonctionnement. Une ligne est constituée de trois échangeurs : le préchauffeur à cyclones, le four rotatif et le refroidisseur à ballonnets. (Figure 6.1)

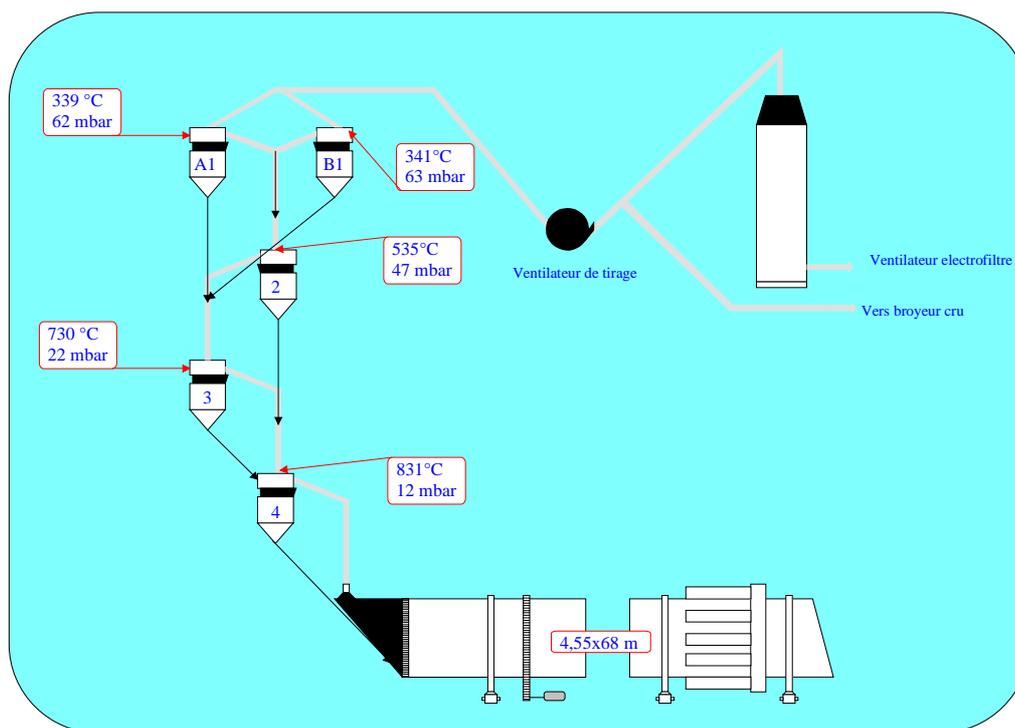


Fig.6.1. Schéma synoptique de l'atelier de clinkérisation

6.2.2.2.1 Le préchauffeur à cyclones

Le cru, séché, broyé et homogénéisé est introduit sous forme pulvérulente dans une tour de préchauffage à cyclones. Cet échangeur gaz/matière reçoit la matière par son extrémité haute et réalise la décarbonatation partielle de la farine crue (25% à 30%) avant d'entrer dans le four. Donc il sert à améliorer le rendement thermique de l'installation de cuisson.

Chaque ligne de préchauffeur présente des cyclones jumelés au premier étage, afin d'assurer une séparation efficace de la farine crue des gaz de sortie. Les cyclones simples du deuxième, troisième et quatrième étage sont généralement de même taille. La farine crue introduite contient encore 1% d'humidité et le courant gazeux dont la température est d'environ 400°C sert au séchage de la farine crue. Séparée des gaz à chaque traversée de cyclone, la matière est à chaque fois réinsérée à l'étage suivant (au-dessous) et reprise par des gaz de plus en plus chauds donc elle se réchauffe.

Au niveau du 4^e cyclone et de la boîte à fumée, vers 950°C commence la décarbonatation. C'est le phénomène chimique par lequel le carbonate de calcium se décompose en chaux et en gaz carbonique.

La chaux ainsi libérée est prête à réagir avec les autres éléments (silice, alumine et fer). Le gaz carbonique s'échappe et part avec les gaz brûlés, faisant ainsi perdre à la matière environ 35% de son poids.

6.2.2.2 Le four rotatif

Le four rotatif de la cimenterie est constitué d'un cylindre d'acier de 68 m de longueur effective et de 4,6 m de diamètre. Il est revêtu à l'intérieur de briques réfractaires qui protègent les tôles des températures élevées (1850°C pour les gaz et 1450°C pour la matière). Il tourne sur lui-même à vitesse réglable lente (0,67 à 2 tr/ mn). Sa lente rotation et son inclinaison (3%) permettent d'acheminer progressivement la matière crue vers la flamme du four, à contre courant des gaz chauds. En amont, la matière pénètre à la température de 800°C. En aval, les gaz chauds (1850°C) sont injectés, à l'aide de la tuyère. Il se produit un échange à contre-courant entre les gaz et la matière. Au fur et à mesure que la matière avance, elle se chauffe et se transforme.

Un groupe d'entraînement donne au four le mouvement de rotation nécessaire, à la fois, au brassage de la matière et à la descente régulière de celle-ci de la zone amont (zone de décarbonatation) à la zone aval (zone de clinkérisation).

L'alimentation du four est réglée par des alimentateurs-peseurs qui sont généralement synchronisés avec la vitesse de rotation du four.

L'énergie de cuisson de la farine est fournie par un brûleur au gaz naturel situé en aval du four. En amont est introduite la farine provenant des cyclones, alors que les gaz chauds sont emmenés à travers la boîte à fumée dans les circuits du préchauffeur. Le clinker qui sort du four tombe dans le refroidisseur. Au niveau de la zone de cuisson, la virole du four est refroidie par une batterie de ventilateurs.

1. La production d'un bon clinker

- La première condition essentielle pour produire un bon clinker, est d'avoir une bonne farine crue : une matière finement broyée et homogène, où les quatre éléments chaux, silice, alumine et fer se trouvent dans des proportions convenables dans l'espace (il n'y a pas de différences entre le haut et le bas d'un silo, ni d'un silo à l'autre) et dans le temps (d'une heure à l'autre ou d'un jour à l'autre, on a le même cru).
- La seconde condition pour avoir un bon clinker est de bien le cuire et ceci implique une grande stabilité du fonctionnement et de la conduite de l'atelier de cuisson : un arrêt, même court, de l'installation entraîne des instabilités longues et difficiles à maîtriser.

Un bon clinker contient encore entre 0.5 et 2 % de chaux libre. Une évaluation plus rapide de la qualité de cuisson est la mesure du poids d'un litre de clinker (tamisé) : un

litre de clinker bien cuit pèse entre 1250 g et 1350 g.

Le clinker portland comprend normalement 20 à 30% de masse en fusion. Ceci est recherché et voulu : s'il y a trop peu de masse de fusion, il n'y aura pas de liaison entre les principaux composants et nous obtenons alors un clinker plein de poussière. A l'opposé, une trop grande masse de fusion donne lieu à un clinker dur, difficilement broyable, qui s'agglomère sur le revêtement du four.

2. Zones de réactions du four rotatif

Au cours de la cuisson dans le four, les composants du mélange cru subissent des réactions chimiques successives, qui les transforment en clinker. Le four se divise ainsi en zones. Les limites entre ces différentes zones dépendent des températures et des réactions chimiques intervenant dans la matière. Cependant, elles varient dans le temps et leurs longueurs dépendent de la qualité d'énergie thermique reçue des gaz et de la paroi.

Néanmoins, on peut distinguer trois zones principales relatives à ces mécanismes physico-chimiques, la zone de décarbonatation, la zone de clinkérisation et la zone de refroidissement (voir tableau 6.1).

Température	Réaction chimique	Zone de four (m)	Caractéristiques
600 à 1100	Décarbonatation $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	0 à 20	la chaux (CaO) ainsi libérée est prête à réagir avec les différents oxydes
1100 à 1200	Début de recombinaison $2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{CaO SiO}_2$	20 à 30	$2\text{CaO SiO}_2 \equiv \text{C}_2\text{S}$ donne au ciment sa résistance à long terme
1250	Début de la phase liquide $4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ $3 \text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 3 \text{CaO Al}_2\text{O}_3$	30 à 40 35 à 40	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3 \equiv \text{C}_4\text{AF}$ conditionne la couleur du ciment $3 \text{CaO Al}_2\text{O}_3 \equiv \text{C}_3\text{A}$ régule la fusion
1250 à 1500	Poursuite de la clinkérisation $2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{CaO SiO}_2$ $2\text{CaO SiO}_2 + \text{CaO} \rightarrow 3\text{CaO SiO}_2$	40 à 50 40 à 50	$3 \text{CaO Al}_2\text{O}_3 \equiv \text{C}_3\text{A}$ donne au ciment sa résistance à long terme $3\text{CaO SiO}_2 \equiv \text{C}_3\text{S}$ donne au ciment sa résistance précoce élevée
1200 à 100	Cristallisation Refroidissement	50 à 68	

Tab.6.1.Principales zones de réactions dans le four et leurs produits

6.2.2.2.3 Le refroidisseur

A la sortie du four, les granules incandescents sont refroidis rapidement et il y a récupération de la chaleur. L'installation de cuisson de Ain-Touta est dotée d'un refroidisseur à ballonnets. Ce sont les tubes en tôles d'acier de 19,8 m de long et de 2,1 m de diamètre montés sur le tube de four et munis de releveurs. Le clinker est refroidi au contact de l'air frais injecté dans les tubes. On obtient ainsi des grains solides à une température entre 100 et 200°C: le clinker est transporté vers d'énormes silos de stockage. La totalité de l'air de refroidissement est utilisée comme air secondaire dans le processus de combustion. C'est la raison pour laquelle aucun dépoussiérage n'est nécessaire.

Le refroidisseur agit donc sur le rendement thermique de l'installation de cuisson et sur la qualité de clinker. Cet échangeur a une double fonction, refroidir rapidement le clinker pour lui donner sa qualité définitive. C'est en quelque sorte une opération semblable à la trempe qui donne des qualités de résistance ou de dureté à l'acier. Un refroidissement rapide du clinker empêchera certains éléments de se décomposer par la suite. La deuxième fonction est de récupérer la chaleur contenue dans le clinker pour réchauffer l'air (1000 à 1150°C) qui permettra la combustion du gaz naturel (avec un débit réglable).

6.2.3 La problématique dans la conduite du four

6.2.3.1 Caractéristiques du système four à ciment

Le four remplit quatre fonctions du processus de cuisson. Il achemine les gaz et la matière, sert de chambre de combustion, transmet la chaleur à la matière et enfin, il constitue le milieu réactionnel pour les transformations chimiques de la matière.

Les interactions entre ces diverses fonctions sont extrêmement complexes et difficiles à identifier. Les connexions déterminantes sur le résultat du processus de cuisson sont celles reliant la production de la chaleur et les transformations chimiques de la matière. Le fonctionnement du four influence plusieurs paramètres comme la qualité du clinker, le niveau de production et la consommation de l'énergie

Les phénomènes d'échange de chaleur, mis en jeu, sont régis par des lois non linéaires. L'environnement du four pose d'énormes difficultés pour disposer de mesures fiables caractérisant son fonctionnement. Le four en tant que système à commander est caractérisé par l'aspect multi-variables, les non-linéarités entre les variables et les non-stationnarités. A ces caractéristiques s'ajoutent les contraintes de son environnement ainsi que les difficultés d'identifier les interrelations entre les phénomènes complexes mis en

jeu. Ces considérations permettent de qualifier le four de système complexe [Bouhanik, 01].

6.3 Mise en œuvre par G2

6.3.1 Le contexte de l'étude

L'industrie du ciment se caractérise par la consommation considérable d'énergie que sa production entraîne, et de là l'intérêt à minimiser cette consommation. Ce travail concerne l'application d'un système expert à la conduite des fours de cimenterie et en particulier au diagnostic des défaillances. L'application d'un système de pilotage et de supervision au processus ayant une dynamique si complexe caractéristique d'un four de cimenterie comprend en général deux phases bien définies :

- Dans la première, l'objectif est de déterminer avec grande précision les variables critiques du processus, et en conséquence, stabiliser totalement son fonctionnement.
- Dans la seconde, ayant atteint la stabilisation requise, les variables critiques sont conduites à travers des trajectoires souhaitées vers ses points de fonctionnement optimaux, où le processus continue à se dérouler de manière stable et permanente.

En général, le four fonctionne à un niveau thermique supérieur à ce qui est nécessaire pour la production de clinker. Bien que dans ces conditions la consommation d'énergie soit supérieure à celle que serait, on obtient une meilleure stabilité dans le fonctionnement, qui facilite dans une grande mesure la commande manuelle du four réalisée par l'opérateur.

Cependant, une fois que la stabilité du four est assurée, il n'y a aucune raison pour maintenir un niveau thermique supérieur à ce qui est vraiment nécessaire. Par conséquent, le problème est de maintenir la stabilisation à ce niveau thermique minimum. Dans cette situation nous obtiendrons, d'une part d'importances économies énergétiques et d'autre part une hausse sensible de la qualité de clinker due à la régularité du fonctionnement du four. La stabilité dans le fonctionnement du four est l'objectif principal qui guide le travail de l'opérateur. La stabilité recherchée consiste à maintenir les variables critiques du processus dans certaines bandes qui assurent la continuité de son fonctionnement, et en conséquence, la continuité de la production.

L'idéal est de conduire le four à un niveau thermique inférieur et maintenir le reste de ses variables toujours autour de leurs consignes respectives (stabilité totale du reste de ses variables) à condition, bien sûr que le niveau thermique minimum soit compatible avec une production de clinker de qualité. Le système de conduite peut recevoir des signaux

mesurés des variables du processus qui sont reportées sur le tableau 6.2.

Variables avec signaux mesurés	Variables pertinentes commandées
-Vitesse de rotation du four -Alimentation du cru -Alimentation du combustible dans le brûleur -Concentration des oxydes d'azote (NOx) dans la sortie du circuit des gaz -Concentration d'oxygène dans l'entrée au four -Pression dans le refroidisseur -Pression dans la sortie du four -Dépression dans l'entrée du four -Concentration de monoxyde de carbone dans la sortie du circuit des gaz -Débit des ventilateurs du refroidisseur -Paire motrice du four -Température des gaz dans le ventilateur principal -Pyromètre dans la zone de clinkérisation -Contenu en chaux libre du clinker	-Vitesse de rotation du four -Alimentation du cru -Alimentation du gaz combustible -Tirage du ventilateur principal -Aspiration des ventilateurs du refroidisseur

Tab.6.2. Variables liées au processus de clinkérisation

Il est évident qu'il existe une interrelation complexe et changeante entre toutes ces variables. Cependant, l'expérience montre qu'il est possible de commander le four en agissant sur un certain nombre de variables jugées pertinentes. Ces variables pertinentes seront représentées sous forme d'attributs spécifiques des équipements afin de pouvoir simuler leurs variations et ses effets sur la totalité de l'installation.

6.3.2 Modélisation de l'atelier de *clinkérisation*

6.3.2.1 Principe de la modélisation

Afin d'atteindre nos objectifs, à savoir la modélisation et la simulation pour l'aide au diagnostic des défaillances à l'aide du système expert : G2, nous proposons une

démarche en deux étapes :

- Mise en oeuvre de l'approche par les modèles
- Intégration de l'approche empirique

Pour la réalisation pratique de cette démarche, une phase d'acquisition des connaissances sur le système s'avère d'une importance primordiale car d'elle dépend la validité de la base de connaissances qui sera construite. Cette phase de transfert d'expertise est souvent considérée comme goulot d'étranglement du développement de la base de connaissances.

Vu le niveau technologique des équipements et compte tenu des problèmes liés à l'acquisition des connaissances, un cadre méthodologique est nécessaire pour mener à bien cette phase d'acquisition.

6.3.2.2 SADT: une méthode d'acquisition des connaissances

La démarche que nous avons adoptée pour l'acquisition des connaissances est basée sur l'outil d'analyse fonctionnelle SADT.. Aussi la figure 6.2 représente les principales activités nécessaires pour produire le clinker et qui s'effectuent dans les trois échangeurs de chaleur.

Dans une première étape, on procède à un préchauffage de la farine crue dans la tour de préchauffage à cyclones à des températures bien définies (selon l'étage considéré). Une fois la farine préchauffée, elle passe dans le four rotatif pour la cuisson afin que les constituants du clinker puissent se former. La matière ainsi cuite est refroidie pour sortir sous forme de clinker.

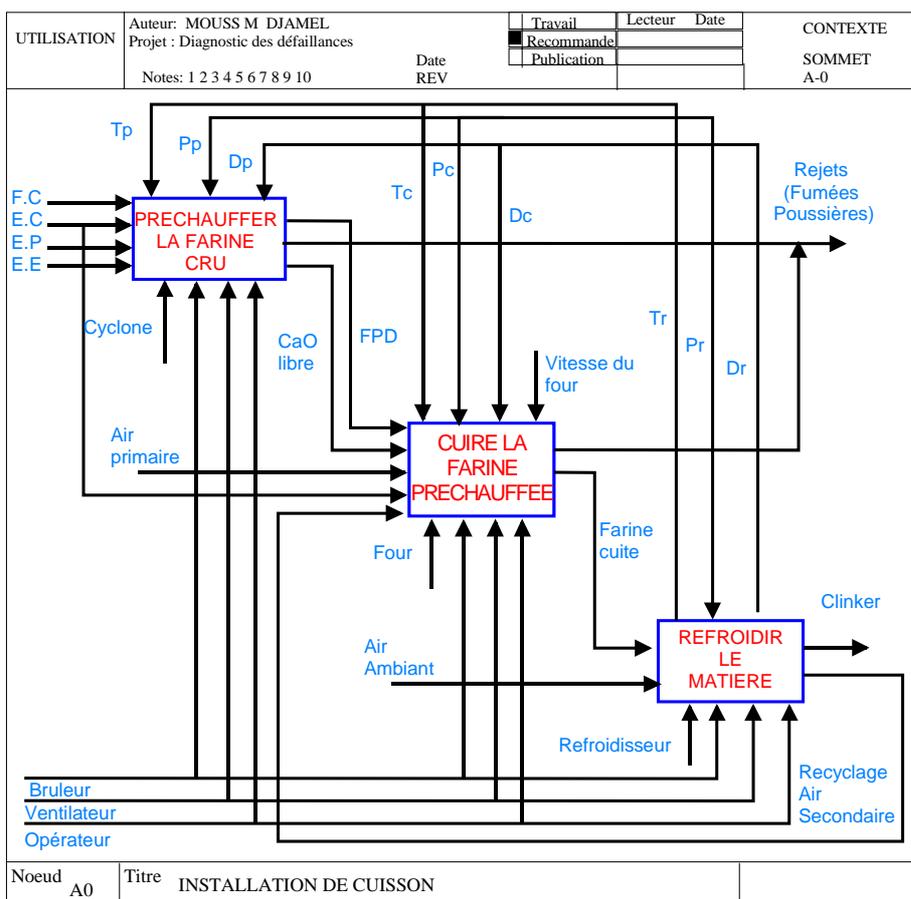
6.3.2.3 Mise en œuvre de l'approche par les modèles

Le modèle sert de référence pour identifier une divergence par rapport au fonctionnement nominal. Afin d'effectuer cette comparaison, on doit disposer d'une représentation structurelle et d'une représentation du comportement. L'association structure plus le comportement de chaque élément du système permet de déduire le comportement normal de système complet. La figure 6.3 représente la décomposition structurelle de l'atelier de cuisson dans les limites de considération relatives à notre choix.

Pour modéliser le comportement on a besoin des relations qui traduisent le comportement théorique du système .Comme notre objectif est de construire un modèle de bon fonctionnement du système et non pas de dimensionner le système (conception par le constructeur), nous proposons de relever pour chaque élément des valeurs de références de

bon fonctionnement qui indiquent que l'élément fonctionne normalement. (Cela dépend du degré de précision dont on dispose).

Les comportements locaux de chaque équipement seront spécifiés, sous formes de modèles de simulation, en exploitant les relations numériques déterminant les échanges thermiques entre la matière et les gaz. Le modèle comportemental du système complet est déterminé grâce aux modèles de comportement des éléments qui le composent et qui traduisent le fonctionnement normal de chaque équipement.



- F.C : Farine crue
- E.C : Energie calorifique
- E.P: Energie pneumatique
- E.E : Energie électrique
- Tp : Température de préchauffage
- Tc : Température de cuisson
- Tr : Température de refroidissement
- Pp : Pression de préchauffage
- Pc : Pression de cuisson
- Pr : Pression de refroidissement
- Dp : Débit matière préchauffage
- Dc : Débit matière cuisson
- Dr : Débit matière refroidissement
- FDP : Farine préchauffée décarbonatée

Fig. 6.2. Le diagramme de niveau A0 du modèle SADT décrivant le processus de clinckérisation

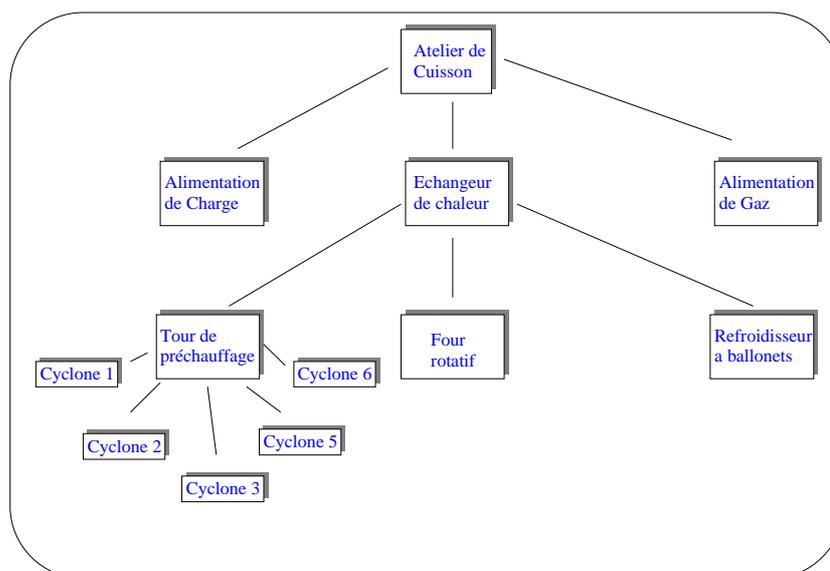


Fig.6.3. Décomposition hiérarchique de l'installation de clinkérisation

6.3.2.4 Intégration de l'approche empirique

- **Analyse des dysfonctionnements** : Cette étape a pour objectif l'identification des dysfonctionnements pouvant affecter la mission du système. Cette analyse est grandement facilitée par la connaissance des modèles structurels et fonctionnels de l'installation. Pour l'analyse des dysfonctionnements nous avons retenu l'AMDEC.

En ce sens une AMDEC de l'atelier de cuisson a été réalisé. Dans notre application, nous avons considéré que les modes de défaillances les plus critiques (criticité >10) et ceci pour des raisons de simplicité et compte tenu des hypothèses de notre étude. L'AMDEC de l'atelier de clinkérisation est présentée en **Annexe F**.

- **Représentation des connaissances d'exploitation** : Dans le domaine du diagnostic, l'expertise relative à l'expérience acquise sur le terrain peut être formalisée comme suit : Si symptômes Alors causes. Nous remarquons que cette forme peut être traduite de manière adéquate par le formalisme de représentation des connaissances utilisant les règles de production dont la syntaxe est la suivante : Si "prémisses" Alors "conclusion"

Les caractéristiques des modèles utilisés permettent de classer les différentes techniques qui, bien souvent, doivent être combinées afin de profiter de leurs avantages respectifs [Kolski, 97] et [Feliot, 97]. Un modèle structurel du procédé, intégrant ses composantes élémentaires, et les relations principales entre celles-ci, un modèle fonctionnel du procédé, mettant en relation différents sous-systèmes et/ou composants par

rapport à leurs objectifs, leurs fonctions. L'intérêt d'un tel type de modèle est de permettre la simulation du procédé. Un diagramme causal mettant en relation différentes causes de pannes à des effets sur le procédé, des bases de connaissances permettant, suite à l'occurrence de dysfonctionnements, de proposer des solutions

6.3.3 La spécification du procédé pour la simulation

Le modèle de simulation a pour but principal de vérifier et valider les différents modèles, en utilisant les fonctionnalités et comportements du procédé industriel à l'aide du générateur de système expert G2.

6.3.3 1 Aspects de la transformation de la matière

La transformation de la matière s'effectue dans les différents équipements suivant les lois de la physique et de la chimie. Le modèle de la transformation de la matière va donc chercher à décrire l'évolution du contenu des appareils et se traduira par un ensemble d'équations algèbro-différentielles. Ces bilans s'obtiennent d'après le principe de conservation d'une quantité (énergie ou masse) dans un système [Eyglunet, 97].

Deux aspects fondamentaux indissociables caractérisent la transformation de la matière dans l'installation de cuisson : l'aspect thermique et l'aspect chimique. Le premier est extrêmement important car il conditionne la cuisson du produit, sa qualité et l'apport calorifique. Cet aspect influe considérablement sur l'évolution et la vitesse des réactions chimiques. Les mécanismes d'échange de chaleur constituent l'élément fondamental du fonctionnement thermique du four. Ils font intervenir différents modes de transmission de la chaleur. Le rayonnement et la convection sont les modes dominants. Le second, l'aspect chimique concerne la transformation des matières dans le four. Le processus chimique du four à ciment est complexe. Plusieurs facteurs influencent la fabrication du clinker tels que : les variations des compositions chimiques, minéralogiques et granulométriques du cru, les teneurs en soufre du combustible, les conditions de refroidissement et le gradient de température dans le four.

Dans cette étude, on s'est intéressé aux transferts thermiques entre les gaz et la charge constituée par la matière à transformée en clinker et en délaissant librement l'aspect chimique vu la complexité liée aux réactions d'échange chimique.

6.3.3 2 Modélisation des transferts thermiques

Dans le cas du four rotatif de l'atelier de cuisson les échanges de chaleur entre la charge mobile et les gaz d'échauffement (ou de refroidissement) se font à contre-courant.

La figure 6.5 représente les profils de température des fumées et de la charge de l'entrée jusqu'à la sortie du four. La chaleur dégagée par les fumées est, après prise en compte de η (rendement de l'échangeur de chaleur : le four rotatif), égale à celle reçue par la charge [Heiligenstaedt, 71]

$$\varphi = e^{-[\alpha S \frac{(1-v)}{dec * c}]} \quad [6.1]$$

$$T_{SC} = (T_{EG} \frac{(1-\varphi)}{(1-\varphi * v)} + T_{EC} * \varphi \frac{(1-v)}{(1-\varphi * v)}) \quad [6.2]$$

$$T_{SG} = T_{EG} - v * (T_{SC} - T_{EC}) \quad [6.3]$$

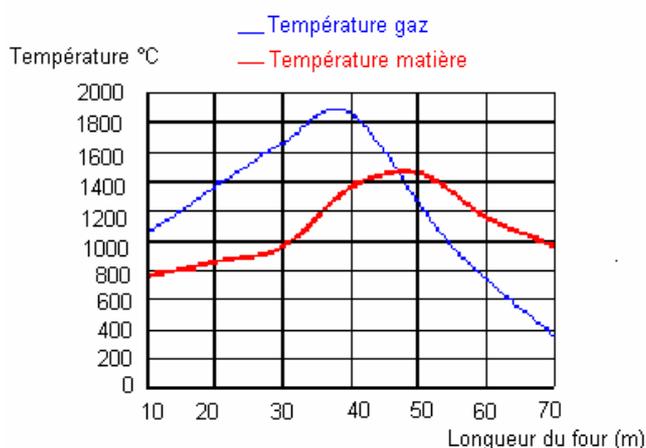


Fig.6.5. Trajectoire thermique du processus de clinkérisation

Les annotations associées à ces équations sont données sur le tableau 6.3.

Symbole	Unité de mesure	Signification
deg	Nm ³ /h	débit de fumées
dec	Kg/h	débit de charge
cp	Kcal/Nm ³ .°C	chaleur spécifique des fumées
c	kcal/kg.°C	chaleur spécifique de la charge
TSC	°C	température sortie charge
TEC	°C	température entrée charge
TEG	°C	température entrée gaz
TSG	°C	température sortie gaz
v	dec*c/η*deg*cp	Nombre
η		rendement du four
α		coefficient d'écoulement
S		surface d'échange

Tab.6.3. Annotations relatives aux équations numériques

Le processus de clinkérisation est simulé avec les relations ci-dessus avec les variables et paramètres donnés dans le tableau 6.3 dans le but de reproduire le profil thermique de la figure 6.5 le long du four.

6.3.4 Spécification dans G2

Comme nous l'avons déjà explicité, toute connaissance à l'intérieur du système expert G2 est contenue dans des espaces de travail (workspaces) qui sont définis hiérarchiquement comme tout objet dans G2 de façon générale. Un workspace peut donc avoir un ou plusieurs espaces engendrés (subworkspaces) tout comme il peut avoir un espace parent (higher-level workspace).

Pour notre application, nous avons défini un espace racine (Root) qui regroupe 04 grandes classes d'espaces de travail : d'abord celle regroupant les définitions (Classes Définitions), l'interface utilisateur (Interface), le workspace comportant les règles (Rules) et enfin le workspace des procédures (Procédures). Bien entendu chacun de ces 04 espaces est composé à son tour de plusieurs sous-espaces.

6.3.4. 1 Définitions des classes

Dans cet espace, sont définis tous les objets utilisés par la simulation. La figure 6.6 regroupe les classes d'objets avec des exemples d'instances pour chaque classe. Ainsi la classe mère dans notre cas « équipements » possède 8 sous-classes (alimentation charge, ventilateur-tirage, p-préparation, préchauffeurs, four, brûleur, refroidisseur, stockage-clinker).

La sous-classe préchauffeurs possède à son tour deux sous-classes : cyclone1 et cyclone 2, pour différencier les cyclones du premier étage (cyclone-double) des autres cyclones (étage 2,étage 3 et étage 4). Chaque sous-classe permet d'engendre des instances avec l'icône graphique représentant chaque objet.

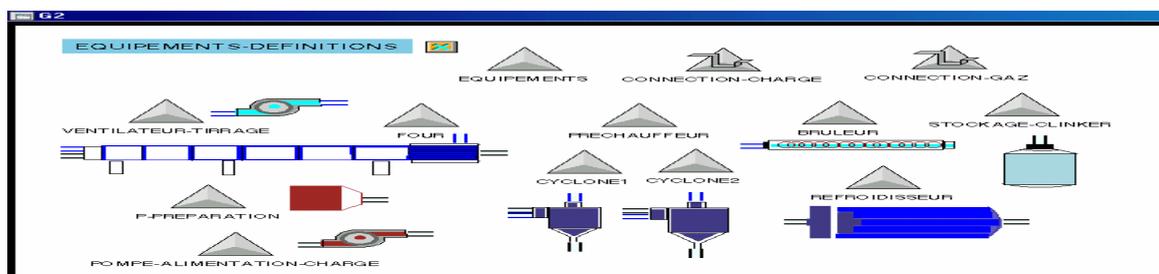


Fig. 6.6. Les classes d'objets et les objets de l'atelier de clinkérisation

En cliquant sur un objet donné, nous pouvons voir les attributs qui lui sont spécifiques (les valeurs d'attributs). Ces attributs peuvent être de nature différente. Sur la figure 6.7 sont présentés quelques exemples d'attributs à titre d'illustration.

C4, a cyclone2	
Notes	OK
Item configuration	none
Names	C4
Functionality	****
Inferred valeur temp	****
Etat d'alarme	ok
Temperature entree gaz	****
Temperature sortie gaz	****
Temperature entree charge	****
Temperature sortie charge	****
Debit entree gaz	0.0
Debit sortie gaz	0.0
Debit entree charge	0.0
Debit sortie charge	0.0
Surface	200
V	0.0
Fi	0.0

Fig. 6.7. Exemple d'attributs

6.3.4. 2 L'interface utilisateur

L'espace interface utilisateur représente l'atelier de cuisson dans sa totalité. Pour la réalisation de cette représentation graphique il fallait créer des instances (au nombre voulu) de sous-classes représentant les composants structurels de l'atelier de cuisson et des connexions pour relier ces instances entre eux et pour représenter les entrées et les sorties de la matière (charge) et des gaz. Pour cette raison deux types de connexions ont été créés : une classe connection-charge et une classe connection-gaz, chacune est une sous-classe de la classe mère définie par G2 « connection ».

Pour une meilleure interactivité avec l'utilisateur de la base de connaissances on a réalisé une barre de menu dont les principales possibilités sont montrées sur la figure 6.8. (Nous avons gardé la première partie identique à celle présenté dans le chapitre 4).

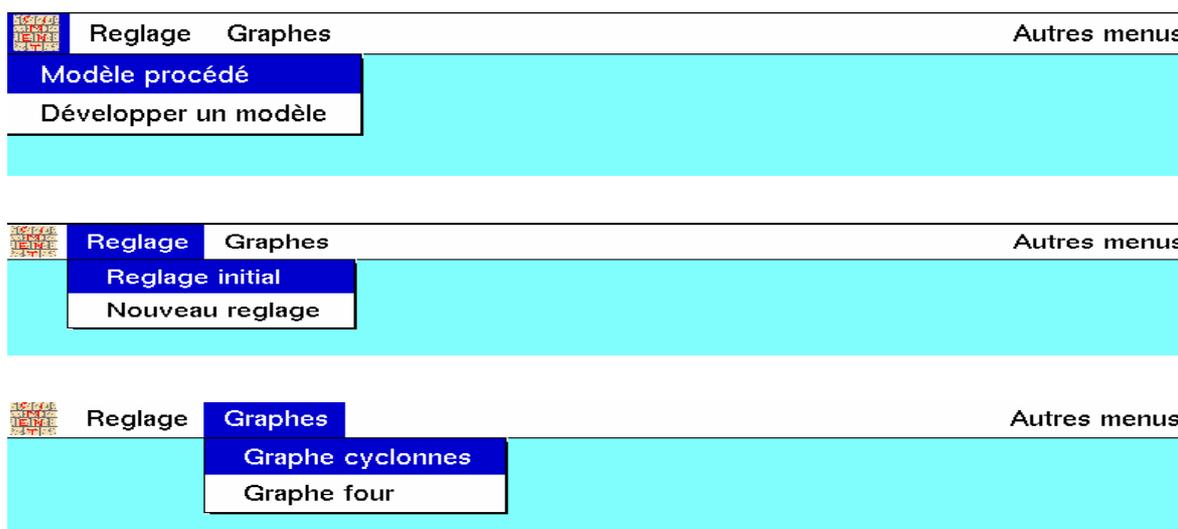


Fig.6.8. Représentation de la barre de menu

6.3.4.3 Les règles

Comme cette base de connaissance est dédiée à la simulation du comportement normal ainsi qu'à la simulation du comportement défaillant, nous avons utilisé deux catégories de règles. Les règles de simulation pour gérer le déplacement de la matière et des gaz, et les règles de diagnostic pour déterminer les défaillances et les localiser.

- **Initially Rules** : ces règles sont activées au début de chaque simulation. Elles déterminent l'état initial pour chaque équipement.
- **Whenever Rules** : elles sont activées à des intervalles réguliers, fixés par le concepteur (en moyennes, toutes les secondes) et permettent d'activer d'autres règles, comme les règles de simulation. Ce sont donc des méta-règles.
- **Simulation Rules** : les règles de simulation testent la présence de la matière et des gaz dans les différents équipements, ces règles utilisent des procédures d'animation.

6.3.4.3 Les procédures

Deux types de procédures ont été définies dans le système expert : celles relatives à la gestion du mouvement de la charge (matière) le long des échangeurs (procédures d'animation) et les procédures calculant les fonctions simulant le transfert thermique dans les différentes parties du système.

Le premier type de procédures gère la simulation de façon globale en déterminant l'état de tout équipement par rapport à la matière et aux gaz (présence ou absence de la matière ou des gaz). Il en est de même pour le calcul du temps du passage de la matière dans les différentes parties du four. Quant au deuxième type de procédures, elles sont utilisées localement par chaque équipement. Certaines sont spécifiques à un équipement donné, d'autres par contre sont utilisées par plusieurs équipements

6.3.6 Spécification pour le diagnostic des défaillances

La spécification de base, c'est à dire pour chaque équipement, paraît une bonne approche pour anticiper la fonction de diagnostic. En effet, la structuration identique au procédé physique permettrait de localiser l'endroit d'un fonctionnement anormal. Une fois l'équipement défaillant est localisé, la détermination des paramètres responsables du mauvais fonctionnement peut être effectuée. Ces paramètres devraient alors être des paramètres de commande afin de pouvoir les modifier dans le procédé réel.

Le raisonnement pour le diagnostic est alors décrit sous forme de règles à

l'intérieur du système expert, exploitant les capacités du moteur d'inférence du G2. L'avantage principal de l'utilisation de la base de règles réside dans sa modularité et la facilité d'extension (suppression ou rajout d'autres règles).

La base de règles nécessaire pour établir le diagnostic des défaillances est construite en exploitant le modèle élaboré en phase d'analyse dysfonctionnelle de notre système (AMDEC). En effet, cette analyse permet d'établir les liens de causes à effets entre les composants défaillants et les symptômes observés. Ces liens seront représentés sous formes de règles de production constituant la base de connaissances qui sera utilisée par le moteur d'inférence pour effectuer les raisonnements nécessaires et aboutir aux résultats exprimant la fonction de diagnostic (figure 6.9).

La détection des anomalies est représentée sous forme de message d'alarme destiné à signaler à l'opérateur (l'utilisateur) l'apparition d'une anomalie (ou des anomalies) et permet d'identifier le composant responsable. Après apparition du message, l'opérateur peut consulter le message pour plus d'informations ou bien le supprimer.

La figure 6.10 montre un exemple de message d'alarme signalant à l'opérateur une anomalie de fonctionnement. En cliquant sur le message on peut connaître l'endroit du composant à l'origine de cette anomalie.

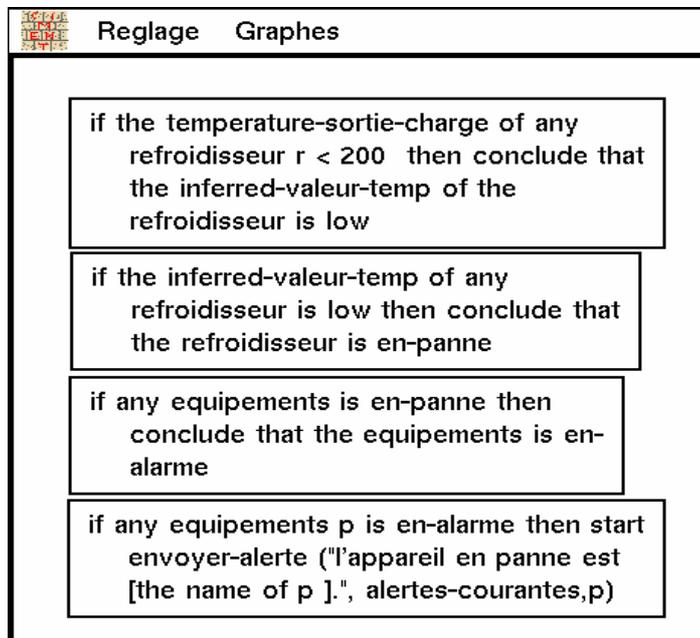


Fig.6.9.Exemples de règles de diagnostic



Fig.6.10.Exemples de message établi pour le diagnostic

6.4 Expression des résultats

6.4.1 Simulation du fonctionnement normal

La simulation du processus de clinkérisation en fonctionnement normal a permis de représenter l'atelier de clinkérisation en montrant les étapes du passage de la charge et des gaz chauds dans les différents échangeurs (figures 6.11 -- / -- 6.16).

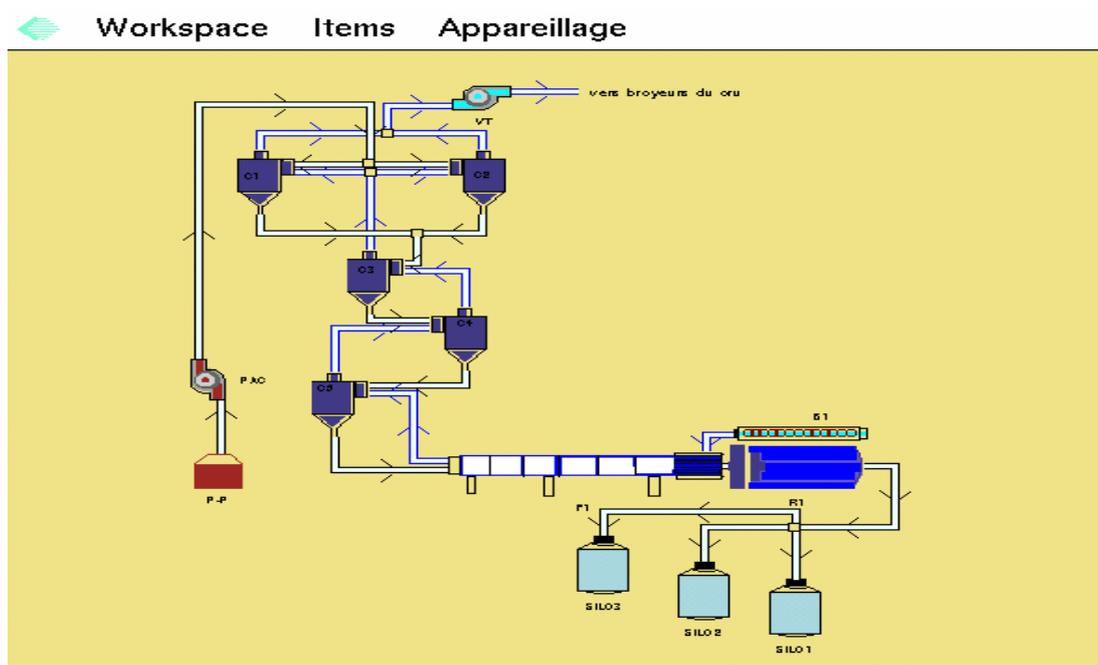


Fig.6.11.Représentation de l'atelier de clinkérisation avant le démarrage

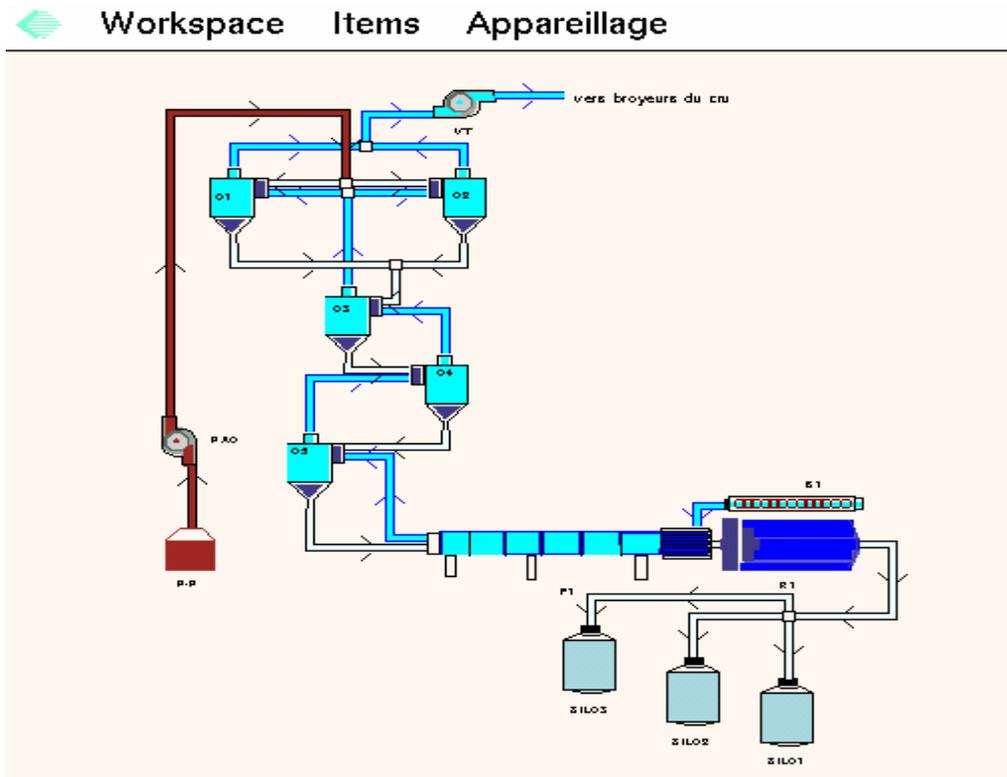


Fig.6.12. Représentation de l'atelier de clinkérisation après introduction des gaz chauds et début de l'arrivée de la charge

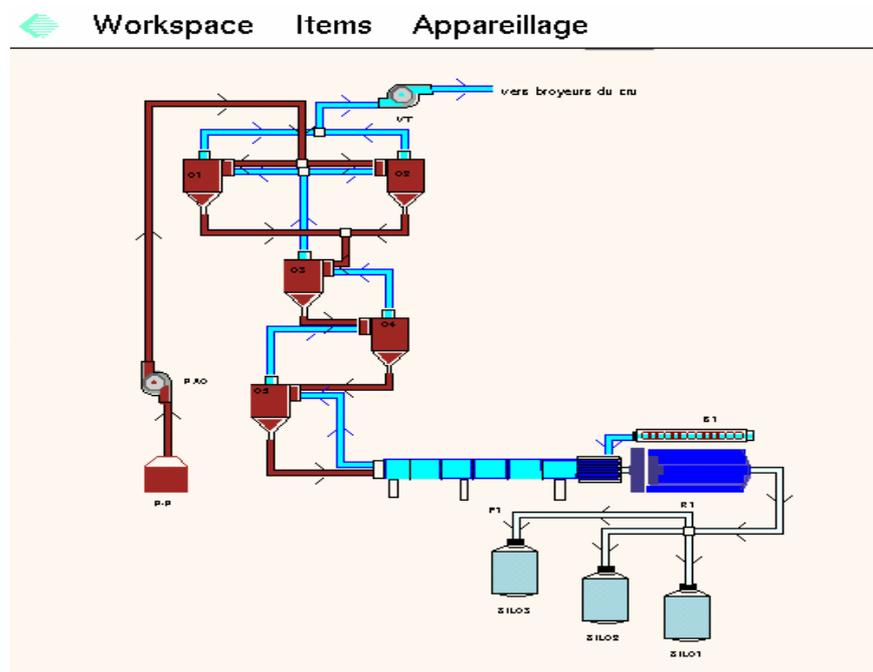


Fig.6.13. Représentation de l'atelier de clinkérisation après passage de la charge dans la tour de préchauffage (dans les 06 cyclones)

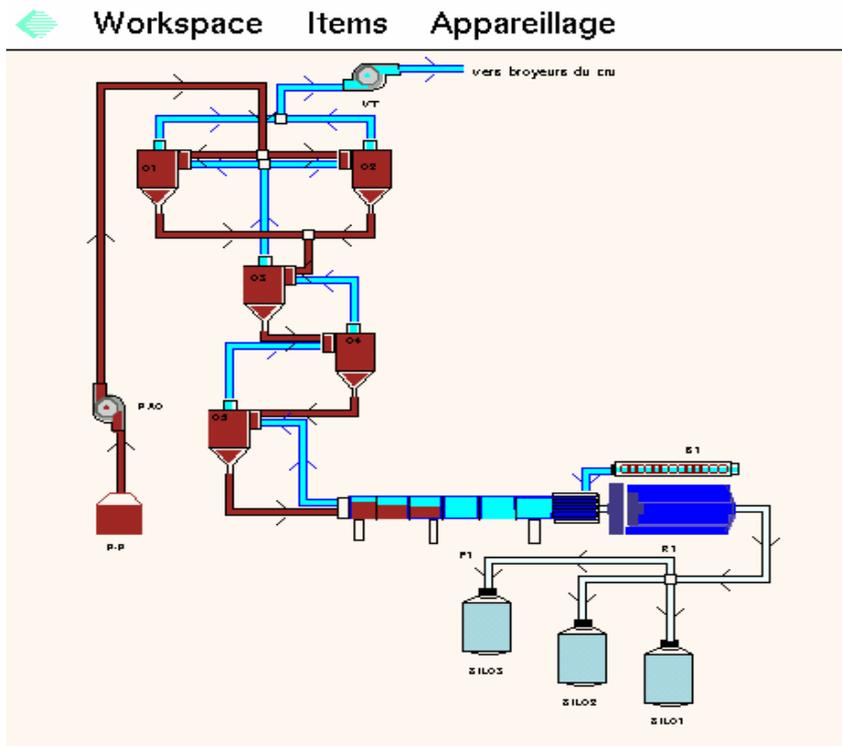


Fig.6.14. Représentation de l'atelier de clinkérisation après passage de la charge dans la première zone du four

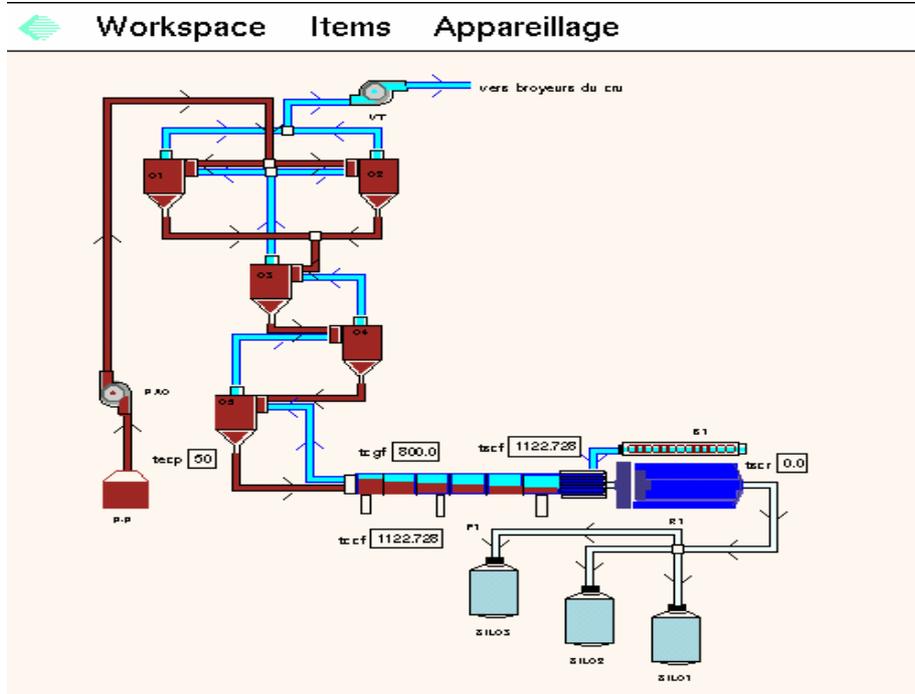


Fig.6.15. Représentation de l'atelier après passage de la charge dans tout le four

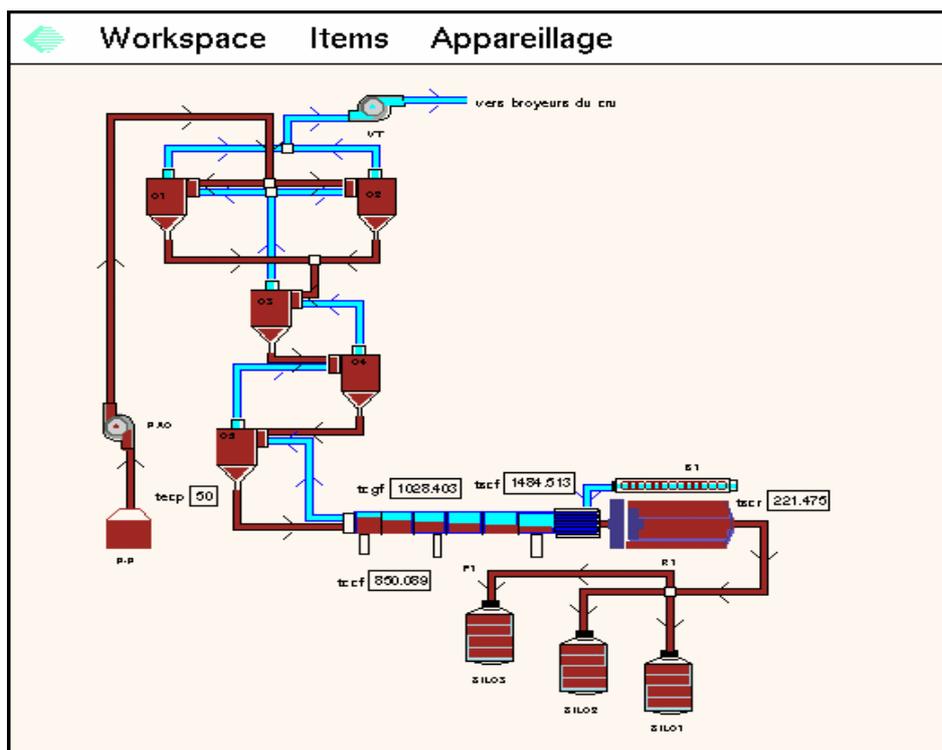


Fig.6.16. Représentation de l'atelier de clinkérisation après passage de la charge dans tout l'atelier

Par ailleurs, et pour une meilleure interactivité avec l'utilisateur de cette base de connaissances, l'évolution des variables significatives est représentée par des tables et des graphes qui signalent les valeurs prises par ces variables à des intervalles de temps bien déterminés (figures : 6.17, 6.18).

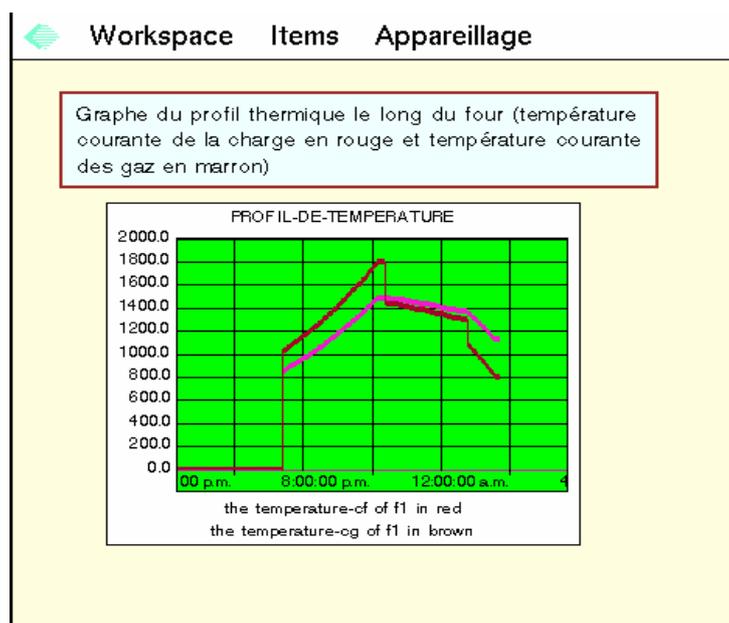


Fig.6.17. Le profil thermique le long du four (température courante de la charge et température courante des gaz)

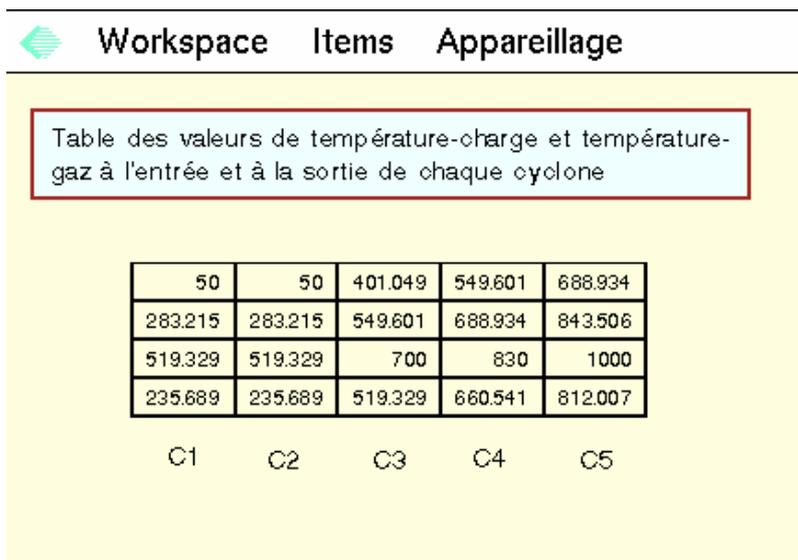


Fig.6.18.Exemple de table des valeurs de température (gaz et charge) dans les 06 cyclones

6.4.2 Simulation en présence des dysfonctionnements

Après apparition d'une anomalie, un message d'alarme permet à l'opérateur de détecter le dysfonctionnement et aussi de localiser le composant responsable.

A titre d'illustration, les figures 6.19, 6.20, 6.21 montrent les résultats de la simulation en présence des dysfonctionnements.

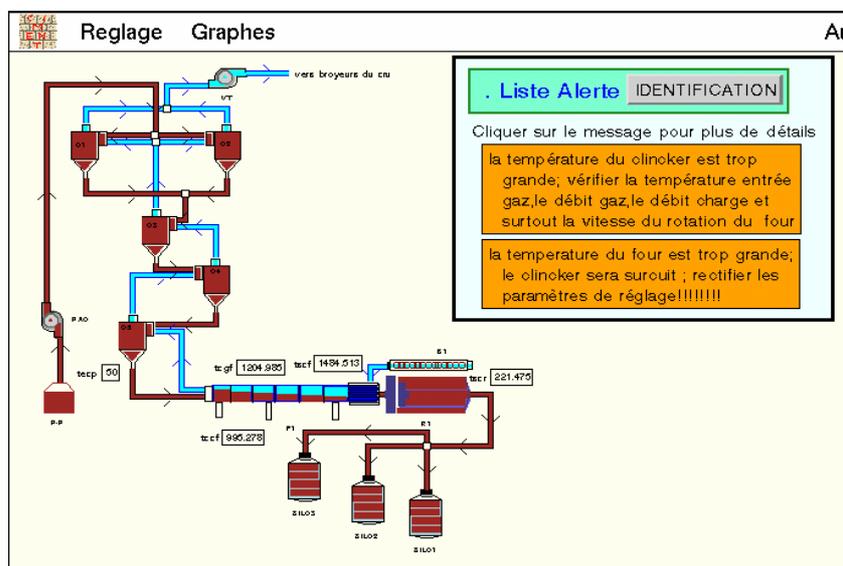


Fig.6.19.Un message signalant une température très élevée

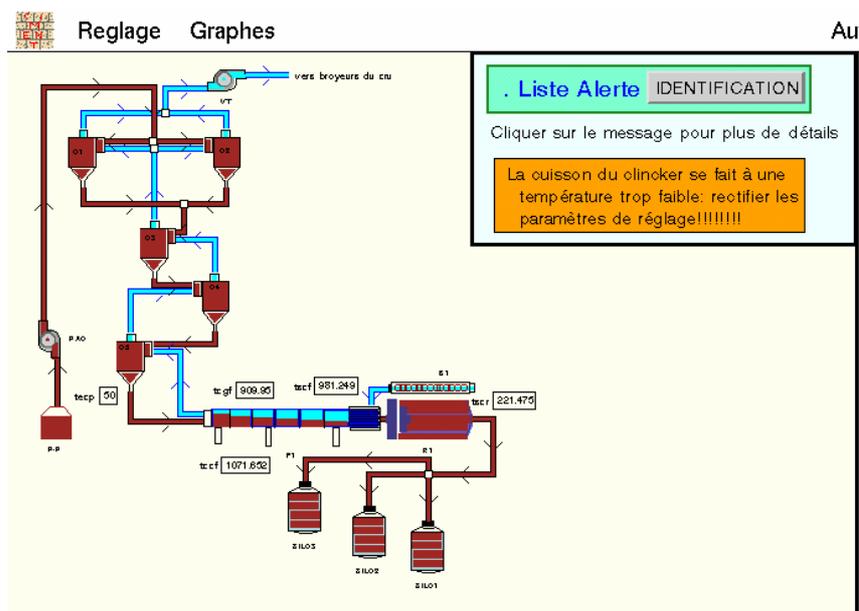


Fig.6.20. Un message signalant une température très basse

Notons que dans cette étude, les anomalies ou dysfonctionnements désignent des anomalies fonctionnelles (valeurs de température ou débit différentes des valeurs normales ou de référence).

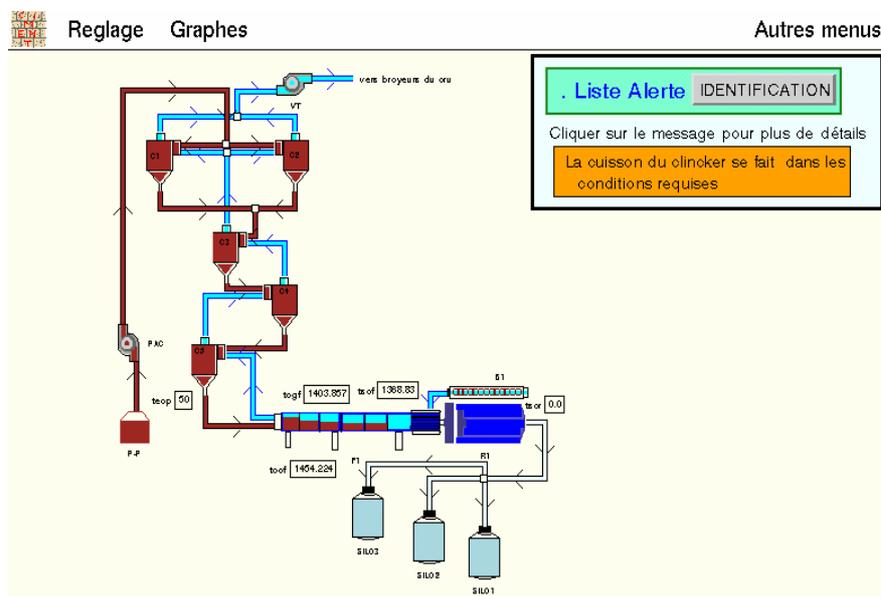


Fig.6.21. Un message signalant une cuisson dans des conditions favorables

6.5 Conclusion

Les résultats numériques analysés semblent être conformes à la réalité. En effet, les températures de la charge et des gaz dans les différents équipements se trouvent dans les limites des valeurs de consignes et peuvent de ce fait être considérés comme des résultats

représentatifs par rapport aux données réelles du système et satisfaisantes dans la limite de la validité du modèle retenu.

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la mise en œuvre d'un exemple d'application industrielle par l'outil de développement, G2. Il a illustré la démarche permettant de représenter et de modéliser les connaissances relatives au domaine à étudier (l'atelier de clinkérisation) ainsi que le raisonnement adopté pour établir le diagnostic des défaillances exploitant l'expérience des experts. Les différentes expressions des résultats considérées dans ce chapitre ont permis de tester d'une part les formalismes de représentation des connaissances et d'autre part les performances de modélisation du générateur de systèmes experts G2.

En outre, l'efficacité d'un système expert dans le domaine du diagnostic des défaillances a été également mise en évidence

***CONCLUSION
GENERALE
ET PERSPECTIVES***

Conclusion Générale et perspectives

Des évolutions très importantes ont marqué la conception des systèmes industriels modernes ce qui complique davantage la tâche de l'opérateur chargé d'entreprendre des opérations de diagnostic dans le cadre des activités de conduite et de maintenance. Il est donc nécessaire de disposer d'outils d'aide au diagnostic permettant de décharger l'opérateur d'une partie du traitement nécessaire pour l'accomplissement de sa tâche.

En effet, la pratique du diagnostic industriel s'inscrit dans le processus de conduite de l'entreprise. Les activités de conduite et de maintenance du processus industriel conduisent à entreprendre en pratique des opérations de diagnostic qui sont de nature très différentes et souvent conditionnées par la spécificité des systèmes et des moyens disponibles.

Les systèmes industriels sont caractérisés par une complexité importante (technologie d'automatisation, interactions importantes opérateurs-processus) qui complique davantage la tâche de l'opérateur chargé du diagnostic. Pour pallier cette difficulté, l'aide informatique devient indispensable et un large éventail de techniques ont été utilisées pour automatiser le diagnostic des systèmes industriels. A chaque type de diagnostic est associé un ensemble de techniques utilisables.

Notre étude a pour objectif de contribuer à proposer un outil d'aide aux opérateurs d'un procédé industriel dans leurs tâches de diagnostic des problèmes et leur résolution. Pour la réalisation de cette étude, choix a été fait de s'appuyer d'une part sur les techniques de l'intelligence artificielle, plus précisément l'approche système à base de connaissance et d'autre part sur les techniques de modélisation fonctionnelle et matérielle.

Comme nous l'avons vu, cette approche utilisée en diagnostic répond parfaitement aux problèmes du type manipulation d'une grande quantité d'information, de données non homogènes et incomplètes.

Ainsi une approche pratique pour la réalisation d'un système à base de connaissances pour l'aide au diagnostic des défaillances et ce à partir de l'acquisition des connaissances

issues de l'analyse fonctionnelle et matérielle a été réalisée. Ces connaissances sont extraites précisément des modèles de sûreté de fonctionnement.

La démarche d'analyse de sûreté de fonctionnement est extrêmement puissante pour la résolution des problèmes de diagnostic de défaillances des procédés industriels. Les connaissances contenues dans les modèles de sûreté de fonctionnement, en plus de la nature même du problème à résoudre, justifient l'approche adoptée dans notre travail.

Dans le but d'illustrer la mise en oeuvre de l'approche système expert, les aspects qui permettent d'élaborer une solution pour nos applications ont été présentés. Ils portent sur la démarche permettant de recueillir et modéliser les connaissances relatives au système, ainsi que le raisonnement adopté pour établir le diagnostic.

Deux objectifs ont guidé la recherche des solutions que nous proposons. D'une part, nous cherchions à optimiser l'effort investi lors de l'acquisition des connaissances relatives au système. D'autre part, il était particulièrement intéressant de trouver une solution modulaire et flexible qui puisse offrir plusieurs réponses d'implantation.

Ainsi, nous avons exposé la démarche qui régit la construction des modèles permettant d'aborder le diagnostic. Notre apport a porté essentiellement sur le choix des méthodes appropriées. En effet, la modélisation de notre système, de par sa complexité, nécessite de recourir à des supports permettant une analyse modulaire et hiérarchique.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'aspect diagnostic industriel qui joue aujourd'hui un rôle déterminant dans la conduite de la production industrielle. A travers notre étude, nous avons essayé de montrer la faisabilité et l'apport des systèmes à base de connaissances pour la réalisation d'outils d'aide au diagnostic. Toutefois, les points suivants paraissent importants à souligner :

- L'acquisition des connaissances est une tâche longue et difficile, néanmoins nous considérons que l'étape de modélisation au cours de laquelle les modèles ont été identifiés et la base de connaissances est exprimée, constitue à elle seule un résultat positif.
- Le raisonnement de diagnostic tel qu'il a été proposé a conduit à l'implémentation d'une structure générique d'aide au diagnostic basée sur le parcours d'un modèle (AdD), et ce indépendamment des connaissances acquises sur le système. En d'autres termes, il a été possible d'atteindre deux objectifs à la fois : la réalisation de deux applications industrielles particulières et l'obtention d'un outil dédié à l'assistance au diagnostic (*Diagnostic Assistant Shell*) autour de G2.

Dans le cadre de nos applications et afin d'améliorer les performances des diagnostics établis, proposé, après identification des causes d'un dysfonctionnement, des actions correctives à l'opérateur pour optimiser son intervention. Ainsi, le traitement proposé et complété par une stratégie particulière qui parcourt le même modèle (l'arbre de défaillance) et utilise les actions correctives et la criticité fournies par l'AMDEC

Dans le cadre de nos recherches, nous avons utilisé trois champs d'application à savoir

1. Un chauffe eau solaire au niveau de l'unité de recherche de l'Université de Batna
2. Le sous système de pasteurisation de la Laiterie des Aurès.
3. Le sous système de clinkérisation de la SCIMAT de Ain Touta

Nous avons travaillé sur le chauffe eau solaire et le sous système de pasteurisation de la Laiterie Aurès, ceci est dû au fait que les deux systèmes sont assez proches d'un point de vue matériel. Nous avons étendu l'étude à une cimenterie (aspect conduite et surveillance) surtout pour la présence de deux types de matière s'écoulant (gaz et solide) en effet nous remarquons que dans les deux premiers cas, nous avons une circulation d'un liquide seulement. Dans le second cas la coexistence de gaz et de matière donne une autre approche qui nécessite d'être étudié.

