

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DU DOCTORAT EN GÉNIE PAPETIER

PAR  
MARIE-PIERRE PINARD

FLEXIBILITÉ, AGILITÉ ET ÉVOLUTION DES PROCÉDÉS  
PAPETIERS : UNE IMPLANTATION PAR LE CONTRÔLE AVANCÉ  
AU CIPP

AVRIL 2011

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

# UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

DOCTORAT EN GÉNIE PAPETIER (PH.D.)

Programme offert par l'Université du QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

Flexibilité, agilité et évolution des procédés papetiers : une implantation par le  
contrôle avancé au CIPP

PAR

MARIE-PIERRE PINARD

---

Luc Laperrière, Ph. D., directeur de recherche      Université du Québec à Trois-Rivières

---

Patrice Mangin, Ph. D., président du jury      Université du Québec à Trois-Rivières

---

Georges Abdul-Nour, Ph. D., évaluateur      Université du Québec à Trois-Rivières

---

Feng Ding, Ph. D., évaluateur externe      Centre de recherche industrielle du Québec

Thèse soutenue le 8 avril 2011

## Avant-propos

L'industrie des pâtes et papiers fait face, depuis quelques années, à un contexte économique et d'affaires particulièrement difficile. Pour demeurer profitables et survivre, les compagnies doivent démontrer la flexibilité et l'agilité nécessaires pour évoluer et s'adapter à ce nouvel environnement. Cette adaptation peut notamment être rendue possible par l'intégration des divers procédés de fabrication d'une usine. L'intégration consiste à recueillir certaines variables de procédé pour en effectuer un traitement intelligent permettant de générer les valeurs requises pour d'autres variables de procédé en vue de l'optimisation globale de ce dernier. Cette façon de faire permet d'ajuster l'opération des équipements en place en vue de l'atteinte d'un même objectif bien défini et d'ainsi tirer un maximum de ces équipements. Cette vision globale et systématique passe par l'intégration adéquate de l'usine. L'usine pilote du Centre Intégré en Pâtes et Papiers (CIPP) de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) assure la disponibilité de la technologie qui permettra la validation des stratégies utilisées pour la réalisation de cette intégration.



## Remerciements

Je désire remercier le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) et Contrôles Laurentide Limité (LCL) pour leur appui financier. LCL m'a aussi offert un support technique des plus utiles et appréciés. Je tiens aussi à souligner le soutien financier de la Fondation de l'Université du Québec à Trois-Rivières qui, année après année, a cru en moi et a ainsi grandement facilité la poursuite de mes travaux.

Je remercie Luc Laperrière, mon directeur de recherche, qui a eu confiance en moi pendant ces nombreuses années. Il a été d'une grande compréhension quant à ma situation familiale et a très bien su doser la pression à exercer pour m'aiguiller vers un travail continu.

Je désire aussi remercier mes parents, Denise Dionne et Pierre Pinard, qui m'ont transmis le désir d'aller toujours plus loin dans les études et qui m'ont permis de terminer le baccalauréat l'esprit libre de tracas financiers.

Enfin, merci à Michel pour son appui à tant d'égards ; et à Raphaël, Renaud et Adam qui constituent mon équilibre.

Avril 2011

## Résumé

Le présent travail de doctorat porte sur l'intégration des procédés de production d'une usine de pâtes et papiers via la conception et l'implantation d'un outil décisionnel d'optimisation. Cet outil utilise notamment le contrôle avancé pour maximiser la productivité et/ou la rentabilité de l'entreprise en réaction à un (des) facteur(s) de turbulence issus de son environnement d'affaires.

Le cadre générique du travail se base sur les niveaux de production typiques d'une entreprise, soient la gestion globale, la gestion du site et de l'usine, la planification et calendrier de production, le contrôle superviseur, le contrôle régulateur ainsi que la collecte de données et action des éléments de contrôle.

L'outil décisionnel lie donc les décisions administratives à l'optimisation de la production. Il cible les éventuels manques de flexibilité (limitations physiques) et/ou d'agilité (dynamique inappropriée) de l'une ou l'autre des variables de produit, de procédé ou de production (PPP) d'un système soumis à un environnement d'affaires turbulent et pour lequel un objectif de rentabilité est fixé. Éventuellement, un scénario d'évolution pourrait être proposé au besoin pour maintenir les cibles de niveau stratégique. Cet outil novateur a été nommé stratégie FAÉ, pour flexibilité, agilité et évolution. Le travail vise donc à aider une entreprise à être mieux préparée (pour réagir) aux perturbations à venir de son environnement d'affaires.

Dans ce contexte, la flexibilité et l'agilité sont utilisées comme mesures de performance et une définition quantitative de ces concepts visant à les intégrer dans le système de contrôle distribué (DCS) est proposée. La méthode d'implantation de la stratégie fait appel au contrôle avancé par modèle prédictif multivariable (MMPC), et c'est ce qui permet à l'outil d'anticiper la réponse face à des turbulences futures.

Une revue de la situation actuelle des papeteries et de l'industrie en général a tout d'abord été effectuée. En réponse à cela, le concept général de la stratégie FAÉ est présenté. Les définitions de flexibilité et d'agilité intégrables au DCS, le rôle du MMPC,

l'implantation ainsi que l'analyse des résultats et une piste de méthodologie liée à l'évolution sont exposés.

Les résultats de la recherche sont très prometteurs ; ils jettent une base solide pour l'implantation en usine d'un outil qui permet d'intégrer à un DCS *DeltaV* une infinité de variables de niveau supérieur, ce qui rend possible l'interopérabilité d'un système de production dans son entièreté. Les possibilités d'utilisation sont doubles : en mode simulation afin d'anticiper la réaction et d'identifier les limites d'un système à des perturbations à venir; ou en mode continu afin d'optimiser l'opération en regard à des cibles de niveau supérieur.

Pour des raisons pratiques, l'implantation a été effectuée avec de courtes échelles de temps et une mise à l'échelle est donc requise pour les niveaux de production supérieurs. Certains points restent à préciser comme la proposition d'un scénario standard d'évolution, la détermination d'un meilleur mode d'évaluation des plages d'opération qui entrent dans le calcul des saturations sur la valeur et sur le temps et la validation de l'opération adéquate des contrôleurs MPC lorsque l'échelle de temps de la simulation est plus grande.

Le procédé de l'usine pilote du Centre Intégré en Pâtes et Papiers (CIPP) et son DCS *DeltaV* sont utilisés comme plate-forme pour la validation et l'implantation de cet outil décisionnel.

Avril 2011

**Mots clés**

Pâtes et papiers, intégration des procédés, optimisation, flexibilité, agilité, évolution, contrôle par modèle prédictif, niveaux de production, environnement d'affaires turbulent, profitabilité, productivité, modélisation, simulation, usine pilote, *CADSIM Plus™*, *DeltaV*.

## Table des Matières

Avant-propos.....	i
Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Mots clés.....	v
Table des Matières.....	vi
Liste des Figures.....	x
Liste des Tableaux.....	xvii
Liste des Équations.....	xviii
Liste des Abréviations.....	xix
Chapitre 1 - Introduction.....	1
1.1 Contexte actuel de l'industrie des pâtes et papiers.....	1
1.2 Problématique du 21 <sup>e</sup> siècle : une ère de changements rapides et imprévisibles.....	3
1.3 Objectif de la recherche.....	5
1.4 Aperçu du projet de recherche.....	7
1.5 Originalité du projet de recherche.....	10
1.6 Organisation du document.....	10
Chapitre 2 - Revue de littérature.....	12
2.1 Mesures de performance traditionnelles.....	12
2.1.1 En général.....	12
2.1.2 En pâtes et papiers.....	14
2.1.3 Importance des études comparatives ou « benchmarking ».....	16
2.1.4 Essoufflement des mesures de performance traditionnelles.....	16
2.2 Concept de flexibilité.....	17

2.3	Concept d'agilité.....	19
2.3.1	Flexibilité vs agilité .....	20
2.3.2	Définitions et modes d'évaluation de l'agilité.....	21
2.3.3	Méthodologie de Sharifi et Zhang pour implanter l'agilité dans les organisations manufacturières .....	23
2.3.4	L'« Agile Wheel Reference Model » de Meredith et Francis .....	27
2.3.5	Modèle de cadre exploratoire et simulation de Ramasesh et al. ....	28
2.4	L'« intelligence » .....	31
2.4.1	Ses nombreux synonymes .....	31
2.4.2	Définitions .....	32
2.4.3	Fonctions .....	33
2.4.4	Quelques faits .....	34
2.4.5	Étapes de la création d'un modèle de CI .....	35
2.4.6	Intégration du BI en entreprise .....	36
Chapitre 3 - Méthodologie .....		39
3.1	Les variables PPP.....	42
3.2	Définition, identification et quantification de la flexibilité et de l'agilité.....	42
3.2.1	Flexibilité.....	43
3.2.2	Agilité .....	47
3.3	Théorie et rôle du MMPC .....	50
3.3.1	Théorie du MMPC en bref.....	50
3.3.2	Rôle du MMPC relativement à la stratégie FAÉ .....	54
3.4	Intégration au DCS .....	57
3.5	Recoupements et évolution.....	61
3.6	Différence entre stratégie FAÉ, SPC, BI et alarmes.....	63
Chapitre 4 - Illustration de la méthodologie par un exemple.....		66
4.1	Parallèle entre la pyramide générique et l'exemple.....	68
4.2	Variables PPP à l'étude dans l'exemple .....	69
4.3	Simulation du procédé à l'aide de <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> .....	70
4.3.1	Niveau du contrôle régulateur de procédé.....	71

4.3.2	Niveau du contrôle superviseur .....	73
4.3.3	Niveau de la gestion du site et de l'usine .....	74
4.4	Boucles de contrôle <i>DeltaV</i> .....	75
4.4.1	Niveau du contrôle régulateur de procédé .....	76
4.4.2	Niveau du contrôle superviseur .....	78
4.4.3	Niveau de la gestion du site et de l'usine .....	80
4.5	Mode de quantification et identification des VS et TS .....	80
Chapitre 5 - Simulation : outil logiciel <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> .....		85
5.1	Implantation d'une simulation .....	85
5.2	Dynamique de premier ordre .....	86
5.3	Totalisateurs .....	87
5.4	Échelles de temps .....	89
5.5	Communication interne .....	90
5.6	Communication avec <i>DeltaV</i> .....	90
5.7	Détermination de la dynamique de procédé associée à une boucle de contrôle et réglage des contrôleurs .....	90
Chapitre 6 - Modélisation et contrôle : outil logiciel <i>DeltaV</i> .....		92
6.1	Configuration .....	93
6.2	Opération .....	94
6.3	Modélisation et opération d'un contrôleur MPC .....	95
Chapitre 7 - Description du procédé à l'étude et implantation .....		98
7.1	Représentation du procédé à l'étude selon les concepts présentés au chapitre sur la méthodologie .....	98
7.2	Hypothèses, plages opérationnelles et limites de flexibilité .....	101
7.3	Description du procédé à l'étude .....	106
7.3.1	Boucles du niveau production .....	106
7.3.2	Boucles du niveau tactique .....	111
7.3.3	Boucles du niveau stratégique .....	114
7.4	Implantation .....	116
7.4.1	Identification du procédé à l'étude .....	116
7.4.2	Paramètres des TS .....	120

Chapitre 8 - Résultats et analyse .....	122
8.1 Résultats de l'implantation .....	122
8.2 Évaluation de la flexibilité du système .....	132
8.3 Évaluation de l'agilité du système .....	136
8.4 Scénario d'évolution .....	139
8.5 Comparaison : avec FAÉ vs sans FAÉ .....	142
8.6 Comportement du système à l'étude lors de modification de la consigne de profit.....	143
Chapitre 9 - Conclusions.....	153
9.1 Retour sur les objectifs .....	153
9.2 Résultats importants.....	156
9.3 Travaux futurs.....	158
Bibliographie.....	163
Annexe A – Pages écran CADSIM Plus™ du procédé à l'étude .....	169
Annexe B – Pages écran <i>DeltaV</i> associées à la description du procédé à l'étude .....	186
Annexe C – Données sur le pin gris.....	197
Annexe D – Modèles des contrôleurs MPC.....	199



## Liste des Figures

Figure 1.1	Stratégie FAÉ appliquée à un système de production générique .....	8
Figure 1.2	Rencontre entre la problématique et la stratégie FAÉ .....	9
Figure 2.1	Fonctions de la gestion de la performance [37] .....	13
Figure 2.2	Modèle conceptuel d'agilité de Sharifi et Zhang [16] .....	24
Figure 2.3	Catégorisation des effets des changements en trois domaines, Sharifi et Zhang [16] .....	26
Figure 2.4	Agile Wheel Reference Model, Meredith et Francis [19] .....	27
Figure 2.5	Cadre conceptuel exploratoire pour l'analyse quantitative de l'agilité, Ramasesh et al. [20] .....	29
Figure 2.6	Partenariat affaires/informations efficace pour une intégration réussie du BI, Hedgebeth [70] .....	37
Figure 2.7	Les huit moteurs qui forment le contexte d'une entreprise, Green [71] .....	37
Figure 2.8	Informations pouvant être obtenues de chacun des huit moteurs, Green [71] .....	38
Figure 3.1	Variables associées à l'évaluation de la flexibilité (ou du manque de flexibilité) lors d'un changement de point de consigne .....	45
Figure 3.2	Variables associées à l'évaluation de la flexibilité (ou du manque de flexibilité) lors d'une perturbation .....	46
Figure 3.3	Variables associées à l'évaluation de l'agilité (ou du manque d'agilité) lors d'un changement de point de consigne .....	49
Figure 3.4	Variables associées à l'évaluation de l'agilité (ou du manque de d'agilité) lors d'une perturbation .....	50
Figure 3.5	Concept de base du MMPC (adapté de Seborg et al. [75]) .....	53
Figure 3.6	Cacade de MMPC associés à la pyramide générique .....	55
Figure 3.7	Liens intra <i>DeltaV</i> et avec <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> .....	59
Figure 3.8	Détail de la communication entre les logiciels <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> et <i>DeltaV</i> .....	60
Figure 3.9	Stratégie préliminaire de standardisation de l'évolution .....	63

Figure 4.1	Schéma de procédé de l'exemple d'implantation .....	66
Figure 4.2	Représentation de l'exemple basée sur la pyramide générique de l'entreprise .....	68
Figure 4.3	Principales variables associées à l'exemple d'implantation faisant l'objet de la communication entre <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> et <i>DeltaV</i> .....	70
Figure 4.4	Page écran de la simulation de la trémie de préchauffage dans <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> - portion de la boucle de température .....	71
Figure 4.5	Page écran de la simulation de la trémie de préchauffage dans <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> - portion des totalisateurs .....	72
Figure 4.6	Page écran de la simulation du niveau superviseur (MPC1) dans <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> .....	74
Figure 4.7	Page écran de la simulation du niveau gestion du site et de l'usine (MPC2) dans <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> .....	75
Figure 4.8	Page écran d'opération de la trémie de préchauffage dans <i>DeltaV</i> .....	76
Figure 4.9	Page écran de la configuration du module de contrôle du PID 103-TIC-005 dans <i>DeltaV</i> .....	77
Figure 4.10	Page écran de la configuration du module de contrôle 103_TIC_005_MPC1 dans <i>DeltaV</i> .....	78
Figure 4.11	Page écran 1 du modèle associé à MPC1 dans <i>DeltaV</i> .....	79
Figure 4.12	Page écran 2 du modèle associé à MPC1 dans <i>DeltaV</i> .....	80
Figure 4.13	Page écran de la configuration associée au calcul de la flexibilité (VS) de la boucle de température dans <i>DeltaV</i> .....	82
Figure 4.14	Page écran de la configuration associée au calcul de l'agilité (TS) de la boucle de température dans <i>DeltaV</i> .....	83
Figure 4.15	Représentation graphique des VS et TS associés à la boucle de température dans <i>DeltaV</i> .....	84
Figure 5.1	Page écran d'un totalisateur de <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> conçu dans le cadre du projet.....	88
Figure 6.1	Arborescence de l'explorateur de <i>DeltaV</i> .....	93
Figure 6.2	Page écran de l'application <i>MPC Operate Pro</i> .....	97
Figure 7.1	Diagramme bloc du procédé à l'étude .....	99

Figure 7.2	Représentation du procédé à l'étude basée sur la pyramide générique de l'entreprise.....	101
Figure 7.3	Principales variables associées au procédé à l'étude faisant l'objet de la communication entre <i>CADSIM Plus™</i> et <i>DeltaV</i> .....	105
Figure 8.1	Tracé des principales variables de la boucle 104-RAF-001-MPC2 .....	125
Figure 8.2	Tracé des principales variables de la boucle 104-RAF-001-MPC1 .....	126
Figure 8.3	Tracé des principales variables de la boucle 104-ENTREFER-MPC.....	127
Figure 8.4	Tracé des principales variables de la boucle 103-CON-001 .....	128
Figure 8.5	Tracé des principales variables de la boucle 103-TIC-005-MPC2 .....	129
Figure 8.6	Tracé des principales variables de la boucle 103-TIC-005-MPC1 .....	130
Figure 8.7	Tracé des principales variables de la boucle 103-TIC-005.....	131
Figure 8.8	Écran d'opération <i>MPC Operate Pro</i> – suivi des tracés liés au contrôleur MPC2 de la boucle 104-RAF-001.....	132
Figure 8.9	VS de la boucle de raffinage (1 de 2) .....	133
Figure 8.10	VS de la boucle de raffinage (2 de 2) .....	134
Figure 8.11	VS de la boucle de température .....	135
Figure 8.12	TS de la boucle de raffinage (1 de 2).....	137
Figure 8.13	TS de la boucle de raffinage (2 de 2).....	137
Figure 8.14	TS de la boucle de température.....	138
Figure 8.15	Scénario d'évolution lié à l'exemple .....	140
Figure 8.16	Comparaison du profit à l'atelier de PTM avec et sans stratégie FAÉ.....	143
Figure 8.17	Tracé des principales variables de la boucle 104-RAF-001-MPC2 lors de changement de consigne de profit.....	146
Figure 8.18	Tracé des principales variables de la boucle 104-RAF-001-MPC1 lors de changement de consigne de profit.....	147

Figure 8.19	Tracé des principales variables de la boucle 104-ENTREFER-MPC lors de changement de consigne de profit.....	147
Figure 8.20	Tracé des principales variables de la boucle 103-CON-001 lors de changement de consigne de profit.....	148
Figure 8.21	Tracé des principales variables de la boucle 103-TIC-005-MPC2 lors de changement de consigne de profit.....	148
Figure 8.22	Tracé des principales variables de la boucle 103-TIC-005-MPC1 lors de changement de consigne de profit.....	149
Figure 8.23	Tracé des principales variables de la boucle 103-TIC-005 lors de changement de consigne de profit.....	149
Figure 8.24	VS de la boucle de raffinage (1 de 2) lors de changement de consigne de profit.....	150
Figure 8.25	VS de la boucle de raffinage (2 de 2) lors de changement de consigne de profit.....	150
Figure 8.26	VS de la boucle de température lors de changement de consigne de profit.....	151
Figure 8.27	TS de la boucle de raffinage (1 de 2) lors de changement de consigne de profit.....	151
Figure 8.28	TS de la boucle de raffinage (2 de 2) lors de changement de consigne de profit.....	152
Figure 8.29	TS de la boucle de température lors de changement de consigne de profit.....	152
Figure A.1	Page écran du fichier CIPP3.dra avec indications de découpage.....	169
Figure A.2	Page écran du découpage 1.....	170
Figure A.3	Page écran du découpage 2.....	171
Figure A.4	Page écran du découpage 3.....	172
Figure A.5	Page écran du découpage 4.....	173
Figure A.6	Page écran du découpage 5.....	174
Figure A.7	Page écran du découpage 6.....	175
Figure A.8	Page écran du découpage 7.....	176
Figure A.9	Page écran du découpage 8.....	177

Figure A.10	Page écran du découpage 9.....	178
Figure A.11	Page écran du fichier CIPP3.dra de <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> associée aux boucles de contrôle 103-CON-001 et 103-TIC-005.....	179
Figure A.12	Page écran du fichier CIPP3.dra de <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> associée aux boucles de contrôle 104-PIC-001 et 104-PIC-007.....	180
Figure A.13	Page écran du fichier CIPP3.dra de <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> associée à la boucle de contrôle 104-ENTREFER- MPC.....	181
Figure A.14	Page écran du fichier 103TIC005_MPC1.dra de <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> associée à la boucle de contrôle 103-TIC-005-MPC1.....	182
Figure A.15	Page écran du fichier 104RAF001_MPC1.dra de <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> associée à la boucle de contrôle 104-RAF-001-MPC1.....	183
Figure A.16	Page écran du fichier 103TIC005_MPC2.dra de <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> associée à la boucle de contrôle 103-TIC-005-MPC2.....	184
Figure A.17	Page écran du fichier 104RAF001_MPC2.dra de <i>CADSIM Plus</i> <sup>TM</sup> associée à la boucle de contrôle 104-RAF-001-MPC2.....	185
Figure B.1	Page écran d'opération <i>DeltaV</i> associée aux boucles de contrôle 103-CON-001 et 103-TIC-005.....	186
Figure B.2	Page écran d'opération <i>DeltaV</i> associée aux boucles de contrôle 104-PIC-001, 104-PIC-007 et 104- ENTREFER-MPC.....	187
Figure B.3	Page écran du module de contrôle <i>DeltaV</i> associé à la boucle de contrôle 103-CON-001.....	188
Figure B.4	Page écran du module de contrôle <i>DeltaV</i> associé à la boucle de contrôle 103-TIC-005.....	189
Figure B.5	Page écran du module de contrôle <i>DeltaV</i> associé à la boucle de contrôle 104-PIC-001.....	190
Figure B.6	Page écran du module de contrôle <i>DeltaV</i> associé à la boucle de contrôle 104-PIC-007.....	191
Figure B.7	Page écran du module de contrôle <i>DeltaV</i> associé à la boucle de contrôle 104-ENTREFER-MPC.....	192

Figure B.8	Page écran du module de contrôle <i>DeltaV</i> associé à la boucle de contrôle 103-TIC-005-MPC1 .....	193
Figure B.9	Page écran du module de contrôle <i>DeltaV</i> associé à la boucle de contrôle 104-RAF-001-MPC1 .....	194
Figure B.10	Page écran du module de contrôle <i>DeltaV</i> associé à la boucle de contrôle 103-TIC-005-MPC2 .....	195
Figure B.11	Page écran du module de contrôle <i>DeltaV</i> associé à la boucle de contrôle 104-RAF-001-MPC2 .....	196
Figure C.1	Relation polynomiale d'ordre 2 entre puissance et entrefer .....	198
Figure C.2	Relation polynomiale d'ordre 2 entre CSF et puissance .....	198
Figure D.1	Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-ENTREFER-MPC (1 de 3) .....	199
Figure D.2	Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-ENTREFER-MPC (2 de 3) .....	200
Figure D.3	Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-ENTREFER-MPC (3 de 3) .....	201
Figure D.4	Caractéristiques du modèle lié à la boucle 103-TIC-005-MPC1 (1 de 2).....	202
Figure D.5	Caractéristiques du modèle lié à la boucle 103-TIC-005-MPC1 (2 de 2).....	203
Figure D.6	Caractéristiques du modèle lié à la boucle 103-TIC-005-MPC2 (1 de 2).....	204
Figure D.7	Caractéristiques du modèle lié à la boucle 103-TIC-005-MPC2 (2 de 2).....	205
Figure D.8	Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-RAF-001-MPC1 (1 de 3).....	206
Figure D.9	Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-RAF-001-MPC1 (2 de 3).....	207
Figure D.10	Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-RAF-001-MPC1 (3 de 3).....	208
Figure D.11	Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-RAF-001-MPC2 (1 de 3).....	209
Figure D.12	Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-RAF-001-MPC2 (2 de 3).....	210

Figure D.13 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-RAF-  
001-MPC2 (3 de 3).....211

## Liste des Tableaux

Tableau 2.1	Indices de production tirés du document <i>Production Indices for Paper Production</i> [39] .....	14
Tableau 2.2	Définitions du concept d'agilité et modèle ou méthode d'évaluation proposées par différents auteurs .....	21
Tableau 4.1	Variables PPP associées à boucle de température de la trémie de préchauffage .....	69
Tableau 7.1	Variables PPP du procédé à l'étude et leurs plages opérationnelles (ou limites de flexibilité) .....	104
Tableau 7.2	Caractéristiques des contrôleurs MPC liées à l'identification du procédé .....	117
Tableau 7.3	TSS et tolérance utilisés dans la détermination des TS .....	121
Tableau 8.1	VS et TS pour l'essai avec variation du point de consigne.....	145
Tableau 9.1	Retour sur les objectifs et l'originalité.....	155



## Liste des Équations

SI $\text{Signal} \leq \text{Limite Basse}$ OU $\text{Signal} \geq \text{Limite Haute}$ ALORS Saturation liée à la Valeur (VS) .....	Éq. 3.1.....44
SI $\text{Temps} > \text{Temps Requis}$ ET $\text{Offset} > \text{Tolérance}$ ALORS Saturation liée au Temps (TS).....	Éq. 3.2.....48
$\min_{\Delta u} J = \sum e^2 + \sum \Delta u^2$ .....	Éq. 3.3.....51
$I_n = I_{n-1} + (\text{Entrée}_n \times \Delta t)$ .....	Éq. 5.1.....89
$\text{Énergie spécifique de raffinage (kJ/kg)} = \frac{\text{Charge (kW)}}{\text{Taux production (kg/s)}}$ .....	Éq. 7.1...113

## Liste des Abréviations

AI	Signal d'entrée analogue « Analog Input »
AO	Signal de sortie analogue « Analog Output »
ARX	« Auto-Regression with eXternal input » (type de modèle)
AWRM	« Agile Wheel Reference Model »
BI	« Business Intelligence »
CA	« Competitor Analysis »
CI	« Competitive Intelligence »
CIPP	Centre Intégré en Pâtes et Papiers
CSF	Indice d'égouttement standard (« Canadian Standard Freness »)
CTI	« Competitive Technical Intelligence »
DCS	Système de Contrôle Distribué (« Distributed Control System »)
DSS	« Decision Support Systems »
DDE	« Dynamic Data Exchange »
DMC	« Dynamic Matrix Control »
FAÉ	Flexibilité-Agilité-Évolution
FIR	« Finite Impulse Response » (type de modèle)
IT	« Information Technology »
KM	« Knowledge Management »
MI	« Market Intelligence »
MIMO	Multiplés entrées – multiplés sorties (« Multiples In - Multiple Out »)
MMPC	Contrôle Multivariables par Modèle Prédicatif (« Multivariable Model Predictive Control »)
MPC	Contrôle par modèle prédictif, multivariables ou non (« Model Predictive Contrôle »)
OPC	« OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control »
PC	Personnal Computer
PID	Contrôleur intégrant les modes Proportionnel-Intégral-Différentiel
PPP	Produit, Procédé et Production (variables de)
PTM	Pâte ThermoMécanique
PV	« Process » ou « Present Value », valeur de la variable contrôlée d'un contrôleur

kPag	Pression absolue, « gage »
SI	« Strategic Intelligence »
SP	« Set Point »
SPC	Contrôle Statistique de Procédé (« Statistical Process Control »)
TMSA	Tonnes métriques séchées à l'air
TS	Saturation liée au Temps « time saturation »
TSS	Temps requis pour atteindre le régime permanent (« Time to Steady State »)
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières
VS	Saturation liée à la Valeur « value saturation »

# Chapitre 1 - Introduction

## 1.1 Contexte actuel de l'industrie des pâtes et papiers

Depuis quelques années, l'industrie papetière canadienne (et celle de nombreux autres pays) est confrontée à des conditions particulièrement difficiles liées à plusieurs facteurs dont notamment la mondialisation des marchés, la stagnation des prix de vente, la diminution de la disponibilité de la fibre, la fluctuation de la valeur du dollar canadien, la hausse des coûts de l'énergie et du transport, le vieillissement du parc technologique ainsi que la crise économique mondiale qui sévit depuis plusieurs mois. Cette situation entraîne une pression énorme pour diminuer les coûts de production tout en maintenant ou en augmentant sans cesse la qualité des produits manufacturés. La compétition est si importante que le fait de ne pas accroître la qualité des produits se traduit, pour plusieurs producteurs, par une diminution des parts de marché au profit de compagnies rivales. Pour faire face à la mondialisation des marchés, des fusions répétées de plusieurs géants de la production papetière ont eu lieu [1-8]. Les rationalisations qui en découlent poussent les divisions les moins prospères à effectuer un examen de conscience au niveau de leur rentabilité sinon de leur marché. Les marchés à faible marge bénéficiaire sont encore plus sévèrement touchés par cette concurrence internationale.

Actuellement, l'industrie des pâtes et papiers est donc en profonde mutation. Plusieurs machines à papier destinées à la production de masse, comme c'est le cas dans le papier journal, sont de moins en moins compétitives au fur et à mesure que de nouvelles machines à papier, plus grandes et plus rapides, effectuent leur mise en service à l'étranger. Ceci accentue la nécessité pour plusieurs papeteries de se distinguer de la concurrence et de se réorienter vers des niches de marché plus lucratives. Face à cette problématique, certaines compagnies ont déjà entrepris d'effectuer des modifications de leurs infrastructures afin d'orienter leur production vers les grades de papiers à valeur ajoutée. Il peut s'agir notamment de l'ajout d'adjuvants chimiques tels les charges minérales ou de l'implantation de traitements de surface comme le supercalandrage et le

couchage [9]. Aussi, les papiers technologiques (papier origami, papier diagnostic, papier sécurité, etc.) font actuellement l'objet de recherches [10-13].

Les équipements utilisés pour produire les papiers à valeur ajoutée (presse encolleuse, coucheuse, supercalandre, etc.) sont très coûteux et l'investissement qu'ils requièrent est difficile à obtenir. On assiste donc en parallèle au développement de certaines alternatives intéressantes dont le financement est plus accessible, comme c'est le cas de la pulvérisation d'amidon, qui peuvent convenir aux entreprises désirant faire une incursion dans ces marchés. Cependant, le besoin de développer d'autres marchés demeure puisque certains observateurs s'interrogent à savoir si la demande pour les papiers à valeur ajoutée sera suffisante pour accommoder le nombre croissant de producteurs.

L'industrie papetière risque fort de voir le bouleversement actuel se prolonger encore quelques années jusqu'à l'atteinte d'une nouvelle situation d'équilibre du marché mondial. Aux conditions difficiles énoncées plus haut s'ajoutent le départ à la retraite massif de la main-d'œuvre vieillissante et les problèmes de perte de savoir-faire que cela occasionne, le remplacement du médium papier par les nouvelles technologies de l'information (internet, livres électroniques) ainsi que l'explosion socio-économique de l'Inde et de la Chine notamment.

Pour survivre, les usines doivent demeurer performantes et leurs capacités d'adaptation et d'innovation les aideront à y parvenir. Du point de vue d'une papetière [14], le défi pourrait se définir comme suit :

- ✎ Convertir la production pour assurer l'avenir des usines ;
- ✎ Réduire les coûts de fabrication et de distribution ;
- ✎ Revoir la structure organisationnelle ;
- ✎ Confectionner des produits à valeur ajoutée à partir de la pâte désencrée ;
- ✎ Utiliser des fibres secondaires et des produits de remplacement.

Enfin, pour faire face à la situation actuelle, chacune des papetières doit s'adapter et évoluer si elle veut survivre. Les investissements étant réduits au minimum, très peu de

ressources sont allouées à cette lutte pour la survie. Les termes « optimisation » et « intégration », actuellement d'utilisation très populaire, prennent ici tout leur sens si on les applique aux installations existantes dans un contexte d'extrême précarité.

## **1.2 Problématique du 21<sup>e</sup> siècle : une ère de changements rapides et imprévisibles**

L'industrie papetière est loin d'être la seule à éprouver de nombreuses difficultés liées aux changements sociaux-économiques. Depuis la fin des années 1980 et pendant les années 1990, suite à l'étendue des changements économiques et politiques à la grandeur de la planète, de nombreux efforts ont été concentrés pour comprendre les racines et les causes de ce nouvel ordre mondial des affaires. Les États-Unis ont initié le mouvement alors qu'ils percevaient une perte importante dans le partage mondial des affaires, tout particulièrement dans le secteur de la production/fabrication avec l'apparition de nouveaux rivaux en provenance de l'Asie et de l'Europe. Des groupes académiques et des instituts de recherche ont donc entrepris des études pour comprendre et diagnostiquer les racines, causes et effets de ces nouvelles conditions. Deux chercheurs [15] ont conduit une étude de cinq ans sur le processus international d'évolution des produits et répertorié les conditions associées à la nouvelle compétition industrielle : l'émergence d'une intense compétition internationale, la création de marchés fragmentés peuplés de consommateurs exigeants et perfectionnés ainsi que divers changements dans les technologies de transformation. Ces chercheurs croient que le rôle joué par les nouveaux produits va bien au-delà de la fascination qu'ils produisent et qu'ils sont devenus le point central de la compétition [16].

Un autre rapport notable [17] a été produit par un groupe de recherche américain du Iacocca Institute. Ce rapport est rapidement devenu une référence en ce qui a trait à l'étude des systèmes de fabrication, proposant que le nouvel ordre mondial agirait comme une force motrice du changement dans le monde de la production. Cette force motrice serait constituée de plusieurs volets soient la compétition, la fragmentation des marchés de masse, la nécessité de produire en coopération, l'évolution des attentes des consommateurs et l'augmentation des pressions sociales. Les caractéristiques que

devraient posséder les entreprises pour combattre ces forces motrices et demeurer compétitives sont l'adaptation continue, la rapidité d'action, l'amélioration de la qualité et la responsabilité sociale. Les auteurs du rapport ont nommé « agilité » ce nouveau concept mettant en relation les moteurs du changement et les aptitudes à posséder pour les vaincre. Nombreux sont les auteurs [18-20] qui s'entendent pour dire que le concept d'agilité est apparu avec le rapport du Iacocca Institute en 1991. Il a donc marqué le début de nombreux écrits sur le sujet et son contenu a par la suite été soutenu par nombre de recherches visant l'étude des changements et des méthodes pour faire face à ce nouvel état des affaires.

Pour le monde des affaires et de l'industrie, l'entrée dans le 21<sup>e</sup> siècle a donc été marquée par un environnement plus turbulent que jamais où la compétition et l'incertitude constituent une menace omniprésente. Le changement n'a rien de nouveau, c'est la vitesse à laquelle il s'effectue aujourd'hui qui le rend si menaçant pour les entreprises. La base de la compétition, qui a longtemps été le prix, a mué vers la qualité, la réduction des délais de livraison et la satisfaction du client. La stratégie courante d'économie d'échelle a été remise en question par la nouvelle vision d'économie dédiée (« economy of scope »). Les systèmes de production de masse ont été sérieusement remis en question pour leur capacité à affronter la nature changeante de l'environnement d'affaires. Les nouvelles méthodes utilisées pour régler les problèmes de productivité telles la fabrication flexible et la production à valeur ajoutée ainsi que toutes les techniques et outils associés s'avèrent insuffisants tels qu'ils sont actuellement utilisés et gérés. [16]

La compétitivité d'une entreprise dépend de plus en plus de sa capacité dynamique à combattre dans un environnement où les changements sont fréquents et imprévisibles. La compétitivité n'est plus une affaire de bas prix. Les entreprises doivent survivre dans un marché où une gamme d'avantages non monétaires est attendue par les clients. Les critères gagnants sont le taux d'innovation, la justesse de l'usage, la flexibilité des quantités, la variété, la personnalisation à l'extrême et par-dessus tout, la rapidité de réaction. L'augmentation de la compétition tant globale que locale entraîne la disparition des entreprises qui ne sont pas en mesure de satisfaire à la demande des clients. La mise

en place des pratiques et principes de l'agilité dans les entreprises semble toutefois offrir une solution au problème. [19]

Bref, la survie des entreprises dépend fortement de leur capacité à réagir rapidement et efficacement aux changements imprévisibles du marché. Pour y parvenir, les systèmes de fabrication doivent maintenant intégrer mais aussi aller au-delà des concepts traditionnels de flexibilité, de valeur ajoutée et de production de masse. [18, 20]

De façon à cibler les éléments principaux de la problématique et à baliser la recherche d'une solution associée, trois constats ont été extraits de ce qui précède :

1. Il est plausible de croire que les conditions liées à la nouvelle compétition industrielle affectent l'efficacité des mesures de performances traditionnelles, lesquelles ont été conçues à une époque où l'environnement d'affaires était fort différent de celui que l'on connaît aujourd'hui. La flexibilité et l'agilité en tant que mesures de performance semblent plus adaptées aux conditions actuelles.
2. L'adaptation et l'innovation dont doit faire preuve l'industrie des pâtes et papiers passent notamment par une compétitivité accrue et par une certaine révision de sa structure organisationnelle.
3. Intégration et optimisation sont des concepts clé à développer dans le contexte précaire actuel.

### **1.3 Objectif de la recherche**

Le regard porté précédemment sur la situation actuelle de l'industrie des pâtes et papiers a conduit à la recherche d'un outil qui pourrait aider une entreprise à identifier ses limitations et à atteindre une profitabilité adéquate dans un contexte d'affaires turbulent. L'approche retenue tire partiellement ses racines de la théorie de l'évolution de Darwin [21]. Selon cette théorie, l'adaptation à de nouvelles conditions de vie passe par l'évolution ; aussi, la survie et le succès sont des caractéristiques que partagent les organismes démontrant un haut niveau d'adaptation.



Par analogie, les mécanismes de base à la source de la démarche d'adaptation d'une entreprise peuvent être résumés par les quatre points suivants [22] :

1. Les facteurs de turbulence engendrent l'adaptation ;
2. L'adaptation se traduit en un comportement agile et flexible à l'intérieur de limites prédéfinies ;
3. Une plus grande flexibilité et agilité (en dehors des limites prédéfinies) peut seulement être acquise par le biais de l'évolution ;
4. L'adaptation est parfois rendue possible grâce à l'évolution.

Ces énoncés sont à la base de la conception du nouvel outil décisionnel. Cet outil intègre les concepts de flexibilité, d'agilité et d'évolution ainsi que l'action du contrôle avancé pour déterminer si une entreprise a la capacité d'affronter les perturbations à venir de son environnement d'affaires. Si tel n'est pas le cas, un scénario d'évolution peut éventuellement être proposé pour y parvenir. Cet outil a été nommé stratégie FAÉ pour Flexibilité, Agilité et Évolution.

***De façon à répondre aux trois constats issus de la problématique, l'objectif global de la recherche est de développer un outil d'optimisation utilisant le contrôle avancé pour maximiser la productivité d'une entreprise en réaction à un environnement global turbulent. Les objectifs spécifiques qui en découlent sont les suivants :***

1. Proposer des définitions quantifiables (et transposables dans un système de contrôle distribué – DCS) de flexibilité et d'agilité en tant que mesures de performance de façon à permettre l'identification des limites de l'entreprise quant à l'atteinte de l'objectif global visé (souvent lié à la profitabilité).
2. Propager de façon systématique les décisions stratégiques jusqu'aux niveaux opérationnels d'une entreprise pour permettre de lier concrètement les décisions administratives à l'optimisation de la production.
3. Utiliser le contrôle avancé pour assurer l'intégration de l'entreprise dans sa globalité, pour en optimiser la productivité et pour anticiper l'effet d'une perturbation globale à venir.

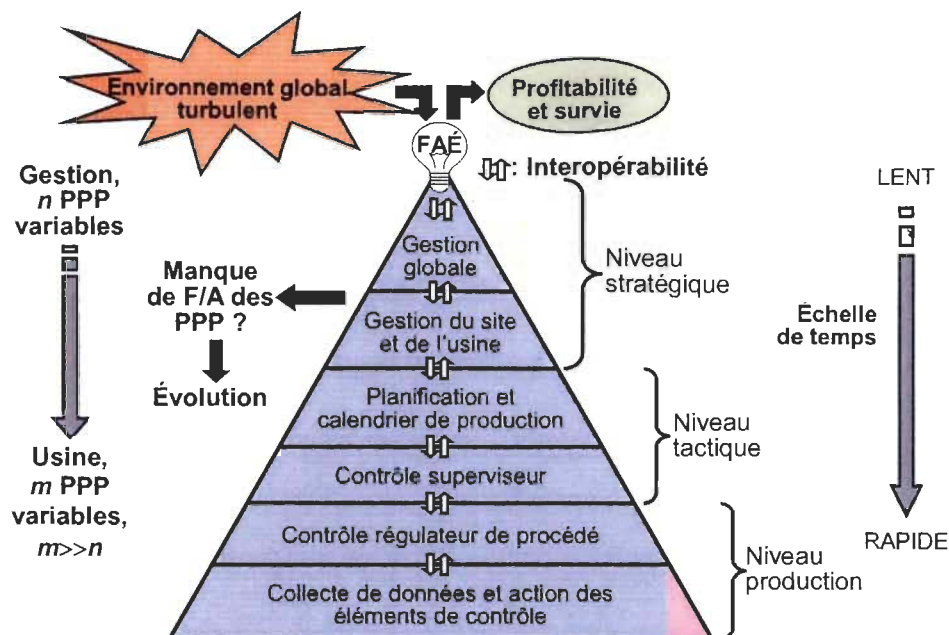
4. Proposer une piste de méthodologie d'évolution permettant à l'entreprise de cibler les modifications requises lorsque les limitations rencontrées sont telles qu'elle ne peut atteindre la profitabilité visée.

#### 1.4 Aperçu du projet de recherche

L'outil d'optimisation qui fait l'objet du présent projet de recherche lie les décisions administratives à l'optimisation de la production. Il cible les éventuels manques de flexibilité (limitations physiques) et/ou d'agilité (dynamique inappropriée) de l'une ou l'autre des variables PPP d'un système soumis à un environnement d'affaires turbulent et pour lequel un objectif de profitabilité est fixé. Un scénario d'évolution pourrait éventuellement être suggéré pour maintenir les cibles de niveau stratégique. Dans ce contexte, la flexibilité et l'agilité sont utilisées comme mesures de performance et une définition quantitative de ces concepts en lien avec le DCS est proposée. La méthode d'implantation de la stratégie fait appel au contrôle avancé de type contrôle par modèle prédictif multivariables (MMPC – dans le texte, les termes MPC et MMPC sont utilisés indifféremment) qui permet notamment de tenir compte des horizons passés et futurs et d'intégrer le système de production dans son ensemble.

Enfin, la démarche favorise une approche générique avec validation/application à l'usine pilote du Centre Intégré en Pâtes et Papiers (CIPP) de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). L'utilisation de la configuration actuelle du DCS *DeltaV* installé au CIPP, en version simulée, permet de démontrer le rôle essentiel joué par le MMPC dans l'implantation de la stratégie FAÉ.

De façon générique et tel qu'illustré à la figure 1.1, le système de production d'une entreprise peut être représenté à l'aide de six niveaux superposés tels une pyramide : gestion globale, gestion du site et de l'usine, planification et calendrier de production, contrôle superviseur, contrôle régulateur, collecte de données et éléments de contrôle. Les deux niveaux supérieurs associés aux décisions administratives sont qualifiés de stratégiques. Les deux suivants, planification/calendrier de production et contrôle superviseur sont définis comme étant tactiques alors que les deux niveaux du bas de la pyramide composent la portion opérationnelle.



**Figure 1.1** Stratégie FAÉ appliquée à un système de production générique

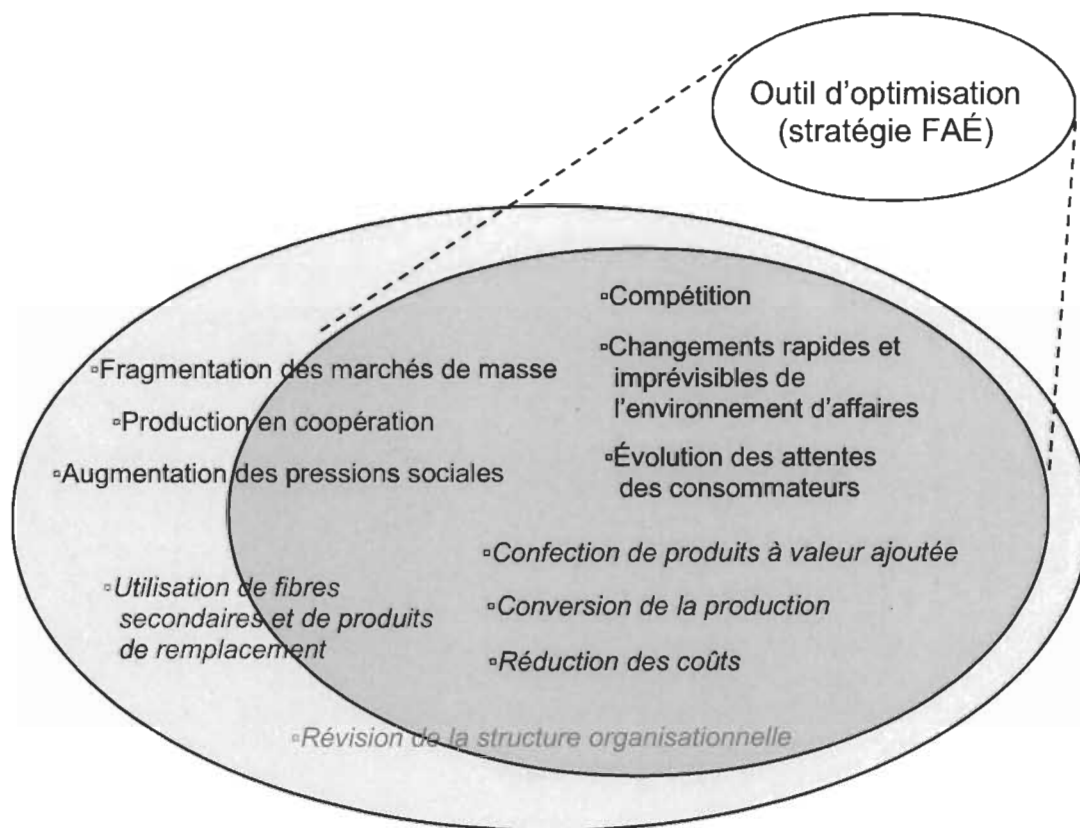
L'échelle de temps est différente entre le haut (gestion globale) où les actions s'effectuent à une vitesse réduite (sur une base hebdomadaire par exemple) et le bas de la pyramide (collecte de données et action des éléments de contrôle) où les actions prises par le DCS sont très rapides (millisecondes).

On retrouve associés à chacun des niveaux de nombreuses variables PPP qui sont des variables reliées au système de production de l'entreprise. Typiquement, les variables PPP sont plus nombreuses à mesure que l'on descend vers les niveaux inférieurs de la pyramide.

Ainsi, lorsqu'une entreprise est soumise à une turbulence dite globale, la stratégie FAÉ agit à la façon d'un filtre visant à maintenir et potentiellement améliorer le(s) objectif(s) global(aux) de profitabilité et survie. Le MMPC permet de cascader, du niveau supérieur et jusqu'au bas de la pyramide (flèches vers le bas), les points de consigne requis pour atteindre ces objectifs. Au bas de la pyramide, le DCS agit sur les éléments de contrôle finaux (valves, pompes, etc.) pour modifier l'état du procédé. Ces modifications ont ensuite un impact successif (flèches vers le haut) sur les niveaux supérieurs jusqu'à

l'atteinte de l'objectif global. L'utilisation du MMPC permet ainsi l'interopérabilité entre les niveaux organisationnels de l'entreprise. Enfin, si l'objectif global n'est pas atteint à cause de manques de flexibilité et/ou d'agilité à divers niveaux, un scénario d'évolution pourrait être proposé.

La figure 1.2 montre les problématiques abordées aux sections 1.1 et 1.2 pouvant être réglées en tout ou en partie par la stratégie FAÉ. Lorsque le texte se situe à l'intérieur du plus petit des cercles concentriques de la figure 1.2, on estime que la stratégie FAÉ peut répondre complètement au problème. Si par contre le texte associé à la problématique se situe partiellement dans le petit cercle, on croit pouvoir y remédier en partie seulement. Les problématiques de la section 1.1 liées à l'industrie des pâtes et papiers sont présentées en police de caractère italique alors que celles associées à l'industrie en général (section 1.2) sont de police normale.



**Figure 1.2 Rencontre entre la problématique et la stratégie FAÉ**

L'usine pilote du CIPP est utilisée comme cadre expérimental à la présente recherche. Cette disponibilité représente une opportunité unique de valider la méthodologie élaborée. L'usine, en plus de permettre l'application concrète de la recherche, offre de par sa fonction et sa conception une flexibilité exceptionnelle. Par exemple, la vitesse de la machine à papier peut varier de 200 à 1000 mètres par minute pour produire une gamme de produits entre le carton deux plis et le papier fin. Le réseau de conduites est conçu pour permettre un maximum de configurations de tracés entre les divers équipements du bout humide notamment. Le raffinage peut être à un, deux ou trois stades. Plusieurs types de blanchiment sont disponibles (réducteur, oxydant,...). Etc.

### **1.5 Originalité du projet de recherche**

L'originalité du projet de recherche comprend trois volets :

1. L'utilisation successive et/ou conjointe des concepts de flexibilité, agilité et évolution comme moteur d'un outil novateur de contrôle avancé vers une profitabilité maximale est une primeur dans le domaine des pâtes et papiers et dans l'industrie en général.
2. L'utilisation des MMPC de façon à assurer l'interopérabilité des niveaux organisationnels d'une entreprise et à rendre possible l'anticipation de l'effet d'une perturbation à venir dans un tel cadre constitue une nouveauté.
3. Et finalement, le fait que cet outil permette l'identification concrète du manque de flexibilité et d'agilité d'une entreprise via son DCS, puis la proposition d'une piste de méthodologie pour l'élaboration de l'évolution requise sont totalement novateurs.

### **1.6 Organisation du document**

Le Chapitre 2 - Revue de littérature propose une revue de littérature associée aux concepts de flexibilité, d'agilité et d'évolution. Cette revue permet d'asseoir les bases pour les définitions concrètes et intégrables au DCS qui sont par la suite proposées. Ce chapitre fait aussi un survol des recherches et applications similaires existantes dans l'industrie des pâtes et papiers afin de bien faire ressortir le caractère unique de la présente recherche. Le Chapitre 3 - Méthodologie expose ensuite en détail la

méthodologie conçue pour implanter concrètement la stratégie FAÉ. Le Chapitre 4 - illustre l'implantation à l'aide d'un exemple complet. Les Chapitre 5 - Simulation : outil logiciel *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> et Chapitre 6 - Modélisation et contrôle : outil logiciel *DeltaV* fournissent les informations requises pour faciliter la compréhension des travaux. Enfin, les Chapitres 7, 8 et 9 sont dédiés aux résultats, à leur analyse et aux conclusions qui s'ensuivent.

## Chapitre 2 - Revue de littérature

En lien avec la problématique, le présent chapitre aborde les trois éléments principaux de la problématique (se référer à la section 1.2) ainsi que l'évolution :

- ✎ La section 2.1 porte tout d'abord sur les mesures de performance traditionnelles et en effectue un bref survol. Même si d'autres auteurs traitent de la définition et de la mesure de la performance [15, 23-24], la section 2.1.1 s'attarde sur un article en particulier où la performance est traitée dans un contexte de production.
- ✎ Les sections 2.2 et 2.3 introduisent et détaillent respectivement la flexibilité et l'agilité en tant que nouvelles mesures de performances visant à aider les entreprises à survivre et à performer dans un environnement d'affaires de plus en plus turbulent.
- ✎ La dernière partie du chapitre, section 2.4, traite de l'« intelligence » qui semble proposer une piste de réponse aux besoins d'adaptation, d'innovation et de révision de la structure organisationnelle d'une entreprise.

Les applications du MMPC en pâtes et papiers se sont avérées nombreuses [25-36]. Elles sont aussi généralement associées à une visée d'optimisation, mais n'étudient pas l'entreprise dans sa globalité et ne dépassent pas le cadre de l'opération pour intégrer les niveaux de production plus élevés tels ceux liés à la gestion comme c'est le cas ici. La revue de littérature n'a pas non plus permis de trouver des écrits portant sur l'évolution telle que définie dans le cadre du projet. C'est pourquoi ces deux sujets (MMPC et évolution) ne font pas l'objet d'une section dans le cadre du présent chapitre

### 2.1 Mesures de performance traditionnelles

#### 2.1.1 En général

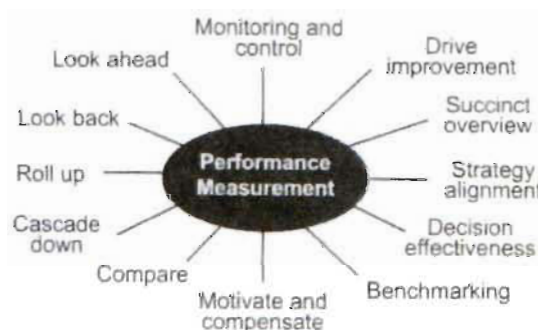
Selon Hon [37] la performance est, par définition, liée aux événements passés ou présents et est donc observable et mesurable. La mesure de la performance est



indispensable aux gestionnaires pour comprendre l'état actuel du système de production et ainsi prendre les actions appropriées pour demeurer compétitif (schématisé à la figure 2.1).

Toujours selon Hon, les fonctions génériques de la mesure de la performance sont les suivantes :

1. Refléter l'état actuel du système de production;
2. Suivre et contrôler l'efficacité opérationnelle;
3. Diriger le programme d'amélioration;
4. Évaluer la pertinence des décisions relatives au système de production.



**Figure 2.1 Fonctions de la gestion de la performance [37]**

L'auteur fait l'historique des mesures de performance en remontant aux années 1960. Il introduit ensuite le type de mesures de performances et leurs propriétés pour les camper dans le cadre de systèmes de production. Il analyse et commente différentes méthodes de mesure de performances liées à la production, dont notamment le « benchmarking », puis discute de leurs fins pratiques.

Enfin, Hon abonde dans le même sens que les auteurs d'écrits sur l'agilité, à savoir : « Bien que l'objectif classique des entreprises manufacturières, qui est de produire la quantité requise dans le temps requis de la façon la meilleure et la plus économique qui soit, demeure valide aujourd'hui, un tel objectif générique nécessite d'être révisé compte tenu de l'environnement compétitif actuel ». D'ailleurs, la flexibilité, l'agilité et la



variabilité font partie des sujets qu'il qualifie d'émergents en relation à son étude des mesures de performance.

### 2.1.2 En pâtes et papiers

Aujourd'hui, l'existence de nombreuses méthodes de calcul de la performance induit la confusion et rend difficile la comparaison entre les compagnies [38]. L'industrie papetière en est présentement à établir un standard qui se veut international et qui permettrait la comparaison directe entre usines. Le standard qui semble vouloir s'imposer est celui mis au point par *The German Pulp and Paper Chemists and Engineers Association* et *The Finnish Paper Engineer's Association* nommé « Production Indices for Paper Production » [39] qui couvre le procédé de l'arrivée de la pâte sur la toile de formation jusqu'au produit fini et offre l'avantage de fournir le détail des équations utilisées. Ce standard est déjà accepté par la plupart des producteurs de papier en Europe. Les indices de production de ce nouveau standard, qui sont en fait des mesures de performance, sont listés au tableau 2.1 :

**Tableau 2.1 Indices de production tirés du document *Production Indices for Paper Production* [39]**

Classe d'indice de production	Indice de production	Équation
<i>Temps</i>	Temps calendrier $t_{calendar}$ [h]	Toutes les heures pendant la période visée : Annuellement : 365 jours X 24 h Mensuellement : 28, 29, 30 ou 31 jours X 24h Etc.
	Temps non disponible $t_{not\_a}$ [h]	Temps où la ligne de production est arrêtée à cause de facteurs externes, avec ou sans personnel en place (plusieurs sous-catégories de temps non disponible).
	Temps maximal disponible $t_{max\_a}$ [h]	Temps où la ligne de production est théoriquement en mesure de produire du papier : $t_{max\_a} = t_{calendar} - t_{not\_a}$
	Temps de shutdown $t_{shut}$ [h]	Le temps de shutdown est la période où il n'y a pas de pâte sur la toile de formation ou pas de vide au cylindre aspirant. Le décompte débute avec l'arrêt de la pompe de mélange et se termine avec le redémarrage de la pompe de mélange. En général, le temps de shutdown est précédé d'un temps d'arrêt. Le temps de shutdown fait partie du temps maximal disponible. $t_{shut} = t_{shut\_p} + t_{shut\_up}$ (shutdown planifié et non planifié)

Classe d'indice de production	Indice de production	Équation
	Temps disponible à la production $t_{a\_prod}$ [h]	Le temps disponible à la production est la période où il y a de la pâte sur la toile ou un vide au cylindre aspirant, peu importe qu'il y ait ou non bobinage d'un rouleau : $t_{a\_prod} = t_{max\_a} - t_{shut}$
	Temps d'arrêt $t_{idle}$ [h]	Le temps d'arrêt est la période où il y a de la pâte sur la toile ou un vide au cylindre aspirant, mais qu'il n'y a pas de bobinage d'un rouleau : $t_{idle} = t_{start-up} - t_{break} + t_{minor\_work} + t_{grade\_change}$ où $t_{start-up}$ : temps de départ après un shutdown et temps de préparation à un shutdown de machine; $t_{break}$ : temps où la production est interrompue pour une raison non planifiée; $t_{minor\_work}$ : temps pour des travaux mineurs associés à la production à la maintenance où la pâte est sur la toile de formation; $t_{grade\_change}$ : temps associé aux changements de grade (si la feuille n'est pas bobinée).
	Temps de non production $t_{lost}$ [h]	Le temps de non production représente le temps de shutdown ou le temps d'arrêt alors qu'il n'y a pas de bobinage d'un rouleau : $t_{lost} = t_{shut} + t_{idle}$
	Temps de production $t_{prod}$ [h]	Le temps de production est la période pendant laquelle un rouleau est bobiné, soit le temps maximal disponible moins le temps de non production : $t_{prod} = t_{max\_a} - t_{lost}$
Efficacité reliée au temps	Taux d'opération $\eta$ [%]	Le taux d'opération est calculé à partir du temps maximal disponible et du temps calendrier : $\eta = \frac{t_{max\_a}}{t_{calendar}} \times 100$
	Temps efficace $\eta_{time}$ [%]	Le temps efficace est calculé à partir du temps de production et du temps maximal disponible : $\eta_{time} = \frac{t_{prod}}{t_{max\_a}} \times 100$
Production	Production potentielle calculée, production nette (rouleau), production nette (feuille), production emballée, production vendable. *	
Efficacité reliée à la superficie de papier	Perte de longueur et longueur efficace, perte de trim et trim efficace, perte de superficie et superficie efficace. *	
Efficacité globale	Efficacité globale de production de papier, efficacité globale liée au temps calendrier. *	
Capacité de production	Superficie produite par mètre de largeur de la machine, superficie produite. *	
* : Se référer au document [39] pour la définition détaillée.		

### 2.1.3 Importance des études comparatives ou « benchmarking »

Dans les années 1970, le calcul de l'efficacité et la mesure de la performance des machines à papier étaient des sujets d'importance grandissante. La comparaison des usines selon leur efficacité était alors et est toujours une information clé pour initier des projets majeurs ou l'optimisation d'une machine. De nombreuses associations et compagnies papetières ont défini des règles de calcul de l'efficacité et de la productivité, généralement dans le but de suivre le développement d'une usine d'une part et de comparer différentes usines d'autres part. La mondialisation des marchés augmente cette nécessité pour les usines de se comparer pour les raisons suivantes [40] :

- ❖ Savoir où les meilleurs se situent;
- ❖ Connaître les standards de l'industrie;
- ❖ Connaître les tendances de l'industrie;
- ❖ Savoir où une usine se situe relativement à la compétition.

### 2.1.4 Essoufflement des mesures de performance traditionnelles

Malgré l'importance indéniable de l'établissement d'un standard de calcul de la performance et de l'utilisation d'études comparatives, les mesures de performance traditionnelles souffrent d'une lacune importante : leur caractère passif. En effet, même si de bonnes mesures permettent d'avoir une image juste de la performance actuelle d'une usine et de la comparer avec ses résultats passés et ceux des autres, elles ne donnent pas d'indications claires sur le cheminement à suivre pour en augmenter la rentabilité, ni ne possèdent une nature dynamique permettant de réagir aux variations du marché. L'urgence de répondre aux fluctuations importantes du marché liées notamment à sa mondialisation a entraîné l'émergence des concepts de flexibilité et d'agilité.

Toutefois, l'utilité des mesures de performance traditionnelles demeure d'une grande importance puisqu'elles entrent dans la définition et dans la mesure de la flexibilité et de l'agilité et qu'elles peuvent éventuellement permettre de faire le pont qui facilitera l'instauration et l'application pratique et concrète de ces concepts.

## 2.2 Concept de flexibilité

Il existe de nombreux écrits sur la flexibilité [41-47]. Les définitions données par les auteurs varient sensiblement en étendue et en complexité. Certaines [43] se rapprochent beaucoup des définitions de l'agilité répertoriées à la prochaine section.

Narain et al. [43] effectuent un survol et une classification des différents types de flexibilité et la revue de littérature associée est très étoffée. L'importance de la flexibilité a été longuement débattue et il en ressort qu'il s'agit d'une nécessité, qu'elle permet d'affronter les perturbations tant internes qu'externes de l'environnement organisationnel.

À travers les années, la flexibilité a été définie de plusieurs façons. Parmi les premières définitions (1978) de la flexibilité, à noter celle de Mandelbaum [48] selon qui il s'agit de répondre efficacement à des circonstances changeantes. Il caractérise aussi la flexibilité selon deux formes : la flexibilité d'action et la flexibilité d'état. La flexibilité d'action est définie comme la capacité de prendre de nouvelles actions pour réagir à de nouvelles circonstances alors que la flexibilité d'état est la capacité de continuer à fonctionner efficacement malgré les changements dans l'environnement.

Toujours tiré des travaux de Narain et al., la flexibilité peut être définie comme étant la capacité d'un système à procéder une large variété de parties ou d'assemblages sans intervention extérieure visant à modifier le système. On fait aussi la distinction entre flexibilité actuelle qui est la capacité à réagir à des changements concrets, et flexibilité potentielle qui est associée à des changements non définis. Dans tous les cas, il ressort que la flexibilité est un concept multidimensionnel complexe difficile à cerner.

Selon eux, en définissant la flexibilité, il est important de tenir compte du niveau de spécification de cette dernière. Ce niveau peut être aussi bas qu'une seule machine ou aussi élevé qu'une usine entière. Cette considération est nécessaire pour chaque niveau, puisque tant le concept de flexibilité que la façon de l'atteindre sont différents.

Narain et al. associent étroitement la flexibilité à l'environnement incertain. Ils s'attardent à la mesure de la flexibilité qui demeure selon eux une des tâches

organisationnelles les plus ardues. Ils proposent ensuite une méthode qui en permet la classification et une autre qui en permet l'intégration dans le processus organisationnel d'une entreprise.

Selon Upton [41], la flexibilité des systèmes de production est une aptitude composée de multiples facettes et un concept ouvert à une large interprétation dont plusieurs sources primaires proposent d'ailleurs une définition (économie, gestion, etc.). Selon lui, la flexibilité est souvent une habilité potentielle plutôt qu'une habilité démontrée. Il s'agit d'évaluer ce qu'une usine peut produire plutôt que ce qu'elle produit actuellement. Ce qui est un problème fondamental puisque de telles habilités sont, par définition, hypothétiques et ne peuvent être observées directement. Sa définition de la flexibilité passe d'ailleurs par la mesure de celle-ci. En effet, la flexibilité associée au produit peut être définie par le nombre de produits différents ou par la capacité de produire une large gamme relativement aux caractéristiques clés d'un produit.

Dans le cadre de son étude, Upton aborde le problème en mesurant, dans un premier temps, la flexibilité démontrée. Puis à l'aide de données additionnelles provenant des opérateurs, il cerne les habilités potentielles. Son choix d'industrie s'est arrêté sur les papiers fins non couchés où la densité du papier est utilisée comme caractéristique dominante et mesurable définissant la gamme de produits manufacturés. L'auteur émet un certain nombre d'hypothèses associées à la flexibilité qu'il tente de valider par ses travaux (par exemple, qu'un haut niveau d'intégration informatique est associé à un haut niveau de flexibilité).

Selon Gerwin [44], la recherche sur la flexibilité dans un contexte de production est axée sur la planification, le contrôle et l'investissement. La vision amenée par Gerwin se veut plus stratégique. Il propose un modèle conceptuel plaçant la flexibilité dans un contexte large et visant à faciliter l'identification de certaines suppositions issues d'études théoriques qui demandent à être remises en question. Le modèle procure aussi une base pour l'identification des dimensions spécifiques de la flexibilité.

Selon les auteurs cités par Gerwin [49], il appert que la nation Japonaise a une longueur d'avance dans la reconnaissance de l'importance grandissante de la flexibilité. Au rang

des priorités pour demeurer compétitif, les compagnies japonaises classent respectivement deuxième et quatrième la flexibilité comme moyen d'introduire de nouveaux produits et la flexibilité comme moyen d'ajuster le volume de production. La qualité arrive troisième. Les firmes nord américaines et européennes quant à elles, classent ces deux flexibilités au sixième et huitième rang alors que la qualité vient en premier. Les auteurs concluent que les Japonais, après avoir surmonté avec succès les problèmes de qualité, portent maintenant leur attention sur la flexibilité. Les entreprises occidentales sont, pour leur part, encore concentrées sur les problèmes de qualité.

Dans le cadre de son modèle, Gerwin propose quatre stratégies génériques associées à la flexibilité nommées adaptation (stratégie défensive nécessitant la flexibilité), redéfinition (stratégie proactive nécessitant la flexibilité), accumulation (stratégie défensive/proactive nécessitant la flexibilité) et réduction (stratégie proactive réduisant le besoin de flexibilité). Le cadre conceptuel de son modèle repose sur ces stratégies. Ce dernier peut être vu comme un fondement du travail sur les aspects stratégiques de la flexibilité. Il aide à esquisser certaines conclusions, dont le fait que la flexibilité n'est pas uniquement une réponse adaptative à un environnement incertain, elle possède aussi une fonction proactive en créant des incertitudes que les compétiteurs peinent à traiter; et que les technologies avancées de production constituent une des nombreuses façons d'atteindre la flexibilité.

### **2.3 Concept d'agilité**

En 1999, Gunasekaran [50] a fait une revue détaillée des plus récentes publications parues sur l'agilité (de 1994 à 1997). L'intérêt de l'article de Gunasekaran réside dans le fait qu'il effectue le classement des publications selon l'approche des auteurs, axée sur les stratégies, les technologies, les systèmes ou les gens. Il met aussi en lumière le fait que, même si les multiples facettes de l'agilité ont été étudiées de façon théorique et que tous sont d'accord sur le fait qu'une entreprise agile est plus à même de tirer son épingle du jeu face au caractère dynamique et imprévisible du marché mondial, aucun auteur n'a encore proposé de méthode universelle et scientifiquement éprouvée permettant la mesure de l'agilité d'une entreprise. Ceci s'explique notamment par le caractère



multidimensionnel de l'agilité qui rend complexe et ardue la définition et la mesure des volets qui la composent. Aussi, l'étendue du type de secteurs industriels est loin de faciliter la tâche quant à la mise au point d'une méthode de mesure commune.

Ramasesh et al. [20] voient aussi l'agilité comme attribut multidimensionnel d'un système de fabrication. Différents sous-systèmes ou segments du système de fabrication peuvent posséder différents degrés d'agilité associés à différentes dimensions. Ces sous-systèmes et segments peuvent aussi interagir de façon variée selon la configuration du système et la dynamique des changements de son environnement d'opération.

La motivation de l'étude de Ramasesh et al. [20] provient de constatations faites par d'autres auteurs dans le cadre d'études antérieures : même si tous croient en l'agilité en tant que moyen de répondre aux changements dynamiques et imprévisibles du marché mondial, ce fait n'a pas encore été scientifiquement prouvé. Le défi actuel est donc de concevoir des modèles quantitatifs permettant d'évaluer l'agilité tout en proposant un cadre pour celle-ci. L'évaluation quantitative de l'agilité permettrait notamment la comparaison de différentes alternatives de configuration de systèmes de fabrication ainsi que la justification des investissements requis pour la mise en place de tels systèmes. Selon Zhang et Sharifi [18] la question est de savoir comment une entreprise manufacturière pourrait identifier les outils et techniques nécessaires et acquérir les capacités et habiletés requises pour devenir agile. Selon eux, il est essentiel que lors de son implantation dans une entreprise, l'agilité soit intégrée aux autres outils et méthodes de fabrication et de gestion.

Plusieurs autres chercheurs ont investigué le concept de d'agilité dans les systèmes de production [51-67] Les années 1999 à 2003 ont d'ailleurs été assez riches en écrits sur l'agilité alors qu'on retrouve sensiblement moins d'écrits à ce sujet après 2003.

### **2.3.1 Flexibilité vs agilité**

Ramasesh et al. [20] font la distinction entre flexibilité et agilité et positionnent la flexibilité comme sous-ensemble de l'agilité. Selon eux, l'agilité est un concept plus large et couvrant la totalité de l'entreprise plutôt que des segments du procédé de

fabrication, comme c'est le cas de la flexibilité. La flexibilité impliquerait généralement un système ayant la capacité de pourvoir à un éventail d'objectifs prédéfinis ou anticipés tels une large gamme de produits offerts, plusieurs façons de fabriquer un même produit, etc. Par opposition, l'agilité impliquerait un système facilement reconfigurable, dont la mise à l'échelle serait dynamique et que l'on pourrait défaire et reconstruire selon les besoins afin de l'adapter aux changements imprévus.

À l'instar de Ramaseh et al., Sharifi et Zhang [16] décrivent la flexibilité comme étant une aptitude inhérente à l'agilité. Selon eux, la flexibilité est la capacité de fabriquer différents produits et d'atteindre différents objectifs à l'aide des mêmes installations. La flexibilité s'appliquerait à plusieurs volets : quantités produites, modèle ou configuration d'un produit, organisation et questions organisationnelles, employés.

D'autres auteurs [41-44] offrent une définition plus large de la flexibilité, souvent similaire à celle de l'agilité, mais peut-être à un niveau un peu plus concret que cette dernière, sans toutefois mettre en lien les deux concepts.

### 2.3.2 Définitions et modes d'évaluation de l'agilité

L'agilité peut être simplement définie comme étant la capacité que possède une entreprise manufacturière à réagir rapidement et efficacement aux fluctuations non prévisibles du marché. Cependant, la définition varie sensiblement en fonction de l'aspect de l'agilité traité par les auteurs.

Le tableau 2.2 présente un résumé de la définition de certains auteurs ainsi que du modèle et/ou la méthode qu'ils proposent pour évaluer ou implanter l'agilité.

**Tableau 2.2 Définitions du concept d'agilité et modèle ou méthode d'évaluation proposées par différents auteurs**

Auteurs (titre de l'article/année)	Définition	Modèle/Méthode
H. Sharifi Z. Zhang (A methodology for achieving agility in	Comprend deux aspects principaux: 1. Répondre adéquatement et dans le temps requis à des changements anticipés ou non. 2. Exploiter les changements et en tirer	Trois volets : 1. Modèle conceptuel d'agilité découlant d'hypothèses de recherche, certaines formulées par les auteurs, d'autres tirées de



Auteurs (titre de l'article/année)	Définition	Modèle/Méthode
manufacturing organisations: An introduction / 1999) [16]	avantage.	la littérature (figure 2.2). 2. Méthodologie visant à fournir aux entreprises un outil réaliste facilitant la compréhension du concept d'agilité dans son intégralité, soit la détermination de l'agilité actuelle et requise, les aptitudes nécessaires pour devenir agile et les pratiques permettant d'acquérir ces aptitudes. 3. Outil visant à assister les entreprises dans l'implantation de la méthodologie proposée.
Z. Zhang H. Shanfi (A methodology for achieving agility in manufacturing organisations / 2000) [18]	Il s'agit de la définition d'une entreprise agile : Une entreprise agile est une organisation ayant une large vision du nouvel ordre mondial des affaires et possédant les capacités et habiletés lui permettant de combattre la turbulence et de tirer avantage des conditions changeantes.	
Sandra Meredith David Francis (Journey towards agility : the agile wheel explored / 2000) [19] Les auteurs font partie d'un groupe de recherche, le <i>Agile Manufacturing Research Group</i> : Centre for Research in Innovation Management (CENTRIM), University of Brighton, UK.	Six caractéristiques d'une entreprise agile : 1. Produire selon les commandes et non produire pour stocker ; 2. Rencontrer les besoins particuliers du consommateur contrairement à la production de masse qui vise un produit bon et médian ; 3. Ajuster la vitesse et la flexibilité de son fonctionnement à la vitesse et la flexibilité de la technologie employée ; 4. Mobiliser et exploiter intelligemment toute forme de savoir pour supporter une stratégie agile ; 5. Adopter de nouvelles façons de faire lorsque cela favorise l'agilité ; 6. Créer un projet virtuel et des organisations temporaires pour augmenter les compétences de la façon et à l'endroit où s'est requis. L'agilité est composée de deux volets interdépendants qui doivent être alignés l'un sur l'autre : stratégique (examen attentif de l'environnement, évaluation des impacts, etc.) et opérationnel (production, maintenance, innovation).	Modèle à 16 dimensions nommé <i>Agile Wheel Reference Model</i> (AWRM) proposé comme outil pour auditer le degré d'agilité des 10 compagnies à l'étude, tout en offrant une définition intégrée des composantes de l'agilité via la nomenclature des 16 dimensions (voir figure 2.4). L'utilité de l'AWRM est d'aider les gestionnaires d'entreprise à auditer leur entreprise, identifier les problèmes relatifs à l'agilité et de concevoir un plan de développement associé.
Ranga Ramasesh Shailesh Kulkarni Maliyakal Jayakumar (Agility in manufacturing systems : an exploratory modeling framework and	Capacité d'un système de fabrication à fournir une réponse efficace à des changements imprévus. Les termes <i>capacité</i> , <i>système de fabrication</i> , <i>efficace</i> et <i>changements imprévus</i> sont par la suite définis avec précision.	Modèle préliminaire de cadre visant à cerner les caractéristiques relatives à l'agilité des différents constituants d'un système de fabrication décrivant en termes quantitatifs la réponse du système à une variété de changements potentiels, imprévus ou dus au hasard (voir figure 2.5). Méthodologie visant à simuler la réponse d'un système de fabrication à

Auteurs (titre de l'article/année)	Définition	Modèle/Méthode
simulation / 2001) [20]		un environnement de changements imprévus et l'exprimer en termes financiers (intégrée dans le modèle précédent).

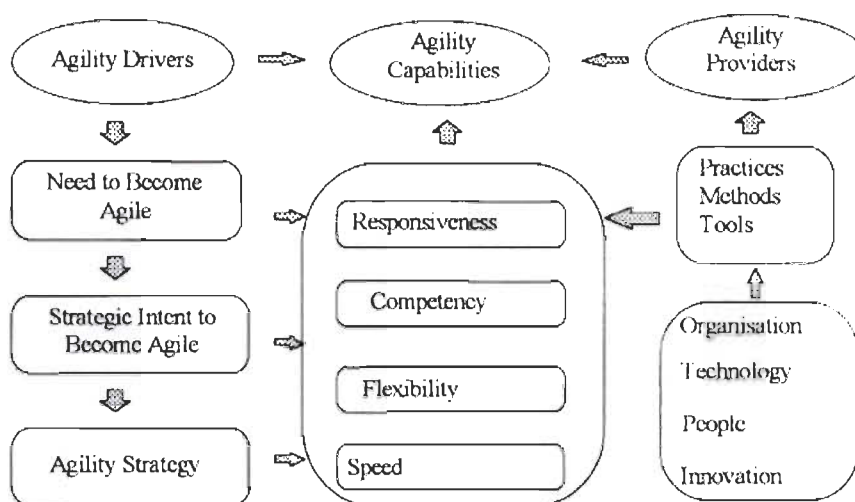
### 2.3.3 Méthodologie de Sharifi et Zhang pour implanter l'agilité dans les organisations manufacturières

Dans le cadre de leur recherche, Sharifi et Zhang [16] émettent des hypothèses particulièrement intéressantes :

- ✍ L'agilité est une habilité et une caractéristique que toute entreprise de fabrication devrait posséder pour survivre et réussir dans le nouvel ordre mondial des affaires.
- ✍ Différentes organisations peuvent répondre différemment aux changements de leur environnement d'opération et nécessitent donc des niveaux d'agilité différents.
- ✍ L'agilité constitue une réponse aux changements vécus par une compagnie et devrait devenir une caractéristique de la compagnie. Par conséquent, la façon dont la compagnie devrait agir lorsque soumise à un environnement turbulent est directement fonction des changements dans l'environnement d'affaires, de l'environnement d'affaires lui-même ainsi que de la situation de la compagnie.
- ✍ Conceptuellement l'agilité est une réponse stratégique au nouvel ordre mondial des affaires. En pratique, il s'agit d'une utilisation stratégique des méthodes de gestions des affaires, de procédés, pratiques et outils de fabrication et de gestion, qui sont pour la plupart déjà utilisés à diverses fins en industrie alors que d'autres sont en développement pour faciliter l'acquisition des capacités requises pour être agile.
- ✍ Les systèmes et technologies d'information lorsqu'ils sont utilisés de façon optimale, qu'ils couvrent toute l'organisation, que leur potentiel de communication est correctement exploité, que leur capacité à faire l'acquisition et l'échange de données est utilisée judicieusement, etc., constituent une différence majeure entre une compagnie agile et une compagnie traditionnelle qui ne l'est pas.

En se basant sur ces hypothèses, les auteurs ont développé un modèle conceptuel inspiré de la littérature représenté à la figure 2.2.

Le modèle est constitué de trois sections principales : les moteurs de l'agilité, les aptitudes inhérentes à l'agilité et les pourvoyeurs d'agilité. Les moteurs de l'agilité sont les changements dans l'environnement d'affaires de la compagnie qui entraînent cette dernière vers une nouvelle gestion plus compétitive. Les aptitudes inhérentes à l'agilité dictent les principales habilités qui prodiguent à la compagnie la force requise pour répondre aux changements. Finalement, c'est par l'entremise des pourvoyeurs d'agilité que les aptitudes inhérentes à celle-ci sont rendues possibles. Les auteurs insistent sur le fait que les quatre catégories de pourvoyeurs ainsi que l'indéfectible support des systèmes et technologies d'information doivent tous être présents et intégrés. Les auteurs tirent une méthodologie de ce modèle conceptuel.



**Figure 2.2** Modèle conceptuel d'agilité de Sharifi et Zhang [16]

Toujours selon Sharifi et Zhang [16], l'environnement d'affaires constitue la source de la turbulence qui exerce une pression sur la compagnie. Cette pression (moteur de l'agilité) force la compagnie à adopter des mesures qui lui assureront la stabilité et la compétitivité. L'environnement d'affaires (marché garanti ou non, consommateurs exerçant plus ou moins de pression, etc.) dans lequel évolue la compagnie influe grandement sur le niveau d'agilité requis par celle-ci. Les auteurs ont donc développé

deux méthodes parallèlement à la méthodologie principale : la première visant à déterminer le niveau d'agilité requis par la compagnie et la seconde visant à déterminer son niveau actuel. La comparaison entre ces deux états (agilité requise et actuelle) amène la compagnie à diagnostiquer si il est requis d'être plus agile.

L'étape suivante dans la méthodologie est celle de l'action visant à devenir agile. Cette étape est constituée de sous-étapes qui peuvent s'avérer ou non requises selon la position de la compagnie, son niveau actuel d'agilité et le type de moteurs d'agilité impliqués. L'étape de l'action intègre deux aspects : les aptitudes inhérentes à l'agilité et les pratiques associées à l'agilité qui, toutes deux en interaction avec les moteurs de l'agilité forment une approche pratique permettant à la compagnie d'obtenir le bon niveau d'agilité. [16]

Donc, après avoir déterminé son niveau d'agilité actuel et requis, la compagnie devrait prendre les actions suivantes, qui la rendront agile [16] :

1. Détecter, analyser et reconnaître les changements ;
2. Déterminer les aptitudes requises pour maîtriser les changements ;
3. Définir les stratégies requises, si nécessaire ;
4. Déterminer les pratiques ou initiatives pouvant aider à atteindre les aptitudes requises et les intégrer au plan d'action de la compagnie ;
5. Mesurer et évaluer la performance de son agilité ;
6. Effectuer les corrections en fonction de la mesure de performance précédente.

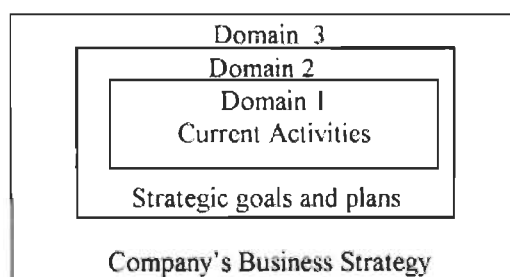
Pour ce faire, les auteurs [16] proposent un outil (ou table) visant à assister les entreprises dans l'application de leur méthodologie. L'outil comprend les aspects suivants :

1. Une classification des divers changements à même de survenir dans l'environnement d'affaires de la compagnie. Les auteurs ont donc catégorisé les changements en trois domaines selon le type ou le degré de réponse, lesquels demandent par le fait même différentes aptitudes, et les ont représentés sous la forme de la figure 2.3. Ceci permet, selon eux, de diriger tout changement survenant dans l'environnement de la

compagnie à un certain niveau de considération permettant de fournir une réponse appropriée.

2. Une classification des aptitudes inhérentes à l'agilité, laquelle s'avère particulièrement intéressante en ce qui a trait à la définition de l'agilité :

- ✍ La capacité de répondre adéquatement : habilité à identifier les changements, à y répondre rapidement, de façon réactive ou proactive, et à récupérer.
- ✍ La compétence : ensemble important d'habilités qui fournissent la productivité, l'efficience et l'efficacité dans l'atteinte des but et des objectifs de la compagnie (vision stratégique, technologies et habilités technologiques appropriées, qualité de produits et services, contrôle des coûts, haut taux d'introduction de nouveaux produits, gestion du changement, employés connaissants, compétents et habilités à agir, efficacité des opérations, production à valeur ajoutée, coopération interne et externe, intégration).
- ✍ La flexibilité : habilité à fabriquer différents produits et à atteindre différents objectifs avec les mêmes équipements (flexibilité dans les quantités produites, dans le modèle ou la configuration du produit, organisationnelle et de l'organisation, des employés).
- ✍ La rapidité : habilité à accomplir des tâches et des opérations dans le temps le plus court possible (rapidité d'introduction des nouveaux produits sur le marché, rapidité et opportunité dans la livraison des produits et des services, vitesse d'opération).



**Figure 2.3** Catégorisation des effets des changements en trois domaines, Sharifi et Zhang [16]

Une fois complétée, cette table constituerait un guide à utiliser en association avec une autre table – laquelle devrait permettre de choisir les pratiques appropriées et ainsi les inclure dans les plans et politiques de la compagnie – pour faciliter la détermination des actions requises par l'entreprise pour atteindre l'agilité requise pour surmonter les changements auxquels elle est soumise. Cette deuxième table semble faire l'objet de travaux à venir de la part des auteurs.

### 2.3.4 L'« Agile Wheel Reference Model » de Meredith et Francis

Meredith et Francis [19] proposent un modèle d'évaluation/définition de l'agilité nommé « Agile Wheel Reference Model » (AWRM) illustré à la figure 2.4. Il s'agit d'un modèle à seize dimensions à être utilisé comme outil pour évaluer le degré d'agilité d'une compagnie. Les auteurs ont choisi la roue comme symbole afin d'insister sur l'interdépendance et l'importance du développement relativement uniforme de chacune des seize dimensions de l'agilité. L'AWRW, de par sa conception, constitue aussi un outil de définition des composantes de l'agilité.

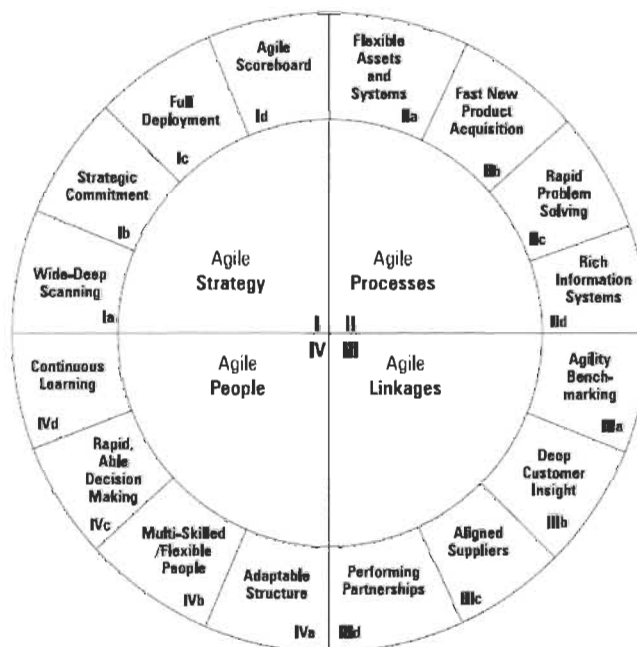


Figure 2.4 Agile Wheel Reference Model, Meredith et Francis [19]

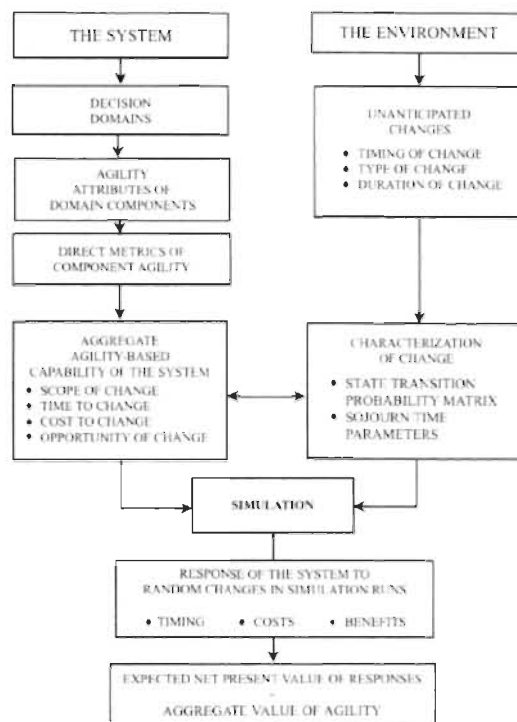
Les seize dimensions divisées en quatre quadrants. Les quadrants sont numérotés de I à IV et sont respectivement associés aux stratégies, procédures, gens et relations. Le contenu de chacune des seize dimensions est détaillé dans l'article.

### **2.3.5 Modèle de cadre exploratoire et simulation de Ramasesh et al.**

Ramasesh et al. [20] ont développé un cadre exploratoire et une simulation permettant l'analyse quantitative de l'agilité et son évaluation en termes financiers. La figure 2.5 illustre ce cadre conceptuel. Selon les auteurs, la valeur de l'agilité d'un système de fabrication réside dans l'impact financier sur l'environnement d'opération du système suite à sa réponse aux changements. Leur but est donc de rechercher des informations quantitatives sur l'agilité du système afin de les lier ultimement à la performance financière. D'un point de vue général, pour un changement donné de l'environnement d'opération, la capacité agile du système est déterminée par la réponse à quatre questions. Ces questions définissent les quatre mesures globales de l'agilité (se référer à la case « Aggregate agility based capability of the system » de la figure 2.5) :

1. À « combien » du changement donné est-ce que le système est en mesure de répondre ? (mesure du « scope-of-change ») ; la réponse attendue est une fraction entre 0 et 1.
2. Après combien de temps suite au début du changement donné le système est-il en mesure de répondre ? (mesure du « time-to-change ») ; la réponse attendue fait partie d'un ensemble de trois estimés de temps : le plus plausible, le pessimiste et l'optimiste.
3. Combien va coûter la réponse au changement donné ? (mesure du « cost-to-change ») ; la réponse attendue se situe dans une gamme d'estimés compris entre le meilleur et le pire scénario.
4. Quel est le profit potentiel associé à une réponse adéquate au changement donné ? (mesure du opportunity-of-change ») ; la réponse attendue se situe dans une gamme d'estimés compris entre le scénario potentiel le plus généreux et le plus conservateur.





**Figure 2.5 Cadre conceptuel exploratoire pour l'analyse quantitative de l'agilité, Ramasesh et al. [20]**

En général, une réponse quantitative suffisamment représentative à ces questions n'est pas encore disponible. Il faudrait donc dériver ces quatre mesures globales de mesures directes d'agilité liées aux produits, systèmes et gens. Des exemples de ces mesures directes seraient l'adaptabilité de la conception des produits, la reconfigurabilité du système de fabrication, la flexibilité des employés, etc. Mais ces mesures directes d'agilité ne sont pas disponibles non plus. Il faut donc se rabattre sur les mesures de performance utilisées actuellement. Cependant, étant donné le jeune âge du concept d'agilité, les formules théoriques et empiriques pour relier l'ensemble des mesures de performance aux mesures directes d'agilité ne sont pas encore connues. Ramasesh et al. ont donc mis sur pied un cadre permettant d'effectuer une collecte de données visant à l'analyse de l'agilité. Les auteurs se sont basés sur les travaux de Yusuf et al. [68] lesquels ont développé de façon détaillée les lignes directrices, concepts et attributs de l'agilité pour concevoir le cadre de collecte de données. Il y a dans le tableau de Ramasesh et al. trois domaines de décision relatifs à l'agilité, soit le marché associé aux produits ou extrants, le système de transformation et le marché associé aux intrants ou



autres éléments. Plusieurs attributs sont associés à chacun de ces domaines. Plusieurs chemins peuvent mener à chacun des attributs et c'est pourquoi les auteurs y ont associé une série de mesures directes ainsi qu'une échelle de mesure. Selon eux, ces mesures facilitent une analyse systématique et détaillée des chemins qui mènent à l'agilité ainsi que leur évaluation quantitative, quoiqu'ils soient bien conscients que le contenu du tableau est représentatif mais non exhaustif.

Le modèle de simulation utilisé fait appel à une notation par vecteurs et matrices, ce qui représente bien l'aspect multidimensionnel du problème avec tous les facteurs internes et externes associés. Les auteurs utilisent notamment les concepts des Chaînes de Markov et du procédé Poisson (absence de mémoire et distribution exponentielle). Il est supposé au départ que le système est dans un certain état d'opération jusqu'à ce qu'un changement aléatoire survienne à un temps aléatoire. Le système répond au changement en un certain temps en encourageant un certain coût déterminé par l'agilité du système. Le coût peut être une image aléatoire de la distribution de la mesure du « cost-to-change ». De la même façon, le temps de réponse est une image aléatoire tirée de la distribution de la mesure du « time-to-change ». L'entrée de revenu, lequel revenu constitue la mesure ultime de l'agilité, débute après le délai associé au temps de réponse et se termine avec l'arrivée d'un autre changement aléatoire. La simulation continue ainsi pendant un temps suffisant pour permettre la validité statistique de la chose. Des « cash-flow » sont extraits de la simulation aux endroits appropriés et déduits pour évaluer la valeur nette présente (NPV) de l'épisode. Enfin, la simulation complète est reproduite un nombre approprié de fois permettant d'établir la distribution des NPV de laquelle est tiré le NPV attendu. L'article décrit en détail le fondement et l'application du modèle de simulation, exemple à l'appui. Les résultats de la simulation démontrent notamment que le potentiel de retour associé à un investissement visant à rendre un système de production agile est d'autant plus élevé que l'environnement est volatile avec des mouvements rapides et de grande amplitude.

## **2.4 L'« intelligence »**

Le concept d'intelligence a une riche histoire de plus de 2000 ans. L'intelligence en tant que stratégie de marketing (« Business Intelligence » ou BI) date des années 1960 où elle était proposée comme un effort pour améliorer la compétitivité et la planification stratégique d'une entreprise. Depuis ce temps, le concept a grandi et est devenu une construction mentale émergente du monde des affaires créant ses propres titres d'emplois pour des gens directement en charge de la collecte, de l'analyse et de la propagation de l'intelligence. [69]

Selon Hedgebeth [70], les systèmes de support à la décision «Decision Support Systems» (DSS) sont à l'origine du BI. Les DSS sont définis comme des systèmes ou sous-systèmes interactifs composés d'ordinateurs visant à aider les décideurs à utiliser les technologies de communication, données, documents, savoir et/ou modèles afin d'identifier et résoudre les problèmes et de faciliter le processus de prise de décision. Ce serait d'ailleurs le besoin de prendre des décisions complexes combiné à l'émergence de systèmes d'information puissants qui auraient donné naissance au BI.

Une entreprise est opérée dans le but de générer des profits de la vente de biens ou services. Le BI permet de tirer la compréhension, l'entendement et les profits de l'expérience acquise en affaires. Les données et informations dont dispose l'entreprise est le terreau qui permet la croissance du BI, lequel favorise la capacité à raisonner, planifier, résoudre les problèmes, penser de façon abstraite, comprendre les idées et le langage pour ultimement apprendre de ces données et informations. Le BI est alimenté par l'utilisation d'informations alignées sur la performance entrepreneuriale. Le BI est construit de l'identification et de la modélisation d'informations convergentes liées aux affaires. [71]

### **2.4.1 Ses nombreux synonymes**

La théorie de l'«intelligence process» a été proposée par de nombreux auteurs sous différents noms dont notamment [69] : CI « Competitive Intelligence », BI « Business Intelligence », SI « Strategic Intelligence », CA « Competitor Analysis », CTI

« Competitive Technical Intelligence », MI « Market Intelligence », « Environmental scanning », « Peripheral vision », « Competitive analytics concept ». La plupart de ces travaux positionne l'intelligence (CI, BI, SI, etc.) comme étant le prérequis nécessaire à la planification stratégique. De ces synonymes, c'est le MI qui a reçu le plus d'attention académique, étant une extension logique à la recherche sur les marchés. [69]

#### **2.4.2 Définitions**

La définition de l'« intelligence » est actuellement à la source d'un débat considérable entre les praticiens et les universitaires [72]. Les définitions en sont nombreuses. Les paragraphes qui suivent en donnent quelques unes.

Le CI est un procédé impliquant la récolte, l'analyse et la communication d'informations sur l'environnement d'affaires d'une entreprise dans le but d'assister la prise de décision stratégique et est donc le fondement de base de cette dernière. L'intelligence aide une compagnie à soutenir et à développer des avantages compétitifs distincts en utilisant son organisation et ses réseaux dans leur globalité, ce qui lui assure des leviers concrets sur son environnement (clients, compétiteurs, employés, technologie, ...). Elle utilise un processus éthique et systématique impliquant la planification, la collecte, l'analyse, la communication et la gestion. [69]

Le CI est l'art et la science de préparer les compagnies au futur par le biais d'un procédé systématique de connaissance administrative. Il crée la connaissance à partir d'informations disponibles et via l'utilisation d'un procédé systématique impliquant la planification, la collecte, l'analyse, la communication et la gestion, desquels résulte une action des décideurs de l'entreprise. [72]

Le MI est vu dans sa totalité comme étant une structure interrompue et interactive constitué de gens, d'équipements et de procédures visant à rassembler, trier, analyser et distribuer en temps opportun des informations pertinentes et précises à être utilisées par les administrateurs pour améliorer la planification, l'implantation et le contrôle de la gestion. [69]

Le BI est une application du IT (« Information Technology ») qui aide les entreprises dans leur prise de décision en utilisant la technologie pour produire des rapports et permettre l'accès aux données et pour des fins d'applications analytiques [70].

Le BI réfère à une philosophie de gestion et à un outil utilisé pour aider les entreprises à manier et affiner les «business informations» dans le but de rendre plus efficaces les décisions d'affaires. Le terme BI peut donc est utilisé en référence à [73] :

- ✍ De l'information ou des connaissances pertinentes décrivant l'environnement d'affaires, l'organisation elle-même et sa situation relativement à son marché, ses clients, compétiteurs et questions économiques;
- ✍ Un procédé systématique et organisé par lequel se fait l'acquisition, l'analyse et la propagation de l'information provenant de sources internes ou externes pertinentes à l'environnement d'affaires et à la prise de décision.

### **2.4.3 Fonctions**

Le MI est souvent vu comme un moteur de stratégie et de succès dans l'environnement d'affaires. Il permet de garder une longueur d'avance sur la compétition en rassemblant l'information pouvant être convertie en intelligence recevable puis appliquée à la planification stratégique à court et à long terme. Le MI permet aussi l'extraction de données internes et externes, ainsi que leur analyse et remodelage statistique dans le but ultime d'améliorer la réponse associée au marché. [72]

Le but du CI est de mieux comprendre les consommateurs, les régulateurs et les compétiteurs, de créer ainsi de nouvelles opportunités d'affaires et de prévoir les changements dans la quête d'un avantage compétitif durable [72].

Dans l'actuelle économie compétitive et basée sur la connaissance, les organisations requièrent l'assistance des outils de BI pour collecter, analyser et partager l'information de façon à ce que les travailleurs concernés soient en mesure de prendre des décisions éclairées. Les applications du BI facilitent notamment la prise de décision, supportent l'exploitation et l'entreposage des données et l'analyse financière. Typiquement, une application de BI récupère et manipule l'information emmagasinée dans les bases de

données pour aider les gestionnaires/travailleurs concernés à formuler les décisions en analysant les données disponibles. Il est alors crucial que ces données soient précises afin que les inférences statistiques soient correctes et indiquent bien les tendances et autres liens importants. [70]

#### **2.4.4 Quelques faits**

L'intelligence est fortement liée au traitement de l'information (défini comme l'adaptation d'une entreprise aux conditions existantes du marché) et une augmentation de l'incertitude de l'environnement d'affaires implique une diminution du traitement de l'information. Il appert que la pratique du CI, quoique bien présente en ce qui a trait à la collecte d'informations, est pauvre du côté du procédé et de l'analyse. [69]

Par le biais de certaines recherches, il appert aussi que l'on désire que le concept d'intelligence ne soit plus associé à la simple collecte d'informations mais soit plutôt vu comme un procédé holistique. Il y a un désir d'élargir l'intelligence au-delà des compétiteurs et d'encourager les compagnies à embrasser un environnement d'affaires plus large à cet effet. Il existe actuellement un certain niveau d'ambiguïté dans la littérature relativement au rôle actuel et à la reconnaissance (establishment) du procédé MI. Quoique de nombreux auteurs croient que le MI supporte directement la gestion, un nombre croissant reconnaît qu'il a une importance plus grande au niveau corporatif. [72]

Au cours des dernières années, le IT a offert à l'entreprise une opportunité phénoménale de capter, emmagasiner, récupérer et distribuer l'information. Les entreprises manipulent maintenant quantité de données de cette façon. Malheureusement, l'accès et la récupération de ces données sous une forme telle qu'elles aient un potentiel d'action directe qui aide les détenteurs de capitaux à prendre des décisions « intelligentes » de manière à livrer leurs produits et services plus rapidement, mieux et à moindre coût ne sont pas bien définis. Les applications et systèmes liés au KM (« Knowledge Management ») doivent être structurés afin de pouvoir permettre l'atteinte de l'intelligence des affaires. L'ironie réside dans le fait que le savoir constitue l'intelligence manipulée par l'homme ; donc si l'« intelligence » n'est pas construite, le

savoir proactif ne peut exister. Ce qui confine le monde des affaires à un savoir réactif et à des décisions du domaine de la conjecture. [71]

« Il n'y a rien de plus difficile à prendre en main, de plus périlleux à mener à bien et de plus incertain quant à son succès que d'être à la tête de l'introduction d'un nouvel ordre des choses (Macchiavelli, 1469-1527). » [71]

#### 2.4.5 Étapes de la création d'un modèle de CI

Afin de mieux comprendre la teneur de ces concepts, la description d'un modèle ou des étapes de la mise en place d'un processus de CI sont énumérées ci-après [69] :

1. **Planification et mise au point.** Hypothèse : *Il existe une phase du procédé d'intelligence qui crée le procédé d'intelligence.* A) Des procédés efficaces d'intelligence ne visent pas à collecter toute l'information possible ou rechercher tout ce qui est lié à un sujet, mais recherchent plutôt ce qui est d'importance élevée pour l'administration supérieure. B) Cette étape vise à déterminer les ressources requises et établir le but et les résultats des recherches. C) Une évaluation des informations requises pour étayer l'incertitude en cause est effectuée.
2. **Collecte.** Hypothèse : *Il existe une phase du procédé d'intelligence qui consiste en la cueillette d'informations.* A) La collecte provient d'une variété de sources et de méthodes d'acquisition différentes. B) La source de l'information et son usage sont rattachés à la phase de collecte. C) Il semblerait qu'environ 25% du temps consacré au procédé d'intelligence soit associé à la collecte. D) Par exemple, les sources d'informations peuvent être associées aux concurrents ou aux technologies émergentes et rapportées par les employés. Elles peuvent aussi être externes, secondaires ou internes (experts, ingénieurs ou scientifiques).
3. **Analyse.** Hypothèse : *Il existe une phase du procédé d'intelligence qui consiste en l'analyse des informations.* C'est l'étape où la « vraie » intelligence est créée, où l'information recueillie converge vers une intelligence recevable sur laquelle peuvent se baser les décisions des niveaux stratégiques et tactiques.



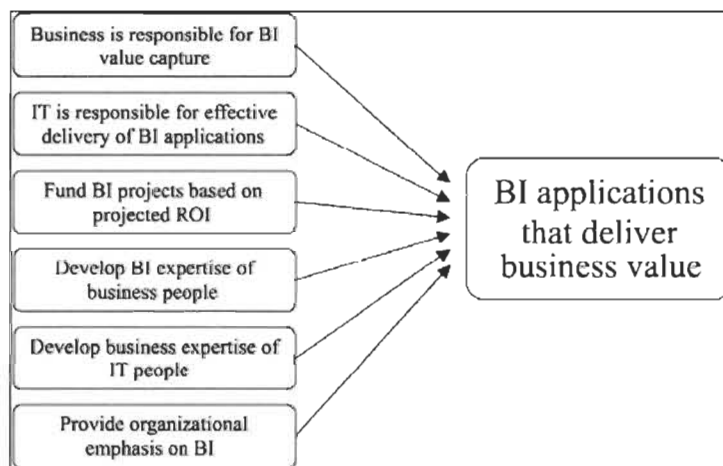
4. **Communication.** Hypothèse : *Il existe une phase du procédé d'intelligence où sont effectuées la communication et la propagation des données analysées.* Il est d'une grande importance que les résultats du procédé d'intelligence soient communiqués aux personnes ayant l'autorité et la responsabilité adéquates pour agir sur les résultats des recherches.
5. **Procédé/structure.** Hypothèse : *Les entreprises utilisant le procédé d'intelligence possèdent une structure (formelle ou non) qui y est associée.* A) L'intelligence requiert des politiques, des procédures et une structure afin que les employés puissent contribuer efficacement au système d'intelligence et en tirer les bénéfices associés. B) Tous les auteurs s'entendent pour dire qu'il est essentiel de bénéficier d'un procédé qui permet de transformer les données/informations recueillies en intelligence.
6. **Conscience/culture organisationnelle.** Hypothèse : Les entreprises utilisant le procédé d'intelligence possèdent une conscience et une culture organisationnelle liées à la compétitivité. Pour être en mesure d'utiliser avec succès les efforts liés à l'intelligence, une entreprise doit posséder une conscience organisationnelle appropriée de l'intelligence et une culture de compétitivité.

#### 2.4.6 Intégration du BI en entreprise

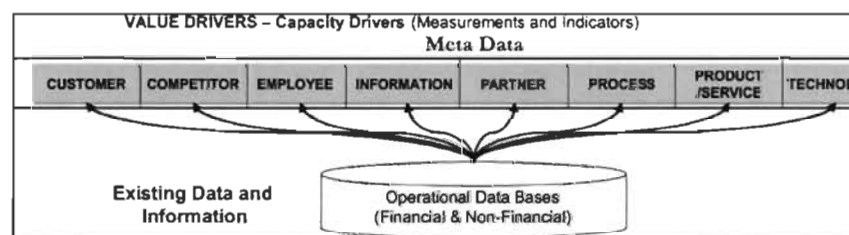
Dans une optique d'intégration réussie du BI, la figure 2.6 montre six éléments essentiels à un partenariat efficace entre l'environnement d'affaires et les informations disponibles et/ou à récolter [70]. Ces éléments s'apparentent pour certains aux étapes de la section précédente.

La figure 2.7 fait état des huit moteurs qui forment le contexte d'une entreprise (client, compétiteur, employé, information, partenaire, procédé, produit/service, technologie). En effet, le BI n'est pas une entité unique, il est décomposé en « business informations ». La pollinisation croisée de ces huit moteurs identifie trois composantes majeures du BI dans une entreprise soient [71] :

- ❏ *L'intelligence dans les relations* : comprendre comment les interactions entre les travailleurs concernés influencent la performance organisationnelle ;
- ❏ *L'intelligence dans la compétence* : comprendre comment les aptitudes/compétences des travailleurs concernés influencent la performance organisationnelle ;
- ❏ *L'intelligence dans le structure* : Comprendre comment l'infrastructure d'une entreprise en influence la performance organisationnelle.



**Figure 2.6 Partenariat affaires/informations efficace pour une intégration réussie du BI, Hedgebeth [70]**



**Figure 2.7 Les huit moteurs qui forment le contexte d'une entreprise, Green [71]**

Enfin, la figure 2.8 présente une liste qui indique, pour chacun des huit moteurs, le type d'information qui pourrait être colligé et les questions à poser pour y parvenir.



Value driver	Information	Potential questions
Customer	Acquisition	What is the ratio of new customers?
	Satisfaction	Who are the satisfied customers?
	Longevity	Who are the loyal customers?
Competitor	Profitability	Who are the profitable customers?
	New markets	Who are the competitors?
	Market share	What are new potential markets?
		What is the company marketshare?
Employee	Image	What is the company image?
	Reputation	What is the company reputation?
	Branding	What is the company branding?
	Hiring	What is the ratio of new employees?
	Satisfaction	Who are the satisfied employees?
	Productivity	Who are the productive employees?
	Competencies	Who are the competent employees?
	Experience	Who are the experienced employees?
	Education	Who are the educated employees?
	Longevity	Who are the loyal employees?
	Turnover	Which employees are leaving?
	Training	Who are the trained employees?
	Position	What positions do employees occupy?
	Assignments	What are employee's assignments?
	Reporting relationship	Who do employees report to?
Information	Profitability	Who are the profitable employees?
	Internal availability	What is the availability of internal information?
	External availability	What is the availability of external information?
	Market studies	What is the availability of market studies?
	Benchmarks	What is the availability of benchmarks?
Partner	Trend studies	What is the availability of trend studies?
	Satisfaction	Who are the satisfied partners?
	Productivity	Who are the productive partners?
	Competencies	Who are the competent partners?
	Experience	Who are the experienced partners?
	Education	Who are the educated partners?
	Partner longevity	Who are the loyal partners?
	Partner turnover	Which partners are leaving?
	Training	Who are the trained partners?
	Position	What positions do partners occupy?
	Assignments	What are partners' assignments?
	Reporting relationship	Who do partners report to?
	Merger	Which partners is a result of a merger?
	Acquisition	Which partners is a result of an acquisition?
	Process	Internal processes
External processes		What are the effective and efficient external processes?
Business activities		What are the effective and efficient business activities?
Business procedures		What are the effective and efficient business procedures?
Work methods		What are the effective and efficient work methods?
Work techniques		What are the effective and efficient work techniques?

(continued)

**Figure 2.8 Informations pouvant être obtenues de chacun des huit moteurs, Green [71]**

### Chapitre 3 - Méthodologie

La revue de littérature permet de constater que l'objectif visé par les mesures de performance traditionnelles nécessite d'être révisé pour tenir compte de l'environnement compétitif actuel. Ceci a mené à l'émergence des concepts de flexibilité et d'agilité comme mesures de performance plus dynamiques, mais pour lesquelles il n'existe pas de modèles quantitatifs permettant leur évaluation systématique. Pour sa part, l'« intelligence » serait née du besoin de prendre de décisions complexes combiné à l'émergence de systèmes d'information puissants. Elle mènerait à des recommandations applicables en pratique provenant d'un processus de planification, cueillette, analyse et communication d'informations visant à aider la prise de décision stratégique. Quoique riche au niveau de la collecte de données, l'« intelligence » gagnerait à descendre des niveaux stratégiques pour couvrir les niveaux opérationnels. Le contrôle avancé est largement utilisé en contrôle de procédé au niveau opérationnel, mais aucun auteur ne l'a encore proposé en appui aux décisions des niveaux tactique et stratégique.

La flexibilité, l'agilité et l'évolution demandent donc à être définies dans le cadre du présent projet. Cependant, il est impératif que le procédé soit correctement sous contrôle avant que la stratégie FAÉ ne soit implantée. Par extension, l'atteinte de la flexibilité et de l'agilité en association à un procédé industriel implique que l'utilisateur ait acquis une meilleure connaissance du procédé, favorisant ainsi sa manipulation pour rencontrer l'objectif de rentabilité qui contribuera à en assurer la survie.

Dans le cadre de la stratégie FAÉ, la flexibilité et l'agilité agissent sur le procédé actuel et en permettent l'optimisation et l'intégration par le biais du MMPC. L'évolution constitue une étape ultérieure impliquant la modification éventuelle de la production, du procédé ou du produit (PPP) lorsqu'un manque de flexibilité et/ou d'agilité a été identifié et que la rentabilité de l'entreprise n'est donc plus assurée. Les concepts de flexibilité, agilité et évolution comme moteurs de rentabilité et de survie dans l'environnement actuel turbulent sont schématisés à la figure 1.1 (reproduite ici).

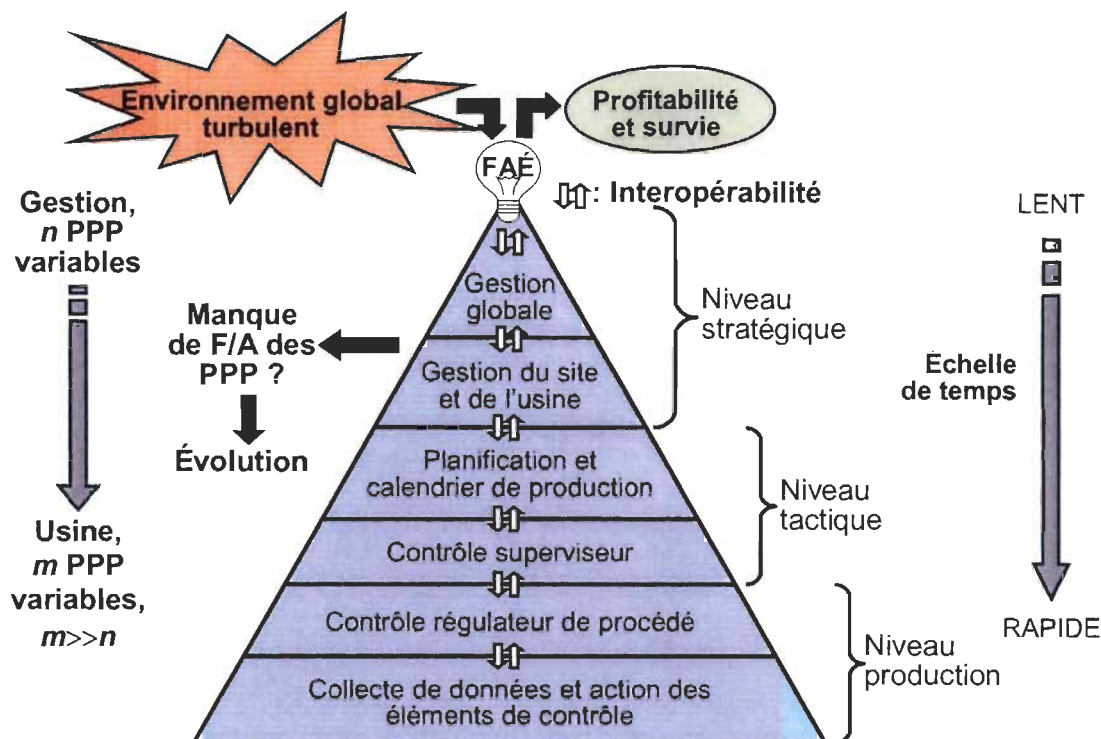


Figure 1.1 Stratégie FAÉ appliquée à un système de production générique

Le système de production d'une entreprise générique est représenté sous une forme pyramidale composée de six niveaux. Comme l'illustre la figure 1.1, la perturbation globale issue de l'environnement d'affaires de l'entreprise pénètre cette dernière à son niveau de production supérieur et affecte ensuite successivement les niveaux inférieurs.

Dans l'optique où l'objectif de l'entreprise face à cette perturbation de haut niveau est de demeurer (et idéalement d'être plus) compétitive, le rôle de la stratégie FAÉ est d'agir comme un filtre relativement à la perturbation et à l'objectif globaux. Pour ce faire, les états requis pour chacun des niveaux (qui sont en fait les points de consignes appropriés), sont cascades du haut vers le bas de la pyramide (flèches vers le bas de la figure 1.1) jusqu'à atteindre le niveau de collecte de données et action des éléments de contrôle par le biais des MMPC. L'action prise au bas de la pyramide en réponse à la modification du point de consigne du niveau du contrôle régulateur de procédé (fonction typique d'un DCS) affecte l'état du procédé à ce niveau. Ceci a un impact successif sur les niveaux supérieurs – chacun étant dépendant des niveaux inférieurs, qui de façon inhérente le définissent – jusqu'à l'atteinte éventuelle de l'objectif global (flèches vers le

haut). C'est cette cascade des points de consignes du niveau supérieur aux niveaux inférieurs puis l'impact successif sur les niveaux supérieurs de l'action prise au niveau inférieur qui rend possible l'interopérabilité entre tous les niveaux de production de l'usine. C'est aussi cette cascade des points de consignes qui permet à l'« intelligence » de descendre aux niveaux opérationnels.

À la figure 1.1, il apparaît que l'échelle de temps varie à chacun des niveaux de production. En effet, puisque les implications des décisions et des actions/réactions du DCS et des gestionnaires de niveau supérieur sont de nature différente, et que cette différence possède dans sa globalité un volet temporel, l'échelle de temps est par conséquent différente.

Les définitions quantitatives proposées dans le cadre de la stratégie FAÉ permettent à celle-ci d'identifier, le cas échéant, les variables de produit, de procédé ou de production (PPP) qui limitent l'atteinte de l'objectif global. Ces limitations peuvent être de deux types : soit relatives aux limites physiques d'une variable PPP (alors appelé manque de flexibilité ou saturation liée à la valeur – VS) ou encore associées à la dynamique de la réponse d'une variable PPP à un changement de point de consigne (manque d'agilité ou saturation liée au temps – TS).

Finalement, s'il y a tant de limitations que l'atteinte de l'objectif global est compromise, la stratégie FAÉ propose un scénario d'évolution basé sur l'analyse des VS et TS selon leur nature (P, P ou P). Cette proposition pourrait notamment impliquer des modifications de la configuration du plancher de production dans le but « d'avalier » la perturbation.

La méthodologie proposée dans le cadre de la stratégie FAÉ est donc complètement originale et novatrice puisque jusqu'à maintenant, aucune définition quantifiable des concepts de flexibilité et d'agilité n'avait été proposée. De plus, l'intelligence était circonscrite aux niveaux de production supérieurs alors que le contrôle avancé l'était aux niveaux opérationnels. Finalement, l'association de l'évolution à la flexibilité et à l'agilité est un concept relativement nouveau.

Les prochaines sections présentent l'information nécessaire à la compréhension du mode d'implantation de chacun des concepts qui forme la stratégie FAÉ.

### **3.1 Les variables PPP**

Essentiellement, la distinction entre les variables de produit, de procédé et de production a été faite pour faciliter le diagnostic et l'analyse de leurs limitations. En effet, tel qu'abordé plus loin dans la section sur l'évolution, leur regroupement basé sur leur nature (P, P ou P), la nature de leur limitation (VS, TS ou les deux), le niveau de production auquel elles sont associées ou un quelconque autre groupement logique facilite le processus d'analyse de l'évolution requise.

Les variables « produit » sont définies comme étant directement associées au(x) produit(s) fini(s) fabriqué(s) par l'entreprise (ex. : CSF, blancheur, poids de base, etc.). Les variables « procédé » sont directement associées aux contrôleurs des niveaux régulateurs ou superviseurs du DCS par le biais des variables contrôlées ou manipulées (ex. : température, débit, pression, etc.). Finalement, les variables « production » sont de plus haut niveau et ne sont typiquement pas contrôlées par les opérations régulatrices du DCS. Elles sont plutôt fixées par les niveaux tactique et stratégique (se référer à la figure 1.1) et souvent utilisées par d'autres logiciels liés notamment à la gestion et planification des ressources, etc. (ex. : nombre de rouleaux à produire, coût des matières premières, consommation d'énergie, etc.).

### **3.2 Définition, identification et quantification de la flexibilité et de l'agilité**

Les définitions de flexibilité et d'agilité sont au cœur de la stratégie FAÉ. Elles rendent possible l'évaluation de la capacité d'une entreprise à surmonter une certaine perturbation en cours ou à venir. Même si la nature spatiale de la flexibilité et la nature temporelle de l'agilité sont fixées depuis le départ, la façon de les quantifier a évolué avec l'avancement des travaux.

### 3.2.1 Flexibilité

L'outil proposé par Sharifi et Zhang [16] présente la flexibilité comme étant une habilité à fabriquer différents produits et à atteindre différents objectifs avec les mêmes équipements. Relativement aux deux niveaux de production inférieurs de la figure 1.1, cette définition ramène aux caractéristiques des équipements en place à l'usine, plus précisément aux limites d'opérabilité qui y sont associées. Les auteurs englobent aussi dans leur définition la flexibilité de l'organisation ainsi que celle des employés. La définition précédente pourrait ainsi s'appliquer par extension aux variables PPP des niveaux tactiques et stratégiques ; les zones d'opération usuelle en définissant en quelque sorte les limites d'opérabilité. La notion de domaines des auteurs s'apparente d'ailleurs à celle des niveaux organisationnels proposée ici.

La définition théorique retenue pour la flexibilité est tirée de l'article de Narain et al. [43] :

« La flexibilité est la capacité d'un système à fabriquer une large variété de produits sans intervention extérieure visant à modifier le système. »

Selon les auteurs, il est important, en définissant la flexibilité, de tenir compte du niveau de spécification de cette dernière (machine seule ou usine entière). Cette définition est donc bien appropriée pour couvrir tous les niveaux de production d'une entreprise.

Basé sur cette définition, la représentation pratique de la flexibilité, proposée dans le cadre de la modélisation et de la transposition dans le DCS, constitue le volet spatial de la stratégie FAÉ puisque liée à la capacité physique d'un système à répondre à la demande. La définition pratique développée ici réfère donc aux bornes ou limites physiques de la plage d'opération de chacune des variables PPP du système de production. Les bornes de l'intervalle sont statiques et bien définies, limitées par des considérations pratiques et concrètes, par exemple, la capacité d'ouverture d'une valve. L'établissement de la flexibilité s'effectue en définissant l'intervalle total, soit les bornes de la plage d'opération la plus large possible compte tenu des équipements en place et autres contraintes. Même si cette définition s'apparente beaucoup en nature à celle de

limites d'opération ou d'alarmes, elle en diffère par son traitement (façon dont les limites sont mises en évidence) et le but qu'elle poursuit (permettre le diagnostique et l'analyse des limitations des opérations de l'entreprise).

La flexibilité telle que définie par la stratégie FAÉ constitue donc en quelque sorte un *indicateur du caractère adéquat ou inadéquat de la plage d'opération ou du dimensionnement des équipements*. Assumant qu'une perturbation globale requiert une action de la part d'un des niveaux stratégiques ou tactiques de l'entreprise, avec de nouvelles valeurs requises pour certaines des variables PPP, le système est considéré flexible si chacune des variables PPP impliquées dans ce changement sont à l'intérieur des limites (celles-ci sont donc exclusives) de leur plage d'opération dite naturelle. Lorsque liées aux deux niveaux de base de la pyramide, les limites sont assez faciles à déterminer. En effet, l'ouverture d'une valve (0-100%) ou le débit associé à cette ouverture sont assez directs. Ceci peut ne pas être aussi facile dans le cas de variables de haut niveau, mais tout de même possible. Par exemple, les limites de la planification de la production pour une semaine peuvent varier entre zéro et le nombre maximal de rouleaux qu'une machine peut produire si elle fonctionne 24 heures par jour. Il est important de noter que la flexibilité de toutes les variables du système de production (toute la pyramide) peut être évaluée. Il peut donc s'agir de variables contrôlées, manipulées, contraintes, et de consignes.

Le monitoring par le DCS des variables de saturation (VS et TS) est un facteur clé dans l'identification et la quantification dynamique de la flexibilité et de l'agilité. Dans le cas de la flexibilité, c'est la variation du signal entre ses limites physiques (haute et basse) qui est suivie par le DCS. Ce qui est exprimé par l'énoncé conditionnel suivant (équation 3.1) :

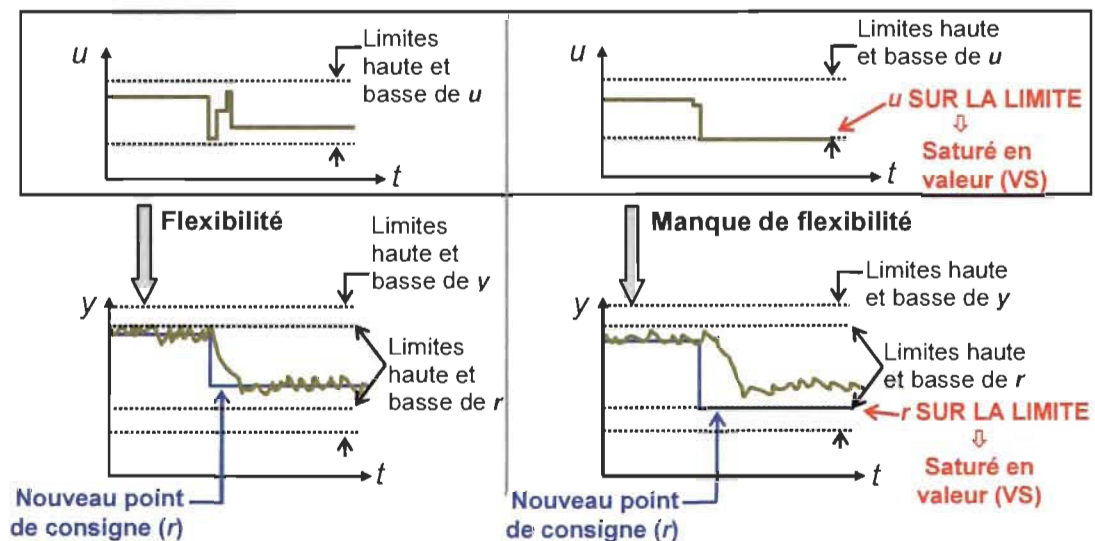
$$\text{SI Signal} \leq \text{Limite Basse OU Signal} \geq \text{Limite Haute ALORS Saturation liée à la Valeur (VS)} \quad \text{Éq. 3.1}$$

Où *Signal* est la valeur de la variable PPP suivie, et *Limite Basse* et *Limite Haute* sont tels que décrits précédemment. L'égalité est incluse dans la saturation parce qu'elle constitue une indication importante que la variable atteint un plancher ou un plafond.



Ceci signifie que la variable suivie est saturée et doit atteindre une valeur qui se situe hors de ses limites pour accéder au nouvel état requis (par la perturbation ou le changement de point de consigne). Ultimement, cette situation indique que la plage d'opération peut être inadéquate et que la variable présente une *saturation liée à la valeur (VS)*. La figure 3.1 introduit les éléments associés à la détermination de la flexibilité.

À la figure 3.1,  $u$  est la variable manipulée,  $y$  est la variable contrôlée et  $r$  est le point de consigne. Sur chacune des parties de gauche et de droite de la figure, il y a mouvement de la variable manipulée en réponse à un changement de point de consigne ; lequel mouvement vise à ce que la variable contrôlée réponde par l'atteinte du nouveau point de consigne. Dans la portion gauche de la figure 3.1, trois constats peuvent être faits sur les variables et leurs limites respectives : 1) le nouveau point de consigne se situe à l'intérieur des limites qui lui sont associées, 2) ce nouvel état requis entraîne un mouvement de la variable manipulée qui respecte ses limites et 3) ceci entraîne une réponse de la variable contrôlée qui est aussi localisée à l'intérieur des limites qui lui sont prédéfinies. Il s'agit donc d'un (sous) système flexible.

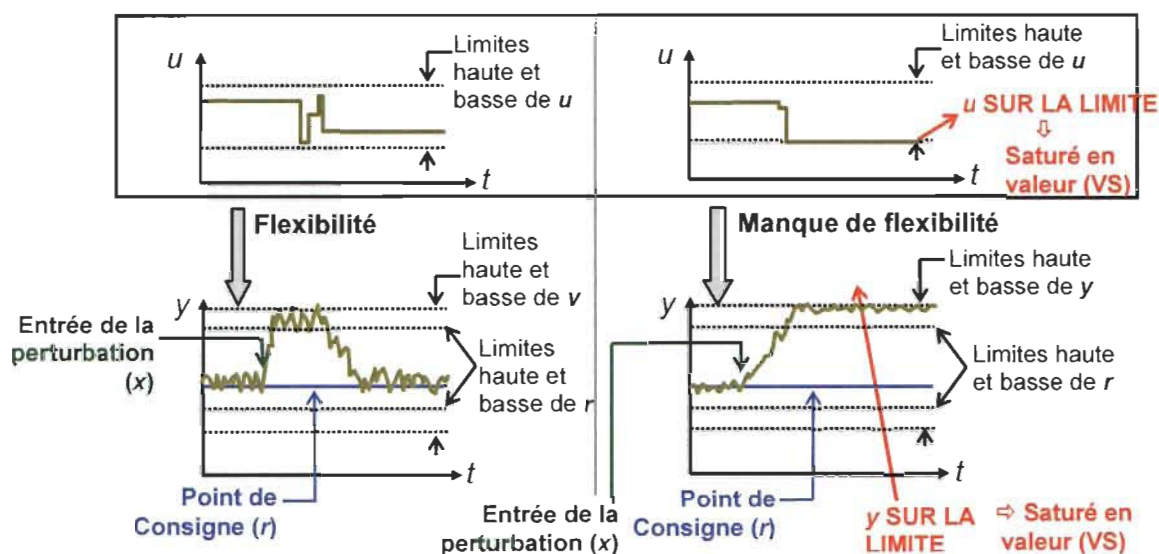


**Figure 3.1** Variables associées à l'évaluation de la flexibilité (ou du manque de flexibilité) lors d'un changement de point de consigne



Par contre, la portion droite de la figure 3.1 démontre un manque de flexibilité pour deux des trois variables en jeu. En effet : 1) le nouveau point de consigne se situe sur sa limite opérationnelle basse. Par exemple, afin de respecter une requête de plus haut niveau (ex. : une consommation de vapeur moindre), la consigne de température doit être réduite à une certaine valeur (qui représente le nouveau point de consigne de la portion droite de la figure 3.1). Pour atteindre ce nouveau point de consigne, 2) la variable manipulée bouge (par exemple, la valve de vapeur se ferme) mais atteint sa limite physique basse, ce qui 3) interrompt la variable contrôlée dans l'atteinte de la nouvelle consigne (la température fluctue légèrement au-dessus de sa limite). Il y a donc deux VS : un associé au point de consigne et l'autre à la variable manipulée. Ils attirent l'attention sur l'incapacité de ce (sous) système à rendre possible l'atteinte d'objectifs de plus haut niveau, même si la variable contrôlée se situe à l'intérieur de ses limites.

La figure 3.2 présente l'évaluation de la flexibilité lorsque le système est soumis à une perturbation.



**Figure 3.2** Variables associées à l'évaluation de la flexibilité (ou du manque de flexibilité) lors d'une perturbation

Les variables de la figure 3.2 sont les mêmes que celles de la figure 3.1, mais dans ce cas-ci, c'est une perturbation qui affecte le système (le point de consigne demeure constant). Comme précédemment, la portion de gauche de la figure montre la réponse

d'un (sous) système flexible face à la perturbation. La portion de droite illustre par contre un (sous) système limité en flexibilité : les variables manipulée ( $u$ ) et contrôlée ( $y$ ) sont sur leur limite respective et présentent ainsi toutes deux un VS.

### 3.2.2 Agilité

Les définitions relatives à l'agilité tirées de la littérature incluent presque toutes une référence à la capacité d'une entreprise à réagir adéquatement à des changements imprévus (se référer au tableau 2.2). Le modèle de cadre exploratoire et la simulation proposés par Ramasesh et al. [20] indiquent que l'entrée de revenu, lequel constitue d'ailleurs selon eux la mesure ultime de l'agilité, débute après le délai associé au temps de réponse et se termine avec l'arrivée d'un autre changement aléatoire. Cette notion de délai lié au temps de réponse s'approche beaucoup de la notion de temps nécessaire à l'atteinte de l'état stable (ou du régime permanent).

La définition théorique retenue pour l'agilité est un amalgame des définitions tirées de la littérature :

« L'agilité est la capacité d'une entreprise à réagir rapidement et efficacement aux changements inattendus de son environnement d'affaires et ultimement à en tirer avantage pour se démarquer de la compétition. L'agilité d'une entreprise passe par sa flexibilité, laquelle lui assure un maximum de souplesse dans la configuration de ses opérations. Conceptuellement, l'agilité pourrait être constituée de deux volets : un premier volet stratégique d'observation et d'analyse de l'environnement d'affaires et un second volet opérationnel axé sur les actions et réactions dictées par l'analyse stratégique. »

Basé sur la revue de littérature, la stratégie FAÉ propose que l'agilité constitue le volet temporel de l'outil en ce sens qu'elle réfère au caractère dynamique de la réponse obtenue. Il a donc été déterminé, qu'en pratique, l'agilité est la capacité que possède un système de production à atteindre une nouvelle consigne *dans les temps voulus et avec la précision demandée* ; la notion de précision introduisant le concept de contrôle de variabilité. Contrairement à la flexibilité, seulement la variable contrôlée est soumise à

l'évaluation de l'agilité puisque le temps de réponse n'est applicable qu'à ce type de variable.

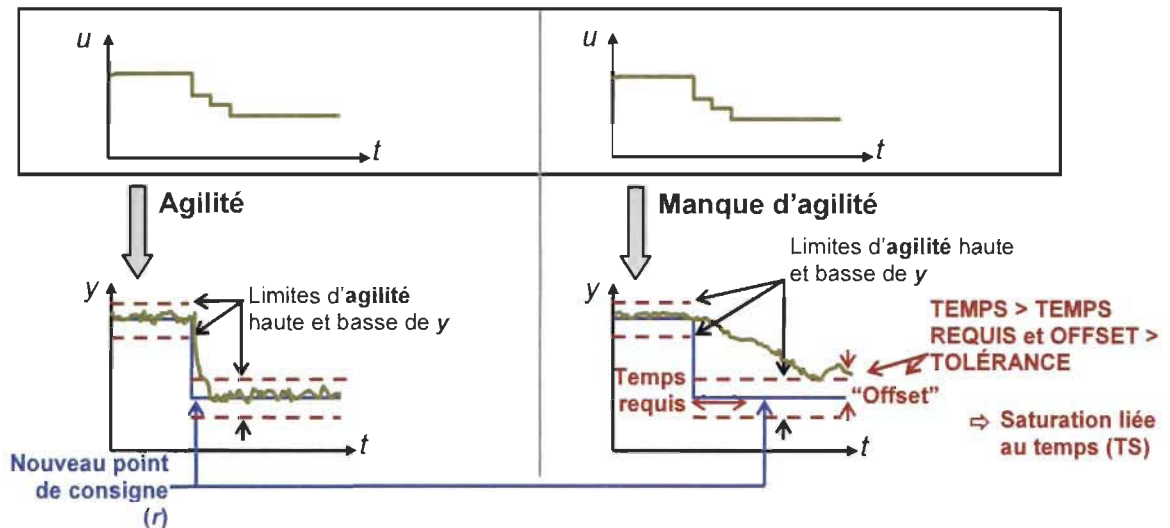
Donc, dans la définition des limites associées à l'agilité, telle que proposée par la stratégie FAÉ, deux conditions entrent en jeu. En premier lieu, la détermination de la valeur de l'horizon de temps (ou temps requis) est basée sur le temps nécessaire à l'atteinte du régime permanent (« time to steady state » ou TSS) du procédé à contrôler. Il faut en effet permettre au système d'atteindre un nouvel état stable avant d'évaluer son agilité. Ensuite, le nouveau régime permanent (ou nouvel état stable) doit respecter des limites liées à la variabilité jugée acceptable pour le procédé. Évidemment, ces limites de variabilité diffèrent des limites physiques opérationnelles applicables à la flexibilité. Ces deux conditions sont exprimées dans l'énoncé suivant (équation 3.2) :

$$\text{SI Temps} > \text{Temps Requis ET Offset} > \text{Tolérance ALORS Saturation liée au Temps (TS)} \quad \text{Éq. 3.2}$$

Cet énoncé constitue une version simplifiée de l'expression conditionnelle définie dans *DeltaV* pour évaluer les TS. Relativement à l'équation 3.2, *Temps* est le temps écoulé depuis que le nouveau point de consigne est établi et *Temps Requis* est défini comme étant le temps requis pour l'atteinte du régime permanent (TSS), ce qui laisse au procédé le temps de parvenir à un nouvel état stable avant de « lever le drapeau » du TS. *Offset* est l'écart entre la valeur du point de consigne et celle de la variable contrôlée alors que *Tolérance* réfère à la limite de variabilité tolérée pour cet écart. Le contrôle statistique de procédé constitue une excellente façon de déterminer les limites de variabilité d'un procédé [74]. Si une de ces deux conditions n'est pas respectée, la variable contrôlée manque d'agilité et présente une *saturation liée au temps (TS)*.

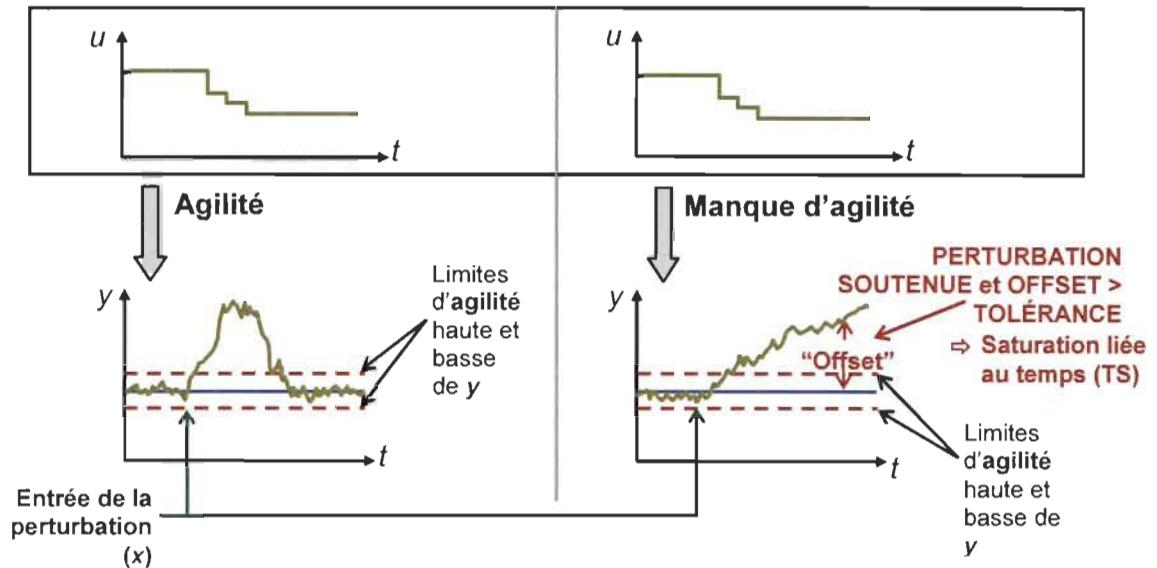
La figure 3.3 est similaire à la figure 3.1 et introduit les éléments associés à la détermination de l'agilité. Dans le cadre de l'évaluation de l'agilité par contre, les limites de la variable contrôlée ( $y$ ) s'expriment en fonction du point de consigne ( $r$ ) de celle-ci. Les limites d'agilité (ou variabilité permise) sont donc liées au point de consigne et c'est pourquoi elles « bougent » avec lui. Ici, le (sous) système est encore soumis à un changement de point de consigne. Suite à ce changement, la variable

manipulée ( $u$ ) doit effectuer une série de mouvements visant à amener la variable contrôlée ( $y$ ) sur son nouveau point de consigne. Dans la portion de gauche de la figure 3.3, la variable contrôlée revient rapidement et avec précision sur la consigne, donc démontre un comportement agile. De l'autre côté de la figure, la variable contrôlée ne revient sur la consigne ni dans le temps, ni avec l'exactitude souhaités. Le système manque donc d'agilité.



**Figure 3.3** Variables associées à l'évaluation de l'agilité (ou du manque d'agilité) lors d'un changement de point de consigne

Lorsqu'une perturbation affecte le système à un niveau suffisant pour générer un écart (*Offset*) plus grand que la tolérance admise, cela a aussi pour effet de générer un TS. Le respect du temps requis n'est cependant pas lié à la perturbation puisque de par la nature de celle-ci, il est difficile d'en détecter le début, la fin et le mouvement relatif. Une perturbation, même mesurée, ne répond généralement ni à une plage opérationnelle ni à une variation constante, bien définie et prévisible. Le respect du temps requis demeure en effet lié à un changement de point de consigne. Lorsque la perturbation agit seule (et qu'il n'y a pas de changement de point de consigne comme c'est le cas ici), elle sera perceptible si elle est soutenue et qu'elle engendre un manque d'agilité, comme c'est le cas de la portion de droite de la figure 3.4).



**Figure 3.4** Variables associées à l'évaluation de l'agilité (ou du manque de d'agilité) lors d'une perturbation

### 3.3 Théorie et rôle du MMPC

Tel qu'il est utilisé dans le cadre de ce projet de recherche, le contrôle avancé par modèle prédictif donne à la stratégie novatrice FAÉ la possibilité de lier concrètement les niveaux stratégiques et tactiques aux opérations des niveaux de production et donne à l'outil d'optimisation son caractère prédictif original. La présente section se divise en deux parties : une première qui dresse un bref aperçu de la théorie à la base du MMPC ; et une seconde qui met en évidence les aspects de cette théorie qui permettent de faire de la stratégie FAÉ l'outil décrit en introduction.

#### 3.3.1 Théorie du MMPC en bref

Selon Seborg et al. [75], le MMPC se décrit comme suit, en supposant un procédé composé par de multiples entrées/sorties (MIMO) qui doivent respecter certaines contraintes. Dans la mesure où un modèle dynamique relativement précis est disponible, on peut utiliser ce dernier conjointement aux mesures courantes pour prédire la valeur future des entrées/sorties. Donc les changements sur chacune des variables d'entrée sont coordonnés en fonction des relations entrées/sorties fournies par le modèle. Du point de

vue du MMPC, les éléments de sortie sont les variables contrôlées ( $y$ ) et contrôlées prédites ( $\hat{y}$ ) alors que les éléments d'entrée sont les variables manipulées ( $u$ ), les perturbations mesurées ( $x$ ) et les contraintes.

Toujours selon Seborg et al. le MMPC offre de nombreux avantages à savoir :

- ❖ Le modèle intègre les interactions statiques et dynamiques entre les entrées, sorties et perturbations ;
- ❖ Les contraintes sur les entrées/sorties sont systématiquement considérées ;
- ❖ Les calculs associés au contrôle sont coordonnés avec le calcul du point de consigne optimal ;
- ❖ Les prédictions associées à un modèle fiable peuvent fournir un avertissement relatif à un problème potentiel.

Les objectifs généraux d'un contrôleur MMPC sont les suivants [75] :

- ❖ Prévenir les violations des contraintes des entrées/sorties ;
- ❖ Amener certaines variables de sortie à leur point de consigne optimal tout en maintenant les autres sorties à l'intérieur de certaines limites ;
- ❖ Prévenir le mouvement excessif des variables d'entrée ;
- ❖ Contrôler le plus grand nombre possible de variables de procédé pour lesquelles aucun senseur ou actuateur n'est disponible.

L'objectif du calcul des actions de contrôle du MMPC est de déterminer la séquence des mouvements de contrôle (mouvement des variables manipulées) afin que la réponse prédite rejoigne le point de consigne en suivant une trajectoire optimale.

Le calcul des mouvements de contrôle est basé sur l'optimisation d'une fonction objective  $J$  [76]:

$$\min_{\Delta u} J = \sum e^2 + \sum \Delta u^2 \quad \text{Éq. 3.3}$$

À l'équation 3.3,  $e$  est le vecteur d'erreur (trajectoire future de la différence entre la valeur prédite de la variable contrôlée et le point de consigne) et  $\Delta u$  est le vecteur de la

trajectoire future d'écart entre la valeur prédite de la variable manipulée au temps  $t$  et la valeur prédite de la variable manipulée au temps  $t-1$ . Dans le cadre d'application de l'équation 3.3 où l'objectif est l'atteinte du point de consigne par la variable contrôlée, le rôle de l'optimisateur est de minimiser l'erreur entre la trajectoire prédite et celle du point de consigne par le biais de mouvements de la variable manipulée. C'est pourquoi la fonction objective  $J$  utilisée dans le calcul d'optimisation (équation 3.3) contient un terme en  $\Delta u$  qui vise à minimiser l'amplitude des mouvements de la variable manipulée.

Le nombre de prédictions  $P$  s'appelle horizon de prédiction alors que le nombre de mouvements de contrôle  $M$  se nomme horizon de contrôle. L'optimisateur calcule donc une série de  $M$  mouvements de contrôle pour  $u$  (mouvement courant plus  $M-1$  futures entrées) pour que les  $P$  prédictions de la variable de sortie  $\hat{y}$  atteignent le point de consigne de manière optimale. La variable manipulée est maintenue constante après  $M$  mouvements de contrôle.

La figure 3.5 présente un diagramme bloc illustrant le principe de fonctionnement du MMPC ainsi qu'un graphique de la trajectoire (passée, actuelle et future) de la variable contrôlée  $\hat{y}$  et des mouvements de la variable manipulée  $u$ .

La portion du haut de la figure 3.5 montre que l'optimisation de la fonction objective permet de fournir au modèle un vecteur de  $M$  mouvements de contrôle associés à la manipulation de  $u$ . Le mouvement de contrôle actuel agit sur le procédé et est aussi considéré par le modèle. Les  $M-1$  autres mouvements de contrôle calculés par l'optimisateur sont transmis au modèle qui établit  $P$  prédictions de la variable contrôlée  $\hat{y}$  en tenant compte des perturbations modélisées  $x$ . La variable contrôlée prédite actuelle  $\hat{y}$  est comparée à la variable contrôlée actuelle  $y$  et cette différence est appelée « output feedback » et permet un certain ajustement des calculs associés au modèle. Les perturbations non modélisées ( $x_{NM}$ ) agissant sur le procédé apparaissent aussi à la figure 3.5.

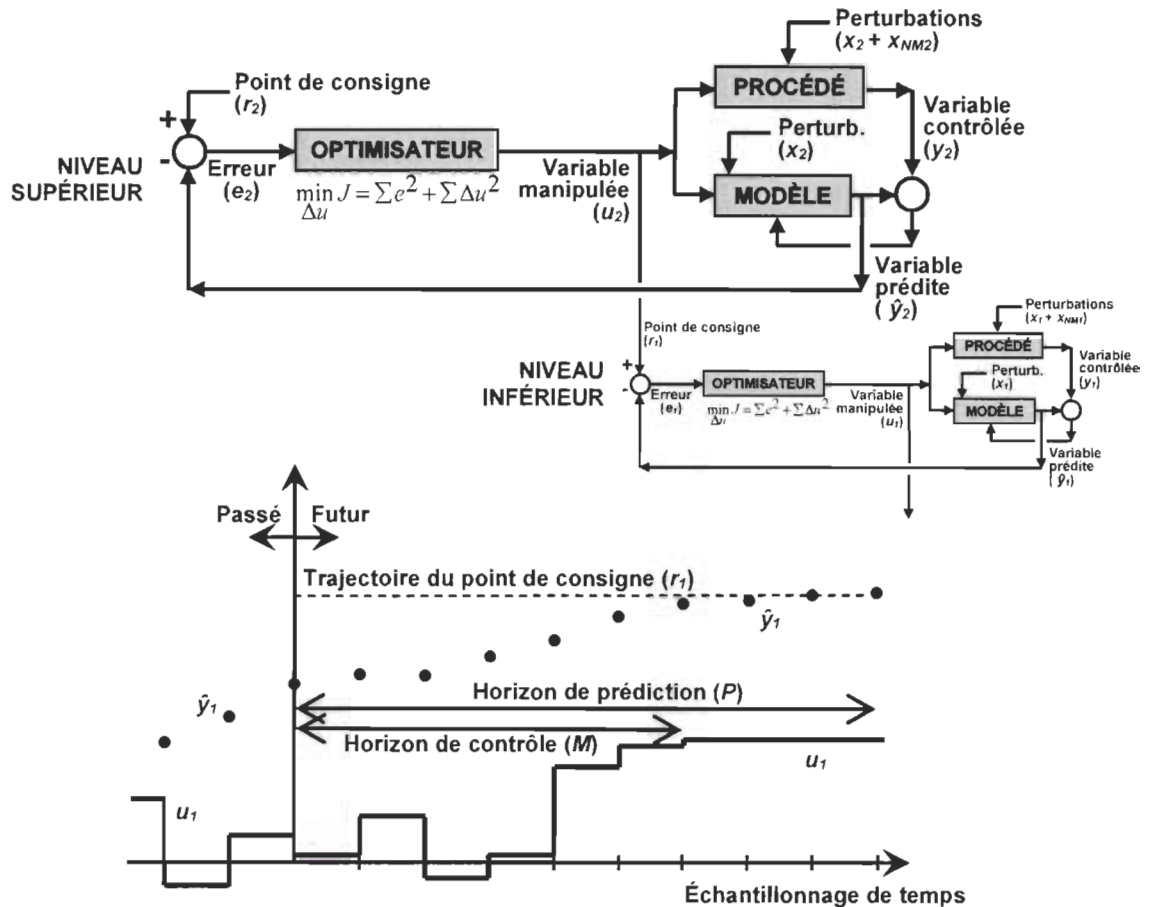


Figure 3.5 Concept de base du MMPC (adapté de Seborg et al. [75])

Les points de consigne de niveau supérieur peuvent être fixés par l'utilisateur ou provenir éventuellement d'un optimisateur économique (ou optimisateur en temps réel, OTR) [75], de systèmes experts ou de l'utilisation de la logique floue [77]. Au niveau inférieur, c'est la variable (ou le vecteur de variables) manipulée du niveau supérieur qui cascade vers le bas pour fournir le point de consigne.

Une caractéristique distinctive du MMPC réside dans son approche par horizons mouvants. En effet, même si une séquence de  $M$  mouvements de contrôle est calculée à chaque instant d'échantillonnage, seulement le premier mouvement est implanté. Une nouvelle séquence est calculée à l'échantillonnage suivant, lorsque de nouvelles mesures deviennent disponibles et encore une fois, seulement le premier mouvement est implanté. Cette procédure est répétée à chaque échantillonnage de temps.



Donc en bref, le MMPC est constitué de deux ingrédients principaux : le modèle dynamique qui calcule les prédictions et l'optimisateur qui détermine les mouvements de contrôle futurs optimaux. Le modèle mathématique est soit empirique, théorique ou un mélange des deux. On désire qu'il soit le plus représentatif possible de la réalité afin de pouvoir prédire avec le plus de précision possible comment le procédé réagira aux mouvements de ses variables manipulées dans un contexte bien précis relativement aux perturbations externes et contraintes en vigueur.

Enfin, le MMPC permet de prédire à l'aide d'un modèle la valeur d'une variable de sortie que l'on désire contrôler ainsi que les actions à être prises par le DCS pour atteindre cette valeur, considérant les conditions antérieures et actuelles du procédé. Le MMPC s'avère très utile lorsque la variable que l'on désire contrôler dépend de plusieurs autres variables et/ou ne peut pas être prise directement en charge par le contrôle conventionnel (variable de niveau supérieur ou virtuelle). Il existe plusieurs applications concrètes du MMPC dans l'industrie papetière [25-32] qui démontrent les possibilités et avantages de ce type de contrôle avancé.

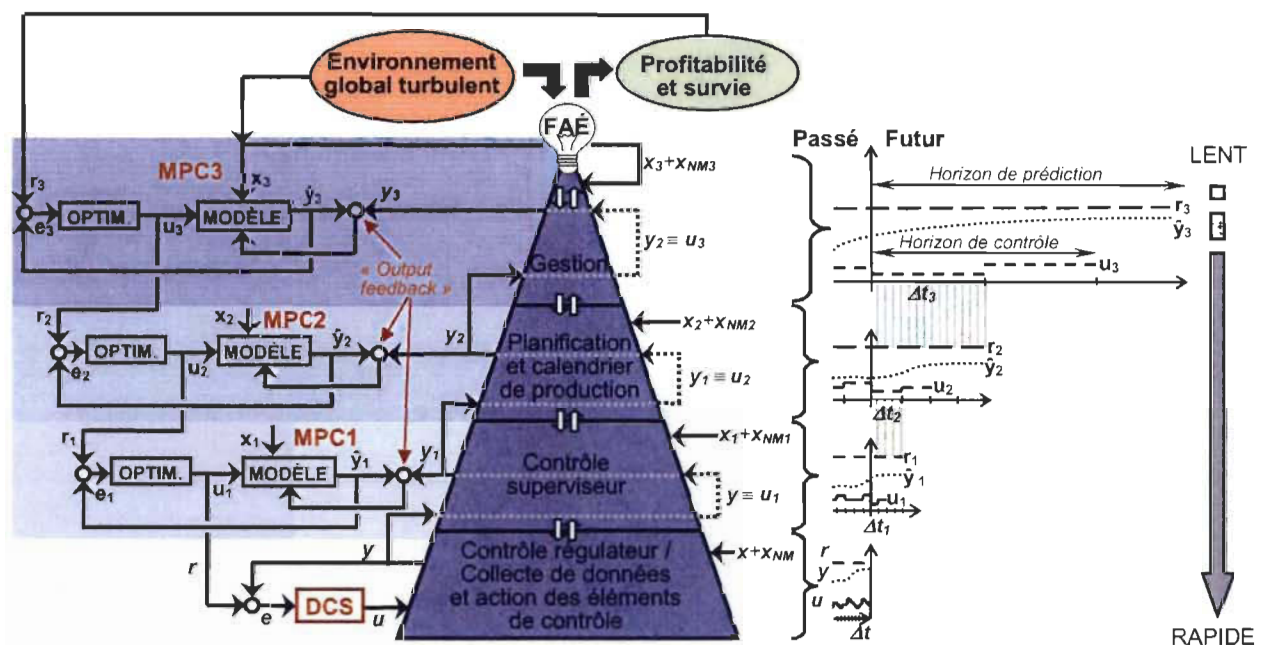
### 3.3.2 Rôle du MMPC relativement à la stratégie FAÉ

Le MMPC possède donc d'importantes caractéristiques [75] qui le rendent bien adapté à l'implantation de la stratégie FAÉ :

1. Le MMPC comprend un volet modélisation et un volet optimisation. Le volet modélisation est composé d'un modèle dynamique qui calcule les prédictions et intègre les relations dynamiques entre les entrées/sorties. *Relativement à la stratégie FAÉ, cette composante de modélisation rend possible l'expression des relations fonctionnelles entre les variables de n'importe lequel des niveaux de production.*
2. Le MMPC utilise de façon inhérente les horizons de temps futurs et les prédictions. *Ceci est essentiel dans le cadre de la stratégie FAÉ qui se veut un **outil décisionnel basé sur l'anticipation des turbulences globales à venir.***
3. Le MMPC est approprié pour les problèmes de type MIMO avec contraintes. *La stratégie FAÉ s'applique à l'entreprise où des relations comprenant de nombreuses*

*entrées/sorties sont escomptées.* Les contraintes sont aussi implicitement prises en compte dans le volet optimisation du MMPC.

La figure 3.6 établit le parallèle entre la pyramide générique de production et la cascade de MMPC. Afin de simplifier la figure, le nombre des niveaux de production a été réduit à quatre, et les deux derniers niveaux de la figure 1.1 sont fusionnés ensemble puisqu'ils constituent à eux deux le contrôle régulateur typique d'un DCS (relation DCS/éléments de champs).



**Figure 3.6** Cascade de MMPC associée à la pyramide générique

À la portion gauche de la figure 3.6, la cascade de MMPC est représentée sous la forme de diagramme bloc, suivant le même principe que celui exposé à la figure 3.5. La pyramide constitue en quelque sorte les rectangles « procédé » de la figure 3.5. Les variables associées aux MMPC sont en caractères gras alors que celles représentant le procédé « réel » sont en italiques. Aux trois niveaux supérieurs de la pyramide de la figure 3.6 correspondent respectivement les MPC 1, 2 et 3.

Le MPC3 reçoit la perturbation (ou son anticipation) provenant de l'environnement global turbulent ( $x_3$ ). Dans le but de maintenir l'objectif de profitabilité et de survie, l'optimisateur du MPC3 calcule la séquence de mouvements de contrôle requis ( $u_3$ ) pour

ramener (maintenir) la prédiction de la variable contrôlée ( $\hat{y}_3$ ) sur l'objectif (consigne,  $r_3$ ). À noter que dans le cadre du projet, l'objectif global de rentabilité a été traduit sous forme de point de consigne de profit, mais il aurait aussi pu faire l'objet d'une maximisation du contrôleur MPC3. Cette séquence de mouvements cascade du MPC3 vers le MPC2 où elle constitue la consigne ( $r_2$ ). L'optimisateur du MPC2 calcule de la même façon la meilleure séquence de mouvements de contrôle ( $u_2$ ) et la transfère au MPC1 ( $r_1$ ) où le même travail est encore effectué. La séquence de mouvements de contrôle du MPC1 ( $u_1$ ) est reçue point par point par le niveau régulateur du DCS sous forme de point de consigne ( $r$ ). C'est à cette étape que le DCS prend action sur l'élément de champs à manipuler ( $u$ ), ce qui a pour effet d'induire une variation de la variable contrôlée ( $y$ ). Donc, comme le montre la figure 3.6 en comparant  $u$  et les  $u_i$ , le DCS est le premier et le seul contrôleur depuis le haut de la cascade à agir « réellement » sur le procédé plutôt que de transmettre un point de consigne. Cette action sur le procédé a pour effet d'affecter successivement l'état des niveaux supérieurs. En effet, la variation de  $y$  affecte  $y_1$  parce du point de vue du niveau « contrôle superviseur »,  $y$  constitue la variable manipulée  $u_1$ . Aussi, dès que l'effet de la variation de  $y$  se fait sentir sur  $y_1$ , cette dernière, qui constitue la valeur actuelle de la variable contrôlée, est comparée à la valeur actuelle de la variable contrôlée prédite ( $\hat{y}_1$ ). Ceci constitue l'« output feedback » et permet de vérifier la validité du modèle. Dans le cas de *DeltaV*, le contrôleur MPC utilise l'« output feedback » pour vérifier la validité du modèle, si la prédiction a bien donné la bonne valeur une fois cette valeur disponible, et à le corriger au besoin (« model mismatch »). Tel que décrit précédemment, la séquence est la même pour les niveaux supérieurs à mesure que les variations de procédé se font sentir. Lorsque le mouvement atteint l'étage supérieur, il est alors possible de valider si l'action initiale prise par le MPC3 permet réellement d'atteindre l'objectif global de rentabilité et de survie.

Pour chacun des niveaux de MPC, la perturbation ( $x_i$ ) qui est connue et modélisée affectera aussi le procédé (avec un décalage étant donné la nature prédictive des MPC). Ce dernier est par ailleurs aussi soumis aux perturbations non mesurées ( $x_{NMi}$ ), ce qui n'est pas le cas des MPC.

La portion de droite de la figure 3.6 représente la cascade des horizons de prédiction en horizons de contrôle. Le graphique du haut est donc associé au niveau supérieur (gestion). Ce MMPC évalue la trajectoire optimale des mouvements de contrôle futurs pour un certain horizon de contrôle  $M$ . De ces mouvements de contrôle futurs est tirée une trajectoire de réponse future pour un certain horizon de prédiction  $P$ . Cette trajectoire prédite doit s'approcher le plus possible de la trajectoire du point de consigne évaluée sur le même horizon de prédiction. La trajectoire des mouvements de contrôle futurs du MMPC du niveau gestion cascade vers le MMPC du niveau planification et calendrier de production où elle devient la trajectoire du point de consigne (rectangle ligné verticalement entre les deux graphiques). Le même processus est répété entre les niveaux planification et calendrier de production et contrôle superviseur. De là, le niveau du contrôle régulateur reçoit un point de consigne du niveau contrôle superviseur. En effet, le contrôle régulateur du DCS (généralement de type PID) n'est pas en mesure de gérer une trajectoire comme le fait un contrôleur MMPC. Comme le montre bien la figure 3.6, les horizons de temps diminuent jusqu'à l'atteinte de l'avant dernier niveau du bas de la pyramide générique de la figure 1.1 où le contrôle régulateur prend le relais des MMPC. Ainsi, c'est à chacun des quatre niveaux supérieurs de la pyramide générique de la figure 1.1 que peut être associé un MMPC.

Un fait intéressant lié à la revue de littérature, Sharifi et Zhang [16] ont développé pour l'agilité deux méthodologies parallèlement à leur méthodologie principale : la première visant à déterminer le niveau d'agilité requis par la compagnie et la seconde visant à déterminer son niveau actuel. La comparaison entre ces deux états (agilité requise et actuelle) amène la compagnie à diagnostiquer s'il est requis d'être plus agile. Cette méthode, par sa démarche comparative, se rapproche de l'« output feedback » pratiqué par les contrôleurs MPC. L'aspect diagnostique qui lui est associé s'approche quant à lui du concept d'évolution tel que défini par la stratégie FAÉ.

### **3.4 Intégration au DCS**

À partir du moment où les concepts de flexibilité et d'agilité peuvent être quantifiés (par le biais des équations 3.1 et 3.2), ils doivent être intégrés au DCS. Il en va de même des

contrôleurs MMPC qui permettront l'interopérabilité entre les niveaux de production ainsi que la capacité d'anticipation et de prédiction de la stratégie FAÉ.

Le DCS utilisé au CIPP est le système *DeltaV* d'Emerson Process Management. L'outil de configuration dans *DeltaV* permet de diviser l'usine en secteurs constitués de boucles de contrôle. Un module de contrôle distinct composé de blocs de fonctions est généralement associé à chacune des boucles de contrôle.

Dans le but de conserver la configuration actuelle de l'usine intacte, l'intégration de la stratégie FAÉ au DCS demande l'ajout de nouveaux modules de contrôle plutôt que la modification de ceux déjà en place. C'est pourquoi, pour chacun des niveaux de production, les saturations VS et TS sont définies dans *DeltaV* en utilisant des blocs de fonction calcul/logique (bloc de contrôle analogue, nommé « calculation block ») additionnels. Le principe est le même en ce qui a trait à la configuration des MMPC de niveau supérieur qui est mise en place grâce à des blocs de fonction MPC (bloc de contrôle avancé) où de nouvelles variables (correspondant aux variables PPP de niveaux supérieurs) sont créées. Ces nouveaux modules, comme c'est aussi le cas des autres modules de l'usine, peuvent accéder à tous les paramètres du DCS. Les nouvelles variables sont ensuite sélectionnées pour être archivées dans l'historien de *DeltaV* (*Continuous Historian*) pour compilation et analyse. Les expressions (langage structuré) qui composent les blocs « CALC » et en déterminent la (les) valeur(s) de sortie (fonctions mathématiques, opérateurs logiques, constantes, références à des paramètres ou E/S internes ou externes, etc.) permettent d'implanter les énoncés conditionnels des équations 3.1 et 3.2 pour l'évaluation des VS et TS.

Afin d'éviter tout impact sur les opérations de l'usine pilote pendant les phases de conception et d'implantation du présent outil d'optimisation, un logiciel de simulation a été utilisé pour « remplacer » la dynamique de procédé de l'usine. Il s'agit du logiciel *CADSIM Plus™*, qui peut communiquer avec *DeltaV* via un lien OPC (OLE – Object Linking and Embedding – for Process Control). Une station « *Simulate Pro* » de *DeltaV* qui contient la base de données complète de l'usine (la configuration est donc identique) est aussi utilisée pour faciliter la communication entre *CADSIM Plus™* et *DeltaV*. La

figure 3.7 illustre les liens de communication entre *CADSIM Plus*<sup>TM</sup>, la configuration du DCS telle qu'actuellement à l'usine, les blocs « CALC » et MPC et l'historien de *DeltaV*. Étant donné que les systèmes DCS actuels sont dotés d'une configuration et d'une architecture relativement ouvertes, l'équivalent peut possiblement être fait avec un système autre que celui de Emerson.

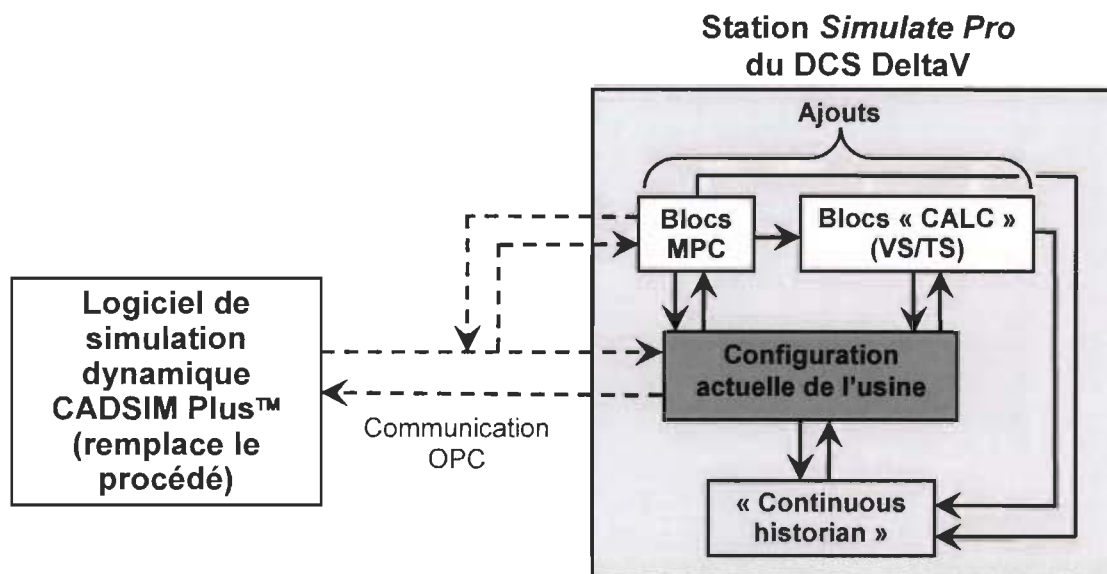


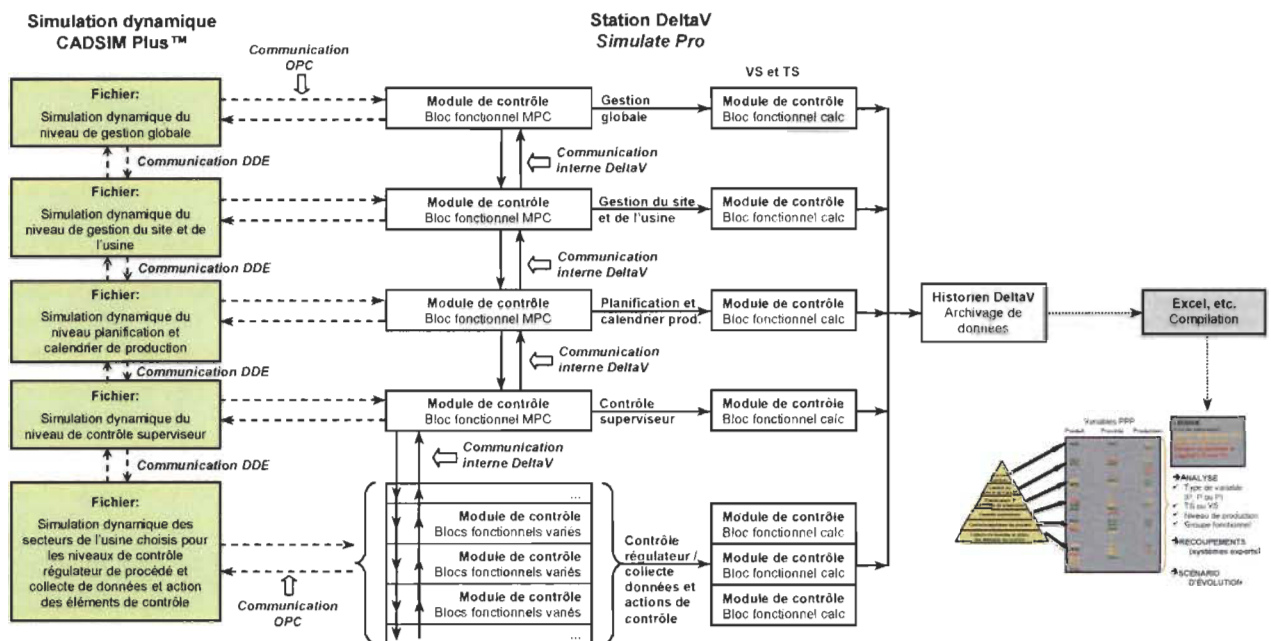
Figure 3.7 Liens intra *DeltaV* et avec *CADSIM Plus*<sup>TM</sup>

La figure 3.8 illustre de façon plus détaillée le même concept que la figure 3.7. La première colonne de gauche de la figure 3.8 représente les fichiers de simulation *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> des différents niveaux de production d'une entreprise. Les deuxième et troisième colonnes de gauche illustrent les modules de contrôle de *DeltaV*, autant ceux liés à la configuration actuelle de l'usine (le groupe du bas de la deuxième colonne) que ceux liés aux blocs de fonction « calc » et MPC ajoutés à la configuration existante dans le cadre du projet (les autres blocs des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> colonnes). Tous ces modules de contrôle de *DeltaV* « parlent » avec l'historien, ce qui permet d'archiver les données qui peuvent par la suite être compilées et analysées dans le but de proposer un éventuel scénario d'évolution.

Aux deux premières colonnes de gauche de la figure 3.8, les deux niveaux de production du bas de la pyramide de la figure 1.1 sont groupés puisqu'ils sont tous deux associés au



contrôle régulateur du procédé typiquement opéré par le DCS. Les fichiers *CADSIM Plus™* associés à ces deux niveaux en sont une simulation dynamique qui remplace littéralement le procédé. Lorsque la simulation est fonctionnelle, *CADSIM Plus™* envoie un(des) signal(aux) via OPC à *DeltaV*, le(s)quel(s) signal(aux) remplace(nt) les entrées provenant normalement des instruments de champ. Le(s) signal(aux) de sortie généré(s) par les modules de contrôle touchés dans *DeltaV* retourne(nt) ensuite vers *CADSIM Plus™*, fermant ainsi la boucle de la simulation.



**Figure 3.8** Détail de la communication entre les logiciels *CADSIM Plus™* et *DeltaV*

Chacun des autres fichiers *CADSIM Plus™* de la colonne de gauche de la figure 3.8 est associé à un niveau de production supérieur. Ces fichiers sont distincts les uns des autres pour faciliter l'intégration des différentes échelles de temps. Les fichiers *CADSIM Plus™* communiquent entre eux par le biais de liens DDE (Dynamic Data Exchange). Chacun des fichiers *CADSIM Plus™* communique avec un (des) module(s) de contrôle MPC de *DeltaV* via OPC. Tel que mentionné plus haut, ces modules composés de blocs fonctionnels de contrôle avancé sont ajoutés à la configuration actuelle de l'usine. Ils communiquent ensemble ainsi qu'avec le contrôle régulateur de procédé de façon

interne dans *DeltaV*. Autant les paramètres des modules MPC que ceux des modules de contrôle existants sont disponibles aux blocs fonctionnels « CALC » de VS et TS pour l'évaluation des saturations à n'importe lequel des niveaux de production de l'entreprise. Toutes ces informations sont aussi disponibles à l'historien *DeltaV* pour archivage et analyse ultérieure.

Finalement, il peut y avoir de nombreuses façons de représenter VS et TS. Ce pourrait être fait par le biais de rapports ou de courbes associées au signal des variables à l'étude. Par exemple, sur un graphique, les signaux de VS et TS pourraient être joints à ceux des variables principales d'un module de contrôle, ce qui sera fait plus loin. Le regroupement sur un même graphique ou dans un rapport de tous les VS et TS d'un même secteur d'usine ou autre groupe fonctionnel permettrait d'avoir une image globale de la situation et des limitations de ce groupe.

### **3.5 Recouvrements et évolution**

Lorsque les saturations sont, en quantité ou en qualité, telles qu'elles limitent ou rendent impossible l'atteinte de l'objectif global visé, un des rôles de la stratégie FAÉ est de faciliter le recouvrement et l'analyse des limitations afin qu'il s'en dégage une piste de solution évolutive.

La littérature associée à l'évolution est encore relativement vierge, particulièrement en association avec les concepts de flexibilité et d'agilité. Ici, l'évolution est vue comme le volet spatiotemporel de la stratégie FAÉ, soit la conséquence de la saturation spatiale (manque de flexibilité) et/ou temporelle (manque d'agilité) qui entraîne une analyse des actions à prendre face aux variables concernées.

L'idée générale est de permettre l'accès à une forme d'instantané de tout le système de production d'une entreprise en terme de ses VS et TS courants. Si les perturbations prévues peuvent être correctement absorbées par l'entreprise, aucun VS ni TS ne sera apparent. Si par contre, des VS ou TS se présentent, dépendamment de leur combinaison (VS, TS ou les deux), de leur nature (P, P ou P) et du groupe fonctionnel qu'ils composent, le but ultime est de déterminer ce qui stratégiquement pourrait être modifié



dans l'entreprise pour assurer l'atteinte des objectifs face à cette perturbation particulière. Ceci constitue ce qui est appelé, dans le cadre de la recherche, le scénario d'évolution.

Il n'a pas été possible, faute de temps, de développer la méthodologie détaillée de l'évolution. Une stratégie préliminaire est cependant proposée. En effet, considérant le nombre élevé de variables présentes dans un système de production réel et la représentation hiérarchique adoptée (pyramide générique), une division du problème global en plusieurs problèmes de moindre ampleur est proposée. Ainsi, lors de la configuration des blocs « CALC » visant à évaluer les saturations sur les variables PPP, une première catégorisation pourrait être faite en regroupant ensemble, dans un même module de contrôle, les variables composant des groupes fonctionnels. Ce faisant, les modules de contrôle ainsi associés à une série de blocs « CALC » pourraient donner une première piste de classification pour une possible analyse locale. Certains de ces modules de contrôle pourraient ensuite donner place à une analyse de plus haut degré, selon le niveau de production auquel sont associées les variables « clés » ayant saturé. En d'autres mots, il est possible que toutes les variables PPP des niveaux de production inférieurs ne doivent pas faire l'objet d'une évaluation, mais seulement celles ayant un impact sur les variables de plus haut niveau, particulièrement celles affectant l'objectif global.

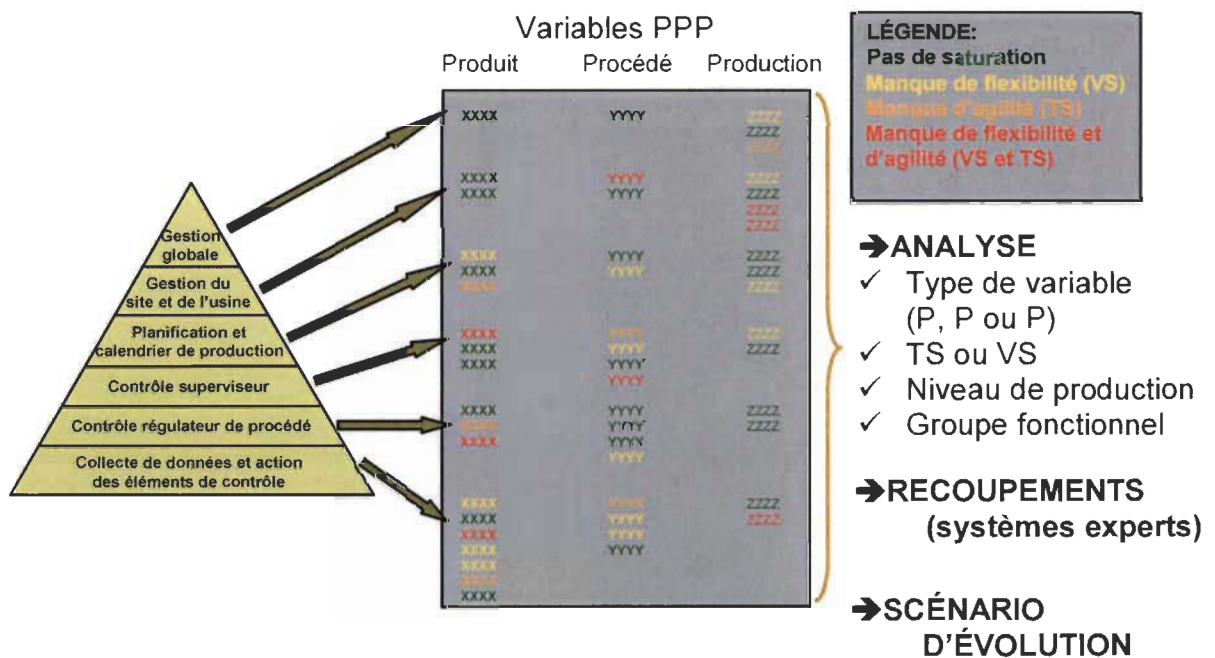
Différentes signatures consistant en différentes combinaisons de VS et TS à différents niveaux et sur différentes variables PPP servent de base au recoupement nécessaire à l'analyse sous-tendant la proposition du scénario d'évolution approprié. À cet effet, les systèmes experts [77] pourraient être mis à contribution. Il est important de noter que l'évolution proposée peut se jouer dans une gamme de scénarios variant entre la simple modification des paramètres de procédé et la reconfiguration du procédé. La figure 3.9 offre une représentation de la stratégie de standardisation de l'évolution décrite plus haut.

Quoique la recherche de littérature liée à l'évolution n'ait pas donné de résultats probants, Sharifi et Zhang, dans le cadre de leurs travaux [16], ont flirté avec ce concept.

En effet, selon eux, après avoir déterminé ses niveaux d'agilité actuel et requis, une compagnie devrait :

1. Détecter, analyser et reconnaître les changements ;
2. Déterminer les aptitudes requises pour maîtriser les changements ;
3. Définir les stratégies requises, si nécessaire ;
4. Déterminer les pratiques ou initiatives pouvant aider à atteindre les aptitudes requises et les intégrer au plan d'action de la compagnie ;
5. Mesurer et évaluer la performance de son agilité ;
6. Effectuer les corrections en fonction de la mesure de performance précédente.

Cette méthodologie s'approche sensiblement de la démarche d'évolution proposée ici.



**Figure 3.9 Stratégie préliminaire de standardisation de l'évolution**

### 3.6 Différence entre stratégie FAÉ, SPC, BI et alarmes

A la lumière de ce qui précède, un questionnement peut se poser sur la différence qu'il existe entre la stratégie FAÉ et le contrôle statistique de procédés et les alarmes qui font

partie inhérente de tout DCS. Essentiellement, le contrôle statistique de procédés (SPC) est un outil visant à garder le procédé sous contrôle et à en réduire la variabilité [78] alors que la stratégie FAÉ est un outil qui vise à aider une entreprise à évaluer sa capacité à faire face à une perturbation en intégrant ses divers niveaux de production. Cependant la stratégie FAÉ ne peut être implantée si le procédé est hors contrôle, puisque les saturations vont surgir de partout. Le SPC s'avère donc un outil utile dans la détermination des limites de variabilité de l'agilité.

La « business intelligence » (BI) s'apparente notamment à la « competitive intelligence » (CI) et à la « strategic intelligence » (SI) qui sont quelques unes des appellations de concepts synonymes ou à tout le moins similaires de l'intelligence [69]. Dans ce contexte, l'intelligence peut être définie comme étant les recommandations pratiquement applicables résultant d'un processus faisant appel à la planification, la cueillette, l'analyse et la communication d'informations liées à l'environnement de l'entreprise et visant à aider la prise de décision stratégique [69]. Ainsi défini, il s'agit du fondement du processus de prise de décision stratégique. L'intelligence aide donc une entreprise à maintenir et développer des avantages compétitifs distincts en utilisant l'organisation dans sa globalité, ainsi que ses différents réseaux, dans le but de développer des perspectives recevables par son environnement (consommateurs, concurrents, employés, technologie...) [69]. L'intelligence utilise un processus systématique et éthique impliquant la planification, la collecte, l'analyse, la communication et la gestion [69]. Ceci rejoint d'une certaine façon la stratégie FAÉ qui vise aussi à aider une entreprise à être plus compétitive dans le marché international actuel, notamment par l'intégration de tous ses niveaux de production et par l'évaluation de ses limitations. En somme, la stratégie FAÉ peut prétendre à proposer une forme d'implantation de l'intelligence qui s'étende jusqu'aux niveaux opérationnels d'une entreprise, plutôt que de demeurer au niveau stratégique.

Finalement, les VS et TS de la stratégie FAÉ pourraient aisément être configurés comme des alarmes, mais comme ils sont utilisés pour identifier les limitations d'un procédé relativement à une perturbation à venir de son environnement d'affaires, ils ne devraient

pas être dédiés aux opérateurs. Cependant, faire ressortir les VS et TS en les configurant comme des alarmes est une façon intéressante de les rendre disponibles.

## Chapitre 4 - Illustration de la méthodologie par un exemple

L'exemple d'implantation qui fait l'objet du présent chapitre vise à faciliter la compréhension de la méthodologie exposée précédemment. La description qui suit est d'ordre plutôt technique puisqu'elle vise à offrir un premier aperçu du rôle des logiciels utilisés. Le contenu du chapitre actuel et des trois prochains (Simulation : outil logiciel *CADSIM Plus™*, Modélisation et contrôle : outil logiciel *DeltaV* et Description du procédé à l'étude) constitue donc en quelques sortes un chevauchement entre la méthodologie et les résultats.

L'exemple d'implantation porte sur le contrôle de la température à la trémie de préchauffage. Relativement à la portion de procédé analysé dans le cadre du présent travail, la trémie de préchauffage (et son convoyeur d'alimentation) est référée comme étant l'approche immédiate du raffineur primaire. La figure 4.1 présente le schéma de procédé simplifié associé à la boucle de température de la trémie de préchauffage.

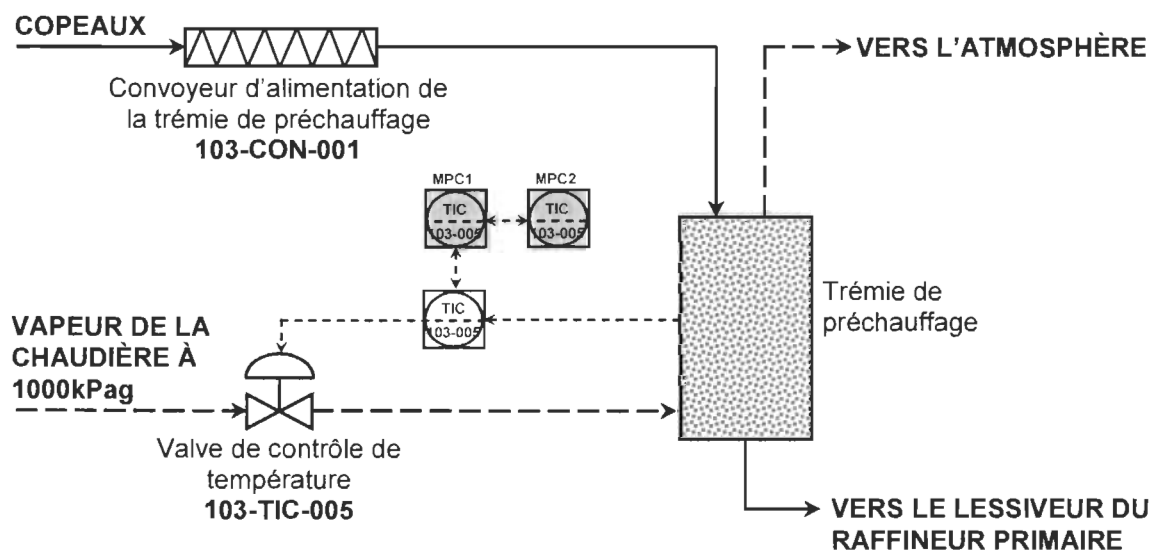


Figure 4.1 Schéma de procédé de l'exemple d'implantation

Les copeaux qui entrent dans la trémie proviennent du convoyeur 103-CON-001. Une fois dans la trémie, ils sont chauffés grâce à de la vapeur provenant de la chaudière à 1000 kPag (pression absolue, kPaa). Les copeaux sortent ensuite de la trémie pour être

acheminés au lessiveur. Un contrôleur PID (103-TIC-005, le carré avec un cercle à l'intérieur) permet de moduler l'ouverture de la valve 103-TIC-005 afin d'atteindre la température voulue. Deux niveaux de contrôleurs MPC chapeautent le contrôleur PID.

Le rôle du logiciel de simulation *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> est de faire office de procédé réel (en remplacement de celui de la figure 4.1). En effet puisqu'il est essentiel, en phase de conception et de validation, de ne pas perturber les opérations en cours à l'usine pilote, la portion de procédé à l'étude est reproduite grâce à une simulation dynamique. Dans le cadre du présent travail, *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> constitue donc le procédé réel avec sa dynamique, lequel communique en continu avec les diverses versions de lui-même (fichiers avec extension *.dra*, chacun correspondant à une échelle de temps différente) et avec *DeltaV*, dans le respect de ces échelles de temps. Tant *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> que *DeltaV* couvrent les niveaux stratégique, tactique et production de l'entreprise.

Le logiciel *DeltaV* est un système de contrôle distribué qui assure le calcul des consignes d'opération qu'il communique ici en continu à *CADSIM Plus*<sup>TM</sup>. Dans le cadre du travail, le calcul des consignes fait l'objet de deux niveaux : PID et MPC. Le PID obéit à une loi de contrôle [75] où c'est le paramétrage adéquat du contrôleur (basé sur la dynamique de procédé préalablement identifiée) qui assure l'atteinte de l'objectif. Le PID est utilisé pour contrôler une boucle de procédé simple et concret, composé d'une variable contrôlée et d'une variable manipulée.

Le MPC permet le contrôle de procédés plus complexes, composés de plusieurs entrées/sorties et/ou soumis à des contraintes et/ou perturbations, ou impliquant des variables de plus haut niveau, etc. Le calcul des consignes est effectué par un optimisateur à partir de données fournies par un modèle qui permet l'identification du procédé en cause. Le MPC de *DeltaV* utilise deux types de modèles pour l'identification du procédé : le FIR (Finite Impulse Response) et le ARX (Auto-Regressive with eXternal input) [77].

Des informations sur le fonctionnement des logiciels *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> et *DeltaV* sont respectivement élaborées dans les chapitres Simulation : outil logiciel *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> et Modélisation et contrôle : outil logiciel *DeltaV*.

#### 4.1 Parallèle entre la pyramide générique et l'exemple

En premier lieu, il importe de bien asseoir l'exemple sur la représentation du système de production qui est élaborée aux chapitres précédents, comme l'illustre la figure 4.2. La pyramide représente le procédé réel (en bleu, simulé ici par *CADSIM Plus™*) des niveaux contrôle régulateur, contrôle superviseur et la gestion du site et de l'usine. La portion de gauche représente en violet les MPC (optimisateurs et les modèles FIR et ARX) qui résident dans *DeltaV* et en blanc les PID. Les graphiques à droite de la pyramide illustrent la cascade des horizons de prédiction en des horizons de contrôle.

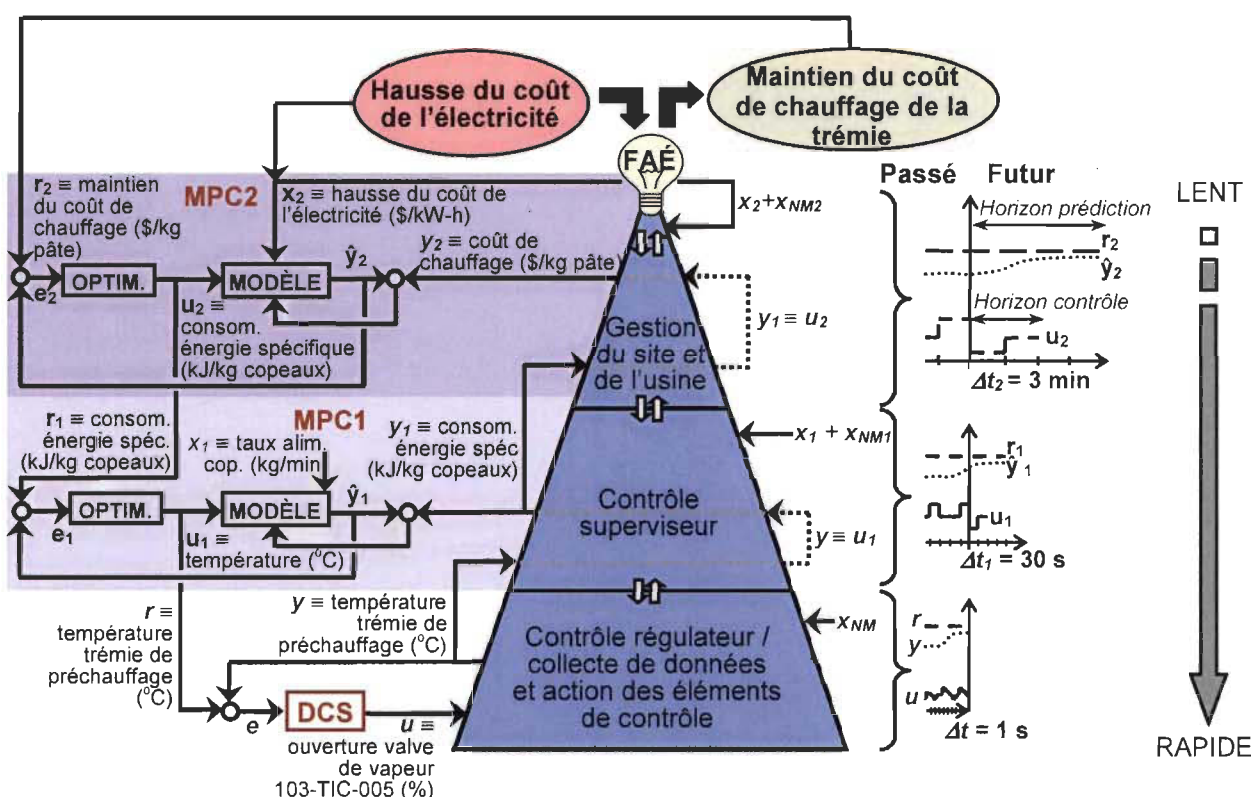


Figure 4.2 Représentation de l'exemple basée sur la pyramide générique de l'entreprise

Dans le cas présent, le nombre de niveaux de production a été réduit à trois : gestion du site et de l'usine, contrôle superviseur et contrôle régulateur/collecte de données et action des éléments de contrôle. La perturbation ( $x_2$ ) à laquelle est soumise ce système provient de la fluctuation du coût de l'électricité ; l'objectif à atteindre (traduit sous



forme de consigne,  $r_2$ ) est le maintien du coût de préchauffage à la trémie. Le MPC du niveau supérieur, MPC2, vise donc à maintenir le coût de préchauffage dans la trémie ( $\hat{y}_2$ ) en manipulant la consommation d'énergie spécifique dans cette dernière ( $u_2$ ). L'échelle de temps associée à ce niveau ( $\Delta t_2$ ) est de trois minutes.

Le MPC du niveau inférieur, MPC1, reçoit cette série de mouvements de contrôle ( $u_2$ ) en tant que point de consigne ( $r_1$ ). Pour maintenir sa prédiction d'énergie spécifique ( $\hat{y}_1$ ), MPC1 manipule la température dans la trémie de préchauffage ( $u_1$ ). L'échelle de temps associée ( $\Delta t_1$ ) est de 30 secondes.

Finalement, le contrôle régulateur (ici appelé DCS par opposition à MPC), reçoit point par point sa valeur de consigne ( $r$ ) provenant de MPC1, soit la température de la trémie de préchauffage. Afin de suivre la consigne et d'atteindre la température requise dans la trémie ( $y$ ), le DCS manipule alors l'ouverture de la valve de vapeur 103-TIC-005 ( $u$ ). L'échelle de temps associée à ce niveau ( $\Delta t$ ) est d'une seconde.

#### 4.2 Variables PPP à l'étude dans l'exemple

Basé sur la figure 4.2, le tableau 4.1 présente les variables PPP associées à l'exemple de la boucle de température.

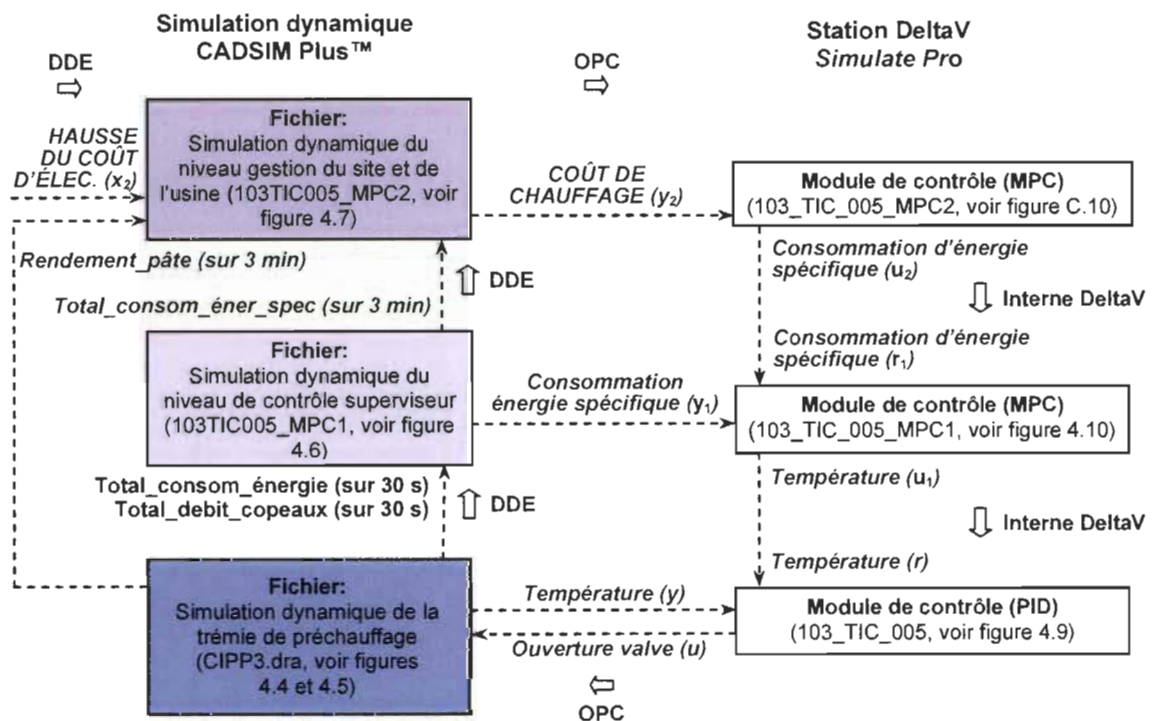
**Tableau 4.1 Variables PPP associées à boucle de température de la trémie de préchauffage**

GESTION DU SITE ET DE L'USINE (MPC2)		
Variables produit	Variables procédé	Variables production
N.A.	N.A.	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Coût de préchauffage à la trémie (<math>r_2</math> et <math>y_2</math>)</li> <li>· Consommation d'énergie spécifique à la trémie de préchauffage (<math>u_2</math>)</li> <li>· Fluctuation du coût de l'électricité (<math>x_2</math>)</li> </ul>
CONTRÔLE SUPERVISEUR (MPC1)		
Variables produit	Variables procédé	Variables production
N.A.	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Température dans la trémie de préchauffage (<math>u_1</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Consommation d'énergie spécifique à la trémie de préchauffage (<math>r_1</math> et <math>y_1</math>)</li> </ul>



CONTRÔLE RÉGULATEUR / COLLECTE DE DONNÉES ET ACTION DES ÉLÉMENTS DE CONTRÔLE (DCS)		
Variables produit	Variables procédé	Variables production
N.A.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Température dans la trémie de préchauffage (<math>r</math> et <math>y</math>)</li> <li>Ouverture de la valve de vapeur 103-TIC-005 (<math>u</math>)</li> </ul>	N.A.

La figure 4.3 reprend partiellement la figure 3.8 et offre un résumé des principales variables faisant l'objet de communication inter et intra *CADSIM Plus™* et *DeltaV* dans le cadre de l'exemple d'implantation.



**Figure 4.3** Principales variables associées à l'exemple d'implantation faisant l'objet de la communication entre *CADSIM Plus™* et *DeltaV*

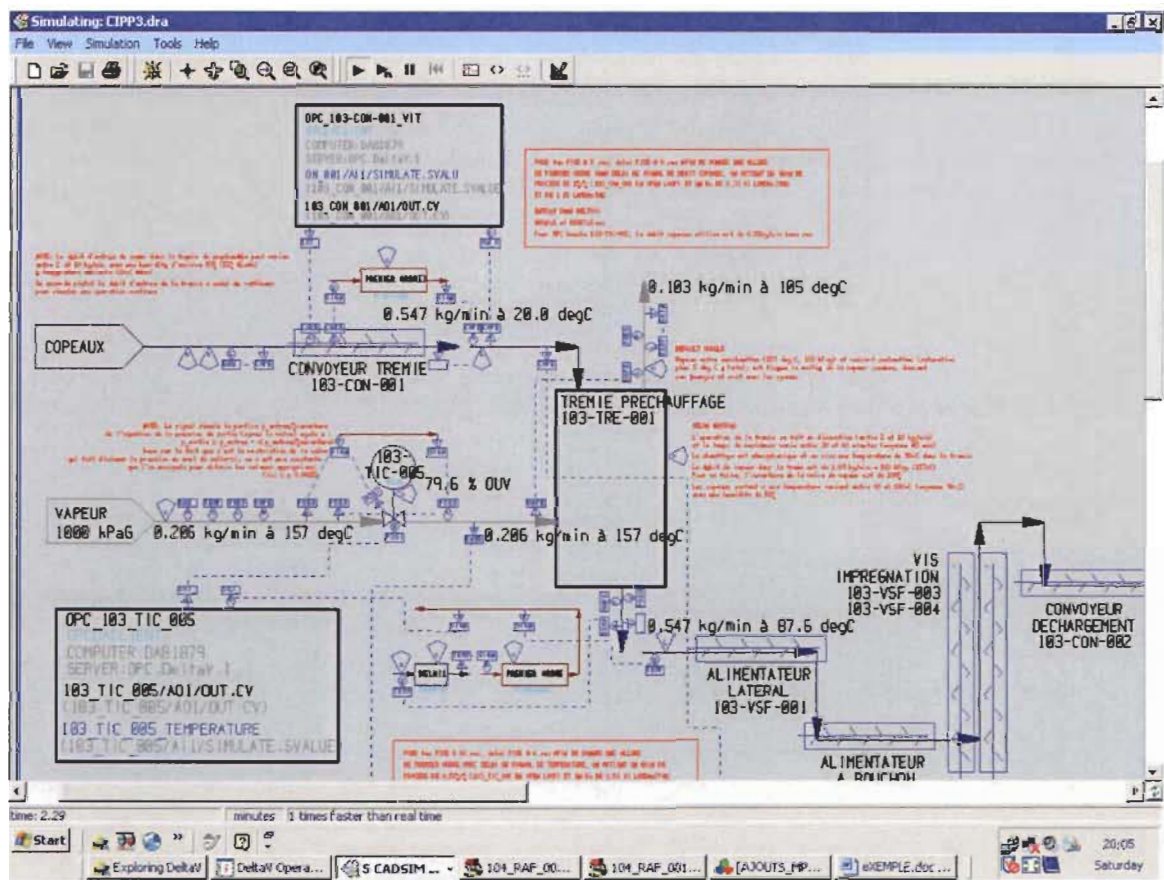
#### 4.3 Simulation du procédé à l'aide de *CADSIM Plus™*

Le logiciel *CADSIM Plus™* permet d'une part de simuler le fonctionnement des équipements et instruments de l'usine associés au niveau de production « contrôle régulateur/collecte de données et action des éléments de contrôle » (fichier CIPP3.dra).

D'autre part, il fournit aux variables de plus haut niveau (contrôle superviseur – fichier 103TIC005\_MPC1.dra et gestion du site et de l'usine – fichier 103TIC005\_MPC2.dra) la représentation logique essentielle à leur traitement dans *DeltaV*.

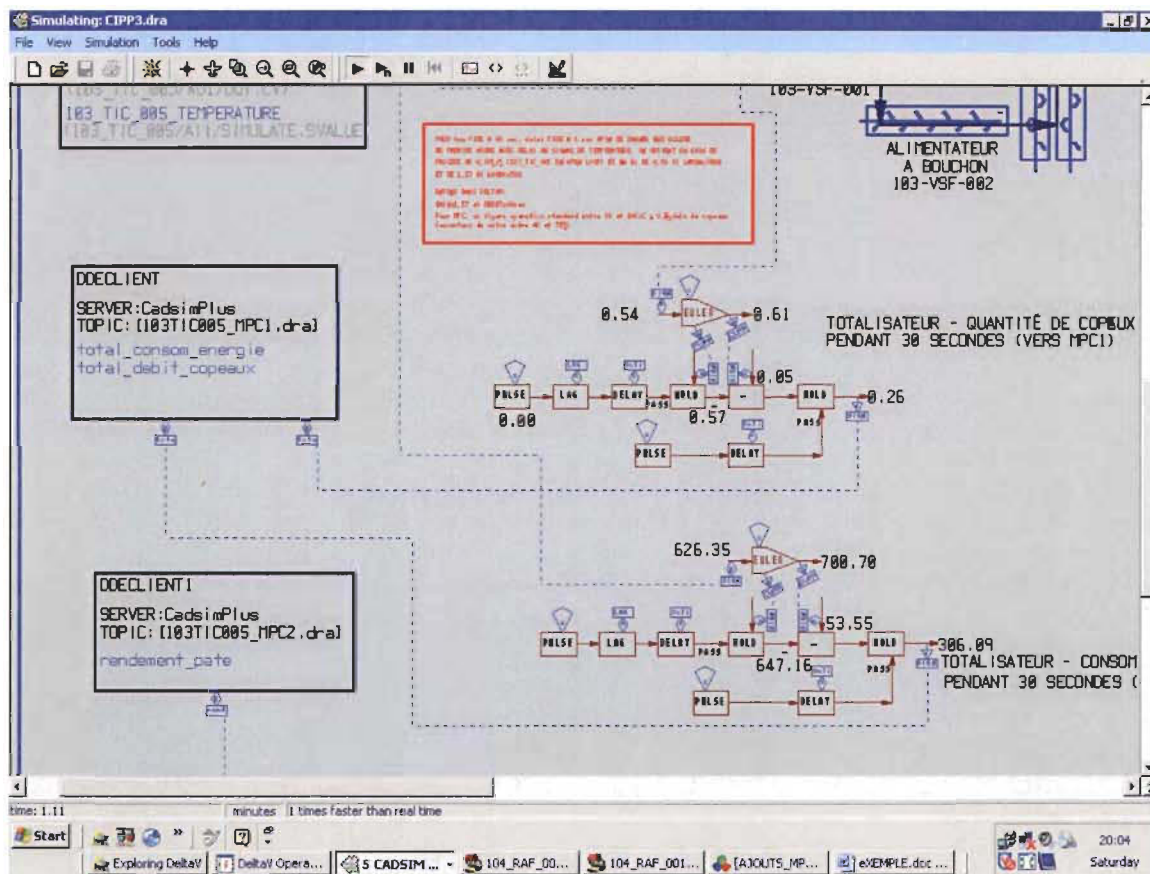
### 4.3.1 Niveau du contrôle régulateur de procédé

Cette section porte sur la description de la simulation du procédé associée à la trémie de préchauffage et décrit le mode de communication entre les fichiers de simulation *CADSIM Plus™* et entre *CADSIM Plus™* et *DeltaV*, lequel permet l'interopérabilité entre les niveaux de production. La figure 4.4 montre la portion de simulation de *CADSIM Plus™* touchant la boucle de température 103-TIC-005 décrite précédemment.



**Figure 4.4** Page écran de la simulation de la trémie de préchauffage dans *CADSIM Plus™* - portion de la boucle de température

La boucle de contrôle régulateur de température, 103-TIC-005, est la boucle DCS de la figure 4.2. Les communications DDE entre les fichiers de simulation *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> (CIPP3.dra), MPC1 (103TIC005\_MPC1.dra) et MPC2 (103TIC005\_MPC2.dra) et OPC entre les fichiers *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> et *DeltaV* sont représentées aux figures 4.4 et 4.5 sous forme d'encadrés dont le nom indique la fonction : DDECLIENT (lien avec 103TIC005\_MPC1.dra), DDECLIENT1 (lien avec 103TIC005\_MPC2) et OPC\_103\_TIC\_005 (lien avec *DeltaV*).



**Figure 4.5** Page écran de la simulation de la trémie de préchauffage dans *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> - portion des totalisateurs

Tel qu'illustré à la figure 4.2, l'échelle de temps est différente entre les trois niveaux de production associés à l'exemple et c'est pourquoi un fichier de simulation distinct est lié à chacun de ces niveaux. Cette différence dans les échelles de temps est concrétisée dans les fichiers *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> grâce à la conception d'un module totalisateur. Ce module

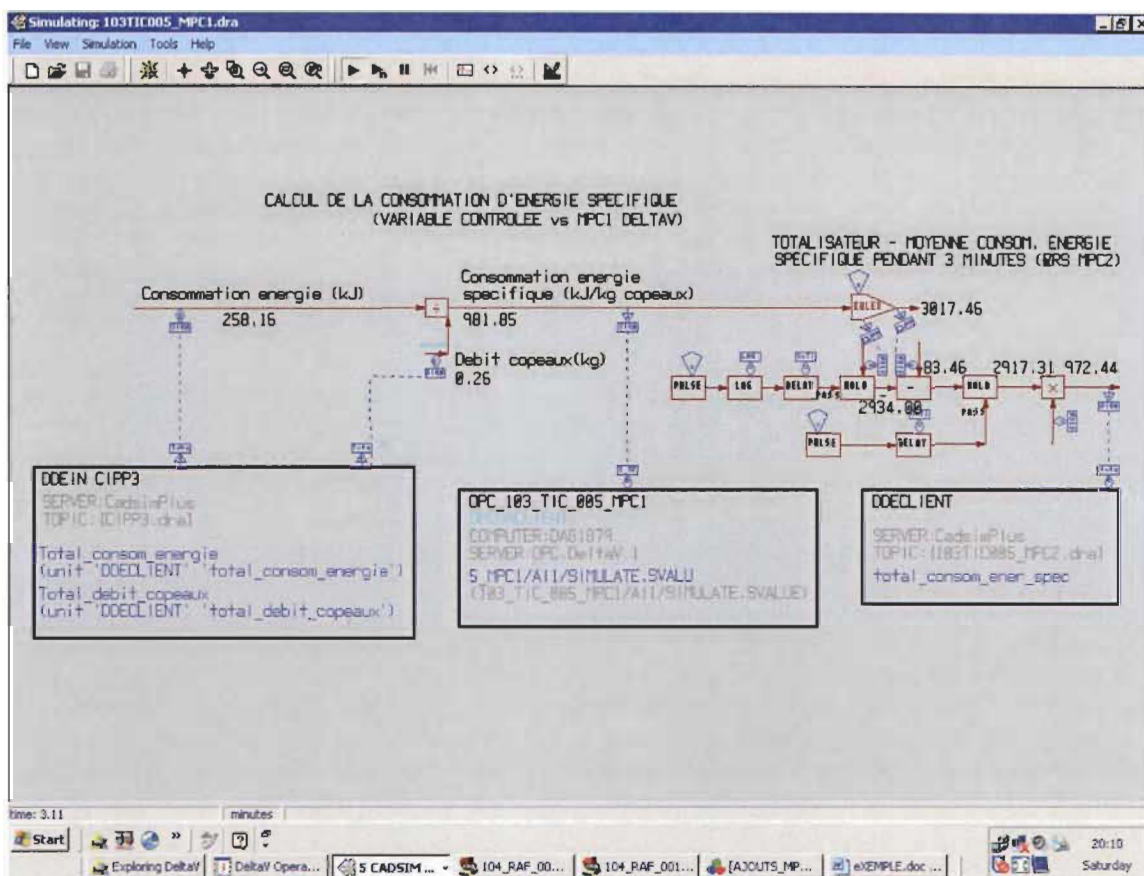
permet de totaliser, pendant une période définie (30 secondes ou trois minutes) une variable PPP qui doit être acheminée à un fichier de simulation de niveau supérieur. Ce dernier reçoit donc des valeurs à une fréquence fixée par son intervalle de temps et génère des résultats à cette même fréquence. La figure 4.5 montre deux totalisateurs. Le totalisateur de quantité de copeaux par exemple permet de faire la sommation des valeurs de débit de copeaux calculées par la simulation pendant trente secondes. La sommation est ensuite dirigée vers le fichier 103TIC005\_MPC1.dra qui utilise cette variable dans ses calculs. Le fonctionnement du module totalisateur est détaillé à la section 5.3 Totalisateurs.

Afin de fixer le taux d'exécution d'un fichier, *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> possède un paramètre appelé « Time step ». Dans tous les fichiers utilisés ici, ce paramètre est fixé à une seconde. Un autre paramètre, le « Percentage of real time » permet de modifier la vitesse d'exécution de la simulation, tout en conservant la valeur du « time step », soit en l'accélérant ou en la ralentissant. Cette fonctionnalité ne sera pas utilisée pour la recherche puisque le but est d'implanter en temps réel les deux niveaux de MPC.

#### **4.3.2 Niveau du contrôle superviseur**

Les variables gérées par le niveau MPC1 (et MPC2, section suivante) sont de plus haut niveau que celle associées au procédé simulé de la section précédente. En effet, ces variables PPP ne peuvent généralement pas être enregistrées et traitées comme celles du niveau régulateur puisqu'elles expriment des concepts pouvant être notamment issus de calculs et qui ne se mesurent donc pas directement. Ceci donne aux fichiers *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> associés une allure différente où la représentation physique d'équipements ou d'instruments n'est pas nécessaire. La communication se fait de la même façon que précédemment. La figure 4.6 représente la page écran du fichier de simulation 103TIC005\_MPC1.dra associée au niveau superviseur.





**Figure 4.6** Page écran de la simulation du niveau superviseur (MPC1) dans *CADSIM Plus™*

### 4.3.3 Niveau de la gestion du site et de l'usine

La figure 4.7 montre la page écran de la simulation associée au MPC du niveau supérieur, ici gestion du site et de l'usine (MPC2).

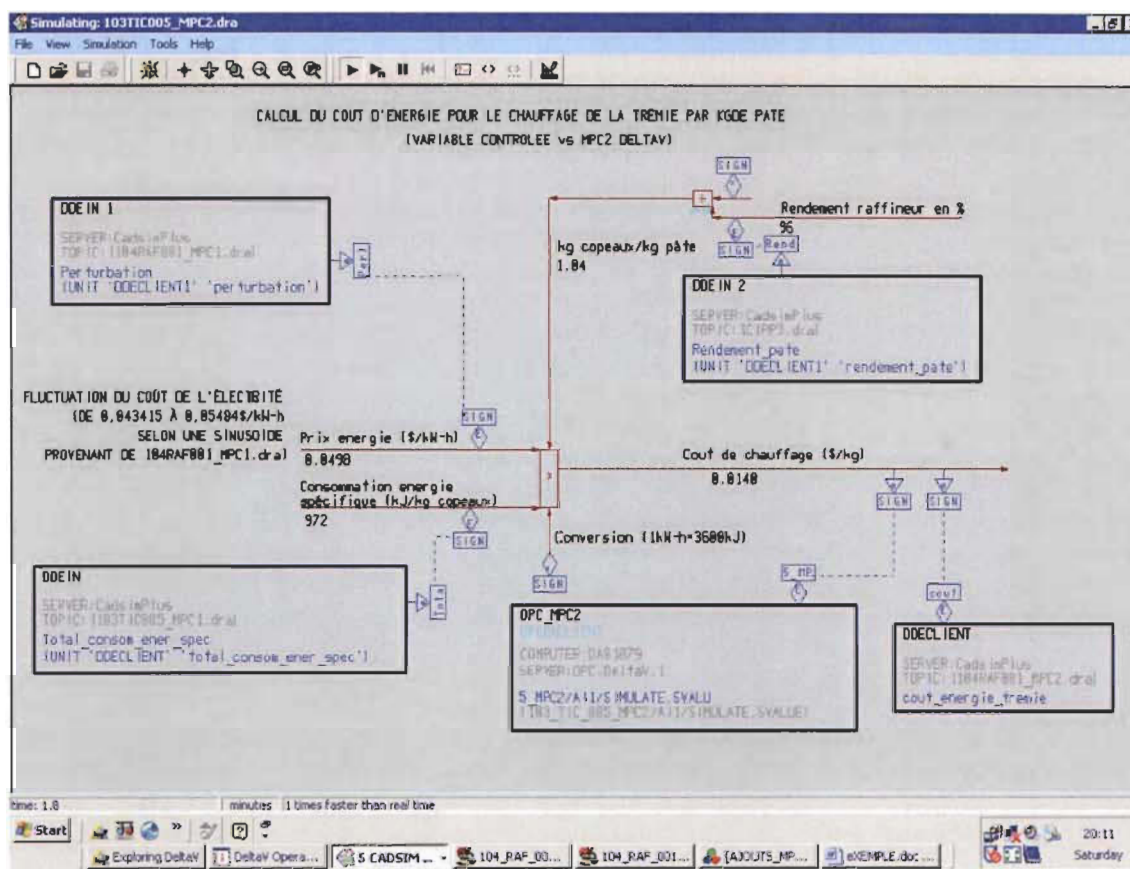


Figure 4.7 Page écran de la simulation du niveau gestion du site et de l'usine (MPC2) dans *CADSIM Plus*<sup>TM</sup>

#### 4.4 Boucles de contrôle *DeltaV*

Dans *DeltaV*, la configuration s'effectue à l'aide d'une application nommée *Control Studio*. Les prochaines sections en font une description limitée aux points nécessaires à la compréhension de l'implantation de la méthodologie. C'est par le biais de *DeltaV* que s'effectue le contrôle régulateur du procédé, comme à l'usine pilote. C'est aussi dans *DeltaV* que résident les contrôleurs MPC nécessaires à l'implantation du contrôle avancé et de la stratégie FAÉ. Le chapitre Modélisation et contrôle : outil logiciel *DeltaV* traite de certains aspects techniques de *DeltaV*.

La figure 4.8 représente l'écran d'opération associé à la boucle de température de la tremie de préchauffage de l'application *DeltaV Operate*. La portion de la page écran

mise à profit dans le cadre de l'exemple consiste en la boucle de température 103\_TIC\_005 et la valve associée.

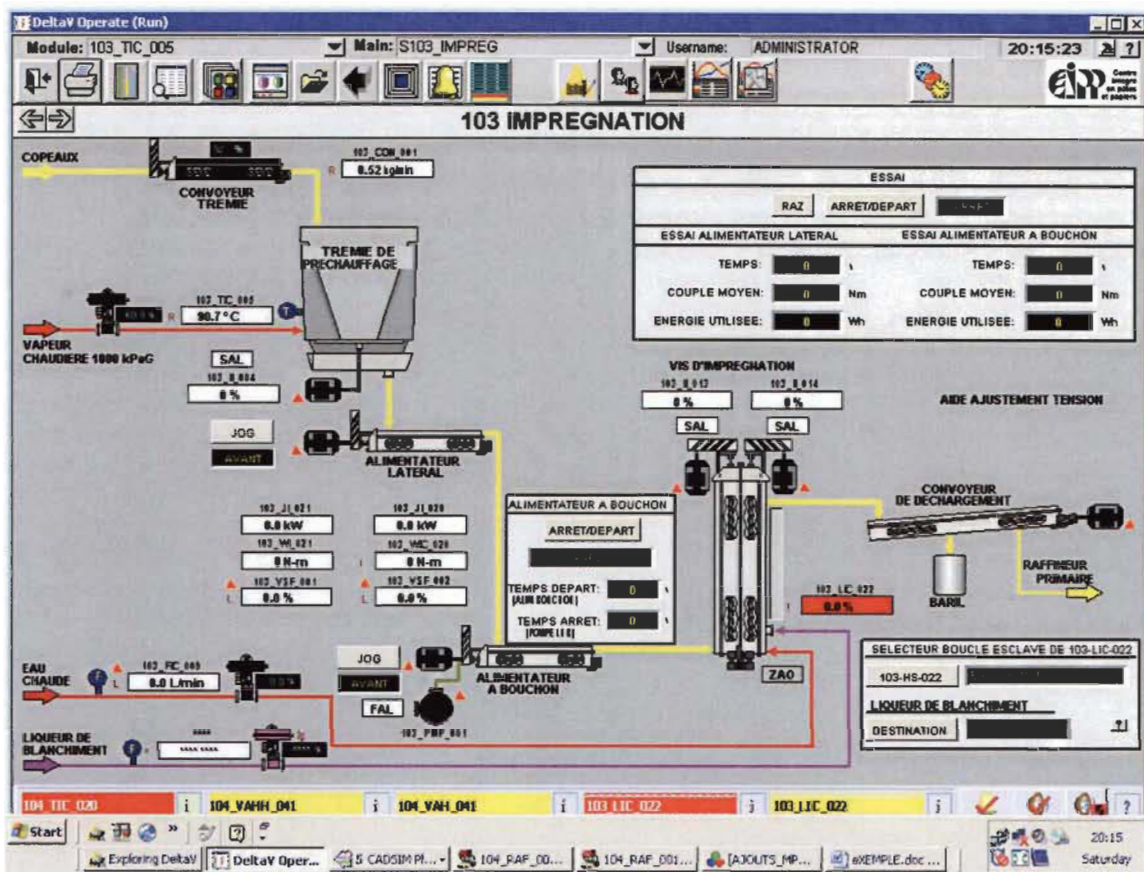


Figure 4.8 Page écran d'opération de la trémie de préchauffage dans *DeltaV*

#### 4.4.1 Niveau du contrôle régulateur de procédé

La figure 4.9 montre la page écran associée à la configuration de la boucle de contrôle 103-TIC-005 dans *Control Studio*. Il s'agit, à quelques modifications mineures près, de la même configuration que celle actuellement en vigueur au CIPP. Au CIPP, l'entrée IN du bloc PID1 reçoit un signal de température provenant d'une sonde de température via un bloc AI (« Analog Input »). La configuration de la station *Simulate Pro* est légèrement modifiée afin que le bloc AI reçoive ce signal de température non pas d'un instrument de champs, mais du logiciel *CADSIM Plus*<sup>TM</sup>. De la même façon, le signal de sortie du bloc PID1, qui passe par un bloc AO (« Analog Output »), n'est pas dirigé vers

la valve réelle 103-TIC-005 mais est plutôt retourné vers la valve virtuelle dans *CADSIM Plus*<sup>TM</sup>.

Le bloc PID1 constitue donc la composante principale de la boucle de contrôle. Un clic sur ce bloc permet d'accéder à tous les paramètres qui y sont associés, soit les paramètres d'alarmes (« alarm »), de réglage (« tuning »), d'opération (« operating ») et d'entrées/sorties (« I/O ») (voir la fenêtre de gauche de la figure 4.9). C'est à ce niveau que sont entrés notamment les paramètres de réglage du contrôleur tirés de la dynamique du procédé.

The screenshot shows the configuration interface for the PID103-TIC-005 module. The main area displays a ladder logic diagram with the following components and connections:

- PID103**: The central control block. Its **IN** is connected to the **OUT** of the **AO1** block. Its **OUT** is connected to the **IN** of the **AO1** block. The **OUT** value is 61.8665.
- AO1**: Analog Output block. Its **IN** is 90.134 and its **OUT** is 61.8665.
- INTERLOCK** blocks: **INTERLOCK1** and **INTERLOCK2** are connected to the **IN** of the PID block.
- CALC** block: **CALC1** is connected to the **IN** of the PID block.
- DEV** block: **DEV1** is connected to the **OUT** of the PID block.

On the left, the parameter list is filtered by 'Operating' and shows the following values:

Parameter	On-line value
PV_FTME	0
PV_SCALE	0.0 to 100.0
RATE	0
RESET	60
SHED_OPT	Normal she.
SHED_TIME	0
SIMULATE	Disabled, 0
SP_FTME	0
SP_HI_LIM	100
SP_LO_LIM	80
SP_RATE...	0
SP_RATE...	0
STATUS...	Non-zero
STRUCTURE	Fraction on
TRACK_O...	Use last Go
TRK_SCALE	0.0 to 100.0
BIAS	0
BYPASS	Off
ERROR	-0.0136642
FIELD_VAL	0
MODE	Remote cas
OUT	61.8665
OUT_REA...	61.8771
PV	90.1477
SP	90.134
SP WRK	90.134

At the bottom, the alarm table is displayed:

Alarm	Vendor	State	Parameter	Limit value	Enable	Inverted	Priority	%P1 parameter	%S2 parameter
DEVIATION...	Probleme: valve...	Inactive	DEVIATION		No	No	AVER...	PID1/PV	PID1/DV_H_LIM
DV_HI_ALM	DEV	Inactive	PID1/DV_HI_ACT	0	Yes	No	AVER...	PID1/PV	PID1/DV_H_LIM
DV_LO_ALM	DEV	Inactive	PID1/DV_LO_ACT	0	Yes	No	AVER...	PID1/PV	PID1/DV_LO_LIM
HI_ALM	HIGH	Inactive	PID1/HI_ACT	95	Yes	No	AVER...	PID1/PV	PID1/H_LIM

Figure 4.9 Page écran de la configuration du module de contrôle du PID 103-TIC-005 dans *DeltaV*



#### 4.4.2 Niveau du contrôle superviseur

La figure 4.10 montre la page écran de la configuration, dans *Control Studio*, du module associé au premier niveau de MPC de l'exemple de la boucle de température. Le bloc *MPC-Pro* constitue l'élément principal de ce module. Le module reçoit par le biais du bloc AI1 le signal de consommation d'énergie spécifique ( $y_1$  ou PRO\_OUT1 dans *DeltaV*) qui provient du fichier 103TIC005\_MPC1.dra de *CADSIM Plus™* (se référer à la figure 4.3). Le bloc MPC-PRO prend action sur la température ( $u_1$ , PRO\_IN1 « browsé » à l'intérieur du bloc) qui est en fait le point de consigne (SP) du bloc PID1 du module de contrôle 103\_TIC\_005 (voir la figure 4.9).

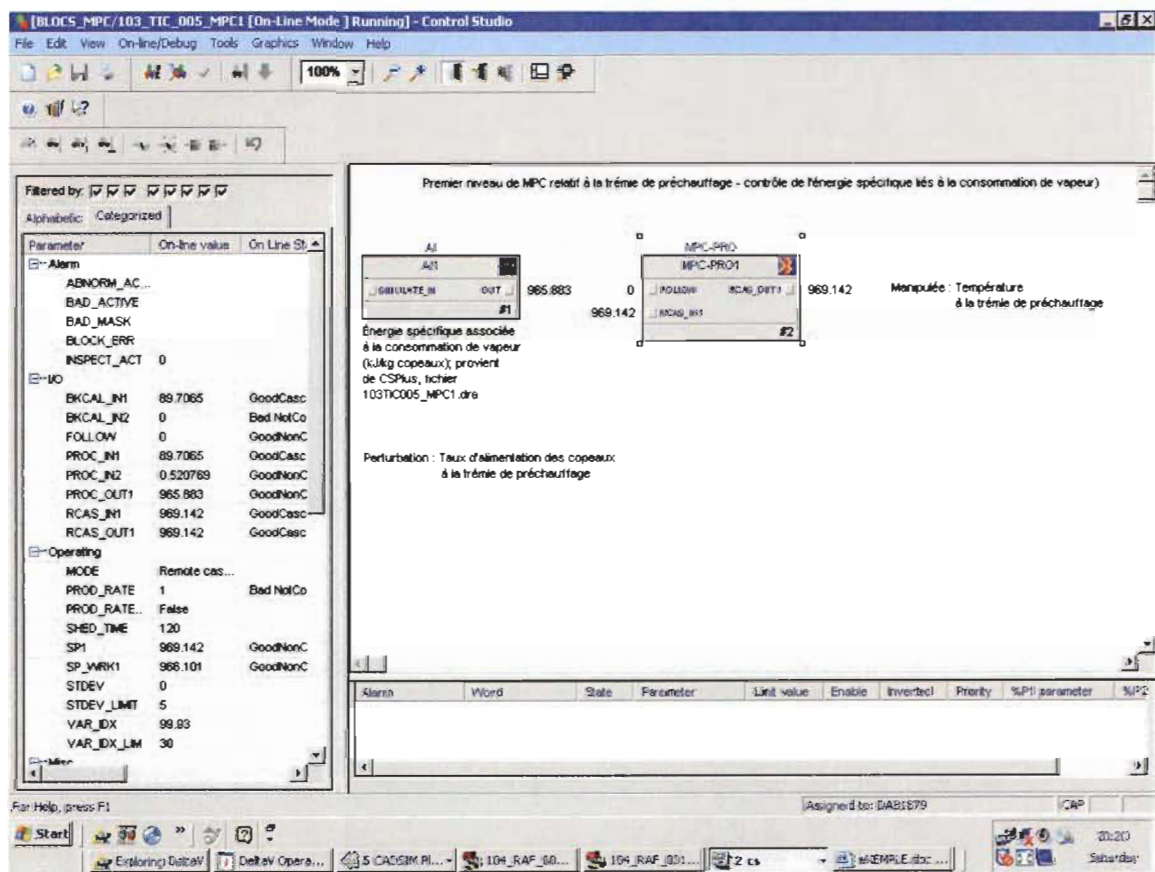


Figure 4.10 Page écran de la configuration du module de contrôle 103\_TIC\_005\_MPC1 dans *DeltaV*

#### 4.4.2.1 Détermination du modèle

Tel que décrit à la section 3.3, les MMPC font utilisation d'un modèle de prédiction qu'il faut établir. La détermination des modèles associés aux blocs MPC de *DeltaV* s'effectue grâce à l'application *Predict Pro*. Une fois le modèle généré par *Predict Pro*, il est chargé (généré) dans le bloc *MPC-Pro*, ce qui permet à ce dernier d'accomplir ses fonctions d'optimisation et de modélisation. La figure 4.11 présente le tracé de la variable contrôlée générée par le modèle relativement au tracé « réel » de la variable contrôlée (données utilisées pour générer le modèle). La figure 4.12 montre par ailleurs le modèle de la variation de la variable contrôlée (énergie spécifique) face à une perturbation de la variable manipulée (température). Au bas de la figure sont affichés les paramètres qui caractérisent la réponse d'énergie spécifique du procédé face à cette perturbation de température. Le même type de tracé peut aussi être obtenu pour une contrainte.

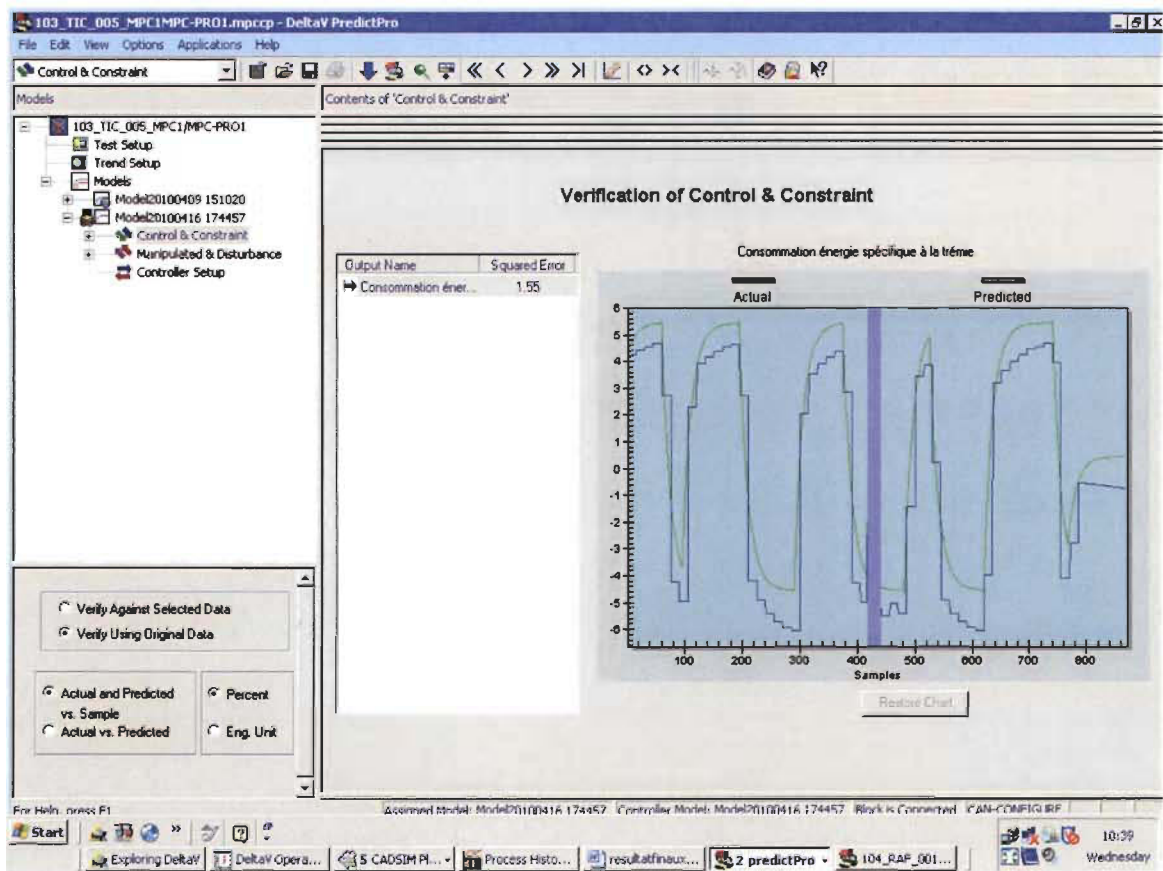


Figure 4.11 Page écran 1 du modèle associé à MPC1 dans *DeltaV*

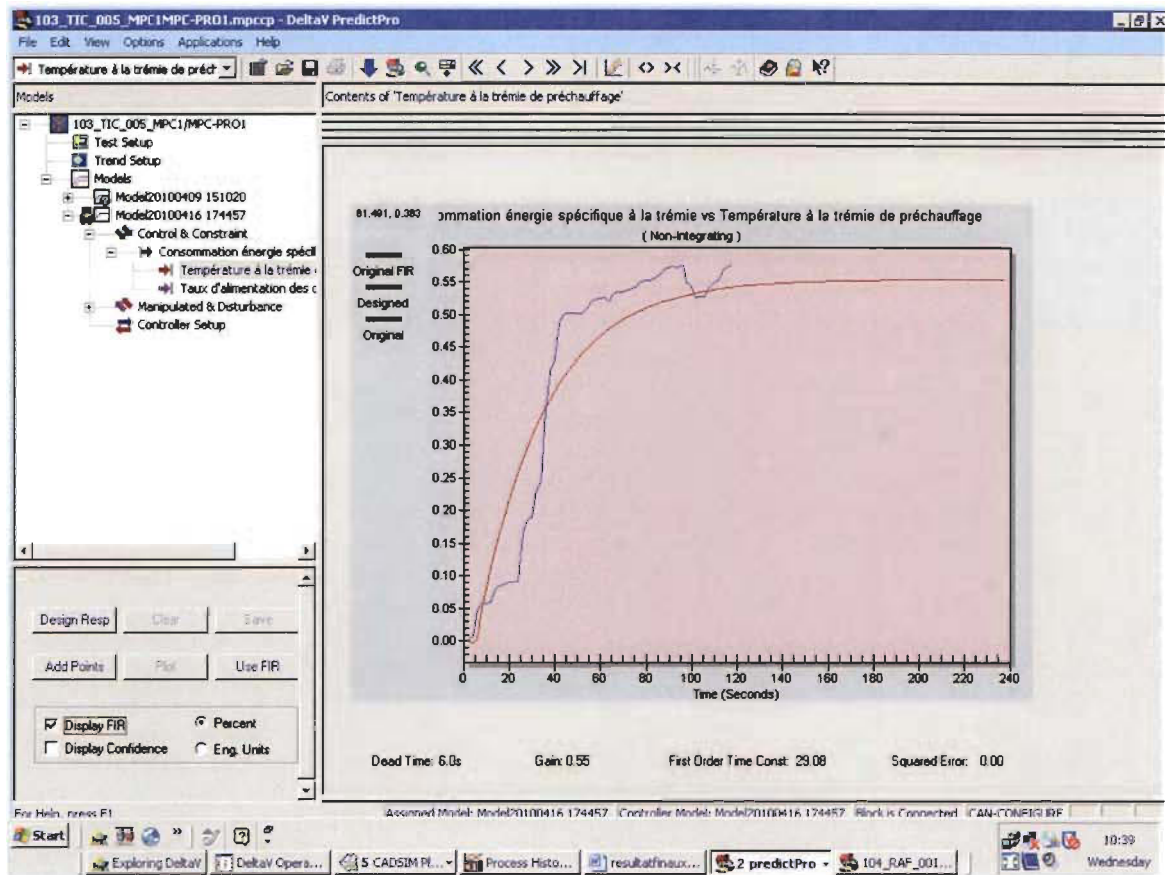


Figure 4.12 Page écran 2 du modèle associé à MPC1 dans *DeltaV*

#### 4.4.3 Niveau de la gestion du site et de l'usine

Le principe est le même pour le deuxième niveau de MPC, tant pour la configuration que pour la modélisation, à l'exception du fait que le bloc *MPC-Pro* du niveau supérieur cascade la consigne au paramètre *RCAS\_IN* du bloc *MPC-Pro* du niveau inférieur.

#### 4.5 Mode de quantification et identification des VS et TS

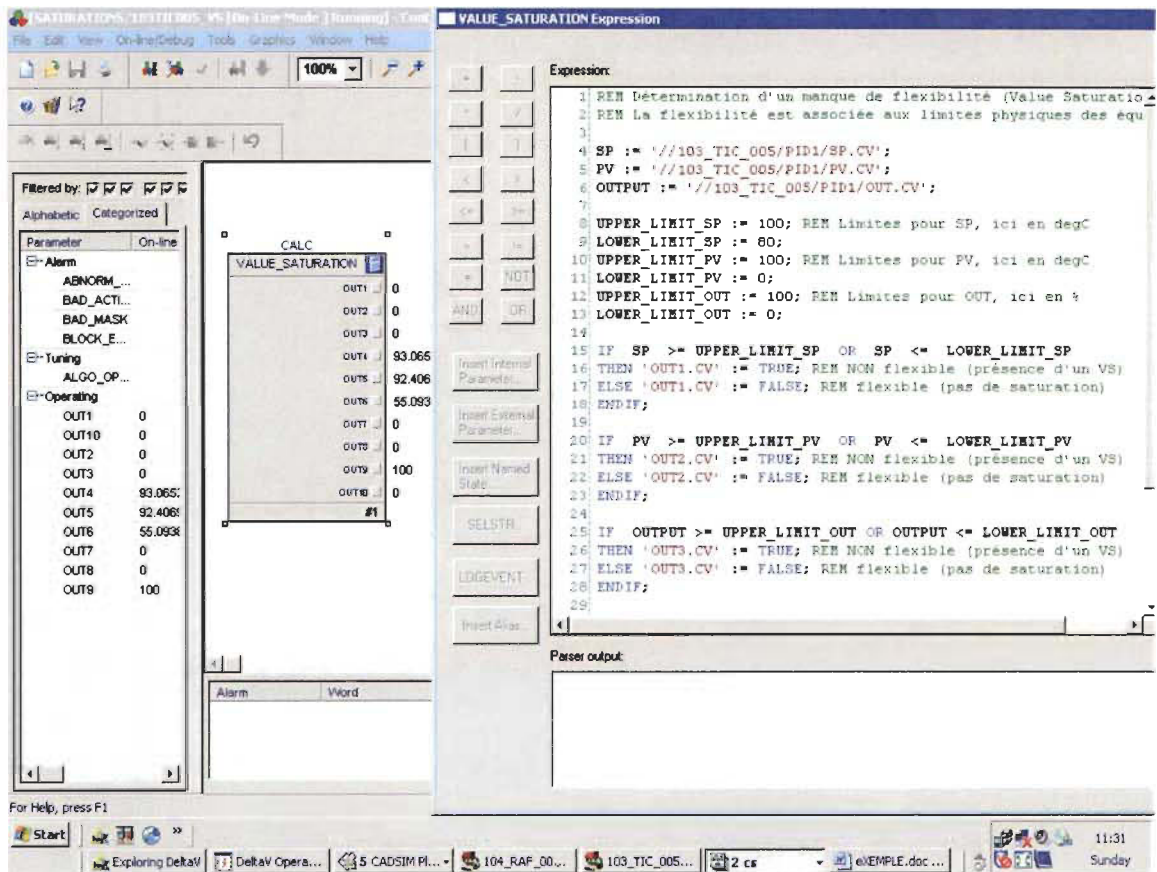
Lorsque les modèles sont chargés dans les contrôleurs, il est possible de démarrer les fichiers de simulation, de mettre les contrôleurs MPC en mode automatique (ou Remonte Cascade) et d'observer le comportement du système lors de fluctuations de la perturbation globale (coût d'électricité). C'est ici que s'insère l'évaluation de la flexibilité et de l'agilité des boucles DCS, MPC1 et MPC2 de l'exemple à l'étude. L'intégration et la quantification des concepts de flexibilité et d'agilité dans le DCS sont

possibles grâce aux énoncés des équations 3.1 et 3.2. Ces énoncés ont été développés par le biais de blocs CALC pour être intégrés au DCS. Ils font l'objet de modules distincts, un pour la flexibilité (VS) et un pour l'agilité (TS) et ce, pour chacune des boucles de contrôle du procédé à l'étude. Le suivi des saturations sur le temps et sur la valeur se fait en temps réel par le biais de l'application *Process History View* de *DeltaV* où les tracés des variables peuvent être visualisés. Toutes les variables générées par les blocs de fonction de *DeltaV* pouvant être archivées, l'observation et l'analyse des VS et TS peuvent aussi se faire par le biais d'autres logiciels de traitement de données tel *Excel*.

Le calcul effectué par les blocs CALC permet de retourner une valeur de 0 ou 1, selon qu'il y a respectivement absence ou présence de saturation. Les figures 4.13 et 4.14 montrent la programmation commentée associée à l'évaluation de la flexibilité et de l'agilité afin d'en fournir une référence exacte. Dans le cas de la flexibilité, une limite basse et une limite haute sont fixées pour chacune des variables PPP de la boucle de contrôle, soit les variables contrôlées, manipulées, les points de consigne et les contraintes. Dans le cas de l'agilité, seulement la variable contrôlée est suivie et c'est le TSS et la tolérance qui sont fixés. La programmation des TS est plus complexe puisqu'elle inclut un compteur lié au TSS qui, suite à un changement de point de consigne, est remis à zéro pour laisser au procédé le temps d'atteindre son état stable avant d'évaluer s'il manque ou non d'agilité.

La figure 4.13 montre la programmation du module de contrôle de l'évaluation de la flexibilité des variables de la boucle de contrôle de température. Le bloc CALC (VALUE\_SATURATION) de la figure 4.13 présente dix sorties (OUT) dont la valeur réfère à l'expression (langage structuré) entrée dans le bloc. Ainsi, lorsque la variable à l'étude présente un manque de flexibilité, la sortie qui lui est associée retourne un 1 (« TRUE ») alors qu'elle retourne un 0 (« FALSE ») dans le cas où la variable est flexible. Parmi les dix sorties, les trois premières sont directement associées aux VS : OUT1 est la flexibilité associée au point de consigne, OUT2 est celle associée à la variable contrôlée et OUT3 est la flexibilité de la variable manipulée.





**Figure 4.13** Page écran de la configuration associée au calcul de la flexibilité (VS) de la boucle de température dans *DeltaV*

La configuration des TS est aussi faite dans des modules distincts pour chacune des boucles de contrôle, à l'aide de blocs CALC. La figure 4.14 montre le module de contrôle de l'évaluation de l'agilité de la boucle de température 103-TIC-005 à l'étude. De la même façon que précédemment, un manque d'agilité fait retourner à OUT1 un 1 alors que lorsque la variable contrôlée est agile, OUT1 retourne un 0. Les autres paramètres de sortie permettent de faciliter le suivi du processus d'évaluation du bloc CALC.

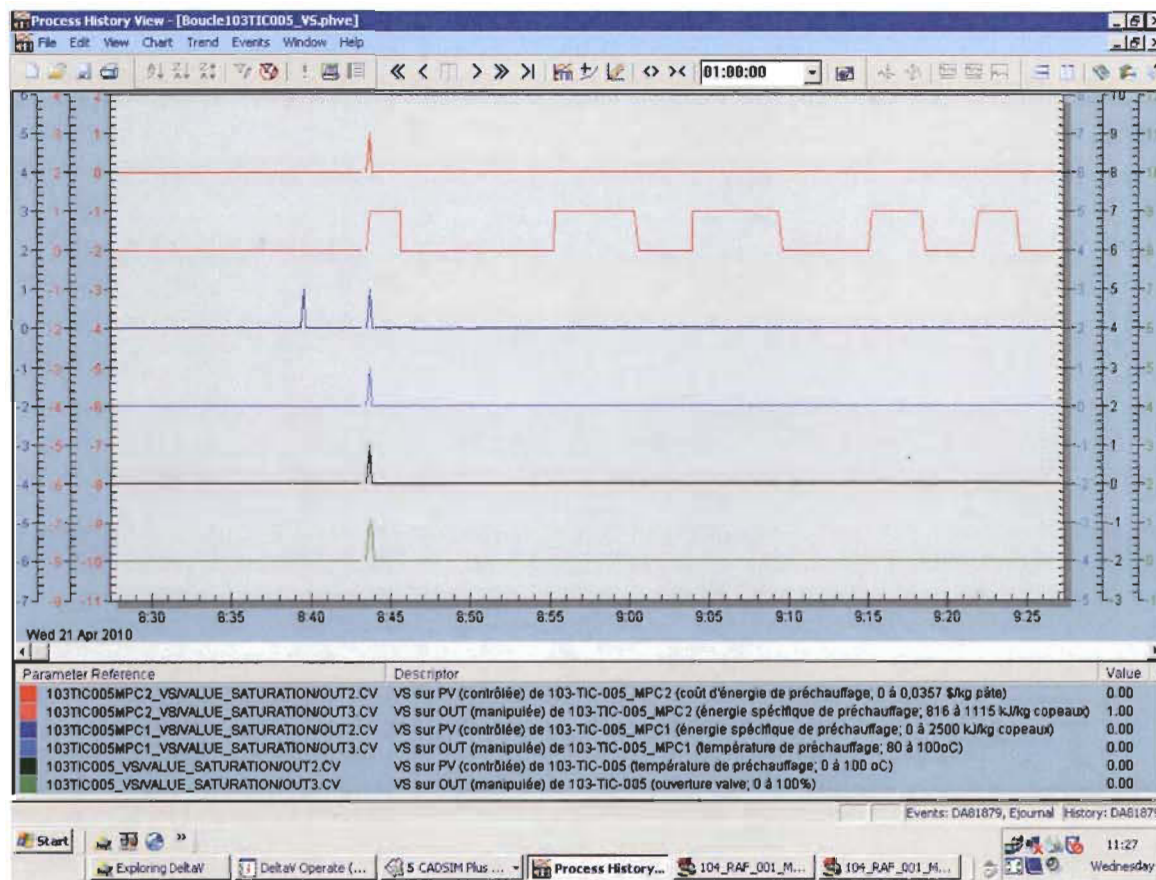
```

Expression
1 REM : DETERMINATION D'UN NIVEAU D'AGILITE (TIME SATURATION)
2
3
4 SP := '//103_TIC_005/PID1/SP.CV';
5 PV := '//103_TIC_005/PID1/PV.CV';
6 OFFSET := abs ('//103_TIC_005/PID1/SP.CV' - '//103_TIC_005/PID1/PV.CV');
7
8 REM Les paramètres TOLERANCE, ERR, SCAN_RATE et TSS doivent être évalués pour chaque
9 REM boucle de contrôle
10
11 TOLERANCE := 1; REM Marge d'erreur ABSOLUE (variabilité en unités d'ingenierie, ici °C)
12 REM tolérée autour du point de consigne (SP)
13 ERR := 0.005; REM Sensibilité RELATIVE visant à déterminer s'il y a eu changement de SP
14 SCAN_RATE := 1; REM (secondes - le bloc est scanné à tous les SCAN_RATE secondes),
15 REM propriété du bloc (PROPERTIES/EEXECUTION), plus la boucle a un long TSS,
16 REM plus SCAN_RATE devrait être élevé afin que l'intervalle entre les flags
17 REM soit plus grand
18 TSS := 246 / SCAN_RATE; REM (secondes) Time to Steady State = 4* $\tau$  + délai, divisé
19 REM par SCAN_RATE pour le conserver à sa vraie valeur
20
21 PAST_PREVIOUS_FLAG := PAST_FLAG;
22 PAST_FLAG := CURRENT_FLAG;
23
24
25 IF abs((P_SP - SP)/SP) <= ERR REM Si le point de consigne est stable, on peut évaluer
26 REM si contrôlée est agile ou non
27 THEN
28   IF SCAN >= 0 AND SCAN < (TSS) REM Si le système n'a pas encore atteint son TSS
29   THEN 'OUT1.CV' := FALSE; REM On ne contrôle pas l'agilité avant 4* $\tau$  après changement
30   REM de point de consigne
31   FLAG := FALSE; REM On veut garder une trace de la saturation pour chaque scan
32   ELSE REM Si par contre le système a atteint/dépasse son TSS
33   IF OFFSET > TOLERANCE REM Et si l'écart entre SP et PV est plus grande que la variabilité
34   THEN FLAG := TRUE; REM Alors il y a présence de "time saturation" donc non-agile (=1)
35   ELSE FLAG := FALSE; REM Sinon, absence de "time saturation" donc agile (=0)
36   ENDIF;
37   REM Après 4* $\tau$ , on calcule la moyenne d'agilité (valeur entre 0 et 1) qui est
38   REM constituée de l'addition des valeurs des flags divisées par le nombre de scans:
39   PREVIOUS_SUM := SUM; REM On assigne à PREVIOUS_SUM la valeur de SUM afin de garder
40   REM celle-ci en mémoire avant d'en changer la valeur
41   SUM := PREVIOUS_SUM + FLAG; REM La nouvelle valeur de SUM inclut celle du flag en vigueur
42   AVERAGE := SUM / (SCAN - (TSS)); REM On calcule la moyenne basée sur le nombre de
43   REM scans depuis l'atteinte du TSS afin de savoir si on
44   REM tend vers l'agilité ou la non-agilité
45   CURRENT_FLAG := ROUND (AVERAGE); REM On assigne à CURRENT_FLAG la valeur arrondie de
46   REM la moyenne afin d'avoir 0 ou 1
47   IF (CURRENT_FLAG = TRUE) AND (PAST_FLAG = TRUE) AND (PAST_PREVIOUS_FLAG = TRUE)
48   THEN 'OUT1.CV' := TRUE; REM Trois flags successifs de dépassement du OFFSET impliquent
49   REM Time saturation (non agile)
50   ELSE 'OUT1.CV' := FALSE;
51   ENDIF;
52 ENDIF;
53
54 IF SCAN = TSS * 4 REM Après l'équivalent en temps de 4 fois le TSS, on remet SCAN
55 REM et SUM à "zéro" pour éviter tendance lourde de la moyenne
56 THEN SCAN := TSS; REM On se positionne après la limite des 4* $\tau$ 
57 SUM := 0; REM On remet la somme à zéro
58 ELSE
59 ENDIF;
60
61 ELSE
62 'OUT1.CV' := FALSE; REM Si erreur entre P_SP et SP plus grande que ERR alors c'est que
63 REM le point de consigne est en cours de modification et on attend
64 REM avant d'évaluer l'agilité
65
66 SCAN := 0;
67 SUM := 0;
68 ENDIF;
69
70 SCAN := SCAN + 1; REM On incrémente la valeur de SCAN
71
72 P_SP := SP; REM On assigne à P_SP la valeur actuelle de SP afin de pouvoir les comparer
73 REM au prochain scan.
74
75 'OUT2.CV' := PAST_PREVIOUS_FLAG; REM Pour que OUT1.CV soit TRUE (1) donc présence de TS
76 'OUT3.CV' := PAST_FLAG; REM ces trois flags doivent être à TRUE(1): sinon
77 'OUT4.CV' := CURRENT_FLAG; REM OUT1.CV est FALSE(0), non saturé sur le temps
78 'OUT5.CV' := FLAG; REM Entre dans le calcul de SUM
79 'OUT6.CV' := SUM; REM Somme des flags depuis le dernier reset de SCAN
80 'OUT7.CV' := SCAN; REM Inclut le TSS
81 'OUT8.CV' := AVERAGE; REM =SUM/(SCAN-TSS)
82 'OUT9.CV' := OFFSET; REM =abs(SP-PV)
83 'OUT10.CV' := TOLERANCE; REM Variabilité absolue permise

```

Figure 4.14 Page écran de la configuration associée au calcul de l'agilité (TS) de la boucle de température dans *DeltaV*

La figure 4.15 montre la représentation graphique des VS et TS associés à la boucle de température. Ces données sont archivées par l'historien *DeltaV* et disponibles pour la compilation et l'analyse.



**Figure 4.15** Représentation graphique des VS et TS associés à la boucle de température dans *DeltaV*

Les modules de contrôle des VS et TS des boucles MPC1 et MPC2 sont similaires. Aucune analyse des résultats n'est effectuée dans le cadre du présent chapitre puisque le but était d'illustrer le mode d'implantation de la stratégie FAÉ à l'aide d'un exemple, ce qui a été fait.

## Chapitre 5 - Simulation : outil logiciel *CADSIM Plus™*

Le présent chapitre et le suivant visent respectivement à détailler le fonctionnement et l'utilisation qui est faite des logiciels *CADSIM Plus™* et *DeltaV* afin d'assurer la transparence du travail.

Dans le cadre du projet, il importait de pouvoir travailler à l'implantation de la stratégie FAÉ sans affecter les opérations du CIPP. C'est pourquoi le procédé à l'étude a été transporté dans un logiciel de simulation, la flexibilité de *DeltaV* permettant la communication avec un tel logiciel plutôt qu'avec le « hardware » habituel (instruments de champs, contrôleurs, etc.). Le choix s'est arrêté sur *CADSIM Plus™* qui est un logiciel de simulation dynamique qui permet à la fois d'équilibrer les diagrammes de procédé et d'en représenter les conditions dynamiques. Les principales raisons motivant ce choix sont l'architecture ouverte et la facilité d'utilisation de *CADSIM Plus™* ainsi que le fait qu'il soit déjà connu des utilisateurs actuels.

Aussi, dans le cas de la simulation de procédé relative à un niveau supérieur, et qui implique donc nécessairement un MPC, la simulation ne remplace pas le procédé mais *fait* office de procédé. En effet, il ne s'agit pas ici de remplacer les signaux existant entre *DeltaV* et les équipements de champs, *mais bien de créer un lieu logiciel où ces signaux peuvent être consignés afin de permettre l'implantation de la stratégie FAÉ.*

### 5.1 Implantation d'une simulation

*CADSIM Plus™* offre plusieurs bibliothèques (standard, réconciliation de données dynamique, fibres, hydrocarbures, OPC, puissance) chacune composée de nombreux modules de procédé prédéfinis (ex. : laveurs, épaisseurs, raffineurs, addition, soustraction, etc.), à l'image des équipements qu'on retrouve en usine, qui facilitent et rendent plus rapide l'implantation de la simulation. Certains de ces modules ont été utilisés dans la conception des fichiers de simulation (CIPP3.dra, 103TIC005\_MPC1.dra, 103TIC005\_MPC2.dra, 104RAF001\_MPC1.dra et 104RAF001\_MPC2.dra).



Il existe deux grandes catégories d'éléments dans *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> : les éléments « procédé » et les éléments « non procédé ». Il existe aussi deux modes « d'opération » du logiciel : le mode dessin et le mode simulation. Le mode dessin permet de mettre en place tous les modules et les différents autres éléments « procédé » à simuler. Lors du passage au mode simulation, le logiciel demande à ce que soient spécifiés tous les paramètres associés aux différents modules et autres éléments « procédé » du fichier. Une fois la spécification complétée, la simulation peut être exécutée (mode simulation). Les spécifications sont les nombreux icônes bleus attachés aux composantes du dessin (icônes semblables à des pointes de tarte, losanges et triangles surmontés d'un rectangle – ou l'inverse). Certains de ces icônes sont joints par un pointillé ; c'est le cas lorsque deux ou plusieurs éléments « procédé » sont liés par une relation fonctionnelle. Le rectangle surmonté d'un triangle constitue alors la variable indépendante et le rectangle surmonté d'un losange la variable dépendante.

L'ordre d'exécution des différentes composantes d'un fichier *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> s'incrémente à mesure des ajouts qui y sont effectués. Il est important, de façon régulière pendant le processus de mise en place de la simulation, de modifier l'ordre d'exécution pour qu'il suive l'ordre logique « d'écoulement » du procédé plutôt que sa chronologie de conception.

C'est l'utilisateur qui détermine le « time step » ou échelle de temps de la simulation ( $\Delta t$ , se référer à la figure 4.2), c'est-à-dire la période de calcul. L'utilisateur peut aussi accélérer ou ralentir au besoin la vitesse d'exécution (« speed ») de la simulation, ce qui ne touche pas l'échelle de temps de la simulation.

## 5.2 Dynamique de premier ordre

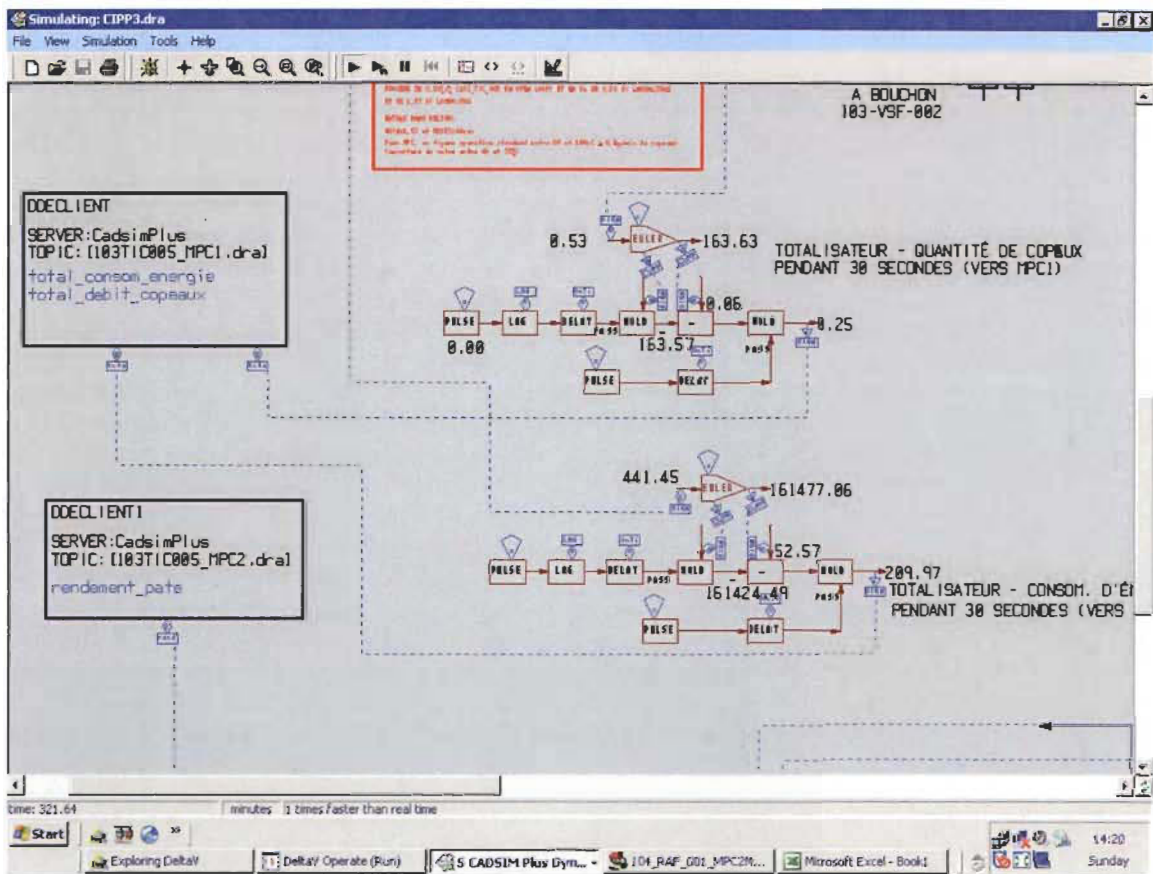
Des modules « premier ordre » ont été ajoutés à chacune des boucles de contrôle afin d'obtenir pour les variables contrôlées des tracés dont la dynamique n'est pas instantanée (par défaut, la dynamique de *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> est instantanée), ce qui est beaucoup plus représentatif de la réalité. Le premier ordre a été choisi parce que de nombreux procédés industriels (comme c'est le cas de celui à l'étude ici) présentent ce

type de dynamique. Un délai a aussi été ajouté dans le cas de la boucle de température de la trémie de préchauffage puisque la variation de température consécutive à la variation de l'ouverture de la valve de vapeur ne se fait pas sentir instantanément.

### 5.3 Totalisateurs

Les totalisateurs comme celui montré à la figure 5.1 sont des modules composites qui ont été conçus dans le cadre du projet et qui ont pour fonction de permettre aux différents fichiers de *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> de communiquer en respectant l'échelle de temps qui leur est propre. Un totalisateur effectue la sommation des valeurs d'une certaine variable en respect avec l'échelle de temps de la simulation (par exemple, la totalisation s'effectue à chaque seconde si le « time step » de la simulation de base – celle à partir de où la totalisation s'effectue – est d'une seconde). La durée de la totalisation est fonction de l'échelle de temps de la simulation vers laquelle est envoyée la valeur totalisée (par exemple, la totalisation s'effectue pendant une minute si le « time step » de la simulation cible – celle qui reçoit la valeur totalisée – est d'une heure). À noter que pour les variables qui sont des flux, comme le débit de copeaux ou la puissance, la totalisation présente un résultat non significatif. La valeur totalisée est alors divisée par l'échelle de temps de la simulation cible pour donner une valeur moyenne plus représentative (voir la section 5.4 plus bas pour plus de détails). Les valeurs totalisées sont communiquées entre les fichiers *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> par le biais de liens DDE.

Le module totalisateur créé dans le cadre du projet est constitué de plusieurs modules prédéfinis de *CADSIM Plus*<sup>TM</sup>. Ainsi, le signal à totaliser entre dans un module « Intégrateur d'Euler » de *CADSIM Plus*<sup>TM</sup>. Celui-ci intègre son signal d'entrée dans le temps. Afin d'intégrer sur un temps défini et d'être en mesure d'avoir comme sortie un signal totalisé (et non en cours de totalisation) quelques autres modules de la librairie standard de *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> ont été ajoutés à l'intégrateur d'Euler.



**Figure 5.1** Page écran d'un totalisateur de *CADCIM Plus*<sup>TM</sup> conçu dans le cadre du projet

Un premier module « Pulse » génère un signal dont la valeur oscille entre 0 pour la période définie par le paramètre « OffTime » du module « Pulse » et 1 pour la période définie par le paramètre « InTime » de ce même module. Ceci a pour but de générer pour le module « Delay » un passage de 1 à 0 (un « falling edge ») à un intervalle de temps précis (à chaque minute par exemple). Lors du passage de la valeur de son signal d'entrée de 1 à 0, « Delay » fixe la valeur de son signal de sortie à 1 pour la période de temps fixée par son paramètre « OnTime ». Ceci a pour but de faire que le module « Hold » laisse passer, pendant l'intervalle qui sera spécifiée pour « OnTime » de « Delay », la valeur totalisée par l'intégrateur d'Euler pendant la période définie par le « falling edge ». Cette valeur est soustraite de la valeur totalisée par l'intégrateur d'Euler. Puisque le module « Pulse » commence sa génération de signal avec son « OffTime », donc une valeur de 0, le « falling edge » se présente après que la période

complète (« OffTime » + « OnTime ») se soit écoulée. Le signal que laisse passer « Hold » a donc une période de retard avec celui duquel il est soustrait. Le résultat de la soustraction constitue ainsi la totalisation de l'intégrateur d'Euler avec une remise à 0 à la fin de chaque période, laquelle marque le début d'une nouvelle période de totalisation. Le même principe (de « Pulse » à « Hold ») a été reproduit. Ceci a pour but de laisser passer le signal de totalisation périodique d'Euler à la fin de la totalisation, lorsque cette dernière atteint sa valeur maximale. C'est ce qui assure que le signal de sortie donne toujours la valeur totalisée et non en cours de totalisation. Le module « Lag » insère un très léger décalage du premier « Pulse » mentionnée sur le deuxième afin que le deuxième « Hold » laisse passer son signal juste avant que la totalisation périodique ne se remette à zéro.

#### 5.4 Échelles de temps

L'échelle de temps des fichiers de simulation du fichier CIPP3.dra est d'une seconde ( $\Delta t = 1 \text{ s} = 0,0167 \text{ min}$ ). Comme les débits de la simulation sont exprimés par minute (l'unité de base de *CADSIM Plus*<sup>TM</sup>, ex. : kg/min), ceci peut porter à confusion relativement aux totalisateurs. En effet, si on intègre pendant une minute le débit de copeaux exprimé en kg/min, mais compilé à toutes les secondes par *CADSIM Plus*<sup>TM</sup>, on obtient la quantité de copeaux (en kg) procédée par les équipements pendant une minute. En effet, l'intégrateur d'Euler intègre le débit relativement à son  $\Delta t$  selon l'équation 5.1 suivante :

$$I_n = I_{n-1} + (\text{Entrée}_n \times \Delta t) \quad \text{Éq. 5.1}$$

où *Entrée* est la valeur du signal qui entre dans le module d'Euler. Au bout d'une minute le total est le suivant (en considérant que le débit de copeaux est stable à 0,50 kg/min) :  $60 \times (0,50 \text{ kg/min} \times 0,0167 \text{ min}) = 0,50 \text{ kg}$  . Si on veut par ailleurs utiliser le totalisateur pour effectuer une moyenne sur une minute de la consommation d'énergie (kJ/s), le calcul est le suivant (en supposant que la consommation est stable à 450 kJ/min) :

$$60 \times \left( \frac{450 \text{ kJ/min} \times 0,0167 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) = 7,5 \text{ kJ/s} .$$

## 5.5 Communication interne

Tel que déjà mentionné, la communication entre les fichiers de *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> s'effectue par le biais de liens DDE représentés par des encadrés de type « DDECLIENT » et « DDEIN ».

## 5.6 Communication avec *DeltaV*

Même si *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> possède les fonctionnalités nécessaires pour simuler les contrôleurs, ces derniers sont localisés dans *DeltaV*. Ceci de façon à reproduire le plus fidèlement possible la situation qui prévaut en usine. Donc typiquement, pour une boucle de contrôle, *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> envoie à *DeltaV* la valeur de procédé (« process value », valeur de la variable à contrôler) et reçoit de celui-ci la directive associée à la variable manipulée (« output » du contrôleur). La communication entre les deux logiciels s'effectue par le biais de liens OPC représentés par des encadrés de type « OPCDACLIENT » dans les fichiers *CADSIM Plus*<sup>TM</sup>.

## 5.7 Détermination de la dynamique de procédé associée à une boucle de contrôle et réglage des contrôleurs

Il importe de déterminer la dynamique des boucles de procédé du fichier de simulation CIPP3.dra afin d'en connaître les paramètres, lesquels sont requis pour établir le réglage de chacun des contrôleurs associés.

Tel que déjà mentionné, des modules simulant une dynamique de premier ordre (et un module de délai dans le cas de la boucle de température) ont été ajoutés au fichier CIPP3.dra afin de générer un signal qui soit plus représentatif de la réalité. Cette portion de la détermination de la dynamique de procédé est donc facilitée puisque la constante de temps ( $\tau$ ) et le délai ( $\theta$ ) du procédé sont fixés, donc connus. Le gain du module de premier ordre est fixé à 1 afin de ne pas influencer le gain du procédé simulé. [75]

Le réglage des contrôleurs est essentiel pour assurer une opération du DCS uniforme et dans les cibles. Logiquement, le réglage doit tenir compte des paramètres du procédé à

contrôler ; ce qui n'est pas le cas de toutes les méthodes. La méthode de réglage des contrôleurs retenue est le « Lambda tuning », méthode qui a d'ailleurs été développée par les gens de la compagnie *Entech*, maintenant affiliée à *Emerson*. Cette méthode possède les avantages suivants [79] :

- ✍ Présente une approche rigoureuse et structurée applicable tant au contrôle régulateur qu'au contrôle de plus haut niveau ;
- ✍ Offre une mesure de la dynamique du procédé et des instruments ;
- ✍ Permet la manipulation de la constante de temps de la boucle fermée ( $\lambda$ ) ;
- ✍ Favorise l'optimisation en permettant une production plus uniforme et efficace.

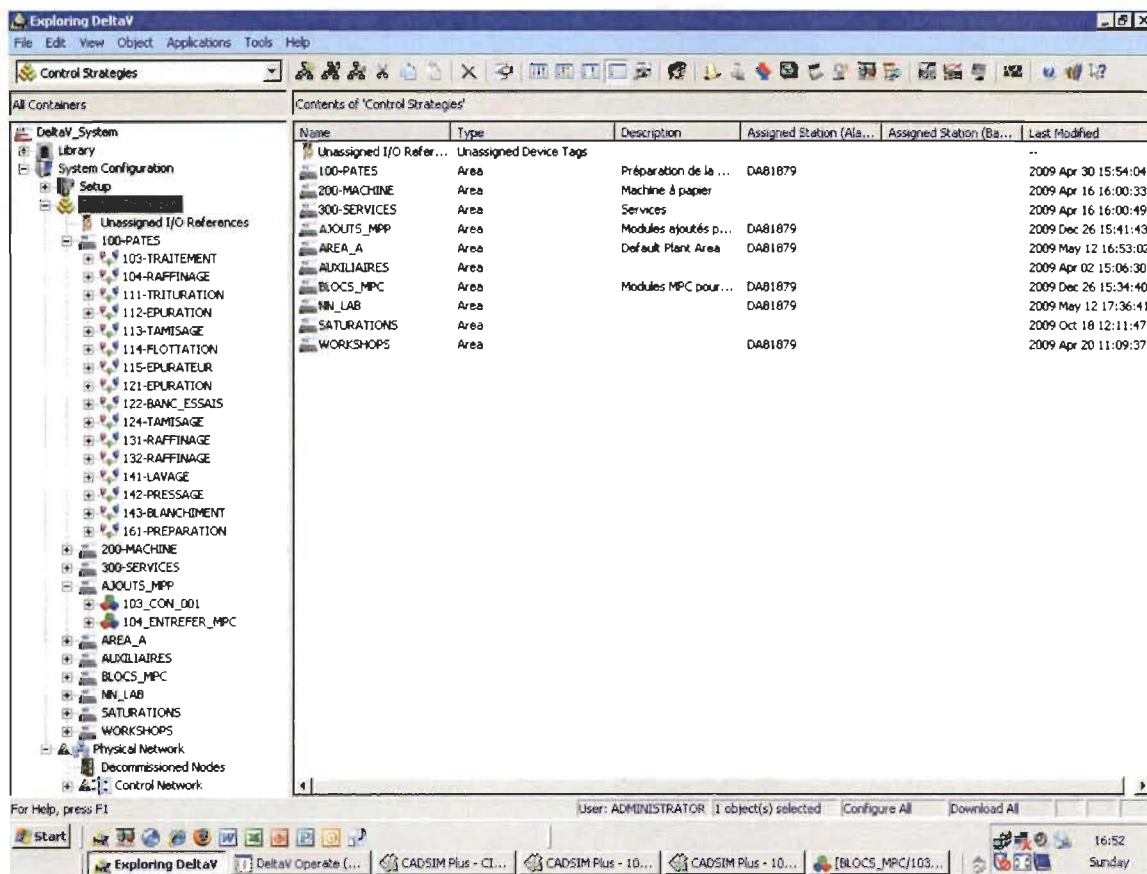


## Chapitre 6 - Modélisation et contrôle : outil logiciel *DeltaV*

Le DCS *DeltaV* en place au CIPP est un système de la compagnie *Emerson Process Management*. La performance, l'architecture ouverte et la flexibilité sont des facteurs qui ont déterminé la sélection de ce logiciel plutôt qu'un autre.

L'outil de configuration de *DeltaV* (*Control Studio*) favorise la division de l'usine en secteurs composés de boucles de contrôle. *DeltaV* supporte trois types de langages pour la configuration : les blocs de fonction (« function blocks »), les diagrammes de fonction séquentiels (« sequential function charts ») et le langage structuré (« structured text »). Les blocs de fonction constituent les composantes de base des modules de contrôle. Il en existe d'ailleurs sept catégories dans *DeltaV* : entrée/sortie, mathématique, « timer/counter », logique, contrôle analogue, suivi énergétique (« energy metering ») et contrôle avancé.

Afin de faciliter la visualisation de sa structure, la figure 6.1 illustre l'arborescence de l'explorateur de *DeltaV*. Elle montre que le premier niveau du système *DeltaV* est constitué de deux sections principales : une librairie et la configuration du système. La librairie comprend notamment des modèles de blocs de fonction, de composites et de modules, des informations sur les instruments et des définitions des lots (« batch »). La configuration du système est quant à elle composée de trois éléments majeurs soient l'organisation du système (« Setup »), les stratégies de contrôle (« Control Strategies ») et le réseau physique (« Physical Network »), lequel regroupe notamment le réseau de contrôle (les stations d'opération/gestion avec toute l'information qui leur est assignée) et les contrôleurs (entités physiques). C'est dans la section « Control Strategies » que se retrouve l'arborescence associée aux secteurs de procédé (« areas ») et à la configuration de leurs modules de contrôle. La figure 6.1 montre que le secteur « 100-Pâtes » se divise en seize sections à l'intérieur desquelles se trouvent les modules de contrôle (non exposés afin de faciliter une meilleure vue d'ensemble du système). Le secteur « Ajouts\_MPP » a été ouvert afin de montrer la représentation graphique des icônes des modules de contrôle (103\_CON\_001 et 104\_ENTREFER\_MPC).



**Figure 6.1** Arborescence de l'explorateur de *DeltaV*

Dans le cadre du travail, la configuration complète du DCS du CIPP a été rendue disponible sur un ordinateur portable configuré en tant que station *Simulate Pro* de *DeltaV*. Comme son nom l'indique, la station *Simulate Pro* est une station de travail qui facilite les travaux de simulation. Il est donc possible d'utiliser le DCS sans être relié au procédé réel.

## 6.1 Configuration

Dans *DeltaV*, la configuration s'effectue par le biais de l'application *Control Studio*. Le procédé est divisé en secteurs « areas » correspondant à des sections physiques de l'usine. Ces secteurs sont ensuite typiquement peuplés de modules correspondant chacun à une boucle de contrôle. Chaque module constitue en quelques sortes un fichier distinct qui peut être ouvert par *Control Studio* pour y effectuer la configuration. Les blocs de fonction constituent le langage de programmation le plus utilisé pour bâtir les



modules. Les principaux blocs de fonction utilisés dans le cadre du travail sont les suivants :

- ✎ AI (« Analog Input ») et AO (« Analog Output ») ;
- ✎ PID (contrôleur PID) ;
- ✎ MPC-Pro (contrôleur MPC) ;
- ✎ CALC (Calcul/Logique).

Chaque fichier « *Control Studio* », donc chaque module de contrôle peut abriter un nombre illimité de blocs de fonction nécessaires à sa configuration. Ces blocs doivent être reliés entre eux de façon adéquate pour que le module soit opérationnel. Chaque bloc de fonction possède de nombreux paramètres internes qui doivent aussi être configurés par l'utilisateur.

La flexibilité de *DeltaV* permet que plusieurs blocs de fonction dont les AI et AO acceptent des signaux simulés ne provenant pas des éléments de champs, ce qui permet d'établir la communication avec *CADSIM Plus™* et d'opérer le DCS comme s'il était relié à un procédé physique.

## 6.2 Opération

Le suivi de l'opération du procédé à contrôler s'effectue grâce à l'application « *DeltaV Operate* » où sont disponibles les écrans-opérateur du CIPP. Plusieurs fonctionnalités sont accessibles directement à partir des écrans-opérateur : changement de point de consigne, de mode d'opération, accès aux paramètres des alarmes, des verrouillages, accès aux autres applications de *DeltaV* comme le visionnement des tracés, etc.

Les boucles MPC n'ont ni été incorporées aux écrans-opérateur actuels ni n'ont fait l'objet de nouveaux écrans-opérateur puisque leurs fonctionnalités sont accessibles par le biais des autres applications de *DeltaV* dont *Control Studio*, *Predict Pro* et *MPC Operate Pro*.

### 6.3 Modélisation et opération d'un contrôleur MPC

Le contrôle multivariable par modèle prédictif est implanté dans l'environnement *DeltaV* grâce à *DeltaV Predict Pro*. Ceci permet de contrôler un procédé en le maintenant à l'intérieur de contraintes d'opération mesurables par le DCS tout en intégrant les interactions de procédé et les perturbations connues. Ce type de contrôle peut aussi être utilisé en remplacement d'un contrôleur PID conventionnel lorsque doivent être pris en compte des perturbations, contraintes, interaction entre des boucles de contrôle, etc.

*DeltaV Predict Pro* comprend plusieurs outils dont :

- ✦ Le bloc de fonction *MPC-Pro* qui permet de mettre en place les stratégies de contrôle multivariables ;
- ✦ L'application *Predict Pro* qui permet de générer le modèle de procédé et de « commissionner » le bloc *MPC-Pro* ;
- ✦ L'application *MPC Operate Pro* qui permet de voir et d'interagir avec le contrôle mis en place grâce au bloc *MPC-Pro*.

Il est possible de procéder à un test automatique d'identification de procédé pendant lequel les données recueillies par l'historien sont utilisées par *DeltaV Predict Pro* pour créer un modèle de réponse de type échelon, pour chacune des variables contrôlées et des contraintes (le cas échéant), au mouvement de la (des) variable(s) manipulée(s). La précision du modèle peut ensuite être validée grâce à une fonctionnalité de l'application *Predict Pro* et c'est ce modèle qui sert à générer automatiquement la matrice du contrôleur qui sera utilisée par le bloc *MPC-Pro*.

L'identification du procédé par *DeltaV Predict Pro* provient de deux types de modèles : le FIR et l'ARX. Le FIR fournit une forme de corrélation croisée qui permet de valider que la direction et la grandeur des changements de la variable contrôlée sont adéquats, mais il ne fournit pas une forme de modèle appropriée. Un modèle FIR de court horizon fournit la partie initiale de la réponse de type échelon et est approprié pour définir le délai. L'ARX par ailleurs offre un modèle paramétrique basé sur la réponse du procédé à

un mouvement de type échelon de la variable manipulée. L'utilisation conjointe des deux types de modèle permet à l'application de générer un modèle fiable et précis. [77]

La validation du modèle provient de la comparaison entre les données réelles et les données simulées. Les contraintes sur les variables contrôlées sont tenues en compte par la manipulation du point de consigne associé. Lorsque des contraintes sont identifiées pour un système et paramétrées dans un bloc *MPC-Pro*, le contrôleur *MPC-Pro* ne changera le point de consigne établi pour la variable contrôlée concernée que lorsqu'une des limites de la prédiction d'une contrainte est dépassée. À noter qu'il est possible de spécifier manuellement les paramètres du modèle.

L'algorithme de contrôle prédictif à la base de l'application *DeltaV Predict Pro* tient sa source du « Dynamic Matrix Control » (DMC) significativement modifié pour y intégrer des pénalités sur l'erreur dépendantes de l'horizon de prédiction, des pénalités sur le mouvement dépendantes de l'horizon de contrôle, un contrôle entonnoir asymétrique, une gamme de contrôle et une trajectoire de référence. La robustesse du contrôleur issu de ces améliorations en serait grandement bonifiée.

Le suivi et l'opération d'un contrôleur MPC peut s'effectuer par le biais de l'application *Control Studio* quoique *MPC Operate Pro* offre une représentation qui s'apparente plus à celle d'un écran-opérateur et permet de voir les tracés des principales variables dont la prédiction des variables contrôlées et des contraintes (voir la figure 6.2).

Le taux d'exécution (« scan rate ») d'un bloc *MPCPro* est basé sur le TSS entré par l'utilisateur lors du test d'identification du procédé de façon à être d'une seconde ou plus. Le temps d'exécution est défini comme étant égal au TSS (en secondes) divisé par 120 de façon à constituer 120 intervalles. L'horizon de prédiction vaut 120 intervalles et est ainsi égal au TSS. L'horizon de contrôle est égal à cinq ou neuf fois la valeur d'un intervalle (cinq par défaut).

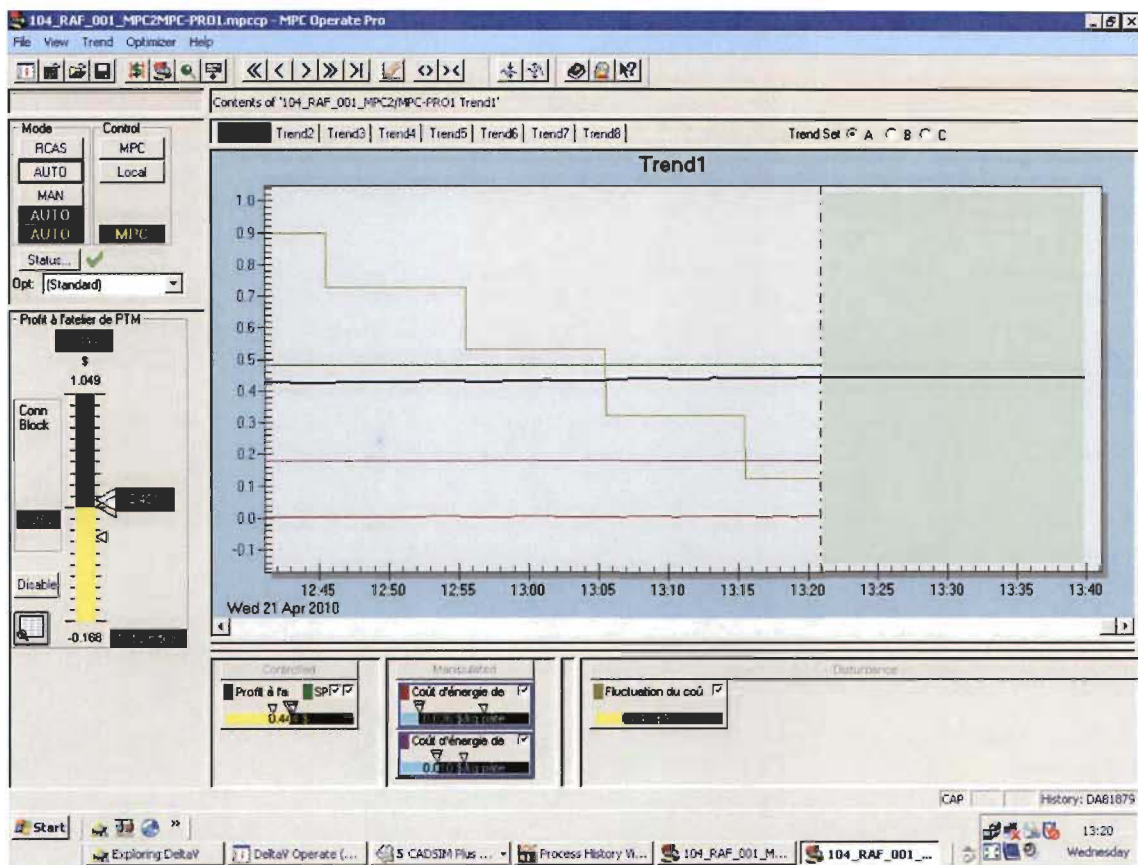


Figure 6.2 Page écran de l'application *MPC Operate Pro*

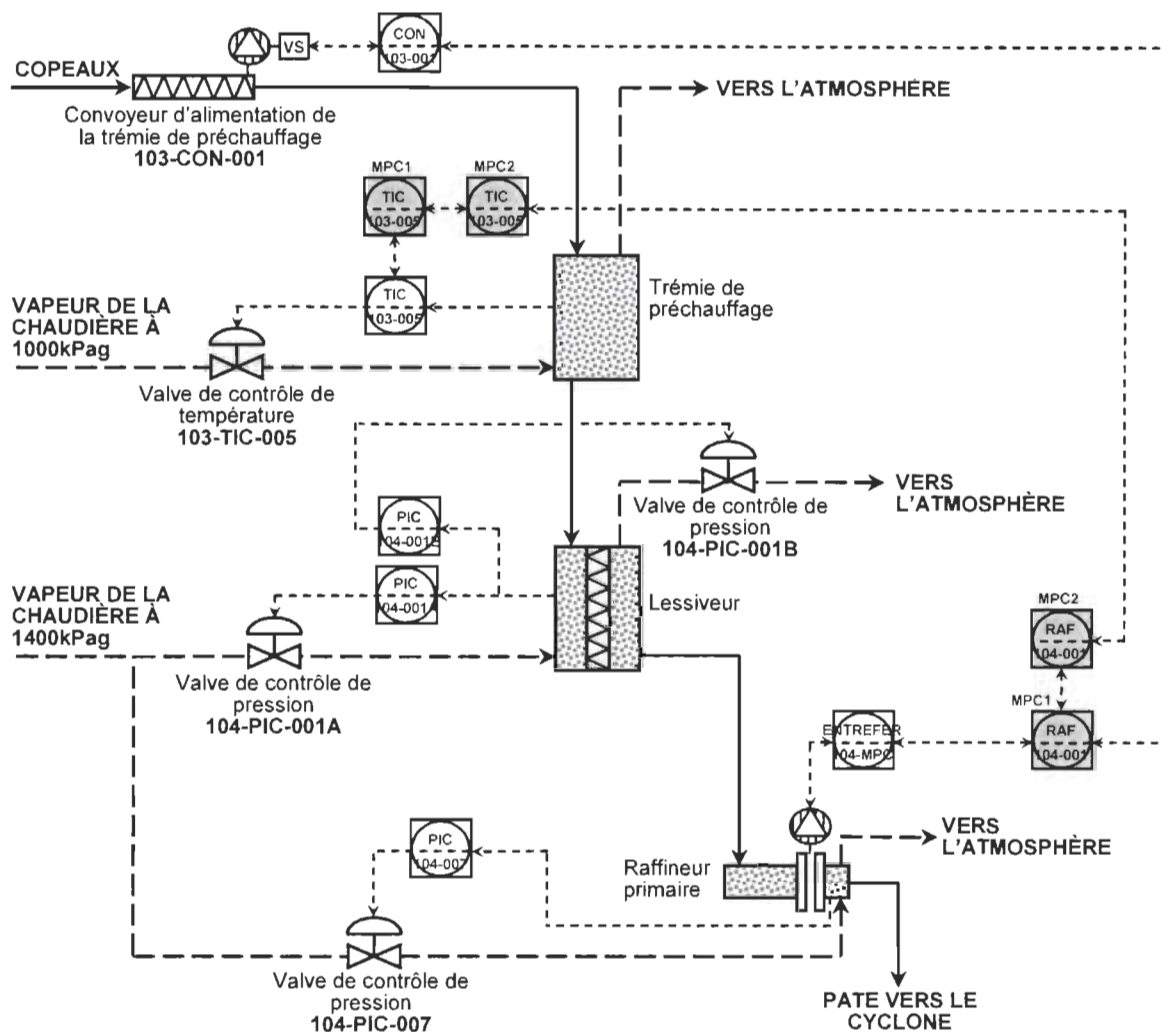
## **Chapitre 7 - Description du procédé à l'étude et implantation**

Afin d'assurer une meilleure compréhension du prochain chapitre, celui-ci vise à représenter et à décrire le procédé à l'étude dans le cadre du projet de recherche. Ce procédé porte sur l'atelier de pâte thermomécanique (PTM) du CIPP, plus précisément sur l'approche immédiate du raffineur primaire et sur le raffineur primaire lui-même.

### **7.1 Représentation du procédé à l'étude selon les concepts présentés au chapitre sur la méthodologie**

La figure 7.1 présente un diagramme bloc simplifié de l'approche immédiate du raffineur et du raffineur primaire. Les flux de copeaux sont représentés par des lignes pleines et ceux de vapeur par des lignes pointillées. Les tirets plus fins sont associés aux liens de communication. Le procédé du CIPP à l'étude débute avec l'arrivée des copeaux qui sont acheminés à la trémie de préchauffage grâce à un convoyeur à vitesse variable 103-CON-001. Au CIPP, les copeaux sont en réalité chargés manuellement sur un convoyeur dont la vitesse est fixe. Dans le cadre de la recherche, c'est pour rendre le procédé à l'étude plus fluide relativement aux outils logiciels que l'alimentation des copeaux se fait en continu. Le débit d'alimentation des copeaux est réglé par un contrôleur PID dont la consigne provient du contrôleur MPC du niveau superviseur associé à la boucle de raffinage (104-RAF-001-MPC1).

Les copeaux entrent dans la trémie de préchauffage qui, comme son nom l'indique, vise à les réchauffer. Au CIPP, la trémie de préchauffage fonctionne en discontinu. Pour les besoins de la cause, le débit d'alimentation des copeaux à la trémie de préchauffage a cependant été accordé à celui d'entrée au raffineur pour simuler une opération continue. L'arrivée de vapeur pour le préchauffage des copeaux provient de la chaudière à 1000 kPag et est ajustée grâce à la valve de contrôle 103-TIC-005 reliée à un contrôleur PID du même nom. La consigne de ce contrôleur PID provient d'un contrôleur MPC du niveau tactique superviseur (103-TIC-005-MPC1) dont la consigne provient d'un MPC du niveau stratégique de gestion du site et de l'usine (103-TIC-005-MPC2), lequel tient finalement sa consigne du contrôleur MPC 104-RAF-001-MPC2 du niveau stratégique.



**Figure 7.1** Diagramme bloc du procédé à l'étude

Entre leur sortie de la trémie de préchauffage et leur entrée dans le lessiveur (aussi appelé étuveur), les copeaux passent par une série d'équipements constitués de deux alimentateurs, d'une vis d'imprégnation double, d'un convoyeur, d'une trémie et de deux vis d'alimentation. Les manipulations qui y sont effectuées ne sont pas considérées dans le cadre du travail et les copeaux entrent donc dans le lessiveur avec les mêmes propriétés qu'ils avaient à la sortie de la trémie de préchauffage ; c'est pourquoi ces équipements n'apparaissent pas à la figure 7.1.

Le rôle du lessiveur est de cuire et ramollir les copeaux avant leur entrée dans le raffineur. Aucun ajout de produit chimique n'est figuré. La boucle de contrôle 104-PIC-001 permet l'ajustement de la pression dans le lessiveur grâce à deux valves, 104-PIC-

001A (contrôleur PID du même nom) qui y assure l'entrée de vapeur, et 104-PIC-001B (contrôleur PID du même nom) qui permet de parfaire l'ajustement de la pression en laissant sortir l'excès de vapeur du lessiveur. La vapeur qui alimente la valve 104-PIC-001A provient de la chaudière à 1400 kPag.

En sortie du lessiveur, les copeaux sont poussés dans le raffineur grâce à deux convoyeurs à vis. La valve 104-PIC-007, associée au contrôleur PID 104-PIC-007, permet à la vapeur en provenance de la chaudière à 1400 kPa d'entrer dans le raffineur et d'y maintenir une pression plus élevée que dans le lessiveur. Ceci a pour effet d'ajuster le différentiel de pression entre les deux côtés des plaques, ce qui agit sur le temps de résidence des copeaux dans le raffineur, lequel affecte l'intensité de raffinage.

À l'usine, l'entrefer est contrôlé manuellement et la puissance lue par le DCS. Un positionnement motorisé des plaques a donc été ajouté à la configuration existante afin de permettre le contrôle de la puissance de raffinage. L'entrefer est ainsi ajusté pour maintenir la puissance demandée par le contrôleur MPC 104-ENTREFER-MPC. La consigne de puissance provient du contrôleur MPC 104-RAF-001-MPC1 du niveau tactique qui tient lui-même la sienne du contrôleur MPC 104-RAF-001-MPC2 de niveau stratégique.

La figure 7.2 illustre le système décrit plus haut selon la représentation de la pyramide générique de l'entreprise vue précédemment. Les tirets sont associés aux variables de la boucle de température 103-TIC-005 alors que les lignes pleines sont liées à la boucle de raffinage 104-RAF-001. La nomenclature des lettres et le concept de représentation sont les mêmes qu'aux sections 3.3.2 et 4.1.



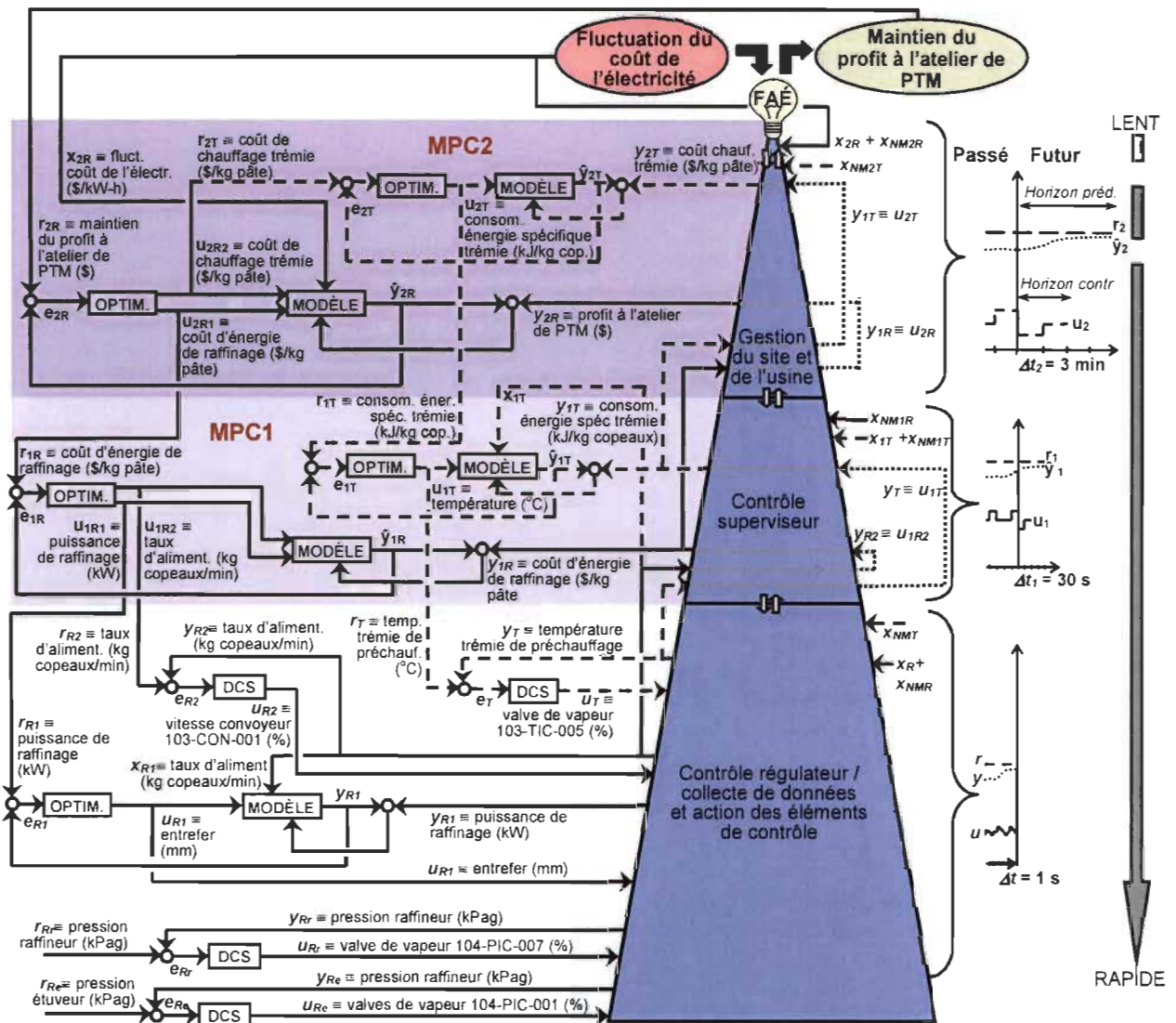


Figure 7.2 Représentation du procédé à l'étude basée sur la pyramide générique de l'entreprise

## 7.2 Hypothèses, plages opérationnelles et limites de flexibilité

Lors de l'implantation de ce système, les hypothèses qui suivent ont été posées. Elles sont représentatives de conditions d'opérations typiques du CIPP :

- ❏ L'alimentation en copeaux doit varier entre 0,45 et 0,55 kg/min ;
- ❏ La température dans la trémie de préchauffage doit varier entre 80 et 100°C ;



- ❖ La pression au lessiveur doit varier entre 250 et 265 kPag (consigne fixée à 255 kPag) ;
- ❖ Le différentiel de pression entre les deux plaques du raffineur doit varier entre 5 et 20 kPa, pour une pression de sortie du raffineur variant entre 255 et 285 kPag (consigne fixée à 265 kPag) ;
- ❖ L'entrefer du raffineur doit varier entre 0,2 et 2 mm ;
- ❖ Le CSF (mesure de l'indice d'égouttement) de la pâte en sortie du raffineur doit varier entre 500 et 650 ml ;
- ❖ Le rendement en pâte au raffineur est de 96%.

Ces hypothèses constituent le point de départ de l'établissement des plages d'opération des trois niveaux de production à l'étude. Les plages d'opération ont été établies en commençant par le niveau contrôle régulateur / collecte de données et action des éléments de contrôle, et en remontant aux niveaux contrôle superviseur puis gestion du site et de l'usine. Les plages d'opération des variables des niveaux inférieurs fixent donc successivement celles des variables des niveaux supérieurs. Basé sur la définition pratique que la stratégie FAÉ donne à la flexibilité (se référer à la section 3.2.1), ces intervalles d'opération constituent les limites de flexibilité des variables auxquelles ils correspondent. L'évaluation des plages d'opération des variables associées à la boucle de température est la suivante :

1. La valve de vapeur 103-TIC-005 (variable manipulée  $u_T$ ) peut ouvrir entre 0 et 100%, il s'agit d'une limite physique concrète de l'instrument.
2. Ceci implique que la température associée (variable contrôlée,  $y_T$ ) peut varier entre 0 et 100°C, il s'agit d'une limite physique qui découle de la valve et du procédé.
3. La plage d'opération requise pour la température (consigne,  $r_T$ ) est de 80 à 100°C, il s'agit d'exigences liées à l'opération.
4. La valeur de la variable contrôlée  $r_T$  étant cascadée par la variable manipulée  $u_{IT}$  du niveau supérieur 103-TIC-005-MPC1, les limites de  $u_{IT}$  sont fixées par  $r_T$  et sont donc de 80 à 100°C.
5. La plage d'opération de la consommation d'énergie spécifique (variable contrôlée,  $y_{IT}$ ) est dictée par les limites physiques des variables de niveau inférieur qui y sont

associées, soient la température ( $y_T$ ) et le taux d'alimentation des copeaux à la trémie de préchauffage ( $y_{R2}$  qui varie entre 0 et 1 kg/min). En figurant que le taux minimal d'alimentation est de l'ordre de 0,25 kg/min (la division par zéro étant impossible), ceci donne une plage variant entre 0 et environ 2500 kJ/kg. Un rendement en pâte de 96% est figuré.

6. La plage associée au point de consigne de consommation d'énergie spécifique ( $r_{1T}$ ) est dictée par les limites de la variable manipulée  $u_{1T}$  et du taux requis d'alimentation des copeaux à la trémie ( $r_{R2}$  qui varie entre 0,45 et 0,55 kg/min) et est de 816-1115 kJ/kg.
7. Comme précédemment, la plage d'opération de la variable manipulée  $u_{2T}$  est fixée par celle de  $r_{1T}$  et est de 816-1115 kJ/kg.
8. La plage d'opération du coût de préchauffage de la trémie (variable contrôlée,  $y_{2T}$ ) est dictée par la limite d'opération du niveau inférieur ( $y_{1T}$ ), et par les limites de la variation du coût de l'électricité (fixée entre 0,0434 et 0,0548 \$/kW-h) ; ce qui donne une plage de 0 à 0,357 \$/kg.
9. Enfin, la plage d'opération de la consigne de coût de préchauffage de la trémie ( $r_{2T}$ ) est fonction des limites de sa variable manipulée  $u_{2T}$  et est de 0,0103 à 0,0177 \$/kg.

C'est donc en se basant sur ces limites que la stratégie FAÉ permet de savoir, en terme des variables qui constituent le système à l'étude, si celui-ci est bien dimensionné et bien paramétré pour la perturbation globale à laquelle il est soumis ou s'il présente des limitations. Dans le cas des contrôleurs MPC, les plages sélectionnées pour les variables manipulées, les contraintes et les perturbations lors de l'étape de détermination du modèle sont d'une grande importance puisque la précision du modèle est optimale dans cette gamme et sera moindre en dehors celle-ci.

Le suivi des perturbations, la connaissance de leur intervalle de variation et l'effet connu de celle-ci sur les variables contrôlées assure une meilleure robustesse au système à l'étude [80].

Le tableau 7.1 fait état de toutes les variables du système à l'étude, incluant les contraintes.

**Tableau 7.1 Variables PPP du procédé à l'étude et leurs plages opérationnelles (ou limites de flexibilité)**

GESTION DU SITE ET DE L'USINE (MPC2)		
Variables produit	Variables procédé	Variables production
N.A.	N.A.	TRÉMIE : · Coût de préchauffage à la trémie ( $r_{2T}$ : 0,0103-0,0177 \$/kg pâte et $y_{2T}$ : 0-0,0357 \$/kg pâte) · Consommation d'énergie spécifique à la trémie de préchauffage ( $u_{2T}$ : 816-1115 kJ/kg) RAFFINEUR : · Maintien du profit à l'atelier de PTM ( $r_{2R}$ : 0,284-0,481 \$ et $y_{2R}$ : -0,168-1,049 \$) · Coût d'énergie spécifique de raffinage ( $u_{2R1}$ : 0,0356-0,0952 \$/kg pâte) · Coût de préchauffage à la trémie ( $u_{2R2}$ : 0,0103-0,0177 \$/kg pâte) · Fluctuation du coût de l'électricité ( $x_{2T}$ : 0,0434-0,0548 \$/kW-h)
CONTRÔLE SUPERVISEUR (MPC1)		
Variables produit	Variables procédé	Variables production
N.A.	TRÉMIE : · Température dans la trémie de préchauffage ( $u_{1T}$ : 80-100°C) · Taux d'alimentation des copeaux ( $x_{1T}$ : 0,45-0,55 kg/min) RAFFINEUR : · Puissance de raffinage ( $u_{1R1}$ : 16-50 kW) · Taux d'alimentation en copeaux ( $u_{1R2}$ : 0,45-0,55 kg/min)	TRÉMIE : · Consommation d'énergie spécifique à la trémie de préchauffage ( $r_{1T}$ : 816-1115 kJ/kg et $y_{1T}$ : ~0-2500) RAFFINEUR : · Coût d'énergie spécifique de raffinage ( $r_{1R}$ : 0,0356-0,0952 \$/kg pâte et $y_{1R}$ : ~0,0191-0,1353 \$/kg pâte)
CONTRÔLE RÉGULATEUR / COLLECTE DE DONNÉES ET ACTION DES ÉLÉMENTS DE CONTRÔLE (DCS)		
Variables produit	Variables procédé	Variables production
RAFFINEUR : CSF de la pâte (contrainte liée à la boucle 104-RAF-001, associé à $y_{1R}$ : 500-650 ml)	TRÉMIE : · Température dans la trémie de préchauffage ( $r_T$ : 80-100°C et $y_T$ : 0-100°C) · Ouverture de la valve de vapeur 103-TIC-005 ( $u_T$ : 0-100%) RAFFINEUR : · Puissance de raffinage ( $r_{R1}$ : 16-50 kW et $y_{R1}$ : 12-71 kW) · Entrefer ( $u_{R1}$ : 0,2-2 mm) · Taux d'alimentation en copeaux ( $x_{R1}$ : 0,45-0,55 kg/min) · Taux d'alimentation en copeaux ( $r_{R2}$ : 0,45-0,55 kg/min et $y_{R2}$ : 0-1 kg/min) · Ajustement de la vitesse du convoyeur 103-CON-001 ( $u_{R2}$ : 0-100%) · Pression à la sortie du raffineur ( $r_{Rr}$ : 265 kPag et $y_{Rr}$ : 0-500 kPag) · Ouverture de la valve de vapeur 104-PIC-007 ( $u_{Rr}$ : 0-100%) · Pression dans l'étuveur ( $r_{Re}$ : 255 kPag et $y_{Re}$ : 0-500 kPag) · Ouverture de la valve de vapeur 104-PIC-001 ( $u_{Re}$ : 0-100%)	N.A.

Finalement, la figure 7.3 reprend les informations de la figure 7.2 en mettant en lumière les liens de communication entre *CADSIM Plus™* et *DeltaV* et les différentes variables PPP échangées.

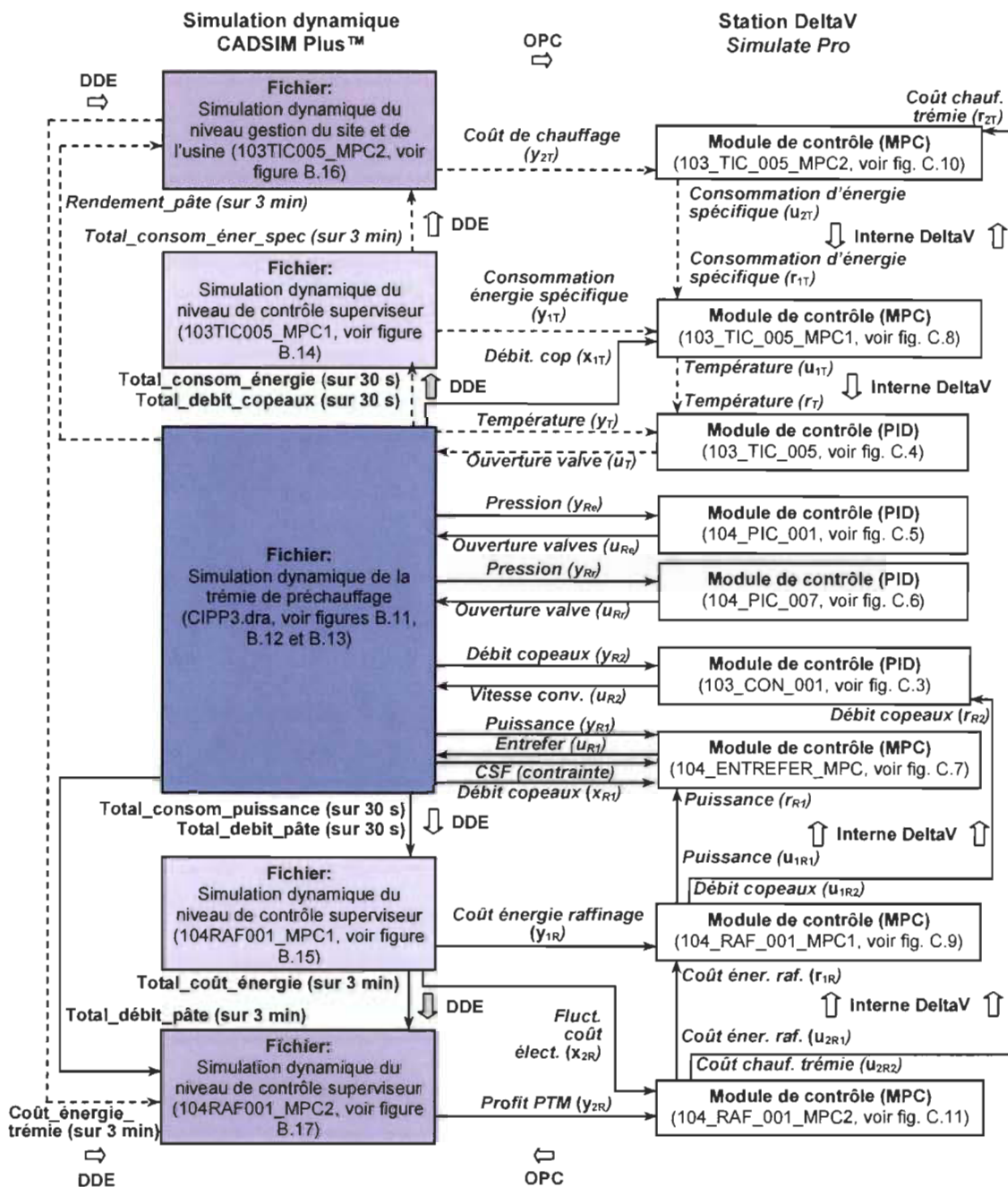


Figure 7.3 Principales variables associées au procédé à l'étude faisant l'objet de la communication entre *CADSIM Plus™* et *DeltaV*

### 7.3 Description du procédé à l'étude

L'Annexe A – Pages écran CADSIM Plus™ du procédé à l'étude et l'Annexe B – Pages écran *DeltaV* associées à la description du procédé à l'étude regroupent les pages écran *CADSIM Plus™* et *DeltaV* relatives à chacune des boucles de la présente section. La consultation de ces annexes facilite la compréhension de la description du procédé.

#### 7.3.1 Boucles du niveau production

L'échelle de temps associée aux boucles de contrôle du niveau production (« plancher » de l'usine du CIPP) est d'une seconde. Pour *CADSIM Plus™*, ceci implique qu'il effectue une passe complète de toutes les unités et « streams » du fichier (ici CIPP3.dra) pendant cet intervalle. Pour *DeltaV*, ceci implique que le DCS exécute l'algorithme des modules de contrôle concernés (103\_CON\_001, 103\_TIC\_005, 104\_PIC\_001, 104\_PIC\_007 et 104\_ENTREFER\_MPC) à toutes les secondes ; il y a donc synchronisation entre *CADSIM Plus™* et *DeltaV*.

##### 7.3.1.1 Boucle 103-CON-001

- *Fichier CADSIM Plus™ associé : CIPP3.dra*
- *Module de contrôle DeltaV associé : 103\_CON\_001*
  - *Variable contrôlée : débit de copeaux vers la trémie de préchauffage (consigne cascadée par la boucle 104-RAF-001-MPC1)*
  - *Variable manipulée : vitesse du convoyeur*
- *Écran d'opération DeltaV associé : 103 IMPREGNATION*

Au CIPP, le chargement manuel se fait au rythme de 2 à 10 kg/min pour alimenter la trémie de préchauffage qui fonctionne en discontinu. Dans le cas de la recherche, le débit d'alimentation des copeaux à la trémie de préchauffage a cependant été accordé à celui d'entrée au raffineur pour simuler une opération continue, soit entre 0,45 kg/min et 0,55 kg/min base sèche, pour une valeur typique proposée de 0,50 kg/min. L'humidité figurée pour les copeaux à l'entrée de la trémie est de 52%.

La boucle 103-CON-001 permet de contrôler l'alimentation en copeaux à l'entrée de la trémie de préchauffage en ajustant la vitesse du convoyeur. Cette boucle de contrôle n'existe pas dans le procédé réel du CIPP, le convoyeur n'étant pas à vitesse variable. Elle a été ajoutée pour permettre l'implantation de contrôle avancé au raffineur. Tel que mentionné au Chapitre 5 - Simulation : outil logiciel *CADSIM Plus™*, des modules de premier ordre sont utilisés à quelques endroits dans la simulation CIPP3.dra afin d'imprimer à certaines variables une dynamique de premier ordre plus réaliste que la dynamique instantanée typique à *CADSIM Plus™*. C'est le cas pour la boucle 103-CON-001.

### 7.3.1.2 Boucle 103-TIC-005

- *Fichier CADSIM Plus™ associé : CIPP3.dra*
- *Module de contrôle DeltaV associé : 103\_TIC\_005*
  - *Variable contrôlée : température de la trémie de préchauffage (consigne cascadée par la boucle 103-TIC-005-MPC1)*
  - *Variable manipulée : ouverture de la valve de vapeur*
- *Écran d'opération DeltaV associé : 103 IMPREGNATION*

Au CIPP, l'opération de la trémie de préchauffage se fait en discontinu et le temps de résidence moyen est d'environ 45 minutes. La valve de vapeur de la boucle 103-TIC-005 est alors ouverte à 100% et le débit de vapeur dans la trémie est de 1,7 kg/min à 157°C (la pression est de 103 kPag, dû à un détendeur dans le circuit de vapeur) et les copeaux sortent à une température d'environ 90°C.

Dans le cadre du travail, et comme c'est le cas à l'usine, la vapeur provenant de la chaudière à 1000 kPag passe par un détendeur pour atteindre 103 kPag. Il est ensuite supposé que la vapeur entre surchauffée à 157°C dans la trémie et en ressort surchauffée (à la température de saturation + 5°C = 105°C); et que la moitié de la vapeur condense, donne son énergie, et sort avec les copeaux. Comme c'est le cas en réalité, la température de sortie des copeaux peut varier entre 80 et 100°C en visant une moyenne de 90°C. L'humidité des copeaux à la sortie de la trémie est de l'ordre de 55%.



Pour que *CADSIM Plus™* reconnaisse la valve de contrôle 103-TIC-005 en tant que telle, le débit de vapeur doit être en réseau (« network »), et il n'est pas possible de le contrôler directement. Cependant, l'ajustement de la pression de part et d'autre de la valve a un effet sur le débit, ce qui permet d'atteindre la température visée à la sortie de la trémie (environ 90°C). Il est logique que le débit de vapeur soit plus faible (de l'ordre de 0,175 kg/min plutôt que 1,7 kg/min) puisque le débit d'alimentation des copeaux l'est aussi (0,45 à 0,55 kg/min plutôt que 2 à 10 kg/min).

Dans *CADSIM Plus™*, la simulation de la trémie de préchauffage est effectuée grâce au module prédéfini « Default » (« Black\_box »). Un bilan général de masse et d'énergie est ainsi effectué sur ce module. Un module de délai permet de simuler un délai dans la variation de la température de la trémie suite à un changement dans l'ouverture de la valve 103-TIC-005. Enfin, un module de premier ordre permet d'imprimer une dynamique de premier ordre à la température des copeaux à la sortie de la trémie de préchauffage.

### 7.3.1.3 Boucle 104-PIC-001

- *Fichier CADSIM Plus™ associé : CIPP3.dra*
- *Module de contrôle DeltaV associé : 104\_PIC\_001*
  - *Variable contrôlée : pression dans l'étuveur*
  - *Variable manipulée1 : ouverture de la valve de vapeur 104-PIC-001A*
  - *Variable manipulée2 : ouverture de la valve de vapeur 104-PIC-001B*
- *Écran d'opération DeltaV associé : 104 RAFFINEUR PRIMAIRE*

La pression dans le lessiveur est généralement maintenue entre 250 kPag et 265 kPag, soit 5 à 20 kPa de moins que dans le raffineur. Dans le cadre du travail, la consigne de pression de cette boucle est fixée à 255 kPag. Un module de premier ordre sans délai permet de simuler une dynamique de premier ordre pour cette boucle de contrôle.

La programmation de cette boucle de contrôle a été modifiée puisqu'elle n'était pas opérationnelle lors du transfert de la base de données. Ici, deux blocs PID distincts (il n'y en a qu'un seul dans la configuration réelle du CIPP) gèrent les valves 104-PIC-



001A et 104-PIC-001B, et ce dans un même module de contrôle. Le réglage du contrôleur associé à la boucle 104-PIC-001B est très conservateur pour éviter que les deux valves se combattent.

#### **7.3.1.4 Boucle 104-PIC-007**

- *Fichier CADSIM Plus™ associé : CIPP3.dra*
- *Module de contrôle DeltaV associé : 104\_PIC\_007*
  - *Variable contrôlée : pression dans le raffineur*
  - *Variable manipulée : ouverture de la valve de vapeur 104-PIC-007*
- *Écran d'opération DeltaV associé : 104 RAFFINEUR PRIMAIRE*

La valve 104-PIC-007 fait entrer de la vapeur dans le bâti du raffineur afin d'y maintenir une pression de 5 à 20 kPa de plus que dans le lessiveur, soit entre 255 kPag et 285 kPag (ouverture de la valve de 3 à 13%).

Comme c'est le cas pour la valve 104-PIC-001A, la vapeur provient de la chaudière à 1400 kPag. Dans le cadre de la simulation, la mesure pour le contrôle de pression est prise à la sortie du raffineur ; la consigne de pression de cette boucle est fixée à 265 kPag. Un module de premier ordre sans délai a été ajouté au signal de pression de la boucle dans le fichier de simulation CIPP3.dra.

#### **7.3.1.5 Boucle 104-ENTREFER-MPC**

- *Fichier CADSIM Plus™ associé : CIPP3.dra*
- *Module de contrôle DeltaV associé : 104\_ENTREFER\_MPC*
  - *Variable contrôlée : puissance de raffinage (consigne cascadée par la boucle de contrôle 104-RAF-001-MPC1)*
  - *Variable manipulée : entrefer*
  - *Perturbation : débit d'alimentation de copeaux (103-CON-001)*
  - *Contrainte : CSF*
- *Écran d'opération DeltaV associé : 104 RAFFINEUR PRIMAIRE*

Cette boucle permet de contrôler la puissance de raffinage en manipulant l'entrefer. La boucle a été ajoutée dans la configuration de *DeltaV* puisqu'il n'existait aucune façon de contrôler la puissance de raffinage, mais seulement une lecture de sa valeur. Un nouveau module de contrôle a donc été créé, utilisant un bloc MPC de façon à permettre un contrôle de type MIMO permettant de considérer la variation du taux d'alimentation en copeaux qui a un impact sur la puissance de raffinage (voir plus bas).

La valeur de l'entrefer est envoyée par *DeltaV* à *CADSIM Plus™* qui effectue un calcul pour faire passer la plage du signal de 0-100% (tel que reçu de *DeltaV*) à 0,2-2 mm (valeur proposée typique de 1,4 mm). Le signal entre ensuite dans un module polynomial d'ordre 2 (voir l'Annexe C – Données sur le pin gris) pour obtenir la puissance en fonction de l'entrefer. On considère que le raffineur opère toujours à vitesse maximale soit 3500 rpm. Un module de premier ordre permet d'imprimer à la puissance une dynamique de premier ordre.

Puisque le taux d'alimentation en copeaux au raffineur a un impact sur la puissance, le signal de puissance est pondéré par la relation suivante : Taux d'alimentation + 0,50. Le taux d'alimentation typique étant de 0,50 kg/min, la relation a été fixée pour obtenir un facteur multiplicatif de 1 dans ce cas précis, la puissance variant ensuite avec le taux d'alimentation ; cette pondération n'est pas assez importante pour masquer l'effet de la variation du taux d'alimentation sur l'énergie spécifique de raffinage. Le signal de puissance pondéré est utilisé à trois endroits dans la simulation *CADSIM Plus™*:

- ✎ Au raffineur, pour calculer l'énergie spécifique (kJ/kg) en divisant la puissance par le taux d'alimentation et en ajustant les unités :  $[\text{Puissance (kW)} / \text{Taux d'alimentation (kg/min)}] * [(60 \text{ kJ/min}) / \text{kW}]$  ;
- ✎ Indirectement à partir du raffineur, Au module polynomial d'ordre 2 permettant de déterminer le CSF en fonction de l'énergie spécifique de raffinage (voir l'Annexe C – Données sur le pin gris) ;
- ✎ Au module OPC\_104\_ENTREFER\_MPC, pour fournir à *DeltaV* le signal de puissance requis à la boucle 104-ENTREFER-MPC.

L'indice d'égouttement (CSF) est utilisé comme contrainte afin de conserver la qualité de pâte désirée en sortie du raffineur, soit entre 500 et 650 ml.

*Plusieurs hypothèses sont associées à la présente section et il importe de préciser que c'est la vérification de la faisabilité d'implantation de la stratégie FAÉ qui prime sur la précision des modèles dans le cadre du présent travail.* Pour les fins de la simulation du fichier CIPP3.dra, des relations liant la puissance et l'entrefer ainsi que le CSF et l'énergie spécifique de raffinage étaient requises. La relation entre la puissance et l'entrefer n'est pas étudiée couramment puisqu'elle est inhérente au procédé (réel) lui-même. Par exemple en usine, l'entrefer est ajusté pour obtenir la charge désirée (affichée par le DCS). Les données à ce sujet sont donc assez rares. D'autant plus que c'est habituellement les caractéristiques de la pâte à la sortie du deuxième stage de raffinage qui sont étudiées. Il a cependant été possible d'obtenir, grâce à la collaboration du technicien au raffinage du CIPP, des données sur le premier stage de raffinage de copeaux de pin gris, datant de 2005 (Annexe C – Données sur le pin gris), où l'entrefer avait été pris en note. Ces données ont été utilisées pour extraire les deux relations mentionnées précédemment. Les deux relations proviennent donc de données pour des premiers stages de raffinage à des températures de 140 et 160°C (le raffinage atmosphérique a été omis). Des courbes de tendance de type polynomial de deuxième ordre en ont été extraites. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la courbe de tendance du CSF en fonction de l'énergie spécifique est pauvre mais l'avantage d'avoir utilisé les données du pin gris pour établir les relations entre ces variables est que cela assure tout de même un meilleur réalisme à la simulation.

### **7.3.2 Boucles du niveau tactique**

L'échelle de temps associée aux boucles de contrôle du niveau tactique (103TIC005\_MPC1.dra et 104RAF001\_MPC1.dra) est de 30 secondes. L'exécution se fait tout de même à toutes les secondes dans *CADSIM Plus™*, mais étant donné que les valeurs totalisées provenant du fichier CIPP3.dra ne changent qu'à toutes les 30 secondes, la différenciation des échelles de temps prévaut. Pour des raisons pratiques (se référer à la section 6.3), *DeltaV* exécute tout de même l'algorithme des modules de

contrôle MPC visés (103\_TIC\_005\_MPC1 et 104\_RAF\_001\_MPC1) à une fréquence moindre ; les deux logiciels ne sont donc pas synchronisés à ce niveau.

Les boucles du niveau tactique gèrent des variables de niveau supérieur à celles du plancher de l'usine. Ces variables ne peuvent pas être suivies par des transmetteurs comme c'est cas pour la température ou la pression ; c'est pourquoi elles font l'objet d'un fichier *CADSIM Plus™* distinct. Cette distinction est aussi liée aux échelles de temps différentes entre les niveaux de production tel que décrit au Chapitre 5 - Simulation : outil logiciel *CADSIM Plus™* et laisse ainsi place aux totalisateurs et aux liens DDE pour assurer la communication entre ces différentes échelles de temps.

### 7.3.2.1 Boucle 103-TIC-005-MPC1

- *Fichier CADSIM Plus™ associé : 103TIC005\_MPC1.dra*
- *Module de contrôle DeltaV associé : 103\_TIC\_005\_MPC*
  - *Variable contrôlée : énergie spécifique de consommation de vapeur à la trémie de préchauffage (consigne cascadée par la boucle de contrôle 103-TIC-005-MPC2)*
  - *Variable manipulée : consigne de température (cascadée à la trémie de préchauffage)*
  - *Perturbation : débit d'alimentation de copeaux (103-CON-001)*

Le fichier 103TIC005\_MPC1.dra de *CADSIM Plus™* est la simulation du procédé associé au contrôle superviseur de la boucle de température de la trémie de préchauffage. Le fichier reçoit, par le biais de DDEIN CIPP3, deux signaux en provenance du fichier CIPP3.dra : la totalisation de l'énergie de vapeur consommée pour chauffer les copeaux (kJ) et la totalisation de la quantité de copeaux alimentés à la trémie (kg), pendant un intervalle de 30 secondes. L'énergie est divisée par la quantité de copeaux, pour donner la consommation d'énergie spécifique en kJ/kg pour cette période de 30 secondes. Ce signal d'énergie spécifique constitue la variable contrôlée qui est transmise au module de contrôle 103\_TIC\_005\_MPC1 de *DeltaV* via OPC\_103\_TIC\_005\_MPC1.

Le signal d'énergie spécifique constitue la variable manipulée au regard du deuxième niveau de MPC (103-TIC-005-MPC2). Son traitement par le totalisateur permet d'assurer la transition vers le fichier 103TIC005\_MPC2.dra en respect avec l'horizon de temps qui passe de 30 secondes à trois minutes.

### 7.3.2.2 Boucle 104-RAF-001-MPC1

- *Fichier CADSIM Plus™ associé : 104RAF001\_MPC1.dra*
- *Module de contrôle DeltaV associé : 104\_RAF\_001\_MPC1*
  - *Variable contrôlée : coût d'énergie spécifique de raffinage (consigne cascadée par la boucle de contrôle 104-RAF-001-MPC2)*
  - *Variable manipulée1 : consigne de puissance de raffinage (cascadée à la boucle d'entrefer)*
  - *Variable manipulée2 : consigne de débit de copeaux (cascadée au convoyeur d'alimentation de copeaux)*

Cette boucle MPC porte sur le contrôle du coût d'énergie spécifique de raffinage grâce à la manipulation du débit de copeaux et/ou de la puissance (ou charge) de raffinage. L'énergie spécifique de raffinage peut être définie par la relation suivante [9] :

$$\text{Énergie spécifique de raffinage (kJ/kg)} = \frac{\text{Charge (kW)}}{\text{Taux production (kg/s)}} \quad \text{Éq. 7.1}$$

La conversion en coût d'énergie spécifique de raffinage se fait dans le fichier 104RAF001\_MPC1.dra. Ce dernier reçoit à toutes les 30 secondes du fichier CIPP3.dra, par le biais de DDEIN CIPP3, deux signaux soient la moyenne de la puissance consommée au raffineur primaire et la moyenne du débit de pâte. Dans ces deux cas, puisque les variables sont des flux, la totalisation devrait plutôt être vue comme une moyenne (se référer aux sections 5.3 et 5.4). La puissance est divisée par le débit de pâte et les unités sont ajustées pour exprimer le résultat en kJ/kg de pâte puis multipliée par le coût de l'électricité (\$/kW-h et les unités sont ajustées), ce qui donne le coût d'énergie spécifique de raffinage pour 30 secondes.

La donnée à la base du coût de l'énergie est tirée du site d'Hydro-Québec qui indiquait un tarif de 0,0457 \$/kW-h pour les clients d'affaires, moyenne puissance. Un signal sinusoïdal, dont l'amplitude a été fixée par un minimum du coût d'électricité égal 0,0457 \$/kW-h moins 5% et un maximum égal à 0,0457 \$/kW-h plus 20%, oscille sur une période de trois heures. Afin d'augmenter le réalisme de l'occurrence de la perturbation, celle-ci est totalisée (de la même façon que le sont les autres signaux) pendant dix minutes de façon à présenter un signal en échelons dont l'échelle de temps est supérieure à celle du plus haut niveau simulé (ici trois minutes). Ce signal est acheminé vers le fichier 103TIC005\_MPC2 (via DDECLIENT1) et vers le module de contrôle 104\_RAF\_001\_MPC2 (via OPC\_104\_RAF\_001\_MPC2).

Le bloc MPC est configuré de telle sorte qu'il vise à maximiser, en respect avec le point de consigne provenant de 104-RAF-001-MPC2, le taux d'alimentation des copeaux (donc le taux de production). Le traitement du signal de coût d'énergie de raffinage par le totalisateur permet d'en assurer la transition vers le fichier 104RAF001\_MPC2.dra en respect avec l'horizon de temps qui passe de 30 secondes à trois minutes.

Enfin, la consommation d'énergie reliée à l'utilisation de vapeur dans le maintien de la pression dans le lessiveur et dans le raffineur n'a pas été considérée. Comme c'est le cas pour la valve de vapeur 103-TIC-005, le débit de vapeur des valves 104-PIC-001A et 104-PIC-007 doit être en réseau pour que *CADSIM Plus*<sup>™</sup> reconnaisse celles-ci comme des valves de contrôle. Ceci implique que les débits de vapeur associés à ces valves de contrôle de pression sont très élevés et l'énergie associée complètement en dehors de l'ordre de grandeur de l'énergie spécifique de raffinage. Les considérer dans le calcul n'aurait eu aucun sens.

### 7.3.3 Boucles du niveau stratégique

L'échelle de temps associée aux boucles de contrôle du niveau stratégique (103-TIC-005-MPC2 et 104-RAF-001-MPC2) est de trois minutes. Tel que précédemment, l'exécution se fait tout de même à toutes les secondes dans *CADSIM Plus*<sup>™</sup>. Cependant, pour les mêmes raisons qu'au niveau tactique, *DeltaV* exécute l'algorithme des modules de contrôle concernés (103\_TIC\_005\_MPC2 et 104\_RAF\_001\_MPC2) à une fréquence

moindre. Les boucles du niveau stratégique gèrent des variables de niveau supérieur à celles du plancher de l'usine. Elles font donc, elles aussi, l'objet d'un fichier *CADSIM Plus™* distinct.

### 7.3.3.1 Boucle 103-TIC-005-MPC2

- Fichier *CADSIM Plus™* associé : 103TIC005\_MPC2.dra
- Module de contrôle *DeltaV* associé : 103\_TIC\_005\_MPC2
  - Variable contrôlée : coût de préchauffage à la trémie (consigne cascadée par la boucle de contrôle 104-RAF-001-MPC2)
  - Variable manipulée : consigne de l'énergie spécifique de consommation de vapeur à la trémie de préchauffage (cascadée à la boucle 103-TIC-005-MPC1)

Le fichier simulation 103TIC005\_MPC2.dra de *CADSIM Plus™* est associé au niveau gestion du site et de l'usine de la boucle de température de la trémie de préchauffage. Il reçoit des données en provenance des fichiers CIPP3.dra (rendement du raffineur en %) par le biais de DDEIN 2, 103TIC005\_MPC1.dra (moyenne de la consommation d'énergie spécifique de préchauffage en kJ/kg) via DDEIN et 104RAF001\_MPC1 (fluctuation du coût de l'énergie en \$/kW-h) via DDEIN 1. La consommation d'énergie est multipliée par le coût de l'électricité et divisée par le rendement du raffineur ; les unités sont ajustées de façon à obtenir le coût de préchauffage de la trémie en \$/kg pâte. Ce signal est envoyé au module 103\_TIC\_005\_MPC2 de *DeltaV* via OPC\_MPC2 et y est utilisé comme variable contrôlée. Comme précédemment, afin d'assurer la simultanéité de la perturbation le signal de fluctuation du coût de l'électricité, ce dernier est directement envoyé de 104RAF001\_MPC1.dra à 103TIC005\_MPC2.dra.

### 7.3.3.2 Boucle 104-RAF-001-MPC2

- Fichier *CADSIM Plus™* associé : 104RAF001\_MPC2.dra
- Module de contrôle *DeltaV* associé : 104\_RAF\_001\_MPC2
  - Variable contrôlée : Profit de l'atelier de PTM
  - Variable manipulée : consigne de coût d'énergie de raffinage (cascadée à la boucle 104-RAF-001-MPC1)



- *Variable manipulée2 : consigne de coût d'énergie de préchauffage à la trémie (cascadée à la boucle 103-TIC-005-MPC2)*

Le profit à l'atelier de PTM, constitue l'objectif global à atteindre par le système à l'étude. Ceci est permis grâce à la manipulation des coûts d'énergie de raffinage et de préchauffage de la trémie. Ces deux signaux sont transférés des fichiers 104RAF001\_MPC1 et 103TIC005\_MPC1 via DDEIN et DDEIN 1 respectivement. Ils constituent, avec le coût des matières premières (fixé à 0,075 \$/kg de pâte), les coûts variables et sont additionnés ensemble puis multipliés par la quantité de pâte produite pendant l'intervalle (3 minutes). Le coût fixe de main d'œuvre (fixé à 0,12 \$ pour trois minutes) y est ajouté pour former le total des coûts de production. Les ventes sont calculées en multipliant la quantité de pâte produite par le prix de vente de la PTM (fixé à 0,50 \$/kg de pâte). L'hypothèse que toute la pâte produite est vendue est posée. Finalement, le profit de l'atelier de PTM est calculé (pour une période de trois minutes) en soustrayant les coûts de production du montant des ventes. L'objectif est l'atteinte du profit maximal qui est de 0,481 \$ compte tenu des limites opérationnelles des niveaux inférieurs.

La fluctuation du coût de l'électricité représente la perturbation globale pour ce système (raffineur primaire). Même si elle se présente à des niveaux intermédiaires (entre dans le calcul des coûts d'énergie de raffinage et de préchauffage), elle affecte directement l'objectif global visé (maximisation du profit au niveau stratégique) qui en dépend. Il faut comprendre ici que les échelles de temps des niveaux de production étant courtes, la perturbation et son effet sur l'objectif global se jouent aussi sur une échelle réduite.

## **7.4 Implantation**

### **7.4.1 Identification du procédé à l'étude**

Les sections précédentes ont présenté le procédé à l'étude et les liens entre les variables de chacun des niveaux. Dans le cadre du processus visant à implanter successivement les niveaux de MPC « par-dessus » le DCS régulateur, chacune des variables PPP

interpellées a dû être soigneusement définie dans *CADSIM Plus™* et paramétrée dans *DeltaV* ; les variables touchées par les cascades de MPC étant particulièrement sensibles.

Une fois le système ainsi défini et établi, l'identification des paramètres de procédé de chacune des boucles de contrôle, tant régulateur qu'avancé, doit être faite manuellement. La méthode est la même pour toutes les boucles (DCS et MPC) : « bump test » sur le procédé en boucle ouverte (non contrôlé) et évaluation du gain, du délai et de la constante de temps [75]. À noter que l'exercice sur certaines des boucles du niveau régulateur a été facilité par le fait que le délai et la constante de temps ont été fixés.

Le tableau 7.2 dresse les valeurs de délai, de constante de temps, de TSS (Time to steady state) et autres paramètres associés pour les boucles de contrôle MPC (les informations sur les boucles PID figurent directement sur les pages écran du fichier CIPP3.dra disponibles à l'Annexe A – Pages écran *CADSIM Plus™* du procédé à l'étude). Le tableau affiche dans un premier temps le délai, la constante de temps, le TSS tiré de ces deux valeurs (le TSS est égal à quatre fois la constante de temps plus le délai) et l'échelle de temps liée au MPC (fixée par le niveau de production). Lorsque la variable contrôlée dépend de plus d'une variable manipulée et/ou d'une contrainte, c'est le TSS le plus limitant (temps le plus long) qui apparaît au tableau.

**Tableau 7.2 Caractéristiques des contrôleurs MPC liées à l'identification du procédé**

Boucle	Délai	Const. de temps	TSS	$\Delta t$ du niveau production	TSS pour identif. modèle	Temp requis identif. modèle	Taux exécution max <i>DeltaV</i>
104_ENTREFER_MPC	3 s	3 s	15 s	1 s	120 s	15 min	1 s
103_TIC_005_MPC1	30 s	55 s	250 s	30 s	240 s	30 min	2 s
104_RAF_001_MPC1	30 s	30 s	150 s	30 s	240 s	39 min	2 s
103_TIC_005_MPC2	3 min	2 min	11 min	3 min	1200 s	150 min	10 s
104_RAF_001_MPC2	3 min	2 min	11 min	3 min	1200 s	196 min	10 s

Afin de mettre en service (« commissioning ») les contrôleurs MPC, *DeltaV* doit procéder à l'identification du procédé dans le but d'en établir le modèle. Ceci est permis par l'application *PredictPro* qui base notamment son identification du procédé sur le

TSS du procédé entré par l'utilisateur. Les concepteurs de *DeltaV* recommandent d'entrer comme TSS la plus grande des deux valeurs suivantes : trois fois la constante de temps plus le délai ou quatre fois le délai. *PredictPro* fixe alors le taux d'exécution (« scan rate ») maximal permis du contrôleur MPC à la valeur de TSS/120. La valeur minimale de TSS acceptée par *PredictPro* est 120 secondes, lié au fait que le taux d'exécution minimal possible pour un bloc MPC est d'une seconde.

Ainsi, deux conditions doivent être respectées lors de la détermination du TSS qui sera fourni à *PredictPro* pour l'identification du modèle : le TSS doit avoir une valeur minimale de 120 secondes et le taux d'exécution de la boucle supérieure doit idéalement être plus élevé ou égal à celui de la boucle inférieure. Les TSS entrés dans *PredictPro* figurent au tableau 7.2 sous l'appellation « TSS pour identification modèle » (ci après : TSS modèle). Le TSS modèle de la boucle 104-RAF-001-MPC1 a été fixé à la même valeur que celui de la boucle 103-TIC-005-MPC1 afin de mieux refléter le fait qu'elles possèdent la même échelle de temps. Le TSS modèle des boucles de niveau stratégique a été surestimé afin de faire tendre le taux d'exécution vers l'échelle de temps. Cependant, un TSS modèle plus élevé que 1200 s entraîne un temps d'identification du modèle relativement long (en considérant qu'au cours de la recherche, chacun des modèles a été identifié plusieurs dizaines de fois à mesure des changements apportés à la configuration à tous les niveaux) sans compter le fait que *Predict Pro* tend à se déconnecter régulièrement en cours d'identification pour cause de bris dans la transmission du signal (l'identification doit alors être reprise du début). Enfin, le tableau 7.2 présente les paramètres associés à *DeltaV* qui découlent des précédents, soient le temps requis par *Predict Pro* pour procéder au test d'identification et le taux d'exécution du bloc *MPC-Pro* tiré du TSS modèle.

Considérant le concept des totalisateurs qui assurent la différenciation entre les échelles de temps, le procédé des niveaux tactique et stratégique en est un de type échelon qui ne correspond pas à la dynamique naturelle des procédés habituels. En effet, en prenant l'exemple du niveau tactique où l'échelle de temps est de 30 secondes, une nouvelle valeur est envoyée par le niveau production (CIPP3.dra) au niveau tactique (ex. : 103TIC005\_MPC1) à chaque 30 secondes. La valeur de la variable contrôlée par le

niveau tactique reste donc constante pendant 30 secondes puis change instantanément pour demeurer à nouveau constante pendant 30 secondes et ainsi de suite. En figurant que la modification des conditions d'opération au niveau production est implantée très rapidement et que la dynamique du procédé du niveau production touché par cette modification est aussi très rapide, dépendamment du moment où la modification a lieu relativement à l'échelle de temps du niveau supérieur (tactique), le temps requis pour atteindre le nouvel équilibre (TSS) au niveau tactique peut être plus grand que son intervalle de temps (ici 30 secondes). Par exemple, si la modification des conditions d'opérations du niveau inférieur survient au temps  $t = 15$  s (relativement à l'échelle de temps de 30 secondes au niveau supérieur), la moitié de la valeur totalisée par le niveau supérieur pendant l'intervalle de temps actuel sera liée aux conditions d'opération avant modification et l'autre moitié tiendra compte des conditions d'opération après modification. La stabilisation du niveau supérieur ne sera donc constatée qu'après la deuxième totalisation, au temps  $t = 60$  s, ce qui implique ici un TSS de 45 secondes. Cette valeur de TSS est appelée à varier selon le moment où se produit la modification des conditions d'opération.

Lorsque d'autres niveaux de MPC sont surimposés, le temps requis pour atteindre un nouvel équilibre au niveau supérieur peut ainsi être d'autant plus long que le nombre d'étages est grand, abstraction faite de l'échelle de temps qui va aussi en augmentant. Quoiqu'il semble que le TSS modèle pouvant être entré pour l'identification dans *Predict Pro* ne connaisse pas de maximum, il est à prévoir que pour une échelle de temps beaucoup plus grande au niveau supérieur (24 heures par exemple), le taux d'exécution du contrôleur *MPC-Pro* aurait avantage à s'approcher de cette valeur mais l'identification risque d'être problématique puisque extrêmement longue.

Malgré le fait que pour les niveaux MPC1 et MPC2 l'intervalle d'exécution de *DeltaV* n'était pas synchronisé avec celui de *CADSIM Plus™*, les modèles établis par l'application *Predict Pro* sont relativement précis. En effet, en comparant la prédiction du modèle avec la valeur actuelle, le carré de l'erreur est inférieur à 7% pour les modèles générés par *Predict Pro* et ce, à tous les niveaux de production. Les caractéristiques des

modèles des contrôleurs MPC sont présentées à l'Annexe D – Modèles des contrôleurs MPC.

Il est possible, une fois le modèle établi par *Predict Pro*, d'en modifier les paramètres. Ceci a été fait dans le cas du modèle qui lie le profit à l'atelier de PTM avec le coût de l'énergie de préchauffage. Dans ce cas précis, le tracé était plat ; ce qui peut être dû au faible ordre de grandeur des données de coût de préchauffage relativement à celles de coût de raffinage et de profit et/ou à la faible excitation de la variable manipulée lors du test d'identification de procédé. En effet, lors de ces tests, l'excitation de la variable manipulée est fixée par l'utilisateur et s'exprime en pourcentage de la plage opérationnelle de la variable contrôlée. Cependant, le mode de détermination des plages opérationnelles (voir section 7.2) fait que la plage d'une variable contrôlée est plus large que celle de la plage de la consigne qui lui est associée. Puisque dans le cadre de l'identification du procédé (modélisation *Predict Pro*), il importe de sélectionner une plage restreinte mais représentative afin de maximiser la précision du modèle, cette plage (et donc les mouvements de la variable manipulée associée) est fixée de façon à couvrir au maximum la plage déterminée pour les consignes. Dans le cas du coût de préchauffage la plage de la consigne est restreinte relativement à celle de la variable contrôlée, ce qui donne une piètre précision au pourcentage de variation de la variable manipulée.

La vérification de données prédites relativement aux données actuelles pour les boucles 103-TIC-005-MPC2 et 104-RAF-001-MPC1 présente une corrélation moins intéressante que dans le cas des autres boucles MPC, ce qui est fort probablement dû à la fluctuation du coût de l'électricité qui entre dans le calcul des coûts d'énergie de préchauffage et de raffinage. Dans le cas de la boucle 104-RAF-001-MPC1, la corrélation entre le FIR et l'ARX est aussi moins bonne, ce qui laisse présager un modèle un peu moins précis.

#### **7.4.2 Paramètres des TS**

Un manque d'agilité est fonction de deux facteurs : le non respect de la limite de variabilité tolérée et le non respect du temps requis pour que la consigne réintègre les limites de variabilité permises. Le temps requis relève du temps que prend le procédé

pour atteindre le régime permanent suite à une perturbation à un changement de point de consigne (TSS).

Le tableau 7.3 indique les valeurs de tolérance et de TSS qui ont été utilisées dans le calcul des TS. Le TSS doit refléter le mieux possible la dynamique du procédé afin de mettre en lumière, le cas échéant, le manque d'agilité de celui-ci. Puisque le procédé des niveaux supérieurs est de type échelon, et pour les raisons décrites précédemment, il est difficile de déterminer avec précision le TSS qui leur est associé, mais l'évaluation provenant du tableau 7.2 et transcrite au tableau 7.3 est réaliste. Les tolérances ont été fixées arbitrairement, le SPC s'appliquant difficilement à cette portion isolée de procédé.

**Tableau 7.3 TSS et tolérance utilisés dans la détermination des TS**

Contrôleur	$\Delta t$ du niveau de production	TSS	Tolérance
103-CON-001	1 seconde	20 secondes	0,005 kg/min
103-TIC-005	1 seconde	246 secondes	1°C
104_ENTREFER_MPC	1 seconde	15 secondes	2 kW
103_TIC_005_MPC1	30 secondes	250 secondes	45 kJ/kg
104_RAF_001_MPC1	30 secondes	150 secondes	0,006 \$/kg pâte
103_TIC_005_MPC2	3 minutes	660 secondes	0,0015 \$/kg pâte
104_RAF_001_MPC2	3 minutes	660 secondes	0,02 \$

## Chapitre 8 - Résultats et analyse

Le présent chapitre vise l'étude et l'analyse des résultats de l'implantation de la stratégie FAÉ à une portion du procédé du CIPP et leur analyse. Dans un premier temps, les pages qui suivent portent sur les résultats liés l'implantation des niveaux successifs de MPC relativement aux échelles de temps, à l'interopérabilité du système ainsi formé et à l'identification des VS et TS. Le but de l'exercice étant de démontrer que le contrôle est efficace, que tous les modèles développés (autant dans *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> que dans *DeltaV*) sont adéquats et que l'implantation est fiable et fonctionnelle. Ensuite, un scénario d'évolution tiré des résultats obtenus est présenté. Finalement, une comparaison du système à l'étude avec et sans stratégie FAÉ est effectuée.

### 8.1 Résultats de l'implantation

Suite au développement d'une définition pratique et d'un mode de quantification de l'agilité (sections 3.2, 4.5, 7.2 et 7.4.2), à la reproduction dynamique par simulation du procédé de tous les niveaux de production et à l'implantation des échelles de temps (Chapitre 5 - Simulation : outil logiciel *CADSIM Plus*<sup>TM</sup>), à l'établissement de la communication entre la simulation *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> et le DCS *DeltaV* (section 3.4) et à la mise en place des MMPC sur deux niveaux successifs (section 7.4.1), l'implantation est complète et peut être testée.

La perturbation globale choisie est la variation du coût de l'électricité. Cette variation a été représentée sous la forme d'une sinusoïdale d'une période de 180 minutes, totalisée aux dix minutes (se référer à la section 5.3), variant dans l'intervalle 0,0457 \$/kWh -5% à 0,0457 \$/kWh +25%. Une perturbation unique et globale a été choisie pour tester l'implantation et ce, pour mettre en lumière l'entrée par le niveau stratégique et la répercussion jusqu'au bas de la pyramide. N'importe quel autre type de perturbation aurait pu être testé.

L'objectif global est le maintien d'un profit maximal de 0,481\$ par période de totalisation (trois minutes) au raffineur primaire. Dans cette implantation, le contrôleur



de la boucle 104-RAF-001-MPC2 chapeaute les autres boucles de contrôle. La consigne de profit étant fixée à sa valeur maximale, il est normal que les variables manipulées (liées à des coûts) qui lui sont associées soient maintenues à leur valeur minimale et c'est la perturbation du coût de l'électricité qui induit la variation du profit. Les résultats présentés découlent donc de la réaction du système à la perturbation. Les graphiques qui suivent couvrent un cycle complet de la perturbation, c'est-à-dire trois heures.

La meilleure façon d'exposer les résultats de l'implantation de la stratégie FAÉ consiste dans un premier temps à illustrer chacune des boucles par un graphique distinct comme le montrent les figures 8.1 à 8.7. Pour toutes ces figures, l'application *Process History View* de *DeltaV* a été utilisée (maximum de six tracés par page écran). Il n'est pas possible de présenter les trajectoires prédites par *PredictPro* des variables contrôlées et des contraintes puisqu'elles ne peuvent être archivées dans l'historien de *DeltaV*. Elles peuvent cependant être vues en temps réel grâce à l'application *MPC Operate Pro* comme l'illustre la figure 8.8.

Le code de couleur est le même pour les figures à 8.1 à 8.7 :

- ❖ Point de consigne est en bleu ;
- ❖ Variable contrôlée en rouge ;
- ❖ Variable manipulée en vert (identifiée manipulée1 lorsqu'il y a deux variables manipulées) ;
- ❖ Variable manipulée2 en noir (le cas échéant) ;
- ❖ Contrainte en violet (le cas échéant) ;
- ❖ Perturbation ou coût de l'électricité en brun (le cas échéant).

À noter que l'échelle des variables illustrées sur ces figures peut être partiellement négative afin de décaler et ainsi dégager les courbes les unes des autres. Ceci est le cas de plusieurs des figures du présent chapitre. Aussi, l'échelle choisie pour chacune des variables vise principalement à éviter le chevauchement de leur tracé respectif. Selon leur grandeur, ces échelles peuvent donc visuellement amplifier ou restreindre les variations qu'elles présentent. Se référer à la légende au bas de l'écran de chacune des figures pour l'identification des variables affichées. L'affichage de la valeur qui suit la

légende est malheureusement fixé à deux chiffres significatifs, c'est pourquoi certaines valeurs sont à zéro alors que ce n'est pas ce que montrent les tracés.

La période de trois heures à l'étude pour les figures 8.1 à 8.7 couvre la plage de 15h00 à 18h00 sur les pages écran. Ces graphiques démontrent que le contrôle avancé implanté est efficace et adapté. En effet, il est possible de constater que le mouvement des variables manipulées n'est pas erratique et que celui des variables contrôlées n'est pas oscillatoire. Cette observation permet d'asseoir les résultats qui suivent sur une base solide. Aussi, la distinction entre les échelles de temps ressort sur ces graphiques où l'on peut constater que le tracé des variables liées au niveau régulateur (boucles PID et boucle 104-ENTREFER-MPC) est continu alors que celui des boucles du niveau tactique (MPC1) présente des échelons à intervalle plus rapprochés que ceux des boucles de niveau stratégique (MPC2).

La figure 8.1 montre la fluctuation du coût de l'électricité en brun. Le tracé en bleu est la valeur maximale visée pour le profit à l'atelier de PTM, soit 0,481 \$. Cette valeur a été calculée en considérant une production maximale et des coûts d'énergie de raffinage, de préchauffage et d'électricité minimaux. Il apparaît que la consigne n'est pas atteinte au cours de la période à l'étude, ce qui est dû au fait que le coût d'énergie de raffinage ( $u_{2R1}$ ) demandé par le module de contrôle 104-RAF-001-MPC2 au module de contrôle 104-RAF-001-MPC1 n'est pas atteint par ce dernier.

La figure 8.1 montre aussi un tracé plat pour les variables manipulées, lesquelles sont maintenues à un minimum dans le but de maximiser le profit. À noter que les variables manipulées par les contrôleurs MPC (qui correspondent aussi aux consignes du niveau inférieur), sont calculées par le contrôleur à chaque exécution de celui-ci, ce qui explique pourquoi les tracés associés peuvent ne pas présenter l'échelon de l'intervalle de temps du niveau associé, mais plutôt celui du contrôleur (dix secondes pour le niveau stratégique et deux secondes pour le niveau tactique).

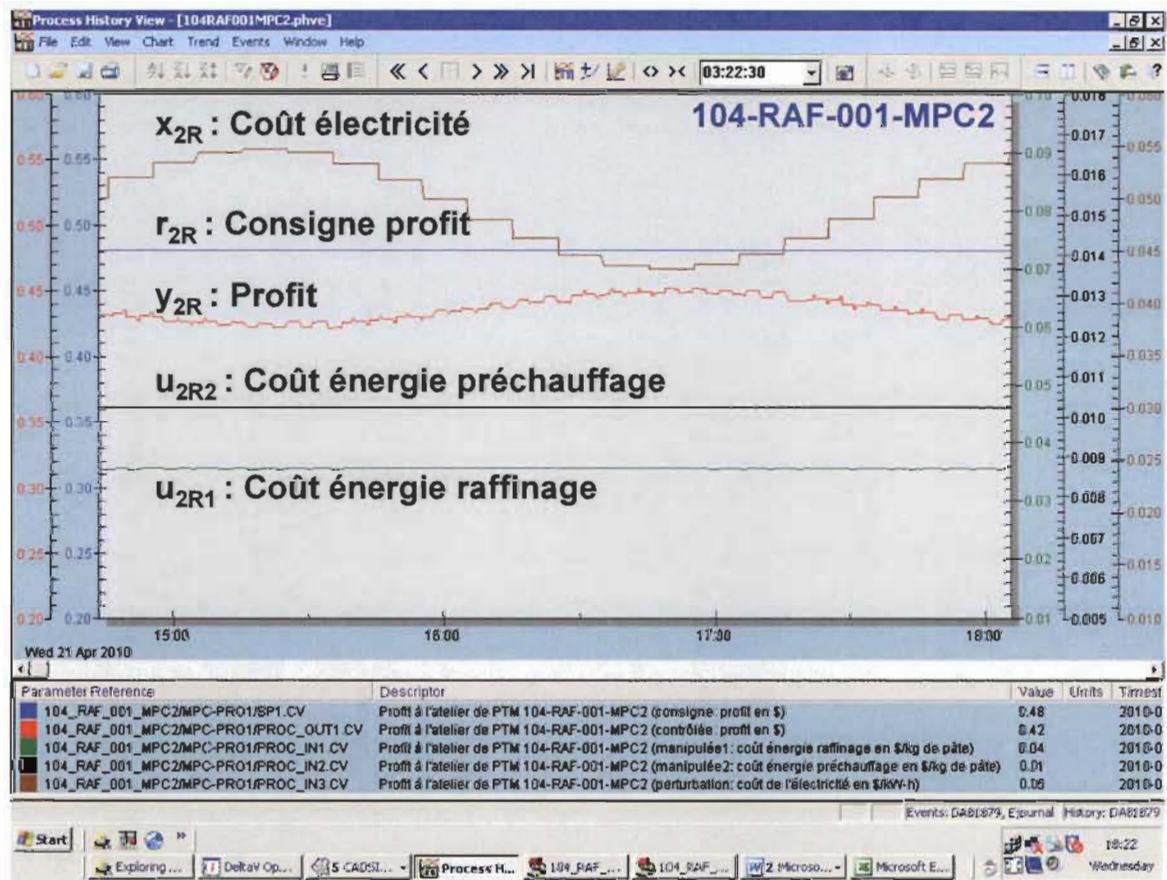


Figure 8.1 Tracé des principales variables de la boucle 104-RAF-001-MPC2

La figure 8.2 montre le niveau MPC1 associé à la boucle de raffinage. Puisque le coût de l'électricité entre dans le calcul du coût d'énergie spécifique de raffinage, celui-ci varie selon la fluctuation du coût d'électricité. La figure permet de constater que, même si le contrôleur MPC fixe les variables manipulées aux valeurs visant la minimisation du coût d'énergie de raffinage (la puissance à 16 kW et le débit de copeaux à 0,55 kg/min), ce dernier n'atteint pas la consigne cascadée par le niveau supérieur. Ceci est dû à la contrainte du niveau inférieur sur le CSF (figure 8.3).

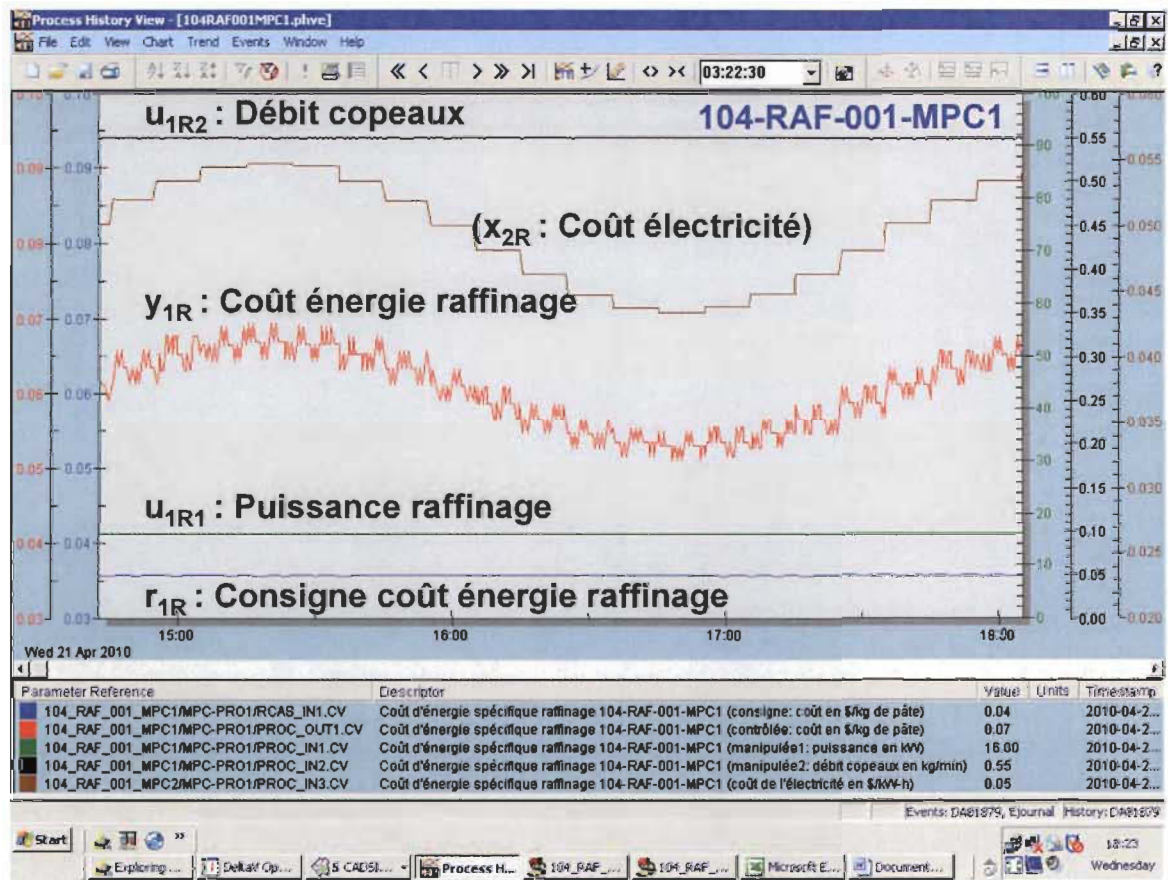


Figure 8.2 Tracé des principales variables de la boucle 104-RAF-001-MPC1



En effet, la figure 8.3 montre que la puissance de raffinage est limitée à une valeur minimale de 38,7 kW puisqu'en deçà de cette valeur, le CSF dépasserait la limite permise de 650 ml.

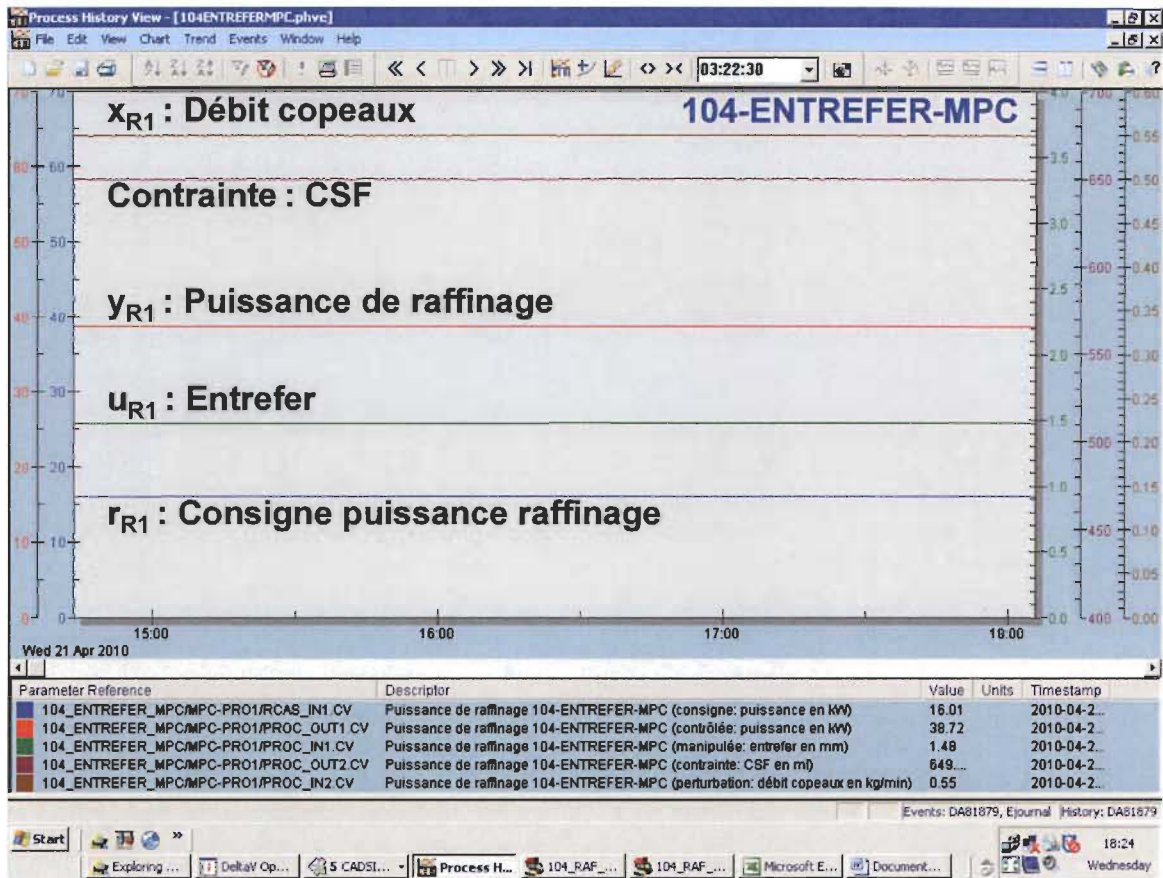


Figure 8.3 Tracé des principales variables de la boucle 104-ENTREFER-MPC

La figure 8.4 illustre les tracés des variables associées au convoyeur 103-CON-001 où le débit maximal est maintenu tel que demandé par le contrôleur de la boucle 104-RAF-001-MPC1.

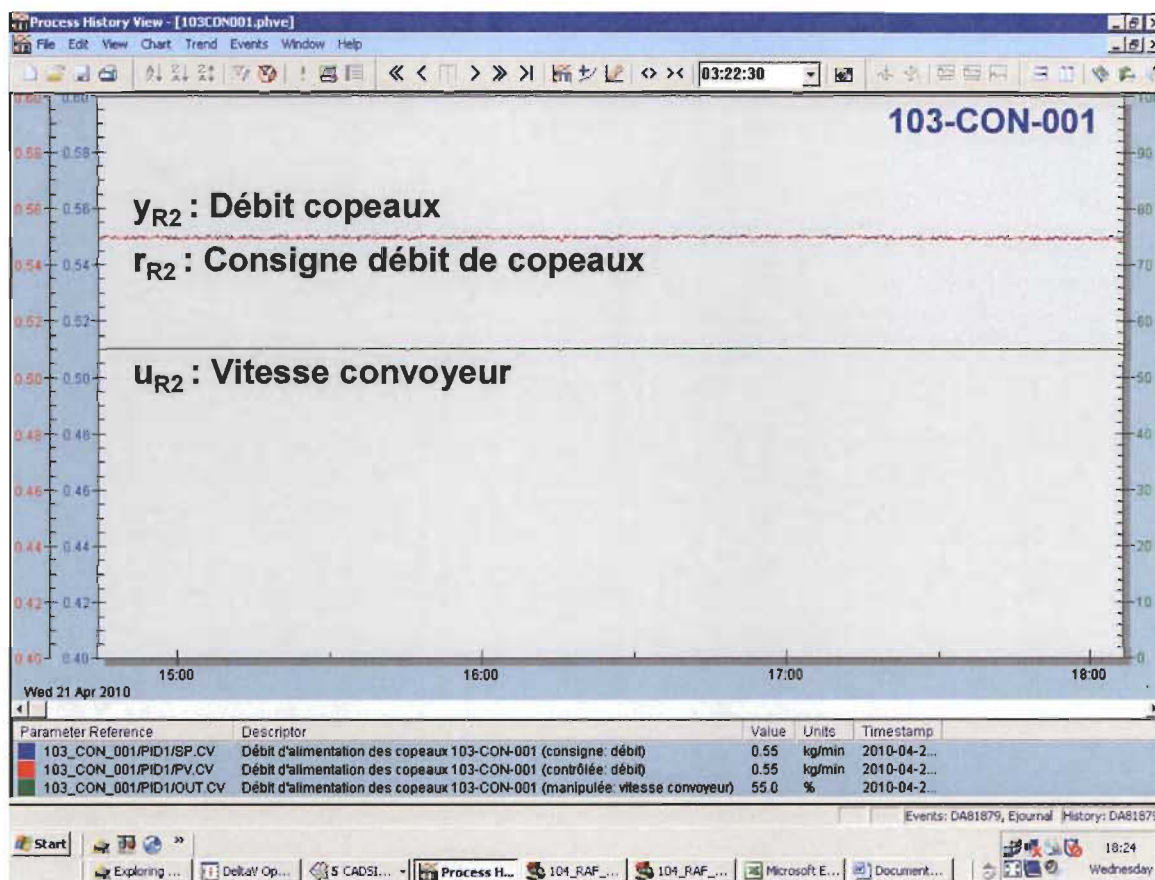


Figure 8.4 Tracé des principales variables de la boucle 103-CON-001

L'analyse de la figure 8.5 relative à la boucle 103-TIC-005-MPC2 montre que la consigne du coût d'énergie de préchauffage n'est atteinte que lorsque le coût d'électricité est à son minimum. Ceci est dû au fait que le coût d'électricité entre dans le calcul du coût de préchauffage, ce qui est bien visible en observant la courbe de la perturbation ( $x_{2R}$ ) et celle du coût d'énergie de préchauffage ( $y_{2T}$ ).

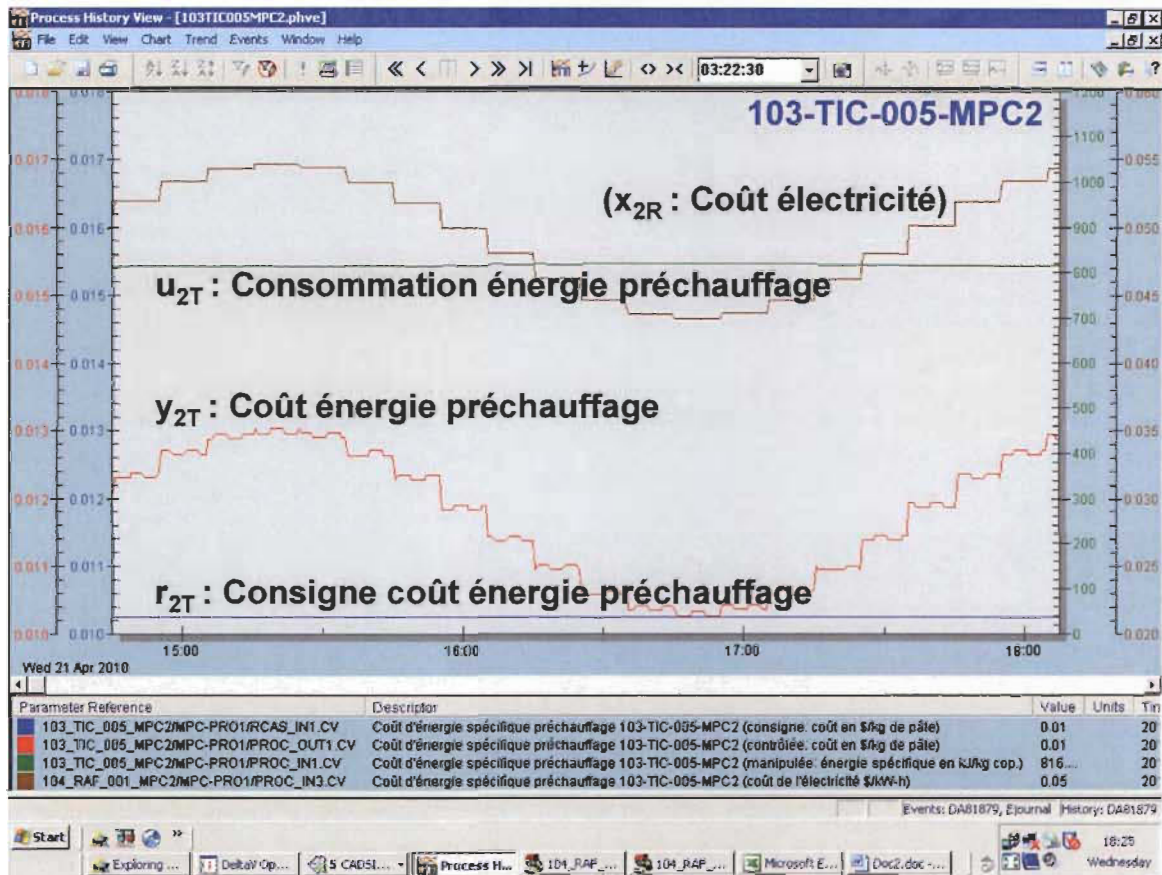


Figure 8.5 Tracé des principales variables de la boucle 103-TIC-005-MPC2



La figure 8.6 montre les tracés plats qui reflètent le maintien d'une consommation d'énergie spécifique de préchauffage minimale. L'écart entre la consigne et la variable contrôlée provient d'un décalage généré par les totalisateurs. En effet, les totalisateurs conçus dans le cadre de la stratégie FAÉ induisent un léger décalage relativement à la totalisation exacte de la valeur source utilisée, ce qui est dû au fait que le temps pendant lequel la soustraction s'effectue doit être assez long (de l'ordre d'une seconde) pour être « vu » par le module de totalisation (se référer à la section 5.3). Ceci implique que la donnée de cette seconde est perdue et ne s'ajoute pas à la valeur totalisée, c'est pourquoi les totalisateurs fournissent des valeurs légèrement sous-estimées. Dans ce cas-ci, la valeur de la variable contrôlée est surestimée puisqu'elle découle du rapport entre deux variables totalisées dans lequel le dénominateur est plus sous-estimé que le numérateur (donc division par un nombre plus petit, ce qui donne un plus grand résultat).

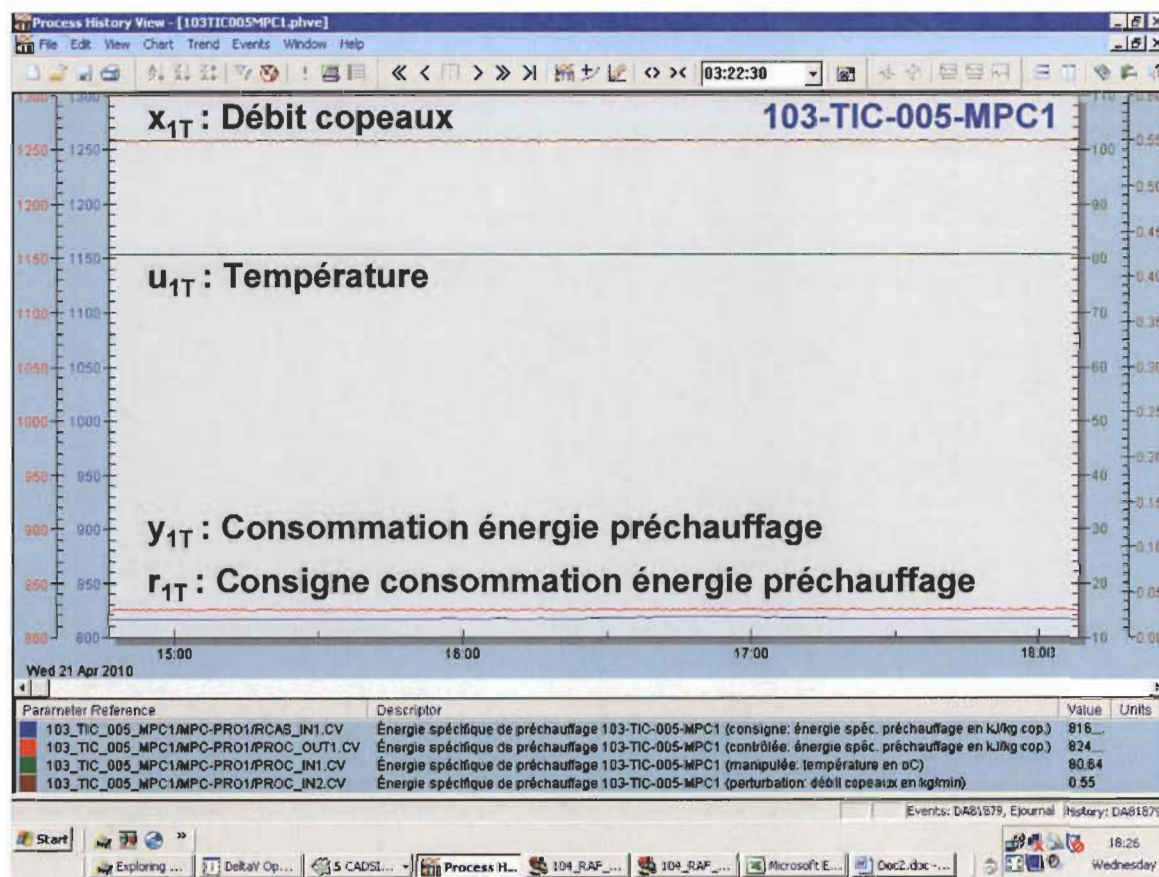
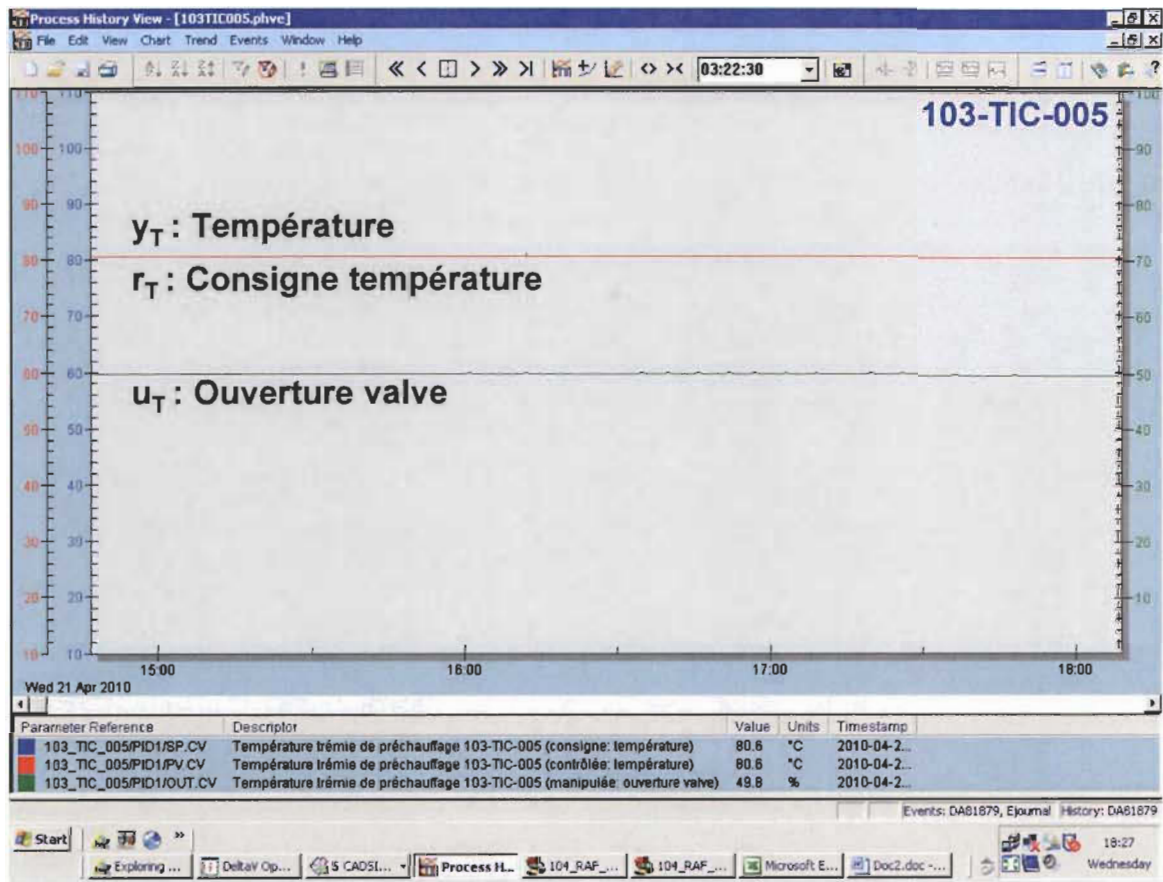


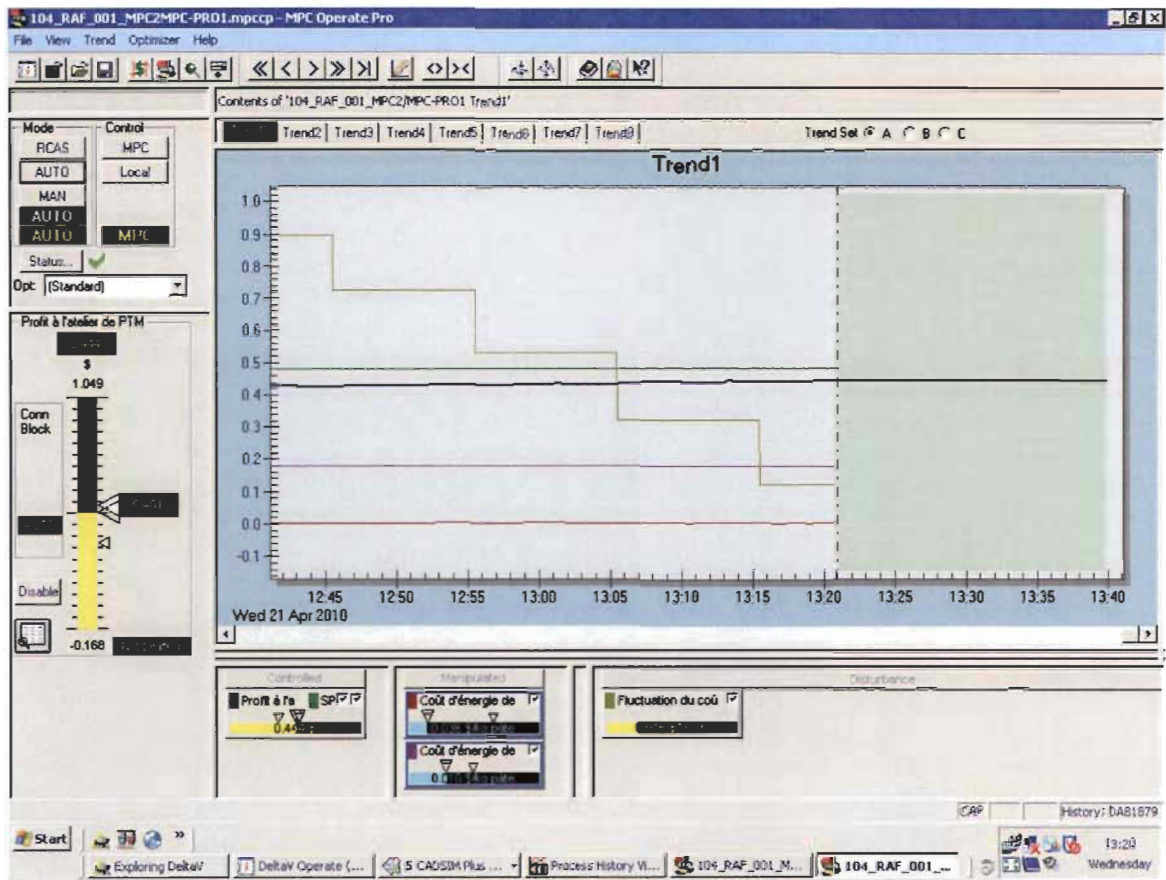
Figure 8.6 Tracé des principales variables de la boucle 103-TIC-005-MPC1

Enfin, la figure 8.7 illustre les tracés constants liés à la température maintenue à la limite minimale permise.



**Figure 8.7** Tracé des principales variables de la boucle 103-TIC-005

La figure 8.8 représente l'application *MPC Operate Pro* qui permet de faciliter l'opération des contrôleurs *MPC-Pro* notamment grâce à l'affichage des tracés des variables de la boucle de contrôle, à des informations relatives au statut de la boucle courante et des boucles en aval et à l'accès aux paramètres et données en temps réel de l'optimisateur.



**Figure 8.8** Écran d'opération *MPC Operate Pro* – suivi des tracés liés au contrôleur MPC2 de la boucle 104-RAF-001

## 8.2 Évaluation de la flexibilité du système

L'intégration et la quantification des concepts de flexibilité et d'agilité dans le DCS sont possibles grâce aux énoncés des équations 3.1 et 3.2. Ces énoncés font l'objet de modules de contrôle résidants dans *DeltaV*. Il y a un module de contrôle de VS et un module de contrôle de TS pour chacune des boucles suivantes : 103-CON-001, 103-TIC-005, 104-ENTREFER-MPC, 103-TIC-005-MPC1, 103-TIC-005-MPC2, 104-RAF-001-MPC1 et 104-RAF-MPC2. Les boucles 104-PIC-001 et 104-PIC-007 ont été omises puisque, dans le cadre de la recherche, leur consigne est fixe.

Les figures 8.9 et 8.10 exposent les limites de flexibilité de la boucle de raffinage et la figure 8.11 montre celles liées à la boucle de température. La période couverte par ces graphiques correspond aux mêmes trois heures que précédemment. À noter que les



limites de la variable manipulée d'un niveau supérieur correspondent à celles de la consigne d'un niveau inférieur et qu'elles apparaissent ici par le biais de la variable manipulée. Comme précédemment, les tracés ont été décalés afin de faciliter la visualisation des résultats ; il faut donc porter attention à leur échelle.

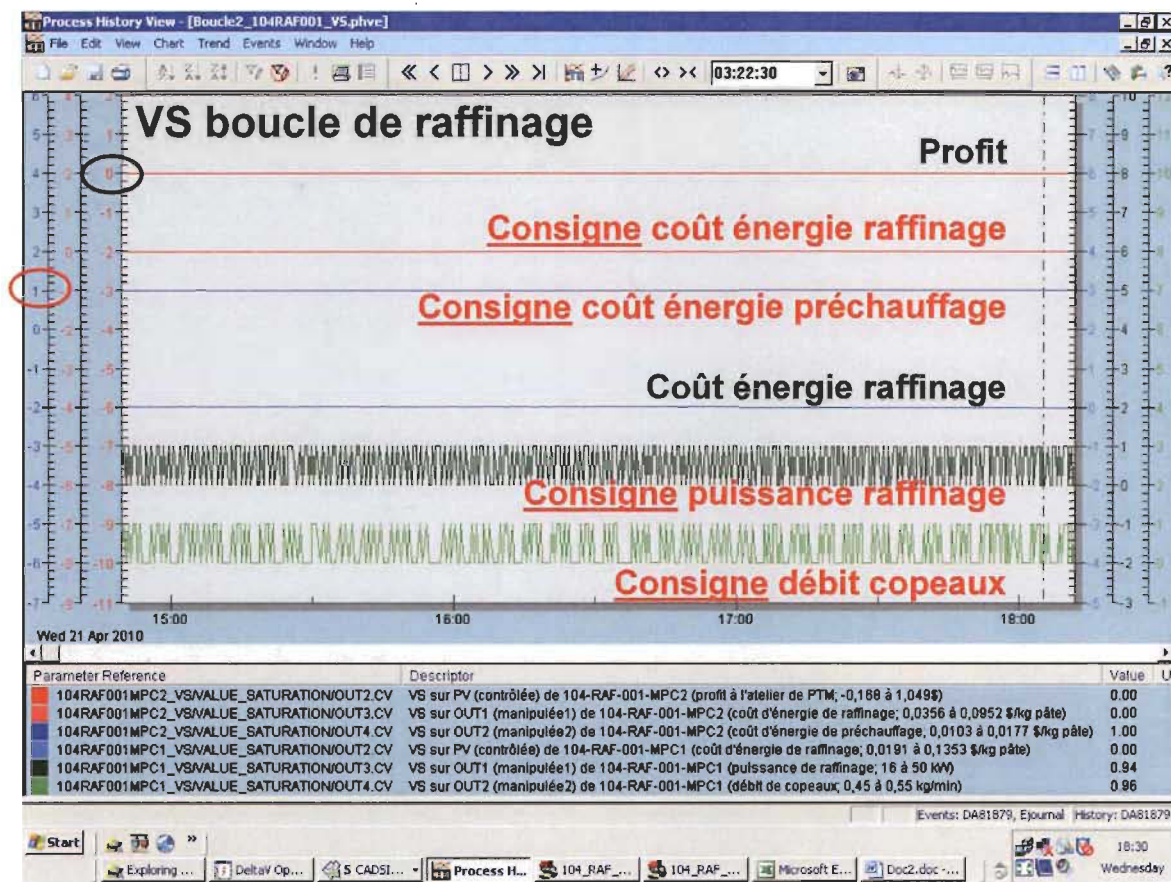


Figure 8.9 VS de la boucle de raffinage (1 de 2)

Le décalage généré par les totalisateurs a un impact marqué sur le suivi des limitations. En effet, les figures 8.1 et 8.2 démontrent que pour les boucles de contrôle 104-RAF-001-MPC1 et 104-RAF-001-MPC2, on aurait dû voir sur la figure 8.9 des VS sur les consignes de coût d'énergie de raffinage, d'énergie de préchauffage et de puissance de raffinage qui sont maintenues à leur niveau minimal ainsi que sur la consigne de débit de copeaux qui est maintenue à son niveau maximal. Ce n'est cependant pas le cas, puisque le VS de la consigne de coût de raffinage ne ressort pas et qu'il y a oscillation entre 0 et 1 pour les consignes de puissance et de débit de copeaux. Ceci est dû au fait que les valeurs fournies par les totalisateurs sont légèrement sous-estimées (tel que décrit

précédemment) et que *DeltaV* effectue les calculs en conservant un très grand nombre de chiffres significatifs qui ont un impact très important sur les saturations lorsque les variables concernées s'approchent des limites. Ce problème peut être très facilement réglé en resserrant légèrement les valeurs de limites entrées dans les blocs CALC des VS. Sur les graphiques de flexibilité et d'agilité des pages suivantes, les variables inscrites en noir ne présentent pas de limitation de VS ou TS alors que celles inscrites en rouge présentent une limitation (VS ou TS). C'est donc la couleur du texte de la variable qui prime sur le tracé des graphiques pour établir s'il y a VS ou TS. À noter que la consigne de profit n'est pas considérée puisque la maximisation du profit est visée comme objectif global.

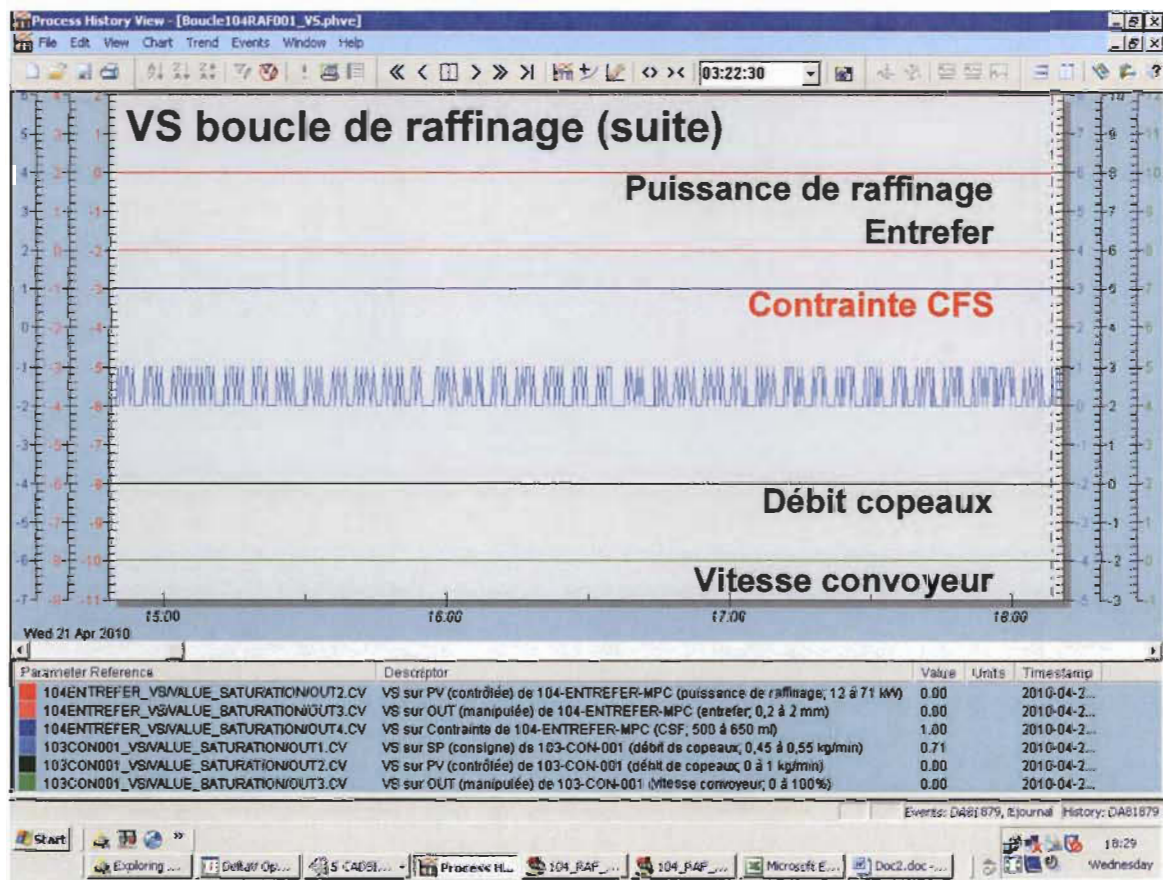


Figure 8.10 VS de la boucle de raffinage (2 de 2)

Les tracés de la figure 8.10 sont corrects à l'exception de la consigne de débit de copeaux qui oscille entre 0 et 1 puisqu'à cheval à quelques millièmes près de la barre des 0,55 kg/min. À noter que la précision de l'échelle employée relativement au



mouvement de la variable suivie peut fausser la perception dans la mesure où une échelle précise mettra en lumière un tracé qui oscille légèrement, ce qui ne sera pas le cas d'une échelle moins précise.

La figure 8.11 présente la même problématique que précédemment. En effet, selon le graphique, seulement la consigne de consommation d'énergie spécifique de préchauffage aurait connu des épisodes de manque de flexibilité. En réalité, la consigne de température de préchauffage présente aussi une limitation sur la valeur. Le mouvement du tracé VS de la consigne de consommation d'énergie de préchauffage qui connaît des épisodes de 0 et de 1 s'explique par le tracé de cette même variable à la figure 8.6 (en bleu) qui oscille légèrement au-dessus de sa limite minimale.

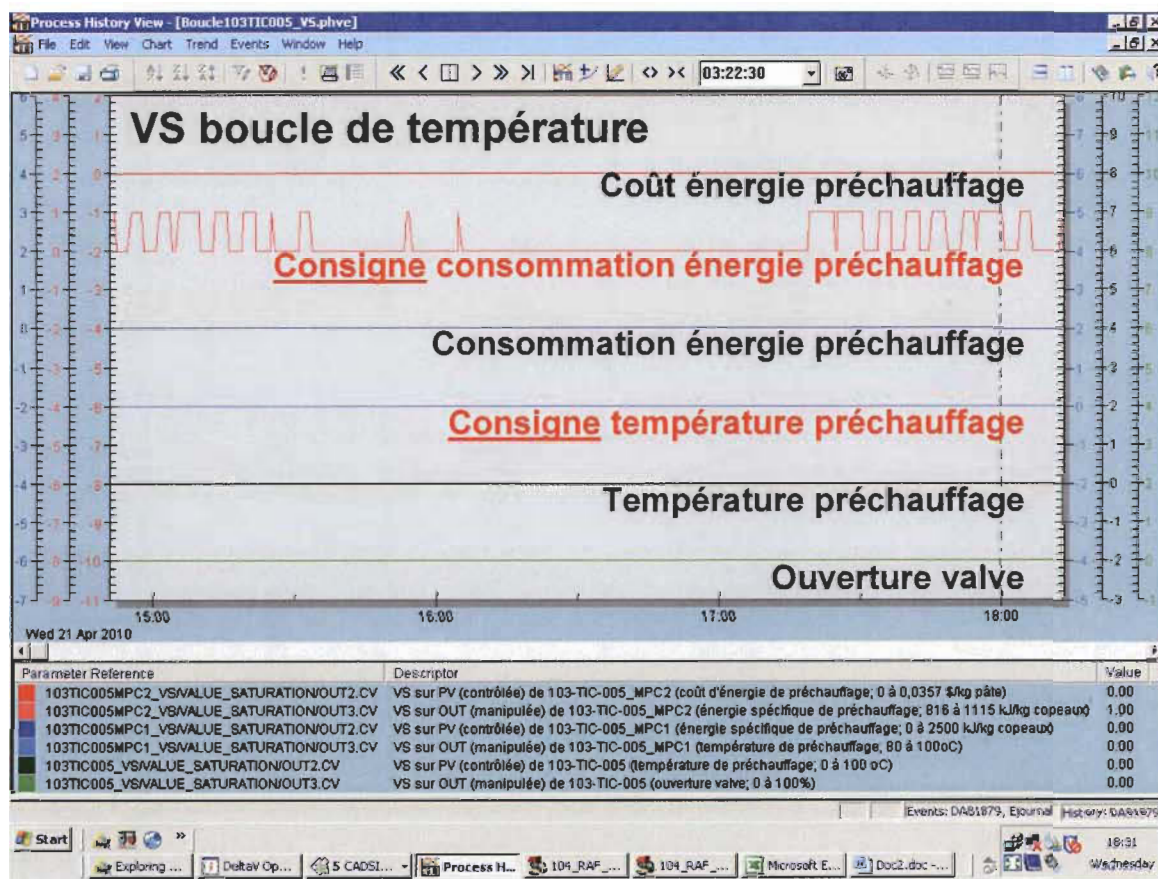


Figure 8.11 VS de la boucle de température



### 8.3 Évaluation de l'agilité du système

Les figures 8.12, 8.13 et 8.14 mettent en lumière les manques d'agilité du système à l'étude. À la figure 8.12, la présence de TS est variable et associée à un dépassement de la tolérance (variabilité) permise. Sur cette figure, la tolérance a été représentée graphiquement afin de faciliter la compréhension. Il est alors facile de repérer visuellement les périodes de TS (portions gauche et droite de la figure) et la période d'agilité (centre de la figure). La corrélation avec la figure 8.1 est aussi assez facile à faire en suivant le mouvement du profit relativement à son point de consigne.

La figure 8.13 montre les TS des autres boucles associées au raffinage. Il est possible de constater que le coût de raffinage est continuellement en TS pour la période à l'étude. Cette constatation était prévisible d'après l'analyse liée à la figure 8.2 qui faisait ressortir qu'il n'est pas possible, pour la valeur courante du coût de raffinage, d'atteindre sa consigne dans un contexte de maximisation du profit. Ce n'est donc pas la dynamique qui est en cause ici, mais un « offset » trop grand qui est dû à la contrainte sur le CSF. La situation est identique dans le cas de la puissance de raffinage qui présente elle aussi un TS ininterrompu. D'autre part, puisque la variabilité associée au débit de copeaux est beaucoup plus faible que la tolérance admise, cette variable ne présente aucun TS pendant la période à l'étude.

La figure 8.14 montre la présence variable d'un TS au niveau stratégique qui est dû au mouvement du coût de préchauffage qui suit celui de l'électricité et qui entraîne périodiquement un manque d'agilité lorsque l'« offset » est trop élevé. La consommation d'énergie spécifique et la température ne présentent aucun TS.

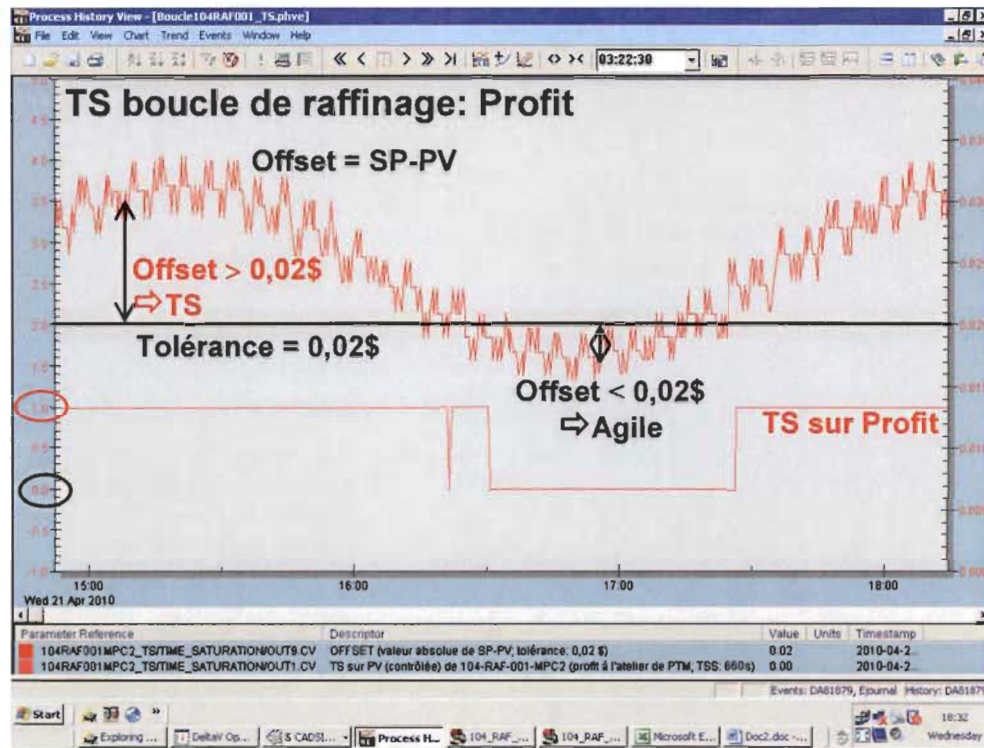


Figure 8.12 TS de la boucle de raffinage (1 de 2)

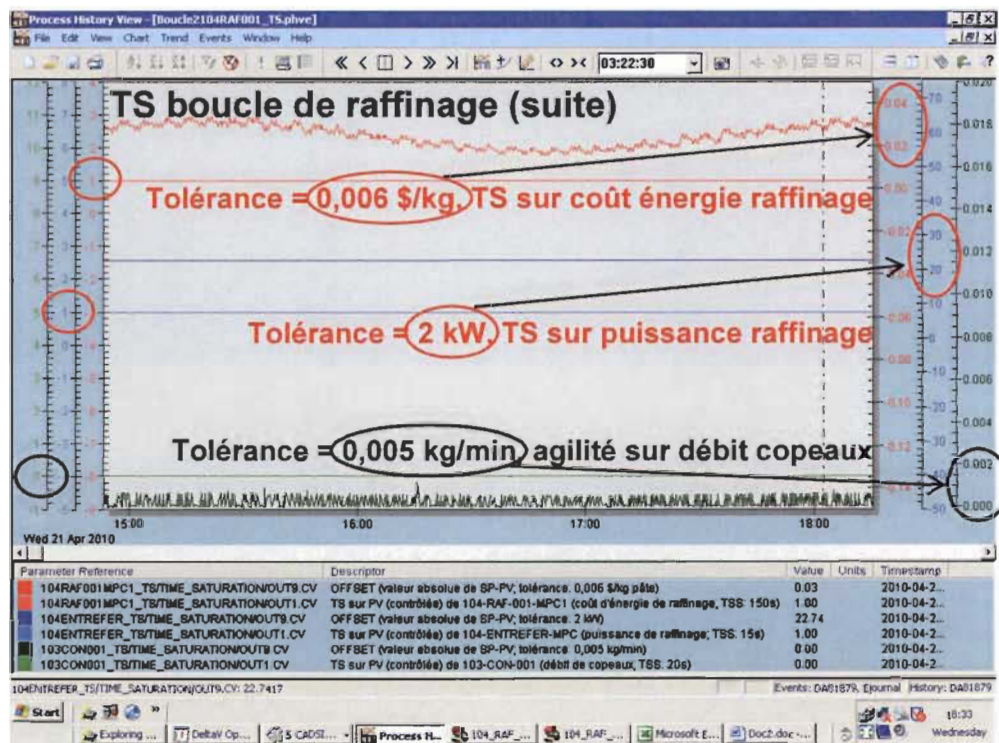


Figure 8.13 TS de la boucle de raffinage (2 de 2)

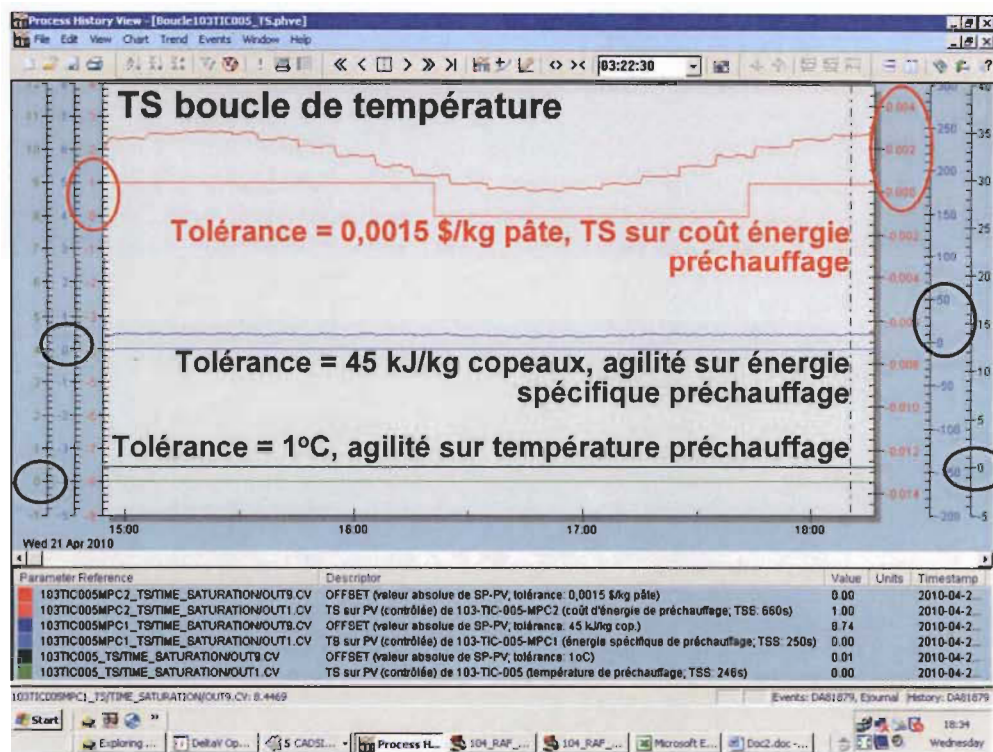


Figure 8.14 TS de la boucle de température

Pour les niveaux de production supérieurs présentant une échelle de temps plus grande donc un TSS plus élevé (ici 11, 4,2 et 2,5 minutes) ou pour les procédés démontrant une longue dynamique (TSS élevé), il est possible de s'attendre à deux scénarios distincts en ce qui a trait à l'agilité selon que l'on vise un optimum (minimum ou maximum) pour la variable contrôlée, ou que l'on désire qu'elle suive une consigne qui fluctue. Dans le premier cas, puisque la consigne ne change pas et que le compteur du TSS tourne, tout « offset » supérieur à la tolérance est vu comme une trop grande variabilité et lève un TS. Dans le deuxième cas, puisque la consigne change de façon régulière à mesure que le contrôleur du niveau supérieur cascade un nouveau point de consigne, aucun TS n'est enregistré. En effet, la programmation des TS (se référer à la figure 4.14) est telle qu'aucun « flag » de saturation n'est levé tant que le TSS n'est pas atteint puisqu'il est normal qu'il y ait des écarts plus ou moins marqués entre la variable contrôlée et son point de consigne pendant cette période. Aussi, les contrôleurs MPC réévaluent constamment la séquence des mouvements de leurs variables manipulées (lesquelles sont cascadées comme consigne au niveau inférieur) et instaurent le premier mouvement

à chaque exécution du contrôleur. Le « compteur » du TSS est donc continuellement remis à zéro, ce qui limite l'occurrence des saturations en agilité. Les manques d'agilité dus à une dynamique inappropriée sont donc moins fréquents aux niveaux tactique et stratégique.

Par ailleurs, lorsque le point de consigne est constant pour une période suffisamment longue, et la boucle 104-RAF-001-MPC2 (figure 8.12) en présente un bon exemple (point de consigne de profit fixé à la limite supérieure atteignable), les TS qui surviennent sont issus d'un « offset » plus élevé que la tolérance permise qui peut soit être dû à la lenteur du système ou à son incapacité à atteindre la consigne ou encore à la présence d'une perturbation qui éloigne la variable contrôlée de sa consigne.

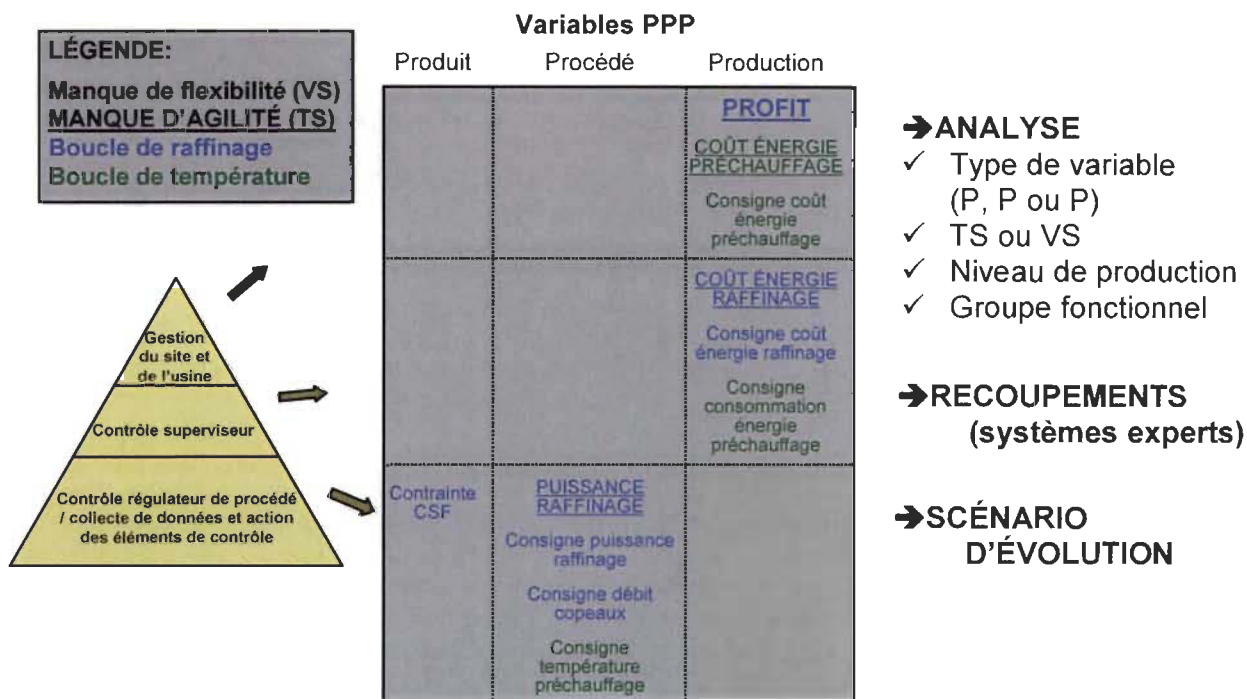
#### 8.4 Scénario d'évolution

Le système à l'étude montre des limitations (VS et TS) dans la rencontre d'un profit maximal à l'atelier de PTM. La figure 8.15 en effectue le classement. Sur la figure, les manques de flexibilité sont représentés par du texte en minuscules, les manques d'agilité par du texte en majuscules, les variables liées à la boucle de raffinage figurent en bleu alors que les variables de la boucle de température sont en vert. Cette représentation laisse place à l'analyse qui suit dans le cas particulier du système à l'étude ici.

L'objectif global n'est pas atteint puisque le profit expérimente de grandes périodes de non agilité où il est inférieur à la valeur visée. Ainsi, une première étude par type de limitation (VS ou TS) permet de constater que la présence aux trois niveaux de production d'un manque d'agilité (TS) des variables contrôlées laisse présager un problème inhérent au procédé. En effet, en partant du profit et en cascasant vers le bas (se référer à la figure 8.15) à la façon des cascades de MPC, il est possible de visualiser que le TS du profit est généré par le TS du coût de raffinage qui est généré par le TS de la puissance de raffinage. En bout de ligne, c'est le respect par la boucle 104-ENTREFER-MPC de la contrainte liée au CSF qui est à la source du manque d'agilité. En effet, la programmation inhérente aux blocs *MPC Pro* est telle que le contrôleur prend en compte les contraintes et en assure le respect en modifiant le « working set



point » (consigne interne visée par le contrôleur ; tient compte des contraintes, ce qui n'est pas le cas de la consigne) de la variable contrôlée.



**Figure 8.15 Scénario d'évolution lié à l'exemple**

Dans un deuxième temps, l'analyse par groupes fonctionnels (boucle de raffinage et boucle de température) se surimpose à celle par type de limitation. Ainsi, pour la boucle de raffinage, les VS sur les consignes aux deux niveaux inférieurs indiquent que les cibles d'opérations de ces niveaux ne sont pas adéquates et ne permettent pas ici l'atteinte de l'objectif global. En effet, le fait que ces cibles soient continuellement maintenues à leurs limites donne une indication claire que ces limites demandent à être repoussées afin de permettre la réalisation du profit. L'analyse est la même pour les VS de la boucle de température qui indiquent que les cibles d'opération (consignes) constituent un frein relativement à l'atteinte de l'objectif global de profit.

Ceci permet de formuler les conclusions suivantes face au système à l'étude :

- ✎ L'objectif global de profit n'est pas atteint : le système tel qu'il est configuré présentement ne possède pas l'agilité nécessaire pour absorber la perturbation du coût d'électricité à laquelle il est soumis.

- ✎ Cependant, le système est bien dimensionné puisque les variables contrôlées sont flexibles.
- ✎ Puisque le manque de flexibilité se situe au niveau des cibles d'opération (consignes), l'évolution doit se jouer dans la modification des paramètres d'opération.

Le suivi des VS met en lumière des cibles d'opération contraignantes, et il est alors recommandé de reconsidérer les conditions d'opération fixées au départ pour tenter d'en repousser les limites. Dans le cas présent, la température minimale posée au départ (80°C) constitue un VS. Il faudrait alors valider si celle-ci peut être abaissée sans compromettre la bonne conduite du procédé ; ou encore s'il y a lieu de mettre en place une méthode alternative de chauffage. La puissance de raffinage constitue aussi un VS. Dans ce cas, c'est le CSF posé en contrainte qui empêche d'abaisser la puissance de raffinage. Les limites de ce dernier devraient être revues pour valider si elles peuvent être haussées afin de favoriser une diminution de la consommation d'énergie spécifique de raffinage tout en conservant les spécifications requises pour la pâte. Enfin, le débit de copeaux pourrait éventuellement augmenter au-dessus de 0,55 kg/min ce qui, à puissance égale, permettrait aussi de réduire la consommation d'énergie spécifique de raffinage.

Les saturations sur la valeur qui apparaissent aux graphiques précédents permettent donc constater où se situent les limites du procédé. Dans le cas présent, il apparaît clairement que les limites rencontrées par les niveaux supérieurs tiennent leur origine des limites du procédé physique du niveau inférieur. L'occurrence sur plusieurs niveaux de MPC d'une limitation qui ramène à une même variable procédé peut être vue comme une démonstration de l'importance de l'équipement (ou du procédé) associé dans la difficulté ou l'impossibilité du système à rencontrer l'objectif fixé et peut s'avérer une piste d'évolution très pertinente.

La relation entre les consignes de départ et les variables de haut niveau ainsi que l'effet que les premières ont sur les deuxièmes paraît évidente puisque le système à l'étude est très simple. Dans le cas d'un système plus complexe avec plusieurs variables de niveau



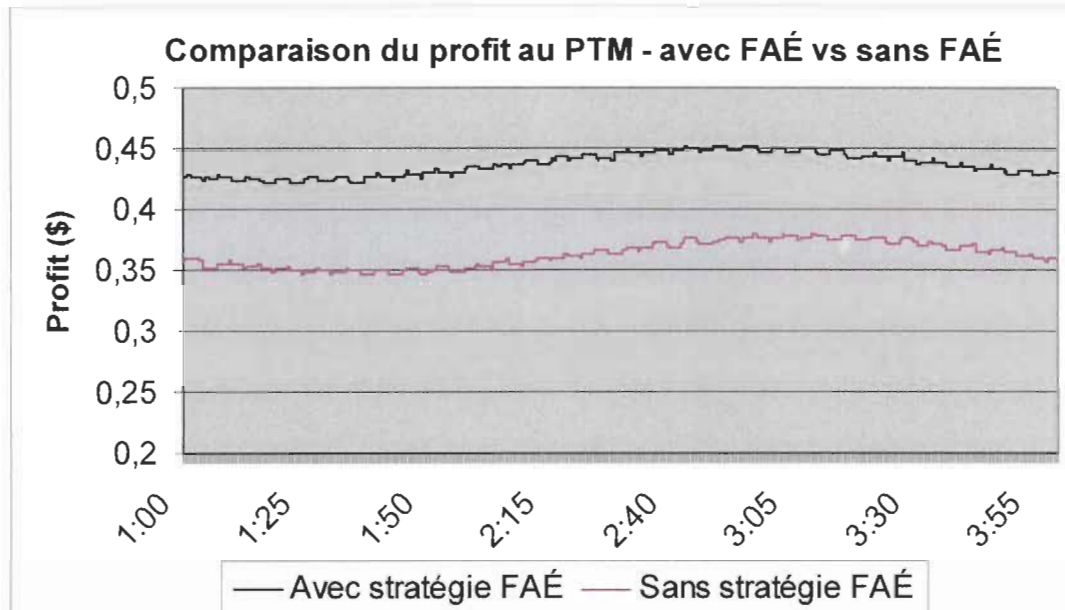
supérieure liées à de nombreuses variables de niveau inférieur, le chemin tracé par les VS et TS s'avérerait certainement d'une aide précieuse pour déterminer quelles sont les variables de production qui sont limitantes, et dans quelle mesure leur plage d'opération devrait être modifiée pour rencontrer les objectifs associés aux variables de plus haut niveau.

La détermination de plages d'opération des différentes variables a été faite ici avec beaucoup de rigueur afin de faire ressortir les liens entre les variables manipulées, contrôlées et point de consigne d'un niveau à l'autre. La même démarche serait assez laborieuse sur un procédé plus large. Il devrait être possible de trouver un équilibre entre cette extrême précision et une gamme d'opération assez représentative qui permette tout de même d'assurer une fidélité adéquate des modèles.

Enfin, l'analyse et le recouplement ont été faits manuellement dans le cadre de la portion de procédé à l'étude ici. Une poursuite future des travaux pourrait permettre d'implanter une méthodologie standard d'analyse et de recouplements qui ferait appel à des outils informatiques (comme les systèmes experts). L'utilisateur aurait donc recours à cet outil pour extraire les informations pertinentes lesquelles lui permettraient par la suite de tirer des conclusions face au scénario d'évolution le plus approprié.

### **8.5 Comparaison : avec FAÉ vs sans FAÉ**

Dans le but de démontrer l'avantage de l'implantation de la stratégie FAÉ sur l'objectif global d'optimisation du profit à l'atelier de PTM, le système non soumis au contrôle avancé a aussi été testé pour une période de trois heures (cycle complet de la perturbation sinusoïdale comme précédemment). Les deux systèmes (avec et sans FAÉ) ont donc été exposés aux mêmes fluctuations du coût de l'électricité et ce, en utilisant les mêmes paramètres d'opération de départ dans les deux cas. Afin de pouvoir suivre la valeur de profit du système sans FAÉ, les contrôleurs MPC ont été mis en mode manuel. Il n'y avait donc aucun contrôle par les MPC et l'opération suivait les valeurs cibles de procédé listées à la section 7.1. La figure 8.16 oppose le tracé du profit à l'atelier de PTM (variable contrôlée de 104-RAF-001-MPC2) avec et sans l'implantation de la stratégie FAÉ.



**Figure 8.16** Comparaison du profit à l'atelier de PTM avec et sans stratégie FAÉ

Avec la stratégie FAÉ, le profit pour la période de trois heures est évaluée à 26,63\$ alors qu'il est de 22,13\$ sans la stratégie FAÉ ; ce qui constitue un gain appréciable de l'ordre de 20%. Ce gain est permis grâce à l'implantation, par la stratégie FAÉ, du contrôle avancé aux niveaux supérieurs. Quoiqu'ils ne puissent être utilisés directement puisque le procédé de production étudié a été simplifié, ces chiffres donnent un aperçu, pour une situation donnée, de l'intérêt monétaire que peut représenter l'implantation de la stratégie FAÉ comme outil d'optimisation.

## 8.6 Comportement du système à l'étude lors de modification de la consigne de profit

Dans le but de donner une meilleure idée du comportement du système contrôlé par la stratégie FAÉ, l'essai précédent est repris en soumettant le profit de l'atelier de PTM à des changements de point de consigne répétitifs. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une situation réaliste (les entreprises visent généralement un profit maximal), cette évaluation permet de bonifier la démonstration de la constance des résultats de l'implantation de la stratégie FAÉ. Les figures 8.17 à 8.29 montrent donc les mêmes

graphiques que précédemment (figures 8.1 à 8.7 et 8.9 à 8.14), où le système est soumis pendant deux heures à la même perturbation sinusoïdale, mais où la consigne de profit varie plutôt que d'être maintenue à sa valeur maximale de 0,481\$.

La figure 8.17 montre en bleu la variation de la consigne de profit. En suivant le tracé du profit en rouge, un délai d'environ vingt minutes est clairement observable. Le TSS modèle de vingt minutes de la boucle 104\_RAF\_001\_MPC2 tiré de l'identification manuelle (voir tableau 7.2) correspond donc assez exactement au délai vu à la figure 8.17. Ceci permet aussi de constater l'efficacité des contrôleurs MPC qui ne s'emballent pas (voir le tracé des variables manipulées) malgré le délai dans la réponse du procédé. Ceci confirme la justesse des modèles identifiés par *Predict Pro* ainsi que la robustesse des contrôleurs MPC.

La variabilité est en fait plus marquée au niveau des boucles DCS. Les contrôleurs de ces boucles ont été les premiers à être ajustés et leurs paramètres ont été fixés selon la méthode du « Lambda tuning » (voir section 5.7 et Annexe A – Pages écran CADSIM Plus™ du procédé à l'étude), mais en utilisant une valeur agressive de  $\text{Lambda} = \text{constante de temps}$  plutôt que la valeur conservatrice suggérée de  $\text{Lambda} = 3 \times \text{constante de temps}$ . Ce paramétrage agressif induit une certaine oscillation de la variable contrôlée et est moins approprié lors de cascade de contrôleurs, mais il permet par contre de confirmer la robustesse des contrôleurs MPC des niveaux supérieurs.

Pour chacun des graphiques, et cette observation est plus évidente avec les niveaux MPC1 et MPC2, les plateaux de la variable contrôlée (en rouge) correspondent à l'échelle de temps du niveau de production (trois minutes pour les figures 8.17 et 8.21 et 30 secondes pour les figures 8.18 et 8.22).

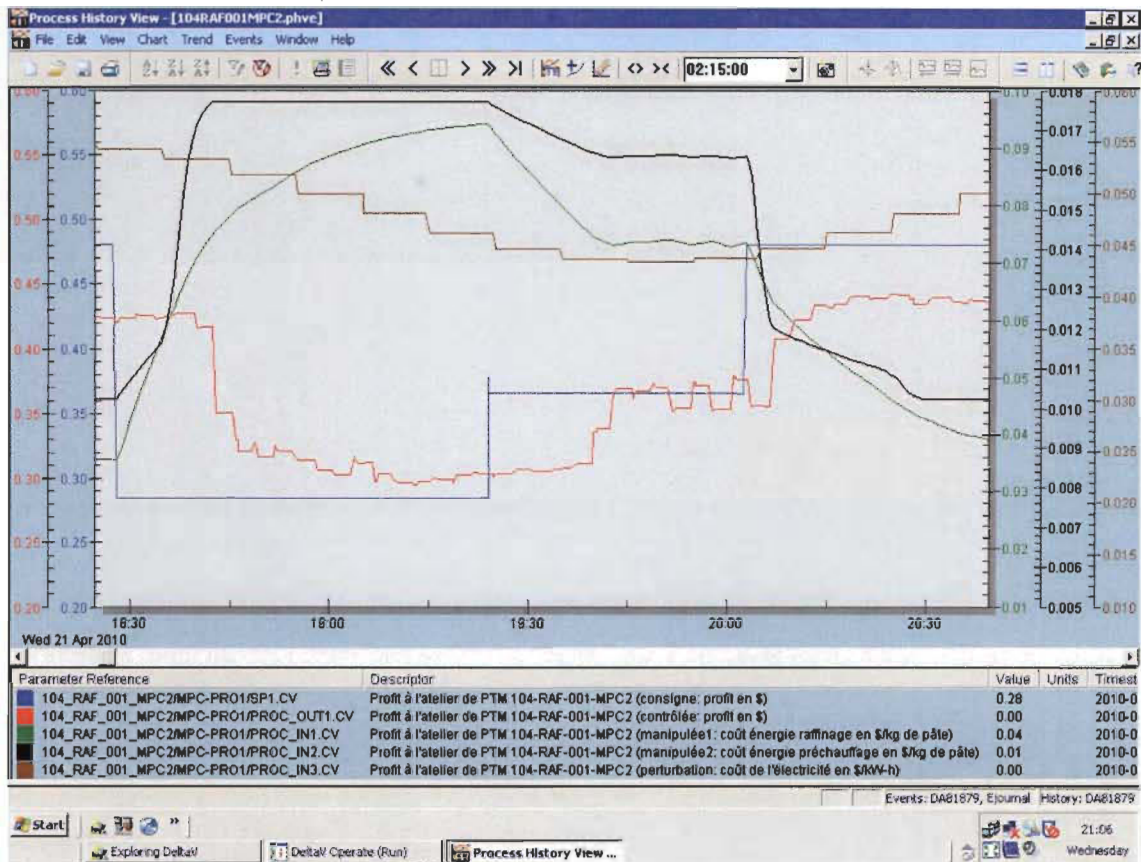
L'analyse des résultats liés aux VS et TS (figures 8.24 à 8.29) est similaire à celle présentée aux sections 8.2 et 8.3. Les limitations sont listées au tableau 8.1 :

**Tableau 8.1 VS et TS pour l'essai avec variation du point de consigne**

<b>Saturations sur la valeur (VS)</b>
<p><b>Consigne de coût d'énergie de raffinage</b> – sporadique On devrait, pour le tracé rose pâle de la figure 8.24, voir un VS au tout début de l'essai ; se référer au tracé vert de la figure 8.17.</p>
<p><b>Consigne de coût d'énergie de préchauffage</b> – sporadique En plus du VS visible en fin d'essai pour le tracé bleu foncé de la figure 8.24, on devrait voir un VS en milieu d'essai, lorsque le tracé noir de la figure 8.17 plafonne.</p>
<p><b>Consigne de puissance de raffinage</b> – sporadique Voir le tracé vert foncé de la figure 8.24.</p>
<p><b>Consigne de débit de copeaux</b> – sporadique Voir le tracé en pâle de la figure 8.24.</p>
<p><b>Contrainte de CSF</b> – sporadique <i>N'est pas continu comme le montre le tracé bleu foncé de la figure 8.25 ; se référer au tracé bourgogne de la figure 8.19. Dû à une erreur de programmation du bloc CALC du VS de la boucle 104-ENTREFER-MPC1 qui utilisait la valeur d'entrefer plutôt que la valeur de contrainte dans l'équation conditionnelle liée à la contrainte. Le résultat du VS sur la contrainte présenté à la section section 8.3 demeure le même. La correction de la programmation a été effectuée.</i></p>
<p><b>Consigne de consommation d'énergie de préchauffage</b> – sporadique Voir le tracé rose pâle de la figure 8.26.</p>
<p><b>Consigne de température</b> – sporadique Les VS devraient être plus fréquents et plus longs que celui montré en bleu pâle à la figure 8.26, se référer au tracé bleu de la figure 8.23.</p>
<b>Saturations sur la valeur (TS)</b>
<p><b>Profit</b> – constant <i>Puisque le tracé de l'offset de la figure 8.27 ne semblait pas correspondre à la différence entre les tracés bleu (consigne) et rouge (contrôlée) de la figure 8.17, une validation de la programmation a été faite et il s'avère qu'une erreur s'était glissée et que le bloc CALC du TS de la boucle 104-RAF-001-MPC2 utilisait les variables de la boucle 104-RAF-001-MPC1, d'où le manque de cohésion remarqué. Ceci affecte aussi le résultat du TS de profit présenté à la section 8.3, qui devrait en fait présenter une limitation ininterrompue d'agilité. La correction de la programmation a été effectuée.</i></p>
<p><b>Coût d'énergie de raffinage</b> – sporadique Voir le tracé rose pâle de la figure 8.28.</p>
<p><b>Puissance de raffinage</b> – sporadique Voir le tracé bleu pâle de la figure 8.28.</p>
<p><b>Coût d'énergie de préchauffage</b> – sporadique Voir le tracé rose pâle de la figure 8.29.</p>

Enfin, tel que cela était à prévoir, cette analyse confirme que les limitations demeurent les mêmes pour un même système visant le même objectif et soumis à la même

perturbation globale. Il est cependant possible de constater ici, qu'à certaines périodes où une valeur moins élevée de profit était requise et où le coût d'électricité était faible, le système était en mesure d'absorber la perturbation (se référer à la période où les tracés bleu et rouge de la figure 8.17 se superposent).



**Figure 8.17** Tracé des principales variables de la boucle 104-RAF-001-MPC2 lors de changement de consigne de profit



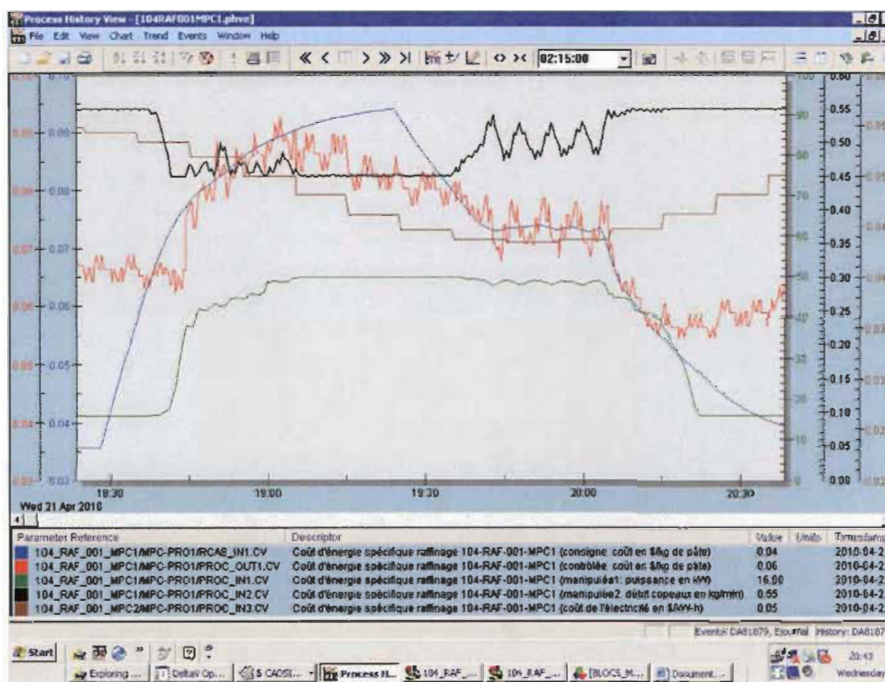


Figure 8.18 Tracé des principales variables de la boucle 104-RAF-001-MPC1 lors de changement de consigne de profit

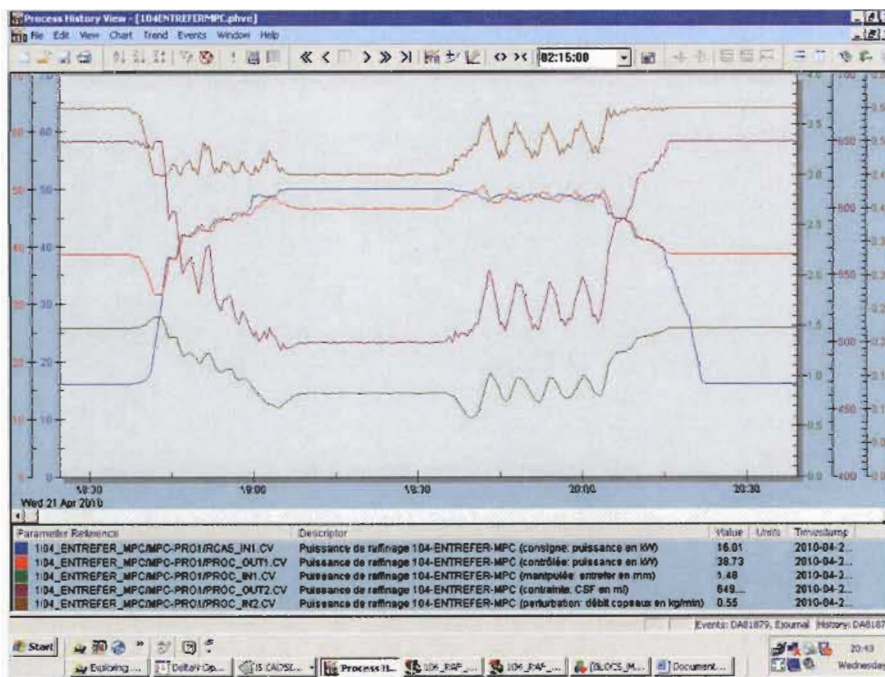


Figure 8.19 Tracé des principales variables de la boucle 104-ENTREFER-MPC lors de changement de consigne de profit



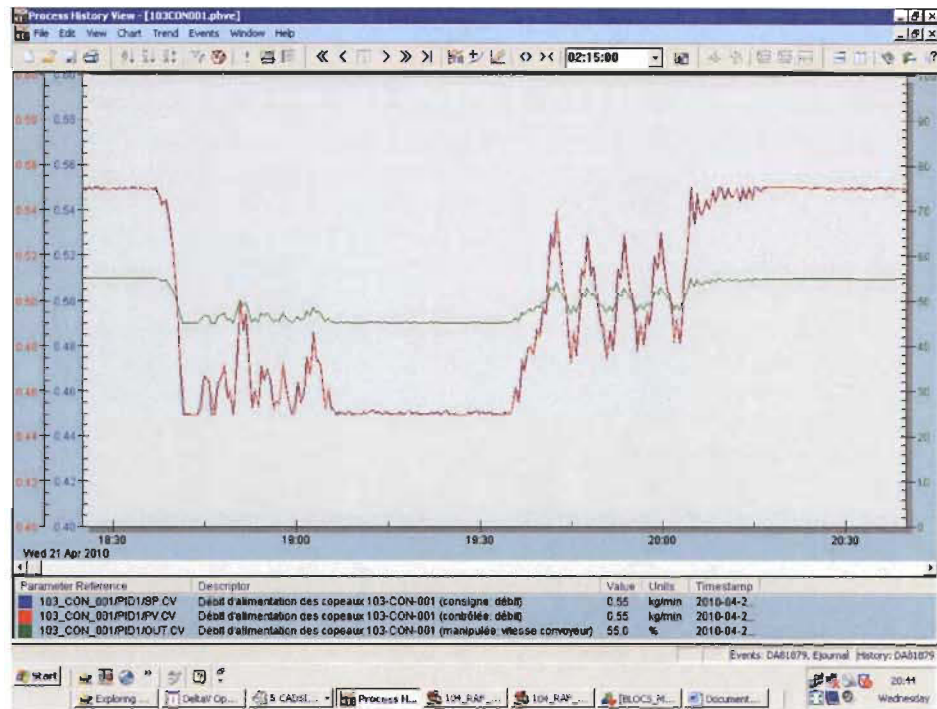


Figure 8.20 Tracé des principales variables de la boucle 103-CON-001 lors de changement de consigne de profit

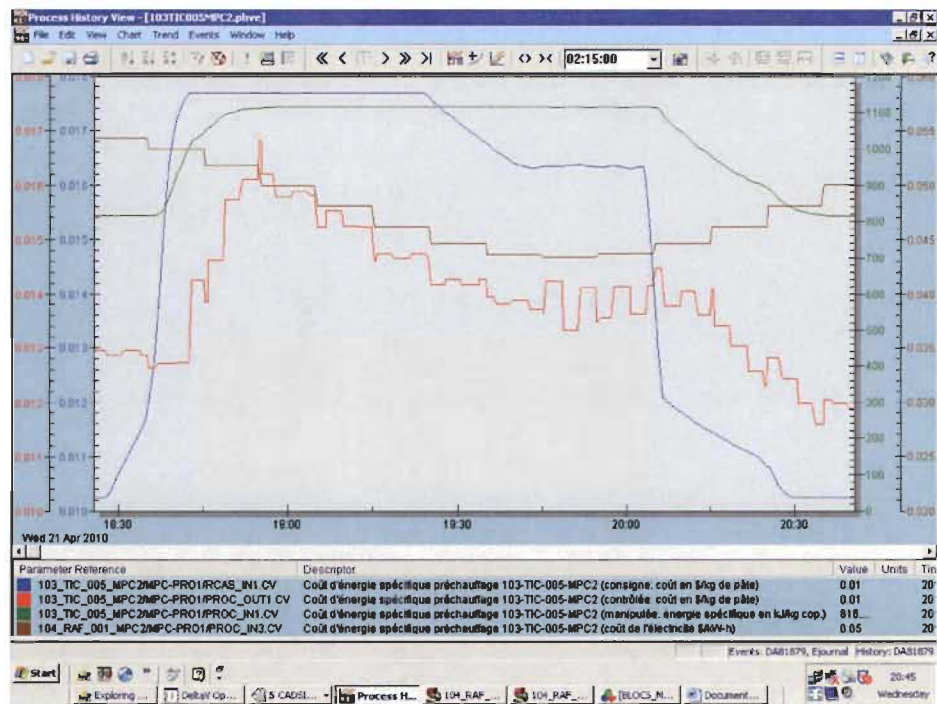


Figure 8.21 Tracé des principales variables de la boucle 103-TIC-005-MPC2 lors de changement de consigne de profit

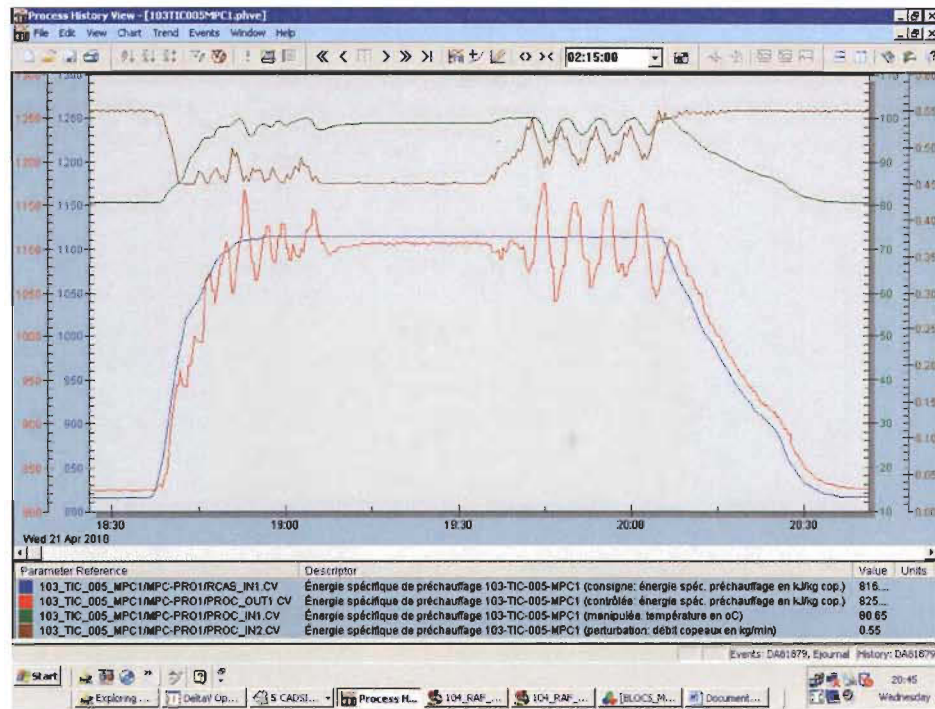


Figure 8.22 Tracé des principales variables de la boucle 103-TIC-005-MPC1 lors de changement de consigne de profit

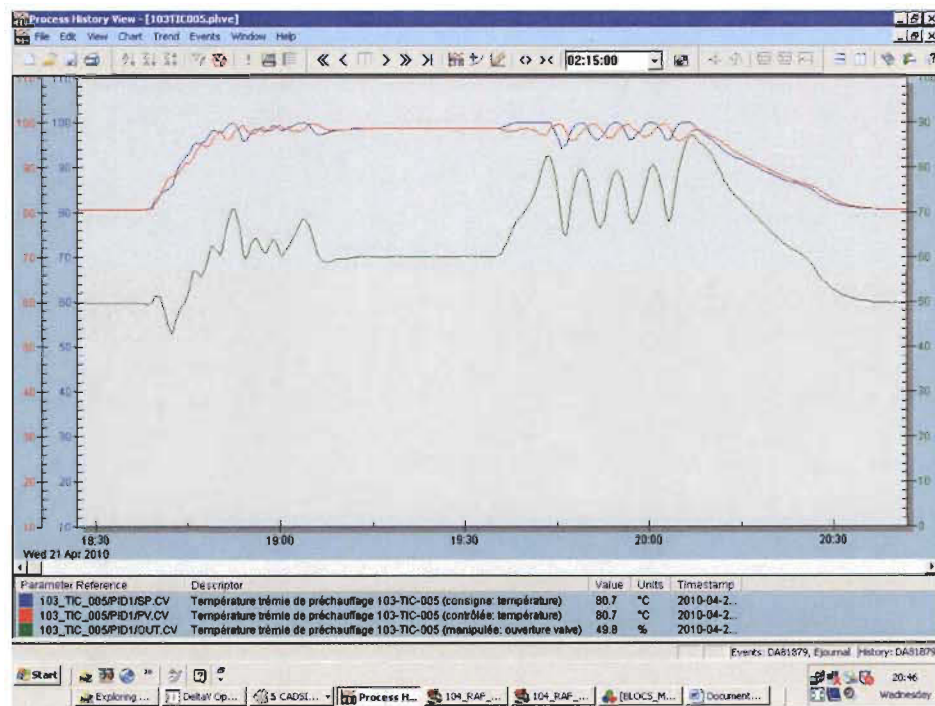


Figure 8.23 Tracé des principales variables de la boucle 103-TIC-005 lors de changement de consigne de profit

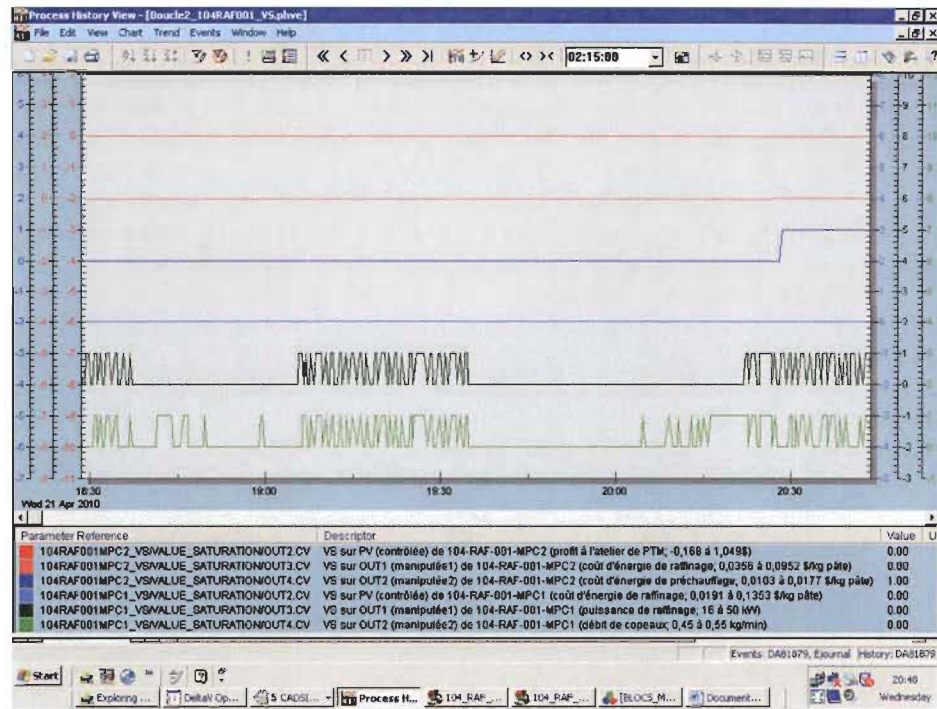


Figure 8.24 VS de la boucle de raffinage (1 de 2) lors de changement de consigne de profit

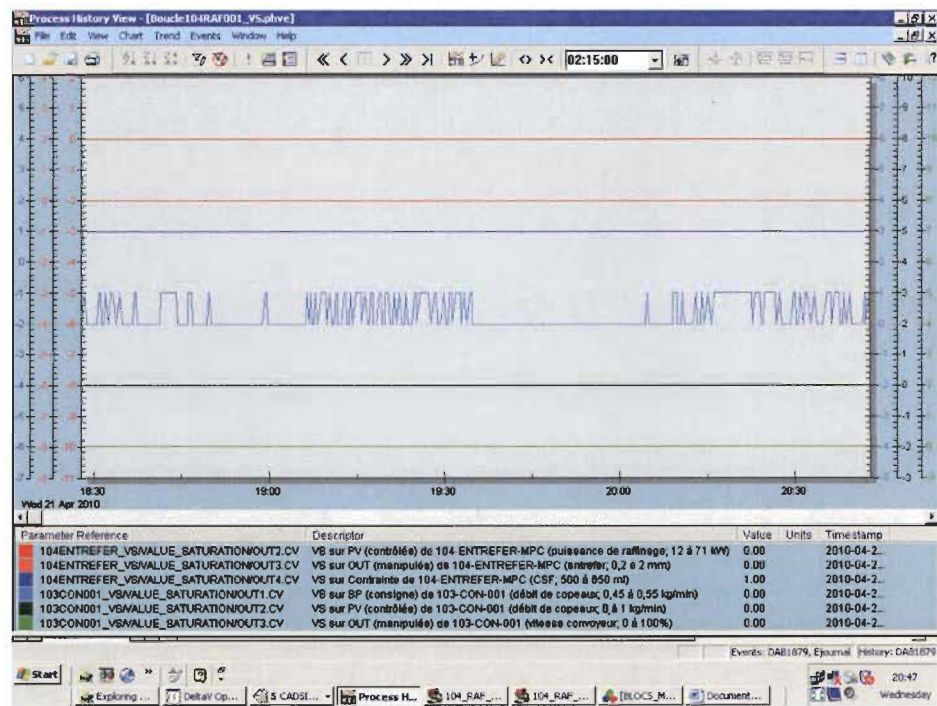


Figure 8.25 VS de la boucle de raffinage (2 de 2) lors de changement de consigne de profit



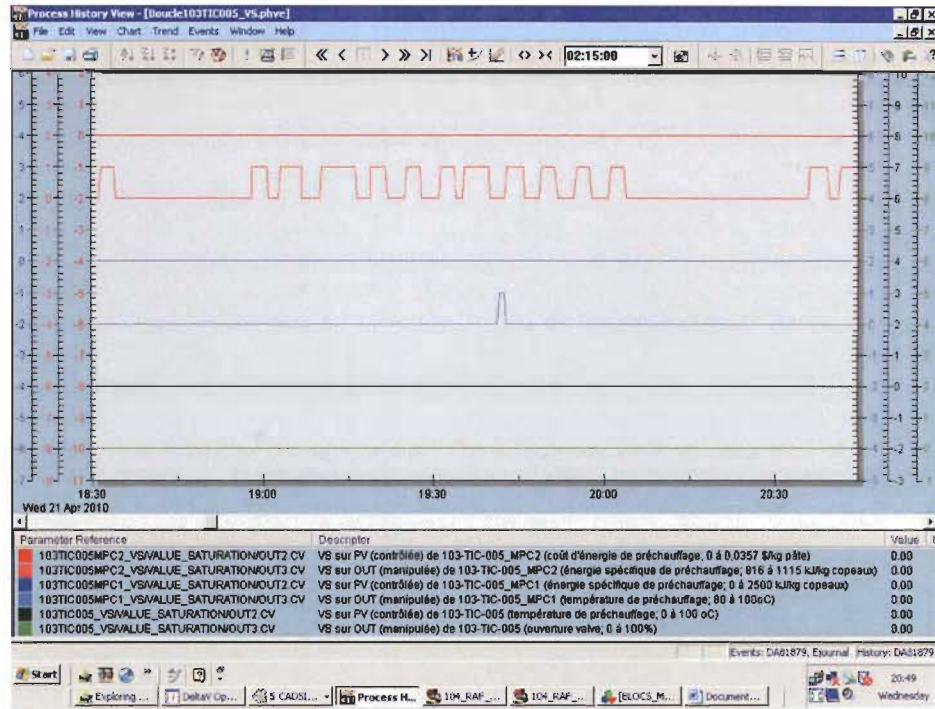


Figure 8.26 VS de la boucle de température lors de changement de consigne de profit

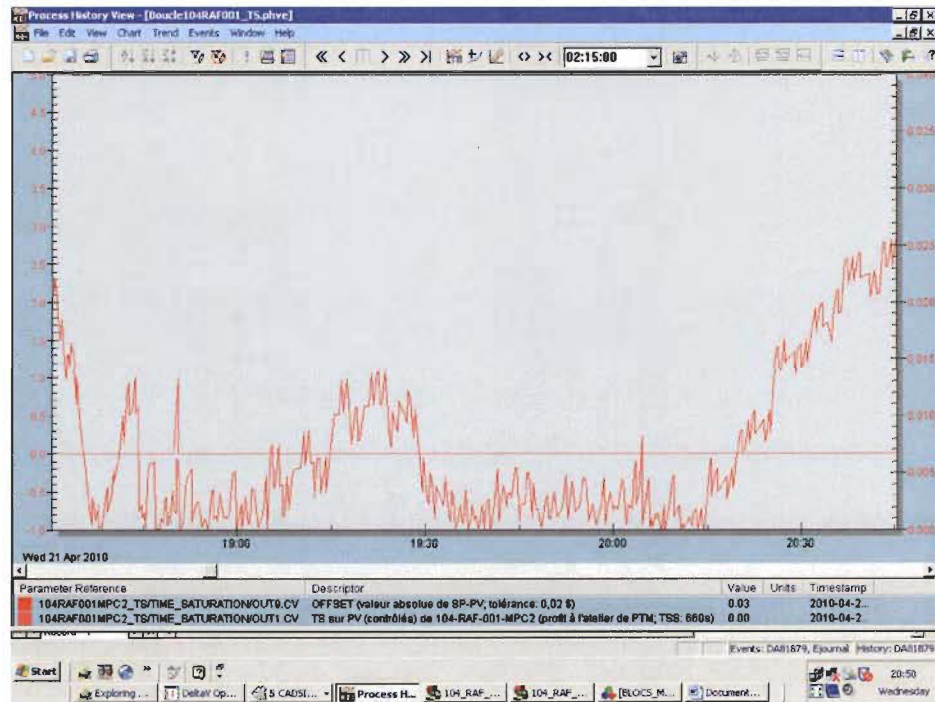


Figure 8.27 TS de la boucle de raffinage (1 de 2) lors de changement de consigne de profit

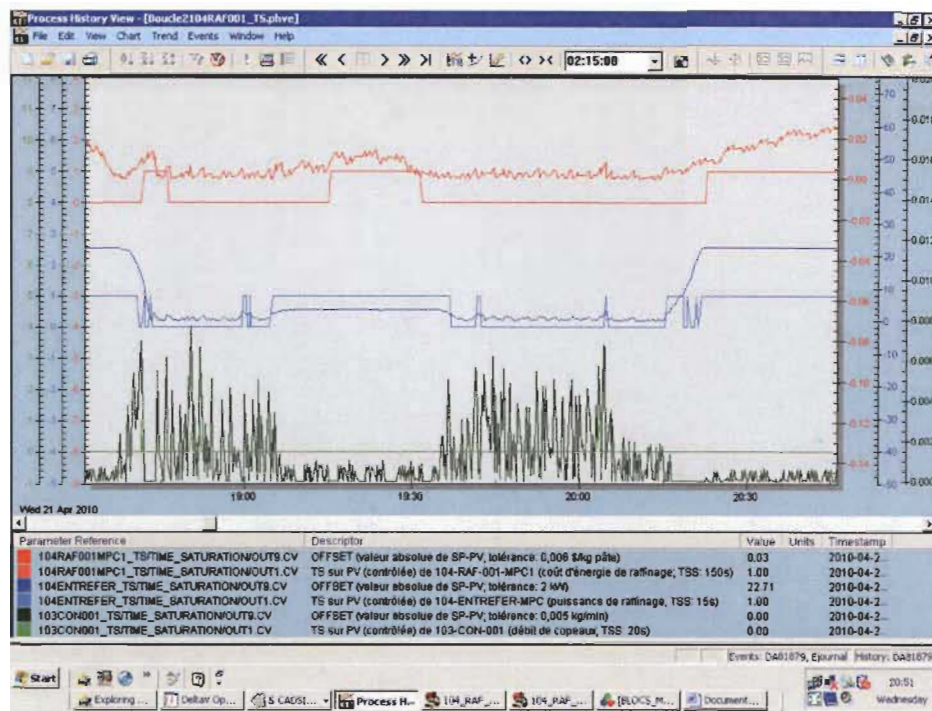


Figure 8.28 TS de la boucle de raffinage (2 de 2) lors de changement de consigne de profit

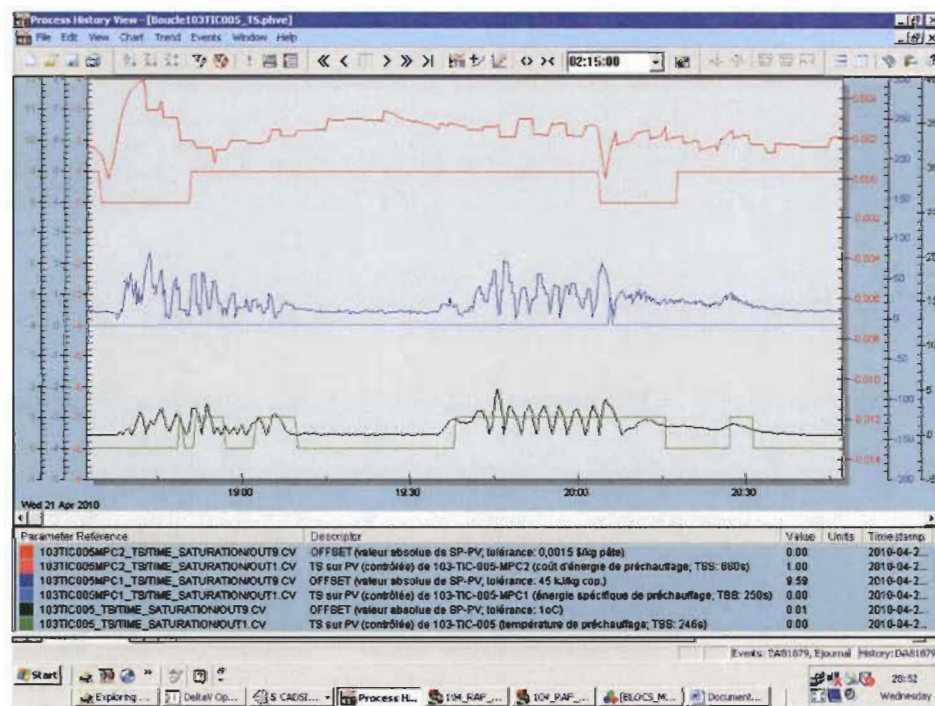


Figure 8.29 TS de la boucle de température lors de changement de consigne de profit

## Chapitre 9 - Conclusions

### 9.1 Retour sur les objectifs

L'analyse de la problématique vécue par l'industrie des pâtes et papiers a permis de mettre en lumière le fait que l'adaptation et l'innovation constituent une piste de solution permettant à une entreprise de demeurer compétitive dans l'environnement d'affaires turbulent et dynamique des années 2000. En considérant le fait que très peu de moyens financiers sont disponibles pour mettre en place une telle solution, celle-ci doit provenir de l'intérieur, c'est-à-dire être mise en place en utilisant les équipements et instruments disponibles à l'usine. Dans un tel contexte, intégration et optimisation constituent des concepts clés.

Aiguillée par ces aspects de la problématique, la revue de littérature a permis de statuer sur le manque d'efficacité des mesures de performance traditionnelles et d'en proposer d'autres plus adaptées. Il a aussi été possible de constater que l'industrie en général est à la recherche de moyens et de méthodes permettant d'appuyer les décisions administratives sur des considérations pratiques qui tiennent compte de l'entreprise dans sa globalité. Finalement, il a aussi été possible de constater que le contrôle avancé, outil d'optimisation par excellence, n'était jusqu'à maintenant utilisé qu'aux niveaux opérationnels d'une entreprise, en lien avec les contrôles régulateur et superviseur.

Ces observations ont mené à la proposition d'un outil visant à améliorer la performance d'une entreprise et ce, en implantant le contrôle avancé à tous les niveaux de production de façon à en assurer l'interopérabilité et à lier les décisions administratives à l'optimisation de la production. La performance de l'entreprise soumise à un environnement d'affaires turbulent peut ensuite être évaluée grâce à des définitions pratiques et quantifiables des mesures de performances que sont la flexibilité et l'agilité. S'il s'avère, suite à l'évaluation de la performance, que l'entreprise et le système qui la constitue ne sont pas en mesure de faire face à la turbulence qui les affecte, un scénario d'évolution basé sur les limitations rencontrées peut être proposé.



Afin de pouvoir quantifier ces limitations, il était essentiel d'en définir la teneur. Les notions de flexibilité et d'agilité abondamment utilisées dans les domaines du marketing et de la productique étaient toutes désignées comme mesures de performance dans un tel contexte. La revue de littérature a donc permis d'en faire l'analyse de manière à établir les définitions qui sont actuellement à la base de la stratégie FAÉ. Le second volet de la revue de littérature visait à évaluer comment se positionne le présent travail relativement aux autres recherches en cours ou déjà effectuées. Deux avenues ont ainsi été explorées : la première est liée aux applications de contrôle avancé MMPC en pâtes et papiers et la seconde porte sur l'approche globale d'optimisation en entreprise. Tous les écrits consultés relativement aux applications de MMPC montrent que le contrôle avancé est, pour l'instant, essentiellement utilisé sur des portions de procédé de manière à en faciliter ou à en optimiser le contrôle. Aucun article ne démontre que l'utilisation ait une visée plus globale qui permette d'une façon ou d'une autre d'établir le pont entre les différents niveaux de production d'une entreprise. La revue des recherches liées à une approche globale d'optimisation a conduit principalement au concept d'intelligence, de plus en plus employé, qui aspire à une meilleure collecte, intégration et utilisation de l'information gravitant autour d'une entreprise. La revue montre que l'élaboration de la notion d'intelligence est essentiellement dans sa phase conceptuelle et qu'il n'existe pas encore de méthode de quantification systématique qui y soit associée.

Ceci confirme donc l'originalité de l'actuel travail, qui explore des zones de recherche relativement vierges quant à une approche intégrant les divers niveaux de production d'une entreprise par le biais du MMPC et à une quantification systématique de la performance d'une entreprise grâce à la stratégie FAÉ. La force et l'originalité du travail sont liées à l'élaboration d'une méthodologie tout à fait unique et novatrice et à la démonstration de sa faisabilité d'implantation.

Ainsi, l'objectif global du travail tel qu'énoncé à la section 1.3 était de développer un outil d'optimisation utilisant le contrôle avancé pour maximiser la productivité d'une entreprise en réaction à un environnement global turbulent. Le tableau 9.1 offre une récapitulation des objectifs spécifiques qui en découlent et de l'originalité du travail de doctorat.

**Tableau 9.1 Retour sur les objectifs et l'originalité**

	<b>Objectif</b>	<b>Objectif atteint</b>	<b>Originalité</b>
1.	Proposer des définitions quantifiables (et transposables dans un DCS) des concepts de flexibilité et d'agilité et en identifier les limitations qui restreignent la profitabilité.	✓	Comble l'actuelle absence de modèles quantitatifs pour la flexibilité et l'agilité.
2.	Propager de façon systématique les décisions stratégiques jusqu'aux niveaux opérationnels d'une entreprise.	✓	Faire descendre l'«intelligence» jusqu'aux niveaux opérationnels.
3.	Utiliser le contrôle avancé à tous les niveaux de production et en permettre ainsi l'interopérabilité et pour anticiper l'effet d'une perturbation globale à venir (en mode simulation).	✓	Implanter le contrôle avancé aux niveaux tactique et stratégique d'une entreprise.
4.	Poser les bases d'une méthodologie pour l'évolution pour les cas où les limitations empêchent l'atteinte de l'objectif global.	✓	Outil novateur performant présentant une méthodologie totalement originale et implantable, mais dont l'efficacité reste à mesurer.

Étant donné l'ampleur du travail associé à l'implantation d'une portion de procédé restreinte, il n'a pas été possible de couvrir un secteur complet de l'usine, et évidemment encore plus difficile de couvrir toute cette dernière dans le cadre de la recherche. Une fois le concept de la stratégie FAÉ bien défini, l'importance était de démontrer qu'il est possible d'implanter cette dernière dans le DCS en place au CIPP. Il fallait donc réussir à :

- ✍ Définir et quantifier les concepts d'agilité et de flexibilité ;
- ✍ Intégrer les définitions de flexibilité et d'agilité dans le DCS et en tirer des signaux qui puissent être interprétés correctement ;
- ✍ Reproduire la dynamique du procédé réel grâce à un logiciel de simulation ;
- ✍ Mettre en place la dynamique des niveaux de production supérieurs dans le logiciel de simulation ;
- ✍ Déterminer la façon de représenter les échelles de temps différentes ;
- ✍ Faire communiquer ensemble le logiciel de simulation et le DCS, tout en respectant les échelles de temps différentes ;

- ❖ Implanter les MMPC sur plusieurs niveaux successifs à l'intérieur du DCS ;
- ❖ Obtenir des modèles représentatifs pour les MMPC ;
- ❖ Assurer l'interopérabilité du système.

Tous ces jalons ont été atteints. Les efforts ont été mis sur l'élaboration de la méthodologie et sur l'implantation de la stratégie FAÉ au détriment de la reproduction précise (somme toute très bonne) de la dynamique de procédé ou des modèles des contrôleurs MPC. Le fait de simuler une partie seulement du procédé a permis de simplifier le travail lié à la démonstration de la faisabilité d'implantation de la méthode. L'objectif de rentabilité analysé dans le cadre de l'exemple à l'étude et les résultats qui en découlent sont adéquats dans ce cadre précis, même si le fait de d'optimiser une partie du système (de l'usine) n'optimise pas nécessairement le système complet (l'usine). À partir du moment où la méthodologie pratique détaillée du mode d'implantation est disponible, la porte est ouverte à la bonification des applications.

## 9.2 Résultats importants

La recherche a permis d'atteindre l'objectif fixé au départ soit la mise en place d'un outil d'optimisation visant à aider une entreprise à demeurer ou devenir plus compétitive. Un des intérêts majeurs réside dans l'interopérabilité des niveaux de production réalisable par le biais des MPC et dans la possibilité, grâce à *CADSIM Plus™* de faire entrer pratiquement n'importe quelle variable de niveau supérieur dans le DCS *DeltaV*, dans la mesure où elle est liée à une variable de niveau inférieur. *CADSIM Plus™* a l'avantage de fournir une représentation tangible pour les variables de niveau supérieur et de créer un lieu logiciel où ces signaux peuvent être consignés afin de permettre l'implantation de la stratégie FAÉ. Il est par contre possible, en industrie, que les communications aient lieu entre le DCS et diverses applications de niveau supérieur, par exemple *SAP™* ou *Epicor Vantage™*.

Il apparaît que cet outil d'optimisation peut être utilisé de deux façons : « on line » en continu avec l'opération de l'usine ou « off line » en simulation déconnectée du procédé réel.

L'avantage du « off line » est double. Il permet dans un premier temps d'intégrer l'aspect prédictif de l'outil en simulant une perturbation à venir et en étudiant comment le système y réagit et où se situent ses limites. L'« off line » permet aussi d'accélérer la simulation. Par contre, cette utilisation nécessite que le procédé réel soit simulé sur *CADSIM Plus™*. À cet effet, de plus en plus d'usines utilisent le logiciel *CADSIM Plus™* et simulent de grandes parties de leur procédé, sinon le procédé complet. Ces usines ont une partie importante du travail qui est effectuée quant à l'implantation de la stratégie FAÉ. Il est aussi possible de débiter modestement, comme c'était le cas ici en intégrant de petites portions du procédé qui impactent directement sur des variables de performance (coût, productivité, qualité, etc.). Ainsi, la stratégie FAÉ permet de lier des variables d'opération à n'importe quelles variables de niveau supérieur sans être confiné aux variables pré-établies dans les applications de MPC. Le mode « off line » permet aussi d'accélérer les deux logiciels afin de minimiser le temps d'attente de résultats. Il faut par contre être très vigilant afin de ne pas distordre la dynamique et perdre les repères lors de l'accélération.

L'application « on line » offre l'avantage de mettre en lumière les limites rencontrées par le procédé et de l'optimiser par le biais de l'implantation de MPC aux niveaux de production supérieurs. Ce mode d'utilisation implique une simulation *CADSIM Plus™* partielle, uniquement associée aux niveaux supérieurs. Le procédé roulant en temps réel, il n'est pas possible de prédire l'impact d'une perturbation à venir. Il demeure cependant que les limites sont mises en lumière et que le procédé bénéficie d'une intégration et d'une optimisation très intéressantes comme l'a démontré la comparaison de l'opération d'un système avec et sans stratégie FAÉ. Le gain obtenu avec la stratégie FAÉ, pour le système implanté dans le cadre du travail, était de l'ordre de 20%.

Le scénario d'évolution laisse entrevoir une possibilité d'avancée considérable au niveau de la gestion globale d'une usine en temps de changements, tout particulièrement en complémentarité avec l'utilisation « off line ». En effet, le fait de tester différentes perturbations potentielles permettrait à un gestionnaire de cibler les lacunes de son usine et de prévoir à l'avance les immobilisations requises dès que ces perturbations semblent se présenter. Une méta analyse pourrait aussi lui pointer les équipements ou les secteurs

de procédé présentant une occurrence fréquente dans les limitations et ainsi cerner les maillons faibles et justifier des investissements associés. Ultimement, la stratégie FAÉ dans son ensemble (limitations de flexibilité et d'agilité et scénario d'évolution) pourrait agir tel un guide pour un gestionnaire dans le cadre de la conversion d'une usine vers la fabrication d'un nouveau produit.

L'impact au niveau de l'industrie est très prometteur. Certains ont déjà comparé la stratégie FAÉ à une boule de cristal, en soulignant par ailleurs qu'il est utopique de prétendre créer un tel outil. Le potentiel de la stratégie FAÉ est cependant très grand. Il comporte par contre plusieurs contraintes importantes. Tout d'abord, le système à l'étude doit idéalement faire l'objet d'une simulation, préalablement à l'implantation sur le procédé réel, afin de tester sa bonne conduite lorsque la stratégie FAÉ est en place. La simulation doit aussi être suffisamment représentative de la réalité pour garantir son exactitude face au procédé réel. Tous les modèles issus de la simulation ainsi que ceux provenant de *DeltaV* doivent être fiables et précis. Les limites de flexibilité et d'agilité qui constituent la base de l'évaluation de la performance doivent être représentatives afin de faire surgir les bonnes limitations. Tout ce système doit ensuite être maintenu à date et suivre les modifications quotidiennes apportées à la configuration du DCS et au procédé en usine, à défaut de quoi la simulation devient désuète. Ce n'est pas une mince affaire, mais si toutes ces exigences sont rencontrées et que la stratégie FAÉ bénéficie d'une méthode de recoupements des limitations fiable pour appuyer l'évolution, la stratégie FAÉ s'approche de la conception que l'on peut se faire d'une boule de cristal...

### 9.3 Travaux futurs

Quoique les résultats soient très probants, la démarche a été longue. Les définitions de flexibilité, d'agilité et d'évolution ont émergé lentement puis ont progressé à mesure des travaux avec les deux logiciels. La façon de représenter les échelles de temps semble simple *a posteriori* mais elle n'était pas évidente au départ. *DeltaV* est un DCS assez intuitif mais très complet et puissant, ce qui a comme contre partie de rendre la tâche difficile lors d'applications hors standard comme c'est le cas ici. Jusqu'aux dernières étapes du projet, c'est l'application *Predict* plutôt que *Predict Pro* qui était utilisée pour

modéliser et générer les contrôleurs MPC. Mais il s'est finalement avéré qu'elle n'était pas en mesure de faire face à la dynamique inhabituelle du procédé.

Parmi les gens du support technique de Contrôles Laurentides (filiale d'Emerson Process Management) personne n'avait encore lié *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> à *DeltaV*, ni utilisé OPC pour échanger des données de procédé avec *DeltaV*. Le niveau de connaissances à ce sujet était donc faible. Il était quelques fois difficile pour le personnel technique de se prononcer sur la source de certains problèmes rencontrés. Par exemple, lors des tests d'identification de procédé, le système *DeltaV* se déconnectait régulièrement et il est difficile de savoir si c'était dû à un problème de communication OPC, à un signal erroné provenant de *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> ou à un problème de capacité de l'ordinateur utilisé. Ceci a néanmoins rendu ardu l'application à une portion de procédé plus large. Pour la suite du projet, il est proposé d'utiliser un ordinateur de marque *DELL* (recommandé par *Contrôles Laurentides* ; le fait que le PC utilisé pendant le projet ait été un *Toshiba* pourrait être à la source de certains des problèmes rencontrés) et beaucoup plus performant afin d'assurer une opération rapide et sans délai compte tenu que de nombreuses applications sont ouvertes en même temps.

Les pistes de travaux futurs suggérées sont les suivantes :

- ❖ *Valider la faisabilité et la précision de l'identification du modèle pour des échelles de temps plus élevées aux niveaux supérieurs.* Un des défis pressentis face à l'identification du procédé pour des échelles de temps plus élevées est lié au temps requis par *Predict Pro* pour cette tâche. Quoiqu'il n'y ait *a priori* aucune limite maximale de TSS modèle à entrer dans l'application lors de l'identification, un TSS élevé pourrait éventuellement poser problème. Il demeure deux interrogations à ce sujet, à savoir jusqu'à quelle échelle de temps *DeltaV* demeure-t-il précis quant à l'identification du procédé et à son contrôle par MPC et est-ce qu'une différence importante entre l'échelle de temps des niveaux de production supérieurs et le taux d'exécution de *DeltaV* pourrait compromettre l'opération des contrôleurs MPC ? Par ailleurs, l'implantation au niveau planification et calendrier de production demanderait possiblement le



concours de logiciels spécialisés du domaine de la productique tel *ERP* par exemple.

- ↳ *Optimiser les totalisateurs.* Les totalisateurs pourraient être retravaillés de façon à éliminer, si possible, la sous-estimation qu'ils induisent.
- ↳ *Ajuster les limites.* Les limites de VS et TS constituent une excellente façon d'établir des liens entre les variables des niveaux intermédiaires et supérieurs et de mettre en lumière la source d'une limitation sur l'une ou l'autre de ces variables. La détermination des plages d'opération des VS telle qu'effectuée dans le cadre de la recherche représenterait cependant une tâche ardue sur un large procédé. L'implantation en usine permettrait de valider et bonifier le mode d'implantation des VS et TS. Il faudra voir la meilleure façon de fixer les limites puisqu'elles sont à la base de l'identification des VS. Les limites de flexibilité des variables contrôlées, des contraintes et des perturbations sont relativement faciles à déterminer. Celles des variables manipulées des niveaux supérieurs (qui deviennent les consignes des niveaux inférieurs) laissent place à un questionnement. Elles devraient possiblement dans un premier temps refléter les plages d'opération usuelles afin de déterminer si l'opération régulière permet d'absorber correctement une perturbation. Un manque de flexibilité des consignes se règle par la suite facilement dans la mesure où les spécifications requises sont toujours rencontrées. Lorsque les consignes ne peuvent plus être bougées, cela appelle à la modification du procédé. La programmation des blocs CALC gagnerait à être élaborée de façon notamment à éviter d'avoir à en modifier l'expression pour chaque VS ou TS configuré, ce qui entraîne des risques d'erreurs importants. Les corrections après soutenance ont d'ailleurs permis d'en détecter deux (VS sur le CSF et TS sur le profit) dus à un oubli suite à un copier/coller. Il serait intéressant de créer un bloc de fonction générique pour les VS et un pour les TS, ce qui permettrait de limiter ce genre d'erreurs.
- ↳ *Accélérer la simulation off line et la gardant synchronisée avec le DCS.* L'accélération de la simulation et du contrôleur (par le biais d'un taux d'exécution plus rapide) n'a pas été tentée dans le cadre de la recherche

notamment parce qu'un ordinateur beaucoup plus puissant aurait été requis. Ainsi de courtes échelles de temps ont été choisies pour minimiser le temps d'attente pour les simulations, même si il est sans conteste que de plus grands intervalles auraient été plus « parlants ». Le profit quotidien en aurait aussi été plus représentatif. Il semble *a priori* que le goulot d'étranglement dans l'accélération de la simulation se situe au niveau du taux d'exécution des blocs de fonction de *DeltaV*. Si la plupart des blocs de fonction permettent un taux d'exécution aussi rapide que 100 ms, les blocs MPC quant à eux ne permettent pas de dépasser 1 s. Il faudrait alors envisager faire appel aux concepteurs de *DeltaV* pour demander l'accès à des taux d'exécution plus courts, ce qui devrait être facilement réalisable. Les taux d'exécution offerts par *DeltaV* permettent d'accommoder la plupart des procédés. Les MPC composant généralement les boucles maîtresses, il n'y a aucun besoin de les faire rouler plus rapidement que les autres blocs de fonction. Cette analyse confirme que la stratégie FAÉ joue hors des sentiers battus.

- ✎ *Développer le concept d'évolution.* Une méthode standardisée d'évolution basée sur les signatures des TS et VS reste à faire. Une telle méthode permettrait au gestionnaire d'usine d'obtenir des recoupements facilitant l'analyse des limitations et facilitant la prise de décision en fournissant des arguments dans la justification des projets ou immobilisations projetées. Cette portion des travaux futurs pourrait faire l'objet d'une recherche en soit puisque le développement d'un outil d'analyse fiable et efficace, adaptable à tout type de procédé et assurant un niveau de détail et d'information adéquats pour appuyer les décisions administratives peut entraîner une quantité de travail assez importante.
- ✎ *Étendre à un plus large procédé et tester en usine.* Une application usine constituerait l'étape ultime des travaux futurs. L'idéal serait possiblement d'y travailler dans le cadre précis d'un projet visant l'atteinte d'un objectif de niveau supérieur, l'efficacité énergétique à la sécherie par exemple. L'usine pilote du CIPP présente l'avantage de n'opérer que certains secteurs de l'usine selon les projets et essais qui sont à faire. Il est alors plus facile de se concentrer sur un

secteur, implanter la stratégie FAÉ sur une simulation puis sur le procédé réel. Le test en usine constituerait la finalité permettant d'évaluer dans quelle mesure la stratégie FAÉ répond aux attentes qu'elle génère.

## Bibliographie

1. Monica, C., Bowater to merge with Abitibi: Impact on 1,000-plus workers at York County plant uncertain. Knight Ridder Tribune Business News, 2007: p. 1.
2. Anonymous, Weyerhaeuser Cleared To Merge With Domtar By Canada. FinancialWire, 2007: p. 1.
3. Anonymous, Domtar's merger with Weyerhaeuser may affect Norampac, Cascades. Pulp & Paper, 2006. 80(10): p. 6.
4. Bernard, S., Weyerhaeuser, Domtar merge paper units in Dollars 3.3bn deal PULP & PAPER, in Financial Times. 2006. p. 22.
5. Joel, D., Papermakers plan to merge. Knight Ridder Tribune Business News, 2006: p. 1.
6. Robert, G., Domtar, U.S. giant to merge, in The Gazette. 2006. p. A.1.FRO.
7. Anonymous, Smurfit, Stone to merge, create \$8 billion company, largest packaging concern. Pulp & Paper, 1998. 72(7): p. 21.
8. Malloy, M.T., Canadian Pacific Planning to Merge 2 Pulp, Paper Units, in Wall Street Journal. 1988. p. 1.
9. Smook, G.A., Cégep de Trois-Rivières, and Centre collégial de développement de matériel didactique, Manuel du technicien et de la technicienne en pâtes et papiers. Collection Pâtes et papiers. 1998, Montréal: Centre collégial de développement de matériel didactique. xiii, 456.
10. Dai, J.S. and D.G. Caldwell, Origami-based robotic paper-and-board packaging for food industry. Trends in Food Science and Technology, 2010. 21(3): p. 153-157.
11. Li, X., et al., Fabrication of paper-based microfluidic sensors by printing. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2010. 76(2): p. 564-570.
12. Li, X., J. Tian, and W. Shen. Paper as a low-cost base material for diagnostic and environmental sensing applications. 2009. Melbourne, VIC, Australia: Appita Inc.
13. Pelton, R., Bioactive paper provides a low-cost platform for diagnostics. TrAC - Trends in Analytical Chemistry, 2009. 28(8): p. 925-942.
14. Abitibi Consolidated Inc., L'innovation: l'avenir des pâtes et papiers (document Power Point présenté au Club Sandwich en mai 2005). 2005.

15. Clark, K.B. and T. Fujimoto, Product development performance: Strategy, organisation, and management in the world auto industry, Harvard University Publications, Editor. 1991, Harvard University: Cambridge, Maine, USA.
16. Sharifi, H. and Z. Zhang, A methodology for achieving agility in manufacturing organisations: An introduction. *International Journal of Production Economics*, 1999. 62(1,2): p. 7.
17. Iacocca Institute, 21st century manufacturing Enterprise Strategy: An industry-led view, Iacocca Institute, Editor. 1991, Lehigh University: Bethlehem, PA, USA.
18. Zhang, Z. and H. Sharifi, A methodology for achieving agility in manufacturing organisations. *International Journal of Operations & Production Management*, 2000. 20(4): p. 496.
19. Meredith, S. and D. Francis, Journey towards agility: the agile wheel explored. *The TQM Magazine*, 2000. 12(2): p. 137.
20. Ramasesh, R., S. Kulkarni, and M. Jayakumar, Agility in manufacturing systems: An exploratory modeling framework and simulation. *Integrated Manufacturing Systems*, 2001. 12(6/7): p. 534.
21. Darwin, C., On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life. 1859: John Murray Publisher, Albermarle Street, London.
22. Laperrière, L., Integrating product-process-production flexibility, agility and evolution, in 2007 Proceedings of 2nd International Conference on Changeable, agile, reconfigurable and virtual production, Toronto, Canada [CD-ROM (ISBN 978-0-9783187-0-3)]. 2007.
23. Gunasekaran, A., Benchmarking of costing and performance measurement systems in the new economy. *Benchmarking*, 2002. 9(3): p. 214.
24. Gunasekaran, A., H.J. Williams, and E.M. Ronald, Performance measurement and costing system in new enterprise. *Technovation*, 2005. 25(5): p. 523.
25. Allison, B. and J. Ball, Cascaded model predictive control of a rotary lime kiln, in Pulp and Paper Report, PAPRICAN, Editor. 2001, Pulp and Paper Research Institute of Canada: Vancouver, BC, Canada.
26. Allison, B. and J. Ball, Model predictive control of blow tank consistency, in Pulp and Paper Report, PAPRICAN, Editor. 1998, Pulp and Paper Research Institute of Canada: Vancouver, BC, Canada.
27. Allison, B. and S. Ogawa, Constrained model predictive control of a paper machine saveall, in Pulp and Paper Report, PAPRICAN, Editor. 1998, Pulp and Paper Research Institute of Canada: Vancouver, BC, Canada.

28. Gendron, S. and M. Perrier, Constrained model predictive control of low order plants based on model weighting adaptation, in Post-Graduate Research Laboratory Report, PAPRICAN, Editor. 1996, Pulp and Paper Research Institute of Canada: Pointe-Claire, QUE, Canada.
29. Dumont, G.A., Y. Fu, and G. Lu, Nonlinear adaptive generalized predictive control and applications, in Post-Graduate Research Laboratory Report, PAPRICAN, Editor. 1993, Pulp and Paper Research Institute of Canada: Pointe-Claire, QUE, Canada.
30. Castro, J.J. and F.J. Doyle Iii, Plantwide control of the fiber line in a pulp mill. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2002. 41(5): p. 1310-1320.
31. Fralic, G., B.C. Strand, and S. Mozaffari, Model predictive control of high consistency refiners, in 2001 TAPPI/ISA-PUPID Process control, electrical, and information conference, San Antonio, TX, USA, 25-29 Mar. 2001, session 2, 36pp [Atlanta, GA, USA: TAPPI Press, 2001, CD-ROM (ISBN 1930657617)] (K, S). 2001.
32. Smith, D.B., et al., Advanced control of a chlorine dioxide plant, in 2001 TAPPI/ISA-PUPID Process control, electrical, and information conference, San Antonio, TX, USA, 25-29 Mar. 2001, session 12, 12pp [Atlanta, GA, USA: TAPPI Press, 2001, CD-ROM (ISBN 1930657617)] (K, S). 2001.
33. Kumar, J.P., A.K. Ray, and R. Mitra, Model predictive control of lime kiln; A cost effective strategy. *IPPTA: Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association*, 2009. 21(3): p. 139-141.
34. Bellette, A., et al., Constrained model predictive control for cross directional applications-some practical examples. *IPPTA: Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association*, 2007. 19(1): p. 133-137.
35. Williamson, M., Madison Paper Stabilizes Wet End, Quality with Model Predictive Control. *Pulp and Paper*, 2004. 78(4): p. 30-33.
36. Vande Vanter, M.A. and G.R. Fralic. Paper machine furnish cost optimization using sensor based multivariable model predictive control. 2005. Canada: Pulp and Paper Technical Association of Canada.
37. Hon, K.K.B., Performance and evaluation of manufacturing systems, in *CIRP Annals 2005 - Manufacturing Technology*, Annals of the International Institution for Production Engineering Research, Editor. 2005, CIRP. p. 690.
38. Paschold, U., The standard method of productivity measurement, in *Improving Paper Machine Efficiency and Productivity*. 2005, Pulp and Paper Technical Association of Canada: Paprican, Pointe-Claire, Québec, Canada.



39. The German Pulp and Paper Chemists and Engineers Association & The Finnish Paper Engineer's Association, Production indices for paper production, in Seminar on Improving Paper Machine Efficiency and Productivity. 2005: Paprican, Pointe-Claire, Québec, Canada.
40. Liard, D., References, benchmarking - Newsprint machines, in Improving Paper Machine Efficiency and Productivity. 2005, Pulp and Paper Technical Association of Canada: Paprican, Pointe-Claire, Québec, Canada.
41. Upton, D.M., Process range in manufacturing: An empirical study of flexibility. *Management Science*, 1997. 43(8): p. 1079.
42. Upton, D.M., The management of manufacturing flexibility. *California Management Review*, 1994. 36(2): p. 72.
43. Narain, R., et al., The strategic implications of flexibility in manufacturing systems. *International Journal of Agile Management Systems*, 2000. 2(3): p. 202.
44. Gerwin, D., Manufacturing flexibility: A strategic perspective. *Management Science*, 1993. 39(4): p. 395.
45. Ronald, E.G., et al., Analysis of the structural measures of flexibility and agility using a measurement theoretical framework. *International Journal of Production Economics*, 2003. 86(1): p. 47.
46. Idhammar, C., Flexibility--not only for craftspeople. *Pulp & Paper*, 1993. 67(13): p. 23.
47. Evans, J.S., Strategic Flexibility for High Technology Manoeuvres: A Conceptual Framework. *The Journal of Management Studies*, 1991. 28(1): p. 69.
48. Mandelbaum, M., Flexibility in decision making: an exploration and unification, in Department of Industrial Engineering. 1978, University of Toronto: Toronto.
49. DeMeyer, A., J. Nakane, and J.G.M.K. Ferdows, Flexibility: The next competitive battle, in Manufacturing Roundtable Research Report Series, B. University, Editor. 1987, School of Management. Boston University: Boston, MA.
50. Gunasekaran, A., Agile manufacturing: A framework for research and development. *International Journal of Production Economics*, 1999. 62(1,2): p. 87.
51. Jackson, M. and C. Johansson, An agility analysis from a production system perspective. *Integrated Manufacturing Systems*, 2003. 14(6): p. 482.
52. Sarkis, J., Benchmarking for agility. *Benchmarking*, 2001. 8(2): p. 88.
53. Coronado, A.E., A framework to enhance manufacturing agility using information systems in SMEs. *Industrial Management + Data Systems*, 2003. 103(5/6): p. 310.

54. McCarthy, I. and C. Tsinopoulos, Strategies for agility: An evolutionary and configurational approach. *Integrated Manufacturing Systems*, 2003. 14(2): p. 103.
55. Prater, E., M. Biehl, and M. Smith, International supply chain agility: Tradeoffs between flexibility and uncertainty. *International Journal of Operations & Production Management*, 2001. 21(5/6): p. 823.
56. One-Ki, L., et al., Aligning IT components to achieve agility in globally distributed system development. *Association for Computing Machinery. Communications of the ACM*, 2006. 49(10): p. 48.
57. Sullivan, E., The age of Agility. *Canadian Packaging*, 2003. 56(11): p. 14.
58. Christopher, M., You are lean but are you agile? *PPI: Pulp & Paper International*, 2002. 44(5): p. 3.
59. John, B., et al., Developing manufacturing agility in SMEs. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 2000. 2(1-7): p. 730.
60. Mason-Jones, R. and D.R. Towill, Total cycle time compression and the agile supply chain. *International Journal of Production Economics*, 1999. 62(1-2): p. 61-73.
61. Naylor, J.B., M.M. Naim, and D. Berry, Leagility: Integrating the lean and agile manufacturing paradigms in the total supply chain. *International Journal of Production Economics*, 1999. 62(1-2): p. 107-118.
62. Preiss, K., S.L. Goldman, and R.N. Nagel, *Cooperate to compete: Building agile business relationship*. 1996, New York.
63. Ram, N., S. Morgan, and K. Soo Wook, Disentangling leanness and agility: An empirical investigation. *Journal of Operations Management*, 2006. 24(5): p. 440.
64. Sharifi, H. and Z. Zhang, Agile manufacturing in practice: Application of a methodology. *International Journal of Operations & Production Management*, 2001. 21(5/6): p. 772.
65. Sharp, J.M., Z. Irani, and S. Desai, Working towards agile manufacturing in the UK industry. *International Journal of Production Economics*, 1999. 62(1-2): p. 155-169.
66. Tekin, E., Performance opportunity for workforce agility. 2003, Northwestern University: United States -- Illinois.
67. Zhang, J., et al., Object-oriented modeling of control system for agile manufacturing cells. *International Journal of Production Economics*, 1999. 62(1-2): p. 145-153.

68. Yusuf, Y.Y., M. Sarhadi, and A. Gunasekaran, Agile manufacturing: The drivers, concepts and attributes. *International Journal of Production Economics*, 1999. 62(1,2): p. 33.
69. Dishman, P.L. and J.L. Calof, Competitive intelligence: a multiphase precedent to marketing strategy. *European Journal of Marketing*, 2008. 42(7/8): p. 766.
70. Hedgebeth, D., Data-driven decision making for the enterprise: an overview of business intelligence applications. *VINE*, 2007. 37(4): p. 414.
71. Green, A., Business information - a natural path to business intelligence: knowing what to capture. *VINE*, 2007. 37(1): p. 18.
72. Wright, S. and J.L. Calof, The quest for competitive, business and marketing intelligence. *European Journal of Marketing*, 2006. 40(5/6): p. 453.
73. Lönnqvist, A. and V. Pirttimäki, The measurement of business intelligence. *Information Systems Management*, 2006. 23(1): p. 32.
74. Leiviskä, K., Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys, and Technical Association of the Pulp and Paper Industry, Process control. *Papermaking science and technology*. 1999, Atlanta, GA: Tappi Press. 297 p.
75. Seborg, D.E., T.F. Edgar, and D.A. Mellichamp, Process dynamics and control. 2nd ed. 2004, Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons. xv, 713 p.
76. Roffel, B. and B.H. Betlem, Advanced practical process control. 2004, Berlin ; Berlin: Springer. ix, 309 p.
77. Blevens, T.L., et al., Advanced control unleashed. 2003, Research Triangle Park, N.C.: ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society. xi, 434 p.
78. Ryan, T.P., Statistical methods for quality improvement: John Wiley & Sons, second Edition, c2000. p. xxiv, 555.
79. Emerson Process Management, Control engineering fundamentals and tuning principles, in PCE-1, Process control for engineers, Lecture notes 2003.
80. Montgomery, D.C., Design and analysis of experiments. 7th ed. 2009, Hoboken, N.J.: Wiley. xvii, 653 p.

## Annexe A – Pages écran CADSIM Plus™ du procédé à l'étude

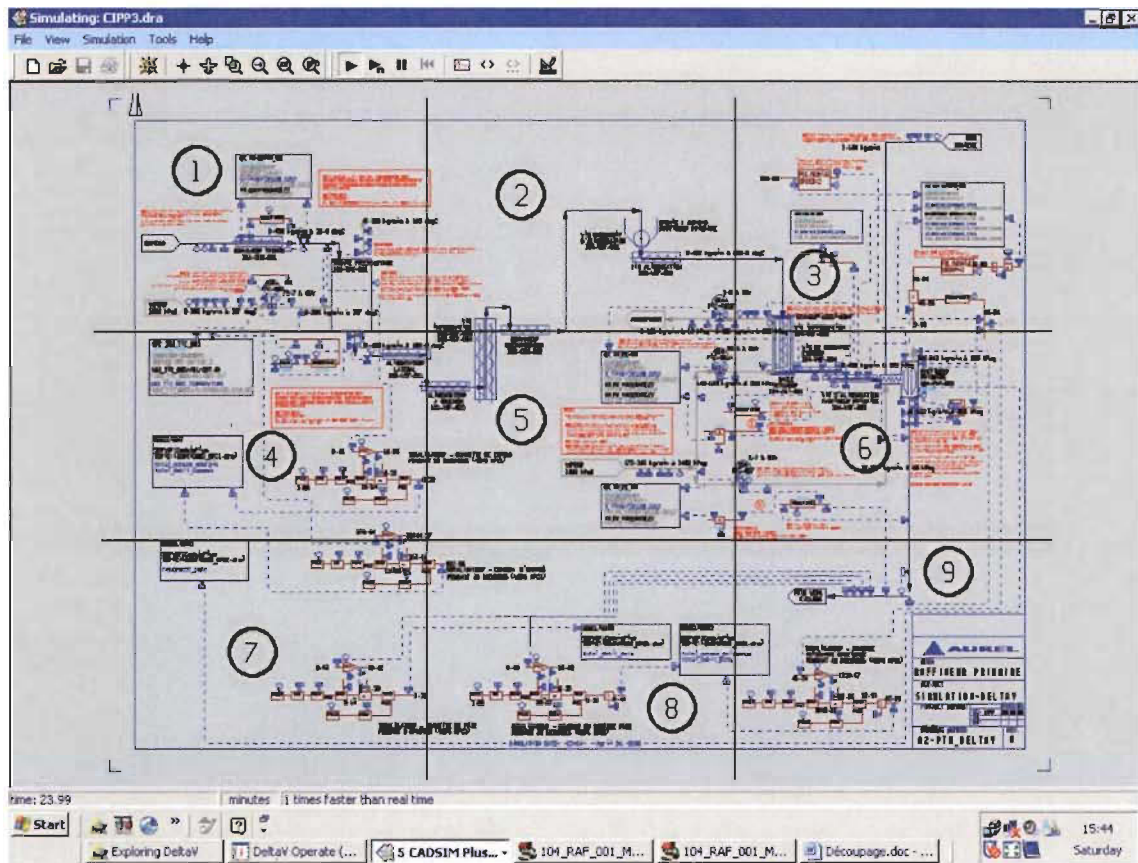


Figure A.1 Page écran du fichier CIPP3.dra avec indications de découpage



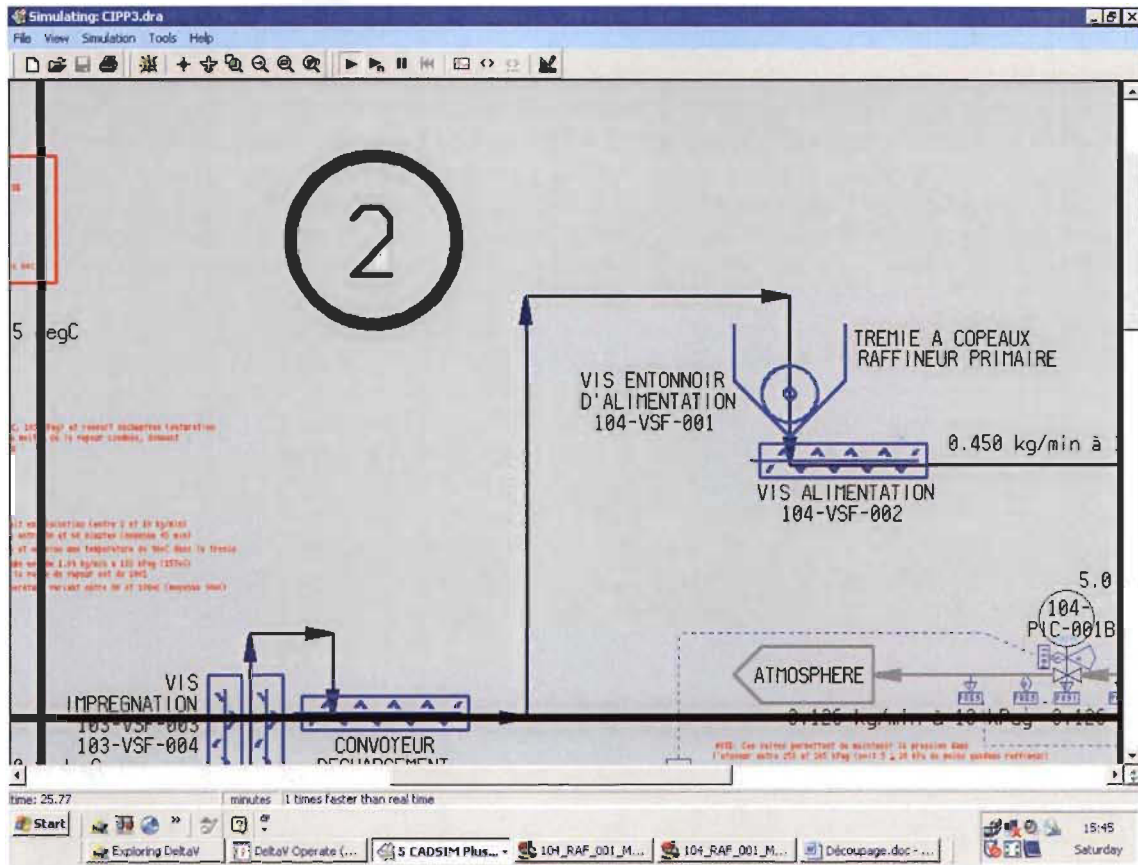


Figure A.3 Page écran du découpage 2



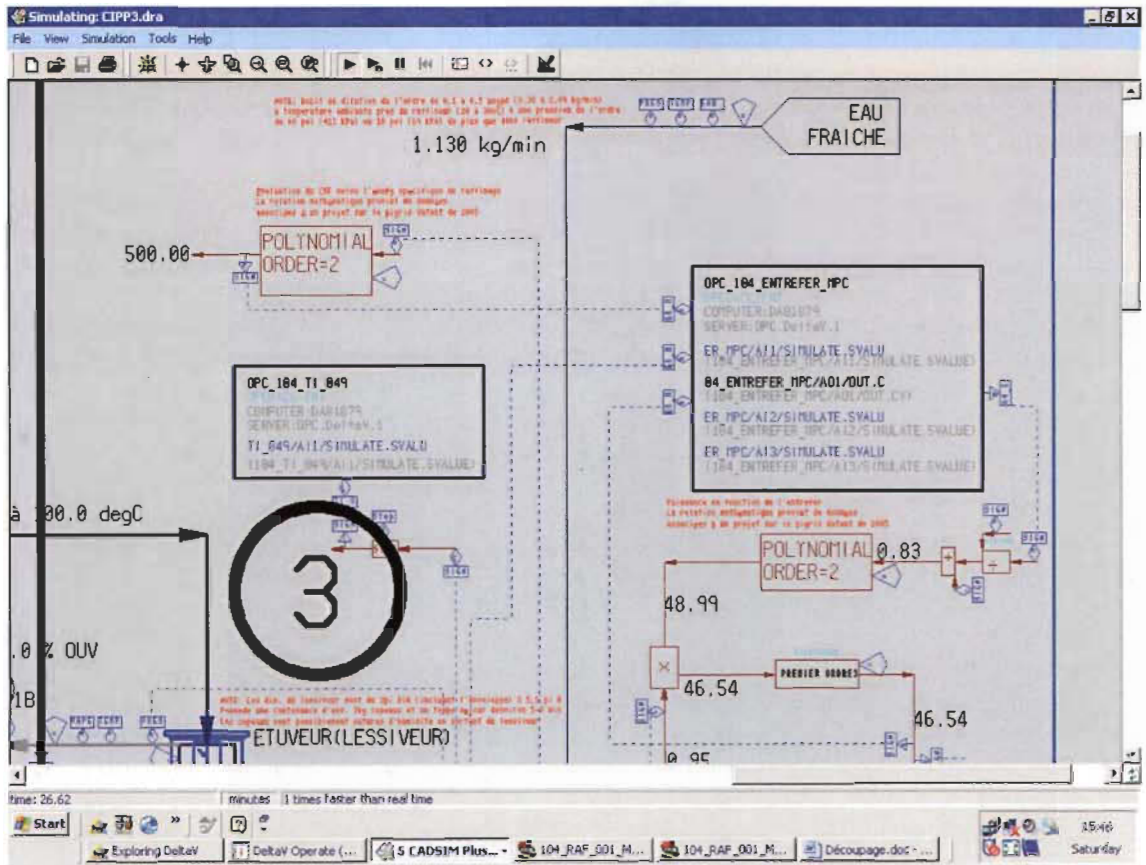


Figure A.4 Page écran du découpage 3



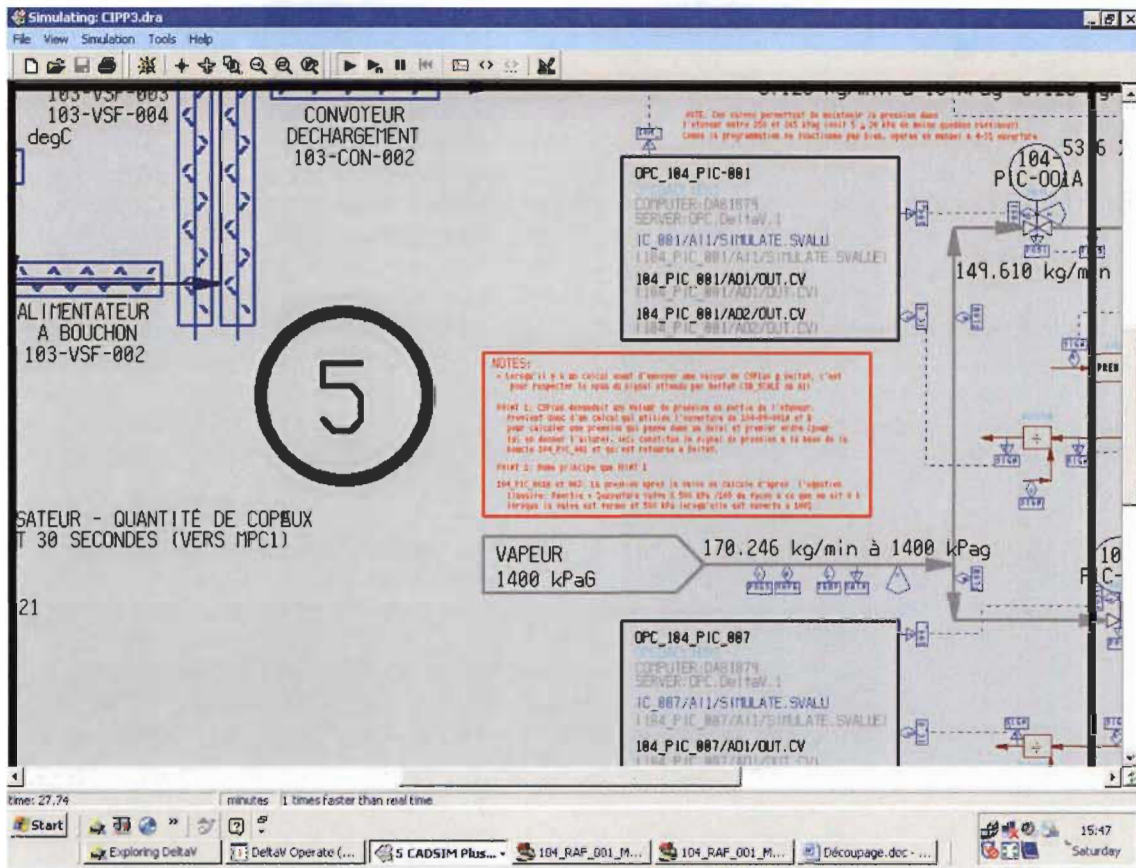


Figure A. 6 Page écran du découpage 5

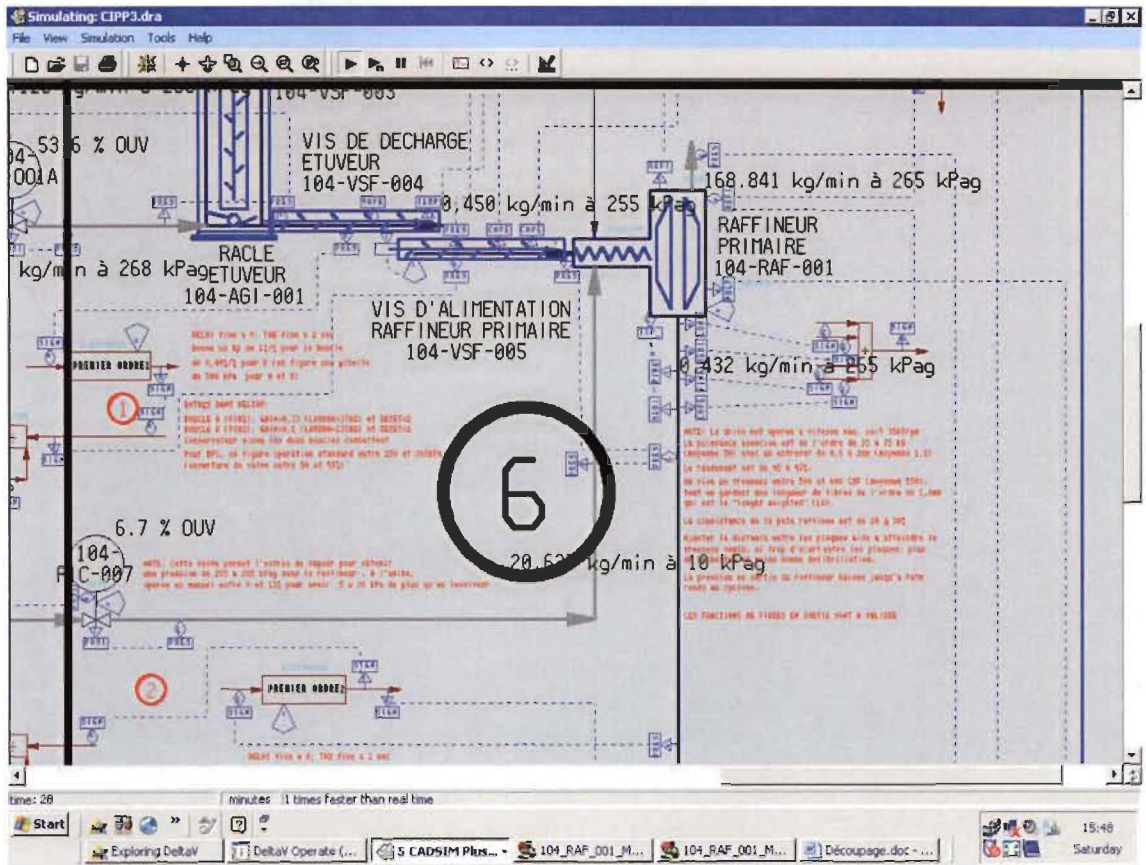


Figure A.7 Page écran du découpage 6



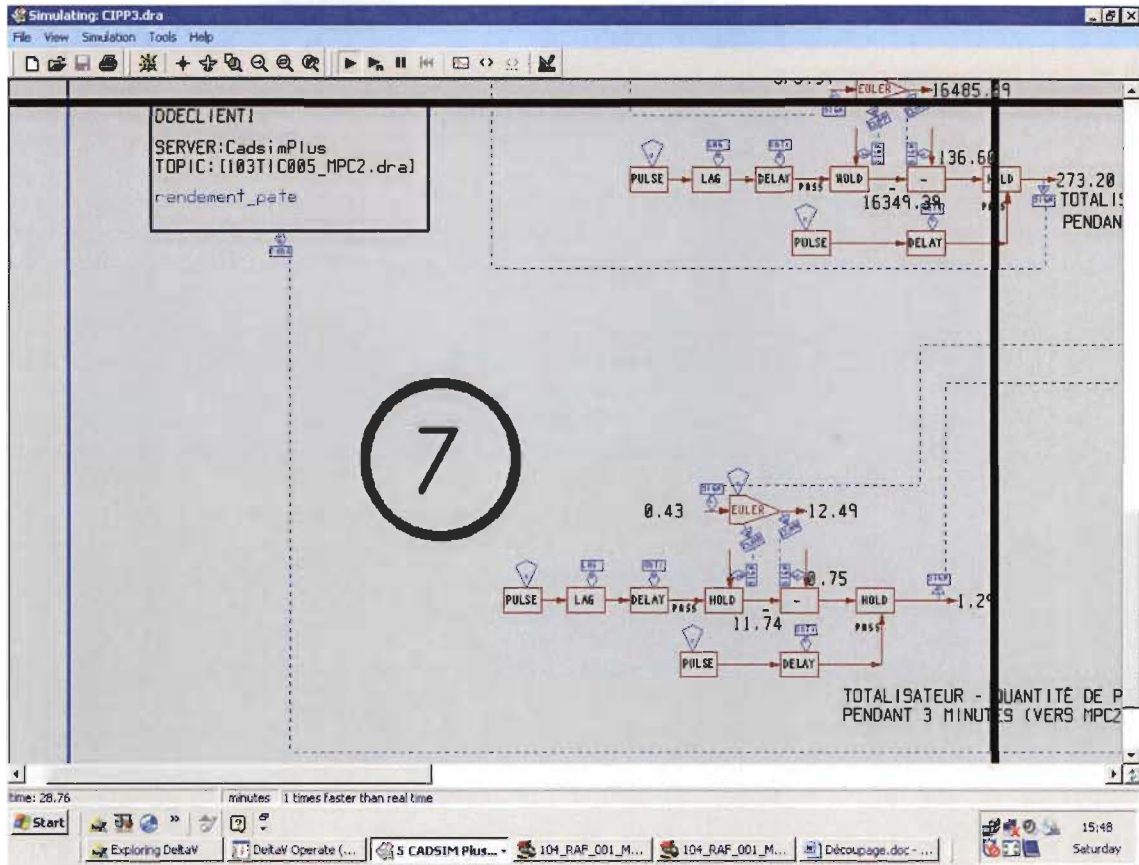


Figure A.8 Page écran du découpage 7

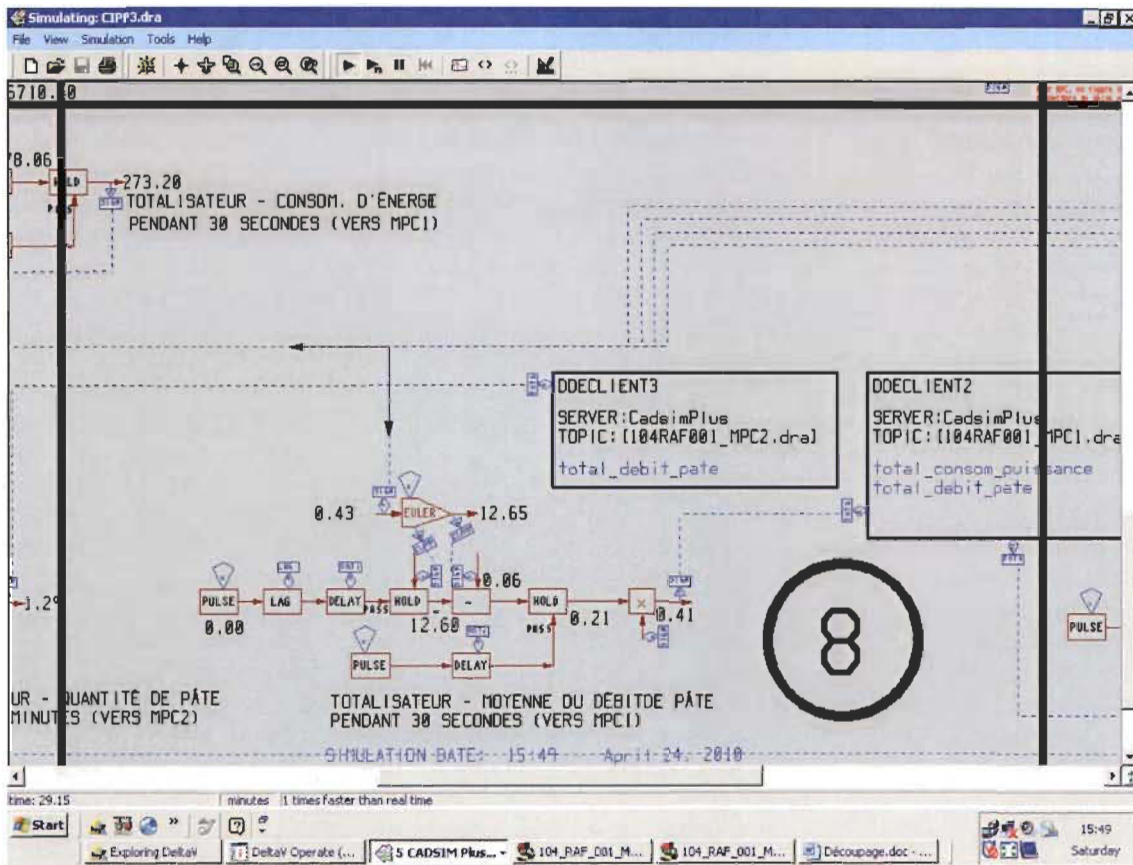


Figure A.9 Page écran du découpage 8



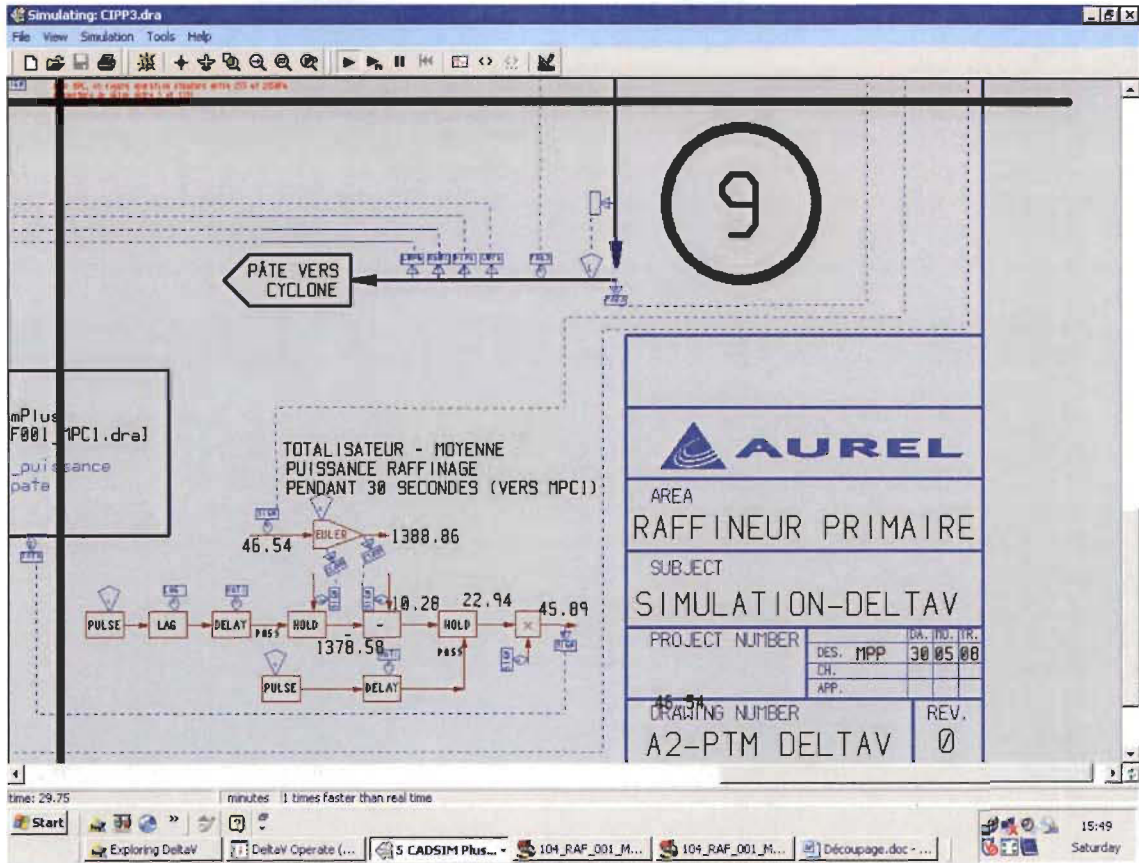


Figure A.10 Page écran du découpage 9

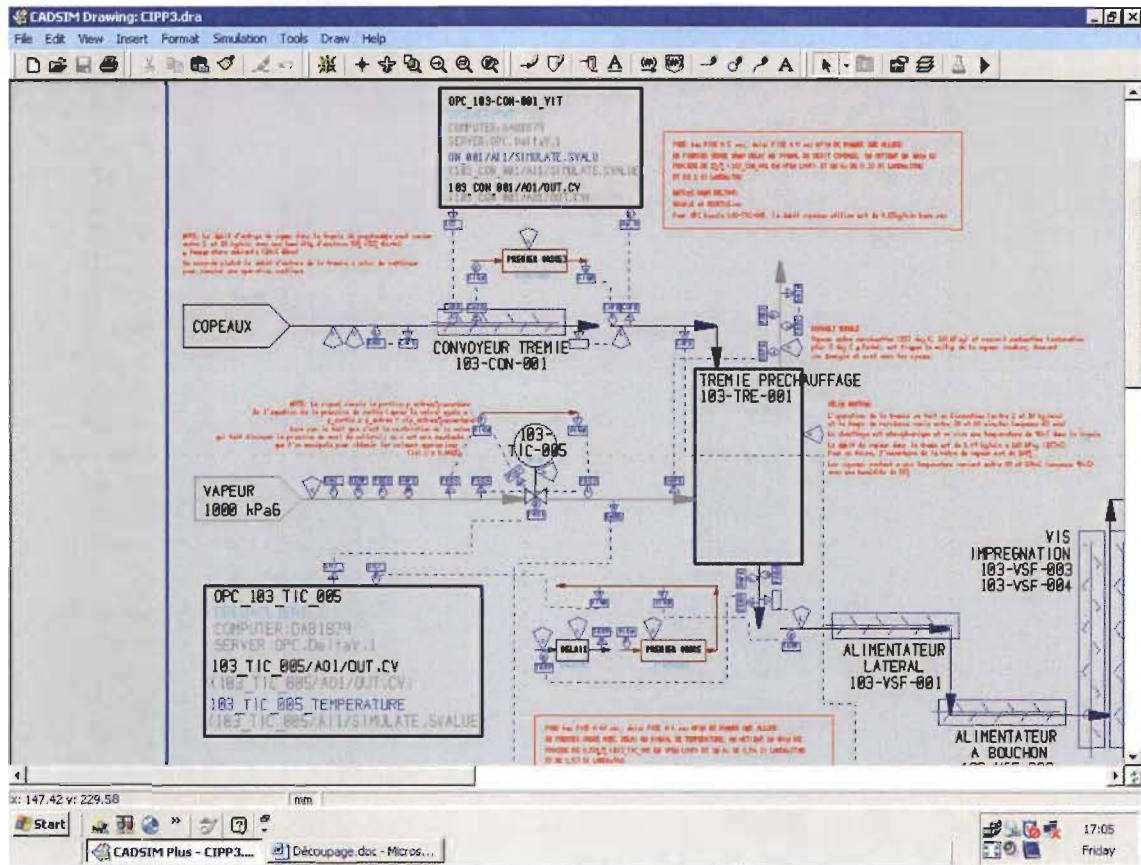


Figure A.11 Page écran du fichier CIPP3.dra de *CADSIM Plus™* associée aux boucles de contrôle 103-CON-001 et 103-TIC-005

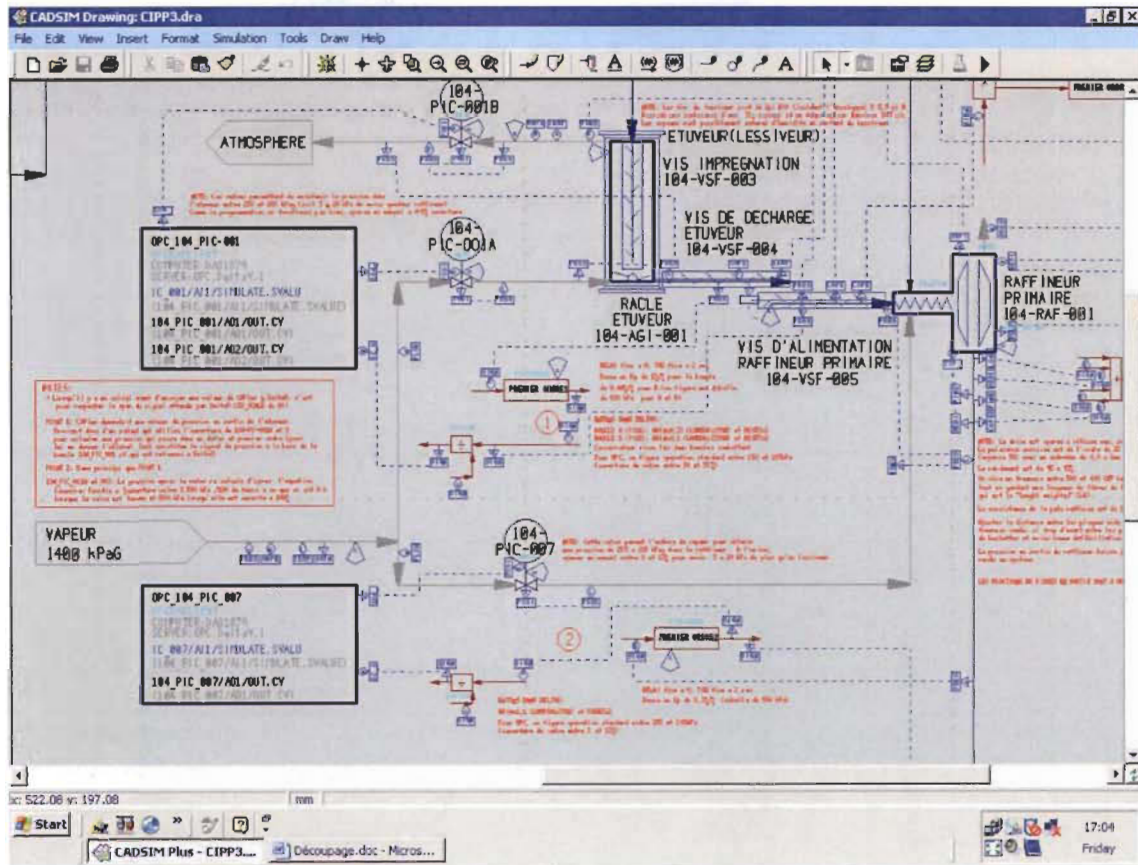


Figure A.12 Page écran du fichier CIPP3.dra de *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> associée aux boucles de contrôle 104-PIC-001 et 104-PIC-007

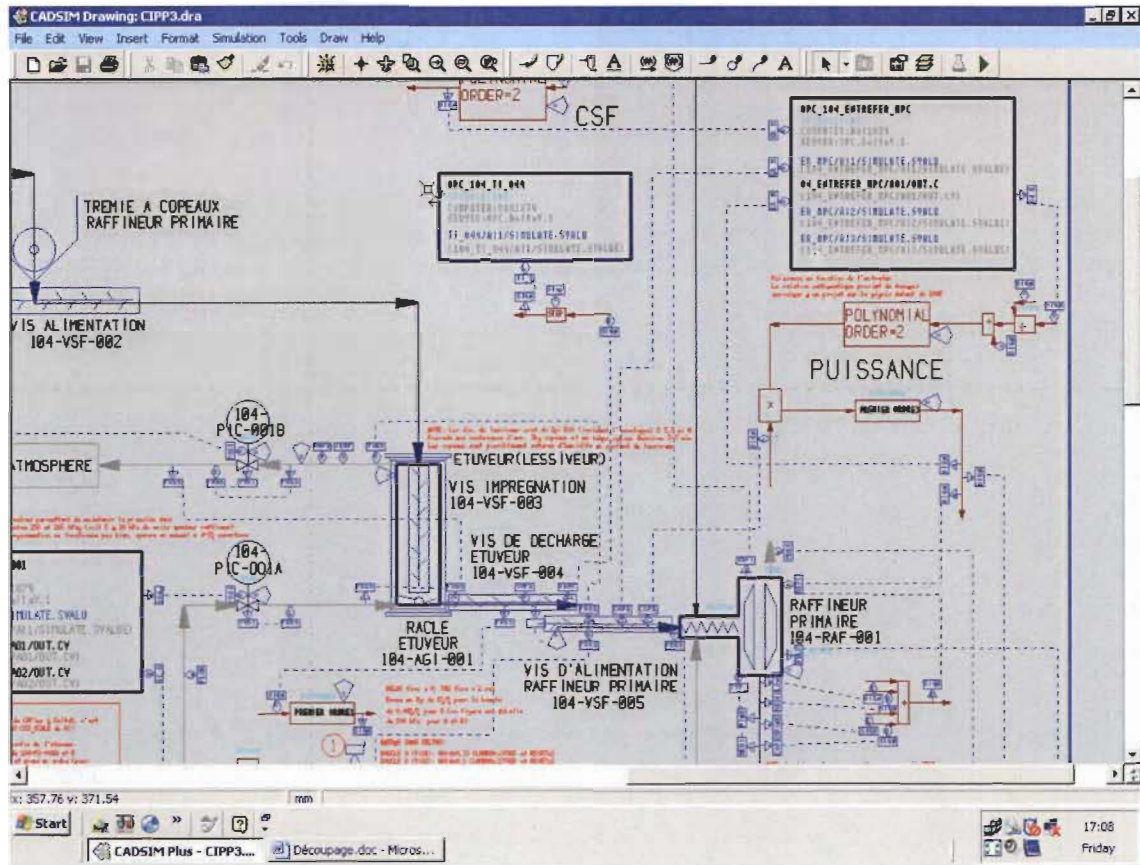


Figure A.13 Page écran du fichier CIPP3.dra de *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> associée à la boucle de contrôle 104-ENTREFER-MPC



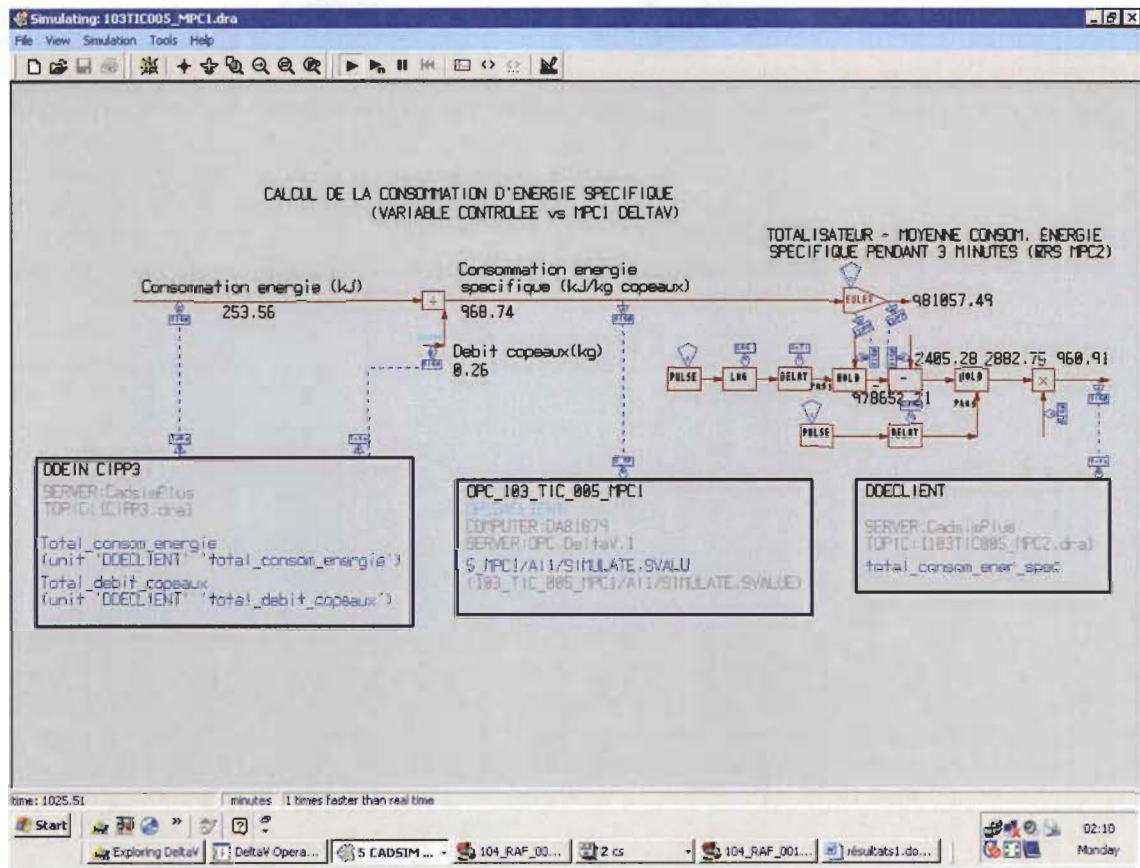


Figure A.14 Page écran du fichier 103TIC005\_MPC1.dra de *CADSIM Plus*<sup>TM</sup> associée à la boucle de contrôle 103-TIC-005-MPC1

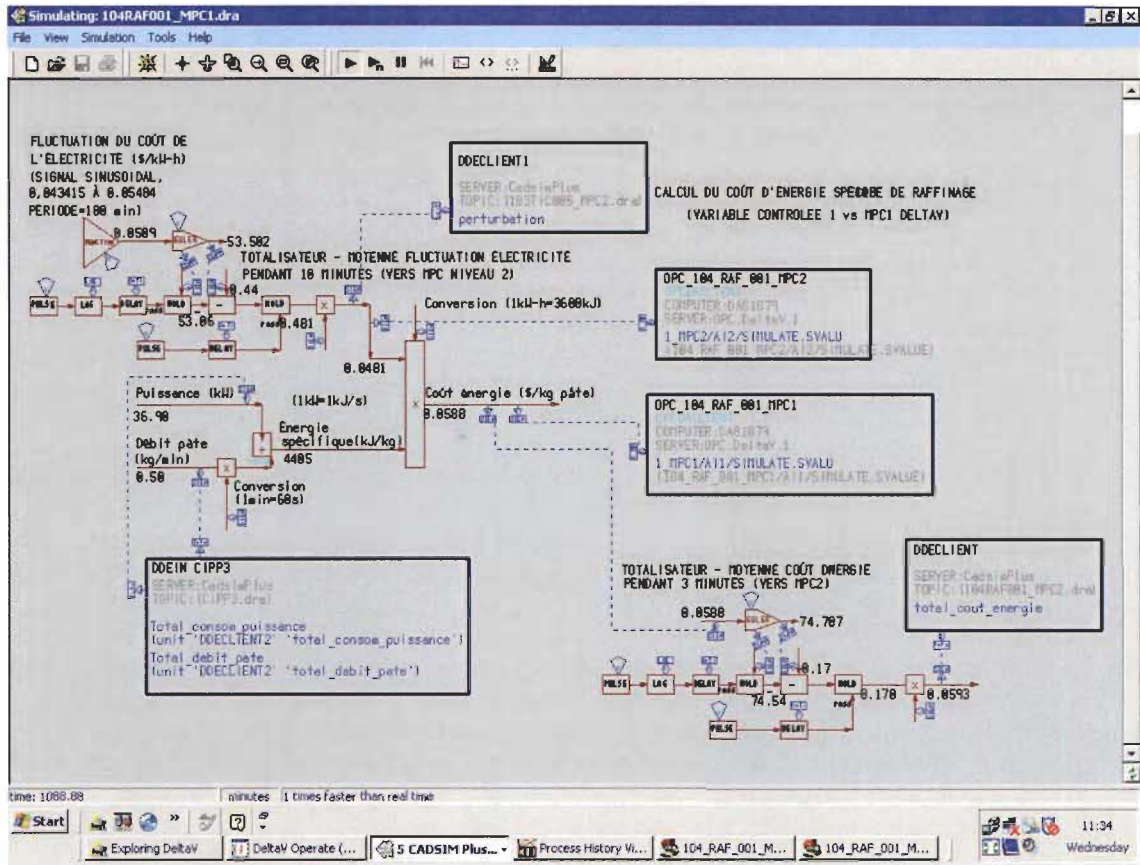


Figure A.15 Page écran du fichier 104RAF001\_MPC1.dra de CADSIM Plus™ associée à la boucle de contrôle 104-RAF-001-MPC1



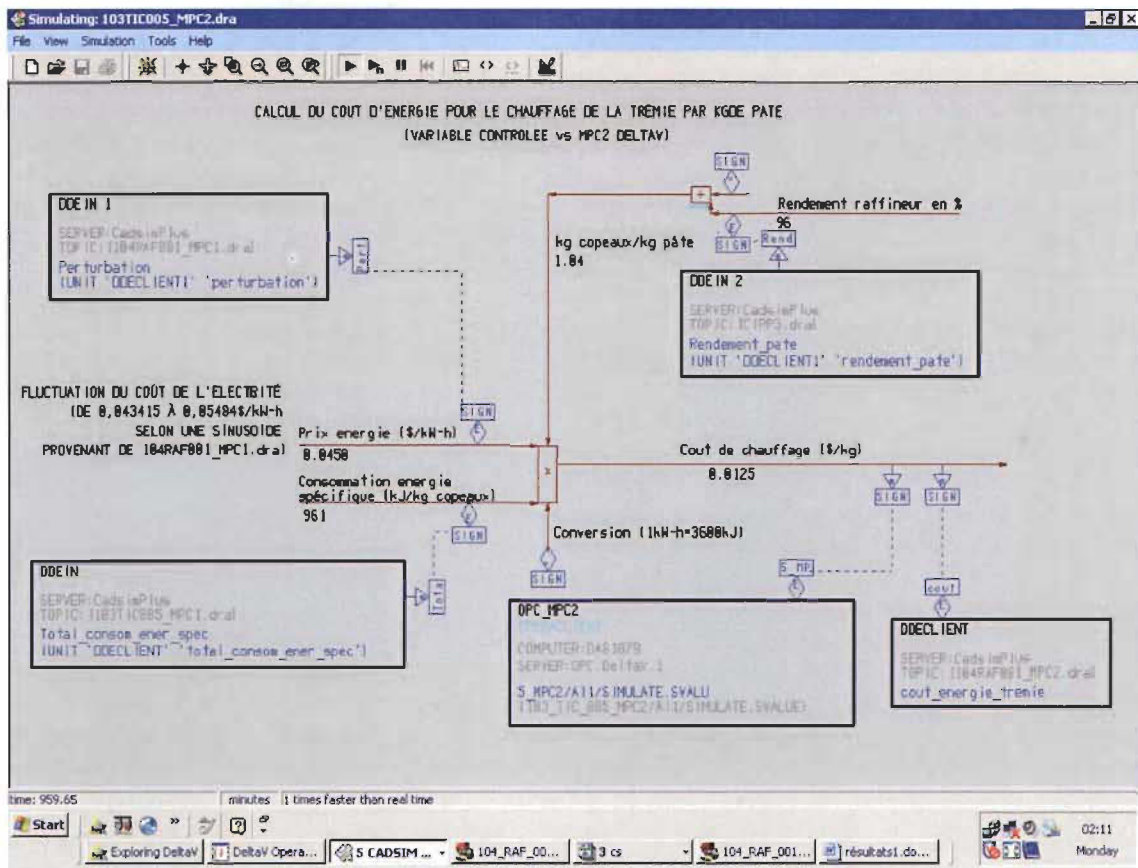


Figure A.16 Page écran du fichier 103TIC005\_MPC2.dra de CADSIM Plus™ associée à la boucle de contrôle 103-TIC-005-MPC2

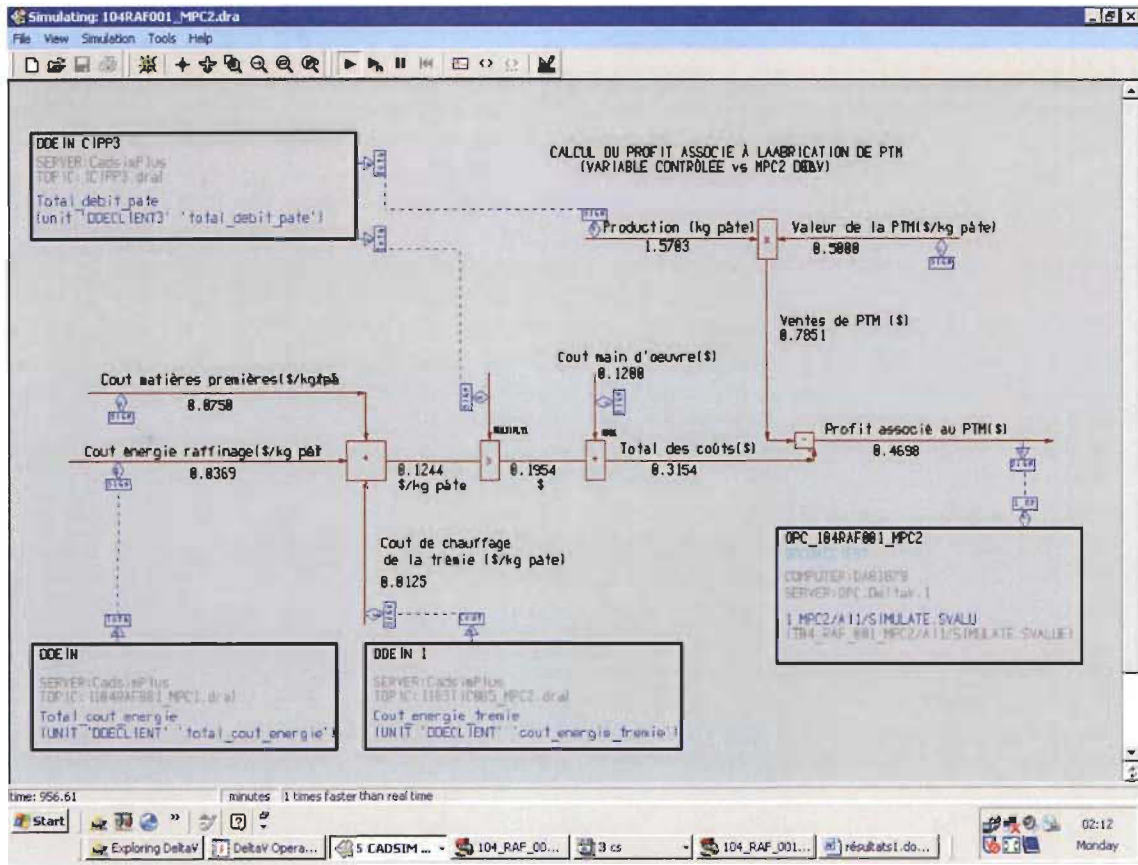


Figure A.17 Page écran du fichier 104RAF001\_MPC2.dra de CADSIM Plus™ associée à la boucle de contrôle 104-RAF-001-MPC2

## Annexe B – Pages écran *DeltaV* associées à la description du procédé à l'étude

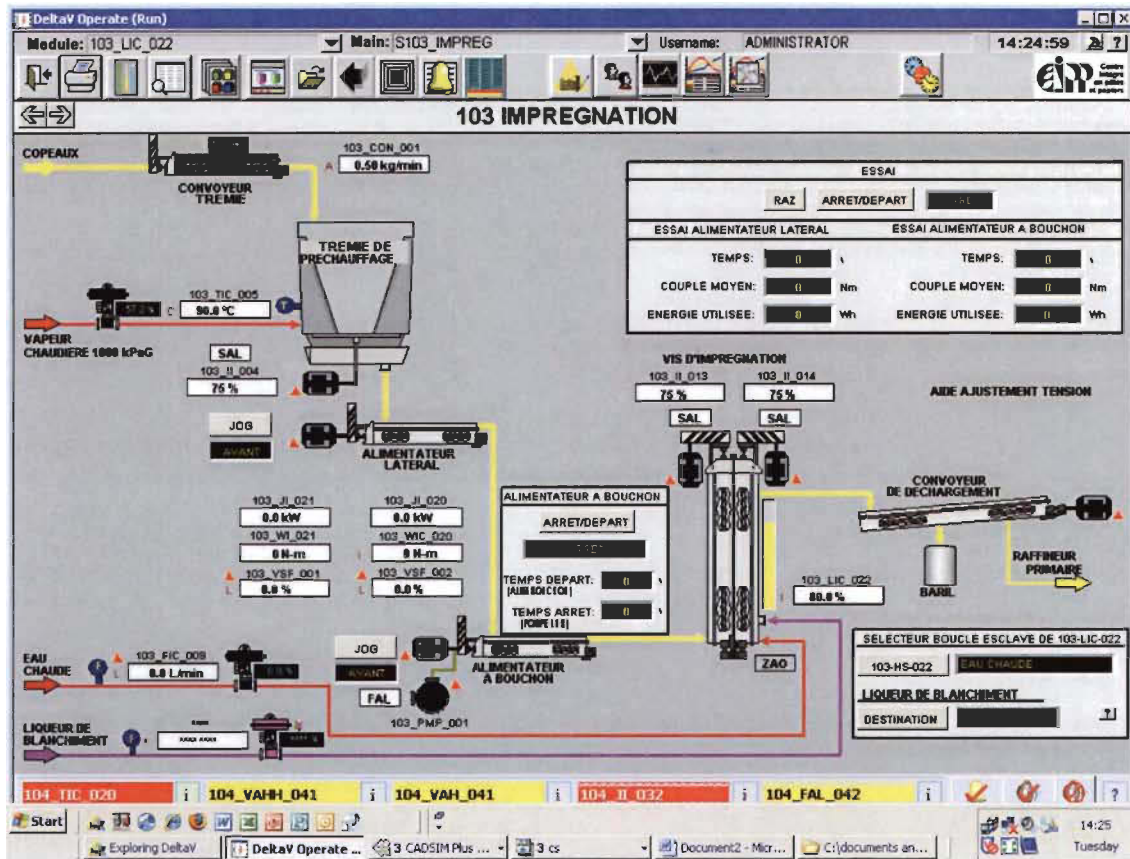


Figure B.1 Page écran d'opération *DeltaV* associée aux boucles de contrôle 103-CON-001 et 103-TIC-005

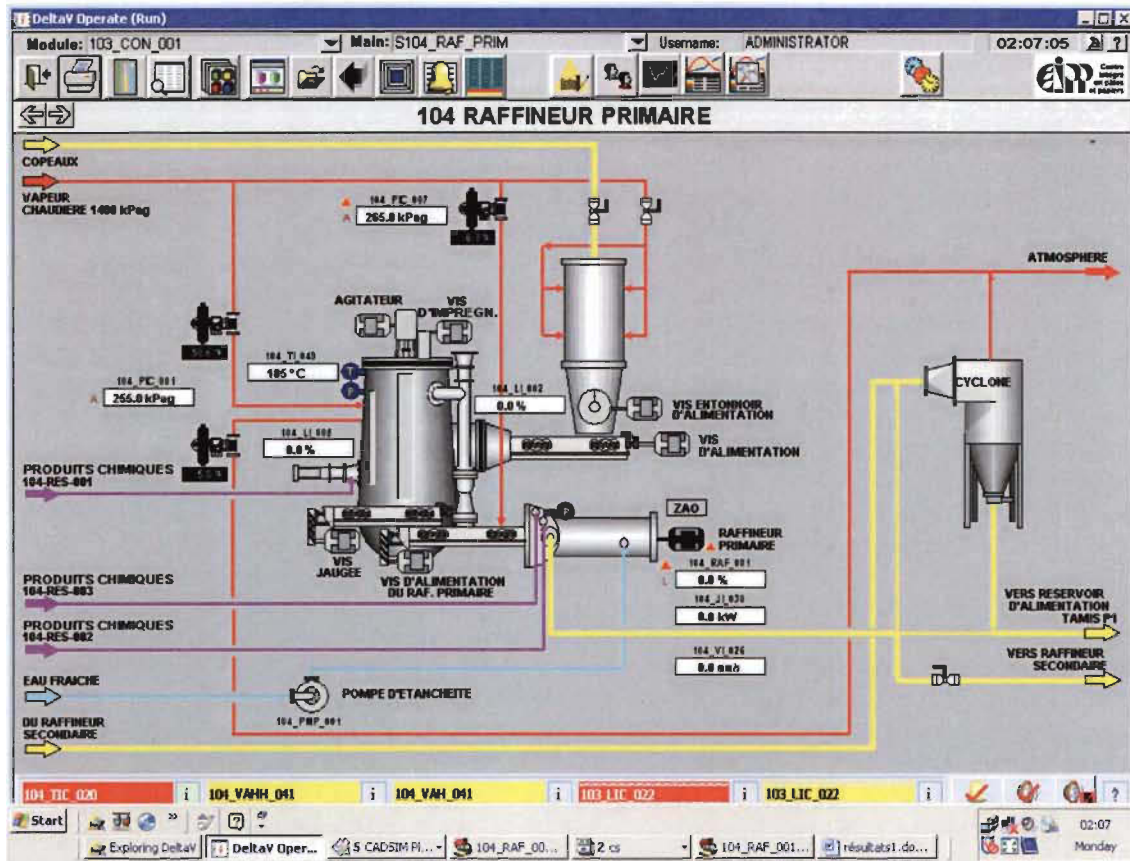


Figure B.2 Page écran d'opération *DeltaV* associée aux boucles de contrôle 104-PIC-001, 104-PIC-007 et 104-ENTREFER-MPC





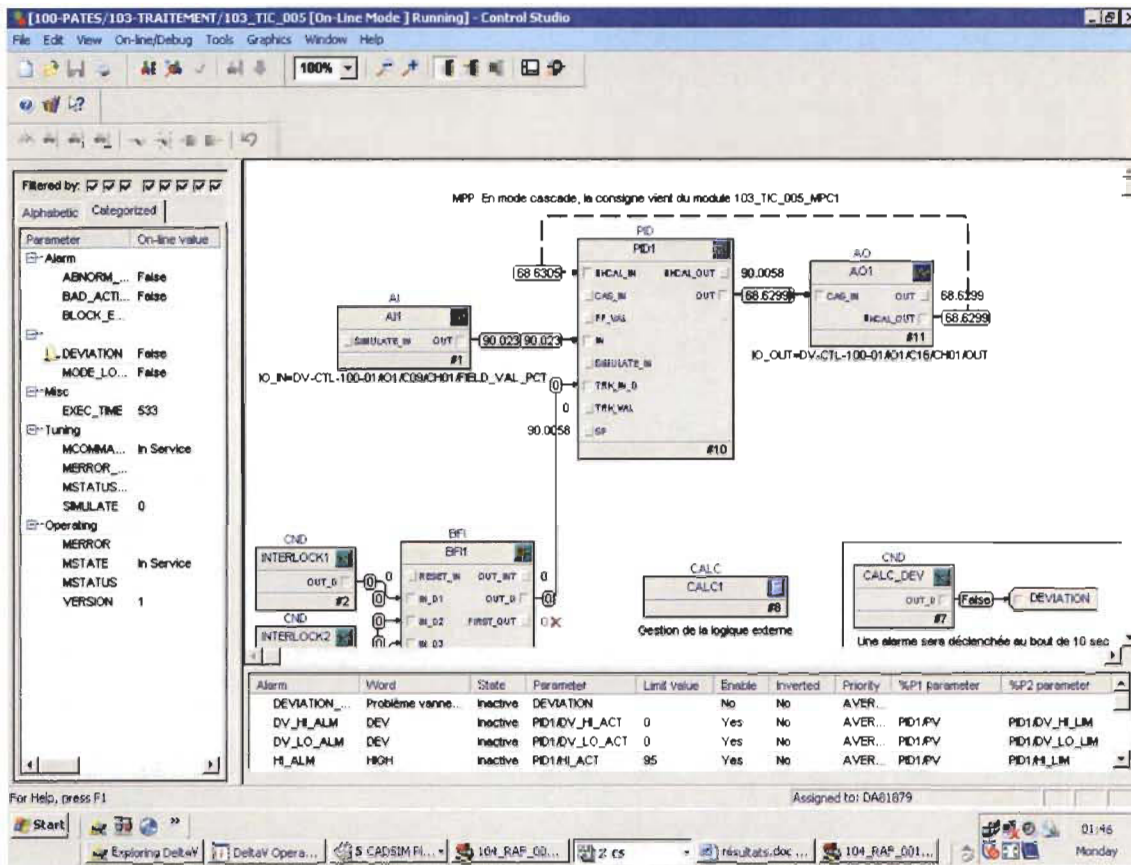


Figure B.4 Page écran du module de contrôle *DeltaV* associé à la boucle de contrôle 103-TIC-005



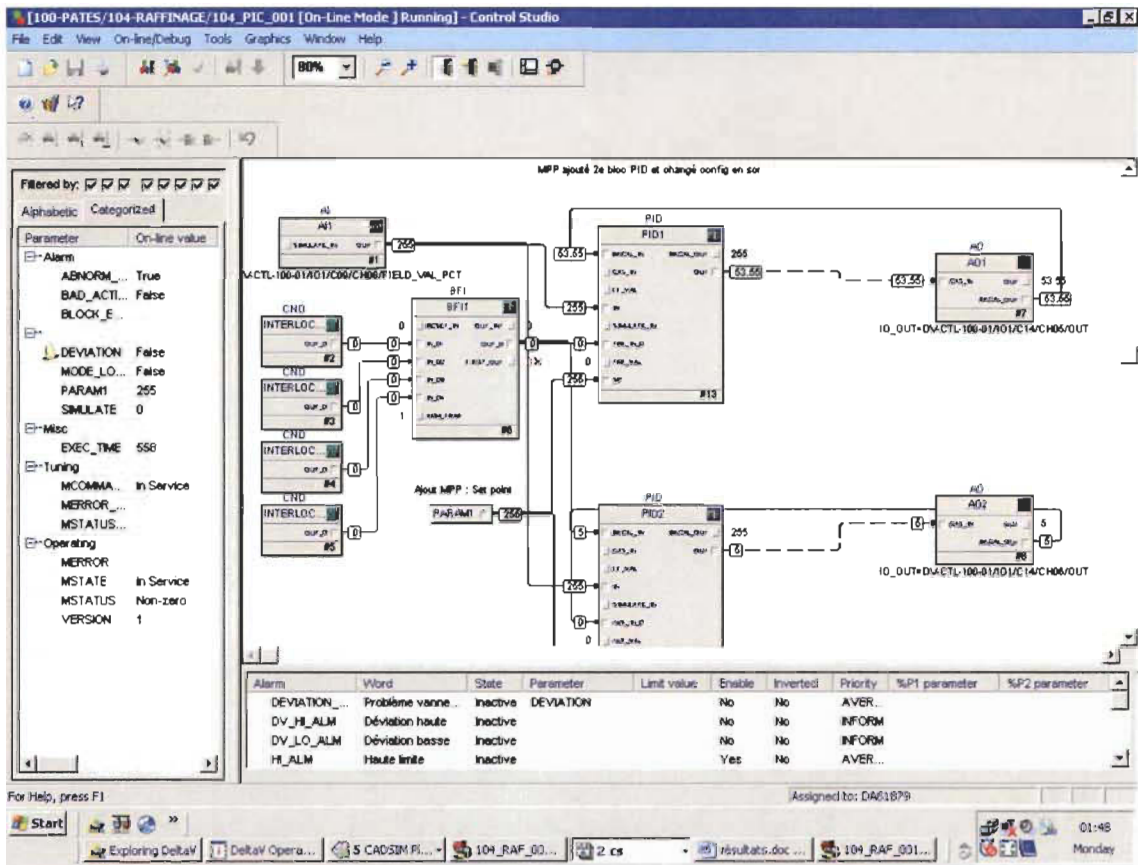


Figure B.5 Page écran du module de contrôle *DeltaV* associé à la boucle de contrôle 104-PIC-001

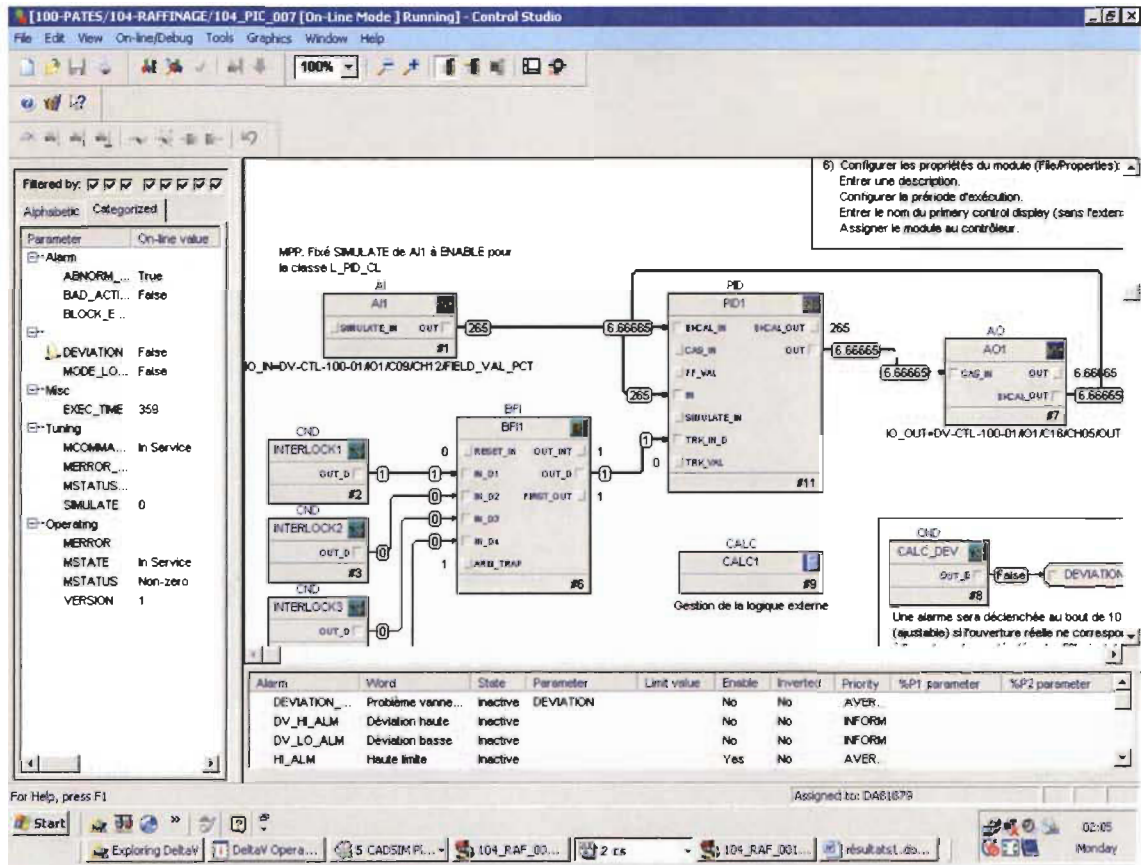


Figure B.6 Page écran du module de contrôle *DeltaV* associé à la boucle de contrôle 104-PIC-007



Control Studio interface showing the MPC-PRO1 control loop configuration for the 103-TIC-005-MPC1 process. The diagram illustrates the relationship between the AI (AI1) and MPC-PRO1 blocks, with associated parameters and values.

**Parameter List (Left Panel):**

Parameter	On-line value
ABNORM_...	
BAD_ACTI...	
BAD_MASK	
BLOCK_E...	
INSPECT_...	0
BKCAL_IN1	90.0249
BKCAL_IN2	0
FOLLOW	0
PROC_IN1	90.0249
PROC_IN2	0.549837
PROC_OUT1	968.976
RCAS_IN1	966.291
RCAS_OUT1	966.291
MODE	Remote cas
PROO_RA...	1
PROO_RA...	False
SHED_TIME	120
SP1	966.291
SP_WRK1	968.96
STDEV	0
STDEV_LI...	5
VAR_IDX	99.6965
VAR_IDX...	30

**Control Loop Diagram (Main Panel):**

Diagram Title: Premier niveau de MPC relatif à la trémie de préchauffage - contrôle de l'énergie spécifique liés à la consommation de vapeur

Block 1 (AI): AI1  
 Input: GIBULATE\_IN (968.976)  
 Output: OUT (966.291)  
 Description: Énergie spécifique associée à la consommation de vapeur (KJ/kg copeaux); provient de CSPlus, fichier 103TIC005\_MPC1.dra

Block 2 (MPC-PRO1): MPC-PRO1  
 Input: RCAS\_OUT1 (966.291)  
 Output: RCAS\_IN1 (966.291)  
 Description: Manipulée : Température à la trémie de préchauffage

Perturbation: Taux d'alimentation des copeaux à la trémie de préchauffage

**Table (Bottom Panel):**

Alarm	Word	State	Parameter	Limit value	Enable	Inverted	Priority	%P1 parameter	%P2 parameter

Figure B.8 Page écran du module de contrôle *DeltaV* associé à la boucle de contrôle 103-TIC-005-MPC1



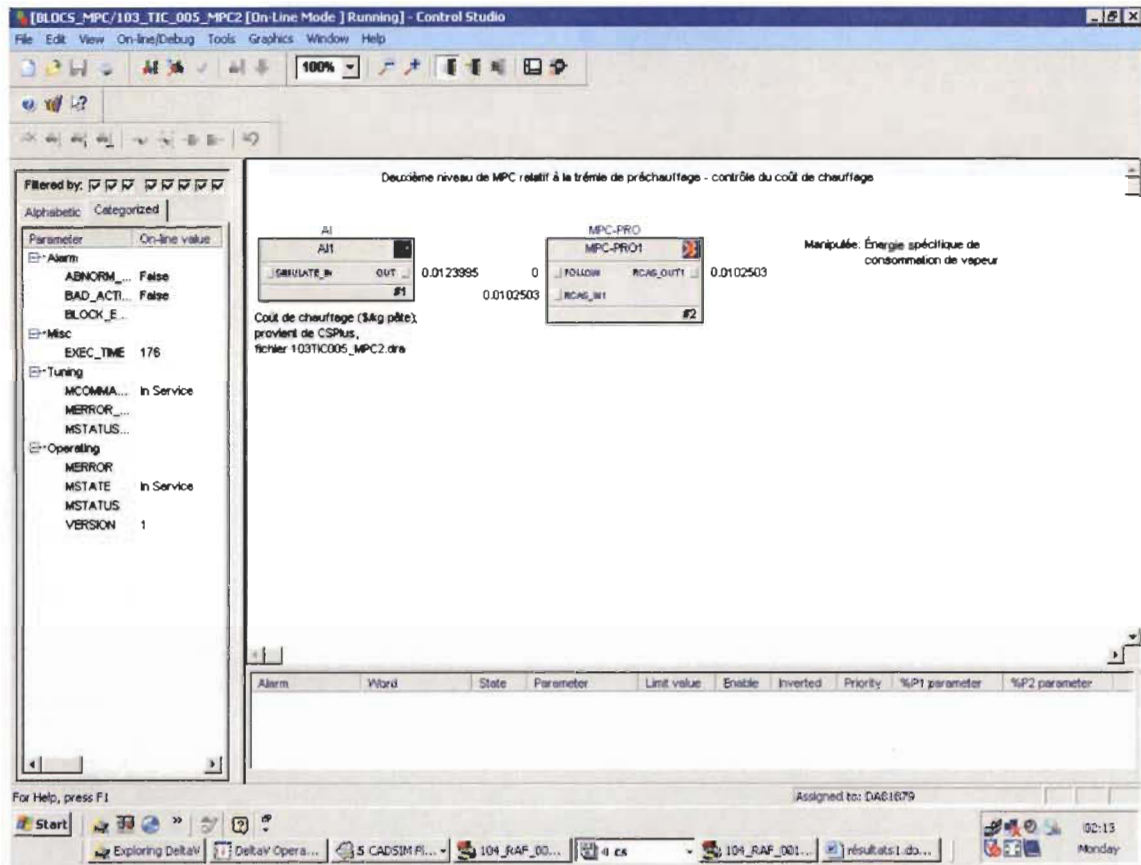


Figure B.10 Page écran du module de contrôle *DeltaV* associé à la boucle de contrôle 103-TIC-005-MPC2



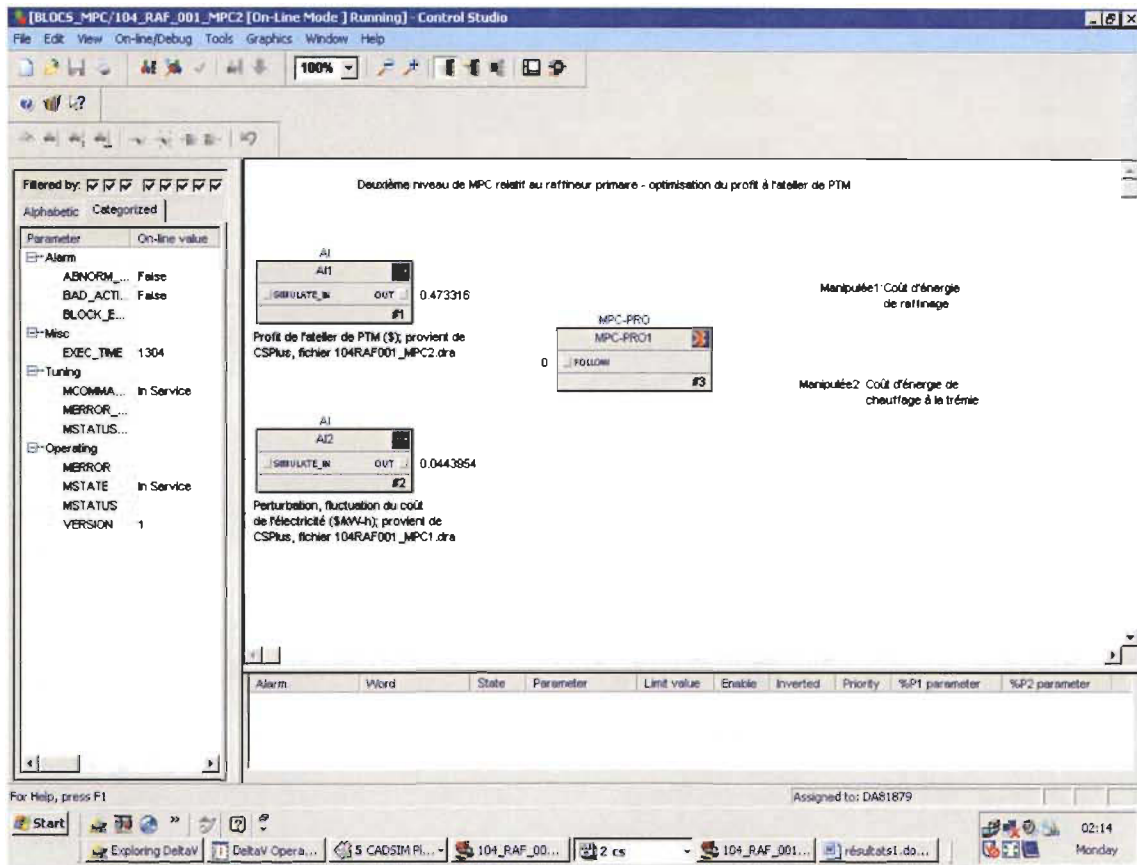


Figure B.11 Page écran du module de contrôle *DeltaV* associé à la boucle de contrôle 104-RAF-001-MPC2

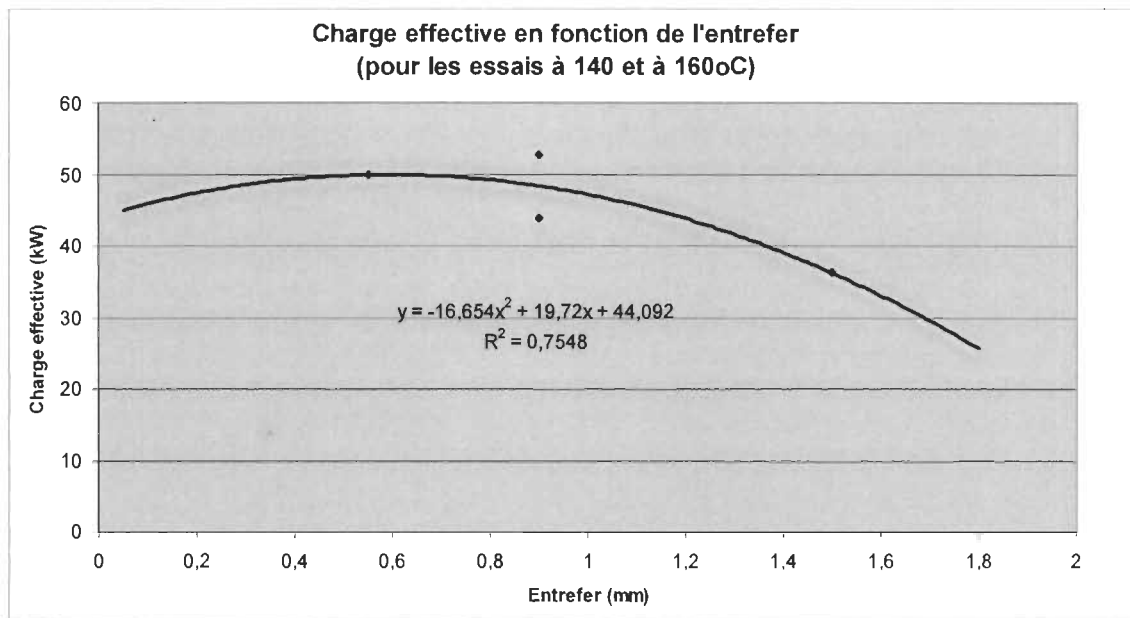
## Annexe C – Données sur le pin gris

Données sur le raffinage primaire tirées d'un projet sur le pin gris  
effectué en mai 2005 au CIPP (Source: Alain Marchand)

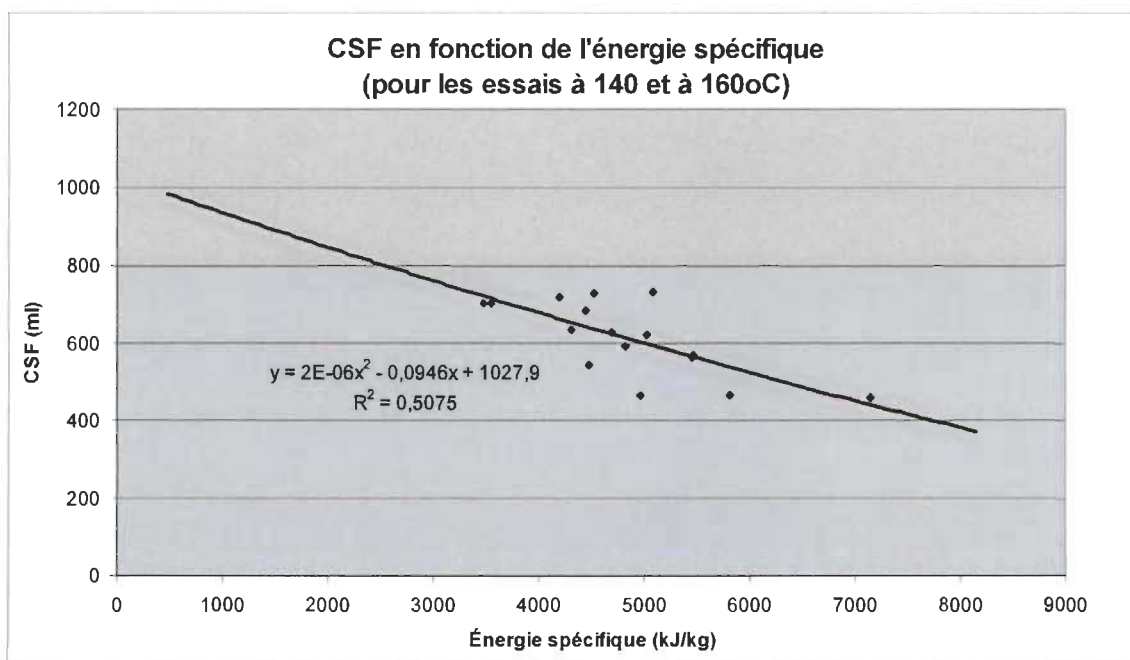
ÉCHANTILLON (Température de raffinage)	Charge effective (kW)	Dilution disques plats (usgpm)	Dilution disques coniques (usgpm)	Distance entre les plaques (mm)	Production (kg sec/min)	Consistance (%)	Énergie spécifique (kWh/t.m.)	Énergie spécifique (kJ/kg)	Indice d'égouttage (ml)
Mix 024A (100°C - Patm) <sup>1</sup>	41,8	0,65	0	0,9	0,508	15,4	1373	4941	377
Mix 024B (100°C - Patm) <sup>1</sup>	41,8	0,65	0	0,9	0,488	14,9	1427	5138	283
Mix 024C (100°C - Patm) <sup>1</sup>	41,8	0,65	0	0,9	0,588	19,6	1184	4262	251
Mix 024D (100°C - Patm) <sup>1</sup>	41,8	0,65	0	0,9	0,576	19,1	1210	4356	233
Mix 026A (100°C - Patm) <sup>1</sup>	29,4	0,65	0	1,1	0,526	15,4	931	3352	508
Mix 026B (100°C - Patm) <sup>1</sup>	29,4	0,65	0	1,1	0,464	14,0	1056	3802	658
Mix 026C (100°C - Patm) <sup>1</sup>	29,4	0,65	0	1,1	0,570	13,8	860	3095	665
Mix 026D (100°C - Patm) <sup>1</sup>	29,4	0,65	0	1,1	0,502	12,6	975	3511	677
Mix 224A (120°C) <sup>2</sup>	58,5	0,65	0	1,2	0,597	18,5	1634	5884	420
Mix 224B (120°C) <sup>2</sup>	58,5	0,65	0	1,2	0,633	28,3	1541	5548	213
Mix 224C (120°C) <sup>2</sup>	58,5	0,65	0	1,2	0,690	18,1	1412	5084	450
Mix 224D (120°C) <sup>2</sup>	58,5	0,65	0	1,2	0,658	25,9	1483	5338	179
Mix 226A (120°C) <sup>2</sup>	35,9	0,65	0	1,2	0,675	14,8	887	3193	623
Mix 226B (120°C) <sup>2</sup>	35,9	0,65	0	1,2	0,619	14,3	966	3478	670
Mix 226C (120°C) <sup>2</sup>	35,9	0,65	0	1,2	0,554	15,6	1079	3885	600
Mix 226D (120°C) <sup>2</sup>	35,9	0,65	0	1,2	0,643	15,9	930	3349	526
Mix 423A (140°C) <sup>3</sup>	52,8	0,6	0	0,9	0,443	15,4	1986	7148	458
Mix 423B (140°C) <sup>3</sup>	52,8	0,6	0	0,9	0,580	17,1	1518	5467	568
Mix 423C (140°C) <sup>3</sup>	52,8	0,6	0	0,9	0,581	15,4	1515	5454	564
Mix 423D (140°C) <sup>3</sup>	52,8	0,6	0	0,9	0,545	16,0	1614	5811	467
Mix 426A (140°C) <sup>3</sup>	36,2	0,45	0	1,5	0,519	16,6	1163	4186	717
Mix 426B (140°C) <sup>3</sup>	36,2	0,45	0	1,5	0,504	20,7	1198	4313	634
Mix 426C (140°C) <sup>3</sup>	36,2	0,45	0	1,5	0,625	16,5	965	3474	701
Mix 426D (140°C) <sup>3</sup>	36,2	0,45	0	1,5	0,611	20,4	987	3553	703
Mix 625A (160°C) <sup>4</sup>	49,9	0,4	0	0,55	0,668	24,7	1245	4482	542
Mix 625B (160°C) <sup>4</sup>	49,9	0,4	0	0,55	0,622	24,3	1338	4816	593
Mix 625C (160°C) <sup>4</sup>	49,9	0,4	0	0,55	0,597	23,3	1394	5018	622
Mix 625D (160°C) <sup>4</sup>	49,9	0,4	0	0,55	0,603	26,1	1379	4966	465
Mix 626A (160°C) <sup>4</sup>	43,9	0,43	0	0,9	0,582	18,9	1256	4522	727
Mix 626B (160°C) <sup>4</sup>	43,9	0,43	0	0,9	0,518	18,6	1412	5084	730
Mix 626C (160°C) <sup>4</sup>	43,9	0,43	0	0,9	0,562	20,3	1302	4686	626
Mix 626D (160°C) <sup>4</sup>	43,9	0,43	0	0,9	0,593	29,4	1234	4444	681

### Fichiers:

- 1: "energie\_raf\_100\_elysa\_mai\_05
- 2: "energie\_raf\_120\_elysa\_mai\_05
- 3: "energie\_raf\_140\_elysa\_mai\_05
- 4: "energie\_raf\_160\_elysa\_mai\_05



**Figure C.1** Relation polynomiale d'ordre 2 entre puissance et entrefer



**Figure C.2** Relation polynomiale d'ordre 2 entre CSF et puissance

## Annexe D – Modèles des contrôleurs MPC

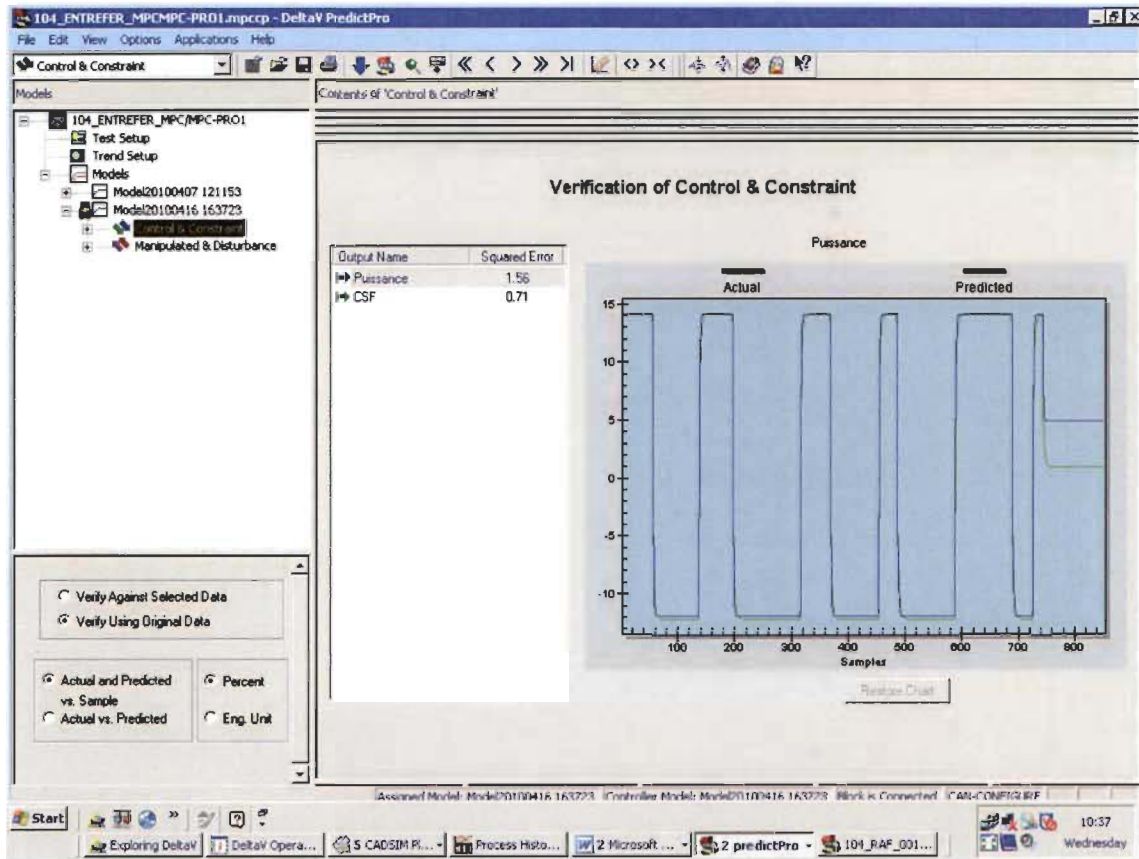


Figure D.1 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-ENTREFER-MPC (1 de 3)

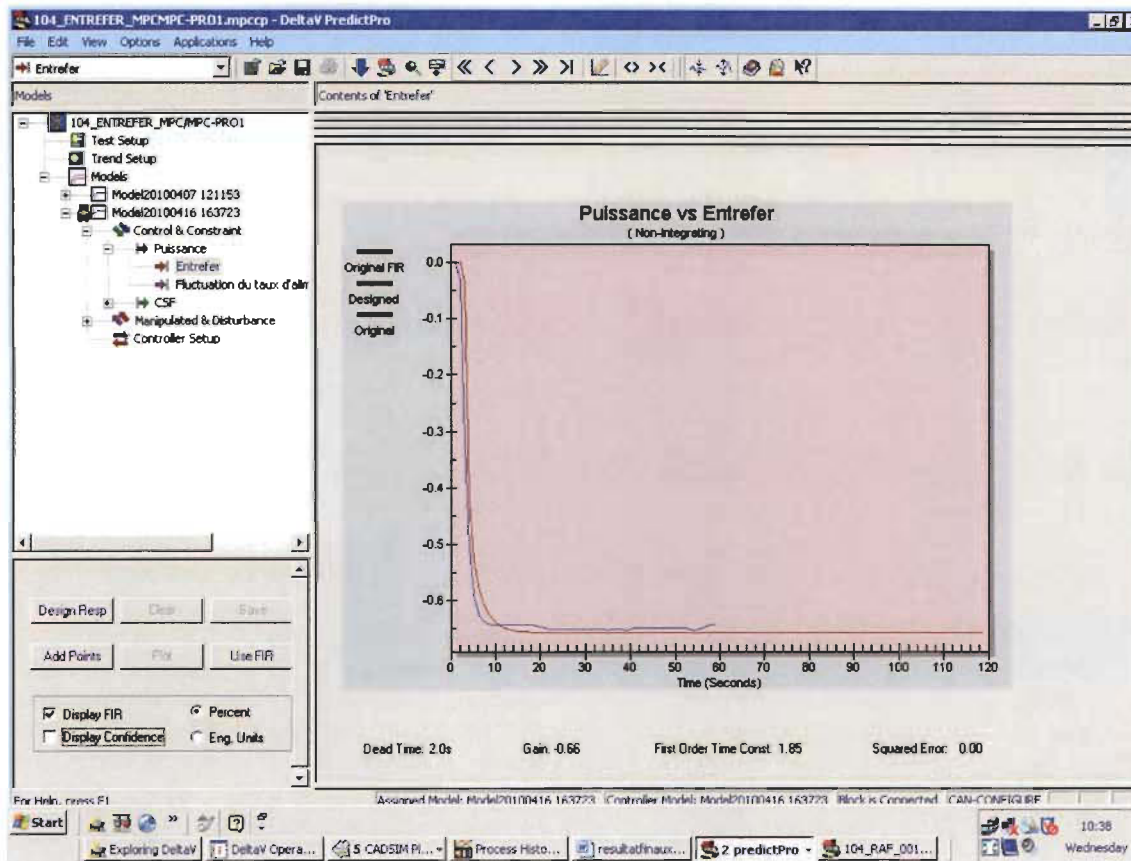


Figure D.2 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-ENTREFER-MPC (2 de 3)

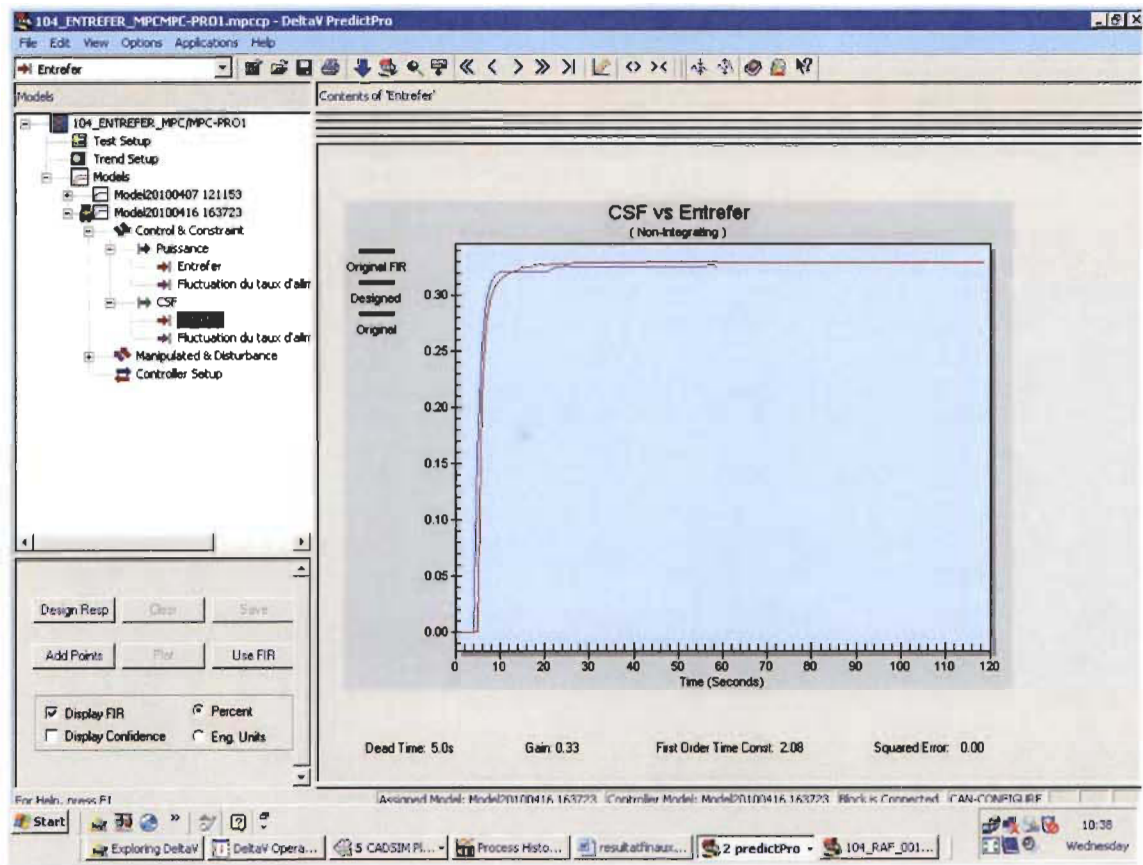


Figure D.3 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-ENTREFER-MPC (3 de 3)



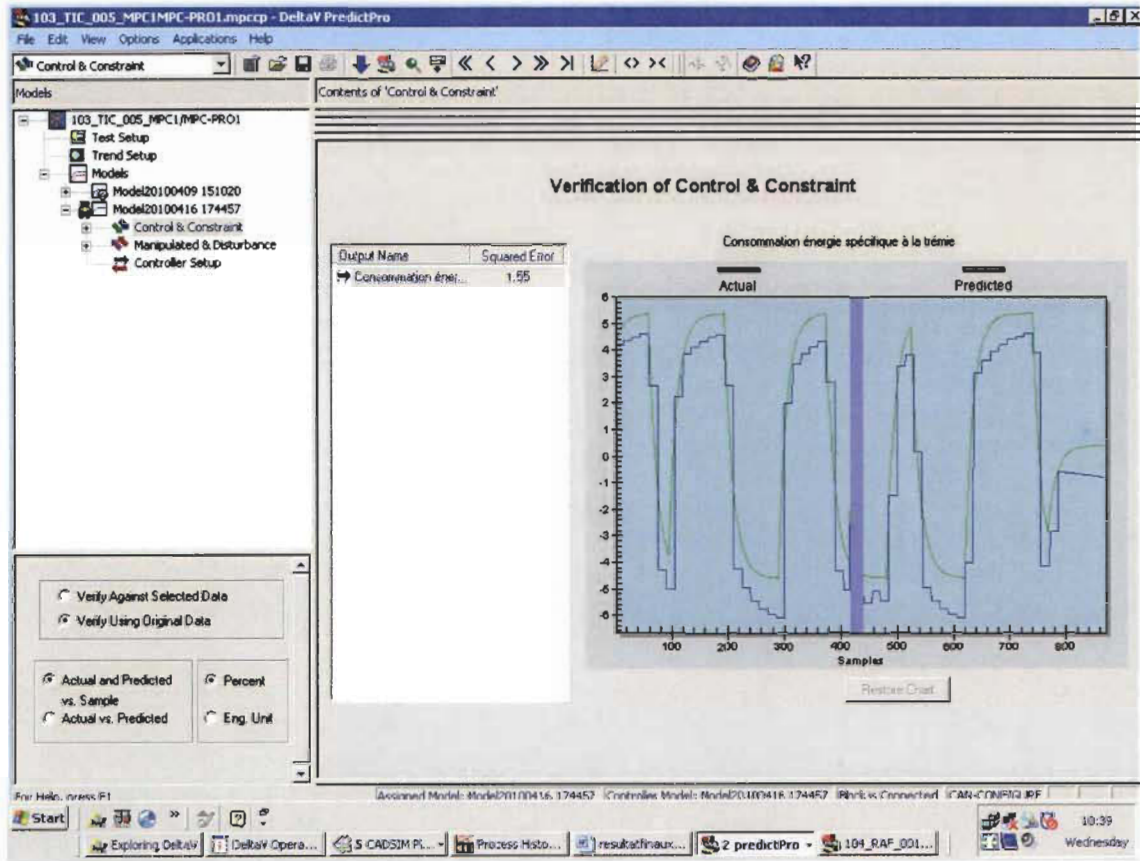


Figure D.4 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 103-TIC-005-MPC1 (1 de 2)

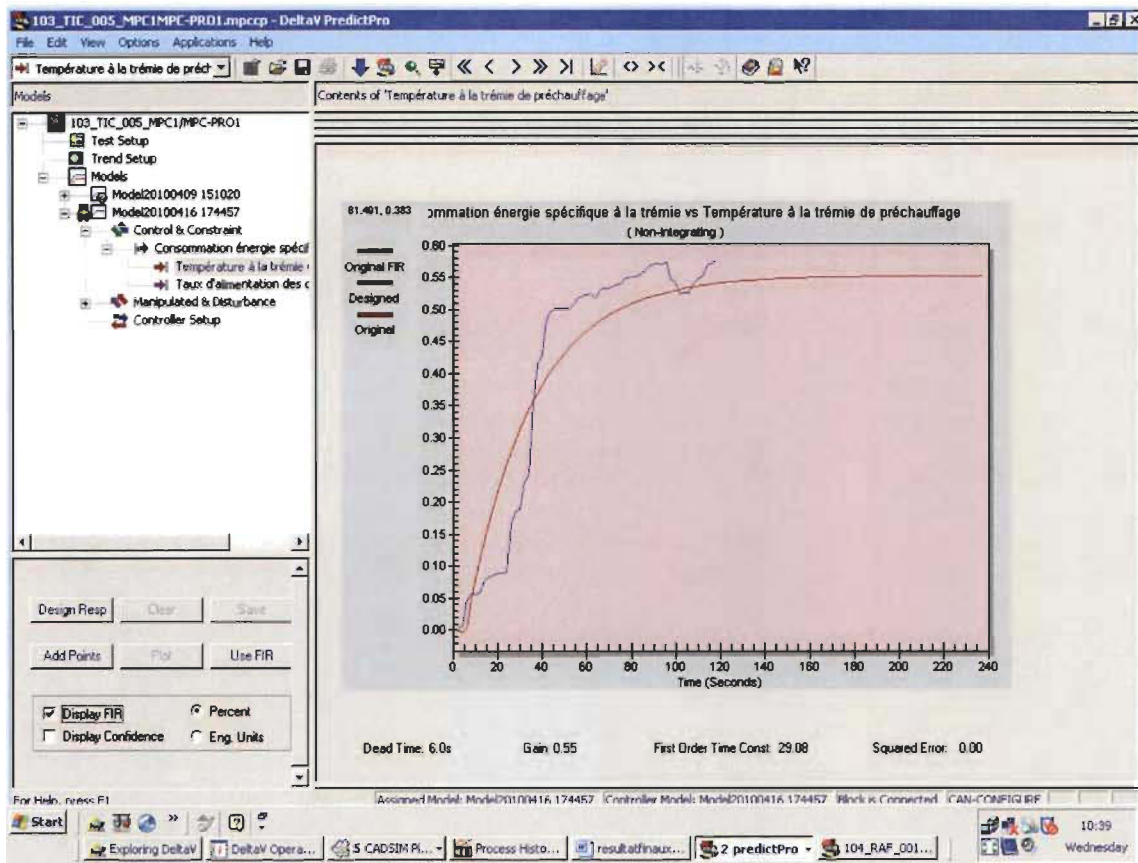


Figure D.5 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 103-TIC-005-MPC1 (2 de 2)

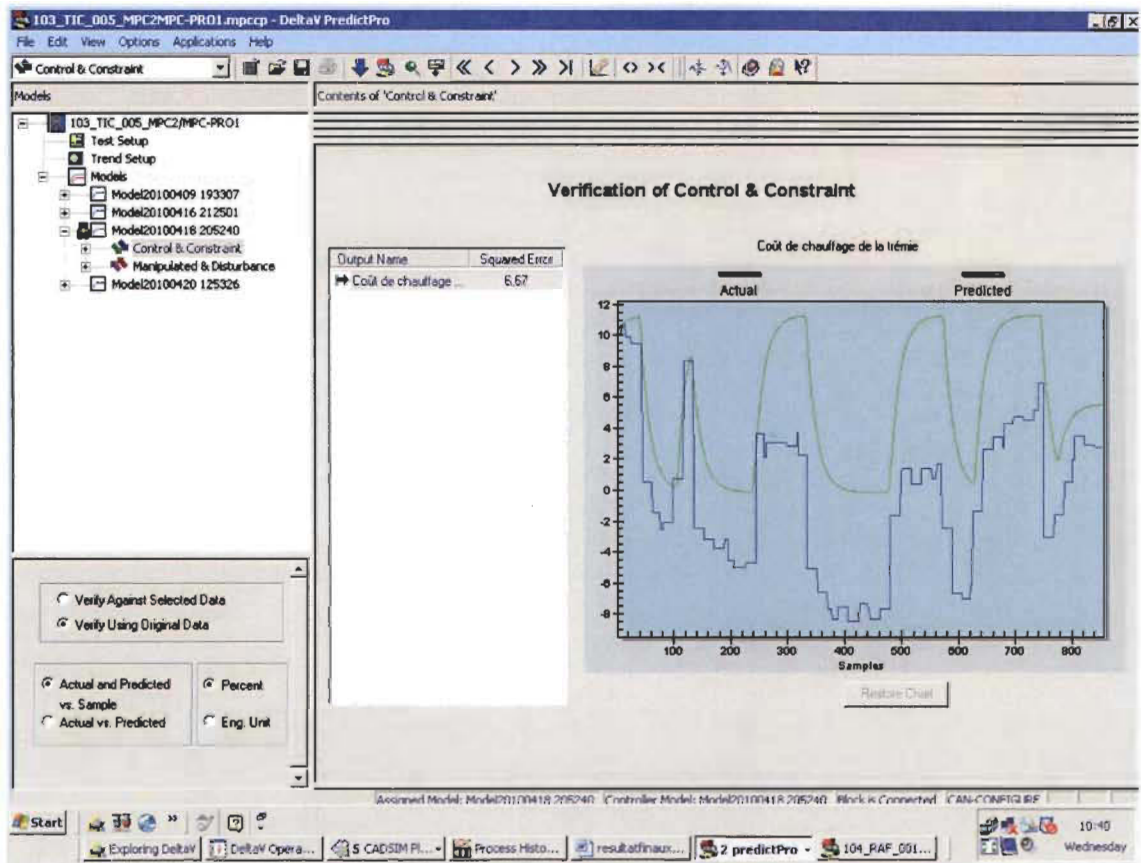


Figure D.6 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 103-TIC-005-MPC2 (1 de 2)

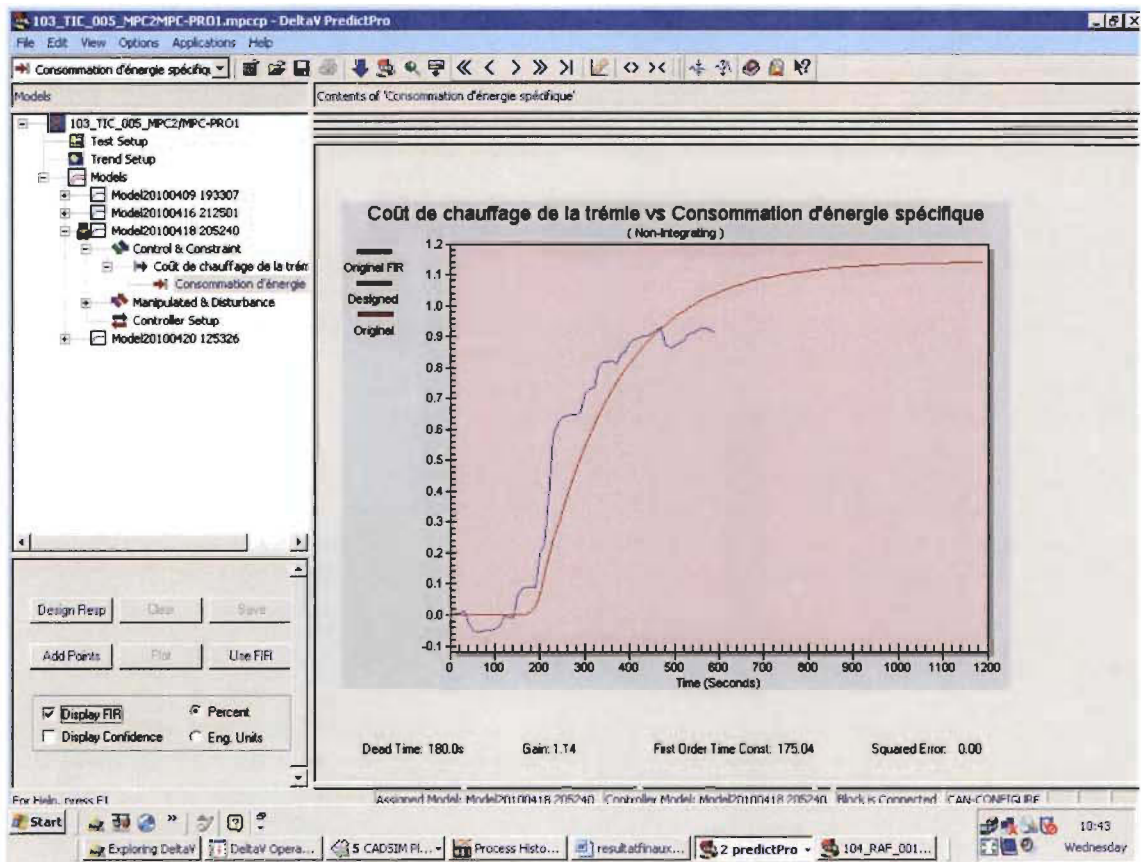


Figure D.7 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 103-TIC-005-MPC2 (2 de 2)

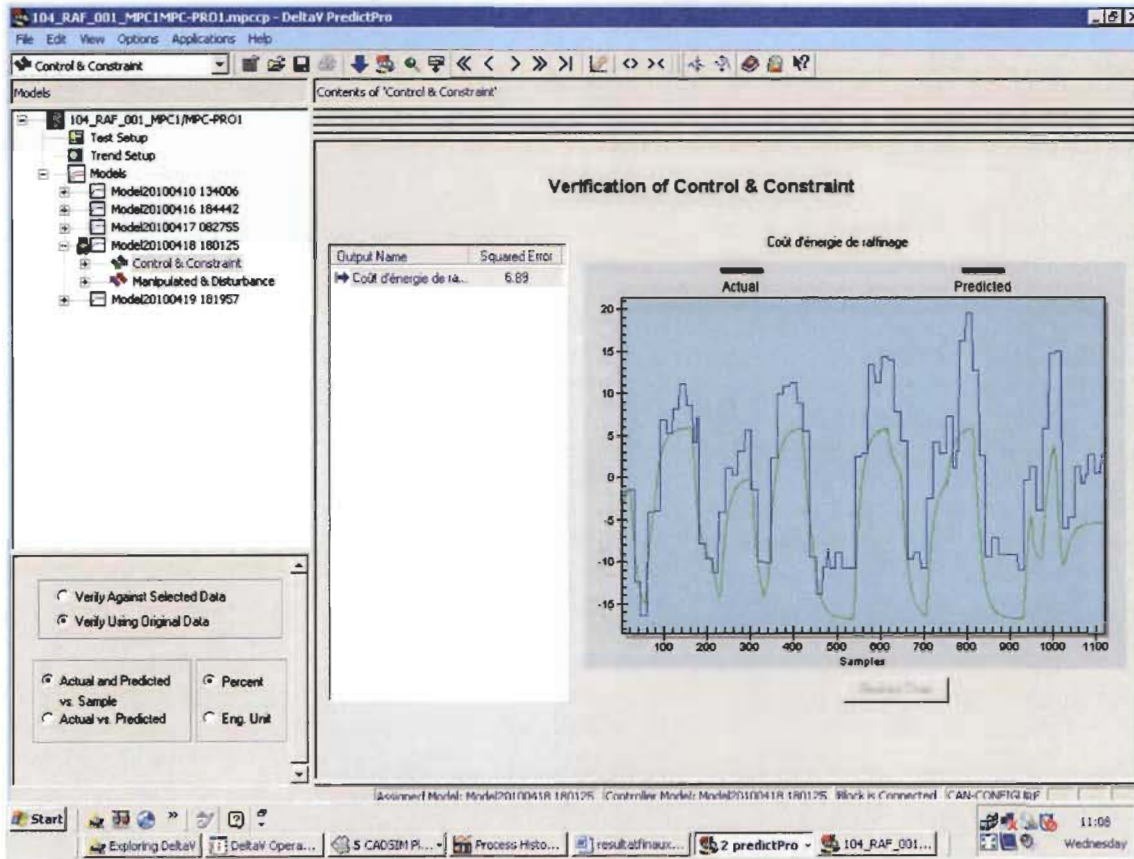


Figure D.8 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-RAF-001-MPC1 (1 de 3)



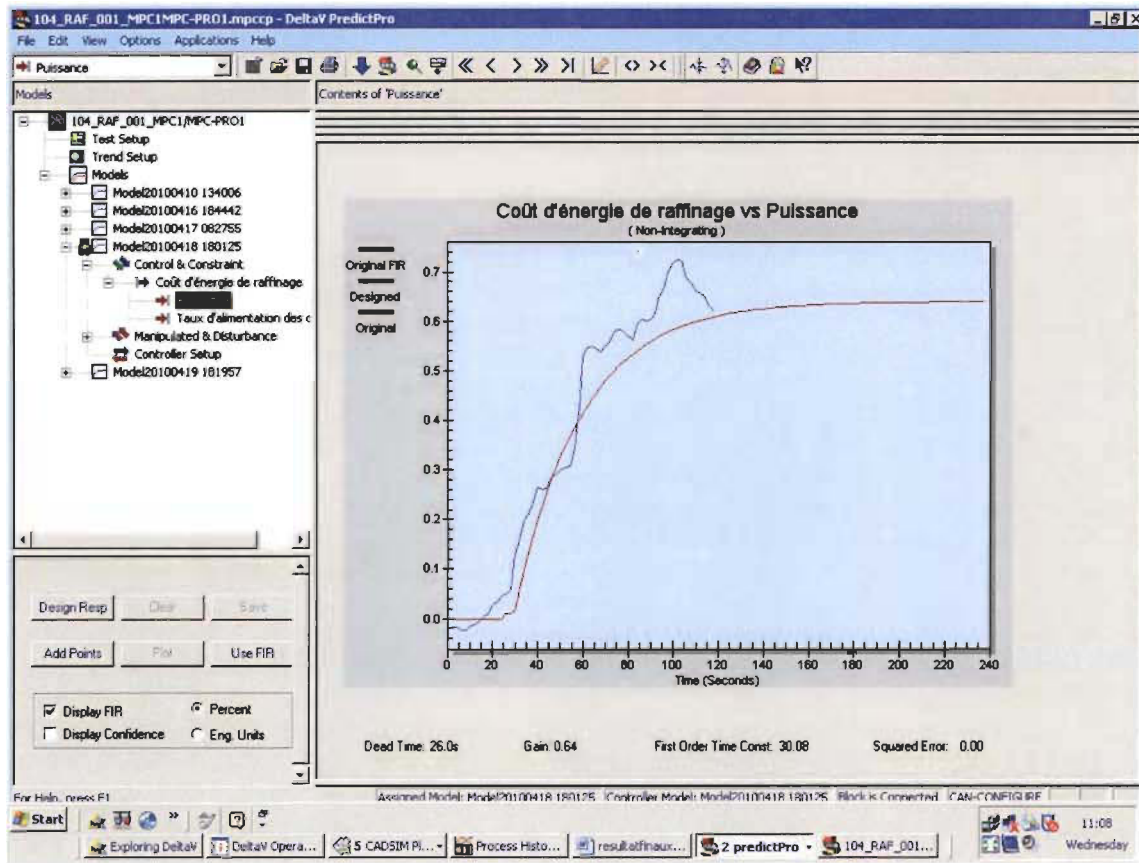


Figure D.9 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-RAF-001-MPC1 (2 de 3)



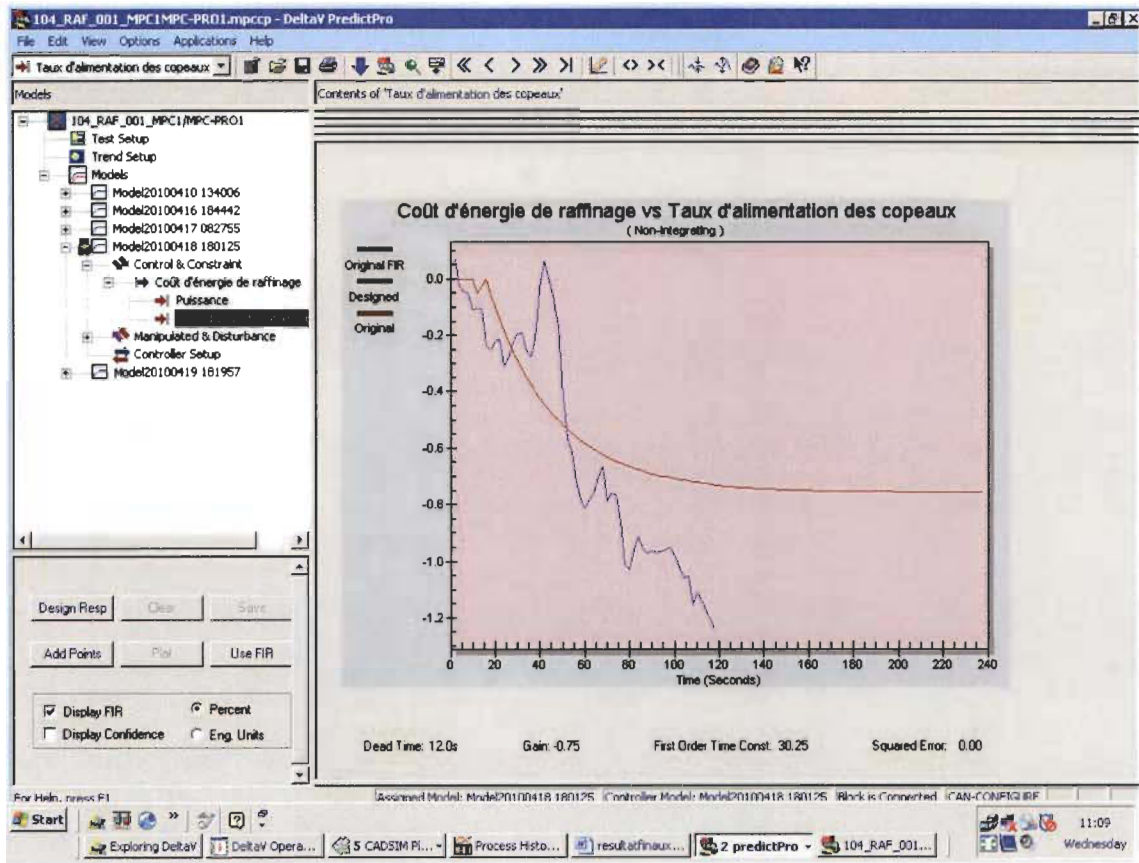


Figure D.10 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-RAF-001-MPC1 (3 de 3)

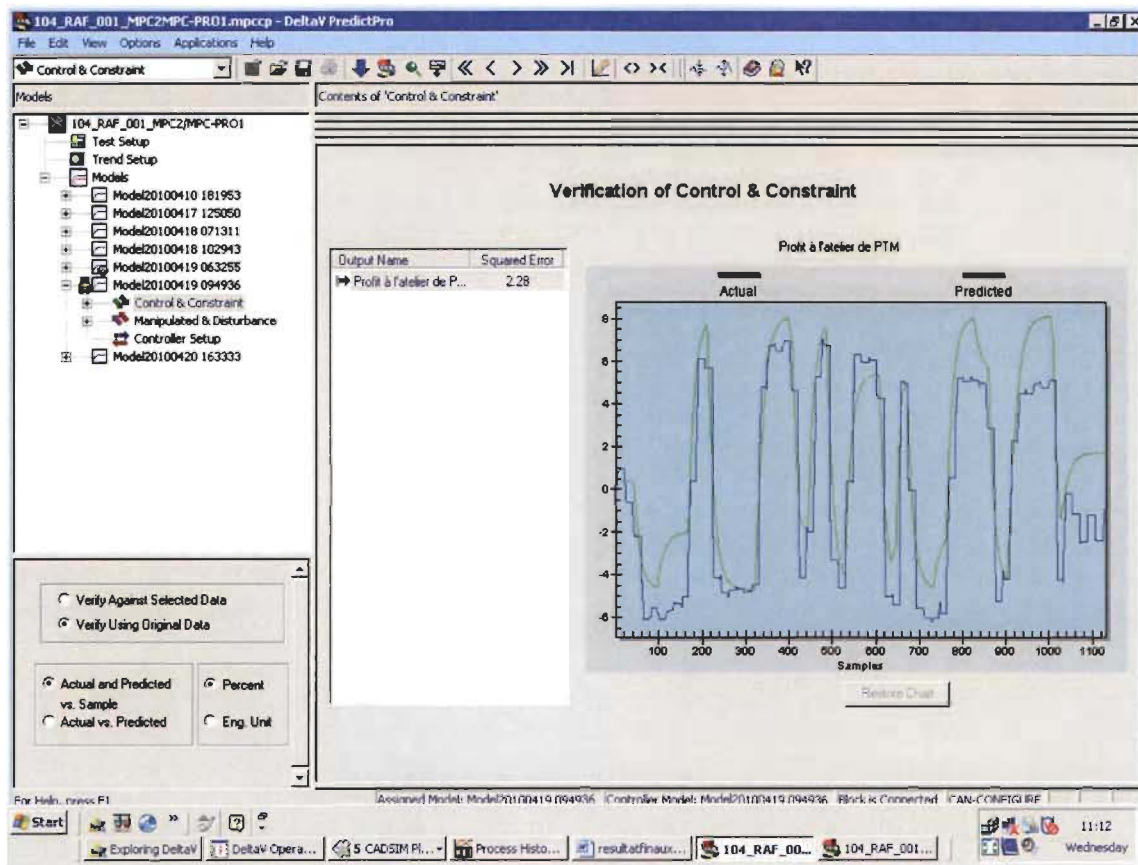


Figure D.11 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-RAF-001-MPC2 (1 de 3)

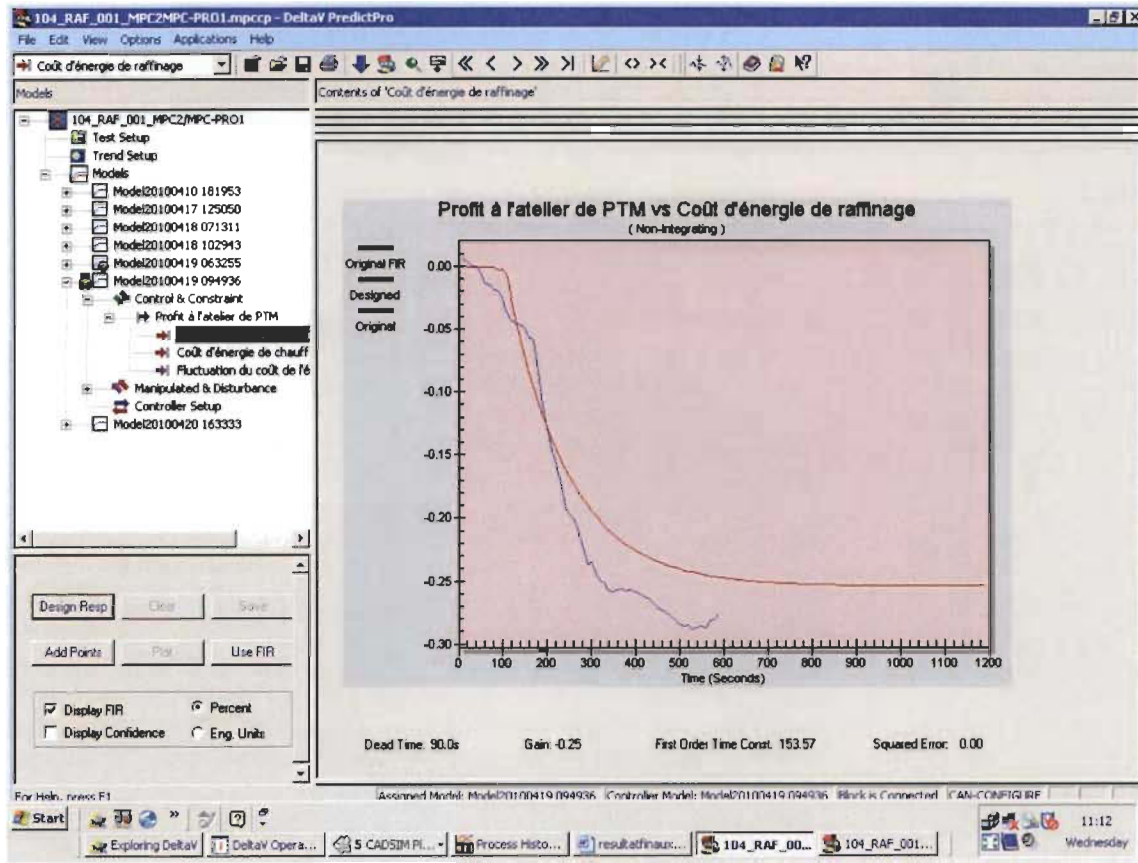


Figure D.12 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-RAF-001-MPC2 (2 de 3)

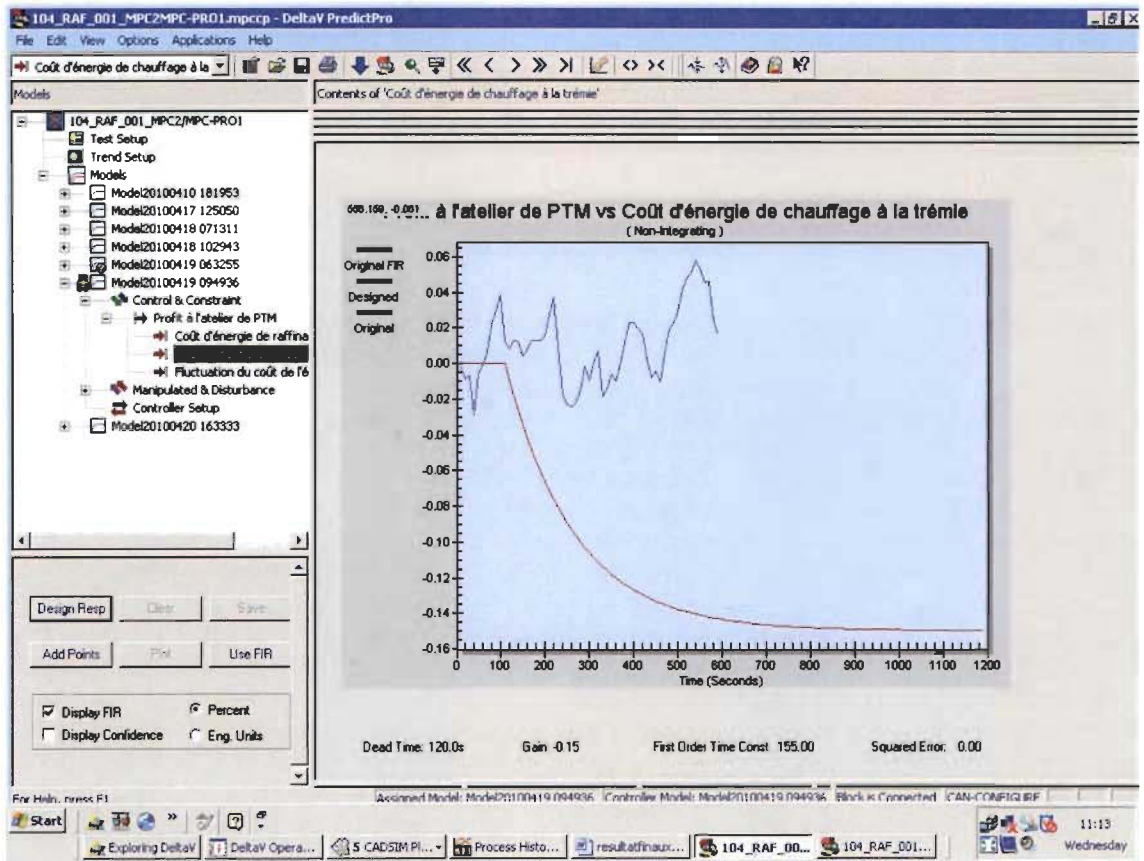


Figure D.13 Caractéristiques du modèle lié à la boucle 104-RAF-001-MPC2 (3 de 3)