



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIERIE ET DE  
L'INNOVATION

Équipe d'Accueil doctorale : Génie Électrique  
Thématique : Systèmes Électromécaniques et Systèmes Industriels

## THÈSE

En vue de l'obtention du titre de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO  
Domaine : Sciences de l'Ingénieur  
Spécialité : Génie Électrique

Par : Anthony RAMAROSON

## CONDUITE DES PROCÉDÉS DISCONTINUS SOUS CONTRAINTE D'ÉNERGIE

Soutenue le 22 Septembre 2015 devant la Commission d'examen composée de :

*Examinateurs :*

Philippe ANDRIANARY  
Adolphe RATIARISON  
Hery Zo ANDRIAMANOHSOA

Professeur Titulaire  
Professeur Titulaire  
Professeur

*Rapporteurs :*

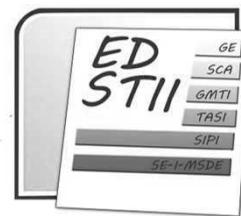
Eddy H. RASOLOMANANA  
Paul A. RANDRIAMITANTSOA

Professeur Titulaire  
Professeur Titulaire

*Directeur de thèse :*

Yvon D. ANDRIANAHAHARISON

Professeur Titulaire



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIERIE ET DE  
L'INNOVATION

Équipe d'Accueil doctorale : Génie Électrique  
Thématique : Systèmes Électromécaniques et Systèmes Industriels

**THÈSE**

En vue de l'obtention du titre de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO  
Domaine : Sciences de l'Ingénieur  
Spécialité : Génie Électrique

Par : Anthony RAMAROSON

**CONDUITE DES PROCÉDÉS DISCONTINUS SOUS  
CONTRAINTE D'ÉNERGIE**

Soutenue le 22 Septembre 2015 devant la Commission d'examen composée de :

*Examinateurs :*

Philippe ANDRIANARY  
Adolphe RATIARISON  
Hery Zo ANDRIAMANOHSOA

Professeur Titulaire  
Professeur Titulaire  
Professeur

*Rapporteurs :*

Eddy H. RASOLOMANANA  
Paul A. RANDRIAMITANTSOA

Professeur Titulaire  
Professeur Titulaire

*Directeur de thèse :*

Yvon D. ANDRIANAHAHARISON

Professeur Titulaire

À la mémoire de mon père, Clément.

*« En essayant continuellement on finit par réussir.  
Donc : plus ça rate, plus on a de chances que ça marche. »*

*Les Devises Shadok*

---

## REMERCIEMENTS

---

Je tiens ici à exprimer ma profonde reconnaissance aux personnes qui, par l'intérêt qu'ils m'ont porté, ou par les moyens qu'ils ont mis à ma disposition, ont rendu possible l'achèvement de ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier M. Paul Auguste Randriamitantsoa, directeur de l'école doctorale « Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation », pour m'avoir autorisé à réaliser cette thèse au sein de sa structure.

Je remercie particulièrement mon directeur de thèse, M. Yvon Andrianaharison, Professeur Titulaire à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo. Ses conseils, ses critiques et ses encouragements m'ont permis de mener cette thèse à son terme.

Je suis extrêmement reconnaissant à Messieurs Eddy Rasolomanana et Paul Auguste Randriamitantsoa, Professeurs Titulaires à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, pour avoir accepté d'étudier mes travaux et d'en être les rapporteurs.

J'exprime tous mes remerciements à Messieurs Hery Zo Andriamanohisoa, Professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, et Adolphe Ratiarison, Professeur Titulaire à la faculté des Sciences d'Antananarivo, pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail et pour leur participation au jury. Ma gratitude va également à Monsieur Philippe Andrianary, directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, pour l'honneur qu'il nous fait d'examiner ce travail et de présider cette commission de thèse malgré la lourde tâche qui lui incombe.

Je voudrais, par ailleurs, adresser mes remerciements à M. Gilles Hétreux, Professeur (Habilitation) au Laboratoire de Génie Chimique (LGC) de Toulouse, qui a suivi mes travaux pendant les quelques années que j'ai passé au LGC et qui m'a permis, grâce à ses précieux conseils et ses encouragements, de mener à bien cette thèse. Je ne saurais oublier de remercier M. Philippe Duquenne, Maître de Conférences à l'ENSIACET, pour m'avoir transmis sa vision de La Thèse et pour les pressions, bien fondées, dont j'ai eu droit lors de mes moments d'égarements. J'en profite ici pour remercier tous les collègues enseignants, chercheurs et doctorants du département « Procédés et Systèmes Industriels » du LGC, pour l'accueil chaleureux qu'ils ont fait preuve à mon égard.

Je n'oublie pas, toutes les personnes que j'ai côtoyées, qui ont éveillé mon goût pour les sciences et qui m'ont permis de concilier études et activités professionnelles.

Pour finir, mes remerciements vont à mes parents qui n'ont cessés de croire en moi, ma famille et mes amis pour les bons moments passés ensemble, mais aussi pour leur présence dans les moments difficiles. Cette expérience n'aurait pas été la même sans leur soutien.

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>1</b>
<b>1 CADRE DE L'ÉTUDE</b>	<b>4</b>
1.1 Les systèmes industriels considérés . . . . .	5
1.1.1 Modes de fonctionnement des procédés . . . . .	5
1.1.2 Étapes d'obtention d'un produit . . . . .	8
1.1.3 Notion de recette . . . . .	9
1.1.4 Cycle de vie d'un procédé discontinu . . . . .	10
1.1.5 Enjeux futurs : les procédés durables . . . . .	13
1.2 Contexte général de l'étude . . . . .	14
1.2.1 Contexte énergétique du secteur industriel . . . . .	14
1.2.2 Initiatives pour la maîtrise de l'énergie . . . . .	15
1.2.3 Intégration énergétique des procédés . . . . .	19
1.2.4 Pilotage des systèmes de production . . . . .	23
1.2.5 Simulation des procédés . . . . .	30
1.3 État de l'art et analyse bibliographique . . . . .	35
1.3.1 Intégration énergétique des procédés discontinus . . . . .	35
1.3.2 Ordonnancement des procédés discontinus . . . . .	37
1.3.3 Simulation des procédés discontinus . . . . .	43
1.4 Objectifs de la thèse . . . . .	45
<b>2 ORDONNANCEMENT DES PROCÉDÉS DISCONTINUS</b>	<b>47</b>
2.1 Modèle de programmation linéaire . . . . .	48
2.1.1 Introduction . . . . .	48
2.1.2 Les contraintes du modèle d'ordonnancement . . . . .	49
2.1.3 Contraintes résultant de l'analyse de la recette . . . . .	69
2.1.4 La fonction objectif . . . . .	72
2.1.5 Conduite du modèle d'ordonnancement . . . . .	72
2.2 Modèle hybride de PLVM / PPC . . . . .	73
2.2.1 Introduction . . . . .	73
2.2.2 Principe de décomposition . . . . .	74
2.2.3 Modélisation du problème-maître [MP] . . . . .	75
2.2.4 Modélisation du sous-problème [SP] . . . . .	78
2.2.5 Coupes de Benders . . . . .	80
2.2.6 Conduite du modèle hybride . . . . .	82

2.3 Conclusion . . . . .	82
<b>3 ORDONNANCEMENT ET INTÉGRATION ÉNERGÉTIQUE</b>	<b>83</b>
3.1 Notions de base . . . . .	84
3.2 Intégration énergétique directe . . . . .	86
3.2.1 Modélisation des tâches au niveau l'atelier de production . . . . .	86
3.2.2 Modélisation des tâches au niveau du réseau d'échangeur . . . . .	92
3.2.3 Modélisation des tâches au niveau de la centrale d'utilité . . . . .	94
3.3 Intégration énergétique indirecte . . . . .	99
3.4 Modélisation des opérations multi-modales . . . . .	102
3.4.1 Modélisation des opérations de nettoyage . . . . .	102
3.4.2 Modélisation des tâches de démarrage et d'arrêt . . . . .	103
3.4.3 Modélisation des phases de maintien en conditions . . . . .	104
3.5 Exemples d'applications . . . . .	104
3.5.1 Intégration énergétique directe (Exemple 1) . . . . .	105
3.5.2 Intégration énergétique indirecte (Exemple 2) . . . . .	112
3.5.3 Prise en compte des opérations multi-modales (Exemples 3 à 5) . . . . .	118
3.6 Conclusion . . . . .	122
<b>4 SIMULATION ORIENTÉ ORDONNANCEMENT D'UN PROCÉDÉ DISCONTINU</b>	<b>123</b>
4.1 Le procédé étudié . . . . .	124
4.2 Modélisation du procédé . . . . .	125
4.2.1 Modélisation du réacteur discontinu . . . . .	126
4.2.2 Modélisation des cuves de stockage . . . . .	132
4.2.3 Modélisation de l'échangeur de chaleur . . . . .	134
4.2.4 Modélisation du système de stockage thermique . . . . .	137
4.2.5 Modélisation de la chaudière à vapeur . . . . .	142
4.2.6 Modélisation de l'ensemble turbine-alternateur . . . . .	143
4.3 Modélisation de la supervision du procédé . . . . .	146
4.4 Couplage optimisation-simulation : Études de cas . . . . .	149
4.4.1 Cas d'application I : Cogénération . . . . .	150
4.4.2 Cas d'application II : Récupération directe d'énergie . . . . .	161
4.4.3 Cas d'application III : Récupération indirecte d'énergie . . . . .	169
4.5 Conclusion . . . . .	173
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>178</b>
<b>Glossaire</b>	<b>182</b>
<b>Annexe A - Liste des publications</b>	<b>183</b>
<b>Annexe B - Caractéristiques des exemples</b>	<b>210</b>
<b>Annexe C - Sémantique du formalisme ERTN</b>	<b>215</b>
<b>Annexe D - Simulateur de procédé</b>	<b>216</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>232</b>

---

## TABLE DES FIGURES

---

1.1 Fonctionnement en mode continu . . . . .	5
1.2 Fonctionnement en mode discontinu . . . . .	6
1.3 Étapes d'obtention d'un produit . . . . .	9
1.4 Hiérarchie des recettes d'un procédé discontinu . . . . .	10
1.5 Cycle de vie d'un procédé . . . . .	12
1.6 Piliers du développement durable . . . . .	13
1.7 Répartition de la consommation énergétique en 2005 . . . . .	15
1.8 Prévision de la consommation énergétique mondiale en 2035 . . . . .	16
1.9 Prévision de croissance de la consommation énergétique à Madagascar [151] . . . . .	17
1.10 Effet de la cogénération sur le rendement énergétique . . . . .	19
1.11 Procédé chimique . . . . .	21
1.12 Identification de l'énergie récupérable . . . . .	22
1.13 Hiérarchisation des niveaux de planification . . . . .	25
1.14 Classification des ressources . . . . .	27
1.15 Parcours de l'espace des solutions . . . . .	28
1.16 Classification des méthodes d'optimisation monobjectifs . . . . .	29
1.17 Apport de l'ordonnancement sur la récupération d'énergie . . . . .	31
1.18 Méthodologie de couplage optimisation/simulation . . . . .	35
1.19 Caractéristiques d'un problème d'ordonnancement des procédés discontinus . . . . .	39
2.1 Répartition des événements sur les appareils . . . . .	48
2.2 Illustration des contraintes d'allocation . . . . .	50
2.3 Représentation des consommations/productions de matière . . . . .	53
2.4 Représentation des consommations/productions d'utilités (ou d'énergie) . . . . .	56
2.5 Représentation des consommations/productions de jeton . . . . .	57
2.6 Séquences de tâches différentes sur des appareils différents . . . . .	59
2.7 Apport des tâches fictives de stockage . . . . .	61
2.8 Profil de consommation/production d'utilité . . . . .	63
2.9 Composantes de la durée d'une tâche . . . . .	65
2.10 Exemple type de configuration . . . . .	69
2.11 Illustration des coupes de Benders . . . . .	81
3.1 Mode d'intégration énergétique . . . . .	84
3.2 Décomposition fonctionnelle de l'unité de production . . . . .	85
3.3 Modélisation ERTN d'un appareil consommateur d'énergie . . . . .	86

3.4 Variation de la puissance en fonction de la durée d'une opération . . . . .	87
3.5 Variation de la puissance en fonction de la taille de lot . . . . .	89
3.6 Décomposition d'une tâche sur la base de la taille de lot . . . . .	90
3.7 Variation de la puissance en fonction de la durée d'une opération . . . . .	91
3.8 Schéma d'un échange thermique avec échangeur externe . . . . .	93
3.9 Représentation ERTN d'un échange d'énergie . . . . .	94
3.10 Performance d'une chaudière en fonction de sa charge . . . . .	95
3.11 Consommation en carburant en fonction de la charge d'une chaudière . . . . .	96
3.12 Représentation ERTN d'une chaudière à vapeur . . . . .	98
3.13 Modélisation ERTN d'une turbine à vapeur . . . . .	99
3.14 Schéma du dispositif de stockage thermique . . . . .	100
3.15 Représentation ERTN d'un échange thermique indirect . . . . .	101
3.16 Modélisation ERTN d'un nettoyage . . . . .	102
3.17 Modélisation ERTN du démarrage et de l'arrêt d'une chaudière . . . . .	103
3.18 Modélisation ERTN d'une chaudière avec prise en compte du mode bouillotte . .	104
3.19 Modélisation ERTN de l'Exemple 1 . . . . .	106
3.20 Modélisation ERTN de l'Exemple 2 . . . . .	114
3.21 Représentation ERTN du stockage d'énergie de l'Exemple 2 . . . . .	115
3.22 Profil d'utilisation des ressources de l'exemple 2 . . . . .	117
3.23 Représentation ERTN des exemples 3 à 5 . . . . .	120
4.1 Topologie de l'atelier de production de PVC (partie discontinue) . . . . .	124
4.2 Topologie de la centrale de cogénération . . . . .	125
4.3 Représentation Statechart des phases du réacteur . . . . .	129
4.4 Diagramme Stateflow-Simulink d'un réacteur . . . . .	131
4.5 Représentation Stateflow d'une cuve de matière première . . . . .	133
4.6 Diagramme Stateflow-Simulink d'une cuve de stockage . . . . .	134
4.7 Dynamique discrète de l'échangeur de chaleur . . . . .	136
4.8 Diagramme Stateflow-Simulink d'un échangeur de chaleur . . . . .	137
4.9 Schéma de réalisation d'un échange indirect de chaleur . . . . .	138
4.10 Dynamique discrète du stockage thermique . . . . .	140
4.11 Dynamique discrète du stockage thermique (suite) . . . . .	141
4.12 Diagramme fonctionnel d'une turbine à vapeur . . . . .	142
4.13 Diagramme Simulink du turboalternateur . . . . .	145
4.14 Couches de contrôle d'un système de production . . . . .	146
4.15 Structure statique de la supervision des réacteurs . . . . .	148
4.16 Séquence de la simulation d'un lot de fabrication . . . . .	148
4.17 Supervision d'un réacteur discontinu . . . . .	149
4.18 Représentation ERTN de la recette du Cas d'Application I . . . . .	151
4.19 Estimation des paramètres du Cas d'Application I . . . . .	154
4.20 Diagrammes de Gantt du Cas d'Application I . . . . .	156
4.21 Profils des utilités du Cas d'Application I . . . . .	157
4.22 Résultats de la simulation de l'atelier du Cas d'Application I . . . . .	159
4.23 Résultats de la simulation de la centrale du Cas d'Application I . . . . .	160
4.24 Représentation ERTN de la recette du Cas d'Application II . . . . .	163
4.25 Besoin en puissance des phases des réacteurs . . . . .	164
4.26 Résultats de l'ordonnancement du Cas d'Application II . . . . .	165
4.27 Résultats initiaux de la simulation du Cas d'Application II . . . . .	167
4.28 Résultat final de la simulation du Cas d'Application II . . . . .	168
4.29 Représentation ERTN de la recette du Cas d'Application III . . . . .	170
4.30 Paramètres de durée et de puissance du Cas d'Application III . . . . .	171

4.31 Résultats de l'optimisation du Cas d'Application III . . . . .	172
4.32 Résultats de la simulation de l'atelier du cas d'application III . . . . .	174
4.33 Résultats de la simulation de la centrale du cas d'application III . . . . .	175
4.34 Résultats de la simulation des cuves de stockage thermique . . . . .	176
B.1 Résultats de l'ordonnancement de l'exemple 1 . . . . .	212
B.2 Résultats de l'ordonnancement de l'exemple 2 . . . . .	213
B.3 Résultats de l'ordonnancement des exemples 3 à 5 . . . . .	214
C.1 Formalisme Extended Resource Task Network . . . . .	215
D.1 Structure du simulateur de l'atelier . . . . .	216
D.2 Interfaces de saisie des résultats de l'optimisation . . . . .	217
D.3 Représentation Statechart du superviseur . . . . .	218
D.4 Simulateur de la centrale de cogénération . . . . .	219
D.5 Configuration de montage des réacteurs discontinus . . . . .	221
D.6 Modélisation Simulink d'un réacteur continu . . . . .	222
D.7 Modélisation Simulink du bilan énergétique du réacteur . . . . .	223
D.8 Modélisation Simulink de l'échangeur de chaleur . . . . .	225
D.9 Modélisation Simulink du stockage thermique . . . . .	226
D.10 Modélisation Simulink de la chaudière à vapeur . . . . .	229
D.11 Modélisation Simulink du groupe turbine-alternateur . . . . .	230

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

3.1 Résultats du modèle de PLVM . . . . .	109
3.2 Résultats du modèle hybride (NC=05) . . . . .	109
3.3 Résultats de l'analyse TSM sur l'Exemple 1 (approche PLVM) . . . . .	109
3.4 Résultats de l'analyse TSM sur l'Exemple 1 (approche hybride) . . . . .	111
3.5 Comparaison des résultats des analyses TSM . . . . .	112
3.6 Résultats de l'optimisation avec stockage idéal . . . . .	116
3.7 Résultats de l'optimisation avec stockage non-idéal . . . . .	118
3.8 Résultats de l'optimisation de l'Exemple 3 . . . . .	121
4.1 Caractéristiques des tâches du Cas d'Application I . . . . .	152
4.2 Résultats de l'ordonnancement du Cas d'Application I . . . . .	155
4.3 Résultats de l'ordonnancement du Cas d'Application II . . . . .	164
4.4 Résultats de l'ordonnancement du Cas d'Application III . . . . .	169
B.1 Caractéristiques des tâches de l'exemple 1 . . . . .	210
B.2 Caractéristiques des états de l'exemple 1 . . . . .	210
B.3 Coefficients de coût de la fonction objectif de l'exemple 1 . . . . .	211
B.4 Caractéristiques des tâches de l'exemple 2 . . . . .	211
B.5 Caractéristiques des états de l'exemple 2 . . . . .	211
B.6 Coefficients de coût de la fonction objectif de l'exemple 2 . . . . .	211
D.1 Caractéristiques des utilités de la centrale de cogénération . . . . .	220
D.2 Caractéristiques du réacteur, de la réaction et du produit . . . . .	220
D.3 Caractéristiques de l'échangeur de chaleur . . . . .	224
D.4 Caractéristiques du dispositif de stockage thermique . . . . .	227
D.5 Caractéristiques de la chaudière à vapeur . . . . .	227
D.6 Caractéristiques de la turbine et de l'alternateur . . . . .	231

---

## LISTE DES ALGORITHMES

---

1	Principe de résolution du modèle de PLVM . . . . .	76
2	Principe de résolution du modèle hybride . . . . .	76
3	Conduite du modèle hybride . . . . .	76

---

## NOMENCLATURE

---

### Indices

$i$	indice des tâches
$j$	indice des appareils
$s$	indice des états ou des états ressource
$n$	indice de l'événement courant

### Constantes

$NE$	nombre de points d'événements
$H$	horizon d'ordonnancement
$NSr$	nombre de ressources multimodales
$NS$	nombre d'états
$NI$	nombre de tâches
$NJ$	nombre d'appareils

### Ensembles

$N$	points d'événements $\{1..NE\}$
$J$	ensemble des appareils $\{1..NJ\}$
$J_i$	ensemble des appareils traitant $i$
• Tâches associées à [P] ou [MP]	
$I$	ensemble des tâches $\{1..NI\}$
$I_j$	tâches associées à l'appareil $j$
$I^c$	tâches continues et utilités
$I^b$	tâches discontinues
$I^p$	tâches continues
$I^u$	tâches utilités
$I^{st}$	tâches de stockage
$I_{ps}$	tâches produisant l'état $s$
$I_{cs}$	tâches consommant l'état $s$
$I_{ps}^b$	tâches batch produisant l'état $s$
$I_{ps}^p$	tâches continues produisant l'état $s$
$I_{ps}^u$	tâches utilités produisant l'état $s$
$I_{ps}^{st}$	tâches de stockage produisant l'état $s$
$I_{cs}^b$	tâches batch consommant l'état $s$
$I_{cs}^p$	tâches continues consommant l'état $s$
$I_{cs}^u$	tâches utilités consommant l'état $s$
$I_{cs}^{st}$	tâches de stockage consommant l'état $s$

- Tâches associées à [SP]

$T$	ensemble des tâches
$CT$	tâches continues
$BT$	tâches batch
$UT$	tâches utilités
$TC[s]$	tâches consommant l'état $s$
$BTC[s]$	tâches batch consommant l'état $s$
$CTC[s]$	tâches continues consommant l'état $s$
$TP[s]$	tâches produisant l'état $s$
$BTP[s]$	tâches batch produisant l'état $s$
$CTP[s]$	tâches continues produisant l'état $s$

- États associés à [P] ou [MP]

$S$	ensemble des états $\{1..NS\}$
$S^m$	états matière
$S^u$	états utilité
$S^r$	états ressources
$S^{st}$	états associés aux tâches de stockage
$S^{rm}$	états de matières premières
$S^{int}$	états de produits intermédiaires
$S^{fp}$	états de produits finis
$S^{zw}$	états en transfert direct
$S^{fis}$	états avec stockage à capacité finie
$S^{nis}$	états sans stockage intermédiaire
$S^{uis}$	états avec stockage à capacité infinie

- États associés à [SP]

$SM$	états de l'atelier de production
$SH$	états du réseau d'échangeurs
$SC$	états de la centrale
$SR$	états ressources
$SNIS$	états sans stockage intermédiaire
$SZW$	états en transfert direct
$SRNIS$	état-ressource sans stockage

### Paramètres

- Associés aux tâches

$b_{min}^i$	taille de lot minimum de $i$	$w_{in}$	état de $i$ à $n$		
$b_{max}^i$	taille de lot maximum de $i$	$ws_{in}$	lancement de $i$ à $n$		
$p_{fi}$	durée fixe de $i$	$wf_{in}$	terminaison de $i$ à $n$		
$pv_i$	durée variable de $i$	$b_{in}$	batch de $i$ pendant son exécution à $n$		
$pu_i$	durée libre de $i$	$bs_{in}$	batch de $i$ lors de son lancement à $n$		
$r_{fi}$	débit massique de $i$	$bf_{in}$	batch de $i$ lors de sa terminaison à $n$		
$r_{min}^i$	débit minimum de $i$	$pt_{in}$	durée de $i$ à $n$		
$r_{max}^i$	débit maximum de $i$	$st_{in}$	date de lancement de $i$ à $n$		
$d_{max}^i$	variation maximale de la durée de $i$	$ft_{in}$	date de terminaison de $i$ à $n$		
$d_{in}$			durée de $i$ à $n$		
• Associés aux états					
$s_0^s$	stock initial de $s$	$s_{sn}$	quantité stockée dans $s$ à $n$		
$C_s$	capacité de $s$	$sf_s$	quantité stockée dans $s$ à $N + 1$		
$D_s$	demande de $s$	$sr_{fs}$	quantité stockée dans $s$ à $N + 1$		
$Cr_s$	capacité de $s$	$stu_{sn}$	date de début de la tâche fictive $s$ à $n$		
$import_{max}^s$	importation maximale de $s$	$ftu_{sn}$	date de fin de la tâche fictive $s$ à $n$		
$export_{max}^s$	exportation maximale de $s$	$sts_{sn}$	date de début du stockage $s$ à $n$		
$sr0_s$	stock initial de $s$	$fts_{sn}$	date de fin du stockage $s$ à $n$		
• Associés aux couples tâches-états					
$roo_{is}$	production de $i$ vers $s$	$bst_{sn}$	batch du stockage $s$ à $n$		
$roi_{is}$	consommation de $i$ dans $s$	$sr_{sn}$	stock dans $s$ à $n$		
$ufo_{is}$	production fixe d'utilité de $i$ dans $s$	$str_{s,n}$	date de début de l'état ressource $s$ à $n$		
$ufi_{is}$	consommation fixe d'utilité de $i$ dans $s$	$ftr_{s,n}$	date de fin de l'état ressource $s$ à $n$		
$uwo_{is}$	production variable d'utilité de $i$ vers $s$	$import_{sn}$	importation de ressource dans $s$ à $n$		
$uvi_{is}$	consommation variable d'utilité de $i$ dans $s$	$export_{sn}$	exportation de ressource depuis $s$ à $n$		
$uwo_{is}$	production libre d'utilité de $i$ vers $s$	• Associées aux appareils			
$uwi_{is}$	consommation libre d'utilité de $i$ dans $s$	$tts_{jn}$	date de début d'utilisation de $j$ à $n$		
$roro_{i,s}$	production de jeton de $i$ vers $s$	$tts_{jn}$	date de fin d'utilisation de $j$ à $n$		
$rori_{i,s}$	consommation de jeton de $i$ dans $s$	• Associées aux couples tâches-états			
• Associées aux tâches					
$i_{sin}$	consommation de la tâche $i$ dans $s$ à $n$	$i_{sin}$	consommation de la tâche $i$ dans $s$ à $n$		
$o_{sin}$	production de la tâche $i$ vers $s$ à $n$	$o_{sin}$	production de la tâche $i$ vers $s$ à $n$		
$ui_{sin}$	consommation d'utilité de la tâche $i$ dans $s$ à $n$	$ui_{sin}$	consommation d'utilité de la tâche $i$ dans $s$ à $n$		
$uo_{sin}$	production d'utilité de la tâche $i$ vers $s$ à $n$	$uo_{sin}$	production d'utilité de la tâche $i$ vers $s$ à $n$		
• Associée au problème					
$plan$	durée du makespan				

## Variables

Toutes les variables ci-dessous sont indexées du point d'événement  $n$ . Elles trouvent leurs définitions dans  $\mathbb{R}^+$  exceptés  $ws_{in}$  et  $wf_{in}$  qui sont définis dans  $\{0,1\}$  pour [P] et  $w_{in}$  pour [MP].

- Associées aux tâches

---

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

À une époque où les termes globalisation, développement durable et préoccupations énergétiques prennent tout leur sens, le secteur des procédés et plus particulièrement, celui des procédés discontinus n'est pas épargné. Ces derniers concernent spécifiquement les industries pharmaceutiques, agroalimentaires, biotechnologiques ou électroniques et participent pleinement à la satisfaction des besoins sociaux de notre ère. Le mode de production discontinu, sur lequel repose ces procédés, est particulièrement bien adapté pour les produits à faible demande et à forte valeur ajoutée où une rotation importante du nombre de nouveaux produits existe. Évoluant au sein d'un marché fortement concurrentiel, externalisé et assujetti à des comportements tendant vers des besoins croissants de la société de consommation, de nouvelles stratégies industrielles tant au niveau de la conception que de l'exploitation doivent être adoptées au sein de ces industries. Ces stratégies ont pour vocation d'améliorer la productivité de l'entreprise en corrigeant les sources d'inefficacités identifiées, tout en permettant de répondre efficacement aux sollicitations diverses que l'entreprise est tenue de respecter. Parmi ces sollicitations, on peut citer la réactivité de l'entreprise face aux contraintes du marché (variations de la demande, normes qualités, délais etc.), face au respect des normes liées aux préoccupations environnementales mais encore et surtout celles relatives à l'énergie qui représentent un poste de coûts non négligeable.

Toutes ces problématiques ont conduit les industriels à développer de nouveaux outils permettant une meilleure gestion de leurs activités. Parmi ces outils, nous nous intéressons dans ces travaux à ceux permettant de rationaliser l'utilisation de l'énergie lors de l'exécution d'une campagne de production. Cette démarche peut être mise en place à différentes échelles de temps, par exemple, sur le long terme des approches basées sur l'exploitation des énergies renouvelables ou l'utilisation de nouvelles technologies éco-énergétiques peuvent être adoptées. Cependant, il faut admettre que ces technologies manquent encore de maturité et que les carburants fossiles resteront les sources principales d'énergie pour les décennies à venir. De ce fait, l'approche que nous proposons s'effectue sans rupture technologique et adopte une vision à court et à moyen terme. Autrement dit, l'approche retenue se propose d'exploiter les technologies existantes et s'oriente vers l'adoption de bonnes pratiques lors de la conduite des procédés discontinus en vue de gérer l'utilisation de l'énergie. La démarche retenue se veut alors générique et non spécifique à un secteur d'activité, pour ce faire, elle s'appuie sur des modèles généraux de gestion de production et prend en compte les spécificités de la ressource énergétique.

La première partie de nos travaux concerne donc le pilotage de la production, notamment à travers l'établissement d'ordonnancements permettant d'améliorer globalement le rendement énergétique du site. En effet, des études récentes [3, 4] ont permis d'observer qu'une diminution de la consommation énergétique d'un procédé discontinu pouvait être enregistrée si une gestion couplée de la fabrication et de la production de l'énergie était mise en place. De plus l'adoption de l'intégration énergétique [85], qui peut être entendue comme le recyclage de l'énergie, et

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

l'exploitation des centrales de cogénération font partie des bonnes pratiques pour la rationalisation de l'énergie au sein du secteur des procédés. Nous adopterons donc une approche couplant ordonnancement et intégration énergétique pour maîtriser la consommation énergétique des procédés discontinus.

L'ordonnancement est une des fonctions de l'organisation et de la gestion de production, il a été adopté avec succès sur des projets ambitieux, publics et privés, et a permis d'appréhender efficacement la complexité de ces projets. Ainsi les problèmes d'ordonnancement apparaissent dans de nombreux domaines tels la construction, l'informatique, les télécommunications, l'administration et bien évidemment la production. De manière simple, résoudre un problème d'ordonnancement consiste à organiser les tâches en déterminant quand elles devront être réalisées de telle sorte que les contraintes soient respectées. Ces contraintes peuvent être diverses et concernent généralement les caractéristiques (capacité, disponibilité etc.) des ressources humaines et/ou techniques devant réaliser les tâches. Dans le cadre des procédés discontinus, d'autres contraintes viennent s'ajouter à celles citées précédemment, ces contraintes concernent les contraintes de bilan (massique et énergétique), les contraintes sur les conditions opératoires (température, pression etc.) et celles sur l'état des appareils (veille, production, démarrage etc.). La problématique abordée est donc de trouver la meilleure manière d'organiser les tâches afin de minimiser la consommation d'énergie lors de la campagne de production.

Afin d'atteindre cet objectif, nous pilotons simultanément le fonctionnement du site de production (atelier) mais également le fonctionnement de la centrale de production d'énergie nécessaire au fonctionnement du site. Cette centrale correspond dans nos travaux à une centrale de cogénération (production simultanée de chaleur et d'électricité) et permet d'atteindre un meilleur rendement comparé à une centrale thermique classique. La prise en compte simultanée de l'unité de production et de la centrale d'utilités permet d'avoir une vision globale du procédé étudié et permet donc l'obtention d'un meilleur pilotage comparé à l'approche séquentielle traditionnelle. Pour aller plus loin, nous autorisons la situation de récupération énergétique au niveau de l'unité de production. Cette récupération fait appel à la notion d'intégration énergétique et s'applique traditionnellement à la récupération de chaleur. Dans le cadre de nos travaux, nous orienterons donc l'ordonnancement du procédé vers des solutions maximisant cette récupération d'énergie.

La deuxième partie de cette thèse est consacrée à la simulation des procédés discontinus dirigée par un module d'optimisation. Ce couplage optimisation / simulation joue le rôle de la supervision dans le cas des systèmes de production et permet d'orienter la conduite du procédé vers des scénarios jugés optimales au sens d'un certain critère défini au niveau de l'ordonnancement. La tendance actuelle concerne l'exploitation d'outils d'*Ingénierie des Procédés Assistée par Ordinateurs* ou CAPE<sup>1</sup>. La spécificité de ces outils est qu'ils intègrent dorénavant des fonctionnalités de simulation (en régime permanent et transitoire), d'optimisation et d'estimation de paramètres. Ils permettent donc à l'ingénieur d'exploitation d'améliorer sa compréhension du procédé mais également de faciliter la communication entre les différents acteurs concernés. Ces outils permettent d'évaluer l'impact des paramètres du modèle de simulation sur des indicateurs de production tels que les coûts, les temps de cycle ou l'occupation des appareils. Ainsi, ils permettent d'obtenir, de façon précise, l'évolution des variables d'états associées aux ressources du procédé mais permettent également d'estimer les valeurs des paramètres donnant lieu à la satisfaction d'une contrainte particulière (durée de chauffe, température optimale etc.).

L'outil de simulation que nous développons dans cette thèse répond à ces points. Cet outil est composé d'une part d'un module d'optimisation et d'autre part, d'un module de simulation. Concernant l'estimation des paramètres, le module de simulation permet de déterminer les caractéristiques des opérations unitaires du procédé (consommations énergétiques, durées,

---

1. Computer Aided Process Engineering

etc.) lorsque l'on impose à ces dernières, un fonctionnement donné. Concernant l'optimisation, le module d'optimisation permet de déterminer les configurations d'ordonnancement permettant de satisfaire un ou plusieurs objectifs donnés tels que la minimisation des coûts liés à l'énergie, la minimisation de la durée du plan d'ordonnancement ou la maximisation de la récupération énergétique. Le résultat de cette optimisation permet alors de réduire le domaine des paramètres (taille de lot, débit, dates de lancement etc.) transmis au module de simulation et permet de retenir les solutions optimisant le critère considéré. Finalement, concernant la simulation du procédé, le module de simulation permet de déterminer les trajectoires des variables d'états conformément au résultat transmis par le module d'optimisation. Ce module de simulation permet donc de valider, de corriger ou de rejeter un scénario de simulation. Ce couplage optimisation-simulation permettra alors d'orienter la recherche d'une configuration d'ordonnancement vers des solutions optimisées en réduisant le gap existant entre la planification et le pilotage du procédé réel.

La présentation de ce travail s'articule ainsi autour de quatre chapitres :

**Le chapitre 1** fixe le cadre de l'étude. Il décrit de façon générique le fonctionnement des procédés discontinus. Il définit ensuite le besoin d'une gestion efficace de la ressource énergétique et met l'accent sur le concept d'intégration énergétique. A travers ce chapitre, l'enjeu du pilotage de production et plus spécifiquement, celui de la fonction ordonnancement est rappelé puis le rôle que la simulation joue dans la conduite des procédés discontinus est introduit. Finalement, un état de l'art de l'ordonnancement, de l'intégration énergétique et de la simulation des procédés discontinus est réalisé.

**Le chapitre 2** s'attèle à la définition des modèles mathématiques pour l'ordonnancement des procédés discontinus sous contraintes d'énergie. Deux approches ont été retenues dans cette thèse. Une première formulation à travers la programmation linéaire (en variables mixtes) est proposée afin de servir de référence. Ensuite, une deuxième formulation couplant programmation linéaire (PL) et programmation par contraintes (PPC) dans une structure maître-esclave est proposée. Cette deuxième formulation permet d'exploiter les avantages respectifs de la PL et de la PPC sur le problème traité.

**Le chapitre 3** décrit en détail la procédure pour incorporer l'intégration énergétique dans le modèle d'ordonnancement. Nous y présentons les deux cas d'intégration, autrement dit, la récupération directe et la récupération indirecte d'énergie. Des contraintes additionnelles relatives au fonctionnement des appareils multimodales y sont également présentées. Finalement, l'application des modèles sur des applications simples mais suffisamment complètes, permet de valider l'efficacité des formulations proposées.

**Le chapitre 4** s'attèle au développement des modèles de simulation et de supervision du procédé et au couplage du module d'optimisation avec le module de simulation. Afin d'illustrer la procédure sur un cas concret, nous nous intéressons ici à un procédé de fabrication de *Chlorure de Polyvinyle* et exploitons le couplage entre ordonnancement et simulation sur des situations où la production simultanée d'électricité et de vapeur se présente mais également sur des situations où l'intégration énergétique directe et indirecte se manifeste.

# CHAPITRE 1

## CADRE DE L'ÉTUDE

### Plan du chapitre

<b>1.1</b>	<b>Les systèmes industriels considérés</b>	<b>5</b>
1.1.1	Modes de fonctionnement des procédés	5
1.1.2	Étapes d'obtention d'un produit	8
1.1.3	Notion de recette	9
1.1.4	Cycle de vie d'un procédé discontinu	10
1.1.5	Enjeux futurs : les procédés durables	13
<b>1.2</b>	<b>Contexte général de l'étude</b>	<b>14</b>
1.2.1	Contexte énergétique du secteur industriel	14
1.2.2	Initiatives pour la maîtrise de l'énergie	15
1.2.3	Intégration énergétique des procédés	19
1.2.4	Pilotage des systèmes de production	23
1.2.5	Simulation des procédés	30
<b>1.3</b>	<b>État de l'art et analyse bibliographique</b>	<b>35</b>
1.3.1	Intégration énergétique des procédés discontinus	35
1.3.2	Ordonnancement des procédés discontinus	37
1.3.3	Simulation des procédés discontinus	43
<b>1.4</b>	<b>Objectifs de la thèse</b>	<b>45</b>

Ce chapitre introductif vise à définir le contexte dans lequel s'inscrit cette thèse. Dans un premier temps, une courte description du système étudié, autrement dit, les procédés discontinus, est réalisée. Cette description sera suivie par une section traitant du contexte énergétique au sein duquel évoluent les procédés industriels, ceci afin de mettre en exergue le besoin d'une gestion efficace de la ressource énergétique. Parmi les différentes méthodes utilisées pour la maîtrise de l'énergie, nous mettons l'accent sur le concept d'intégration énergétique dont, les principes généraux sont introduits dans ce chapitre.

Dans un second temps, une brève introduction des enjeux de la gestion de production, et plus spécifiquement de la fonction ordonnancement, est réalisée. Nous y définissons l'intérêt de la mise en œuvre d'un pilotage optimal pour améliorer la performance énergétique globale d'un procédé.

Avant de clore ce chapitre, nous mettons l'accent sur l'intrication qui existe entre la modélisation et la simulation des procédés, cette démarche a été adoptée dans cette thèse afin de valider d'une part, les résultats de l'optimisation, et d'autre part, afin de mettre en avant l'intérêt de la

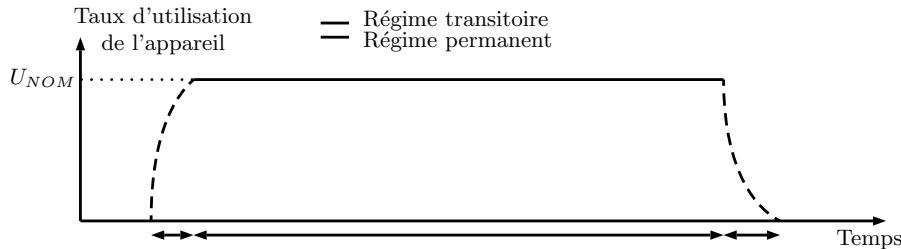


Figure 1.1 – Fonctionnement en mode continu

simulation dans le pilotage des procédés discontinus.

Finalement, nous clôturons ce chapitre en dressant un panorama de l'état de la recherche dans le domaine de l'ordonnancement des procédés sous contraintes d'énergie, de la gestion de la ressource énergétique au niveau des procédés discontinus ainsi que de la simulation des procédés discontinus.

Les objectifs de la thèse sont alors rappelés en fin de chapitre afin de résumer la démarche retenue dans nos travaux.

## 1.1 Les systèmes industriels considérés

Nous nous intéressons dans cette thèse au cas des systèmes de production de biens et abordons plus spécifiquement le cas des industries du process à travers les procédés discontinus. Par systèmes de production de biens, nous entendons toutes industries dont la finalité est la réalisation de produits physiques (par opposition aux services).

Une première classification des procédés industriels peut alors être réalisée en fonction de la manière dont la matière transite au niveau des appareils destinés à transformer la commodité.

Dans BARKER et RAWTANI [15] et DOUGLAS [37], on distingue principalement trois types de procédés :

- les procédés *continus* ;
- les procédés *discrets* ;
- les procédés *discontinus* ou *batch*.

Chacun de ces trois types de fonctionnement est propre à un marché bien défini, néanmoins, il arrive que la réalisation de certains produits, nécessite le traitement successif de la matière sur un ensemble d'appareils fonctionnant en mode mixte (continu-discontinu). Cette dernière catégorie de procédé est appelée procédé *semi-continu*.

La présente section définit plus en détails chacun des fonctionnements cités ci-dessus et mets l'accent sur les procédés batch faisant l'objet de cette thèse.

### 1.1.1 Modes de fonctionnement des procédés

Comme introduit précédemment, la manière dont transite la matière à travers les appareils du procédé, introduit une classification sur ce dernier. Nous présentons dans cette section les différents modes de fonctionnement des procédés industriels ainsi que leurs domaines d'applications respectives.

#### 1.1.1.1 Les procédés continus

Ces procédés fonctionnent suivant le mode de production « traditionnel » des procédés industriels, c'est d'ailleurs avec ce mode de fonctionnement que le génie des procédés a acquis ses lettres de noblesse. On le retrouve dans les industries possédant un gros volume de production,

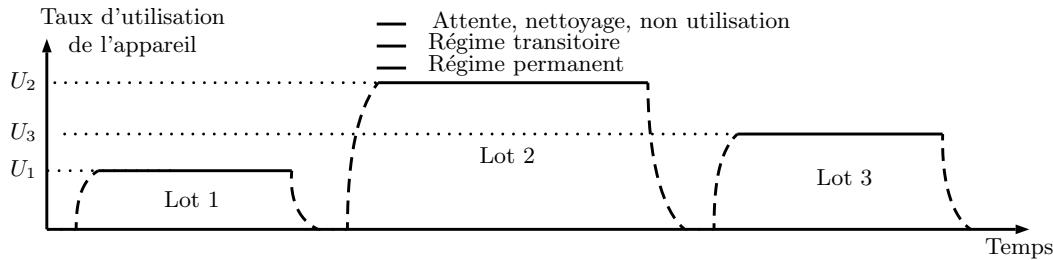


Figure 1.2 – Fonctionnement en mode discontinu

de fortes demandes en produits finis et possédant un fonctionnement quasi-ininterrompu au cours de la campagne de production.

Chaque appareil du procédé est alors associé à une fonction unique, la séquence opératoire est figée et la matière est simultanément présente dans tous les appareils du procédé. Les phases transitoires de démarrage ou d'interruption de la production étant restreintes, le fonctionnement du procédé est assimilé à un fonctionnement en régime permanent (figure 1.1). Les appareils ont donc été conçus pour fonctionner autour d'un point fixe de telle manière que les productions/consommations de matière et d'énergie sont quasiment constantes dans le temps.

Du fait de ce fonctionnement continu, les procédés continus sont peu flexibles et les stockages tampons sont quasiment inexistant. Ceux-ci sont uniquement utilisés lors des phases de transition où l'on doit interrompre la production pour une activité de maintenance ou pour le lancement d'une nouvelle campagne.

Parmi les procédés fonctionnant en mode continu on retrouve : les procédés pétrochimiques, miniers ou les centrales de production d'énergie. En ce qui nous concerne, les centrales de co-génération font partie de cette catégorie de procédé.

### 1.1.1.2 Les procédés discrets

Ces types de procédés sont plus communément rencontrés dans le domaine manufacturier. Dans un procédé discret, les produits sont acheminés unes par unes ou en quantités discrètes d'un appareil à l'autre. Ces quantités transférées sont appelées **lots de fabrication** et l'utilisation de la ressource dépend dorénavant de la quantité de lot traitée et de la disponibilité temporelle de la matière.

Les appareils sont dimensionnés pour fonctionner sur une plage de valeurs bornée par la capacité de la ressource et l'utilisation de stockages intermédiaires devient fréquent car ils permettent d'améliorer la flexibilité de l'unité de production. Les phases transitoires sont nombreuses et correspondent le plus souvent aux changements de série.

Des exemples de procédés discrets peuvent être retrouvés dans le secteur de la production automobile, dans l'aéronautique ou dans la mécanique de précision.

### 1.1.1.3 Les procédés discontinus ou batch

Le mode de fonctionnement discontinu représente un mixte du fonctionnement continu et discret. Un procédé discontinu n'est ni un procédé continu ni un procédé discret, mais il présente simultanément les caractéristiques de ces derniers. Tout comme les procédés discrets, la matière est traitée par lots de fabrication ou **batch** et chaque lot est transféré d'un appareil à un autre jusqu'à l'obtention d'un ou des produits finis. Mais contrairement aux procédés discrets, la matière est une mixture liquide qui subit une succession de transformations continues entraînant des consommations différentes en matière et en énergie.

Ce mode de fonctionnement est utilisé dans les industries agroalimentaires et pharmaceutiques, dans la fabrication de semi-conducteurs ou dans tout autre domaine incorporant les

caractéristiques précédents (chauffage urbain, systèmes continus incorporant des séries de démarrage/arrêt ou présentant différents états de fonctionnement etc.).

Du fait du comportement hérité des procédés discrets, le fonctionnement discontinu permet une meilleure flexibilité comparée aux procédés continus. En effet, il est courant dans ces types de procédé, de réaliser des produits différents en utilisant le même jeu d'appareils. Dans KOROVESCI et LINNINGER [87], les auteurs recommandent l'utilisation d'une production en mode discontinu lorsque les conditions suivantes sont regroupées :

- un faible tonnage (inférieur à 500 tonnes/an) en produits ayant une forte valeur ajoutée, associé à une courte durée de vie des produits ;
- une saisonnalité de la demande en produits finis ;
- un besoin de réutilisation des équipements se manifeste, c'est le cas lorsque plusieurs opérations peuvent être réalisées sur le même appareil ;
- une rotation importante sur le nombre de produit ;
- un besoin de réajustement rapide des paramètres opérationnels du procédé impliquant une réactivité élevée face à une demande incertaine ;
- une traçabilité des lots de fabrication est requise.

Le principal fait qu'un nombre élevé de produits différents puissent être traités au niveau des procédés discontinus, entraîne une augmentation du nombre de changement de série, incluant les opérations de nettoyage. Des cuves de stockage intermédiaires sont donc habituellement utilisées afin de permettre la création d'en-cours de production. Ces stockages autorisent un découplage entre la production et la consommation de la matière, ce qui engendre une augmentation du nombre de lancement des appareils ou à l'inverse, une augmentation des temps d'arrêt (figure 1.2).

De plus, la production de petits lots de fabrication entraîne l'augmentation des phases transitoires. Sachant que ces phases correspondent souvent à des étapes de mises en conditions de la matière (chauffe, refroidissement etc.), on assiste à une sollicitation de la centrale d'énergie plus importante que dans le cas des procédés continus. En effet, dans les procédés continus, la consommation énergétique est quasi-constante pendant la campagne de production. Ce n'est pas le cas des procédés discontinus où divers niveaux d'énergie sont requis, entraînant un fonctionnement plus contraignant de la centrale fournissant l'énergie.

Selon l'objectif visé, il existe donc un fort potentiel d'amélioration à travers la conduite de ces procédés, notamment, par l'établissement d'ordonnancements minimisant les temps d'attente, la durée d'exécution ou la gestion de l'aspect énergétique.

#### 1.1.1.4 Les procédés semi-continus

Les procédés **semi-continus** sont une combinaison de procédés continus et de procédés discontinus, c'est à dire, qu'une section du procédé semi-continu regroupant un certain nombre d'appareils fonctionnent en mode discontinu. Les produits intermédiaires obtenus à travers cette première phase sont ensuite traités à nouveau mais cette fois ci dans une section fonctionnant en mode continu. Ce processus peut alors se répéter plusieurs fois avant l'obtention des produits finaux.

Dans ces types de procédés, une des principales problématiques réside dans la gestion des transitions à l'interface entre ces deux types de fonctionnement. Il est alors commun de retrouver des stockages dans des cuves intermédiaires au niveau de ces interfaces. Il est donc nécessaire de bien dimensionner ces cuves afin de permettre à la partie continue de fonctionner en permanence suivant sa cadence nominale. Parmi les procédés fonctionnant en mode semi-continu on peut citer la production du *Chlorure de Polyvinyle* (PVC).

Après avoir brièvement défini les différents mode de fonctionnement des procédés, nous aborderons dans la section suivante les différentes étapes nécessaires à l'obtention d'un produit.

### 1.1.2 Étapes d'obtention d'un produit

Comme tout processus de fabrication, l'obtention d'un produit quelconque est régit par une séquence d'étapes élémentaires. Cependant, en fonction du point de vue retenu, plusieurs appellations peuvent être observées. D'un point de vue orienté *génie des procédés* et plus spécifiquement pour le cas des procédés discontinus, l'obtention d'un produit chimique est structuré à travers une liste d'étapes appelée **recette de fabrication** [119]. D'un point de vue relatif au *génie industriel*, l'obtention d'un produit se fait par l'établissement d'une *gamme de fabrication*. En fonction du besoin de synthèse d'un produit, la réalisation d'un produit s'effectue donc par l'exécution d'une séquence d'étapes, parmi lesquelles quatre fonctions sont communément rencontrés dans les procédés discontinus (figure 1.3) :

1. **Regroupement de lot** : De manière générale, les opérations de mélange sont nécessaires pour préparer la matière aux éventuelles opérations de synthèse des produits, elles servent donc à regrouper deux ou plusieurs produits (matières premières ou produits intermédiaires) afin de former une mixture homogène possédant les propriétés voulues. Un mélange est nécessaire lorsque les produits finis possèdent des propriétés physicochimiques résultant d'un mixte des propriétés de divers matières premières (ou produits intermédiaires). Initialement stockée dans des cuves sous différentes conditions (température, pression), cette charge initiale est transférée à l'aide de mécanismes tels que les vannes, les pompes ou les transferts par gravité.
2. **Mise en condition** : Le processus de préparation consiste à conditionner la matière pour que celle-ci soit en état de subir une transformation. Par exemple, si des matières solides sont présentes dans la charge, il est nécessaire d'effectuer des opérations de broyage afin d'atteindre le degré de finesse requis. Il est également possible de mettre cette matière solide en suspension par l'addition d'un solvant ou d'un diluant. Il n'est cependant pas rare d'observer des consommations énergétiques lors des phases de préparation. En effet, la mise en condition de la matière nécessite souvent l'apport ou l'extraction d'énergie sous différentes formes (énergie thermique, mécanique, électrique etc.).
3. **Transformation** : Une opération de transformation est nécessaire lorsque l'identité des espèces contenues dans la charge initiale est différente de celle désirée dans les produits. Il est nécessaire de prendre en considération le nombre et les caractéristiques des différents états de la matière. La mise en contact des réactifs, l'ajout ou la suppression de solvant ainsi que leur mise en état de réagir sont des phases courantes dans ces opérations. L'appareil devra alors être maintenu automatiquement dans des conditions (température, pression etc.) adéquates. Par exemple, si pendant une réaction, la chaleur produite est négligeable, une réaction adiabatique est réalisable. Dans le cas contraire, un contrôle de la température de réaction devra être mis en œuvre.
4. **Division de lot** : Une opération de division est nécessaire lorsque le nombre et l'identité des composants est identique à la charge initiale mais le produit désiré est mélangé dans la charge. Afin de pouvoir extraire de la masse réactionnelle, à une certaine pureté, le produit recherché, on a généralement recours à une séquence d'opérations de séparation. Rappelons que cette masse réactionnelle contient le produit principal, les produits secondaires qui se sont formés, les produits non transformés, les solvant et/ou les diluants utilisés. La séparation s'effectue alors par la création de phases additionnelles par chauffe ou refroidissement, par l'addition d'agents séparateurs ou par la création de barrières entre les produits principaux et les impuretés. Dans le cas des procédés discontinus, les techniques séparatives par chauffe ou refroidissement ont lieu dans des opérations d'évaporation, de cristallisation, de distillation, d'extraction liquide-liquide etc.

Dans chacune des étapes précédemment citées, dont la séquence n'est pas figée mais dépend du produit à réaliser, le procédé a recours à une consommation ou une production d'énergie

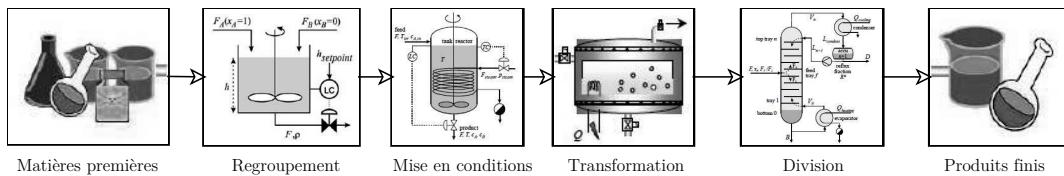


Figure 1.3 – Étapes d'obtention d'un produit

pouvant se manifester sous forme de consommation de vapeur à différentes pressions, d'eau à différentes températures, d'air comprimé, d'électricité etc.. Cette énergie peut se présenter sous différentes formes : thermique, mécanique et/ou électrique. La prise en compte de l'aspect énergétique devient alors un aspect incontournable dans l'étude des procédés chimiques.

Nous avons discuté précédemment des diverses étapes rencontrées au sein d'un procédé discontinu. Afin de structurer la manière dont ces étapes sont exploitées pour la réalisation d'un produit donné, la section suivante présente la notion de recette de fabrication.

### 1.1.3 Notion de recette

Par définition, une recette est une structure de données représentant les informations minimales requises pour la fabrication d'un et d'un seul produit. Autrement dit, la recette permet de décrire les produits et la manière de les fabriquer [71]. La recette d'obtention d'un produit comprend principalement cinq (05) parties dont :

1. *L'en-tête* qui contient les informations administratives concernant la recette dont, le nom et le numéro du lot, des informations sur le produit, l'identification de l'auteur, la version, la date et le statut de la recette ;
2. *La formule* contient la liste des matières premières, la quantité de ces derniers ainsi que les conditions opérationnelles requises pour réaliser le produit. La formule contient également des paramètres complémentaires comme la température, la pression et les informations additionnelles sur la quantité de produit fini à réaliser ;
3. *Les spécifications sur le produit* tels que les tests de qualité réalisés sur la matière durant son traitement, les résultats attendus etc. ;
4. *Le besoin en équipement* qui définit la liste des appareillages nécessaires à la réalisation du produit, ces appareillages concernent les équipements de production et ceux de contrôle ;
5. *La procédure* qui définit la liste des étapes et actions par lesquelles la matière devra transiter et l'ordre dans lequel ces dernières seront réalisées afin d'obtenir le produit final ;
6. *Des informations optionnelles* relatives à la réglementation et à la sécurité.

Les informations fournies ci-dessus peuvent se présenter à différents niveaux décisionnels et suivant une granularité différente à chaque niveau. C'est à dire que la recette peut se définir depuis un niveau d'agrégation élevé (niveau d'entreprise) jusqu'à un niveau détaillé (niveau d'une ligne de production). Afin de structurer les informations contenues dans la recette, le standard ISA S88 [73] définit une classification et propose une modélisation hiérarchisée des principaux niveaux de recette (figure 1.4). La hiérarchie en question fait apparaître les niveaux de recette suivants :

**La recette générale** , de niveau entreprise, s'applique généralement à plusieurs sites de fabrication et contient des informations générales sur les équipements requis, les matières premières utilisées et les procédures sans faire référence à une unité de production spécifique. La recette générale est donc conçue sans connaissance préalable de l'unité de fabrication sur laquelle le produit sera réalisé ;

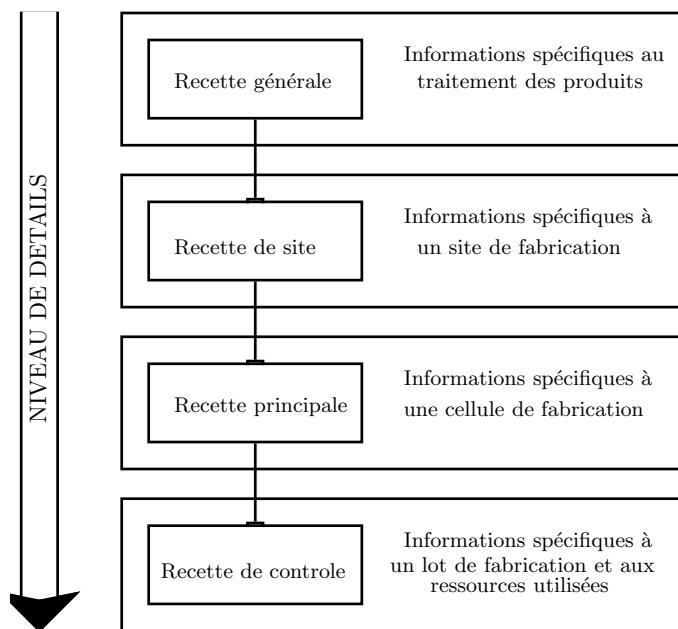


Figure 1.4 – Hiérarchie des recettes d'un procédé discontinu

**La recette de site**, spécifique à un site de production, est dérivée de la recette générale et inclut des informations propres à un site de fabrication particulier. C'est à dire qu'elle définit de façon spécifique les besoins en équipements et ressources associés au site de production considéré. La recette de site est destinée à être utilisée sur plusieurs cellules de fabrication ;

**La recette principale**, destinée à une cellule de fabrication spécifique, est dérivée de la recette de site et comprend des informations telles que l'arrangement des équipements nécessaires à l'obtention du produit. La recette principale est conçue pour être utilisée sur différentes lignes de production. La fonction ordonnancement qui définit les lots de fabrication est généralement réalisée à ce niveau ;

**La recette de contrôle** est une instantiation de la recette principale, c'est à dire qu'elle est créée à partir de la recette principale lorsqu'un lot de fabrication (*batch*) est ordonné et elle définit la fabrication d'un batch pour un produit spécifique. Elle contient pour cela les informations relatives à ce lot de fabrication, la ligne de fabrication sur laquelle le batch est réalisé et les informations sur les matières premières utilisées. La recette de contrôle est l'unique type de recette requis pour la production.

Pour résumer, la recette générale et la recette de site sont des recettes indépendantes des équipements tandis que la recette principale et la recette de contrôle sont des recettes dépendantes des équipements. Les termes procédures, opérations et phases sont alors associés aux recettes dépendantes des équipements.<sup>1</sup>

#### 1.1.4 Cycle de vie d'un procédé discontinu

Le génie des procédés intervient à différents stades du cycle de vie d'un procédé et chaque stade fait intervenir un certain nombre de compétences. En effet, comme on peut le voir sur la

1. Nous nous situons au niveau de la recette principale et de la recette de contrôle dans le présent travail. Plus spécifiquement, les travaux sur l'ordonnancement abordés dans cette thèse traitent des informations localisées au niveau de la recette principale et les travaux menés sur la simulation manipulent des informations relatives à la hiérarchie de la recette de contrôle.

figure 1.5, un procédé discontinu, et plus globalement un procédé industriel, peut être assimilé à un produit évoluant dans le temps suivant une séquence de phases dont les principales sont :

- la conception ;
- la réalisation ou la fabrication ;
- l'exploitation ou l'utilisation ;
- le recyclage.

En termes de durée, on impose généralement que la phase d'exploitation soit la plus longue possible afin de maximiser la rentabilité du procédé. Inversement, la phase de conception est minimisée, d'une part, pour réduire les dépenses en R&D, et d'autre part, pour permettre une pénétration sur le marché le plus tôt possible, sachant la conjoncture dictée par le marché concurrentiel. Dans la suite de cette section, nous présentons individuellement chacune des phases précédentes. Nous mettrons cependant l'accent sur la phase d'exploitation sur laquelle se focalise l'objet de ces travaux.

#### 1.1.4.1 Phase de conception

La phase de conception fait apparaître une coopération étroite entre les chimistes et les ingénieurs de recherche. Cette phase traite principalement de la manière dont devra être conçu le procédé, ainsi que du choix des opérations unitaires et équipements nécessaires pour le bon fonctionnement du système. L'objectif de la phase de conception est donc de proposer une ou plusieurs recettes de fabrication et d'accompagner cette recette par la liste des équipements ainsi que des instructions opérationnelles nécessaires à chaque opération. Dans le cas des procédés discontinus, la conception s'attèle à l'obtention de la recette de fabrication. L'obtention de cette recette s'effectue généralement par l'exécution d'une succession d'étapes [15] comprenant :

- *une génération des connaissances* qui consiste à identifier les opérations nécessaires pour l'obtention du produit, l'analyse des composants et produits utilisés lors de la synthèse du produit fini et l'identification des variables et des contraintes opérationnelles ;
- *une génération d'alternatives pour la recette*. En effet, dans un procédé discontinu, il existe plusieurs alternatives à l'obtention d'un produit. Par exemple, dans les systèmes de fabrication flexibles, il n'est pas rare que plusieurs appareils différents puissent réaliser une même opération entraînant ainsi une augmentation du nombre de configuration possible. Une fois ce choix réalisé, les ingénieurs d'étude devront générer toutes les alternatives possibles suivant un certain critère à optimiser (durée d'obtention des produits, consommation énergétique etc.)[87]. Cette génération se fait alors sur la base de la connaissance des concepteurs, par l'utilisation d'algorithmes de génération ou par des approches combinées ;
- *une évaluation de chaque alternative* qui se fait généralement par simulation. L'approche par simulation est dans ce cas utilisée pour vérifier la conformité du comportement du procédé face à différents scénarios opérationnels, pour valider la dynamique de chaque opération au début ou à la fin de chaque opération ou pour identifier les opérations pouvant être améliorées en agissant sur les variables et contraintes opérationnelles.

Toutes ces complications font de la conception des procédés discontinus une véritable problématique au niveau industriel.

#### 1.1.4.2 Phase de réalisation

Une fois les opérations, les principaux appareils, ainsi que leurs conditions opératoires définies, l'ingénieur s'attèle à la réalisation du choix des équipements de connexion matière et énergie ainsi que des éléments de régulation et de contrôle. Il est d'usage au niveau de cette phase de mettre en œuvre un procédé pilote en laboratoire avant d'avoir recours à la réalisation proprement dite du procédé.

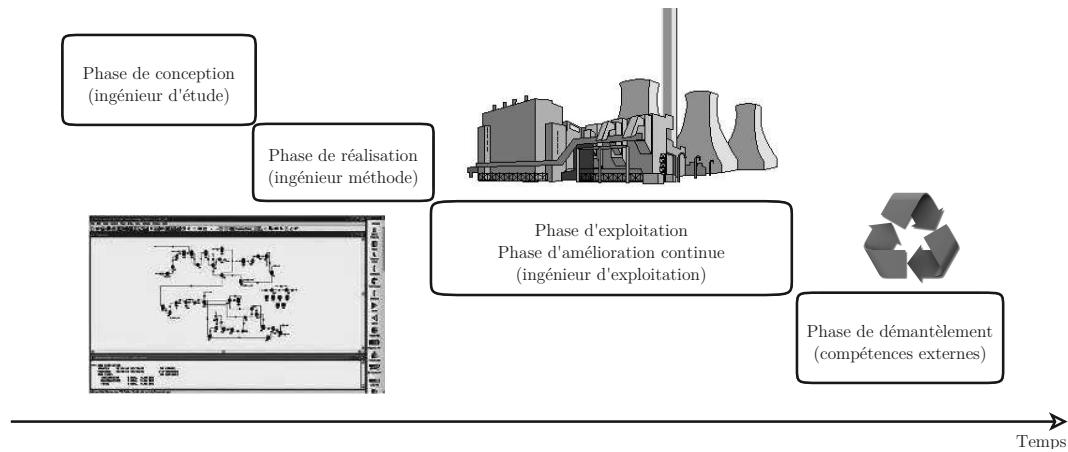


Figure 1.5 – Cycle de vie d'un procédé

#### 1.1.4.3 Phase d'exploitation

La phase d'exploitation du procédé fait intervenir l'ingénieur d'exploitation. Cette phase comprend un ensemble d'activités et de fonctions de contrôle, dont les principales sont listées ci-dessous [73] :

- *le contrôle du procédé* qui consiste à décrire les fonctions de contrôle directement en relation avec les équipements. On retrouve entre autre la collecte des informations provenant des capteurs, l'exécution des commandes sur les équipements en fonction des paramètres reçus, l'établissement d'informations de suivi pour le système de supervision etc. ;
- *la supervision des équipements* qui consiste à coordonner les activités de contrôle du procédé, à savoir l'allocation des ressources (appareils, matières) et la supervision proprement dite de l'exécution des différentes opérations du procédé. On retrouve également au niveau de cette activité la collecte des informations associées à chaque lot afin de documenter le système informatique de l'entreprise ;
- *la planification et l'ordonnancement de la production* qui assure la création des lots de fabrication nécessaires à la réalisation de la commande client. Les informations sur ces lots de fabrication seront utiles pour l'étape de conduite du procédé. En se basant sur un horizon d'ordonnancement donné, la fonction planification et ordonnancement propose un plan d'utilisation des ressources (appareils ou opérateurs) disponibles. Ce plan gère également la production/consommation de ressources, les dates auxquelles chaque opérations/lots devront être lancés ainsi que l'ordre dans lequel ils devront être réalisés ;
- *la conduite du procédé* qui s'attèle à la création de la recette de contrôle à partir de la recette principale, et ceci sur la base de l'ordonnancement et des informations provenant de l'état des équipements. La conduite du procédé consiste donc à gérer les ressources de production en allouant ou réservant un appareil mais également en résolvant les conflits d'allocation. De même que dans les étapes précédentes, une remontée des informations vers le système d'information est réalisée ;
- *La gestion des données de production* qui est une activité consistant à collecter et à stocker les informations nécessaires à la fabrication afin de permettre l'établissement d'une historique des lots de fabrication. Ces informations sont entre autre utilisées pour l'analyse de l'unité de production et pour l'établissement de rapports (indicateurs de performance, tableaux de bord etc.).

En plus de ces tâches, l'ingénieur d'exploitation devra répondre aux sollicitations internes (taux de service, interventions de maintenance, pannes, rotation du personnel etc.) de l'entreprise ainsi qu'aux contraintes externes imposées par le secteur d'activité (normes, fluctuations du

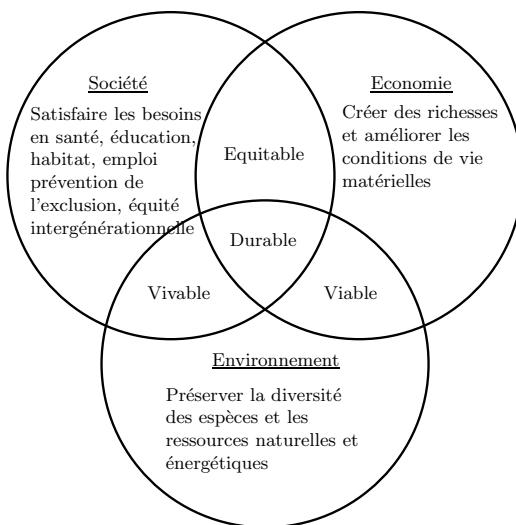


Figure 1.6 – Piliers du développement durable

marché, commandes urgentes etc.). Ces situations induisent souvent l'ingénieur exploitant à améliorer continuellement l'unité de production et/ou la manière dont celle-ci est pilotée.

#### 1.1.4.4 Phase de démantèlement

Cette phase fait appel à une compétence spécialisée externe à l'entreprise. Cependant, dans la plupart des cas, elle n'est réalisée que sur une portion du procédé et correspond à la non-utilisation des appareils qui y sont localisés. Dans ce cas de figure, la portion considérée devra être isolée mécaniquement et électriquement de la partie fonctionnelle. Une documentation de l'état des appareils démantelés sera alors réalisée afin de permettre une future réutilisation, modification ou un démantèlement. Au final, cette phase correspond à une amélioration majeure du procédé (remplacement d'appareils, installation de nouvelles unités etc.) plutôt qu'à une fin d'exploitation.

#### 1.1.5 Enjeux futurs : les procédés durables

Face à une forte croissance de la demande dans des secteurs tels que les biomatériaux, la conversion de biomasse, l'industrie pharmaceutique etc., le secteur industriel, dont celui des procédés, manifeste une utilisation peu contrôlée des ressources naturelles non-renouvelables. De plus, l'évolution sur un marché compétitif, tendant vers la globalisation et subissant diverses contraintes telles que celles imposées par les normes qualité, de HSE<sup>2</sup> etc., conduisent le secteur des procédés à mettre en œuvre des usines optimisées. De nouvelles directives ou feuilles de routes ont donc été émises [70], où le génie chimique et le génie des procédés tiennent une place importante. Ces feuilles de route mettent l'accent sur l'évolution du génie des procédés vers un **génie des procédés durables** plus en accord avec les principes énoncés du développement durable (figure 1.6). Dans cette optique, plusieurs exigences sont adressées à la recherche en génie des procédés, on retrouve des tendances allant vers des concepts tels que l'*éco-innovation*, l'*éco-conception*, l'*intensification ou l'intégration* des procédés où le génie des procédés adopte la mise en place d'une vision multicritère de l'ensemble du procédé (réduction d'impacts environnementaux, améliorations de performances, compétitivité, flexibilité etc.). Dans POUX, COGNET et GOURDON [127], plusieurs approches supplémentaires sont proposées, à savoir :

2. Hygiène, Sécurité et Environnement

- *L'optimisation des procédés existants* s'opérant sans rupture technologique, elle met en place des modèles prenant en compte les différents aspects du cycle de vie des procédés (environnement, énergie, recyclage etc.)<sup>3</sup> ;
- *L'innovation technologique* qui s'est opérée d'une manière peu conventionnelle durant ces dernières dizaines d'années, en effet, on assiste à l'occurrence d'une démarche de systèmes dits *intensifiés* (réacteurs multifonctionnels, miniaturisation etc.) ou *intégrés* [29], c'est donc une approche qui s'aligne parfaitement avec la philosophie de durabilité ;
- *La mise en place de nouvelles générations de procédés* par l'utilisation de nouvelles techniques de synthèse, de nouvelles technologies comme les fluides supercritiques, les liquides ioniques etc.

## 1.2 Contexte général de l'étude

Cette section débute par une introduction sur la situation énergétique du monde industriel, ceci permet de mettre en évidence l'augmentation dramatique de la consommation énergétique et la nécessité d'une gestion efficace de la ressource énergétique. La section se poursuit par une énumération des initiatives menées sur le plan industriel pour maîtriser la consommation énergétique. Une attention particulière a été fournie, dans cette thèse, sur le principe d'intégration énergétique dont nous définissons les principales caractéristiques dans la présente section. Nous poursuivons sur les enjeux du pilotage de la production et mettons en exergue le fait qu'une meilleure conduite de l'unité de production permet d'améliorer globalement le rendement énergétique d'un procédé. Finalement, nous terminons sur l'intérêt de la simulation des procédés discontinus et présentons le rôle de la simulation dans nos travaux.

### 1.2.1 Contexte énergétique du secteur industriel

Une récente étude menée par l'IEA<sup>4</sup> a permis de mettre en évidence qu'entre 1990 et 2005, la consommation énergétique mondiale a enregistré une hausse de 23%, soit une croissance moyenne de 1.5% par an. Cette étude a également démontré que le secteur industriel était celui qui consommait le plus, avec une proportion qui avoisine les 33% de la consommation globale d'énergie (figure 1.7). D'après une projection plus récente de l'IEA réalisée en 2011 [2], la croissance moyenne de la consommation énergétique mondiale de 1.5% par an se maintiendra jusqu'en 2020 et une volonté de diminution à 0.9% par an est prévue entre 2020 et 2035. Cette baisse sera en majeure partie provoquée par l'augmentation de l'initiative à l'exploitation des sources d'énergies alternatives.

D'après ce même rapport, la consommation en carburants fossiles (gaz naturel, charbon, pétrole) comptera pour plus de la moitié de l'augmentation de la consommation énergétique, ce type de carburant restera donc la source d'énergie principale à l'horizon 2035 (figure 1.8). Sur une échelle plus locale, la consommation énergétique industrielle en France est de l'ordre de 28 % de la production énergétique (source *Grenelle de l'environnement*). La répartition de cette consommation pour les divers secteurs industriels est donnée par la figure 1.7. On constate alors que l'industrie chimique tient une part importante dans cette consommation (26%), elle est ensuite suivie par le secteur sidérurgique (16%) et les industries agroalimentaires (14%).

D'un autre point de vue, la consommation en carburants fossiles induit un impact négatif, indissociable, à l'environnement. Dans ce rapport [2], une trajectoire, jusqu'en 2035, de l'émission de  $CO_2$  en fonction de la consommation en carburants fossiles est présentée. Cette projection

3. Ce travail s'inscrit dans une vision d'optimisation d'un procédé existant en mettant l'accent sur l'aspect énergétique par l'utilisation du concept *d'intégration énergétique* des procédés dont les éléments principaux seront présentés dans cet ouvrage.

4. International Energy Agency (Agence Internationale de l'Énergie)

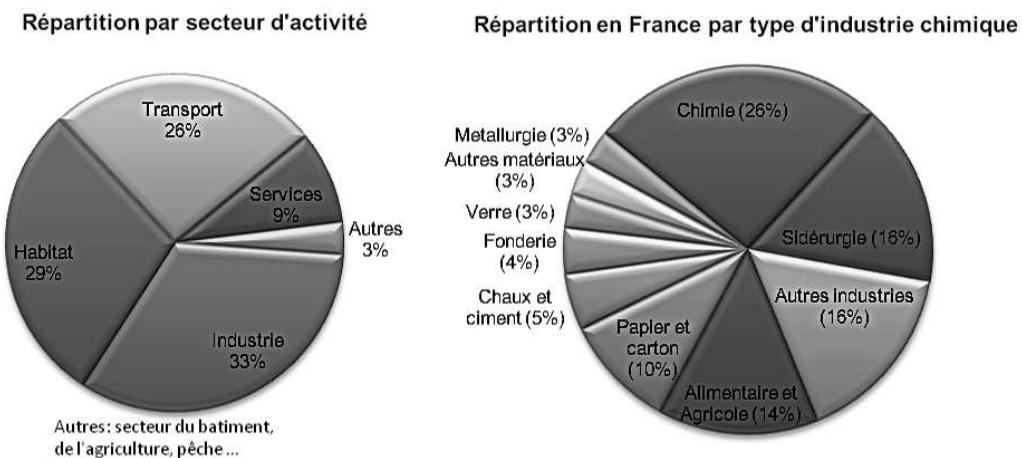


Figure 1.7 – Répartition de la consommation énergétique en 2005

induit une augmentation probable de la température de 3.5 °C sur le long terme (supérieur à l'objectif admissible fixé à 2 °C). L'IEA prévoit également qu'entre 2008 et 2035, une augmentation de l'émission en  $CO_2$  par source d'énergie dont 60% est due au gaz naturel (2/3 de plus que l'émission enregistrée en 2008), 25% au pétrole et 15% au charbon (7% de plus que l'émission enregistrée en 2008). A partir de ces constatations, il est mis en évidence que la demande en ressource énergétique présente une forte tendance à la croissance pour les décennies à venir.

Concernant le cas de Madagascar, la répartition de la consommation énergétique par secteur d'activité est discutée dans [151]. Dans ce rapport, on peut observer que 9% de cette consommation est liée au secteur industriel et 28% au secteur des services. La majorité de la demande énergétique est concentrée dans les consommations des ménages à hauteur de 63 %.

Les prévisions de croissance en consommation énergétique pour l'horizon 2030 sont présentés sur la figure 1.9. Elles correspondent à quatre scénarios de croissance économique dont le premier est à un taux de 3% par an, noté E3, et correspondant à la tendance actuelle du pays. Les autres scénarios, plus optimistes, engendrent les profils de croissance de la demande en énergie de la figure sus-citée. Ainsi, il est possible d'observer une augmentation de la demande en énergie de l'ordre de 73% (base de 2011) dans le meilleur des scénarios, et de 300% dans le scénario à 10% de croissance économique.

D'un autre côté, la production énergétique à Madagascar concerne principalement la production d'énergie électrique. La situation des dernières années concernant le rapport source thermique - source hydraulique pour la production d'électricité est montrée par la figure 1.9. On observe que le rapport thermique-hydraulique est d'environ 50% de 1994 à 2009, cependant, au delà de cette date, on observe sur la figure une nette augmentation de l'utilisation du thermique, autrement dit, des carburants fossiles, pour la production d'énergie électrique. En réalité, cette tendance se confirme à un taux de croissance de 16.75 % depuis 2009. Au jour d'aujourd'hui, la combustion des carburants fossiles est donc la source principale de production d'électricité à Madagascar.

Au vu de ces constats, il est clair qu'une initiative pour la maîtrise des consommations énergétiques, principalement celles obtenues à partir des carburants fossiles, doit être initiée.

## 1.2.2 Initiatives pour la maîtrise de l'énergie

D'un point de vue systémique, une industrie peut être assimilée à un système devant répondre à plusieurs objectifs. D'une part il doit évoluer sur un marché compétitif, évolutif, dynamique et fortement concurrentiel. D'autre part, il doit répondre à un certain nombre de

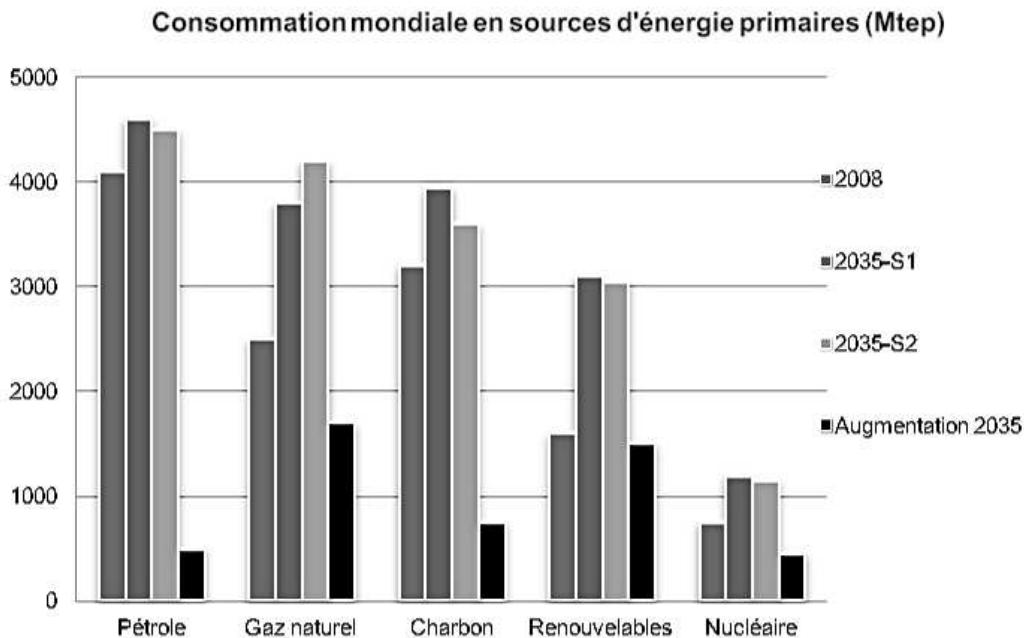


Figure 1.8 – Prévision de la consommation énergétique mondiale en 2035

contraintes (règlementations, normes etc.) parmi lesquelles celles relatives à l'énergie et à l'environnement. Afin d'atteindre ses objectifs, c'est à dire dégager le maximum de profit de son activité, l'industriel devra améliorer sa productivité et réduire ses coûts et tout cela au respect des obligations sur le plan environnemental. Parmi ces coûts, ceux liés à l'énergie tiennent une proportion importante dans les dépenses de l'entreprise. Pour répondre à ces contraintes, différentes initiatives ont été proposées tant au niveau technique que stratégique. Pour le cas de l'industrie chimique, on peut classifier les initiatives proposées en fonction de leurs projections dans le temps.

#### 1.2.2.1 Initiatives à long terme

Si la plupart des solutions proposées sont encore actuellement au stade de la recherche, quelques pistes prometteuses commencent à être considérées plus sérieusement. Parmi ces solutions, on pourra citer :

**L'exploitation des sources d'énergies renouvelables** De nombreuses recherches sont actuellement menées dans ce domaine, elles s'articulent principalement sur la conception de nouvelles centrales d'énergie intégrant partiellement [51, 121, 131] ou totalement des sources d'énergie renouvelables [45, 107, 109]. C'est d'ailleurs à travers cette logique que s'aligne l'Union Européenne avec un objectif de baisse de 20% de la consommation énergétique à l'horizon 2020. Les sources d'énergie considérées ici sont l'éolienne, le photovoltaïque et les biomasses. L'IEA estime que près de 42% de la capacité électrique installée après 2020, sera fournie par les sources d'énergies renouvelables et ce avec une croissance moyenne annuelle de 4.1% [19] ;

#### L'investissement dans de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies éco-énergétiques

On citera par exemple l'introduction de nouvelles techniques de synthèse comme celles des réactions à activation par ultrasons ou par microondes, l'extraction sous  $CO_2$  supercritique [127], la capture et la séquestration de  $CO_2$ , l'utilisation de nouveaux carburants à base biologique comme le bioéthanol et le biodiesel, les bioplastiques ou l'utilisation de l'hydrogène comme alternative aux carburants fossiles et les nano-particules pour le recyclage

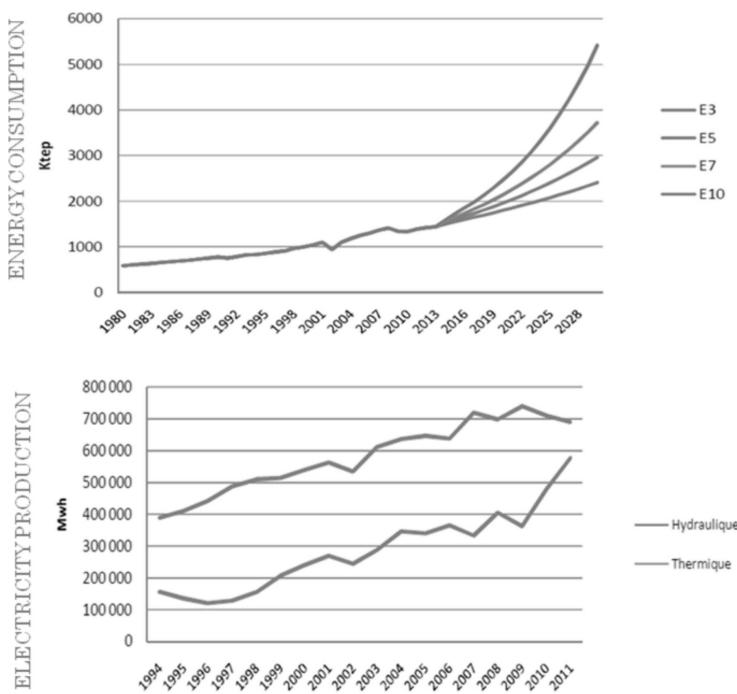


Figure 1.9 – Prévision de croissance de la consommation énergétique à Madagascar [151]

de la matière [122]. Sur le plan de la distribution énergétique, on observe également l'introduction de nouvelles structures de réseaux électriques dits *distribués* tels que les *microgrids* [31] ou les *smartgrid* [41].

La liste de solutions énumérée ci-dessus est loin d'être exhaustive et de nombreuses voies de recherche ne cessent de s'ouvrir au sein de la communauté scientifique. Cependant, il faudra admettre que les sources d'énergies renouvelables ne seront pas disponible immédiatement et les carburants fossiles ainsi que le gaz naturel resteront les sources principales d'énergies pour les décennies à venir [2].

### 1.2.2.2 Initiatives à court et moyen terme

Sachant qu'un effort est encore requis pour que les sources d'énergies renouvelables soient pleinement exploitées, les acteurs du monde scientifique et industriel ont coopérés pour mettre en œuvre des solutions à court et moyen terme permettant de tirer profit des potentiels inexploités des procédés actuellement en place. Ces initiatives se concentrent principalement sur l'amélioration de l'**efficacité énergétique** des procédés industriels. Parmi les mesures proposées dans un rapport de la commission Énergie de l'Union Européenne [34], on peut citer les directives suivantes :

**Amélioration des systèmes d'approvisionnement de chaleur :** Parmi les appareils effectuant ces opérations on retrouve : les chaudières, les bruleurs ou les fours. Ces opérations nécessitent l'utilisation d'un carburant et d'un oxydant. La production de chaleur se fera alors par réaction chimique entre le carburant et l'oxydant qui est généralement de l'air à température ambiante. Dans le cas d'une chaudière à vapeur par exemple, une consommation supplémentaire en eau est nécessaire, cette eau est chauffée jusqu'à l'obtention de vapeur à haute pression qui sera ensuite distribuée à l'ensemble du procédé. La cause principale d'inefficacité au niveau de ces appareils est due aux pertes thermiques. Ainsi pour minimiser ces pertes, les solutions proposées consistent à agir sur les paramètres du procédé (par

exemple en réduisant la température du carburant et en augmentant la température et / ou le débit air), à mieux choisir le type de carburant (impact environnemental minimal, meilleur pouvoir calorifique ...) et d'oxydant (par exemple de l'oxygène au lieu de l'air) ou en renforçant l'isolation thermique de l'appareil ;

**Amélioration des systèmes d'approvisionnement en électricité :** Ces systèmes assurent l'acheminement et l'utilisation de la puissance électrique à l'intérieur du procédé. On peut citer par exemple les générateurs, les transformateurs ou les lignes électriques. Les principales sources d'inefficacités concernent les pertes de puissance, par exemple celles des pertes en lignes ou des harmoniques créées par les appareils possédant des charges non-linéaires. Ainsi, parmi les solutions proposées on retrouve l'amélioration du facteur de puissance en ajoutant des compensateurs (charges capacitives), l'élimination des harmoniques par l'utilisation de filtres, l'élimination des pertes en ligne par la réduction des distances entre les transformateurs et les équipements ou par le dimensionnement des câbles ainsi que l'amélioration du rendement des transformateurs par la connexion / déconnexion des transformateurs en fonction de la charge ;

**Exploitation des centrales de cogénération :** appelées également CHP<sup>5</sup>, ce sont des technologies assurant la production simultanée d'électricité et de chaleur (vapeur ou eau chaude). Sur la figure 1.11, le CHP correspond à la centrale de production d'utilités. C'est donc l'entité en charge de la réalisation du contrat d'approvisionnement en énergie. On retrouve généralement au sein de ce système des appareils tels que les chaudières à vapeur, les vannes de détente, les tours de refroidissement ou les turbines.

L'avantage d'un système de cogénération peut être aisément interprété au travers de la figure 1.10. Pour ce cas précis, le rendement global de la centrale de cogénération est de 85% ( $\alpha_E + \alpha_Q$  ou  $\eta_E + \eta_Q$ ), tandis que le rendement énergétique d'une centrale mixte thermique-électrique est de 65% ( $\alpha_E + \alpha_Q(\eta_{Eg}/\eta_{Qb})$ ) lorsque la quantité de chaleur  $\alpha_Q$  est ramenée en quantité équivalente d'électricité [134]. On remarque donc que la production simultanée de chaleur et de puissance donne un meilleur rendement que celui d'une centrale combinée.

De plus, en fonction du besoin du procédé en électricité, et sachant que le ratio puissance-chaleur d'un CHP est d'au moins 45% [113], il n'est pas rare qu'un surplus d'énergie électrique puisse être revendue par injection dans le réseau de distribution. Ceci est d'autant plus remarqué dans le cas des procédés discontinus où le besoin énergétique varie par palier en fonction de l'activité du procédé au cours du temps. Pour de meilleures performances énergétiques, la commission préconise le couplage du CHP avec une source d'énergie alternative, ce qui présente un double avantage dont le premier se trouve sur le plan environnemental et le second sur le plan énergétique car une production d'électricité sur site permet de réduire notablement les pertes lors de la transmission de l'énergie, qui notons le, pénalise d'environ 5% en moyenne, le rendement énergétique d'une centrale électrique ;

**Adoption du recyclage énergétique** Cette initiative consiste à valoriser le surplus d'énergie au sein du procédé (unité de production ou centrale d'utilités). Le recyclage énergétique fait partie d'un ensemble de mesures connu sous la dénomination d'intégration des procédés. Suivant la définition 1.1, l'intégration des procédés est donc une méthodologie permettant d'évaluer le potentiel d'un procédé donné et de mettre en œuvre les actions nécessaires afin d'exploiter au mieux ce potentiel.

En fonction du type de commodité considéré (chaleur, masse, empreinte carbone, oxygène ou hydrogène etc.) ou en fonction des champs d'application retenus (centrales d'énergie, chaines d'approvisionnement ...), plusieurs déclinaisons en intégration massique, in-

---

5. Combined Heat and Power

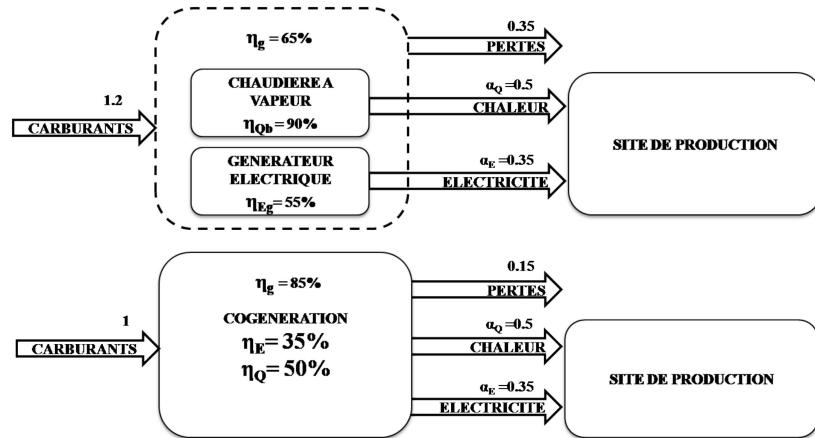


Figure 1.10 – Effet de la cogénération sur le rendement énergétique

tégration thermique, Total Site Integration, Hydrogen Pinch etc., s'observent dans la littérature [85]. Le cas particulier de l'intégration énergétique traitant de la méthodologie permettant de mettre en œuvre le recyclage énergétique est discuté dans cette thèse. Translaté sur la figure 1.11, le système en charge de la récupération d'énergie est le **réseau d'échangeurs de chaleur**.

### Définition 1.1 (Intégration énergétique)

L'intégration des procédés est un ensemble de méthodologies combinant les opérations au sein d'un procédé ou au sein de plusieurs procédés afin de réduire les consommations en ressources et/ou les émissions potentiellement dangereuses. [85].

Ces propositions ne reflètent qu'une partie des mesures pour la rationalisation de l'énergie au niveau industriel. Une liste exhaustive pourra être consultée dans [34], dans lequel l'auteur fait référence à ces mesures comme étant les meilleures pratiques actuellement disponibles ou *BAT* (Best Available Techniques). Ces solutions sont donc mises à disposition des industriels afin de permettre une meilleure maîtrise de la consommation énergétique au sein des procédés. Notre étude concernant en partie l'intégration énergétique des procédés, autrement dit, le recyclage énergétique, nous présentons succinctement dans la section qui suit les concepts fondamentaux liés à cette notion.

### 1.2.3 Intégration énergétique des procédés

Comme introduit précédemment, l'**intégration énergétique** peut être interprétée comme la notion de *valorisation du surplus énergétique* au sein des procédés. L'intégration énergétique se focalise donc sur l'identification du potentiel d'énergie récupérable au sein du procédé et détermine les mesures à mettre en œuvre pour valoriser cette énergie. Son utilisation se traduit alors par la conception ou l'amélioration du système de récupération d'énergie et/ou par la modification de certaines caractéristiques opératoires des appareils afin d'assurer une meilleure récupération énergétique. Comme nous allons le voir, le principe d'intégration énergétique peut être appliqué à différentes échelles allant de l'opération unitaire - un appareil - jusqu'au cas de plusieurs procédés interconnectés.

#### 1.2.3.1 Intégration énergétique d'une opération unitaire

A l'échelle d'une opération unitaire, c'est à dire, à l'échelle d'un appareil du procédé (réacteur, colonne de distillation ...), l'intégration énergétique permet d'améliorer le rendement

énergétique de l'appareil. Nous parlons dans ce cas précis d'*intensification* des procédés.

**Définition 1.2 (Intensification des procédés)**

L'intensification des procédés est l'ensemble des progrès en génie chimique permettant de mettre en œuvre des technologies miniaturisées, plus propres, plus sécurisées et plus efficaces sur le plan énergétique [129].

Les mesures d'intensifications s'effectuent donc soit au niveau de l'aspect chimique (techniques de synthèse améliorées), soit au niveau de l'aspect technologique (appareils multifonctionnels, miniaturisés etc.). A titre d'exemple on peut citer :

- L'intensification des opérations de séparation. Les techniques de séparation s'effectuent généralement soit par distillation, par extraction, par absorption, par adsorption ou par cristallisation. Une amélioration au niveau technologique peut être illustrée par les colonnes de distillation à murs divisés qui permettent de fusionner deux colonnes de distillation en une seule. Pour ce faire, chaque opération de séparation est isolée par l'utilisation d'un mur de séparation. Ces colonnes permettent de séparer trois ou plusieurs composants en une seule opération et présentent l'avantage de réduire le nombre de bouilleur et de condenseur utilisés, donc de la quantité d'énergie requise pour l'obtention des composants désirés. Tandis qu'une amélioration au niveau de la synthèse peut être représentée par la technique de séparation par membranes. Contrairement à une opération de séparation classique qui nécessite l'utilisation d'énergie (chaleur) pour pouvoir extraire un composant de la mixture, la séparation par membranes ne nécessite qu'une différence de pression ou de composition pour achever la séparation, ce qui présente un gain non négligeable sur le plan énergétique ;
- L'intensification des opérations de réaction. Parmi les améliorations des techniques de synthèse, on peut citer les réacteurs à membranes permettant une récupération continue du produit en cours d'opération, les réacteurs améliorés par l'utilisation de champs (électriques ou rotationnels) permettant un meilleur transfert thermique et massique. Sur le plan technologique, on observe les réacteurs multifonctionnels combinant une opération de séparation à la réaction, ou les réacteurs échangeurs qui permettent l'ajout et l'extraction de chaleur en cours de réaction. L'utilisation de ces systèmes présente entre autre l'avantage de réduire les coûts d'exploitation (énergie, maintenance etc.) comparés à des installations conventionnelles.

Néanmoins, même si cette technologie promet une amélioration significative du procédé, il persiste une appréhension du monde industriel face à l'utilisation généralisée de l'intensification des procédés. Par exemple, dans le cas d'un procédé existant, il est extrêmement difficile d'introduire un appareil intensifié qui n'a pas encore fait ses preuves. C'est à dire, qu'un dysfonctionnement de cet appareil intensifié pourrait compromettre le fonctionnement de tout le procédé. D'un autre point de vue, l'introduction d'un appareil intensifié n'est souhaitable que lorsque tout le procédé est intensifié. Ce qui impliquerai l'extension de l'intensification à l'ensemble des sections fonctionnelles du procédé or, à l'état actuel des choses, plusieurs investigations devront encore être réalisées.

### 1.2.3.2 Intégration énergétique d'un procédé

Plusieurs définitions de l'intégration énergétique d'un procédé peuvent être retrouvées dans la littérature, nous retiendrons la suivante :

**Définition 1.3 (Intégration énergétique)**

L'intégration énergétique d'un procédé est l'ensemble des améliorations apportées à un procédé, à ses opérations unitaires et à leurs interactions, pour qu'ils utilisent le plus efficacement possible l'énergie [21].

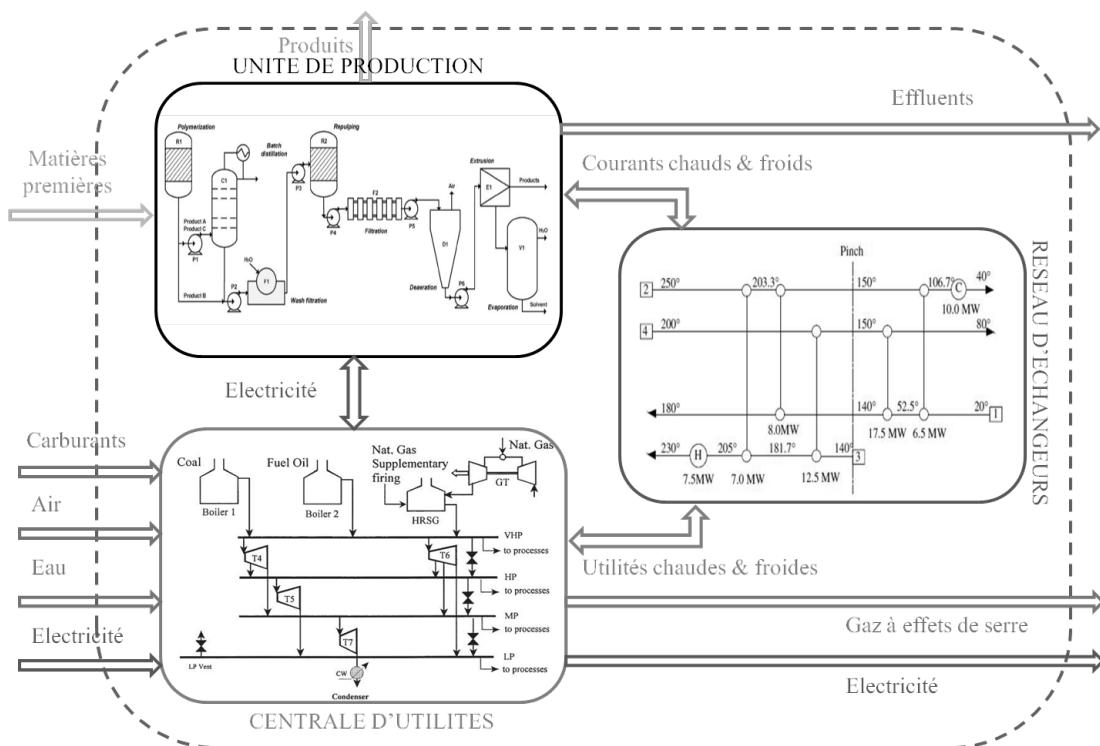


Figure 1.11 – Procédé chimique

Lorsque l'intégration énergétique s'applique à tout un procédé, il s'applique conjointement à l'unité de production et à la centrale d'utilités et se manifeste à travers le réseau d'échangeurs de chaleur (figure 1.11). Lors du fonctionnement du procédé, certaines opérations consomment ou produisent une certaine quantité d'énergie (chaleur, électricité). Pour le cas de l'énergie thermique, il est d'usage lors de la production de céder l'énergie à l'environnement, soit par convection naturelle soit par l'utilisation d'un fluide de refroidissement. Cette pratique n'est cependant pas toujours judicieuse car cette énergie peut être revalorisée ou réutilisée pour répondre à la demande d'autres opérations du procédé.

Le cas de l'énergie électrique est plus délicat. En effet, dans le cas le plus conventionnel, la puissance électrique est uniquement fournie lorsque la demande se manifeste. Cependant, il est possible de créer, à travers des unités de stockage, un décalage entre le moment de la production et celui de la consommation de l'énergie. C'est là qu'intervient l'intégration énergétique, plus précisément, la méthode est utilisée pour l'optimisation du dimensionnement ou de la conduite de systèmes de stockage d'énergie entre une source renouvelable (éolienne ou photovoltaïque) et un consommateur quelconque [61, 62].

#### Définition 1.4 (Nature des flux)

Les opérations produisant de la chaleur sont qualifiés de courants chauds ou de flux chauds. Ceux en consommant, de courants froids ou flux froids. Cependant, dans une vision plus générale, on peut associer les opérations produisant de l'énergie à celui de fournisseurs ou sources et ceux consommant de l'énergie, à celui de clients ou puits.

L'objectif de l'intégration énergétique, dans le cas thermique, se résume alors à trouver le couplage optimal entre les courants chauds et les courants froids permettant de maximiser la quantité d'énergie récupérée. Lorsqu'un tel couplage est obtenu, le réseau d'échangeur de chaleur est mis en place afin de matérialiser le transfert d'énergie. Se présente alors la prise en compte des contraintes techniques liées aux appareils (performance, dimensions, nombres etc.) mais également le calcul économique effectuant un compromis entre l'investissement en

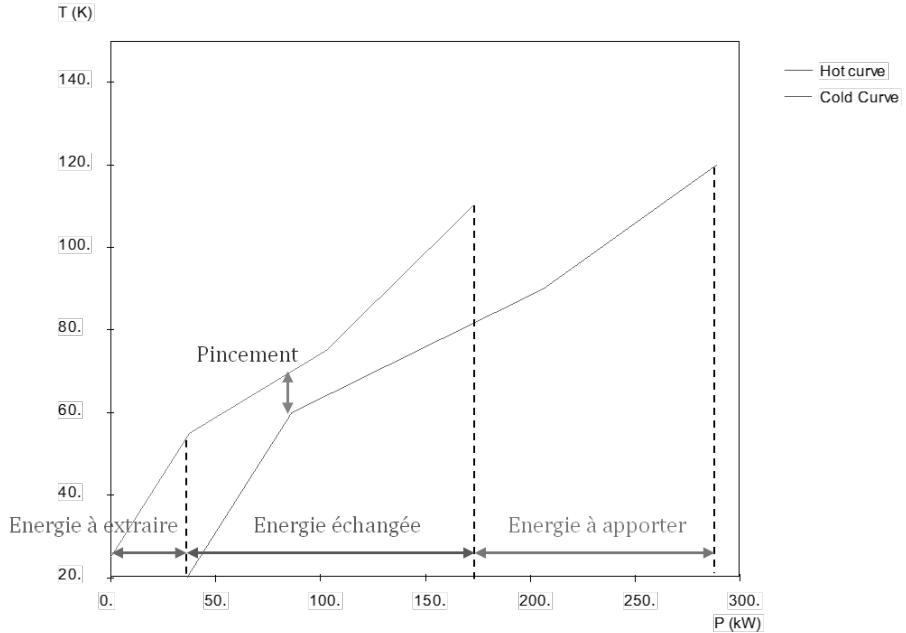


Figure 1.12 – Identification de l'énergie récupérable

équipement et le gain énergétique.

Le problème d'intégration énergétique des procédés est largement traité dans la littérature [39] mais on constate qu'une grande majorité des travaux fait référence à une technique particulière dénommée **Analyse Pinch** [79]. Décrite en quelques mots, l'analyse par la méthode du pincement ou Pinch translate l'ensemble des courants du procédé sur un graphe (quantité d'énergie, potentiel énergétique) dénommé *courbe composite*. Ce graphique regroupe d'un coté l'ensemble des courants chauds du procédé et de l'autre coté l'ensemble des courants froids. Les zones de chevauchement correspondent alors au potentiel de récupération — directe — d'énergie du site tandis que les zones non recouvertes déterminent les consommations d'utilités<sup>6</sup> à fournir au système (figure 1.12).

Dans certaines conditions, cette fourniture d'utilités peut être réduite par l'utilisation de stockage énergétique, on parle alors d'*intégration énergétique indirecte* [79]. Ces stockages énergétiques donnent une meilleure flexibilité au procédé moyennant un coût de maintien en conditions de la commodité (matière utilisée pour stocker l'énergie). L'évaluation de la potentialité de récupération énergétique entre les deux courbes composites (producteur et consommateur d'énergie), s'effectue alors par une translation horizontale de la courbe composite froide vers la courbe composite chaude jusqu'à un certain point imposé correspondant au pincement. Ce point de pincement traduit l'écart de température minimum à respecter pour que l'échange énergétique puisse se faire au respect des contraintes technologiques du réseau de transfert d'énergie. Lorsque le nombre de courants pris en compte devient important, la résolution graphique fait place à une résolution numérique par optimisation.

Notre étude se situe au niveau de l'intégration énergétique d'un procédé et considère l'existence préalable du réseau d'échangeur d'énergie (direct ou indirect). C'est à dire que l'on admet une sélection préalable des opérations pouvant échanger de l'énergie. Les caractéristiques de chaque appareil du réseau de récupération (échangeurs, cuves de stockage d'énergie) ainsi que les caractéristiques — plages de valeurs — de chaque courant sont également connus, l'objectif du travail consiste alors à exploiter (ou à sélectionner) les meilleurs couplages en fonction de l'activité de la production (ordonnancement).

6. Ressources consommables servant de support d'énergie (vapeur, fluide, électricité, air etc.)

### 1.2.3.3 Intégration énergétique multi-sites

La tendance qui s'impose aujourd’hui fait intervenir la notion de collaboration inter-entreprises [154]. On retrouve cette tendance dans la gestion des chaînes logistiques où deux configurations de pilotage se présentent. Un pilotage centralisé qui correspond au pilotage traditionnel en entreprise où toutes les prises de décision sont réalisées par une entité propre et les directives sont ensuite transmises à chaque organe fonctionnel de l’entreprise. D’un autre côté, le développement des technologies de l’information a permis l’émergence de nouvelles pratiques basées sur un mode de pilotage distribué ou coopératif [155]. Ces types de pilotage ont montré que lorsque le processus collaboratif fonctionnait efficacement, une amélioration globale de la performance du réseau pouvait être atteinte. Il serait donc envisageable de considérer une démarche d’intégration énergétique multi-site, comme le concept de « parc éco-industriel » qui a déjà fait ses preuves notamment sur le site de Kalundborg au Danemark où un véritable réseau d’échange faisant intervenir cinq grandes entreprises a porté ses fruits [40, 48]. Il est cependant à préciser que la création d’une certaine dépendance entre des entreprises ayant chacun leurs objectifs propres, et la mise en place d’un organe décisionnel dans le but de viser une meilleure performance globale, soulève parfois une difficulté dans la mise en place de ces systèmes.

### 1.2.4 Pilotage des systèmes de production

De nombreux travaux retrouvés dans la littérature [3, 18, 88, 144] permettent d’observer que l’efficacité énergétique globale d’un procédé discontinu est intimement relatif à l’activité du procédé. En effet, les potentialités d’échange d’énergie dépendent principalement de la position temporelle des flux en échange, autrement dit des dates de lancement des opérations. De ce fait, un pilotage optimal des activités du procédé est une des pistes d’optimisation énergétique au sein des procédés discontinus. Nous nous basons sur cette observation pour proposer une méthode d’amélioration du rendement énergétique d’un procédé discontinu. Mais avant de discuter plus en détails de l’approche retenue, nous rappelons dans un premier temps, les fondements de base du pilotage des activités de production et plus particulièrement de la fonction ordonnancement.

#### 1.2.4.1 Enjeux de la gestion de production

Depuis ces dernières décennies, la gestion de production a développé différentes méthodes et outils permettant l’amélioration de la maîtrise de la performance des systèmes de production de biens et de services. Si au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, la tendance était plutôt pour une situation où l’offre était inférieure à la demande, aujourd’hui, l’entreprise est confrontée à une situation de forte concurrence et à des clients toujours plus exigeants en termes de coûts, qualité et délais. De plus, on assiste à une diversification des produits causée en majeure partie par la diminution de leur durée de vie et par une manifestation croissante de la demande. Toutes ces situations entraînent le besoin de la mise en place d’un moyen de production toujours plus flexible. Cette tendance actuelle est cependant loin de disparaître, au contraire, on observe qu’une logique plus étendue de collaboration inter-entreprises (chaîne logistique) commence à s’imposer.

Pour pouvoir produire un service ou un bien, l’entreprise doit donc être en mesure de mobiliser les ressources nécessaires dont il dispose pour atteindre ses objectifs. Dans le cas d’une entreprise de production de biens, la gestion des activités de production aura pour rôle de gérer les différentes dimensions participant au processus de production. D’après PILLET et al. [123], ces dimensions sont les suivantes :

- Gérer la matière. Afin de pouvoir réaliser les produits finis, l’entreprise doit disposer des matières premières et des composants nécessaires. Ces matières doivent être mises à disposition de la production au moment voulu et à la quantité voulue. Gérer la matière c’est donc, savoir gérer l’approvisionnement et savoir gérer le stock ;

- *Gérer les flux d'informations.* Un grand nombre d'informations de nature différentes circule au sein de l'entreprise. Ces informations peuvent correspondre à des commandes, des nomenclatures de produits, des états de stock, des ordres de fabrication, des informations sur le suivi de la production, ..., et ont souvent des destinataires différents, il est donc indispensable de prendre en compte explicitement la gestion de ces données ;
- *Gérer les ressources.* Le terme ressource fait référence aux moyens de production nécessaires pour réaliser la transformation des matières premières en produits finis. Ces moyens peuvent être des ressources matérielles (appareils, matières premières etc.) ou des ressources humaines (opérateurs) et nécessitent une attention particulière afin d'assurer une adéquation entre la charge de travail et la capacité disponible. ;
- *Gérer les hommes.* L'homme est une ressource quasi-omniprésente dans le processus de production et cette ressource est souvent gérée différemment des ressources matérielles. En effet, la performance des opérateurs est fonction de différents paramètres, quantifiables ou non, tels que le climat social, la compétence, la disponibilité etc. Il n'est donc pas recommandé de considérer les hommes comme des capacités de production pures mais ils nécessitent une gestion particulière au sein de l'entreprise.

La gestion de production vise donc un objectif organisationnel, mais il intervient également au niveau des enjeux financiers. En effet, pour qu'une entreprise soit compétitive, elle se doit de générer de la richesse en créant de la valeur ajoutée au niveau des produits. Le contexte du marché ayant tendance à fixer le prix des produits, l'entreprise devra agir au niveau des coûts pour maximiser sa marge bénéficiaire. Les postes de coûts peuvent être de natures très variées (coûts de stockage, coûts de maintenance, temps de changement de série etc.), mais elles se répercutent dans la plupart des cas au niveau des cycles de fabrication, ce qui induit le risque potentiel d'une livraison tardive des clients.

Les situations citées précédemment démontrent la complexité du processus de pilotage de production. Il faut donc disposer de techniques permettant une gestion plus rigoureuse de la production afin d'augmenter la performance et la compétitivité de l'entreprise.

#### 1.2.4.2 Processus décisionnel pour le pilotage de production

D'un point de vue systémique, on peut diviser l'organisation d'une entreprise de production de biens en deux composantes. Un système de gestion appelé également *Système de Pilotage* et un système physique ou *Système Piloté*. Le *Système de Pilotage* est généralement en charge des décisions relatives au fonctionnement efficace de l'activité de production et est majoritairement le siège de flux d'informations. Ces informations peuvent être de sources externes (commandes pour un certain produit, annulations etc.) ou de sources internes (objectifs, procédures etc.). Le *Système Piloté* quant à lui, assure la réalisation des produits et traite simultanément des flux d'informations (plan de production, actions correctives etc.) et des flux matières.

Comme nous avons pu le voir dans la section 1.2.4.1, les problématiques rencontrées en gestion de production sont diverses et font intervenir différentes fonctions de l'entreprise. De plus, chacune de ces problématiques a des impacts différents sur le système de production, par exemple le choix d'un nouveau fournisseur n'a pas le même impact, sur le système dans sa globalité, que le choix d'un outillage pour la maintenance d'un appareil. Il est donc nécessaire de structurer, par affinement successif, le processus décisionnel en une série de sous-problèmes plus faciles à gérer, on parle alors de *planification hiérarchisée* [47].

Cette décomposition assure une certaine hiérarchie de prise de décision et s'applique, en fonction de l'impact sur le système, sur des horizons temporels différents (figure 1.13). On retrouve alors les niveaux de planification suivants :

- *La planification stratégique* qui s'effectue sur un horizon allant de 2 à 5 ans. Elle définit la stratégie globale de l'entreprise concernant les nouveaux produits à lancer, les marchés à pénétrer, les choix d'investissements en nouveaux matériels, les politiques d'embauche, la

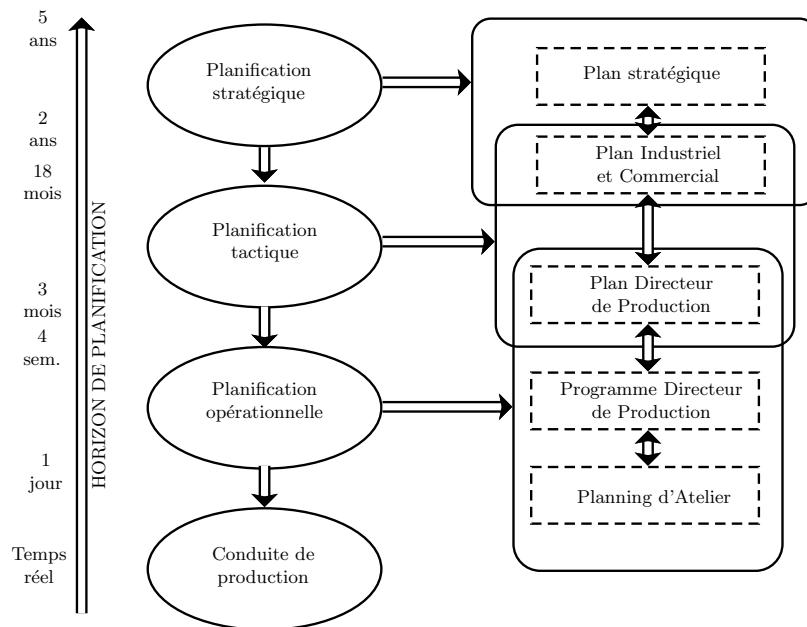


Figure 1.13 – Hiérarchisation des niveaux de planification

définition du chiffre d'affaire et du profit désiré, etc. La planification stratégique se concrétise par l'établissement du plan stratégique et du plan industriel et commercial obtenus à partir des prévisions de vente par famille de produit et suivant la stratégie adoptée par l'entreprise ;

- *La planification tactique*, réalisée sur un horizon à moyen terme (3 à 18 mois), correspond à la gestion prévisionnelle de la production. C'est à dire qu'elle établit l'objectif annuel de production, analyse et planifie les ressources de l'entreprise afin d'atteindre l'objectif fixé et mets en œuvre des plans d'ajustement pour exploiter pleinement les ressources. Basé sur le plan stratégique, le plan industriel et commercial (PIC) ainsi que le plan directeur de production (PDP) est élaboré à partir des prévisions de vente affinées par le carnet de commande ;
- *La planification opérationnelle* réalisée sur un horizon à court terme de l'ordre de la journée à quelques semaines, assure la mise en œuvre des objectifs fixés par la *planification tactique*. A partir du plan directeur de production, la planification opérationnelle établit le programme directeur de production appelé aussi « ordonnancement » et assure l'allocation des commandes aux ressources de production. Ce niveau décisionnel se charge donc de la réalisation des objectifs de production et gère l'adéquation entre la charge de travail et la capacité de production disponible ;
- *La conduite de production* s'effectue en temps réel et s'assure du lancement des ordres de fabrication et du suivi de production. On y retrouve également les activités de commande sur les appareils, l'exécution des tâches opératoires etc.

A ce stade, on remarque un rapprochement entre la planification hiérarchisée et les différents niveaux de recette énoncés dans le paragraphe § 1.1.3.

Il est à noter que deux flux d'informations coexistent entre chaque niveau décisionnels. Un flux d'information descendant fixant les objectifs de chaque niveau et un flux ascendant représentant les informations sur l'état de chaque sous-niveau. Cette dernière permet d'intégrer une logique corrective dans la gestion du processus décisionnel. Les problèmes d'ordonnancement, que nous traitons dans le cadre de cette étude, font partie intégrante de la planification opérationnelle. Elles ont donc une vision à court terme et à très court terme du processus de

production.

#### 1.2.4.3 Généralités sur l'ordonnancement de la production

Les problèmes d'ordonnancement trouvent un large spectre d'application depuis l'informatique ou les télécommunications, où la commodité traitée est de l'information, en passant par le secteur manufacturier, où de la matière subit un ensemble de transformations, jusqu'au secteur de l'énergie [124]. Un problème d'ordonnancement possède donc plusieurs définitions en fonction du domaine d'activité mais de façon générale, elle s'énonce comme suit :

##### Définition 1.5 (Problème d'ordonnancement)

Le problème d'ordonnancement est l'organisation dans le temps de l'exécution d'un ensemble de tâches, en prenant en compte les contraintes liées au temps (càd. les dates limites, les contraintes de précédence, etc.) et les contraintes d'adéquation et de capacité sur les ressources requises pour réaliser ces tâches [97].

Ordonner la production consiste donc, globalement, à trouver la meilleure manière d'exécuter consécutivement, ou simultanément, des opérations sur une même machine ou simultanément sur plusieurs, afin d'obtenir une certaine quantité de produits.

**1.2.4.3.1 Éléments d'un problème d'ordonnancement** Un problème d'ordonnancement fait intervenir un certain nombre de concepts élémentaires que nous décrirons par la suite. Ces concepts font appel aux notions de :

- **Tâches** qui sont les éléments au centre du problème d'ordonnancement. On pourra définir une tâche comme étant une activité ou une quantité de travail devant être exécutée. Chaque tâche possède plusieurs attributs qui le décrivent, à savoir une date de début (ou de fin), et une durée connue ou non. Dans certains cas, une fenêtre temporelle est également associée à chaque tâche, cette fenêtre définit la date de début au plus tôt et la date de fin au plus tard de l'activité. Une tâche consomme (ou produit) une ressource, cette consommation / production peut être uniforme (constante) ou non uniforme (variable), au cours de l'exécution de la tâche. Il faut cependant noter qu'une distinction est faite entre la situation où une tâche peut être interrompue en cours d'activité et celle où elle ne peut l'être. Dans le premier cas, on dit que la préemption est autorisée et que l'ordonnancement est *préemptif*. Dans le cas contraire, l'ordonnancement est dit **non-préemptif**. Dans notre étude, nous traitons ces derniers types de tâches ;
- **Ressources** qui représentent un ensemble de commodités, de moyens techniques ou humains nécessaires à l'exécution d'une ou de plusieurs tâches. En fonction de la capacité disponible dans le temps, on peut distinguer les ressources *renouvelables* et les ressources *consommables*. Une ressource est dite *renouvelable* lorsqu'elle retrouve sa capacité d'origine à la fin de l'exécution de la tâche qui la consomme (machine, électricité, vapeur etc.). Dans le cas contraire, c'est à dire si la ressource est altérée (augmente ou diminue en capacité), elle est dite *consommable* (matières premières, composants, carburants fossiles etc.). Par ailleurs, en fonction de sa disponibilité temporelle, une ressource est dite *disjonctive* lorsqu'une seule tâche peut lui être affectée à un moment donné, elle est dite *cumulative* dans le cas contraire (figure 1.14) ;
- **Contraintes** qui sont de natures très diverses, mais peuvent être classées de manière générale en *contraintes de ressources* et en *contraintes temporelles* [97]. Parmi les *contraintes temporelles* on retrouve les contraintes d'allocation temporelles lorsqu'une tâche est obligée de s'exécuter dans une certaine plage de temps, et les contraintes de précédence qui offrent une représentation alternative à la notion de *gamme de fabrication*. Les *contraintes*

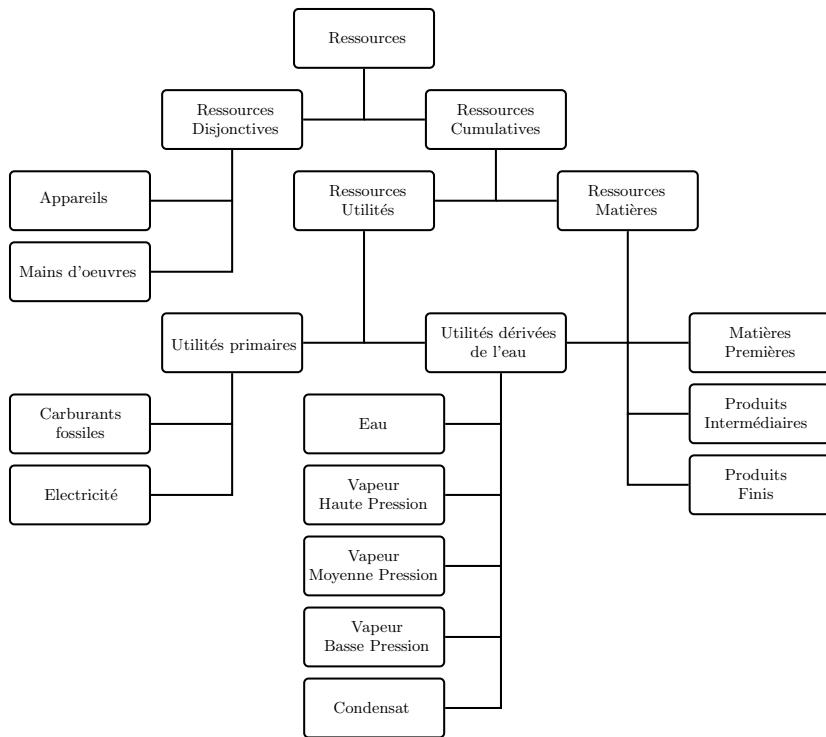


Figure 1.14 – Classification des ressources

de ressources quant à elles, traduisent la disponibilité des ressources utilisées pour la réalisation d'une tâche, on retrouve ici la différenciation en fonction du type de ressource utilisé (disjonctive ou cumulative) ;

- **Critère ou fonction objectif** qui représente un objectif à atteindre. Il est souvent difficile de juger si une configuration d'ordonnancement est meilleure qu'une autre lorsqu'on est face à un ensemble de solutions satisfaisant les contraintes soumises au problème. Les critères permettent donc de faire un choix, suivant une direction donnée (maximisation ou minimisation), sur la qualité d'un ordonnancement. On dit généralement qu'un critère est *régulier* si il évolue de façon monotone en fonction des dates d'achèvement des tâches (minimisation du retard maximum ou du maximum des dates d'achèvement etc.). Inversement, un critère est dit *irrégulier* quand sa variation, par rapport à la date de fin d'exécution des tâches, n'est pas monotone (minimisation des coûts de stockage ou des encours etc.). Il est cependant courant de retrouver des problèmes d'ordonnancement dits « multicritères » ou « multiobjectifs », c'est généralement le cas lorsque l'on cherche à optimiser conjointement plusieurs objectifs qui peuvent être contradictoires. Par exemple, on peut citer la maximisation de la production conjointement avec la minimisation des consommations énergétiques, on remarque d'emblée que ces deux objectifs sont contradictoires. Plusieurs méthodes sont alors proposées dans COLETTE et SIARRY [33] pour traiter ces genres de problème d'optimisation.

Les éléments précédents représentent les caractéristiques fondamentales d'un problème d'ordonnancement, cependant, en fonction du secteur d'activité considéré, des contraintes additionnelles peuvent et doivent être formulées.

#### Remarque 1.1 (Contraintes de bilan)

Dans le cas des procédés discontinus, des contraintes relatives aux bilans (énergétiques et massiques) et relatives aux opérations multimodales, devront être ajoutées au problème afin d'obtenir une représentation fidèle et plus réaliste du système étudié.

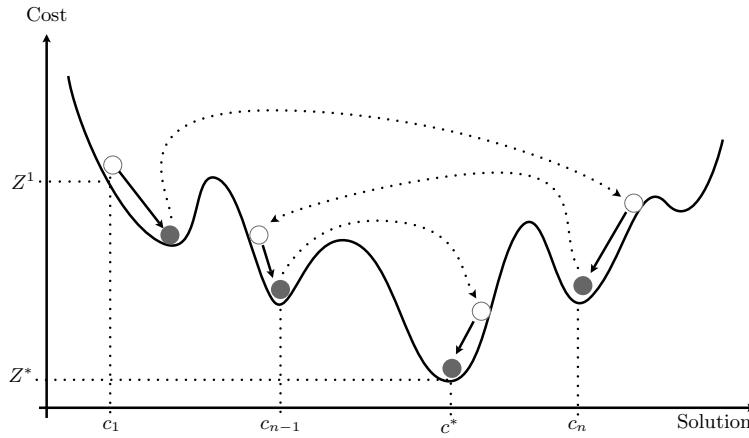


Figure 1.15 – Parcours de l'espace des solutions

**1.2.4.3.2 Méthodes d'optimisation pour l'ordonnancement** De manière générale, le classement des méthodes d'optimisation peut être réalisé en fonction de la qualité de la solution recherchée par le décideur. Cette classification fait appel à la notion d'optimalité. En effet, une solution ou configuration donnée est dite optimale (au sens global) par rapport à un critère donné lorsqu'il est meilleur que tout autre solution du problème. Inversement, une solution est dite optimale (au sens local) lorsqu'il correspond à la meilleure valeur du critère dans une zone restreinte de l'espace des solutions.

Sur la figure 1.15 où la fonction objectif est en minimisation,  $c^*$  est l'optimum global du problème tandis que  $c_{n-1}$  ou  $c_n$  sont des optimums locaux. Lorsque l'on recherche à déterminer les optimums globaux, il est courant de faire appel aux méthodes issues de la recherche opérationnelle. Ces méthodes appelées *méthodes exactes*, par opposition aux méthodes dites *approchées* (figure 1.16), permettent d'obtenir la ou les solutions optimales du problème, en effectuant une exploration exhaustive de l'espace des solutions. Par ailleurs, dans le cas des *méthodes approchées* et principalement des *métaheuristiques*, la recherche commence à partir d'une configuration  $c_1$  quelconque (figure 1.15), ou d'un ensemble de configurations initiales de l'espace des solutions. Cette solution initiale est obtenue rapidement par construction (heuristique spécialisée, heuristique gloutonne etc.), ensuite des stratégies de *diversification* (perturbation non déterministe ou sauts aléatoires) et d'*intensification* (recherche locale) sont effectuées un nombre fini de fois jusqu'à l'obtention d'un certain critère d'arrêt (nombre maximal d'itération, non-amélioration du critère, tolérance etc.). La meilleure solution obtenue est alors considérée comme optimale, toutefois, à cause de cette dimension probabiliste du parcours de l'espace des solutions, aucune garantie d'optimalité globale n'est assurée par l'utilisation de ces méthodes.

Nous citons ci-après quelques méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement, suivant une classification par discipline scientifique.

- Approche par des méthodes issues du domaine de la *Recherche Opérationnelle*. La plupart des problèmes d'ordonnancement sont des problèmes combinatoires difficiles, ceci étant dû à l'augmentation quasi-exponentiel du nombre de configuration possible avec la taille du problème. Cette difficulté peut être évaluée en fonction du temps d'exécution (*complexité en temps*) et en fonction de l'occupation mémoire pour la gestion des structures de données (*complexité en espace*). Les méthodes d'optimisation issues de la recherche opérationnelle utilisent souvent la **programmation linéaire** (PL) comme moteur d'inférence. Elles permettent d'obtenir l'optimum global d'un problème moyennant un temps de calcul assez important pour certaines instances. En effet, en termes de complexité algorithmique,

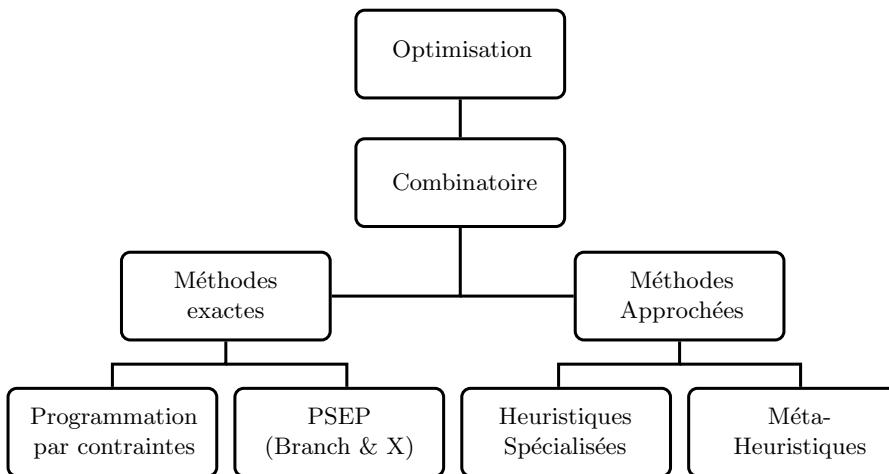


Figure 1.16 – Classification des méthodes d'optimisation monobjectifs

les problèmes de décision associés aux problèmes d'ordonnancement appartiennent à la catégorie des problèmes combinatoires  $\mathcal{NP}$ -complet, autrement dit, il n'existe actuellement aucune preuve qu'un algorithme à temps polynomial permette de résoudre ces types de problèmes. Ainsi, lorsque le décideur est confronté à un problème de taille industrielle, il est souvent impossible de résoudre à l'optimal le problème considéré car soit le temps nécessaire pour l'obtention de la solution optimale (ou d'une bonne solution) est prohibitif, soit la mémoire dédiée pour stocker l'arbre de recherche est insuffisante. Parmi les méthodes exactes, on retrouve les méthodes de la famille Branch & X, utilisant une procédure par séparation et évaluation progressive tel que le Branch & Bound, ou celles associées à des décompositions du problème en sous problèmes lorsque la structure du modèle le permet (Branch & Price, Branch & Cut, décomposition de Benders, décomposition de Dantzig-Wolfe etc.) [110] ;

- Approche par des méthodes issues de l'*Intelligence Artificielle*, elles sont diverses et trouvent principalement leurs applications dans l'aide à la décision. Pour palier aux difficultés rencontrées par l'utilisation des méthodes exactes, des méthodes moins gourmandes en temps (heuristiques spécialisées ou métáheuristiques) ont été développées. Il peut s'agir ici soit d'approches utilisant des algorithmes de recherche inspirés du fonctionnement du cerveau humain comme les *réseaux de neurones*, soit d'algorithmes inspirés du comportement animal comme les *colonnes de fourmis* ou les *essaims particulaires*, soit d'algorithmes utilisant les concepts d'évolutions comme les *algorithmes génétiques* [38]. Parmi les méthodes issues de l'intelligence artificielle utilisées pour résoudre les problèmes d'ordonnancement, on retrouve la **programmation par contraintes (PPC)** qui utilise la propagation de contraintes comme moteur d'inférence pour résoudre des problèmes de faisabilité ou d'optimisation [11] ;
- Évidemment, des approches combinées dites *hybrides* sont également retrouvées. Parmi, ces dernières plusieurs recherches couplant une méthode exacte et une méthode issue de l'intelligence artificielle ont été menées et ont démontré leurs efficacités sur les problèmes d'ordonnancement [12]. D'autre part, la tendance actuelle est de coupler les métáheuristiques avec la programmation mathématique, cette discipline assez récente est connue sous la dénomination de *matheuristic* et de nombreux travaux sont actuellement réalisés dans cette direction [20, 101].

Nous nous intéressons ici au développement d'une méthode hybride alliant programmation linéaire en variables mixtes et programmation par contraintes. Nous établirons dans un premier

temps le modèle de PLVM afin de servir de référence au modèle hybride. Ensuite, le couplage PLVM/PPC sera conçu en faisant en sorte de tirer parti de l'avantage de chacune des approches.

#### 1.2.4.4 Ordonnancement et intégration énergétique

Les techniques d'intégration énergétique tels que l'analyse *Pinch* [79] ont largement été utilisées d'une part, pour estimer le potentiel de récupération énergétique et d'autre part pour concevoir le système de récupération au sein d'un *procédé continu*. En effet, la prédominance du fonctionnement en régime permanent dans ces types de procédés permet de considérer plus aisément les potentialités d'échange au niveau du système et ceci, même dès la phase de conception.

Toutefois, le cas des procédés *discontinus* régit par une succession de régimes transitoires et permanents, complexifie la problématique considérée. Si ce comportement confère une certaine flexibilité aux procédés *discontinus*, afin de pouvoir s'adapter aux variations du marché, il entraîne en contrepartie une difficulté lors de l'application des méthodes d'intégration énergétique. En effet, contrairement aux procédés dits *continus*, dans les procédés *discontinus* les courants chauds et froids sont disponibles par intermittence et à des potentiels dépendant généralement de la taille de lot. Sachant que pour une même quantité de produits finis à réaliser, il peut exister d'une part, d'une multitude de manière de diviser la quantité commandée en tailles de lots différentes, et que d'autre part, il existe plusieurs manières de séquencer les opérations avec chacun une consommation/production d'énergie différente, on constate très rapidement qu'il existe une forte corrélation entre l'efficacité énergétique du procédé et la manière dont celle-ci est ordonnancée.

Par ailleurs, de récentes recherches ont mis en évidence le fait qu'un meilleur pilotage de l'unité de production couplé avec la centrale d'utilités (figure 1.11) permettait d'améliorer le rendement énergétique global du procédé [3, 16, 146]. Cette approche peut facilement être démontrée par la figure 1.17 sur laquelle on peut distinguer le fait qu'un meilleur pilotage de l'atelier permet d'augmenter la potentialité de récupération d'énergie et donc, d'améliorer globalement la performance du procédé en terme d'énergie. Dans le même contexte, des recherches menées à des fins de conception ou d'exploitation, intégrant le pilotage de l'unité de production avec le réseau d'échangeurs de chaleur ont permis d'augmenter notamment le potentiel de récupération énergétique d'un procédé [42, 91].

Mais on a pu constater que très peu de travaux ont été consacrés au pilotage intégré de l'unité de production et du réseau d'échangeur en considérant partiellement ou intégralement les contraintes de la centrale de production d'utilité [39]. C'est dans cette perspective que s'est inscrite cette étude, dont l'intérêt semble inévitable pour une meilleure maîtrise de l'efficacité énergétique des procédés discontinus. L'apport de ce travail se situe donc dans la prise en compte intégrale du système de la figure 1.11 en appliquant le concept de récupération énergétique et de pilotage de production.

#### 1.2.5 Simulation des procédés

Le terme simulation est défini comme « l'expérimentation d'une imitation simplifiée d'un système afin d'avoir une meilleure compréhension et/ou en vue d'une amélioration lorsque celui-ci (le système) progresse dans le temps » [28]. Bien que cette définition parle d'elle-même, elle introduit quelques notions essentielles qu'il est nécessaire de présenter. Tout d'abord, la notion de *système* fait généralement référence à une collection de parties organisée pour répondre à un objectif bien précis. Dans le cadre de cette thèse, le système considéré est celui représenté par la figure 1.11 et fait intervenir un ensemble de composantes (atelier, réseau d'échange, centrale d'énergie) combinées entre elles afin de produire un bien (commande client). Parmi les caractéristiques des systèmes de production, on peut citer le fait qu'ils sont le siège d'*interconnexions*,

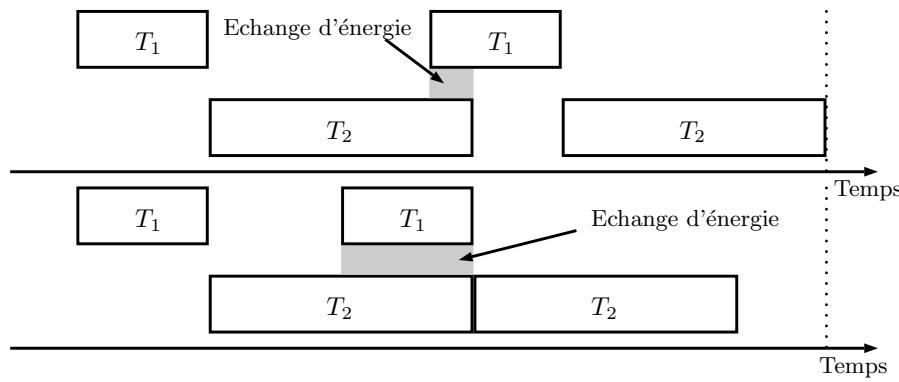


Figure 1.17 – Apport de l'ordonnancement sur la récupération d'énergie

assujettis à des *variations* et *complexes* par nature [132]. La complexité des systèmes considérés peut donc être décomposée en complexité combinatoire et en complexité dynamique.

- La complexité combinatoire est directement liée au nombre de composant impliqué dans le système, à titre d'exemple, dans le cas du problème du voyageur de commerce [52], le nombre de combinaison possible de route pour visiter  $n$  villes est équivalent à  $\frac{(n-1)!}{2}$ , la complexité dans ce cas précis est donc directement proportionnelle à la taille du problème traité. Dans le cadre de nos travaux, la complexité combinatoire peut être représentée à travers le nombre de tâches (lots) devant être réalisés ;
- La complexité dynamique quant à elle, ne dépend pas directement de la taille de l'instance mais plutôt, est relatif au degré d'interconnexion au sein du système. L'interconnexion au sein du système est due au fait que chaque composant fonctionne rarement tout seul, mais au contraire affecte d'une manière ou d'une autre, les autres composants participant à la réalisation de l'objectif commun. Dans le cadre de nos travaux, les interconnexions concernent principalement celles existantes entre l'atelier de production, la centrale d'énergie et le réseau d'échange d'énergie. Tout cela pour dire que plus le niveau d'interconnexion est élevé, plus la réaction du système est difficilement prévisible.

De ce fait, la compréhension de ces systèmes interconnectés fait souvent appel à des modèles informatiques de simulation sur lesquels chaque comportement du système peut être étudié en profondeur sans risquer d'altérer le système réel.

### 1.2.5.1 Enjeux et intérêts de la simulation

Nous avons défini précédemment, certaines caractéristiques intrinsèques des systèmes. Bien qu'il soit déjà difficile de prédire la performance d'un système réel lorsque celui-ci est sujet à l'un des éléments précédents, l'application simultanée de ces différents aspects rend particulièrement dur, voir impossible, la prédiction du comportement du système. C'est à ce stade que la simulation intervient car il dispose des outils nécessaires pour gérer efficacement les notions de variabilité, d'interconnexion et de complexité. La simulation présente donc plusieurs avantages dont les plus évidents sont les suivants [132] :

- le coût en terme de temps et d'argent : la réalisation d'expériences sur un système réel peut être très coûteux. Il est souvent très cher, voir impossible, d'interrompre le fonctionnement d'une installation existante, car en plus des coûts engendrés par les changements effectués, il existe une certaine période d'ajustement pour que le nouveau système soit pleinement opérationnel. Ce temps d'adaptation peut être plus ou moins long et affecte directement la performance du système. Les conséquences directes dans le cas des systèmes de production sont le fait que les clients exigent un niveau de qualité et de satisfaction élevé et la baisse de performance au sein du système risque de coûter cher à l'entreprise si ces

derniers décident de s'approvisionner ailleurs. Avec la simulation par contre, tester une modification ne coûte pas plus que le temps nécessaire pour modifier le modèle et collecter les résultats (si les connaissances sont présentes au sein de l'entreprise) et cela, sans interrompre le fonctionnement du système réel ;

- l'expérimentation de nouveaux systèmes : lorsque le système n'existe pas encore, il est impossible d'en décrire son comportement sans avoir recours à la simulation. De plus, l'obtention d'un système répondant aux besoins spécifiés dans le cahier des charge se fait généralement par l'expérimentation d'une série d'alternatives et de configurations différentes. On est précisément dans les problématiques en phase de conception dont un des problèmes les plus représentatifs est la conception des recettes de fabrication dans le cas des procédés discontinus ;
- l'amélioration d'un système existant se traduit souvent par la réalisation d'analyses de type « What-if » nécessaires aux ingénieurs pour la compréhension, la prédiction et l'amélioration du pilotage du système réel comme la gestion des ressources critiques (goulets), l'amélioration de l'efficacité énergétique, la supervision ou le contrôle face aux aléas etc.. La simulation s'avère très pratique pour traiter ces analyses, de plus, lorsque les contraintes que le système doit satisfaire varient périodiquement (par contraintes, nous entendons les sollicitations dues aux fluctuations du marché ou les réglementations normatives etc.), l'établissement de scénario, à travers la simulation, intégrant ces nouvelles sollicitations peut se faire de façon indépendante du système réel sans que celui-ci soit perturbé.

La simulation permet alors d'obtenir un point de vue et donc un raisonnement sur le fonctionnement d'un système, en vue de l'améliorer, d'y concevoir et de tester de nouveaux concepts ou simplement d'y expérimenter ou d'y appliquer des concepts existants sans risquer d'interrompre le fonctionnement normal du système. De plus, face aux enjeux futurs évoqués dans la section 1.1.5, la simulation s'avère être une des pistes prometteuses permettant de supporter l'innovation et d'apporter une première réponse à travers le développement de modèles numériques avant la réalisation proprement dite de ces nouveaux systèmes.

### 1.2.5.2 Modélisation et simulation des procédés

Dans le cadre particulier du génie des procédés, la création d'un modèle d'un phénomène physico-chimique peut s'effectuer de trois manières différentes :

- Par l'établissement de *modèles comportementaux* dans lesquels l'information expérimentale tient une part importante. En effet, l'établissement du modèle est réalisé à partir d'une quantité importante de données expérimentales. Le modèle traduit donc fidèlement le système dans le cadre des conditions auxquelles les mesures ont été réalisées, cependant, en dehors de ce contexte, son caractère prédictif perd en précision. Ces genres de modèles possèdent l'avantage d'être rapides à développer et ne nécessitent généralement aucune expertise particulière concernant le système étudié ;
- Par l'établissement de *modèles de connaissance pure*. A l'instar des modèles comportementaux, les modèles de connaissance pure sont établis à partir des lois fondamentales de la physique. Le niveau d'expertise du modélisateur, ainsi que sa perception du fonctionnement du système, jouent donc un rôle prépondérant dans la validité du modèle. Dans ce cas particulier, les données expérimentales sont limitées à des expériences bien ciblées répondant aux besoins du modélisateur et l'avantage de ces modèles réside dans le fait qu'ils possèdent un large spectre d'application mais nécessitent souvent un effort considérable lors du développement ;
- Par l'établissement de *modèles phénoménologiques* [43] qui sont un compromis entre les modèles purement empiriques et les modèles de connaissance pure. De ce fait, les modèles phénoménologiques permettent un arbitrage entre la fidélité du modèle par rapport au système réel et le temps nécessaire pour la réalisation de la modélisation.

Quant à la simulation des procédés, l'attention a tout d'abord été dirigée vers les procédés fonctionnant en mode continu. Ceci est dû au fait que la majorité des procédés développés dans la deuxième moitié du siècle dernier, concernait les procédés continus. Ainsi donc, il existe actuellement une maîtrise avancée de la simulation dans le cas continu. En effet, les procédés continus sont des procédés largement dominés par les régimes permanents, ce qui a donné naissance vers le début des années 60 aux simulateurs dits *statiques ou en régime permanent*. Ces simulateurs permettent de prédire l'état complet du procédé autour d'un point de fonctionnement. A l'heure actuelle, il existe un bon nombre de simulateur statique spécialisé au domaine des procédés, pour ne citer que *Aspen Plus* et *Aspen Hysys* d'Aspen Technology ou de *Prosim +* de Prosim S.A.

Lorsque l'intérêt est orienté d'avantage vers l'étude des régimes transitoires, on fait souvent référence aux simulateurs dits *dynamiques*. En effet, les simulateurs dynamiques permettent de suivre l'évolution des variables d'état (température, pression, composition etc.) au cours du temps, et cela pour chaque appareil pris individuellement ou pour l'intégralité du procédé. La simulation dynamique peut alors être décomposée en plusieurs catégories [119] parmi lesquelles :

- *la simulation dynamique continue* qui permet d'étudier les régimes transitoires autour d'un point de fonctionnement donné. Ces simulateurs manipulent les variables d'états associés aux opérations unitaires fonctionnant en mode continu ou discontinu. L'évolution de ces variables d'états se fait de manière continue et fait appel à des outils bien définis des mathématiques tels que les systèmes d'équations différentielles (ordinaires ou partielles), les systèmes d'équations algébriques, les méthodes numériques d'intégration etc. On fait donc référence à un *système à dynamique continue* lorsque l'espace d'état est continu et lorsque les transitions d'états se font de façon continue dans le temps. Le panel d'outil traitant de la simulation dynamique continue est vaste surtout depuis le début des années 90 à cause principalement de la disponibilité en puissance de calcul de plus en plus accrue. Parmi ces outils on peut citer *Aspen Dynamics*, *gPROMS* dans le domaine des procédés ou *Simulink* dans le domaine du contrôle ;
- *la simulation à événements discrets* [153], d'autre part a fait ses preuves dans les systèmes de production manufacturiers, les réseaux de communication, les systèmes informatiques ou les systèmes de files d'attente. La simulation à événements discrets fait appel à l'algèbre de Boole ou à des formalismes d'état/transition pour représenter l'évolution des variables d'états que l'on nomme plus spécifiquement une « trajectoire ». Un système est dit Systèmes à Événements Discrets (SED) lorsque l'espace d'état est naturellement défini dans un ensemble discret et les transitions d'états uniquement observés à des instants particuliers appelés « événements ». Parmi les formalismes utilisés dans le cadre des SED on peut retrouver le formalisme des réseaux de Pétri (RdP), le Grafcet, les machines ou automates à états finis (FSM) ou encore les Statecharts. Parmi les outils traitant des SED on retrouve *Arena*, *Witness*, *Flexsim*, *ProModel*, *ModSim*, *AutoMod* ou *GPSS/H* et bien d'autres encore.. ;
- *la simulation dynamique hybride* [98], concerne l'étude des Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH). Ces derniers incorporent simultanément la dynamique discrète et continue propres aux deux systèmes discutés précédemment. En effet, dans de tels systèmes, un automate logique et un système intégré est couplé à un processus physique continu. L'étude de l'évolution de ces systèmes hybrides nécessite généralement la prise en compte de modèles mathématiques tels que les équations algébro-différentielles pour la description de la dynamique des composants continus et des formalismes d'états/transitions pour la description de la dynamique discrète des composants discrets. La simulation dynamique hybride s'attèle donc à fournir un cadre de travail et un ensemble d'outils et de méthodes permettant de représenter et de modéliser les systèmes dynamiques hybrides. Ces simulateurs doivent alors intégrer et faire collaborer les noyaux de calculs capables de résoudre

efficacement les modèles mathématiques associés à la partie continue et le moteur de traitement permettant de gérer les commutations logiques liées à la partie discrète. Ces outils sont particulièrement bien adaptés pour représenter les procédés discontinus, cependant, si la plupart sont des outils dédiés à un fonctionnement précis auquel le comportement manquant a été ajouté, le panel d'outils disponible intégrant pleinement la fonctionnalité hybride est assez limité. Parmi les simulateurs dynamiques hybrides les plus récemment développés, dédiés au domaine des procédés on peut citer *gPROMS*, *ABACUS II*, *PrODHyS* [60]. Par ailleurs, des simulateurs hybrides plus génériques comme *Modelica*, *HyVisual*, *Shift*, *Charon* ou *Stateflow/Simulink* sont également disponibles [22].

Notre étude concerne principalement la simulation dynamique hybride. En effet, les procédés discontinus engendrent simultanément la prise en compte de dynamiques continues et de comportements discrets représentés par des perturbations ou des commutations. Les perturbations sont de nature diverses et peuvent exister à différentes échelles des procédés. Par exemple, à l'échelle de la matière, les changements d'états ou de phases représentent des perturbations, à l'échelle de l'opération unitaire et/ou du procédé, le démarrage et l'arrêt d'un appareil, l'occurrence d'événements tels que le franchissement de seuils entraînent des discontinuités dans le comportement global du système. Il devient alors clair que la simulation dynamique hybride joue un rôle principal dans l'étude de ces types de procédés.

### 1.2.5.3 Vers un couplage optimisation et simulation

L'intérêt du couplage optimisation/simulation est démontré par le fait que la simulation, prise individuellement, est incapable, mis à part à travers une énumération explicite, de déterminer l'optimalité d'une configuration. En effet, il est souvent nécessaire d'effectuer la simulation d'un grand nombre de scénarios pour pouvoir juger de la supériorité d'une configuration par rapport à une autre. Ceci est causé par le fait que le modèle de simulation reçoit comme *intrants* un certain nombre de paramètres initiaux dont dépendra le résultat de la simulation. Or, la majorité de ces paramètres sont définis dans l'espace des réels (débits, taille de lot, date de lancement, consommations énergétiques etc.), on peut donc imaginer le nombre de configurations possibles liés à la variation d'un seul paramètre.

Cette situation est cependant loin de refléter la réalité, car le nombre de paramètres nécessaires pour initialiser la simulation est rarement de l'ordre de l'unité. On assiste alors à une infinité de possibilités pour un jeu de paramètres initiaux relativement faible et il est clair que l'énumération exhaustive des valeurs de chacun de ces paramètres en vue de les simuler et ensuite d'en analyser les résultats reviendrait à dépenser un coût faramineux pour une solution sans garantie d'optimalité.

Pour cette raison, une étape préliminaire d'optimisation, suivant un objectif donné, est réalisée en amont de la simulation. Cette étape aura pour objectif de fixer et de fournir une approximation des valeurs des différents paramètres influant sur la qualité de la solution finale. L'avantage de l'optimisation est qu'elle est capable de fournir une solution optimale (ou du moins proche de l'optimale) et permet, lorsque le modèle est bien formulé, d'obtenir une solution de bonne qualité avec un effort de calcul raisonnable.

Cependant, l'optimisation possède un point faible, elle n'offre aucune garantie sur la faisabilité de la solution lorsque celle-ci est confrontée au procédé réel. Cela est dû au fait que le modèle d'optimisation est une représentation simplifiée du procédé, de ce fait, le modèle s'établit sur la base d'hypothèses simplificatrices (linéarisations, approximations etc.) pouvant, lorsqu'elles sont mal formulées, conduire à une solution systématiquement irréalisable.

L'intérêt du couplage devient alors évident et permet de bénéficier des avantages communs fournis par chaque approche respective. Néanmoins, il est clair que l'obtention d'une solution satisfaisante devra s'effectuer de façon incrémentale et itérative, ainsi donc des étapes d'analyse et de diagnostic devront être réalisées afin de pouvoir confronter les résultats de l'optimisation

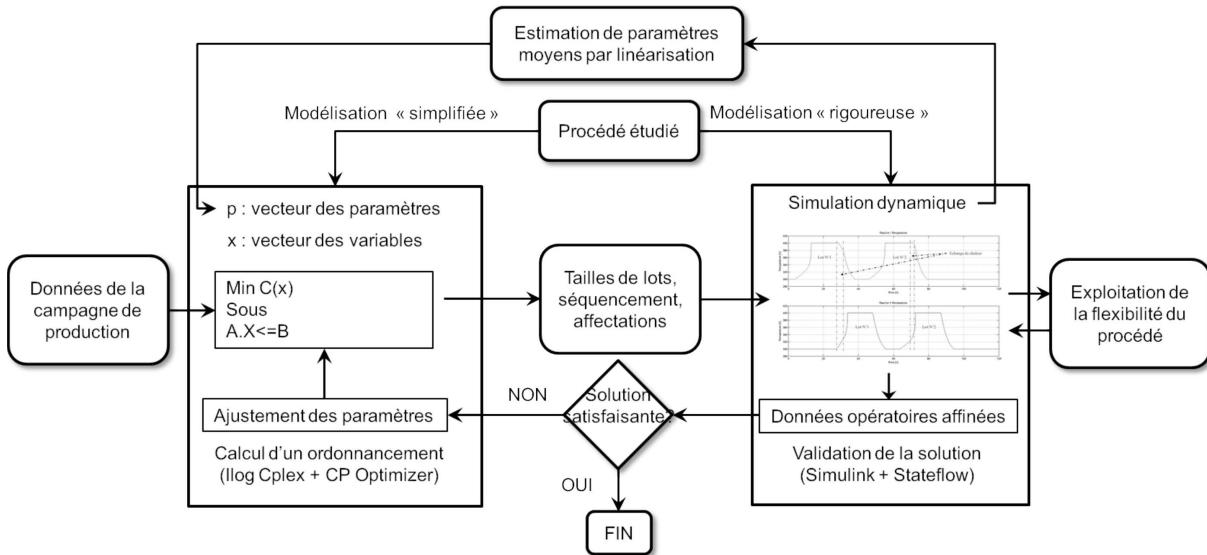


Figure 1.18 – Méthodologie de couplage optimisation/simulation

avec celle de la simulation lorsque ce dernier produit une infaisabilité. Ces analyses permettront d'ajuster les paramètres du modèle d'optimisation afin de diminuer le gap entre les solutions des deux étapes respectives. Le schéma de la figure 1.18 résume la logique de la démarche proposée.

## 1.3 État de l'art et analyse bibliographique

Nous abordons ici des principaux travaux, issus de la littérature, concernés par cette thèse. Nous veillons également à fournir préalablement les notions fondamentales, telles que les définitions, manipulées dans nos travaux.

### 1.3.1 Intégration énergétique des procédés discontinus

#### 1.3.1.1 Introduction

L'intégration énergétique est une méthodologie consistant à combiner les demandes et productions d'énergie au sein d'un procédé dans le but de minimiser les fournitures d'énergie venant de l'extérieur en maximisant la récupération énergétique au sein du procédé. Lorsque l'énergie en question est de la chaleur, les consommations énergétiques se manifestent au niveau des opérations de l'atelier nécessitant une chauffe et les productions énergétiques correspondent aux opérations de l'atelier dégageant de la chaleur. L'intégration énergétique dans le cas de cette situation, consiste à combiner, par récupération à travers le réseau d'échangeur (figure 1.11), les dégagements et consommations de chaleur afin de minimiser la fourniture d'énergie venant de la centrale de cogénération ou venant d'un fournisseur d'énergie externe. Notons que l'énergie provenant d'une source externe (centrale de cogénération ou réseau interconnecté d'électricité) engendre un coût d'exploitation nettement plus important que celui engendré par l'utilisation d'un système de récupération d'énergie (échangeur de chaleur). Il est donc plus avantageux, économiquement parlant, de valoriser l'excédent d'énergie au sein de l'atelier en le réutilisant plutôt que de payer cet excédent à un prestataire externe pour combler le déficit énergétique du site.

Nous présentons dans cette section les concepts de base de l'intégration énergétique des procédés ainsi que les méthodes utilisées pour évaluer le potentiel de récupération énergétique d'un site. On peut dès à dire qu'il existe deux modes d'intégration à savoir :

- l'intégration énergétique directe où l'énergie libérée devra être utilisée immédiatement au risque d'être perdue. Afin de permettre cette récupération, l'intégration énergétique directe nécessite l'utilisation d'appareils d'échange (échangeurs de chaleur) dont la structure globale forme le réseau d'échangeur de chaleur ;
- l'intégration énergétique indirecte où l'énergie libérée peut être stockée dans des conditions précises afin d'être utilisée ultérieurement moyennant un certain apport énergétique afin de maintenir les conditions opératoires liées aux stockages. On retrouve ici le concept de stockage énergétique.

La différence majeure existant entre ces deux modes d'intégration réside donc dans la disponibilité temporelle de l'énergie pouvant être récupérée lors de la campagne de production. Nous discuterons de l'application de ces modes d'intégration dans le chapitre 3 mais nous aborderons dans les paragraphes qui suivent, les principales méthodes d'estimation du potentiel de récupération énergétique d'un site et des travaux réalisés dans la littérature pour la maîtrise de l'énergie au sein des procédés discontinus.

### 1.3.1.2 Méthodes d'estimation énergétique

Nous abordons ici des différentes méthodes utilisées dans la littérature pour estimer le potentiel de récupération énergétique d'un procédé. La plupart des travaux réalisés font référence à l'énergie thermique, on parle alors d'*intégration thermique*. Parmi les premiers travaux réalisés, ceux de CLAYTON [32] introduisent la méthode Time Average Model (TAM) qui consiste à assumer le fait que les flux (à chauffer ou à refroidir) du procédé discontinu coexistent pendant toute la durée d'exécution du lot. Autrement dit, l'énergie dégagée par un flux est moyennée par la durée d'exécution du lot et le procédé discontinu se comporte comme un procédé continu. De ce fait, l'ordonnancement des flux devant échanger de l'énergie n'est pas nécessaire car tous les flux sont censés exister simultanément. L'objectif énergétique fourni par cette méthode n'est donc pas réalisable à travers uniquement une intégration énergétique directe et constitue, de ce fait, une surestimation de la quantité d'énergie pouvant être récupérée.

Afin de fournir une estimation plus réaliste de ce potentiel, KEMP et DEAKIN [80, 83] ont proposés le Cascade Analysis qui permet d'introduire la dimension temporelle (ordonnancement) au Problem Table Algorithm [96] utilisé pour l'estimation énergétique des procédés continus. Cette double dimension Température-Temps permet de cascader la chaleur d'un niveau de température à l'autre et d'une tranche temporelle à l'autre, autorisant ainsi la prise en compte du stockage de chaleur. La principale conséquence de cette méthode réside dans le fait que la localisation de la température de pincement est dorénavant variable dans le temps. L'analyse en cascade, du fait de la double dimension température-temps, permet de localiser et d'évaluer plus rapidement les potentialités de ré-ordonnancement permettant de maximiser la quantité d'énergie échangée, cependant, ces améliorations sont généralement de nature itératives et une vision globale de l'analyse en cascade est souvent difficile du fait de la nature matricielle de la méthode.

La méthode Time Slice Model (TSM) proposée par LINHOFF, ASHTON et OBENG [95] quant à elle, décompose, sur la base d'un l'ordonnancement, le procédé discontinu en une série de sous-procédés continus. Chaque sous-procédé continu est alors associé à chaque tranche de temps et une analyse TAM est effectuée de telle sorte que l'estimation énergétique obtenue à travers le TSM est la somme des analyses TAM effectuées pour chaque tranche de temps. Inversement à la méthode TAM, la méthode TSM permet d'obtenir une estimation de la consommation énergétique, réalisable à travers une intégration directe. L'analyse TSM est donc une analyse en cascade, simplifiée, dans laquelle, la chaleur est uniquement transférée sur la dimension tempé-

rature.

Parmi les méthodes permettant d'identifier les potentialités de ré-ordonnancement, la méthode Time Event Model (TEM) [112] utilise une représentation graphique des consommations des principaux équipements constituant le procédé et les représente sous forme de profils de ressources pour identifier les goulots d'étranglements et les chemins critiques. L'analyse qui en découle permet d'identifier assez facilement les propositions de ré-ordonnancement à appliquer à la campagne afin de maximiser la récupération énergétique directe et/ou indirecte.

Par ailleurs, lorsqu'on parle d'intégration énergétique indirecte, l'une des méthodes utilisées pour la conception des réseaux de stockage d'énergie est celle proposée par STOLTZE et al. [141, 142], étendue par MIKKELSEN [108], et s'intitulant Permutation Method (PM). Cette méthode consiste à déterminer, à l'aide d'heuristiques, le couplage optimal entre les cuves de stockage thermique et les flux du procédé, permettant ainsi de créer une série de superstructure de réseau d'échange atteignant jusqu'à 25% d'amélioration.

Finalement, l'analyse Time Pinch Analysis (TPA) proposée par WANG et SMITH [156] utilise comme contrainte principale le temps, rendant secondaire la température. Autrement dit, les rôles respectifs de la température et du temps sont inversés et la chaleur est d'abord transférée à travers les tranches de temps en partant du plus haut niveau de température pour ensuite être cascadée vers les niveaux inférieurs si un excès de chaleur existe. Cette procédure est ensuite répétée en boucle tant que la condition précédente est satisfaite. Le potentiel de récupération énergétique peut alors être estimé fidèlement et les stockages de chaleur ainsi que leurs durées peuvent être identifiés par l'utilisation de la grande courbe composite temporelle. Cette grande courbe composite permet d'avoir un aperçu des possibilités de ré-ordonnancement permettant de réduire le besoin de stockage thermique.

La liste des méthodes que nous avons cité précédemment ne constitue qu'une partie des méthodes actuellement proposées dans la littérature, elle est donc loin d'être exhaustive. Il est néanmoins à faire remarquer, que toutes les méthodes précédentes nécessitent la connaissance préalable d'un ordonnancement initial, ordonnancement qui sera ensuite traité sous forme tabulaire, matricielle ou graphique afin d'estimer l'énergie pouvant être récupérée. Elles servent donc uniquement à estimer le potentiel d'une configuration d'ordonnancement donnée, et au mieux, à proposer itérativement des améliorations de ré-ordonnancement afin d'atteindre les objectifs énergétiques visés. Ce comportement dépendant d'une configuration d'ordonnancement ne permet cependant pas, d'avoir une vision globale du potentiel du site étudié, et c'est pour cette raison que de nombreux auteurs, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, ont proposés une approche plus générale combinant ordonnancement et intégration énergétique.

Comme discuté précédemment, les méthodes utilisées pour estimer le potentiel énergétique d'un procédé discontinu sont diverses mais résultent toutes de l'analyse d'un ordonnancement donné. Afin d'extraire une vision globale de l'intégration énergétique des procédés discontinus, plusieurs auteurs ont proposés des méthodes alliant l'optimisation et principalement l'ordonnancement aux méthodes précédemment citées. Nous discuterons de ces travaux dans la section suivante.

### 1.3.2 Ordonnancement des procédés discontinus

Nous présentons ici les principaux modèles d'ordonnancement des procédés discontinus. Ces modèles font appel aux techniques issus de la recherche opérationnelle, principalement la programmation linéaire, et traitent de la prise en compte de l'aspect énergétique dans leurs formulations.

### 1.3.2.1 Notions de base

Il existe plusieurs notions qu'il est nécessaire de prendre en compte lorsque l'on aborde le problème de l'ordonnancement des procédés discontinus sous contraintes de ressources. Ces aspects dont nous rappelons les principales dans ce qui suit, ont d'ailleurs été listés dans MÉNDEZ et al. [106] et permettent de réaliser une classification des problèmes d'ordonnancement des procédés batch. Ces aspects en question sont listés sur la figure 1.19.

**1.3.2.1.1 Représentation temporelle :** On remarque d'après la figure 1.19, qu'il existe généralement deux modes de représentation temporelle des modèles d'ordonnancement :

- Une représentation dite « à temps discret » dans laquelle l'horizon d'ordonnancement est divisé en période de longueur fixe et connue. Pour les modèles basés sur un temps discrétilisé, les événements (début et fin des tâches) doivent avoir lieu aux limites des périodes. Les événements sont donc planifiées et réduit de ce fait, la complexité de la formulation des contraintes du problème. Cependant, cette représentation possède l'inconvénient d'être difficile à résoudre à cause du nombre important d'intervalle de temps. Mais plus encore, une mauvaise estimation de la longueur de l'intervalle temporelle peut engendrer un ordonnancement sous optimal au mieux, et infaisable au pire. En effet, si l'intervalle est trop large, le modèle risque de rater un événement et si elle est trop étroite, on assistera à une explosion combinatoire entraînant un temps de résolution prohibitif. Cependant, lorsque le choix de la période est bien effectué, les modèles à temps discret permettent d'obtenir de bonnes solutions (voire optimales) sur des instances pouvant aller jusqu'à des problèmes de tailles industrielles ;
- Une représentation « à temps continu » dont le principal atout est de surmonter l'inconvénient généré par les modèles à temps discrets. Les modèles à temps continu utilisent donc un nombre relativement raisonnable d'événements correspondant aux dates précises où un changement d'état des variables du modèle est enregistré. En contrepartie, la formulation du problème peut devenir très complexe comparée aux modèles à temps discret et les contraintes d'affectation et de séquence utilisent généralement des termes dits de *Big-M* conduisant à l'appauvrissement de la valeur de la relaxation du problème .

**1.3.2.1.2 Bilans matière :** Dans le domaine des procédés, l'établissement de bilans matières, en plus des contraintes classiques d'ordonnancement, est nécessaire pour garantir la faisabilité de la solution finale. En effet, à cause du traitement des lots de fabrication, il est nécessaire de garantir la traçabilité de la matière lors des séparations / regroupements de lots. Il existe généralement deux approches pour gérer les lots et les tailles de lots, à savoir :

- l'approche « séquentielle » largement utilisée en milieu industriel et qui consiste à décomposer le problème général en problème de *lot-sizing* (problème de planification) et en un problème de séquencement et d'allocation (problème d'ordonnancement),
- l'approche « monolithique » où la résolution du lot-sizing et de l'ordonnancement est réalisée simultanément. Contrairement à l'approche séquentielle, l'approche monolithique est capable de prendre en considération n'importe qu'elle topologie de procédé. Et les modèles d'ordonnancement qui en résultent sont généralement de tailles importantes mais garantissent des solutions de meilleures qualités que dans le cas précédent.

**1.3.2.1.3 Représentation des événements :** Outre le fait que l'ordonnancement des procédés discontinus nécessite l'utilisation d'équations de bilan, la représentation des événements en plus de la représentation temporelle permet de classifier les différents modèles rencontrés dans la littérature. En général, il existe quatre (4) types de représentation événementielle permettant de traiter les procédés avec une topologie en réseau [106, 115] :

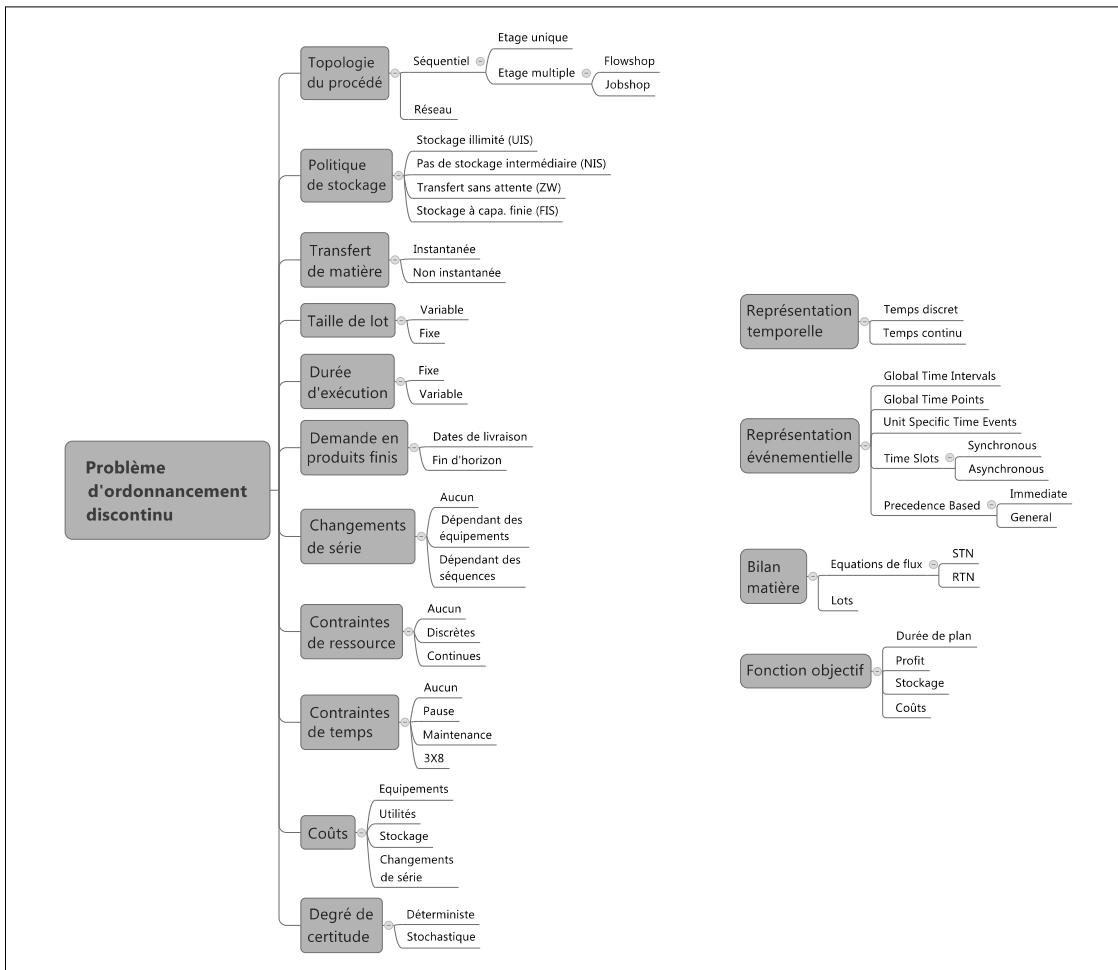


Figure 1.19 – Caractéristiques d'un problème d'ordonnancement des procédés discontinus

- La représentation *Global Time Intervals* qui rejoint la représentation à temps discret. Le modèle d'ordonnancement utilisant cette représentation utilise soit le formalisme *State Task Network* (STN) [86, 136], soit le formalisme *Resource Task Network* (RTN) [116] pour la représentation des bilans matières. Elles permettent en ce sens de considérer les recettes possédant une structure en réseau mais souffrent du fait qu'il est difficile de prendre en compte la durée variable des tâches ainsi que les contraintes de nettoyage dépendant des séquences d'opération ;
- La représentation *Global Time Points* utilise une représentation à temps continu. Les principaux modèles d'ordonnancement utilisant cette représentation avec le formalisme STN sont ceux de MARAVELIAS et GROSSMANN [46, 92, 100, 103, 111]. Tandis que les travaux basés sur le formalisme RTN sont ceux de CASTRO, BARBOSA-PÓVOA et MATOS [23, 25]. Les modèles d'ordonnancement utilisant la représentation *Global Time Points* sont une généralisation des modèles *Global Time Intervals* où la durée des intervalles temporelles (périodes) est considérée comme une nouvelle variable commune à tous les appareils. Les équations de bilan peuvent s'effectuer selon le formalisme STN ou RTN mais le paramètre critique concerne l'estimation du nombre d'événements qui s'obtient généralement par une approche itérative ;

- Inversement à la représentation *Global Time Points*, la représentation *Unit Specific Time Events* autorise et définit une grille temporelle variable pour chaque ressource partagée (appareil). Autorisant ainsi plusieurs tâches différentes à débuter à des moments différents pour le même point d'événement. Du fait de cette répartition hétérogène des points d'événements, les modèles utilisant cette représentation requièrent généralement un nombre d'événement plus faible que celui de la représentation *Global Time Points*. Cependant, le manque de points de référence autorisant la vérification de capacité des ressource partagées avec une capacité limitée, rend la formulation du modèle d'ordonnancement beaucoup plus compliquée. De nouvelles variables et des contraintes additionnelles doivent donc être ajoutées au modèle pour assurer la faisabilité de la solution. Les modèles d'ordonnancement utilisant la représentation *Unit Specific Event* sont ceux de IERAPETRITOU et FLOUDAS [72, 76, 94] ;
- La représentation événementielle en *Time Slots* utilise un ensemble prédéfini d'intervalle temporelles de durée inconnue. Les intervalles de temps sont alors associés aux équipements dans le but de permettre à ceux-ci d'exécuter les tâches qui leurs sont allouées. La représentation en *Time Slots* se décline en deux types : synchrone et asynchrone. La représentation synchrone utilise le même concept que le *Global Time Points* et définit un intervalle commun pour tous les appareils. Le cas asynchrone par contre rejoint l'idée de la représentation *Unit Specific Event* en autorisant la définition de *time-slots* différents d'un équipement à un autre, ce qui permet une meilleure flexibilité en termes de prise de décision comparée au cas synchrone. Les travaux utilisant la représentation en *Time Slots* concernent ceux effectués par PINTO et GROSSMANN [78, 89, 90, 93, 125, 143] ;

Nous tenons à faire remarquer que les travaux cités précédemment concernent des modèles d'ordonnancement représentés sous forme de programme mathématique. La résolution de ces modèles fait donc appel aux outils de la recherche opérationnelle et principalement à la programmation linéaire.

### 1.3.2.2 Modèles d'ordonnancement sous contraintes d'énergie

Nous nous intéressons ici aux modèles d'ordonnancement des procédés discontinus avec prise en compte de la ressource énergétique. Dans un premier temps, nous citons les principaux travaux traitant de l'ordonnancement des procédés discontinus sans récupération d'énergie, ceci permet de faire un premier balayage des différentes méthodologies de prise en compte de la consommation énergétique dans les modèles d'ordonnancement. Dans un second temps, nous nous focalisons sur les méthodologies permettant d'intégrer la récupération d'énergie dans l'ordonnancement.

**1.3.2.2.1 Ordonnancement sans prise en compte de la récupération énergétique :** Les premiers travaux traitant explicitement des utilités dans l'ordonnancement des procédés discontinus, concernent ceux de KONDILI, PANTELIDES et SARGENT [86, 136] où les auteurs proposent un modèle d'ordonnancement à court terme sous forme de programme linéaire en variables mixtes en utilisant le formalisme STN. Le modèle proposé utilise une représentation à temps discret et permet de prendre en compte la quantité d'énergie utilisée par une tâche comme étant une quantité fixe ou variable (dépendante de la quantité de matière traitée) durant l'exécution de la tâche. Cependant, selon les auteurs, du fait de la discréétisation temporelle, le modèle proposé engendre la création d'un nombre important de variables binaires rendant le modèle inadapté (lent) pour la résolution des problèmes de moyennes ou grandes instances voire pour certains problèmes de petites tailles tirés de la littérature.

Afin de résoudre les problèmes liés à l'aspect discret du temps, des modèles à temps continu ont été proposés parmi lesquels celui proposé par JANAK, LIN et FLOUDAS [76] qui est un modèle

de Programmation Linéaire en Variables Mixtes (PLVM) (PLVM) utilisant la représentation *Unit Specific Event* (USE) destiné à l'ordonnancement à court terme des procédés discontinus. Ce modèle est une amélioration du modèle d'ordonnancement de IERAPETRITOU et FLOUDAS [72] auquel des contraintes de ressources, de tailles de lot et de durée variables des tâches ainsi que des contraintes relatives aux changements de série ont été ajoutées. La spécificité du modèle proposé par ces auteurs réside dans le fait que pour les tâches devant consommer de l'énergie (utilités), l'extension sur plusieurs points d'événements devient nécessaire pour une meilleure détermination de la consommation énergétique d'une tâche lors de son lancement. Les auteurs démontrent ainsi une supériorité du modèle face aux autres modèles (à temps continu), proposés dans la littérature, considérant la prise en compte des contraintes de ressources. Dans SHAIK et FLOUDAS [137, 152], les auteurs utilisent la représentation USE pour établir un nouveau modèle d'ordonnancement à court terme de procédés (continus et discontinus) utilisant des variables binaires et continues à trois indices afin de permettre l'extension d'une tâche sur plusieurs points d'événements. Cette démarche diffère de celle de JANAK, LIN et FLOUDAS [76] sur le nombre d'indice associé aux variables du problème. Les auteurs concluent alors que même pour des problèmes d'ordonnancement sans contraintes de ressources, leur modèle nécessite l'extension d'une tâche sur plusieurs points d'événements permettant ainsi de créer un cadre unique entre les modèles avec prise en compte de consommations énergétiques et celles sans.

Dans BEHDANI, PISHVAIE et RASHTCHIAN [16], les travaux concernent l'établissement d'un ordonnancement optimal de procédés mixtes continus-discontinus avec prise en compte des utilités. Les auteurs proposent ici un modèle de PLVM à temps continu tiré de IERAPETRITOU et FLOUDAS [72]. Afin d'illustrer les aspects énergétiques au niveau du modèle d'ordonnancement, les auteurs formulent l'énergie disponible, au niveau de la centrale d'utilité, comme des bornes supérieures sur les contraintes de consommations et pénalisent les consommation excédentaires au niveau de la fonction objectif. L'activité des opérations de la centrale est alors gérée au travers de variables binaires additionnelles permettant la minimisation des phases de démarrage.

Si dans les travaux précédents, la centrale d'énergie (centrale de cogénération) était représentée de façon minimaliste au travers de bornes sur les contraintes, les travaux de AGHA et al. [4] ont permis de définir un cadre de modélisation unique pour l'ordonnancement intégré des procédés discontinus et des centrales de cogénération. Ce cadre a permis de représenter les opérations en charge de la fourniture de l'énergie de la même manière que les tâches du procédé sont représentés. Ce formalisme dénommé Extended Resource Task Network (ERTN) [145, 146] est une extension du formalisme RTN [116]. Dans AGHA et al. [4], les auteurs utilisent alors le formalisme ERTN pour démontrer l'intérêt d'un ordonnancement intégré du procédé et de la centrale d'utilité lorsque celui-ci est comparé à l'approche séquentielle traditionnelle. Les auteurs utilisent alors un modèle de PLVM à temps discret et mettent en évidence une réduction notable des coûts liés à l'énergie lorsque qu'une vision globale du procédé est adoptée.

**1.3.2.2.2 Ordonnancement avec prise en compte de la récupération énergétique :** L'intégration énergétique combinée à l'ordonnancement des procédés discontinus a fait son apparition dans les travaux de KEMP et DEAKIN [80, 81, 82]. Les auteurs ont concentré leurs efforts sur l'estimation de la quantité d'énergie pouvant être récupérée d'un procédé continu en se basant sur un ordonnancement donné. Ils proposent pour cela, plusieurs axes de classification et d'identification des opportunités de ré-ordonnancement permettant d'atteindre l'objectif donné lorsqu'une récupération directe et/ou indirecte (avec stockage) est réalisée.

Si dans les travaux cités dans les paragraphes précédents, l'obtention d'un ordonnancement initial était indispensable, les travaux de PAPAGEORGIOU, SHAH et PANTELIDES [118] ont permis de lever cette limitation. Les auteurs proposent ici un cadre mathématique basé sur le formalisme STN proposé par KONDILI, PANTELIDES et SARGENT [86], pour l'ordonnancement des procédés discontinus et semicontinu avec récupération directe et indirecte de chaleur. Lors de la

récupération directe de chaleur, le modèle à temps discret de KONDILI, PANTELIDES et SARGENT [86] est utilisé tel quel avec l'addition de contraintes de synchronisation, cependant dans le cas de l'intégration indirecte, la présence des contraintes de bilan massique et énergétique conduit le modèle à évoluer vers un PNIVM<sup>7</sup> non-convexe. Afin de résoudre le modèle de PNIVM, les auteurs ont alors développés un algorithme de *Branch & Bound*, mais du fait de la nature non linéaire du modèle et du fait de la discréétisation temporelle rendant le modèle difficile à résoudre, les auteurs ne garantissent pas l'obtention de l'optimal (voire d'une solution faisable), mais justifient leur approche du fait que la procédure permet de fournir un encadrement de la solution optimale.

Dans LEE et REKLAITIS [91], les auteurs proposent un modèle de PLVM permettant d'obtenir l'ordonnancement cyclique sans stockage intermédiaire maximisant la récupération énergétique et donc minimisant la consommation en utilités externes. Leur modèle utilise des variables binaires pour identifier les couplages optimaux entre les opérations prises unes par unes. La taille du modèle augmente alors en fonction du nombre d'opérations pouvant être couplées et les auteurs concluent en stipulant qu'un ordonnancement avec récupération maximale d'énergie peut être efficacement obtenu pour les cas avec des politiques de stockage de durée limitée, mais alors la durée de stockage maximale devient un paramètre significatif de la performance énergétique du procédé. Pour les mêmes types de procédé que précédemment, ZHAO et al. [158] utilisent l'analyse en cascade pour déterminer la configuration d'ordonnancement optimale, ce qui conduit à un modèle de PNIVM avec la présence de non-linéarités au niveau de la fonction objectif. La différence avec le modèle de LEE et REKLAITIS [91] est qu'il est dorénavant possible de réaliser des couplages multiples entre les flux devant échanger de l'énergie. Cependant, à cause de la nature non linéaire du modèle, des prétraitements sont réalisés sur le modèle pour réduire sa taille et ceci se fait généralement par la résolution d'un ensemble de modèle de PLVM ou d'une série de modèles de programmation linéaire.

Dans ADONYI et al. [1], les auteurs proposent une méthodologie pour l'incorporation de l'intégration de chaleur dans l'ordonnancement des procédés discontinus. Ils utilisent pour cela le formalisme des *S-graph* pour représenter simultanément le problème d'ordonnancement et de conception du réseau d'échange de chaleur. La procédure adoptée utilise alors un algorithme de Branch & Bound où les deux problèmes d'optimisation sont considérés simultanément au lieu de consécutivement. Parmi les approches permettant également de concevoir le réseau d'échangeur simultanément avec l'ordonnancement, les travaux de PINTO, NOVAIS et BARBOSA-PÓVOA [126] permettent d'établir un modèle de PLVM où des variables binaires sont utilisées pour établir les choix topologiques tandis que les variables continues sont utilisées pour dimensionner les appareils et les quantités de matière devant traverser le procédé.

Parmi les travaux utilisant le formalisme RTN [116, 117] pour l'ordonnancement à court terme des procédés discontinus avec intégration thermique, ceux de CHEN et CHANG [30] proposent une intégration des deux problématiques précédentes au niveau d'un formalisme unique. Le modèle d'ordonnancement est un modèle de PLVM à temps continu tiré de CASTRO, BARBOSA-PÓVOA et MATOS [24] dans lequel les auteurs intègrent une distinction entre le mode de fonctionnement des opérations en fonction de la source énergétique. Cette distinction se fait par la duplication d'une tâche consommant de l'énergie en deux modes de fonctionnement, un mode de consommation externe d'énergie et un mode d'échange d'énergie. La démarche adoptée consiste alors à créer deux modes de fonctionnement pour chaque opération devant échanger de l'énergie. Ainsi, un des modes représente l'exécution de l'opération sans récupération d'énergie et le second, avec récupération d'énergie. Cette méthodologie est aisée à mettre en œuvre surtout lorsque les opérations en échange sont préalablement connues, cependant, il engendre une augmentation du nombre de tâches devant être ordonnancé d'une part, et, force une opération à fonctionner selon un seul mode lors de son exécution, d'autre part. Autrement dit, lorsqu'une

---

7. Programmation Non Linéaire en Variables Mixtes

opération est lancée en mode sans récupération, il restera sur ce mode pendant toute la durée de l'exécution de la tâche.

Plus récemment, les travaux de AGHA [3, 4], quant à eux, abordent de l'ordonnancement des procédés discontinus et des centrales de cogénération. Les auteurs, dans leurs travaux, utilisent le formalisme ERTN [145] pour représenter les échanges d'énergie entre les deux composantes citées précédemment. Le modèle d'ordonnancement proposé est un modèle de PLVM à temps discret et la problématique abordée concerne l'ordonnancement à court terme avec minimisation de la consommation énergétique et/ou des émissions polluantes. Les travaux entrepris ont permis de conclure que l'ordonnancement intégrée du procédé et de la centrale permettait de diminuer notamment la consommation énergétique du site, et par la même occasion, une diminution des GES (Gaz à Effets de Serre) était également enregistrée. Néanmoins, la difficulté majeure citée par les auteurs réside dans le fait que le modèle PLVM, du fait de la discréétisation temporelle, pouvait croître très rapidement en taille rendant l'optimisation exacte d'une instance de taille moyenne impossible. Les auteurs concluent en conseillant d'utiliser un représentation temporelle continue et/ou en développant un algorithme hybride.

Dans le même ordre d'idée, les travaux de HETREUX, RAMAROSAN et DUQUESNE [59] proposent un modèle de PLVM à temps discret pour l'ordonnancement des procédés discontinus avec récupération de chaleur. Leurs approches prennent en considération le procédé batch couplé avec la centrale de cogénération et le réseau d'échangeur de chaleur préalablement défini. Les auteurs démontrent alors que l'obtention d'un ordonnancement optimal maximisant la récupération de chaleur est possible au travers de l'exploitation du formalisme ERTN mais cependant, l'utilisation d'un modèle d'ordonnancement à temps discret augmente considérablement la taille de l'instance surtout quand il est nécessaire de représenter explicitement la centrale d'énergie et le réseau d'échangeur de chaleur.

Si les approches précédentes utilisent une approche monolithique pour la résolution du problème d'ordonnancement et de récupération de chaleur, des approches séquentielles sont également retrouvées dans la littérature. Parmi ces derniers, les travaux de HALIM et SRINIVASAN [53] utilisent le formalisme STN et proposent une méthodologie permettant d'incorporer l'intégration énergétique à l'ordonnancement. La démarche adoptée est une approche séquentielle à deux niveaux où le problème général est décomposé en deux sous problèmes (intégration énergétique et ordonnancement) résolus séquentiellement. Dans un premier temps, le modèle d'ordonnancement formulé par SUNDARAMOORTHY et KARIMI [143] est résolu afin de satisfaire les contraintes de production (durée de la campagne, profit etc.), ensuite, à partir de la solution optimale obtenue, une série de configurations alternatives est recherchée à travers l'application d'une procédure de recherche aléatoire basée sur des coupes additionnelles. Ces inégalités valides sont ajoutées au fur et à mesure au modèle d'ordonnancement afin de générer des solutions additionnelles. Finalement, à partir de l'ensemble de solutions obtenu, une analyse Time Average Model et Time Slice Model est réalisée sur chaque solution afin d'estimer le minimum d'énergie requis. L'approche est donc basée sur l'hypothèse que les opportunités d'intégration énergétique sont importantes pour des solutions proches de l'optimal où les tâches sont regroupées entre elles.

### 1.3.3 Simulation des procédés discontinus

Si dans la section 1.2.5.2 nous avons introduit les différentes approches de modélisation et de simulation des procédés chimiques, nous présentons ici les différents travaux menés par la communauté scientifique pour la simulation des systèmes dynamiques hybrides. Mais avant de rentrer dans les détails, un brève classification des approches de modélisation des SDH est proposée.

### 1.3.3.1 Modélisation des systèmes dynamiques hybrides

La modélisation dynamique hybride s'attèle à représenter de façon uniforme le comportement hybride du système considéré. Par comportement hybride, nous entendons d'une part, un comportement continu régit en majeure partie par des équations algébro-différentielles, et d'autre part, un comportement discret dicté par une série de commutations logiques entre différents états de fonctionnement. Les études menées pour concilier ces différents aspects ont alors permis de concevoir de nombreux formalismes [157] basés sur des :

- **Extensions des modèles à dynamique continue** par l'introduction de variables discrètes représentant des états de fonctionnement au niveau du modèle continu, d'une part et d'autre part, à travers l'introduction de graphes d'états associés aux modes de fonctionnement du système provoquant ainsi des discontinuités lors des changements de modes.
- **Extensions des modèles à événements discrets** par l'introduction de temporisation dans les modèles discrets. A titre d'exemple on peut retrouver les automates temporisés [5] (contraintes d'horloge associées aux états et/ou aux transitions), les réseaux de Pétri temporisés [138] (notion de réservation à travers une durée de franchissement associée aux places ou aux transitions), les réseaux de Pétri temporels (association d'une fenêtre temporelle aux transitions du réseau), les réseaux de Pétri continus [35] (association de vitesse de franchissement au niveau des transitions) etc.,
- **Modèles mixtes** où les comportements discrets et continus sont représentés de façon collaborative au sein d'un même modèle. Dans ce type de modèle, l'évolution des variables continues déclenchée par la résolution du modèle continu provoque la validation de certaines transitions au niveau du modèle discret. De même, l'exécution du modèle discret crée un nouvel état déclenchant un nouveau système d'équations. A titre d'exemple, on pourra citer les automates hybrides [58], les statecharts hybrides [84], les réseaux de Pétri mixtes [35], les réseaux de Pétri prédictifs-transitions différentiels [27], etc..

### 1.3.3.2 Simulation dynamique hybride des procédés discontinus

Pour la grande majorité des travaux retrouvés dans la littérature pour la modélisation des procédés discontinus, les auteurs font appel aux Réseaux de Pétri (RdP) pour représenter la partie discrète et aux équations algébro-différentielles pour représenter le comportement continu du système étudié. Parmi ces travaux, on peut citer ceux de ANDREU et al. [6, 7, 8, 9, 10] dans lesquels une approche hiérarchique retrouvée dans les procédés manufacturiers est étendue au cas des procédés batch. L'approche hiérarchique donne alors lieu à trois niveaux composés de modèles à événements discrets pour la politique de contrôle et de modèles continus pour représenter le procédé. Les auteurs proposent un générateur d'événement pour assurer la correspondance entre les deux types de modèle et concluent que l'approche hiérarchique ne peut être directement étendue au cas des procédés discontinus mais que l'utilisation d'un réseau de Pétri hiérarchique permet de modéliser l'aspect discret des procédés discontinus.

Dans VALETTE et al. [148], les auteurs démontrent l'intérêt d'une modélisation séparée, à travers des réseaux de Pétri, des systèmes de production hybride plutôt que d'utiliser un cadre de modélisation unique. Les auteurs concluent alors en stipulant qu'il est plus clair de délimiter la vision discrète de la vision continue en faisant collaborer un RdP discret avec un RdP continu plutôt que d'utiliser uniquement un RdP hybride.

Parmi les travaux abordant de la supervision des procédés batch, les travaux de CHAMPAGNAT et al. [26] utilisent deux modèles dont les réseaux Pétri au niveau de la supervision et les graphes “activity-on-arcs” pour le niveau ordonnancement et présentent la manière dont les deux formalismes coopèrent pour déterminer les incohérences structurelles, décisionnelles ou quantitatives lors de la planification et de l'ordonnancement des procédés discontinus. L'aspect ordonnancement est également retrouvé dans les travaux de JULIA et VALETTE [77] dans lesquels les

auteurs abordent la problématique de l'ordonnancement temps-réel des procédés discontinus. Ils se basent pour cela sur les réseaux de Pétri *p*-temporisés et appliquent une démarche permettant de définir les différentes contraintes existantes dans les systèmes de production hybrides -linéaires- et permettant de proposer un principe de résolution de conflit. Plus récemment, dans HETREUX, RAMAROSAN et LE LANN [60] et FABRE et al. [44], les auteurs proposent une méthodologie pour la simulation des procédés discontinus dirigés par un module d'ordonnancement. Dans leurs travaux, les auteurs abordent le couplage simulation-ordonnancement en exécutant la phase de simulation du procédé au travers d'un simulateur dédié à base de RdP-Différentiel Objet dénommé *PrODHyS* [120] en se basant sur les résultats fournis par la phase d'optimisation.

Les travaux précédents sont généralement basés sur les réseaux de Pétri, on remarque que les champs d'applications sont diverses en partant de la modélisation, en passant par la supervision et le contrôle jusqu'à la planification et l'ordonnancement des procédés discontinus. Il est donc clair qu'une approche basée sur les RdP convient au cas des procédés discontinus [50]. Cependant, différents travaux utilisant d'autres formalisme s'observent également dans la littérature même si ceux-ci s'appliquent de façon générale aux industries manufacturières. Nous pouvons citer par exemple les travaux de BALDUZZI, GIUA et SEATZU [14] sur la modélisation au travers des automates hybrides des systèmes manufacturiers automatisés, ou sur les travaux de SAHBANI et PASCAL [135] concernant la modélisation des systèmes hybrides au travers de l'outil *Stateflow* pour le comportement discret et de Matlab pour le comportement continu. Néanmoins, dans le domaine des procédés discontinus on pourra citer les travaux de SIMEONOVA [139] traitant de l'ordonnancement périodique des procédés discontinus dont le formalisme des automates à états finis a été retenu par l'auteur pour l'aspect discret et le simulateur *Simulink* de Matlab pour l'aspect continu.

## 1.4 Objectifs de la thèse

Les sections précédentes ont permis d'illustrer le besoin de mettre en place une gestion efficace de la ressource énergétique, elles illustrent également les concepts de base utilisés pour la conduite d'une unité de production ainsi que l'intérêt de la mise en place d'un couplage optimisation et simulation. Notre étude concerne principalement le cas des procédés discontinus et s'attèle à lever les difficultés rencontrées lors du pilotage de ces procédés lorsque l'aspect énergétique est pris en compte. Le cadre de cette étude est alors définie comme suit :

1. L'objectif de cette thèse est de proposer une approche permettant de gérer efficacement la ressource énergétique au sein des procédés discontinus. La solution proposée à un impact sur le court terme en se basant sur la technologie actuellement disponible. Elle s'attèle à démontrer le fait qu'un meilleur pilotage d'une unité de fabrication permet d'améliorer considérablement les besoins en terme d'énergie.
2. Dans cette thèse nous considérons uniquement les procédés discontinus et semi-continus. Et nous adoptons une vision d'ensemble du procédé en faisant intervenir l'unité de production (atelier), le réseau d'échangeur (récupération d'énergie) et la centrale de production des utilités (fourniture d'énergie) conformément à la structure de la figure 1.11 ;
3. Dans les sections précédentes, nous avons pu constater les enjeux du pilotage des procédés discontinus. Nous avons également pu constater l'interaction qui existe entre l'efficacité énergétique d'un procédé discontinu et la manière dont celle-ci est gérée et pilotée en phase d'exploitation. Nous proposons donc une approche alliant intégration énergétique et ordonnancement des procédés afin d'améliorer le rendement énergétique du système étudié ;

4. Pour ce faire, le développement d'un modèle d'ordonnancement utilisant la programmation linéaire en variables mixtes (PLVM), sur la base d'une formulation à temps continu, est réalisé dans un premier temps. Ce modèle se veut générique, c'est à dire, applicable à n'importe quel type de ressource énergétique (thermique, mécanique ou électrique) et n'importe quel secteur d'activité, et prend en compte les différents sous-systèmes du procédé afin d'intégrer les interconnexions pouvant exister entre ces différents éléments.
5. Dans un second temps, une approche hybride combinant programmation linéaire (en variables mixtes) et programmation par contraintes est réalisée. Ce besoin s'est manifesté à cause de la difficulté du modèle de PLVM à fournir une solution de bonne qualité en un temps raisonnable et permet d'exploiter les avantages respectifs des deux approches de résolution sur une situation intégrant la récupération d'énergie.
6. Finalement, un couplage optimisation / simulation est réalisé afin de valider la faisabilité de la solution fournie par l'optimisation. Durant cette phase, la modélisation du comportement du procédé fait appel à la simulation dynamique hybride. Les modèles correspondant à la dynamique continue du procédé, de la centrale et du réseau d'échangeurs de chaleur, sont alors développés dans l'environnement *Simulink* tandis que leur comportement discret est représenté avec le formalisme des *Statecharts* et est modélisé à travers la boîte à outils *Stateflow* de *Matlab*. Les deux environnements sont alors couplés afin de décrire et de simuler le comportement hybride des procédés discontinus.

Cette démarche devra alors permettre d'exploiter une procédure mixte alliant un module d'optimisation et un module de simulation lors de la conduite des procédés discontinus sous contraintes de récupération d'énergie. Cette approche permettra d'introduire une étape intermédiaire afin de diminuer le gap existant entre la planification et la conduite du procédé .

# CHAPITRE 2

---

## ORDONNANCEMENT DES PROCÉDÉS DISCONTINUS : MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

---

### Plan du chapitre

<b>2.1 Modèle de programmation linéaire</b> . . . . .	<b>48</b>
2.1.1 Introduction . . . . .	48
2.1.2 Les contraintes du modèle d'ordonnancement . . . . .	49
2.1.3 Contraintes résultant de l'analyse de la recette . . . . .	69
2.1.4 La fonction objectif . . . . .	72
2.1.5 Conduite du modèle d'ordonnancement . . . . .	72
<b>2.2 Modèle hybride de PLVM / PPC</b> . . . . .	<b>73</b>
2.2.1 Introduction . . . . .	73
2.2.2 Principe de décomposition . . . . .	74
2.2.3 Modélisation du problème-maître [MP] . . . . .	75
2.2.4 Modélisation du sous-problème [SP] . . . . .	78
2.2.5 Coupes de Benders . . . . .	80
2.2.6 Conduite du modèle hybride . . . . .	82
<b>2.3 Conclusion</b> . . . . .	<b>82</b>

---

Ce chapitre s'articule en deux volets. Dans le premier volet, il présente le modèle de programmation linéaire en variables mixtes, pour l'ordonnancement des procédés discontinus avec prise en compte de la récupération énergétique. Le modèle de programmation linéaire considéré dans nos travaux utilise la représentation événementielle *Unit-Specific Event* [72] et s'appuie sur le modèle d'ordonnancement (sans récupération d'énergie et sans prise en compte de la centrale de cogénération) de JANAK, LIN et FLOUDAS [76]. Préalablement conçu pour l'ordonnancement d'un atelier de production discontinu, le modèle présenté dans JANAK, LIN et FLOUDAS [76] a été étendu dans cette thèse afin de permettre la modélisation des procédés semi-continus, qui de ce fait, autorise la prise en compte de la centrale d'énergie et du réseau de récupération d'énergie dans l'ordonnancement. La première partie de ce chapitre se cantonne donc à la modélisation des tâches continues et de leurs interactions avec les tâches discontinues, à la modélisation des tâches consommatrices et productrices d'énergie et finalement, à la modélisation des opérations multimodales. Afin d'accélérer la convergence du modèle, des inégalités valides exploitant la structure de l'exemple traité, sont proposées. L'algorithme pour la conduite du modèle d'ordonnancement est alors présenté.

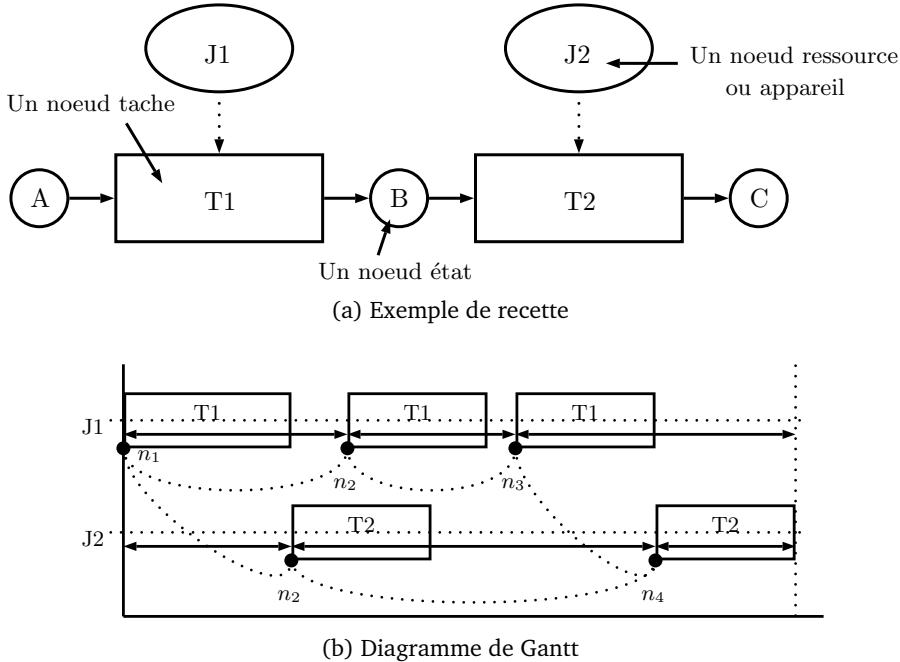


Figure 2.1 – Répartition des événements sur les appareils

Dans le deuxième et dernier volet, une volonté de réduction de l'effort de calcul pour l'obtention d'une solution de bonne qualité (voire optimale) s'est manifestée à travers une modélisation du problème sous forme d'un couplage entre programmation linéaire et programmation par contraintes. En effet, les caractéristiques inhérentes du modèle d'ordonnancement permettent de tirer partie des avantages proposés par ces deux approches, résultant ainsi de la mise en œuvre d'un modèle hybride d'ordonnancement.

## 2.1 Modèle de programmation linéaire

### 2.1.1 Introduction

Le modèle d'ordonnancement que nous présentons dans ce chapitre, utilise une représentation temporelle à temps continu [106]. Contrairement à la formulation à temps discret où l'horizon d'ordonnancement est divisé en périodes communes de durées connues, la formulation à temps continu divise l'horizon temporel, en un nombre fini de périodes de durées *inconnues*. Plus spécifiquement, dans le cas de la formulation *Unit-Specific Event* retenue dans nos travaux, le modèle reçoit comme paramètre d'entrée un nombre de points d'événements. Ce nombre de points d'événements définit le nombre de période, de durée variable, composant l'horizon d'ordonnancement de chaque appareil.

Chaque appareil du procédé possède alors son propre axe temporel et est désynchronisé par rapport aux autres appareils, cependant, ils se voient alloué le même nombre de points d'événements et donc le même nombre de tranche de temps. L'utilisation par l'appareil de son quota de points d'événements dépend alors du nombre de tâche exécuté sur la ressource et des dépendances entre les tâches dictées par la recette. Autrement dit, si l'on considère le diagramme de Gantt de la figure 2.1b faisant intervenir deux appareils J1 et J2 sur lesquels s'exécutent respectivement deux opérations T1 et T2, on peut observer l'utilisation des points d'événements (de chaque appareil) en fonction des lancements (cas de T1) et en fonction des séquences (cas de T1 vers T2).

Ce comportement de base du modèle nécessite une attention particulière, principalement,

lors de la récupération énergétique car une synchronisation des différentes opérations échangeant de l'énergie devra être réalisée. Il n'est donc pas rare de devoir gérer des comportements plus subtils du modèle, comme la possibilité d'une tâche de s'exécuter pendant plusieurs points d'événements ou le besoin d'utilisation de tâches *fictives* pour modéliser certains comportements. Nous verrons plus en détails ces différents points dans la section traitant des contraintes du modèle d'ordonnancement. Notons également que nous stipulons explicitement les contraintes qui sont identiques à celles retrouvées dans le modèle de base de JANAK, LIN et FLOUDAS [76], les nouvelles contraintes, par contre, seront juste formulées sans indications particulières.

### 2.1.2 Les contraintes du modèle d'ordonnancement

Dans la suite du chapitre, nous utiliserons au même titre les termes événement, temps, moment et instant. Cette interprétation est réalisée dans un soucis de clarté, néanmoins, elle ne prétend en rien égaliser les sens de ces différentes notions ni leurs distributions respectives dans le temps.

#### Remarque 2.1 (Types de tâche)

Nous tenons à faire remarquer qu'à fin de permettre une représentation des procédés semicontinu, une distinction a été introduite entre les différentes tâches du procédé. Nous associons donc la terminologie de **tâche discontinue** pour représenter les tâches dont la matière est en rétention dans l'appareil lors de son traitement. Inversement, les **tâches continues** représentent les tâches du procédé en charge de la réalisation des produits finis mais dont la matière circule en flux continu lors de la réalisation de l'opération. Quant aux **tâches utilités**, elles traitent comme leur nom l'indique, des utilités et sont associées au système en charge de la fourniture en utilité (centrale de cogénération) et à celui en charge de la récupération énergétique (réseau d'échangeur de chaleur).

#### 2.1.2.1 Contraintes d'allocation

Les contraintes d'allocation assurent la gestion de l'utilisation des ressources disjonctives. Ces ressources n'admettent le traitement que d'une seule tâche à la fois, ce qui conduit les contraintes d'allocation à assurer l'arbitrage de l'affectation d'une tâche à une ressource.

Deux points de vue peuvent alors être adoptés pour formuler les contraintes d'allocation. Le premier est centré sur les ressources et le second sur les tâches. Dans la formulation proposée, l'approche centrée sur les tâches est retenue par l'association de variables d'états ( $w$ ) aux tâches. Le terme état (ou activité) est associé à une tâche pour distinguer si elle est en-cours de traitement, ou au contraire, elle est non-exécutée. Dans le premier cas, la variable d'état  $w$  est mise à 1, dans le second cas, elle est annulée.

Notons que lorsqu'une tâche est active, elle utilise une ressource disjonctive et définit donc implicitement l'état de l'appareil sur lequel elle s'exécute. Il existe donc une dépendance mutuelle entre les deux points de vue cités précédemment.

$$\sum_{i \in I_j} w_{in} \leq 1 \quad \forall j \in J, \forall n \in N \quad (2.1)$$

Les contraintes (2.1) stipulent que pour un appareil  $j$  donné, une seule tâche  $i$  peut être active à un moment donné  $n$ . En d'autres termes, ces contraintes interdisent l'exécution simultanée de deux ou de plusieurs tâches sur un même appareil à un moment donné. Cependant, l'appareil peut n'exécuter aucune tâche, d'où la relation d'inégalité de ces contraintes.

$$w_{in} = \sum_{n' \leq n} ws_{in'} - \sum_{n' < n} wf_{in'} \quad \forall i \in I, \forall n \in N \quad (2.2)$$

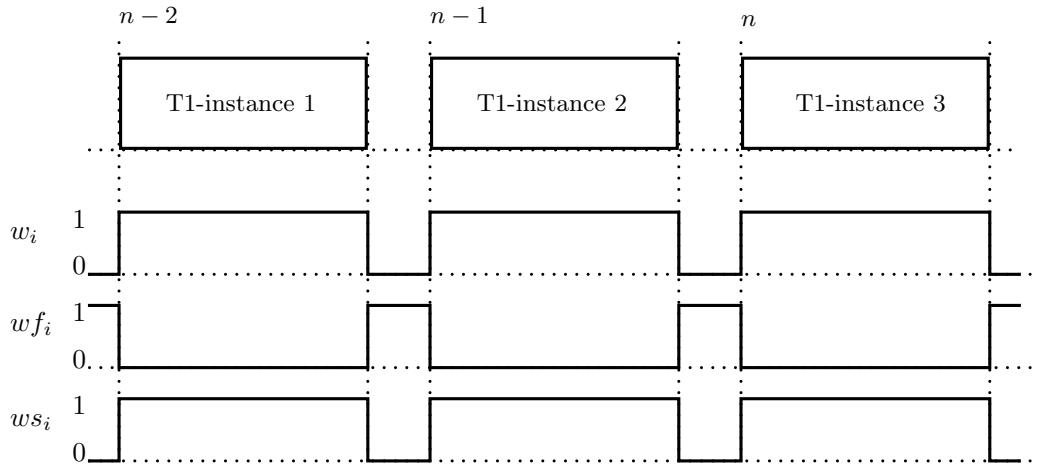


Figure 2.2 – Illustration des contraintes d'allocation

Les contraintes (2.2) définissent l'activité d'une tâche. Ces contraintes stipulent qu'une tâche  $i$  est active uniquement si elle s'est lancée avant ou à l'instant courant et ne s'est pas encore terminée. Ces contraintes sont ensuite généralisées pour le cas de plusieurs successions de la même tâche (figure 2.2).

$$\sum_{n \in N} ws_{in} = \sum_{n \in N} wf_{in} \quad \forall i \in I \quad (2.3)$$

Les contraintes (2.3) expriment le simple fait que toutes les tâches débutées doivent se terminer. Autrement dit, le nombre de fois qu'une tâche se lance doit être égal au nombre de fois qu'elle se termine. Ces contraintes permettent de s'assurer qu'il n'existe pas de tâches en cours d'exécution à la fin de l'ordonnancement.

$$ws_{in} \leq 1 - \sum_{n' < n} ws_{in'} + \sum_{n' < n} wf_{in'} \quad \forall i \in I, \forall n \in N \quad (2.4)$$

Les contraintes (2.4) stipulent le fait qu'une tâche peut se lancer à l'instant  $n$ , si le nombre de fois qu'elle s'est lancée dans le passé est égal au nombre de fois qu'elle s'est terminée. Si cette condition est vérifiée, l'état de la tâche est donc bien au repos et elle est autorisée à se lancer. Dans le cas contraire, si le nombre de lancement est supérieur au nombre de terminaison (seule alternative possible), la tâche est encore active et la variable de décision  $ws$  est mise à zéro empêchant tout nouveau lancement de la tâche à l'instant donné.

$$wf_{in} \leq \sum_{n' \leq n} ws_{in'} - \sum_{n' < n} wf_{in'} \quad \forall i \in I, \forall n \in N \quad (2.5)$$

La réciproque des contraintes (2.4) traitant de la terminaison d'une tâche, est formulée par les contraintes (2.5). Celles-ci stipulent qu'une tâche ne peut se terminer à un instant donné que si elle s'est lancée et ne s'est pas encore terminée.

Les contraintes relatives au type des variables  $ws$  et  $wf$  sont données par le jeu d'équation (2.6). Ces variables sont des variables de décision (entières) pouvant prendre 0 ou 1 comme valeur, autrement dit ce sont des variables binaires ou bivalentes. Toutes les autres variables du problème sont, quant à elles, définies dans l'ensemble  $\mathbb{R}^+$ .

$$\forall i \in I, \forall n \in N \quad \begin{cases} ws_{in} \in \{0, 1\} \\ wf_{in} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (2.6)$$

Les contraintes (2.1) à (2.6) sont identiques à celles formulées dans le modèle de base de JANAK, LIN et FLOUDAS [76].

### 2.1.2.2 Contraintes de capacité

Les contraintes de capacité définissent la plage de valeurs que peut prendre la taille de lot d'une tâche. Le paramètre  $b_{min}$  définit la quantité minimale de matière que peut traiter un appareil afin que le lancement de l'opération soit rentable. En effet, lors de l'exécution d'une opération sur un appareil, celle-ci consomme une quantité fixe de ressource (énergie, nettoyage etc.) indépendamment de la taille de lot traitée. Afin de minimiser ces consommations, il est recommandé de ne lancer une opération que lorsqu'une certaine quantité de matière est atteinte. Inversement,  $b_{max}$  définit la capacité maximale de l'appareil au sein duquel s'exécute l'opération.

#### Remarque 2.2 (Représentation des affectations)

Le formalisme *Extended Resource Task Network* représente l'affectation d'une opération sur différents appareils en associant plusieurs tâches à la même opération. Chacune de ces tâches est alors affectée à un et un seul appareil de l'ensemble d'appareils sur lequel peut être réalisée l'opération. Autrement dit, il existe autant de duplication d'une opération (en tâches) que d'appareil sur lequel cette dernière peut être réalisée et chaque copie est associée à un seul appareil.

D'après la Remarque 2.2, il existe autant de duplication de tâche que d'appareils sur lequel l'opération peut être réalisée, de ce fait, les valeurs des paramètres  $b_{min}$  et  $b_{max}$  sont ramenées à chacune des tâches représentant l'opération et diffèrent suivant l'appareil auquel est affecté la tâche.

**2.1.2.2.1 Capacité des tâches discontinues [76]** Le jeu de contraintes (2.7) stipule que la taille de lot doit être au moins égale à  $b_{min}$  et ne peut dépasser  $b_{max}$  (c'est à dire la capacité de l'appareil). Ceci est uniquement valide si la tâche est active ( $w = 1$ ), par contre, si la tâche ne l'est pas, la taille de lot,  $b$ , est mise à zéro.

$$b_{min}^i \cdot w_{in} \leq b_{in} \leq b_{max}^i \cdot w_{in} \quad \forall i \in I^b, \forall n \in N \quad (2.7)$$

**2.1.2.2.2 Capacité des tâches continues** Dans le cas des tâches continues, les quantités  $b_{min}$  et  $b_{max}$  traduisent des débits massiques en  $\frac{kg}{s}$  ou en  $\frac{t}{h}$ , tandis que les variables  $b_{in}$  définissent des quantités de matière en  $[kg]$  ou en  $[t]$ . Ces types de tâches peuvent fonctionner autour d'un point fixe nominal, ou au contraire, peuvent varier dans une certaine plage autorisée (cas des transferts entre opérations). La taille de lot produite ou consommée par une opération continue est donc exprimée en fonction de la durée de fonctionnement,  $pt$ , de l'opération.

$$b_{min}^i \cdot pt_{min}^i \cdot w_{in} \leq b_{in} \leq b_{max}^i \cdot pt_{max}^i \cdot w_{in} \quad \forall i \in I^p, \forall n \in N \quad (2.8)$$

Les paramètres  $pt_{min}^i, pt_{max}^i$  définissent respectivement les durées minimales et maximales de la tâche lors de son lancement. Les contraintes (2.8) bornent alors la valeur de la taille de lot  $b$  lorsque la tâche est active et annule la taille de lot lorsque la tâche n'est pas lancée. Dans le cas où l'opération doit être traitée à débit constant, les quantités  $b_{min}$  et  $b_{max}$  seront égalisées à la valeur du débit.

**2.1.2.2.3 Capacité des tâches utilités** Les tâches utilités sont des tâches utilisées afin de contrôler l'utilisation des ressources utilités (énergie, vapeur etc.) au sein du procédé. Ces tâches représentent concrètement les opérations assurant la production<sup>1</sup> et le transfert énergétique<sup>2</sup> entre les différents organes du procédé (figure 1.11).

$$b_{min}^i \cdot w_{in} \leq b_{in} \leq b_{max}^i \cdot w_{in} \quad \forall i \in I^u, \forall n \in N \quad (2.9)$$

1. Centrale de cogénération

2. Réseau d'échangeurs de chaleur

Contrairement aux tâches continues présentées précédemment, la spécificité des tâches utilités réside dans le fait que leur durée est inconnue et dépend essentiellement du résultat de l'ordonnancement (séquencement). De ce fait, formuler les contraintes (2.9) en fonction des durées des tâches correspondantes nécessiterait l'obtention préalable d'une configuration d'ordonnancement, ce qui n'est pas le cas au lancement du modèle.

A titre d'exemple, si nous associons ces contraintes à la capacité d'une chaudière, exprimer la durée de fonctionnement de la chaudière nécessiterait de connaître la localisation temporelle de toutes les tâches consommant la vapeur produite par cette opération. Sachant que connaître cette localisation reviendrait à connaître le résultat de l'ordonnancement, il est préférable de déléguer la détermination de la durée de la chaudière aux contraintes de séquence plutôt qu'aux contraintes de capacité.

Néanmoins, la capacité de ces tâches peut être formulée librement à travers les contraintes (2.9). Cette capacité dépend donc uniquement de celle des appareils qu'ils représentent, ainsi,  $b_{min}$  et  $b_{max}$  traduisent les débits massiques des appareils tout comme dans le cas précédent. Cependant, la quantité  $b_{in}$  n'est plus assimilée à une quantité de matière mais plutôt à un débit.

**2.1.2.2.4 Capacité des tâches *fictives* de stockage [76]** Les tâches *fictives* de stockage, comme leur nom l'indique, ne représentent pas des opérations réelles au sein de la recette mais représentent plutôt les cuves de stockage à capacité finie. Cependant, les caractéristiques du modèle et le besoin d'une gestion plus fine des stocks ont conduit à la mise en place de ces entités. Nous parlerons plus en détails de ces points dans la section 2.1.2.7.2, mais nous retiendrons ici que la taille de lot des tâches *fictives* de stockage ( $bst_{sn}$ ) ne devra pas dépasser la capacité ( $C_s$ ) des cuves de stockage auxquelles les tâches fictives sont associées.

$$bst_{sn} \leq C_s \quad \forall s \in S^{fis}, \forall n \in N \quad (2.10)$$

### 2.1.2.3 Contraintes de conservation de masse

Les contraintes de conservation de masse sont formulées afin de traduire le fait que la taille de lot traitée par une tâche donnée, ne varie pas durant l'activité de cette tâche. En effet, sachant que le lot est en rétention dans l'appareil, aucune modification de cette quantité n'est enregistrée avant la terminaison de la tâche considérée.

Dans le cas où la tâche considérée est active pendant plusieurs points d'événements, le modèle devra permettre à la taille de lot de rester constante depuis son lancement jusqu'à sa terminaison. Deux déclinaisons des contraintes, en fonction du type de tâche considéré, sont alors formulées ci-dessous.

**2.1.2.3.1 Tâches discontinues et tâches utilités :** Les contraintes (2.11) stipulent que la taille de lot (ou le débit) d'une tâche à un instant quelconque  $n$  est égal à celui de l'instant précédent  $n - 1$ , uniquement si la tâche est en cours d'exécution et ne s'est pas terminée à l'instant  $n - 1$ .

$$\forall i \in (I^b \cup I^u), \forall n \in N | n > 1 \quad \begin{cases} b_{in} \leq b_{in-1} + b_{max}^i (1 - w_{in-1} + wf_{in-1}) \\ b_{in} \geq b_{in-1} - b_{max}^i (1 - w_{in-1} + wf_{in-1}) \end{cases} \quad (2.11)$$

Les contraintes (2.12) effectuent la liaison des variables  $b$  avec les variables  $bs$ . Elles stipulent que si la tâche se lance à l'instant  $n$ , alors la taille de lot au lancement de la tâche sera égale à la taille de lot  $b$  à ce même instant. Inversement, si la tâche ne se lance pas à l'instant  $n$ , alors les contraintes ci-dessous sont relaxées.

$$bs_{in} = b_{in} \times ws_{in} \quad \forall i \in (I^b \cup I^u), \forall n \in N \quad (2.12)$$

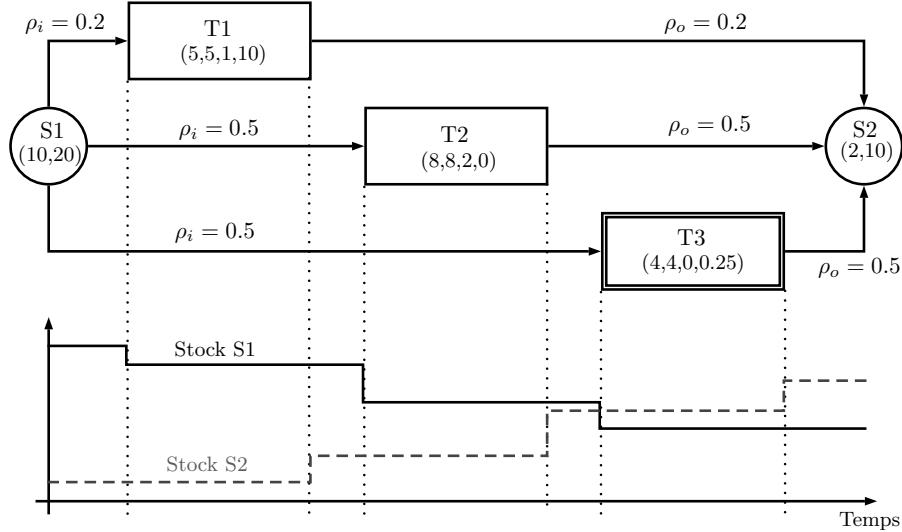


Figure 2.3 – Représentation des consommations/productions de matière

Les contraintes (2.13) fonctionnent de la même manière que ceux formulés précédemment, à la différence qu'elles lient les variables  $b$  avec les variables  $bf$  représentant la taille de lot d'une tâche à la fin de son exécution. Ces contraintes dictent alors le fait que si une tâche se termine à l'instant  $n$ , alors la taille de lot  $bf$  est égalisée à la taille de lot au cours de son exécution.

$$bf_{in} = b_{in} \times wf_{in} \quad \forall i \in (I^b \cup I^u), \forall n \in N \quad (2.13)$$

Les contraintes (2.12) et (2.13) étant non-linéaires, nous appliquons la linéarisation de Glopers pour linéariser ces contraintes. Lorsque cette linéarisation est réalisée pour le cas de la variable  $bs_{in}$ , le jeu de contraintes (2.14) suivant remplace les contraintes (2.12).

$$\forall i \in (I^b \cup I^u), \forall n \in N \quad \begin{cases} bs_{in} \leq b_{in} \\ bs_{in} \leq b_{max}^i ws_{in} \\ bs_{in} \geq b_{in} - b_{max}^i (1 - ws_{in}) \end{cases} \quad (2.14)$$

**2.1.2.3.2 Tâches continues** Le cas des tâches continues ne diffère que de peu des relations précédentes. Cette différence réside dans les coefficients de relaxation de ces contraintes. En effet, dans le cas des tâches continues, la capacité maximale pouvant être réalisée est égale au débit maximum de la tâche multiplié par la durée maximale d'exécution de la tâche. Cette durée maximale est un paramètre du problème. Autrement dit, à la place des  $b_{max}^i$  des contraintes (2.14), nous aurons  $b_{max}^i \times pt_{max}^i$ .

#### 2.1.2.4 Consommation et production de matières et d'utilités

Les contraintes ci-dessous représentent les consommations/productions de matière, d'énergie ou d'utilités par les tâches du procédé. Ces contraintes ont été formulées afin d'agrégner les propriétés des flux (matières, énergies et utilités) dans des variables intermédiaires.

**2.1.2.4.1 Consommation de matière** La consommation de matière dans un état est représentée par la variable continue  $i_{sin}$ . Cette consommation est proportionnelle à la taille de lot traitée par la tâche, et est exprimée à travers le produit de la taille de lot par la proportion de matière consommée  $roi_{is}$  où  $i$  représente la tâche consommatrice et  $s$  l'état consommé.

$$i_{sin} = roi_{is} \times bs_{in} \quad \forall s \in S, i \in (I_{cs}^b \cup I_{cs}^p), \forall n \in N \quad (2.15)$$

La consommation en matière, pour les tâches discontinues et les tâches continues, s'effectue généralement au lancement d'une tâche. Cette consommation est donc reliée aux variables  $bs$  représentant la taille de lot traitée au lancement d'une tâche (contraintes 2.15).

$$i_{sin} = roi_{is} \times b_{in} \quad \forall s \in S, i \in I_{cs}^u, \forall n \in N \quad (2.16)$$

Cependant, pour le cas des tâches utilités appartenant soit à la centrale d'utilité, soit au réseau d'échangeur d'énergie, l'expression (2.16) est utilisée à la place de l'expression (2.15) pour traduire le flux continu traversant ces sous-systèmes.

Dans le cas particulier d'une prise en compte explicite des tâches de stockage, la consommation de matière des tâches de stockage est représentée par les variables continues  $ist$  (contraintes 2.17).

$$ist_{sin} = roi_{is} \times bs_{in} \quad \forall s \in S, i \in I_{cs}^{st}, \forall n \in N \quad (2.17)$$

Même si les contraintes (2.17) sont similaires aux contraintes (2.15), l'intérêt d'associer une autre variable, en l'occurrence  $ist_{sin}$ , pour traduire ces quantités permet de manipuler indépendamment ce dernier.

**2.1.2.4.2 Production de matière** La production de matière dans un état est représentée par les variables  $o_{sin}$ . Ces variables traduisent le produit de la taille de lot de la tâche productrice par le paramètre  $roo_{is}$  représentant la proportion de matière produite par la tâche.

$$o_{sin} = roo_{is} \times bf_{in} \quad \forall s \in S, i \in (I_{ps}^b \cup I_{ps}^p), \forall n \in N \quad (2.18)$$

Les contraintes (2.18) expriment cette production pour le cas des tâches discontinues et des tâches continues. On peut observer à travers ces contraintes que la livraison de matière se fait à la fin de l'exécution de la tâche.

#### Hypothèse 2.1 (Livraison de matière des tâches continues)

La taille de lot produite par une tâche correspond à la quantité produite à la fin de l'exécution de la tâche. Cette hypothèse est valide pour le cas des tâches discontinues car elles représentent de façon fidèle le comportement de ces opérations. Cependant, pour le cas des tâches continues, une discréétisation suivant une certaine période dont la sensibilité est laissée au bon sens du décideur, est nécessaire afin de gérer au mieux les transitions entre les fonctionnements continus et discontinus.

L'expression de la production de matière, ou d'utilité, pour le cas des tâches utilités est donnée par les contraintes 2.19. Ces contraintes sont similaires à ceux des consommations pour les tâches discontinues, à l'exception du fait que les variables  $b$  sont utilisées à la place des variables  $bf$ . Cette distinction permet à ces tâches de produire l'utilité pendant l'exécution de la tâche et non plus à ses extrémités.

$$o_{sin} = roo_{is} \times b_{in} \quad \forall s \in S, i \in I_{ps}^u, \forall n \in N \quad (2.19)$$

Le cas des tâches de stockage est donnée par la relation (2.20), les variables  $ost_{sin}$  représentent donc la proportion de matière produite par la tâche  $i$  et envoyée en stockage.

$$ost_{sin} = roo_{is} \times bf_{in} \quad \forall s \in S, i \in I_{ps}^{st}, \forall n \in N \quad (2.20)$$

La figure 2.3 illustre les consommations/productions de matière par les tâches discontinues (T1 et T2) et continues (T3). On constate alors que la consommation de matière se fait au lancement des tâches et ce indépendamment du type de tâche. Nous observons la même caractéristique pour les productions à l'exception du fait qu'elles s'effectuent à la terminaison des tâches.

**2.1.2.4.3 Consommation et production d'utilité** La quantité d'utilité (ou d'énergie) produite et/ou consommée par une tâche est équivalente à une quantité par unité de temps, elle représente donc le débit matière (ou énergétique) requis pour la réalisation de l'opération.

$$ui_{sin} = ufi_{is} \cdot w_{in} + uvi_{is} \cdot b_{in} + uw_{is} \cdot d_{in} \quad \forall s \in S, i \in I_{cs}, \forall n \in N \quad (2.21)$$

Les contraintes (2.21) stipulent que la quantité d'utilité de type  $s$  consommée par une tâche  $i$  à un instant donné  $n$  est composée d'une consommation fixe  $ufi_{is}$ , dépendant du fait que la tâche soit en cours de traitement ou non, et d'une quantité variable  $uvi_{is}$  dépendante de la taille de lot traitée par l'opération au cours de son exécution. Une troisième composante, représentée par les paramètres  $uw_{is}$  (ou  $uwo_{is}$ ), est associée aux variables  $ui$  et  $uo$  afin de permettre l'expression de la consommation/production d'utilité en fonction de la durée de la tâche.

$$uo_{sin} = ufo_{is} \cdot w_{in} + uvo_{is} \cdot b_{in} + uwo_{is} \cdot d_{in} \quad \forall s \in S, i \in I_{ps}, \forall n \in N \quad (2.22)$$

Les contraintes (2.22) sont équivalentes aux contraintes (2.21) mais traduisent, cette fois-ci, la production d'utilité ou d'énergie d'une tâche pendant son activité.

#### Hypothèse 2.2 (Représentation des puissances)

Dans le cadre de nos travaux, la production / consommation d'utilité (ou d'énergie) d'une tâche ne se fait ni au lancement de la tâche, ni à la fin de son exécution mais bel et bien pendant toute la durée d'activité de la tâche considérée, on parle alors de débit énergétique moyen ou de puissance moyenne. Ainsi donc, pour une tâche donnée, cette quantité est supposée constante pendant le lancement de la tâche et s'exprime généralement en fonction de la taille de lot  $b$ , de l'activité  $w$  et/ou de la durée  $d$  de la dite tâche.

La figure 2.4 illustre les consommations/productions d'utilités et d'énergie par les tâches discontinues (T1 et T2) et continues (T3). On constate que la consommation est déterminée au lancement des tâches et ce indépendamment du type de tâche. La quantité d'utilité consommée reste constante pendant toute la durée d'exécution de la tâche. Ainsi, dans le cas de l'état S1 modélisant une ressource non-renouvelable, la quantité stockée dans l'état est altérée (diminuée) au fur et à mesure du lancement des tâches consommatrices de l'état. Dans le cas de l'état S2 qui correspond à une ressource renouvelable, la quantité stockée revient à sa valeur d'origine une fois la tâche productrice terminée.

#### 2.1.2.5 Contraintes de bilan

Les contraintes de bilan permettent de traduire l'évolution de la masse ou de l'énergie au niveau d'un stockage fictif ou réel. Les bilans énergétiques se réalisent de manière similaire aux bilans massique et donc, les contraintes ci-après sont valides quelque soit le type de commodité considéré (énergie, utilité ou matière).

#### Remarque 2.3 (Conservation de la nature des noeuds de bilan)

Chaque noeud de bilan correspond soit à un noeud de bilan matière (au niveau atelier de production), soit à un noeud de bilan utilité (au niveau centrale de cogénération), soit à un noeud de bilan d'énergie (au niveau du réseau d'échangeurs) mais ne peut en aucun cas représenter un mixte des situations précédentes. La prise en compte explicite de cette distinction permet de conserver la nature des arcs véhiculant les commodités traitées. Ainsi donc, tous les arcs entrant et sortant d'un noeud (état) doivent être de même nature.

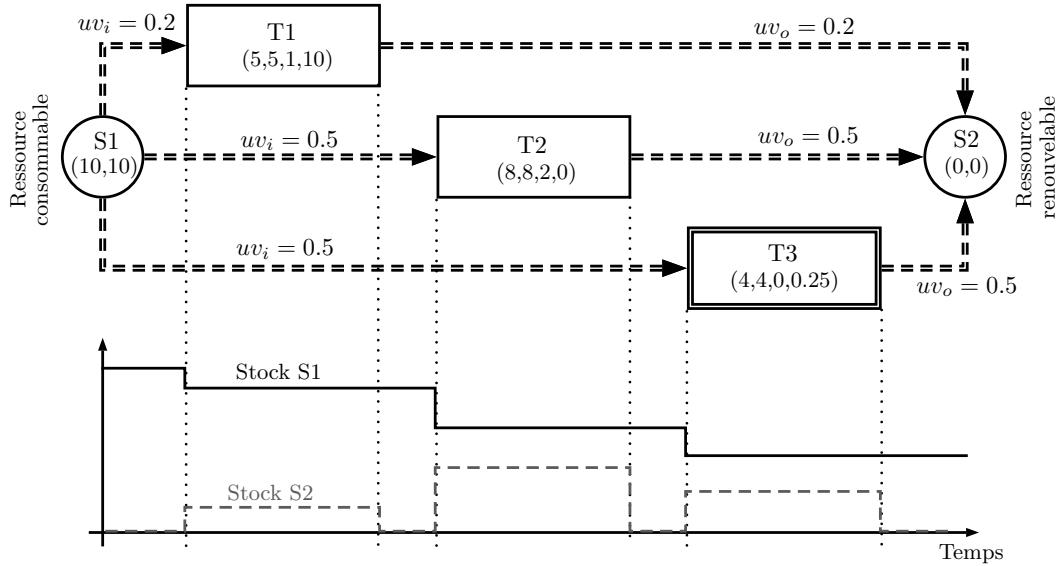


Figure 2.4 – Représentation des consommations/productions d'utilités (ou d'énergie)

**2.1.2.5.1 Bilan instantané** Les contraintes (2.23) stipulent que la quantité stockée dans l'état  $s$  à l'instant  $n$  est égale au total des production dans l'état à l'instant  $n - 1$  diminué des consommations à l'instant courant. Les variables continues *import* et *export* représentent les importations et exportations de ressources au niveau de l'état. Ces variables d'écart permettent, lorsqu'elles sont activées, d'ajuster la capacité de l'état et/ou d'estimer le déficit/excès de ressource levant ainsi toutes infaisabilités liées aux bilans.

$$\left. \begin{aligned} s_{sn} + \sum_{i \in I} i_{sin} + \sum_{i \in I} ui_{sin} + bst_{sn} + export_{sn} + \sum_{i \in I^{st}} ist_{sin} = \\ s_{sn-1} + \sum_{i \in I} o_{sin-1} + \sum_{i \in I} uo_{sin-1} + bst_{sn-1} + import_{sn-1} + \sum_{i \in I^{st}} ost_{sin-1} \end{aligned} \right\} \quad \forall s \in S, \forall n \in N | n > 1 \quad (2.23)$$

**2.1.2.5.2 Bilan initial** Les contraintes (2.24) et (2.25) traduisent l'état du stockage à l'instant initial. En effet, à cet instant, aucune production de ressource n'est enregistrée au niveau de l'état considéré. Les contraintes (2.25) sont donc une simplification des contraintes (2.23) sans les productions de ressource. Les contraintes (2.24) servent à initialiser le stockage dans l'état à l'instant initial.

$$s_{s0} = s_{0s} \quad \forall s \in S \quad (2.24)$$

$$s_{s1} + \sum_{i \in I} i_{si1} + \sum_{i \in I} ui_{si1} + bst_{s1} + export_{s1} + \sum_{i \in I^{st}} ist_{si1} = s_{s0} \quad \forall s \in S \quad (2.25)$$

**2.1.2.5.3 Bilan final** Le bilan à l'instant final traduit le stockage dans chaque état lorsque l'ordonnancement se termine. Les contraintes (2.26) obligent le modèle à mettre à disposition une quantité  $D_s$  dans l'état  $s$  à la fin du plan. Cette quantité correspond à la demande en produits finis au terme de la campagne si l'état en question est un état de produits finis, dans le cas contraire, la quantité  $D_s$  est mise à 0. Dans la présente formulation, il n'y a donc aucune livraison avant la fin de l'ordonnancement.

Ces contraintes sont formulées pour tous les types d'état, mais sont uniquement actives pour

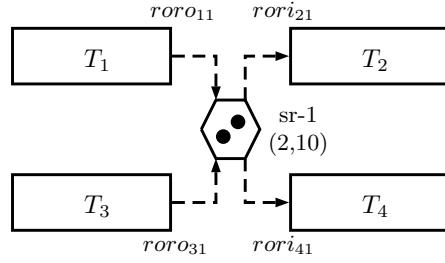


Figure 2.5 – Représentation des consommations/productions de jeton

les états correspondant aux produits finis.

$$sf_s \geq D_s \quad \forall s \in S \quad (2.26)$$

Les contraintes (2.27) sont une version allégée des contraintes (2.23) lorsque les consommations de ressources sont annulées. En effet, au terme de la campagne, aucune consommation n'est autorisée exceptée celles correspondantes aux demandes en produits finis.

$$sf_s = s_{sN} + \sum_{i \in I} o_{siN} + \sum_{i \in I} u_{osiN} + bst_{sN} + export_{sN} + \sum_{i \in I^{st}} ost_{siN} \quad \forall s \in S \quad (2.27)$$

### 2.1.2.6 Contraintes sur les opérations multimodales

La notion de ressource multimodale concerne les opérations possédant différents modes de fonctionnement. A titre d'exemple, une ressource classique fonctionne généralement suivant deux modes qui peuvent être soit la production, soit la non-production. Chacun de ces modes peut alors être affiné en sous modes, tel que le démarrage, la production continue, le nettoyage, la maintenance etc.

Afin d'intégrer la prise en compte de ces types de ressources, THERY et al. [146] ont introduits la représentation de ces systèmes au sein du formalisme ERTN. Nous retiendrons cette représentation dans la suite de l'ouvrage, mais de manière générale, il existe une forte similarité entre la formalisation ERTN des ressources multimodales et le formalisme des graphes d'états [57].

**2.1.2.6.1 Évolution du marquage d'un état ressource** A un instant quelconque  $n$ , la quantité de jeton présente dans l'état ressource  $s$  est égale à la quantité à l'instant précédent  $n - 1$  augmenté des productions dans l'état à l'instant  $n - 1$  et diminué des consommations à l'instant  $n$ .

Cette contrainte est exprimée par la relation (2.28) ci-dessous.

$$sr_{sn} + \sum_{i \in I} (rori_{is} \times ws_{in}) = sr_{sn-1} + \sum_{i \in I} (roro_{is} \times ws_{in-1}) \quad \forall s \in S^r, \forall n \in N | n > 1 \quad (2.28)$$

La formulation de la relation précédente pour le cas de la figure 2.5 est la suivante lorsque les paramètres  $roro_{is}$  et  $rori_{is}$  sont égalisés à l'unité.

$$sr_{1n} + wst_{2n} + wst_{4n} = sr_{1n-1} + wst_{1n-1} + wst_{3n-1}$$

A l'instant initial ( $n = 1$ ), aucune production de jeton n'est enregistrée, impliquant que la quantité de jeton présente à l'instant initial dans un état donné est la quantité initiale ( $sr_0$ ) diminuée des consommations à cet instant initial.

$$sr_{s1} + \sum_{i \in I} (rori_{is} \times ws_{i1}) = sr_{0s} \quad \forall s \in S^r \quad (2.29)$$

Inversement à l'instant final  $N + 1$  avec  $N$ , le nombre de points d'événements, aucune consommation dans l'état ressource n'est enregistrée. L'expression du bilan dans l'état ressource est alors une simplification des contraintes (2.28) sans les expressions de production de jeton.

$$srf_s = sr_{sN} + \sum_{i \in I} (roro_{is} \times ws_{iN}) \quad \forall s \in S^r \quad (2.30)$$

$$srf_s \geq sr0_s \quad \forall s \in S^r \quad (2.31)$$

Finalement, afin de compléter le cycle de fonctionnement d'une ressource multimodale, le marquage final du réseau devra coïncider avec le marquage initial. Cela se fait à travers l'expression des contraintes (2.31), imposant que la quantité finale dans un état ressource doit être au moins égale à la quantité initiale enregistrée dans ce même état. Ces contraintes sont valides pour les ressources (appareils) devant retourner à leur état initial après leur utilisation.

### 2.1.2.7 Contraintes de séquence

Les contraintes de séquence constituent une composante essentielle des modèles d'ordonnancement. En effet, ces contraintes liées au temps, assurent la définition du positionnement relatif d'une tâche par rapport aux autres et s'expriment généralement à l'aide d'*inégalités de potentiels* [97] qui imposent une distance minimale entre deux événements particuliers associés aux tâches. Ces événements peuvent être des dates de début ou des dates de fin des tâches concernées.

**2.1.2.7.1 Séquence des tâches de production** Les contraintes ci-dessous s'appliquent aux tâches associées à l'atelier de production, c'est à dire à ceux qui transforment directement de la matière afin de réaliser les produits finis. Dans ce cas de figure et en fonction des types de tâche et des ressources mis en jeu, trois situations peuvent se présenter :

- la séquence de la même tâche sur un même appareil ;
- la séquence de tâches différentes sur un même appareil ;
- la séquence de tâches différentes sur différents appareils.

Nous présentons successivement ci-dessous chacun de ces scénarios. Cependant, du fait du comportement différent des tâches continues et discontinues, nous introduisons une distinction en fonction du type de tâche dans la dernière catégorie de contraintes.

**Séquence de la même tâche sur un même appareil :** Lorsqu'une tâche unique est exécutée successivement sur un même appareil, le modèle d'ordonnancement doit s'assurer qu'il n'y a pas de chevauchement dans le résultat final. La raison pour laquelle cette situation doit être respectée est due au fait que la ressource (appareil) est de capacité unitaire, donc ne pouvant traiter qu'une seule tâche à un instant donné.

Les contraintes (2.32) stipulent donc que la date de début d'exécution de la tâche  $i$  à un instant  $n$  devra être supérieure ou égale à la date de fin de la même tâche à l'instant précédent,  $n - 1$ .

$$st_{in} \geq ft_{in-1} \quad \forall i \in I, \forall n \in N | n > 1 \quad (2.32)$$

De plus, si la tâche s'étend sur plusieurs événements, alors les contraintes (2.33) permettent d'assurer la non-préemptivité de la tâche.

$$st_{in} \leq ft_{in-1} + H \cdot (1 - w_{in-1} + wf_{in-1}) \quad \forall i \in I, \forall n \in N | n > 1 \quad (2.33)$$

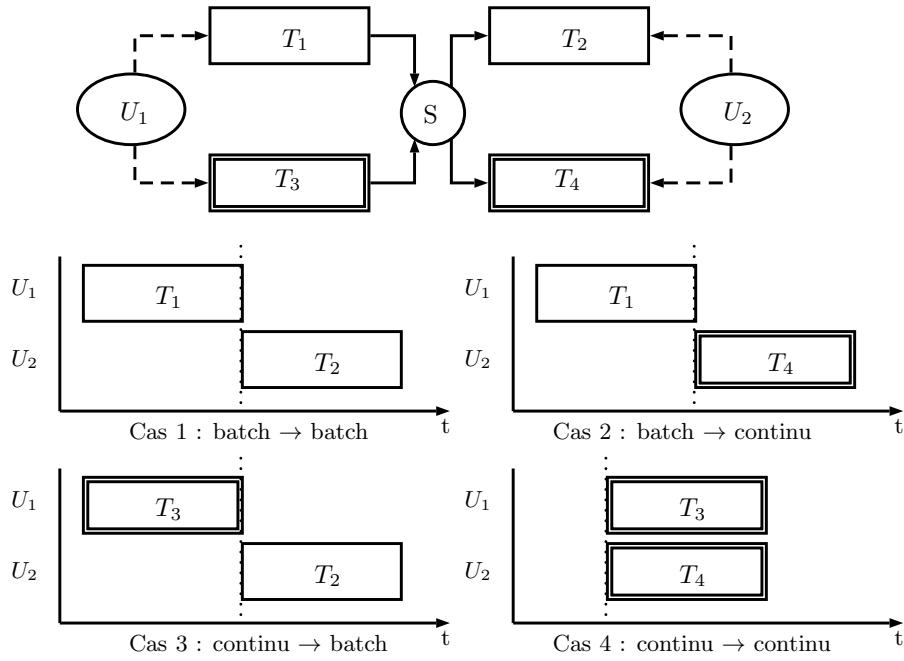


Figure 2.6 – Séquences de tâches différentes sur des appareils différents

**Séquence de tâches différentes sur un même appareil :** Lorsque deux ou plusieurs tâches différentes doivent être séquencées sur un même appareil, alors le précédent principe stipulant qu'une ressource ne peut traiter qu'une seule tâche à la fois, reste valide.

Les contraintes (2.34) stipulent que tant que la tâche en amont,  $i'$ , est active, alors la tâche en aval,  $i$ , ne pourra se lancer qu'au delà de la date de fin du premier.

$$st_{in} \geq ft_{i'n-1} - H \cdot (1 - w_{i'n-1}) \quad \forall j \in J, \forall i \in I_j, \forall i' \in I_{j'}, \forall n \in N | n > 1 \quad (2.34)$$

Ces contraintes sont complétées par l'expression (2.35) stipulant que si aucun stockage n'est disponible entre les deux tâches, alors la date de fin du prédécesseur sera égale à la date de début du successeur.

$$\begin{aligned} st_{in} &\leq ft_{i'n-1} + H \cdot (2 - ws_{in} - wf_{i'n-1}) \\ \forall s \in S^{zw}, \forall j \in J, \forall i \in (I_j \cap I_{cs}), \forall i' \in (I_{j'} \cap I_{ps}), \forall n \in N | n > 1 \end{aligned} \quad (2.35)$$

**Séquence de tâches différentes sur différents appareils :** Trois situations en fonction du type de tâche peuvent se présenter pour ce cas de figure. La figure 2.6 donne une représentation graphique des différentes contraintes pour le cas où aucune possibilité de stockage n'est disponible entre les deux tâches séquencées. Les différentes situations sont énumérées ci-après.

1. **Le prédécesseur est une tâche discontinue (Cas 1 et 2 de la figure 2.6) :** lorsque ce cas de figure se présente, la livraison de la matière par la tâche en amont se fait à la fin de l'exécution de ce dernier. Les contraintes (2.36) stipulent alors que la tâche en aval ( $i$ ) se lancera au plus tôt à la fin de la tâche en amont ( $i'$ ).

$$\begin{aligned} st_{in} &\geq ft_{i'n-1} - H \cdot (1 - wf_{i'n-1}) \\ \forall s \in S^m, \forall i \in I_{cs}, \forall i' \in I_{ps}^b, \forall j \in J_i, \forall j' \in J_{i'}, \forall n \in N | n > 1 \end{aligned} \quad (2.36)$$

Les contraintes (2.37) quant à elles, définissent la synchronisation stricte entre les deux tâches s'il n'existe aucune possibilité de stockage intermédiaire entre les deux tâches

concernées.

$$\begin{aligned} st_{in} &\leq ft_{i'n-1} + H \cdot (2 - ws_{in} - wf_{i'n-1}) \\ \forall s \in (S^m \cap S^{zw}), \forall i \in I_{cs}, \forall i' \in I_{ps}^b, \forall j \in J_i, \forall j' \in J_{i'}, \forall n \in N | n > 1 \end{aligned} \quad (2.37)$$

2. **Le prédecesseur est une tâche continue et le successeur une tâche discontinue (Cas 3 de la figure 2.6)** : lorsqu'une tâche discontinue consomme un état produit par une tâche continue, alors la tâche consommatrice ne disposera de la matière que lorsque la tâche productrice sera terminée. Selon l'Hypothèse 2.1 page 54, il n'est possible de disposer de la matière traitée par une tâche continue qu'à la fin de celle-ci. De ce fait, lorsqu'une représentation plus précise de la production de matière d'une tâche continue est nécessaire, la durée maximale de fonctionnement de la tâche continue est bornée à une certaine valeur (relativement faible) autorisant un suivi plus précis des stockages.

$$\begin{aligned} st_{in} &\geq ft_{i'n-1} - H \cdot (1 - wf_{i'n-1}) \\ \forall s \in S^m, \forall i \in I_{cs}^b, \forall i' \in I_{ps}^p, \forall j \in J_i, \forall j' \in J_{i'}, \forall n \in N | n > 1 \end{aligned} \quad (2.38)$$

Les contraintes (2.38) stipulent alors que la tâche discontinue pourra se lancer après la terminaison de la tâche continue, ou du moins de l'ensemble de lancement de la tâche continue permettant de regrouper la taille lot consommée par la tâche batch .

$$\begin{aligned} st_{in} &\leq ft_{i'n-1} + H \cdot (2 - ws_{in} - wf_{i'n-1}) \\ \forall s \in (S^m \cap S^{zw}), \forall i \in I_{cs}^b, \forall i' \in I_{ps}^p, \forall j \in J_i, \forall j' \in J_{i'}, \forall n \in N | n > 1 \end{aligned} \quad (2.39)$$

Identiquement aux cas précédents, lorsqu'aucun stockage n'est disponible entre les deux tâches, la synchronisation des deux tâches est stricte. Cette relation s'exprime par les contraintes (2.39). Néanmoins, il est rare de retrouver ce cas de figure car un changement de mode de fonctionnement engendre obligatoirement un stockage tampon.

3. **Le prédecesseur et le successeur sont des tâches continues (Cas 4 de la figure 2.6)** : ces situations représentent généralement les cas de transfert de matière entre opérations. En effet, dans le cas des procédés, les transferts de matière se font toujours en mode continu et empêchent généralement l'utilisation des appareils effectuant le transfert. Il est donc conseillé dans ces situations de lancer simultanément la production et la consommation de matière et d'adopter un débit identique, à moins qu'un stockage intermédiaire ne soit disponible entre les opérations.

$$\begin{aligned} st_{in} &\geq st_{i'n-1} - H \cdot (1 - ws_{i'n-1}) \\ \forall s \in S^m, \forall i \in I_{cs}^p, \forall i' \in I_{ps}^p, \forall j \in J_i, \forall j' \in J_{i'}, \forall n \in N | n > 1 \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} st_{in} &\leq st_{i'n-1} + H \cdot (2 - ws_{in} - ws_{i'n-1}) \\ \forall s \in (S^m \cap S^{zw}), \forall i \in I_{cs}^p, \forall i' \in I_{ps}^p, \forall j \in J_i, \forall j' \in J_{i'}, \forall n \in N | n > 1 \end{aligned} \quad (2.41)$$

Afin de représenter cette situation, les contraintes (2.40) stipulent que la consommation commencera au plus tôt, au même moment que la production. Couplée avec les contraintes (2.41), les contraintes (2.40) traduisent alors le fait que les deux tâches continues démarrent au même moment lorsqu'aucun stockage n'est disponible.

#### 2.1.2.7.2 Séquence des tâches *fictives* de stockage

Les tâches fictives de stockage sont des entités créées afin de permettre une meilleure gestion des capacités de stockage. Du fait de la représentation temporelle par l'utilisation de points d'événements spécifiques à chaque appareil,

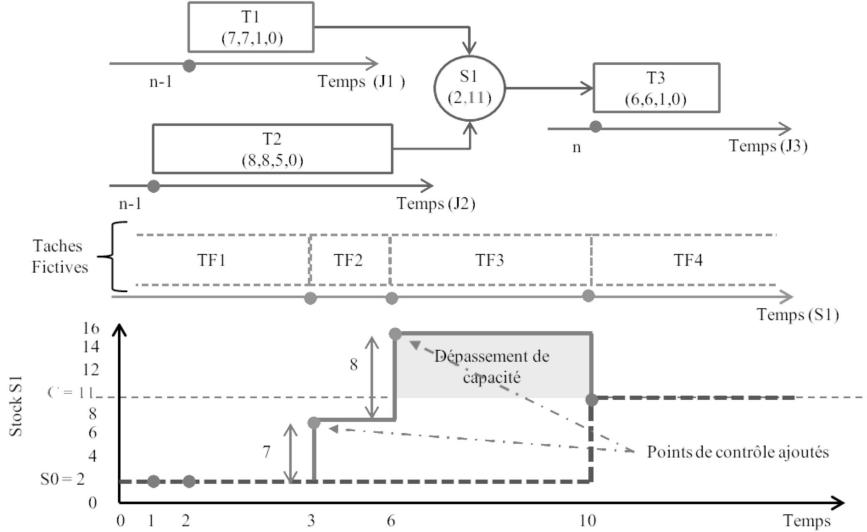


Figure 2.7 – Apport des tâches fictives de stockage

les bilans massiques s'effectuent uniquement lors des lancements des tâches de production. Ce comportement inné au modèle engendre cependant une perte d'information car la livraison de matière se fait généralement à la fin de l'exécution de la tâche. On s'expose alors à des risques de dépassement de capacité de stockage qui engendreront des ordonnancements infaisables.

Afin d'illustrer l'intérêt de la mise en place des tâches *fictives* de stockage, considérons l'exemple de la figure 2.7. La situation présentée fait intervenir 3 tâches T1 à T3 se lançant sur trois appareils J1 à J3. Supposons maintenant que la tâche T3 se lance à l'événement  $n$  sur J3 et la tâche T1 (resp. T2) se lance à l'événement  $n-1$  sur J1 (resp. J2). Le bilan massique sans la prise en compte des tâches *fictives* de stockage donnerait dans ce cas le profil de stockage en trait discontinu de la figure 2.7 avec uniquement des contrôles du stock à chaque début de tâche. L'équation relative au bilan dans ce cas précis serait :

$$s_{1,n} = s_{1,n-1} + bf_{T2,n-1} + bf_{T1,n-1} - bs_{T3,n}$$

Soit :  $s_{1,n} = 2 + 7 + 8 - 6 = 11 \leq C_1 = 11$ , l'ordonnancement est donc faisable au vu de cette relation. Or, comme on peut le constater sur la figure 2.7, le profil réel du stockage (trait continu) dépasse cette capacité, rendant de ce fait, l'ordonnancement de la figure infaisable.

Afin de palier à cet inconvénient, des tâches *fictives* associées à chaque stockage à capacité finie ont été introduites par JANAK, LIN et FLOUDAS [76]. Ces tâches *fictives* se créent et commencent à la fin de l'exécution de chaque tâche produisant un état de capacité finie (stock) et se terminent au lancement de la tâche consommatrice du stockage. Ces tâches *fictives* possèdent une taille de lot bornée par la capacité de l'unité de stockage et ont une durée variable au cours de l'ordonnancement. En d'autres termes, l'unité de stockage a été considéré comme un appareil à part entier avec son propre jeu d'événements. Dans le cas de la figure 2.7, 2 points d'événements supplémentaires, correspondant à la création de deux tâches *fictives* de stockage, sont nécessaires au modèle afin de valider le respect des capacités de stockage.

Les contraintes (2.42) associent la fin de l'exécution des tâches *fictives* de stockage,  $fts$ , au début du lancement de chaque tâche consommant l'état à capacité finie.

$$\begin{aligned} st_{in} &\geq fts_{sn-1} & \forall s \in S^m, \forall i \in I_{cs}, \forall n \in N | n > 1 \\ st_{in} &\leq fts_{sn-1} + H \cdot (1 - ws_{in}) & \forall s \in (S^m \cap S^{fis}), \forall i \in I_{cs}, \forall n \in N | n > 1 \end{aligned} \quad (2.42)$$

Les contraintes (2.43) stipulent qu'une tâche fictive de stockage se lance exactement au moment où la tâche produisant l'état se termine.

$$\begin{aligned} sts_{sn} &\geq ft_{in-1} - H \cdot (1 - wf_{in-1}) & \forall s \in S^m, \forall i \in I_{ps}, \forall n \in N | n > 1 \\ sts_{sn} &\leq ft_{in-1} + H \cdot (1 - w_{in-1}) & \forall s \in (S^m \cap S^{fis}), \forall i \in I_{ps}, \forall n \in N | n > 1 \end{aligned} \quad (2.43)$$

Finalement, les contraintes (2.44) assurent l'activité sans interruption d'une tâche fictive associée à un stockage donné.

$$sts_{sn} = fts_{sn-1} \quad \forall s \in S^{fis}, \forall n \in N | n > 1 \quad (2.44)$$

Notons cependant, qu'il est possible de remplacer une tâche fictive de stockage, par une tâche réelle lorsque le besoin se fait ressentir. Dans ce cas précis, les contraintes (2.42) à (2.44), sont remplacées par les contraintes (2.45) suivantes :

$$\forall i' \in I^{st}, \forall i \in I, \forall n \in N | n > 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} st_{in} \geq ft_{i',n-1} \\ st_{in} \leq ft_{i',n-1} + H \cdot (1 - ws_{i,n}) \\ st_{i',n} \geq ft_{in-1} - H \cdot (1 - wf_{in-1}) \\ st_{i',n} \leq ft_{in-1} + H \cdot (1 - w_{in-1}) \end{array} \right. \quad (2.45)$$

Les contraintes (2.45) s'assurent alors de synchroniser la tâche fictive avec la tâche réelle dans le cas de la consommation dans le stockage.

$$st_{in} = ft_{in-1} \quad \forall i \in I^{st}, \forall n \in N | n > 1 \quad (2.46)$$

Les contraintes (2.46), par contre, assurent la continuité de l'activation de la tâche de stockage dans le temps. L'intérêt de représenter explicitement le stockage à travers une tâche réelle réside dans le fait que le formalisme ERTN peut être utilisé pour représenter d'éventuels consommations énergétiques au niveau des stockage, chose qui était impossible avec les tâches *fictives* proposées par JANAK, LIN et FLOUDAS [76].

**2.1.2.7.3 Séquence des tâches *fictives* utilités** Le concept de tâche *fictive* utilité a été présenté par JANAK, LIN et FLOUDAS [76] pour gérer la consommation de ressource par une tâche. Nous présentons ici une version modifiée permettant de mieux représenter la situation de récupération (production et consommation) énergétique au niveau du procédé.

Dans la formulation originelle de ces contraintes, la vérification de l'utilisation d'une ressource énergétique se faisait à chaque lancement des tâches consommant la ressource. Cette vérification, implique donc que la consommation/production d'une ressource énergétique par une tâche s'étend au delà de l'activité de la tâche, c'est à dire au delà du fait que la tâche se termine. Ce comportement se manifeste lorsque la tâche consommant la ressource énergétique n'est pas active sur plusieurs points d'événements. Autrement dit, si la tâche consommant l'utilité ne s'étend pas sur plusieurs point d'événements, alors sa consommation s'étendra jusqu'au lancement de la prochaine tâche consommant le même type d'utilité. Afin d'illustrer notre propos, considérons la figure 2.8, sur laquelle on retrouve la tâche T1 produisant une quantité de ressource équivalente à sa taille de lot, et la tâche T2 consommant une quantité de ressource également équivalente à sa taille de lot. Si le lancement de T1 et de T2 se fait à des événements successifs, alors les profils des consommations et productions correspondent aux tracés de la figure 2.8. On remarque assez rapidement qu'il existe des points de bilans manquants où la production / consommation devrait s'annuler. Ces situations provoquent un surplus de consommation/production d'énergie et faussent la réalisation d'une récupération énergétique.

Afin de corriger ce comportement du modèle de JANAK, LIN et FLOUDAS [76], nous créons

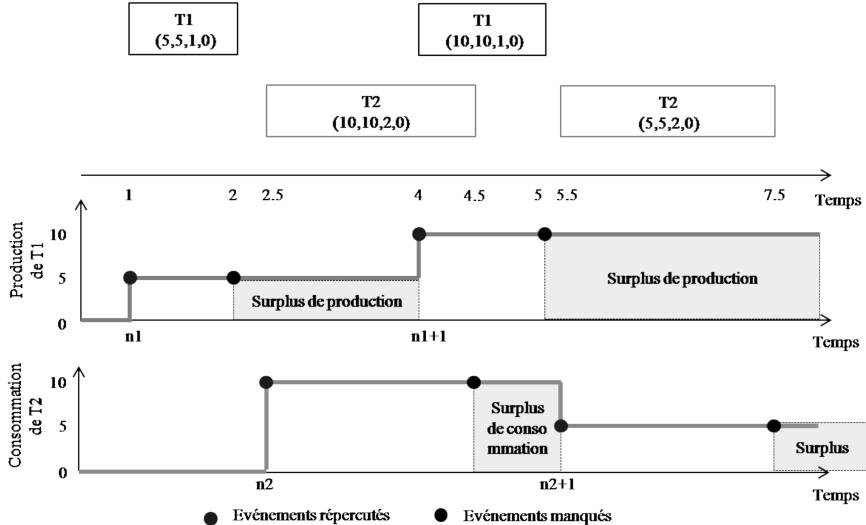


Figure 2.8 – Profil de consommation/production d'utilité

une tâche fictive utilité comme étant une copie exacte (dans le temps) de la tâche utilisant la ressource, autrement dit, nous associons à l'état correspondant à la ressource une tâche fictive de durée équivalente à la durée de la tâche utilisatrice.

Pour ce faire, les contraintes (2.47) assurent la synchronisation des dates de fin lors de la consommation d'une utilité. Les contraintes (2.48) quant à elles permettent la synchronisation de la date de début de la tâche consommatrice et de la tâche fictive associée. Ces contraintes stipulent que tant que la tâche consommatrice est active alors les tâches fictives seront présentes sur le même intervalle, dans le cas contraire, les contraintes seront relaxées.

$$\forall s \in S^u, \forall i \in I_{cs}, \forall n \in N \quad \begin{cases} ftu_{sn} \leq ft_{in} + H \cdot (1 - w_{in}) \\ ftu_{sn} \geq ft_{in} - H \cdot (1 - w_{in}) \end{cases} \quad (2.47)$$

$$\forall s \in S^u, \forall i \in I_{cs}, \forall n \in N \quad \begin{cases} stu_{sn} \leq st_{in} + H \cdot (1 - w_{in}) \\ stu_{sn} \geq st_{in} - H \cdot (1 - w_{in}) \end{cases} \quad (2.48)$$

Dans le cas d'une production d'utilité, les contraintes (2.49) synchronisent les dates de fin tandis que les contraintes (2.50) assurent la synchronisation de la date de début de la tâche productrice et de la tâche fictive associée. De même que dans le cas de la consommation, ces contraintes sont actives tant que la tâche productrice est en cours d'exécution, dans le cas contraire les contraintes seront relaxées.

$$\forall s \in S^u, \forall i \in I_{ps}, \forall n \in N | n > 1 \quad \begin{cases} ftu_{sn} \leq ft_{in-1} + H \cdot (1 - w_{in-1}) \\ ftu_{sn} \geq ft_{in-1} - H \cdot (1 - w_{in-1}) \end{cases} \quad (2.49)$$

$$\forall s \in S^u, \forall i \in I_{ps}, \forall n \in N | n > 1 \quad \begin{cases} stu_{sn} \leq st_{in-1} + H \cdot (1 - w_{in-1}) \\ stu_{sn} \geq st_{in-1} - H \cdot (1 - w_{in-1}) \end{cases} \quad (2.50)$$

Les contraintes (2.51) ordonnent les différentes tâches fictives dans le temps. Contrairement à la formulation originelle, ces tâches fictives ne sont plus contraintes à s'exécuter continuellement dans le temps mais existent uniquement en fonction de l'activité des tâches consommatrices et productrices d'utilités.

$$stu_{sn} \geq ftu_{sn-1} \quad \forall s \in S^u, \forall n \in N, n > 1 \quad (2.51)$$

**2.1.2.7.4 Séquence des tâches fictives associées aux ressources multimodales** Les tâches fictives associées aux ressources multimodales représentent les stockages au niveau des états ressources. Le raisonnement concernant ces tâches *fictives* est identique à celui correspondant aux tâches *fictives* de stockage. Les contraintes (2.52) s'assurent donc que les tâches *fictives* se terminent lorsque la tâche consommant l'état ressource se lance.

$$\forall s \in S^r, \forall i \in I_{cs}, \forall n \in N \quad \begin{cases} st_{in} \geq ftr_{sn} \\ st_{in} \leq ftr_{sn} + H \cdot (1 - ws_{in}) \end{cases} \quad (2.52)$$

Quant aux contraintes (2.53), elles synchronisent la date de début de la tâche fictive associée à l'état ressource, avec la date de fin de la tâche produisant le dit état-ressource.

$$\forall s \in S^r, \forall i \in I_{ps}, \forall n \in N | n > 1 \quad \begin{cases} str_{sn} \geq ft_{in-1} - H \cdot (1 - wf_{in-1}) \\ str_{sn} \leq ft_{in-1} + H \cdot (1 - wf_{in-1}) \end{cases} \quad (2.53)$$

Les contraintes (2.54) s'assurent de la séquence des différentes tâches *fictives* état ressource. Ces contraintes stipulent entre autre que, la date de lancement de la tâche fictive doit être au moins égale à la date de fin de la même tâche fictive lors de son lancement précédent. Ceci permet d'éviter tout chevauchement des différentes tâches.

$$str_{sn} \geq ftr_{sn-1} \quad \forall s \in S^r, \forall n \in N | n > 1 \quad (2.54)$$

### 2.1.2.8 Contraintes de durée des tâches

La durée d'une tâche représente la distance minimale entre deux lancements successifs sur un même appareil. Dans le cas des procédés discontinus, la durée d'exécution d'une tâche varie généralement en fonction de la quantité de matière traitée. Néanmoins, dans certains cas - tâches utilités - la durée d'une tâche est inconnue ou alors aucune relation linéaire ne représente fidèlement l'évolution de cette durée.

Dans ces cas particuliers, nous raisonnons par linéarisation d'une courbe obtenue expérimentalement ou nous laissons le modèle déterminer la durée appropriée en imposant des limites pratiques de fonctionnement.

**2.1.2.8.1 Durée globale des tâches [76]** De manière générale, l'expression de la durée d'une tâche stipule que la date de lancement est antérieure à la date de terminaison de la tâche. Cela est vrai tant que la tâche s'exécute et cette expression est formulée par les contraintes (2.55).

$$\forall i \in I, \forall n \in N \quad \begin{cases} ft_{in} \geq st_{in} \\ ft_{in} \leq st_{in} + H \times w_{in} \end{cases} \quad (2.55)$$

Quant aux contraintes (2.56), elles stipulent que la date de fin d'une tâche est égale à sa date de début augmentée de l'expression de sa durée, si et seulement si, la tâche qui est lancée à l'événement (n) et qui se termine à l'événement (n'), ne se termine pas entre (n) et (n').

$$\forall i \in I, \forall n \in N | n \leq n' \quad \begin{cases} ft_{in'} \geq st_{in} + pt_{in} - H \cdot [2 - ws_{in} - wf_{in'} + \sum_{n''=n}^{n'-1} wf_{in''}] \\ ft_{in'} \leq st_{in} + pt_{in} + H \cdot [2 - ws_{in} - wf_{in'} + \sum_{n''=n}^{n'-1} wf_{in''}] \end{cases} \quad (2.56)$$

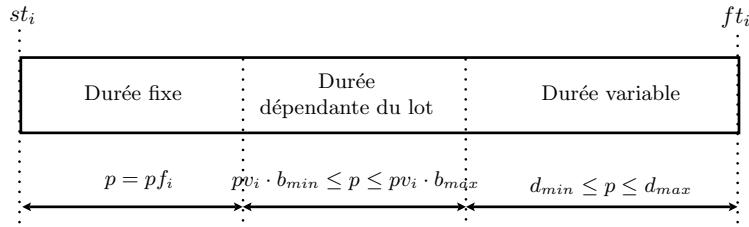


Figure 2.9 – Composantes de la durée d'une tâche

**2.1.2.8.2 Durée des tâches discontinues** Dans le cas des tâches discontinues, l'expression de la durée d'une tâche est donnée par les contraintes (2.57) qui relient la durée avec le lancement de la tâche ( $w$ ) et avec la taille de lot ( $b$ ) de cette tâche. Une composante fixe incompressible représentant une durée obligatoire est traduite par le paramètre  $pf_i$ , le paramètre  $pv_i$  correspond à la composante variable dépendante de la quantité de matière traitée et le paramètre  $pu_i$  représente une durée variable associée à la consommation d'utilité de la tâche (figure 2.9).

$$pt_{in} = pf_i ws_{in} + pv_i bs_{in} + pu_i d_{in} \quad \forall i \in I^b, \forall n \in N \quad (2.57)$$

**2.1.2.8.3 Durée des tâches continues** Dans le cas des tâches continues traitant de la matière, la durée de l'opération est souvent imposée par le débit de l'appareil. Pour exprimer cette durée, les contraintes (2.58) incorporent les paramètres  $rmax_i$  et  $rmin_i$  qui traduisent la plage de débit admissible pour la tâche (i). En réalité ces paramètres sont l'expression de l'inverse des débits  $b_{min}$  et  $b_{max}$  (voir section 2.1.2.2.2).

Si l'appareil fonctionne à débit fixe, alors  $rmin_i = rmax_i$  et ce débit fixe est multiplié par la taille de lot traitée par la tâche.

$$\forall i \in I^p, \forall n \in N \begin{cases} pt_{in} \leq pf_i ws_{in} + r_{max}^i bs_{in} + ru_i d_{in} \\ pt_{in} \geq pf_i ws_{in} + r_{min}^i bs_{in} + ru_i d_{in} \end{cases} \quad (2.58)$$

Tout comme dans le cas des tâches discontinues, une composante additionnelle dépendante de la quantité d'utilité utilisée par la tâche est ajoutée à l'expression de la durée. Cette composante se manifeste à travers le paramètre  $ru_i$  et permet à la tâche de déterminer librement sa durée.

**2.1.2.8.4 Durée des tâches utilités** Dans le cas des tâches utilités, les durées de fonctionnement des tâches sont généralement inconnues au lancement du modèle.

Sachant que ces tâches utilités sont des tâches représentant les échanges énergétiques ou les productions d'utilités, leurs durées sont généralement dépendantes de l'activité (séquence) des tâches de l'unité de production.

Donc, afin d'autoriser à cette durée de s'étendre, nous introduisons une troisième composante réelle  $d_{in}$  pouvant varier dans une certaine plage de valeur. Cette composante est liée à l'activation ou non du paramètre  $ru_i$  qui est un paramètre binaire (contraintes 2.59). Si ce paramètre n'est pas activé (valeur égale à 0), alors la durée de la tâche continue correspondra aux deux premières composantes.

$$pt_{in} = pf_i ws_{in} + rf_i bs_{in} + ru_i d_{in} \quad \forall i \in I^u, \forall n \in N \quad (2.59)$$

Cependant, lorsqu'une expression de la durée en fonction du débit,  $bs_{in}$ , est disponible, les paramètres  $rf_i$  et  $pf_i$  peuvent être utilisés pour traduire la durée de la tâche. La variable  $d_{in}$  n'a donc plus aucun rôle à jouer dans l'expression de la durée de la tâche.

**2.1.2.8.5 Durée des tâches fictives** Les contraintes (2.60) traduisent la durée des tâches fictives de stockage. Ces expressions stipulent que la tâche fictive de stockage peut avoir une durée positive ou nulle. Autrement dit, que sa date de lancement  $sts_{sn}$  est soit inférieure, soit égale à sa date de fin  $fts_{sn}$ .

$$fts_{sn} \geq sts_{sn} \quad \forall s \in S^{fis}, \forall n \in N \quad (2.60)$$

De façon identique aux tâches fictives de stockage, les contraintes (2.61) traduisent le fait que la date de fin de la tâche fictive utilité est supérieure ou égale à sa date de début.

$$ftu_{sn} \geq stu_{sn} \quad \forall s \in S^u, \forall n \in N \quad (2.61)$$

Pour le cas des tâches fictives associées aux états-ressources, les contraintes (2.62) sont identiques à ceux précédemment formulés. Cependant, elles sont complétées par les contraintes (2.63) forçant la tâche fictive à avoir une durée nulle lorsque la politique de stockage de l'état ressource est un transfert sans attente.

$$ftr_{sn} \geq str_{sn} \quad \forall s \in S^r, \forall n \in N \quad (2.62)$$

$$ftr_{sn} \leq str_{sn} + H \cdot (1 - ws_{in}) \quad \forall s \in (S^r \cap S^{zw}), i \in I_{cs}, \forall n \in N \quad (2.63)$$

### 2.1.2.9 Contraintes de borne sur les variables

Les contraintes de borne définissent les limites supérieures et inférieures des valeurs que peuvent prendre les variables du modèle. Ces contraintes s'appliquent sur les variables associées aux tâches, celles associées aux états ainsi que celles associées aux couples tâches-états (arcs).

**2.1.2.9.1 Politique de stockage** Les contraintes (2.64) stipulent que les variables  $S$  sont nulles pour toutes les politiques de stockage<sup>3</sup> exceptées pour les état en stockage infini. Inversement les contraintes (2.65) annulent toutes les variables  $bst$  représentant la quantité de stock dans les états exceptés ceux associés à un état en stockage fini. En effet, ces variables jouent le même rôle au sein du modèle et traduisent tous les deux la quantité de matière stockée au niveau d'un état, elles ne sont donc jamais actives en même temps.

$$s_{sn} \leq 0 \quad \forall s \notin S^{uis}, \forall n \in N \quad (2.64)$$

$$bst_{sn} \leq 0 \quad \forall s \notin S^{fis}, \forall n \in N \quad (2.65)$$

Lorsque l'on décide de modéliser les stockages par des tâches concrètes, il est nécessaire d'annuler l'effet des tâches fictives de stockage car elles jouent le même rôle dans le modèle. Les contraintes (2.66) et (2.67) s'appliquent aux états associés aux tâches concrètes de stockage. Ces contraintes annulent les variables associées aux stockages, tout comme précédemment, pour transférer les quantités stockées dans la taille de lot de la tâche de stockage.

$$bst_{sn} \leq 0 \quad \forall s \in S^{st}, \forall n \in N \quad (2.66)$$

3. Une politique de stockage définit la possibilité ou non d'un stockage entre deux appareils du procédé. On distingue généralement quatre (04) catégories de politiques, à savoir : le NIS (Non Intermediate Storage ou Sans Stockage Intermediare), le ZW (Zero-Wait ou Transfert Sans Attente), le FIS (Finite Intermediate Storage ou Stockage à Capacité Finie) et le UIS (Unlimited Intermediate Storage ou Stockage à Capacité Infinie). La différence entre le NIS et le ZW réside dans le fait que pour le NIS le lot est stocké dans le dernier appareil l'ayant traité tandis que pour le ZW le lot quitte instantanément l'appareil producteur du lot.

$$s_{sn} \leq 0 \quad \forall s \in S^{st}, \forall n \in N \quad (2.67)$$

Les contraintes (2.68) et (2.69) quant à elles, annulent la prise en compte des tâches *concrètes* de stockage lorsque la représentation de ces derniers n'est pas nécessaire ou lorsque la politique de stockage de l'état courant n'est pas un stockage fini.

$$ist_{sin} \leq 0 \quad \forall s \notin S^{fis}, \forall i \in I, \forall n \in N \quad (2.68)$$

$$ost_{sin} \leq 0 \quad \forall s \notin S^{fis}, \forall i \in I, \forall n \in N \quad (2.69)$$

**2.1.2.9.2 États** Les contraintes (2.70) forcent toutes les variables  $S$  (variables représentant l'état du stock) à ne pas dépasser la capacité de stockage de l'état associé. Les contraintes (2.71) et (2.72) quant à elles définissent une borne supérieure à l'importation et l'exportation de ressource.

$$s_{sn} \leq C_s \quad \forall s \in S, \forall n \in N \quad (2.70)$$

$$import_{sn} \leq import_{max}^s \quad \forall s \in S, \forall n \in N \quad (2.71)$$

$$export_{sn} \leq export_{max}^s \quad \forall s \in S, \forall n \in N \quad (2.72)$$

**2.1.2.9.3 Ressources multimodales** Les contraintes (2.73) définissent la capacité à ne pas dépasser pour les états ressources. Les contraintes (2.74) et (2.75) bornent les dates de début et de fin des tâches *fictives* associées aux états ressources pour ne pas dépasser l'horizon d'ordonnancement.

$$sr_{sn} \leq Cr_s \quad \forall s \in S^r, \forall n \in N \quad (2.73)$$

$$str_{sn} \leq H \quad \forall s \in S^r, \forall n \in N \quad (2.74)$$

$$ftr_{sn} \leq H \quad \forall s \in S^r, \forall n \in N \quad (2.75)$$

**2.1.2.9.4 Tâches** Les contraintes (2.76) et (2.77) définissent la borne supérieure de la date de lancement et de fin des tâches. Les contraintes (2.78) lient la composante libre de la durée d'une tâche avec le lancement de la tâche. En effet, si la tâche ne se lance pas, alors la variable  $d_{in}$  sera nulle, si elle se lance par contre, elle sera bornée par la valeur du paramètre  $dmax$  qui correspond à la longueur de l'intervalle de variation de la durée.

$$st_{in} \leq H \quad \forall i \in I, \forall n \in N \quad (2.76)$$

$$ft_{in} \leq H \quad \forall i \in I, \forall n \in N \quad (2.77)$$

$$d_{in} \leq d_{max}^i \cdot ws_{in} \quad \forall i \in I, \forall n \in N \quad (2.78)$$

Les contraintes (2.79) quant à elles, définissent la variable traduisant la durée totale d'exécution de l'ordonnancement. Cette variable est destinée à être minimisée au niveau de la fonction objectif, ce qui aura pour conséquence la compression de la durée du plan d'ordonnancement.

$$ft_{in} \leq plan \quad \forall i \in I, \forall n \in N \quad (2.79)$$

**2.1.2.9.5 Tâches fictives utilités** L'expression des bornes sur les variables représentant les tâches *fictives utilités* sont les mêmes que pour les tâches *concrètes* classiques. Ainsi, les contraintes (2.80) et (2.81) définissent la borne supérieure des dates de lancement et de terminaison des tâches *fictives utilités*.

$$stu_{sn} \leq H \quad \forall s \in S^u, \forall n \in N \quad (2.80)$$

$$ftu_{sn} \leq H \quad \forall s \in S^u, \forall n \in N \quad (2.81)$$

**2.1.2.9.6 Tâches fictives de stockage** De façon identique aux contraintes précédentes, celles énoncées ci-dessous bornent les variables *sts* et *fts* représentant les dates de début et de fin des tâches *fictives de stockage*, à la valeur de *H*.

$$sts_{sn} \leq H \quad \forall s \in S^{fis}, \forall n \in N \quad (2.82)$$

$$fts_{sn} \leq H \quad \forall s \in S^{fis}, \forall n \in N \quad (2.83)$$

$$sts_{s1} = 0 \quad \forall s \in S^{fis} \quad (2.84)$$

Les contraintes formulées précédemment permettent de délimiter les domaines respectifs des variables continues et entières du modèle d'ordonnancement. Elles définissent par la même occasion, quelles variables sont activées lors de quelles situations, permettant ainsi au modèle de représenter les différents comportements des procédés semi-continus.

### 2.1.2.10 Contraintes de resserrement

Les contraintes de resserrement ont été présentées par JANAK, LIN et FLOUDAS [76], ces contraintes sont des inégalités valides, autrement dit, des coupes ou contraintes additionnelles ajoutées au modèle afin d'accélérer la résolution et d'améliorer la valeur de la relaxation continue<sup>4</sup>. Parmi ces contraintes on retrouve les contraintes (2.85) qui stipulent que pour un appareil donné *j*, la somme de la durée des tâches qui se lancent sur l'appareil ne doit pas excéder la valeur de l'horizon.

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{n \in N} pt_{in} \leq H \quad \forall j \in J \quad (2.85)$$

Les contraintes (2.86) associent une variable *tts* à chaque appareil et définissent la valeur de cette variable à l'instant *n*, à celle de la date de début de la tâche qui se lance sur l'appareil à cet instant. Les contraintes (2.87) en font de même mais cette fois ci pour la date de fin de la tâche qui se lance à l'instant *n*.

$$\forall j \in J, \forall i \in I_j, \forall n \in N \quad \begin{cases} tts_{jn} \leq st_{in} + H(1 - ws_{in}) \\ tts_{jn} \geq st_{in} - H(1 - ws_{in}) \end{cases} \quad (2.86)$$

$$\forall j \in J, \forall i \in I_j, \forall n \in N \quad \begin{cases} tt f_{jn} \leq ft_{in} + H(1 - wf_{in}) \\ tt f_{jn} \geq ft_{in} - H(1 - wf_{in}) \end{cases} \quad (2.87)$$

4. La valeur de la relaxation continue représente la valeur de la fonction objectif lorsque toutes les contraintes d'intégralité (2.6) sont abandonnées. Elle permet d'obtenir une borne inférieure (en minimisation) sur la valeur que pourra prendre la fonction objectif.

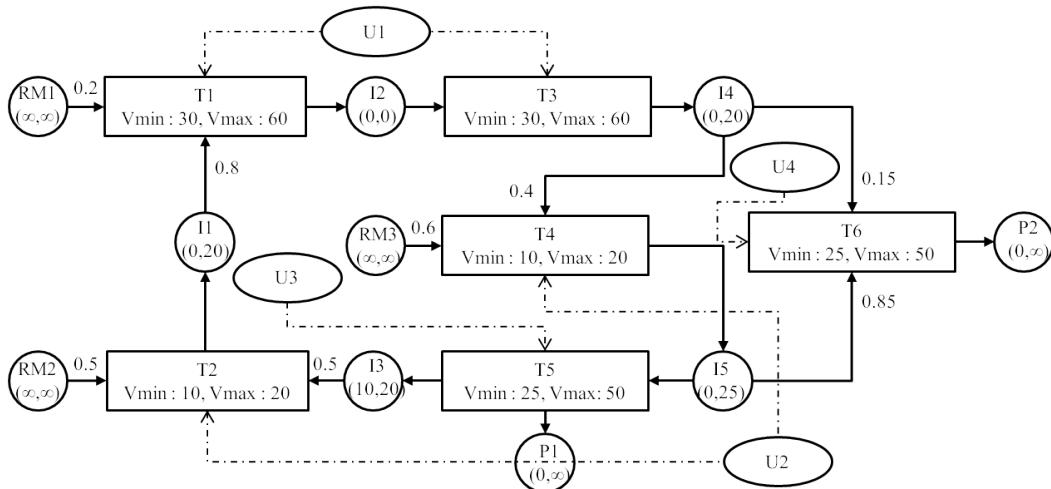


Figure 2.10 – Exemple type de configuration

A partir de la valeur de  $tts$ , les contraintes (2.88) stipulent que la somme des durées des tâches devant se lancer sur l'appareil  $j$  mais ne s'étant pas encore lancées à l'instant  $n$ , devra être inférieure au temps restant.

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{n \leq n'} p t_{in'} \leq H - tt s_{jn} \quad \forall j \in J, \forall n \in N \quad (2.88)$$

Les contraintes (2.89) quant à elles, stipulent que si au moins une tâche  $i$  s'est terminée à l'instant  $n - 1$  sur l'appareil  $j$ , alors la somme des durées de toutes les tâches s'étant exécutés sur l'appareil  $j$  avant l'instant  $n$ , ne devra pas dépasser la valeur de  $ttf$ .

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{n' < n} p t_{in'} \leq t t f_{jn-1} + H(1 - \sum_{i \in I_j} w f_{in-1}) \quad \forall j \in J, \forall n \in N | n > 1 \quad (2.89)$$

### 2.1.3 Contraintes résultant de l'analyse de la recette

Afin d'accélérer la convergence du modèle d'ordonnancement, une analyse de la recette et des caractéristiques de l'instance traitée permet d'extraire des contraintes améliorant la résolution du modèle. Ces contraintes, redondantes, appelées également *inégalités valides* ou *coupes*, permettent de réduire l'espace de recherche de manière à n'exclure aucune solution réalisable du problème. Ainsi, ces contraintes résultent d'une part, de l'analyse de la recette correspondant au cas étudié et d'autre part, de la propriété du modèle mathématique. L'utilisation de ces contraintes dépend donc de l'exemple traité mais il est possible de formuler des situations générales pouvant se présenter lors de l'ordonnancement des procédés discontinus. Afin d'illustrer les contraintes sur un exemple type, nous utiliserons la recette de la figure 2.10.

### 2.1.3.1 Disponibilité de la matière

En observant la recette de la figure 2.10, on peut remarquer qu'il n'y a aucun stock initial dans les états intermédiaires I1, I2, I4 et I5. Seul I3 dispose de matière, permettant ainsi à la tâche T2, seule, de se lancer au premier événement. Nous pouvons donc fixer les variables d'activité correspondant aux tâches T1 et T3 à T6, à 0 pour ce premier événement. La formulation de cette contrainte s'effectue de la manière suivante :

$$ws_{i,1} \leq 0 \quad \forall i \notin \{\text{T2}\}$$

Sachant d'après la situation précédente que seule la tâche T2 est autorisée à se lancer au premier événement, on peut observer sur la recette que l'unique tâche pouvant se lancer, au plus tôt, au second événement,  $n=2$ , est la tâche T1. En effet, le lancement de T1 est conditionné par la disponibilité de la matière dans l'état I1. Cet état étant uniquement disponible à l'événement 2. La contrainte suivante peut alors être formulée :

$$ws_{i,2} \leq 0 \quad \forall i \notin \{T1, T2\}$$

Lorsque cette situation est généralisée, on peut déterminer pour chaque événement  $n > 2$ , l'ensemble des tâches pouvant se lancer à chaque point d'évènement.

D'un autre coté, on peut adopter la même logique mais en débutant cette fois-ci, des états représentant les produits finis, en l'occurrence P1 et P2. En effet, au dernier point d'événement,  $n=|N|$ , seules les tâches T5 et T6 devront se lancer (au plus tard), afin que la matière qu'ils traitent puissent se trouver dans les états P1 et P2 à la fin de l'ordonnancement. En effet, tous les autres lancements ne participeront pas à la réalisation des produits finis mais généreront des stockages intermédiaires en fin d'horizon. Afin de représenter cette situation dans le modèle d'ordonnancement, la contrainte ci-dessous peut être utilisée :

$$ws_{i,|N|} \leq 0 \quad \forall i \notin \{T5, T6\}$$

Lorsque cette logique est étendue pour le cas de l'événement  $n = |N| - 1$ , alors seules les tâches T3 et T4 sont autorisées à se lancer à cet événement pour que la matière qu'ils traitent participe à la réalisation des produits finis. La contrainte correspondante est alors la suivante :

$$ws_{i,|N|-1} \leq 0 \quad \forall i \in \{T1, T2\}$$

Cette contrainte peut alors être généralisée pour les cas où  $n < |N| - 1$ . Les contraintes que nous venons de voir, correspondent à la réalisation de coupes avant et après chaque tâche de la recette.

### 2.1.3.2 Ressource critique

Une machine goulet est une ressource de production dont la capacité est inférieure à la capacité de toutes les autres ressources, prises unes par unes. Autrement dit, la capacité maximale de la ligne ou du réseau, est contraint à la valeur de la capacité de cette ressource goulet. Lorsque l'on observe le cas de la figure 2.10, on peut constater que l'appareil U2 correspond à cette situation. En effet, à cette ressource correspondent les tâches T2 et T4, le cas de T2 peut être utilisé pour illustration. Lorsqu'on observe la séquence  $T2 \rightarrow T1$ , on constate qu'il faut au moins deux lancements de T2 sur la machine U2 pour pouvoir lancer un lot au niveau de la tâche T1 sur la ressource U1. Si au niveau de la fonction objectif, un critère de minimisation des coûts fixes liés au lancement des tâches, est formulé, alors la constatation précédente permet de formuler la contrainte suivante :

$$\sum_{n \in N} ws_{T1,n} \leq \sum_{n \in N} ws_{T2,n}$$

Autrement dit, le nombre de lancement de la tâche T1 dans la solution finale du problème devra être inférieur au nombre de fois que la tâche T2 se lancera. Cette contrainte permet de réduire considérablement le nombre de configuration possible. Lorsque le cas de la tâche T4 est observé, on peut remarquer qu'une contrainte similaire peut être formulée pour les tâches T5 et T6. En effet, la tâche T4, ou plutôt, la ressource U2, a une capacité maximale de 20 contre un minimal de 25 unités pour les ressources U4 et U3. On voit clairement que la tâche T4 doit au

minimum être lancé deux fois pour satisfaire le besoin des tâches produisant les produits finis. La contrainte associée au couple T4-T5 est alors donnée comme suit :

$$\sum_{n \in N} ws_{T5,n} \leq \sum_{n \in N} ws_{T4,n}$$

La situation que nous venons de voir permet alors la détermination de la ressource critique faisant partie du chemin critique du réseau. Nous retrouvons cette notion dans les réseaux PERT<sup>5</sup> relatif à l'ordonnancement de projet.

### 2.1.3.3 Flux continu

L'observation de la ligne correspondant à la ressource U1 permet également d'extraire une caractéristique intéressante de la recette. En effet, les tâches T1 et T3 sont censés fonctionner successivement l'un à la suite de l'autre et cela sans attente. Cette situation est illustrée par le fait que le stockage intermédiaire entre les tâches citées précédemment, n'existe pas (cas NIS ou ZW). Nous conclurons donc que, dans la solution finale, ces deux tâches seront traversées par la même quantité de matière et se lanceront le même nombre de fois. Lorsque cette conclusion est transformée en contraintes, alors celles-ci sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \sum_{n \in N} ws_{T1,n} &= \sum_{n \in N} ws_{T3,n} \\ \sum_{n \in N} bs_{T1,n} &= \sum_{n \in N} bs_{T3,n} \end{aligned}$$

A partir de l'observation précédente, nous pouvons établir la règle que toutes les tâches de l'ERTN interfacées par un état NIS (ou ZW) se lancent le même nombre de fois et transmettent la même quantité de matière. De plus, vu qu'aucun stockage n'est possible entre ces tâches, alors elles sont contraintes à s'exécuter à des événements successifs et leur taille de lot devront également être identique. Ces contraintes se formulent de la manière suivante :

$$\begin{aligned} wf_{T1,n-1} &\leq ws_{T3,n} & \forall n \in N | n > 1 \\ bf_{T1,n-1} &= bs_{T3,n} & \forall n \in N | n > 1 \end{aligned}$$

Ces contraintes stipulent que si la tâche T1 se termine à l'événement  $n-1$  alors la tâche T3 devra se lancer au prochain événement, de plus la taille de lot de T3 sera égale à la taille de lot de T1 à l'événement précédent. Ces contraintes permettent de fixer la valeur d'un certain nombre de variables binaires et réelles, et améliore grandement l'efficacité du modèle d'ordonnancement.

### 2.1.3.4 Activation des tâches sur plusieurs événements

La formulation du modèle d'ordonnancement proposé par JANAK, LIN et FLOUDAS [76] autorise l'activation d'une tâche sur plusieurs événements lorsque la tâche en question fait partie d'un regroupement de tâches produisant un stockage à capacité finie ou lorsque la tâche consomme une ressource utilisée à capacité limitée. Pour les tâches non soumises à cette restriction, l'activation sur plusieurs points d'événements n'est pas requise [75]. Dans le cas de notre exemple, ces situations ne sont pas observées, on pourra donc proposer les contraintes suivantes :

$$ws_{in} \leq wf_{in} \quad \forall i \in I, \forall n \in N$$

Ces contraintes stipulent que lorsque la tâche  $i$  se lance à l'événement  $n$ , alors, il devra se terminer au même événement. Ces genres de contrainte allègent grandement la résolution du

---

5. Program and Evaluation Review Technique

modèle car la connaissance de la variable binaire  $ws$  définit entièrement la valeur des variables binaires  $wf$ . Ces contraintes sont alors assimilées à des contraintes de “symmetry-breaking” et permettent de réduire (tronquer), de moitié, l’exploration de l’arbre de recherche.

#### 2.1.4 La fonction objectif

La fonction objectif peut être formulée à partir de deux expressions. La première expression correspond à un critère relatif aux objectifs de production formulés au niveau de l’atelier. La seconde expression correspond à un critère relatif aux consommations d’énergie, celle-ci s’exprime sur les quantités retrouvées au niveau de la centrale de cogénération ou du réseau d’échangeur de chaleur. Cependant, même si deux critères sont formulés nous traitons ici d’un problème d’optimisation mono-objectif.

Le critère relatif aux objectifs de production est donnée par l’expression (2.90). Dans cette expression, on retrouve entre autre le critère de satisfaction des demandes en produits finis (première composante) et l’objectif en terme de stockage intermédiaire en fin d’horizon (deuxième composante). Mais également, le nombre de lancement des tâches (troisième composante) et le critère correspondant à la durée totale de l’ordonnancement (dernière composante).

$$z_1 = \sum_{s \in S^{fp}} C_{fp} sf_s + \sum_{s \in S^{int}} C_{int} sf_s + \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} C_l ws_{in} + C_{ms} plan \quad (2.90)$$

Le critère relatif à la consommation énergétique donné par l’expression (2.91), intègre les consommations en vapeur à différentes pressions (trois premières composantes), la consommation en matière première qui correspond ici aux importations en sources primaires d’énergie à savoir les carburants (4<sup>e</sup> composante), l’eau (5<sup>e</sup> composante) et électricité (6<sup>e</sup> composante).

$$\begin{aligned} z_2 = & \sum_{s \in S^{hp}} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} C_{hp} ui_{sin} + \sum_{s \in S^{mp}} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} C_{mp} ui_{sin} + \sum_{s \in S^{lp}} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} C_{lp} ui_{sin} + \\ & \sum_{s \in S^{fu}} C_{fu}(s0_s - sf_s) + \sum_{s \in S^w} C_w(s0_s - sf_s) + \sum_{s \in S^{el}} \sum_{n \in N} C_{el} import_{sn} \end{aligned} \quad (2.91)$$

La fonction objectif consiste alors à minimiser la somme pondérée de l’objectif de production et de l’objectif énergétique. Cette relation est donnée par l’expression ci-dessous<sup>6</sup> :

$$z = \alpha_1 \cdot z_1 + \alpha_2 \cdot z_2$$

Il est également possible d’introduire dans l’expression précédente la maximisation des quantités d’énergie récupérées, ceci se fait en maximisant la somme des tailles de lot traversant les tâches servant à récupérer l’énergie. Mais de manière générale, les coefficients  $C_x$  représentent les coûts associés aux ressources de type  $x$ . Elles sont donc prédéfinies et sont utilisées comme des paramètres du modèle.

#### 2.1.5 Conduite du modèle d’ordonnancement

Du fait de la nature du modèle dépendante du nombre d’événements  $N$ , l’exécution pour la valeur  $N_{min}$ <sup>7</sup> ne permet pas d’obtenir l’optimum global du problème. En effet, le nombre d’événement joue un rôle prépondérant dans la qualité de la solution obtenue. Plus ce nombre est élevé, plus la qualité de la solution augmente, néanmoins, il existe un certain seuil au delà duquel l’augmentation du paramètre  $N$  n’influence plus la qualité de la solution. L’obtention de

6. Nous assumerons, dans le cadre de nos travaux, que les coefficients  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  sont équivalents (valeur égale à 0.5). La configuration d’ordonnancement optimale sera donc dépendante des valeurs des coefficients de coût  $C_x$ .

7. Plus petite valeur de  $N$  permettant de satisfaire toutes les contraintes du modèle

cette valeur maximale se fait par résolution itérative du modèle en incrémentant  $N$  au fur et à mesure des itérations jusqu'à ce que la valeur de la fonction objectif n'enregistre plus d'amélioration ou qu'une durée maximale du temps de simulation soit atteinte.

La procédure retenue pour la conduite de l'optimisation est alors donnée par l'algorithme 1. On pourra constater qu'il existe un certain nombre de paramètres associés à la procédure. A savoir,  $c_{max}$  et  $N_{min}$ . Les rôles de ces paramètres et de deux paramètres de contrôle supplémentaires, sont donnés ci dessous :

- Le paramètre  $c_{max}$  est obligatoire et représente le nombre maximal d'itérations au bout duquel une solution du problème est considérée comme optimale. A titre d'exemple, si l'on attribue arbitrairement la valeur de 2 à ce paramètre, alors l'algorithme considèrera comme solution optimale du problème, la solution  $x^i$  (où  $i$  est l'itération courante), si les solutions  $x^{i+1}$  et  $x^{i+2}$  produisent une valeur de la fonction objectif moins bonne (ou équivalente) à celle fournie par la solution  $x^i$ . On pourra alors établir la condition d'optimalité suivante (en minimisation) :

$$x^i = x^* \Leftrightarrow x^i \leq x^{i'} \quad \forall \varepsilon, i, i' \in \mathbb{N}, \quad \varepsilon > 0, \quad i < i' \leq i + \varepsilon \quad (2.92)$$

- Le paramètre  $N_{min}$  est obligatoire et représente la plus petite valeur de  $N$  pour laquelle le modèle satisfait toutes les contraintes ;
- Le paramètre  $tlim$  quant à lui, traduit la durée maximale (optionnelle en secondes) d'une itération. Autrement dit,  $tlim$  représente le temps alloué au modèle pour produire une solution. Si cette valeur est omise, alors le modèle sera exécuté jusqu'à l'obtention de la solution optimale pour le nombre d'événement  $n$  donné. Dans le cas contraire, le modèle produira la meilleure solution disponible au terme de cette durée ;
- Le paramètre  $rgap$  est optionnel et représente quant à lui, la tolérance d'optimalité en (%). Cette différence est mesurée entre l'évaluation de la meilleure borne inférieure et le coût de la solution courante. A titre d'illustration, si le décideur estime qu'une solution avec une tolérance d'optimalité inférieure ou égale à 15% est satisfaisante, alors le paramètre  $rgap$  est fixé à 0.15.

Cette procédure est implémentée avec le langage OplScript et pilote automatiquement la résolution du modèle de PLVM avec le solveur CPLEX d'IBM.

## 2.2 Modèle hybride de PLVM / PPC

### 2.2.1 Introduction

Le modèle d'ordonnancement que nous avons formulé dans les sections précédentes et que nous noterons ( $M$ ) représente un modèle de PLVM. Le problème d'ordonnancement associé au modèle ( $M$ ) sera noté [P]. La programmation linéaire en variables mixtes est un puissant outil de modélisation, cependant, cette formulation souffre d'un inconvénient majeur. L'obligation d'utiliser des contraintes linéaires, pour représenter des phénomènes non-linéaires, dans les modèles de PLVM, a tendance à augmenter la taille du modèle en fonction du degré de finesse recherché. En effet, il est souvent nécessaire d'effectuer des pré-traitements (linéarisations par morceaux) sur les données afin d'obtenir une utilisation efficace des données par le modèle. Ce qui a pour conséquence une augmentation drastique du temps nécessaire pour la résolution optimale de l'instance.

Afin d'obtenir une solution de bonne qualité (voire optimale) en un temps acceptable lors de traitements de problèmes de grandes ou moyennes tailles, il est nécessaire d'avoir recours à des méthodes permettant de *diviser* ou de *décomposer* le problème en une série de problèmes de petites tailles facilement résolues. C'est dans cette logique que s'aligne les travaux présentés dans cette section.

### 2.2.2 Principe de décomposition

L'approche de décomposition utilisée est basée sur la *décomposition de Benders hybride* [17, 65]. Le principe de l'algorithme consiste à définir un problème dit *problème-maître* et un problème appelé *sous-problème* puis à résoudre itérativement ces deux problèmes en leur demandant de communiquer leurs résultats. Le modèle associé au problème maître est alors un modèle de PLVM et le modèle associé au sous problème est un modèle de Programmation Par Contraintes (PPC). Cette approche a été proposée dans JAIN et GROSSMANN et HOOKER et OTTOSSON [63, 64, 65, 66, 67, 74].

L'intérêt de ce couplage réside dans le fait que le problème-maître est un problème d'optimisation de taille plus réduite. Plus précisément, le problème maître est réduit à la résolution d'un problème *d'affectation* et de *lot-sizing*. Tandis que le sous-problème est un problème *d'ordonnancement détaillé*, ce dernier consiste donc à déterminer la séquence des tâches sur chaque appareil ainsi que la date de lancement de chaque tâche du procédé.

L'analyse de la structure du modèle (M) présenté dans la section précédente, permet d'observer que les variables liées à l'affectation et au lot-sizing (variables  $w_{in}$  et  $b_{in}$ ) peuvent être découplées — déterminées indépendamment — des variables liées à la séquence des tâches sur chaque appareil ( $st_{in}, ft_{in}$ ). En d'autres termes, il est possible de décomposer le problème [P], en deux problèmes [MP] et [SP] de tailles plus restreintes. La résolution de [MP] permet alors de déterminer dans un premier temps, les valeurs des variables liées à l'affectation et au dimensionnement des tailles de lots, ensuite, à partir de ces valeurs, [SP] détermine les dates de début et de fin de chaque tâche sur chaque appareil. On associera alors le rôle du problème-maître [MP] à celui du niveau de la planification dans les systèmes de production. C'est à dire, qu'il réalise l'établissement du plan de charge de l'atelier (détermine le nombre et la taille de chaque lot) et détermine également quelles ressources (appareils) devront réaliser quelles opérations. Le sous-problème [SP] quant à lui réalise l'ordonnancement détaillé des tâches devant être exécutées, autrement dit, [SP] détermine à quel moment devra être exécuté chaque tâche.

L'exploitation de la PLVM au niveau de [MP] est motivé par le fait que l'on y résout un problème d'optimisation, de plus lorsque [MP] est relaxé des contraintes de séquences (big-M), une amélioration de la relaxation continue et une diminution de la taille des PL résolus à chaque nœud du Branch-and-Bound est enregistrée. Par ailleurs, le cas de [SP] est assimilé à un problème de faisabilité lorsque la fonction objectif consiste à minimiser les coûts de production. Sachant que la PPC est bien adaptée pour la résolution des problèmes de satisfaction de contraintes, la recherche des différentes séquences des tâches sur chaque appareil est facilement réalisée à travers les contraintes globales disponibles en programmation par contraintes. De plus, le fait d'avoir délégué la résolution du problème d'affectation et de lot-sizing à [MP] permet d'épargner la recherche d'une solution optimale et la preuve d'optimalité au niveau de [SP] — absence de la notion de relaxation en programmation linéaire — améliorant ainsi l'efficacité de cette dernière.

Le fonctionnement général de l'algorithme est alors le suivant :

1. Le modèle commence par la résolution à l'optimalité de [MP]. Du fait de la nature relaxée de [MP], la valeur de la fonction objectif de [MP] est une borne inférieure de la valeur de la fonction objectif de [P]. Cette solution n'est donc pas obligatoirement réalisable ;
2. Si aucune solution n'est obtenue à ce stade, alors le problème [P] est infaisable et l'algorithme se termine ;
3. Si une solution est obtenue, celle-ci est transférée à [SP] pour déterminer si cette solution peut être étendue à toutes les variables de [P]. Plus concrètement, cette étape détermine si il est possible de trouver un séquencement des tâches lancées par [MP].
4. Si une solution faisable est obtenue, alors cette solution correspond à la solution optimale de [P] pour le nombre de points d'événements donné ;

5. Si, au contraire, aucune solution n'est obtenue, alors les causes d'infaisabilités sont inférées sous formes de coupes dites « coupes de Benders » et sont transmises à [MP] à la prochaine itération. Ces coupes lorsqu'elles sont ajoutées au modèle, permettent d'extraire la solution infaisable de l'ensemble des solutions admissibles de [MP] ;
6. Le problème [MP] est alors résolu à nouveau avec les nouvelles coupes et l'algorithme se poursuit. A ce stade, en fonction du résultat obtenu par cette dernière étape, l'algorithme se poursuit soit à l'étape 2 soit à l'étape 3.

Une représentation en pseudo-code de l'algorithme proposé est donnée par l'algorithme 2 et son implémentation est réalisée avec le langage OplScript. Cet algorithme a été appliqué avec succès à différents problèmes d'ordonnancement de procédés discontinus sans prise en compte des contraintes d'énergie [56, 74, 102, 133]. Nous l'étendrons, dans cette thèse, au cas des procédés discontinus sous contraintes de récupération énergétique.

### 2.2.3 Modélisation du problème-maître [MP]

Le problème-maître est un problème d'affectation et de *lot-sizing*. Autrement dit, il s'occupe de déterminer les couplages optimaux entre les opérations et les ressources unitaires constituant le procédé étudié mais il détermine également le nombre de lot à lancer ainsi que la taille de ces derniers. Le modèle de PLVM, que nous noterons modèle (M1), représentant le problème d'affectation et de *lot-sizing* est donc le même que celui présenté dans la section 2.1 excepté le fait que les contraintes de séquences ainsi que toutes les contraintes représentant les tâches fictives sont ôtées du modèle. En effet, tous les aspects relatifs au temps tels que les variables associées aux dates de début et de fin ainsi que celles associées aux contraintes de séquence sont relaxées au niveau de ce nouveau modèle. Ces variables ainsi que ces contraintes sont alors transférées au niveau du sous-modèle qui se chargera de déterminer la séquence optimale.

#### 2.2.3.1 Fonction objectif

Le modèle (M1) se chargera de déterminer le nombre de lot ainsi que la taille de chaque lot conformément aux commandes devant être livrées en fin d'horizon et conformément aux objectifs de stockage intermédiaires. Il sera également en charge de déterminer la configuration minimisant les coûts liés à la consommation en matières premières (carburants, eau, produits intrants) et en utilités (vapeur, eau chaude et électricité), et principalement dans ce dernier cas, le modèle devra donner le nombre de fois qu'une récupération énergétique est réalisée ainsi que la quantité d'énergie récupérée. De plus, le modèle devra fournir quelle tâche sera lancée sur quel appareil pour minimiser les coûts de lancement et combien d'opérations de nettoyage, de démarrage, d'arrêt etc. devront être réalisées.

La fonction objectif associée à (M1) est identique à celle de (M) au niveau de l'atelier de production et de la centrale de cogénération, cependant, un critère supplémentaire associé au réseau d'échangeurs de chaleur est ajoutée à l'expression de cette fonction. Cette dernière s'exprime alors de la manière suivante :

$$z = \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \alpha_3 z_3 \quad (2.93)$$

$$z_3 = \sum_{i \in I^e} \sum_{n \in N} C_e \times b_{in} + \sum_{i \in I^e} \sum_{n \in N} C_e \times d_{in} \quad (2.94)$$

Les expressions  $z_1$  et  $z_2$  sont identiques à celles fournies par les relations 2.90 et 2.91, la relation 2.94 quant à elle permet d'agir sur la quantité d'énergie récupérée ( $b_{in}$ ) et sur la durée des échanges ( $d_{in}$ ) au niveau des tâches d'échange  $I^e$ .

---

**Algorithme 1:** Principe de résolution du modèle de PLVM

---

**Données :**  $n \leftarrow N_{min}$

**Entrées :**  $z^* \leftarrow \infty; c \leftarrow 1;$

**tant que**  $c \leq c_{max}$  faire

$z^n \leftarrow \text{SolveProblem}(n);$

**si**  $z^n < z^*$  alors

$z^* \leftarrow z^n;$

$c \leftarrow 1;$

**sinon**

$c \leftarrow c + 1;$

$n \leftarrow n + 1;$

**Sorties :**  $z^*$

---



---

**Algorithme 2:** Principe de résolution du modèle hybride

---

**Données :**  $n;$

**Entrées :**  $k \leftarrow 0; cond \leftarrow true; z^* \leftarrow \infty;$

**tant que**  $cond$  faire

$(x^k, z^k) \leftarrow \text{SolveMasterProblem}(n);$

$feas \leftarrow \text{SolveSubProblem}(x^k);$

**si**  $feas$  alors

$z^* \leftarrow z^k;$

$cond \leftarrow false;$

**sinon**

$\text{AddCut}(x^k);$

$k \leftarrow k + 1;$

**Output :**  $z^*$

---



---

**Algorithme 3:** Conduite du modèle hybride

---

**Entrées :**  $z^* \leftarrow \infty; n \leftarrow N_{min};$

$z^n \leftarrow \text{SolveMasterProblem}(n);$

**tant que**  $z^n < z^*$  faire

$z^* \leftarrow z^n;$

$n \leftarrow n + 1;$

$z^n \leftarrow \text{SolveMasterProblem}(n);$

$z_{ub} \leftarrow \text{SetUpperBound}(z^*);$

$y^n \leftarrow \text{SolveMasterProblem}(n, z_{ub});$

**tant que**  $y^n < z^*$  faire

$z^* \leftarrow y^n;$

$n \leftarrow n + 1;$

$z_{ub} \leftarrow \text{SetUpperBound}(z^*);$

$y^n \leftarrow \text{SolveMasterProblem}(n, z_{ub});$

**Sorties :**  $z^*$

---

### 2.2.3.2 Contraintes du modèle

Les contraintes du modèle d'ordonnancement sont équivalentes à celles formulées dans la section 2.1 à la différence que les contraintes (2.2) à (2.6) sont désormais retirées du modèle. De plus, les variables  $w$  sont désormais des variables de décision. Toutes contraintes faisant intervenir les variables  $st$ ,  $ft$  ainsi que celles relatives aux tâches fictives sont également retirées du modèle d'ordonnancement. De plus, nous ajoutons un paramètre supplémentaire au modèle afin de limiter le nombre de lancement d'une tâche dans la solution finale. Ce paramètre additionnel est nommé NC et correspond au nombre maximal de copies autorisé pour chaque opérations du procédé. Le résultat fourni par le modèle [MP] est généralement une solution incomplète de par le fait que les contraintes de séquence sont absentes dans la formulation du modèle. Afin de compléter et d'étendre cette solution à l'ensemble des variables du problème d'ordonnancement, la solution fournie, si elle existe, devra être transmise au sous modèle que nous définissons dans la section suivante. Du fait de cette nature incomplète de (M1), la solution fournie correspond à une borne inférieure sur la valeur de la fonction objectif du problème d'ordonnancement [P]. La structure générale du modèle à l'itération K est alors la suivante :

$$(M1^K) : \min z \quad \sum_{i \in I_j} w_{in} \leq 1, \quad \forall j \in J, n \in N \quad (2.95)$$

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{n \in N} pt_{in} \leq plan, \quad \forall j \in J \quad (2.96)$$

$$b_{min}^i w_{in} \leq b_{in} \leq b_{max}^i w_{in}, \quad \forall i \in I, n \in N \quad (2.97)$$

$$\begin{cases} i_{sin} = roi_{is} b_{in} \\ o_{sin} = roo_{is} b_{in} \end{cases} \quad \forall s \in S, i \in I, n \in N \quad (2.98)$$

$$\begin{cases} ui_{sin} = ufi_{is} w_{in} + uv_{is} b_{in} + uw_{is} d_{in} \\ uo_{sin} = ufo_{is} w_{in} + uvo_{is} b_{in} + uwo_{is} d_{in} \end{cases} \quad \forall s \in S, i \in I, n \in N \quad (2.99)$$

$$pt_{in} = pf_i w_{in} + pv_i b_{in} + pu_i d_{in}, \quad \forall i \in I, n \in N \quad (2.100)$$

$$\begin{cases} s_{sn} + \sum_{i \in I} i_{sin} + \sum_{i \in I} ui_{sin} + export_{sn} = \\ s_{sn-1} + \sum_{i \in I} o_{sin-1} + \sum_{i \in I} uo_{sin-1} + import_{sn-1} \end{cases} \quad \forall s \in S, n \in N \quad (2.101)$$

$$\begin{cases} s_{s0} = s0_s \\ s_{s1} + \sum_{i \in I} i_{si1} + \sum_{i \in I} ui_{si1} + export_{s1} = s_{s0} \end{cases} \quad \forall s \in S \quad (2.102)$$

$$\begin{cases} sf_s \geq D_s \\ s_{sN} + \sum_{i \in I} o_{siN} + \sum_{i \in I} uo_{siN} + import_{sN} = sf_s \end{cases} \quad \forall s \in S \quad (2.103)$$

$$\sum_{n \in N} w_{in} \leq NC, \quad \forall i \in I \quad (2.104)$$

$$\sum_{(i,n) \in L^k} w_{in} \leq |L^k| - 1 \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K-1\} \quad (2.105)$$

$$w_{in} \in \{0, 1\}, b_{in}, d_{in} \in \mathbb{R}^+, \quad \forall i \in I, n \in N \quad (2.106)$$

Le modèle associé à [MP] est composé des contraintes 2.95 à 2.105. Les contraintes 2.95 représentent les contraintes d'allocation. Quant aux contraintes 2.96, elles représentent une relaxation des contraintes d'affectation et permettent d'obtenir une borne inférieure sur la durée

du plan d'ordonnancement. Les contraintes 2.97 permettent de définir la plage des tailles de lot de chaque tâche et les contraintes 2.98 et 2.99 représentent respectivement les quantités de matières et d'utilités produites et consommées par une tâche dans un état. Les contraintes 2.100 traduisent l'expression des durées des tâches et les contraintes de bilan sont formulées à travers les contraintes 2.101 à 2.103. Finalement, les contraintes 2.105 traduisent les coupes de Benders générées au sein du modèle de [MP] à chaque itération  $k \in \{1, 2, \dots, K - 1\}$ . L'ensemble  $L^k = \{(i, n) | w_{in}^k = 1\}$  associé à ces contraintes regroupe les tâches lancées à chaque évènement dans la solution obtenue aux itérations  $k \in \{1, 2, \dots, K - 1\}$  où  $K$  est l'itération courante.

#### 2.2.4 Modélisation du sous-problème [SP]

Le sous-problème est essentiellement résolu avec la programmation par contraintes. Il correspond à un problème de faisabilité et s'applique à vérifier si la solution fournie par le problème [MP] est réalisable. Le modèle que nous noterons (M2) correspond à la modélisation du sous-problème. Dans le cadre de nos travaux, (M2) utilise le langage de modélisation OPL [68, 69] qui dispose de contraintes globales ainsi que de structures spécifiquement conçues pour résoudre les modèles d'ordonnancement.

Pour chaque variable binaire  $w_{in}$  ayant une valeur égale à 1 dans la solution courante du modèle (M1), nous associons une variable interval nommée  $op[t]$  de durée  $t.dur$  et de taille de lot  $t.batch$ . Nous créons également une variable interval dénommée  $MS$  de durée variable et de consommation nulle en ressource. Pour chaque ressource unitaire  $j$  du procédé, nous créons une contrainte sequence nommée  $seq[j]$ . Cette contrainte de séquence permet, lorsqu'on utilise la contrainte  $noOverlap$ , de gérer le fait qu'une ressource unitaire  $j$  ne peut exécuter qu'une seule tâche à un instant donné. Pour chaque état matière  $s$  du procédé, nous introduisons une variable  $levelmat[s]$  de capacité  $C[s]$  pour représenter la consommation / production de la dite ressource. Cette contrainte représente le bilan massique au niveau de l'état  $s$ . Nous réalisons la même chose pour les états-ressources que nous représentons par la variable  $levelmats[s]$  de capacité  $Cr[s]$ . Ces contraintes représentent les bilans au niveau des états ressources. Le cas des ressources de type utilité est décomposé en deux situations : lorsque ces ressources utilisent concernent les tâches au niveau du réseau d'échangeurs de chaleur, alors la variable  $statehex[s]$  est utilisée pour formuler les équations de bilan. Lorsque ces ressources utilisent concernent les tâches au niveau de la centrale d'utilités, alors la formulation de la ressource cumulative est obtenue à travers la relation  $statechp[s]$ . La distinction réalisée ici permet de synchroniser les tâches devant échanger de l'énergie au niveau du réseau d'échangeurs et de cumuler les demandes de l'atelier au niveau des tâches de la centrale de cogénération. Dans ce dernier cas, les consommations en utilités de l'atelier sont diminuées des quantités d'énergie traversant les échangeurs de chaleur lorsque cette énergie est ramenée en quantité de vapeur ou d'électricité. Ces contraintes sont alors formulées indépendamment, pour tous les états utilisés de la représentation ERTN correspondant à la centrale. Ces contraintes créent automatiquement le profil de consommation en utilités de l'atelier de production et de la même manière, définit la durée de fonctionnement de chaque tâche de la centrale de cogénération.

La déclaration des tâches et des états dans le langage OPL 12 est alors la suivante :

```
dvar interval op[t in T] in 0..H;
dvar interval MS in 0..H;
dvar sequence seq[j in J] in all(t in T: t.unit=j);
cumulFunction statemat[s in Smat] =
    step(0, S0[s]) +
    sum(t in TP[s]) stepAtEnd(op[t], t.o) -
    sum(t in TC[s]) stepAtStart(op[t], t.i);
cumulFunction stateres[s in Sres] =
    step(0, Sr0[s]) +
```

```

sum(t in TP[s]) stepAtEnd(op[t], roro[t.task][s])-
sum(t in TC[s]) stepAtStart(op[t], rori[t.task][s]);
cumulFunction statechp[s in Schp] =
    sum(t in TC[s]) pulse(op[t], t.ui) -
    sum(t in TP[s]) pulse(op[t], t.uo);
cumulFunction statehex[s in Shen]=
    step(0,S0[s])+ 
    sum(t in CTP[s]) stepAtStart(op[t],t.o)+ 
    sum(t in CTP[s]) stepAtStart(op[t],t.uo)+ 
    sum(t in BTP[s]) stepAtStart(op[t],t.uo)- 
    sum(t in CTC[s]) stepAtStart(op[t],t.i)- 
    sum(t in CTC[s]) stepAtStart(op[t],t.ui)- 
    sum(t in BTC[s]) stepAtStart(op[t],t.ui);

```

Les contraintes modélisant les capacités des ressources cumulatives (états) destinés à être produites et consommées par les tâches sont représentées par les relations suivantes. De manière simple, ces contraintes stipulent que dans l'intervalle  $[0, H]$ , la ressource cumulative est contrainte à ne pas dépasser  $C[s]$ .

```

forall(s in Smat) alwaysIn(statemat[s],0,H,0,C[s]);
forall(s in Shen) alwaysIn(statehex[s],0,H,0,C[s]);
forall(s in Sres) alwaysIn(stateres[s],0,H,0,Cr[s]);
forall(s in Schp, t in TP[s]) alwaysIn(statechp[s],0,H,0,Vmax[t.task]);

```

Les relations permettant d'assurer l'arbitrage de l'utilisation des ressources unitaires (appareils) du procédé sont représentées par les contraintes suivantes :

```
forall(j in J) noOverlap(seq[j]);
```

Les contraintes représentant la durée des tâches continues et discontinues au niveau de l'atelier sont données ci-après. Ces durées sont définies au niveau de [MP] et sont transmises comme des paramètres vers [SP].

```
forall(t in BT||CT) lengthOf(op[t]) = t.dur;
```

Cependant, pour le cas des tâches utilités, les durées sont inconnues au moment du lancement du modèle [SP]. La détermination de ces durées est donc déléguée au sous-modèle, d'où le fait de n'introduire aucune imposition sur la durée de ces types de tâche.

```
forall(t in UT) lengthOf(op[t]) >= 0;
```

Les contraintes de séquence sont modélisées à travers les contraintes globales suivantes. Nous retrouvons ici la décomposition formulée dans le modèle de la section 2.1. En effet, lorsque l'on doit séquencer une tâche sur un seul appareil, le modèle devra s'assurer qu'il n'existe aucun chevauchement entre les différentes instances de la tâche. De même lorsque des tâches différentes doivent être séquencées sur le même appareil, alors la situation précédente reste valide. L'expression de ces situations dans le modèle de [SP] est donnée par les relations suivantes.

```

forall(t,tp in T|t.task =tp.task & t.unit=tp.unit)
    endBeforeStart(op[t],op[tp]);
forall(t,tp in T|t.task!=tp.task & t.unit=tp.unit)
    endBeforeStart(op[t],op[tp]);

```

Le cas de la non-disponibilité de stockage intermédiaire oblige les tâches à s'enchaîner ou à se synchroniser dans le temps. Ces situations sont modélisées de la manière suivante :

```

forall(s in Snis, t in TP[s], tp in TC[s]) startAtEnd(op[tp],op[t]);
forall(s in Snis, t in CTP[s], tp in CTC[s]) startAtStart(op[t],op[tp]);

```

La représentation de la figure 2.6 est formulée par les contraintes ci-après. Ces contraintes stipulent que lorsqu'une tâche discontinue précède une tâche quelconque traitant de la matière,

alors la tâche en amont devra se terminer avant que la tâche en aval puisse commencer. Par ailleurs, si une tâche continue précède une tâche discontinue, alors la tâche discontinue devra attendre la fin de la tâche continue pour pouvoir se lancer. Finalement, si deux tâches continues se succèdent, dont la première produisant un état  $s$  et la seconde consommant le même état, alors la deuxième tâche continue ne pourra débuter qu'une fois que la première tâche aura commencé.

```
forall(s in Smat, t in BTP[s], tp in TC[s]) endBeforeStart(op[t],op[tp]);
forall(s in Smat, t in CTP[s], tp in BTC[s]) endBeforeStart(op[t],op[tp]);
forall(s in Smat, t in CTP[s], tp in CTC[s]) startBeforeStart(op[t],op[tp]);
```

Le séquencement des tâches lors de la modélisation des opérations multimodales est donné par les contraintes qui suivent. Ces dernières permettent de stipuler que lorsque l'état multimodal permet un stockage, alors la tâche consommatrice de l'état ne pourra débuter que lorsque la tâche productrice aura été lancée. Par ailleurs, lorsque le stockage n'est pas permis, alors la tâche consommatrice devra commencer exactement au moment où la tâche productrice se terminera.

```
forall(s in Sres, t in TP[s], tp in TC[s]) startBeforeStart(op[t],op[tp]);
forall(s in Sres, t in TP[s], tp in TC[s]) startAtEnd(op[tp],op[t]);
```

D'un autre côté, lorsque deux tâches utilités se succèdent, alors les deux tâches devront débuter au même moment. Ces situations se retrouvent au niveau du réseau d'échangeur de chaleur et niveau de la centrale de cogénération et sont représentés par les contraintes formulées ci-après. Les durées de ces tâches sont alors des variables du problème.

```
forall(s in Shen, t in TP[s], tp in TC[s]) startAtStart(op[t],op[tp]);
forall(s in Schp, t in TP[s], tp in TC[s]) startAtStart(op[t],op[tp]);
```

Finalement, les contraintes qui suivent permettent de stipuler que la tâche MS recouvre toutes les tâches lancées. Lorsque cette variable est introduite dans la fonction objectif, elle permet de minimiser la durée du makespan. Sachant que cette tâche, fictive, à une consommation nulle en utilité, elle n'altère pas les profils de consommation en ressources.

```
span(MS, all(t in T) op[t]);
minimize lengthOf(MS);
```

Nous tenons cependant à faire remarquer que lorsque ces dernières contraintes sont formulées dans (M2), celui-ci devient un problème d'optimisation. Néanmoins, si l'objectif du sous-problème est de vérifier la faisabilité de la solution proposée par le problème maître, alors ces dernières contraintes peuvent être omises.

## 2.2.5 Coupes de Benders

Les coupes ajoutées à (M1) suite à l'infaisabilité détectée au niveau du sous-problème sont les équivalents des *nogoods* en PPC. Elles permettent d'exclure uniquement la solution courante et leur forme générale correspond à la relation (2.107) où  $L^k$  représente l'ensemble des variables  $w$  prenant la valeur 1 à l'itération  $k$  et  $N^k$ , celle prenant la valeur 0.

$$\sum_{(i,n) \in L^k} w_{in} - \sum_{(i,n) \in N^k} w_{in} \leq |L^k| - 1 \quad (2.107)$$

Ainsi donc, à chaque fois que le sous-problème est infaisable, une coupe équivalente à celle de la contrainte (2.107) est ajoutée au niveau de (M1). L'algorithme en charge de la communication entre les deux modèles devra donc pré-allouer un certain nombre de lignes à la matrice  $A$  des contraintes du modèle [MP] et mettre à jour à chaque itération les coefficients  $a_{ij}$  de cette matrice. Comme discuté dans MARAVELIAS et GROSSMANN [102], les coupes de la forme de la contrainte (2.107) sont des coupes peu efficaces car elles n'excluent que la solution courante

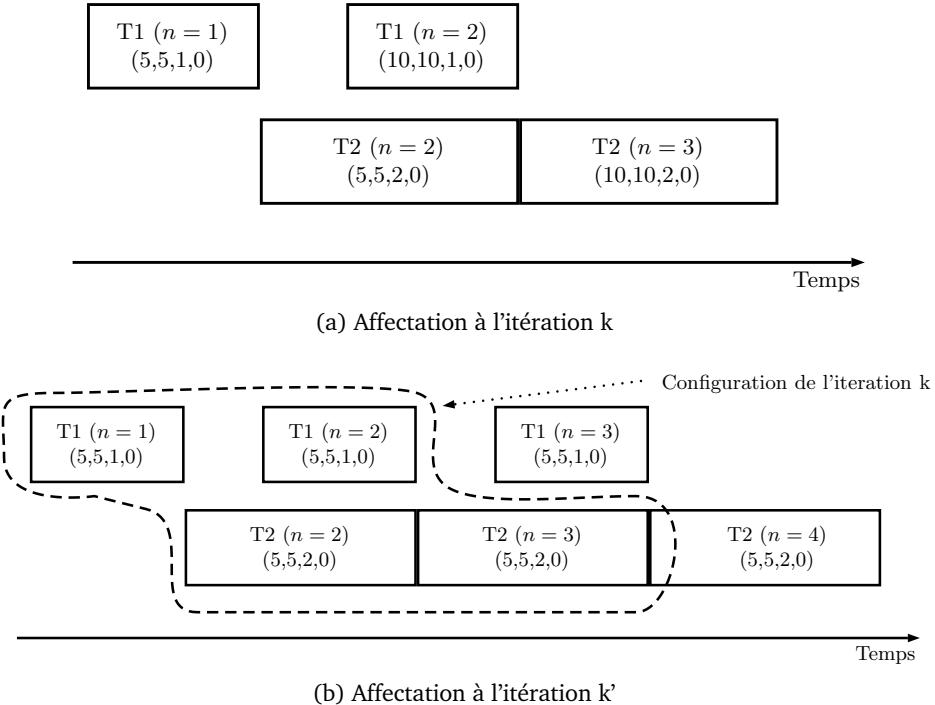


Figure 2.11 – Illustration des coupes de Benders

mais cependant, ce sont les seules garantissant l'obtention de la solution optimale moyennant un nombre d'itérations relativement important car les configurations sont exclues une par une de l'espace des solutions. Cependant, lorsqu'une économie d'échelle, ou une minimisation de la durée du plan, est prise en compte dans la formulation de la fonction objectif, nous pouvons remplacer les coupes précédentes par l'expression suivante :

$$\sum_{(i,n) \in L^k} w_{in} \leq |L^k| - 1 \quad (2.108)$$

Ces dernières permettent alors d'exclure la configuration courante, mais également toutes les configurations contenant la configuration courante. Dans le cadre de nos travaux, nous nous limiterons donc à la forme générale définie par la relation (2.108). Ainsi, les coupes de la forme de la contrainte (2.107) pour le cas de la figure 2.11a créent la contrainte suivante pour le cas où 3 points d'événements sont utilisés :

$$(w_{11} + w_{12} + w_{22} + w_{23}) - (w_{13} + w_{21}) \leq 4 - 1$$

Cette contrainte n'exclut de l'ensemble des solutions que cette solution de la figure 2.11a. Ainsi, si au cours de la résolution du modèle à une itération supérieure, la solution de la figure 2.11b est trouvée, alors elle sera une solution admissible du problème. Par contre, si la coupe (2.108) est appliquée, alors la forme de la contrainte sera la suivante :

$$(w_{11} + w_{12} + w_{22} + w_{23}) \leq 4 - 1$$

Si cette contrainte résultant de l'infaisabilité de la solution de la figure 2.11a est ajoutée au modèle à l'itération  $k$ , alors à l'itération  $k'$ , la solution de la figure 2.11b sera écartée de l'ensemble des solutions. Plus généralement, toute solution incluant l'affectation de la figure 2.11a sera écartée de l'ensemble admissible des solutions.

### 2.2.6 Conduite du modèle hybride

La conduite du modèle hybride s'effectue de la même manière que dans le cas du modèle de PLVM, autrement dit, la convergence du modèle hybride est dépendante des valeurs des paramètres présentés dans la section 2.1.5.

Néanmoins, la condition de convergence est différente du cas du modèle de PLVM. En effet, sachant que la résolution à l'optimal de [MP] permet d'obtenir en premier lieu la meilleure solution, lorsque celle-ci est faisable au niveau de [SP] alors la solution optimale de coût  $z^n$  correspondant au nombre d'évènement courant est obtenu. L'algorithme se poursuit alors en augmentant  $n$ . Si pour cette valeur de  $n$ , une solution de meilleure qualité est obtenue, alors le coût de la solution optimale,  $z^*$ , est mis à jour. Par contre, si aucune solution de coût inférieur n'est obtenue, alors [MP] n'est plus résolu à l'optimal mais recherche dorénavant une solution faisable de coût  $y^n$  strictement inférieur au coût de la meilleure solution obtenue. Si cette solution existe pour la durée d'optimisation  $tlim$  associée à chaque itération, alors la solution optimale est mise à jour et une contrainte de borne sur la fonction objectif est ajoutée à [MP]. Sinon, la solution à l'itération précédente est optimale et l'algorithme se termine. La représentation en pseudo-code de cet algorithme est donnée par l'Algorithme 3 page 76.

## 2.3 Conclusion

Ce chapitre a permis de définir le cadre mathématique pour l'ordonnancement des procédés discontinus avec prise en compte de l'aspect l'énergétique. Deux formulations y sont alors présentées. La première formulation est une représentation sous forme d'un modèle de PLVM. Cette démarche est nécessaire pour bénéficier d'une base de résultats et d'analyses sur les divers comportements engendrés par la modélisation des tâches utilisatrices des ressources énergétiques. A travers ce premier modèle, il nous est donc possible de décrire les différentes contraintes mises en jeu lors de la prise en compte explicite de la centrale d'énergie ainsi que du réseau de récupérateurs d'énergie.

Le deuxième modèle quant à lui, utilise un couplage entre les méthodes issues de la recherche opérationnelle et celles issues de l'intelligence artificielle. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement au couplage PLVM/PPC. Motivé d'une part, par le fait que les modèles à base de PLVM sont efficacement conçus pour résoudre des problèmes d'optimisation et d'autre part, que les modèles à base de PPC sont plutôt orientés vers la résolution des problèmes de satisfaction de contraintes, nous avons utilisé dans ce chapitre une décomposition permettant de faire collaborer ces deux types de modélisation.

Nous verrons alors dans le prochain chapitre, la méthodologie pour l'incorporation de la récupération d'énergie dans le modèle d'ordonnancement. Nous y éprouverons l'efficacité des deux modèles sur des exemples simples afin de dégager leurs comportements face au problème de l'intégration énergétique.

# CHAPITRE 3

## ORDONNANCEMENT ET INTÉGRATION ÉNERGÉTIQUE

### Plan du chapitre

<b>3.1 Notions de base</b>	<b>84</b>
<b>3.2 Intégration énergétique directe</b>	<b>86</b>
3.2.1 Modélisation des tâches au niveau l'atelier de production	86
3.2.2 Modélisation des tâches au niveau du réseau d'échangeur	92
3.2.3 Modélisation des tâches au niveau de la centrale d'utilité	94
<b>3.3 Intégration énergétique indirecte</b>	<b>99</b>
<b>3.4 Modélisation des opérations multi-modales</b>	<b>102</b>
3.4.1 Modélisation des opérations de nettoyage	102
3.4.2 Modélisation des tâches de démarrage et d'arrêt	103
3.4.3 Modélisation des phases de maintien en conditions	104
<b>3.5 Exemples d'applications</b>	<b>104</b>
3.5.1 Intégration énergétique directe (Exemple 1)	105
3.5.2 Intégration énergétique indirecte (Exemple 2)	112
3.5.3 Prise en compte des opérations multi-modales (Exemples 3 à 5)	118
<b>3.6 Conclusion</b>	<b>122</b>

Ce chapitre présente la méthodologie pour la prise en compte de l'intégration énergétique dans le modèle d'ordonnancement. Nous débuterons par un bref rappel des définitions et notions fondamentales manipulées tout au long de ce rapport, puis nous aborderons la prise en compte de l'intégration énergétique directe dans le modèle d'ordonnancement. Cette première partie sera ensuite étendue au cas du stockage énergétique. Tout au long de cette présentation, la démarche pour la modélisation des tâches consommant, produisant ou transférant l'énergie est décrite et le formalisme graphique ERTN présenté par THERY et al. [146] est utilisé comme support de modélisation. Cette modélisation est alors réalisée conjointement sur les tâches de l'atelier de production, du réseau d'échangeur de chaleur et de la centrale d'utilités.

A travers ce chapitre, nous aurons la possibilité d'appliquer le modèle d'ordonnancement sur une série d'exemples intégrant la récupération énergétique directe, dans un premier temps, puis la récupération énergétique avec stockage, dans un deuxième temps. Mais avant cela, la démarche de modélisation dans le formalisme ERTN des ressources multimodales est réalisée. Finalement, au travers de ces différentes expérimentations, certaines propriétés du modèle sont soulevées et des directives sont proposées pour une meilleure intégration de la récupération énergétique dans le modèle d'ordonnancement.

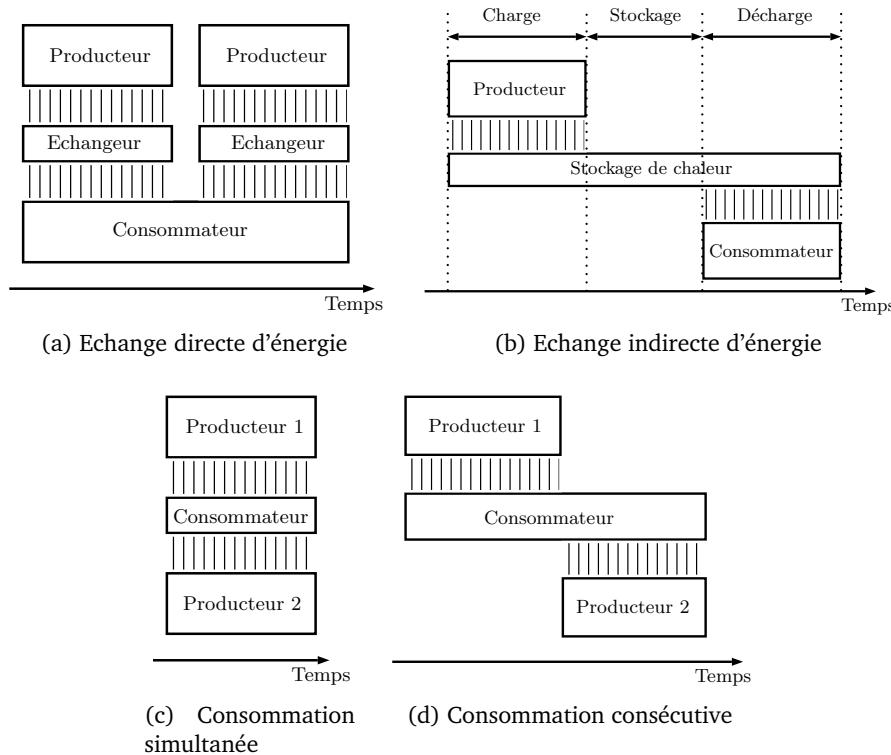


Figure 3.1 – Mode d'intégration énergétique

### 3.1 Notions de base

Lorsqu'on aborde le thème de l'intégration énergétique, une distinction sur le type d'intégration est observée en fonction de la disponibilité temporelle de la ressource échangée. Cette distinction introduit la notion :

- **d'intégration énergétique directe** caractérisée par le fait que la commodité échangée n'est disponible que pendant la fenêtre de temps associée à sa production. Autrement dit, si la commodité en question est de la chaleur, elle n'est pas stockable sous sa forme ultime et nécessite d'être consommée immédiatement au risque d'être irrécupérable ultérieurement. L'utilisation de la ressource devra donc s'effectuer simultanément avec sa production (figure 3.1a) ;
- **d'intégration énergétique indirecte** dans laquelle on autorise le stockage de la commodité pendant une certaine période moyennant un apport d'énergie externe. Par intégration énergétique indirecte, nous entendons donc le concept de stockage énergétique. Ce stockage autorise alors un déphasage entre le moment de la production et celui de l'utilisation de l'énergie conférant ainsi au procédé une meilleure flexibilité comparée au cas de l'intégration énergétique directe (figure 3.1b).

Le modèle que nous proposons prend en considération ces deux modes d'intégration énergétique et s'appuie sur le principe de conservation de l'énergie. Cependant, la représentation des tâches productrices et consommatrices d'utilités, ainsi que la modélisation des échanges énergétiques au niveau du formalisme ERTN nécessite une démarche particulière que nous décrirons par la suite.

Avant d'entrer dans les détails de la modélisation, rappelons qu'il existe une différenciation de la consommation d'énergie d'un appareil en fonction de la source d'énergie.

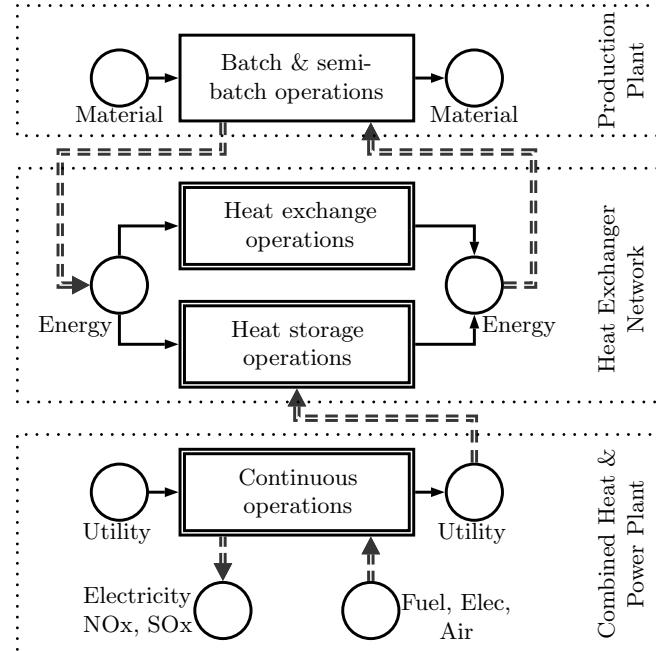


Figure 3.2 – Décomposition fonctionnelle de l’unité de production

### Définition 3.1 (Sources des fournitures d’énergie)

Si un appareil fonctionne avec l’énergie fournie par la centrale d’utilité, nous disons que l’appareil est en consommation **externe** d’énergie (car la source est externe à l’atelier de production). Inversement, si l’appareil fonctionne avec l’énergie récupérée au sein de l’atelier de production alors nous faisons référence à une consommation **interne** d’énergie. Dans le cas où une partie de l’énergie consommée est fournie par la centrale d’utilité et l’autre partie par une opération de l’atelier de production, on assiste à une consommation **mixte** d’énergie.

Dans le cas d’une consommation mixte<sup>1</sup>, la consommation externe et interne peut être *simultanée* ou *consécutive*, la différence entre ces deux situations réside au niveau de la séquence de la fourniture d’énergie. Dans le cas d’un consommation simultanée (figure 3.1c), l’énergie est fournie simultanément par un échange avec une autre opération et par la centrale d’utilité. Ces situations se manifestent lorsque l’énergie échangée n’est pas suffisante pour réaliser l’opération, la centrale de cogénération fournit donc la quantité d’énergie manquante. Dans le cas de la consommation consécutive (figure 3.1d), l’opération consommatrice d’énergie fonctionne pendant un certain temps avec l’énergie récupérée, puis, lorsque l’échange se termine, alors l’opération consommatrice d’énergie bascule en mode de consommation externe jusqu’à ce qu’une potentialité d’échange se représente ou jusqu’à ce que la dite opération se termine.

Le procédé, lorsqu’il est considéré dans son intégralité, est témoin de l’existence de différents types de flux tels que des flux de matière, des flux d’utilité ou des flux d’énergie. Afin d’identifier et de classifier les différents flux mis en jeu dans le procédé, il est nécessaire d’établir une cartographie du procédé selon la nature des flux circulant dans le système. Les différents flux mis en jeu par chacun des sous systèmes du procédé sont présentés sur la figure 3.2, on remarque donc qu’au niveau de l’atelier de production, les tâches transforment la matière en utilisant de l’énergie. Au niveau de la centrale de cogénération, les opérations transforment des utilités en consommant de la matière sous forme de carburant fossiles, de l’énergie sous forme

1. Nous admettrons, dans cette thèse, que l’appareil consommateur (ou producteur) d’énergie dispose de la technologie nécessaire pour autoriser une consommation simultanée provenant d’une source externe et d’une source interne.

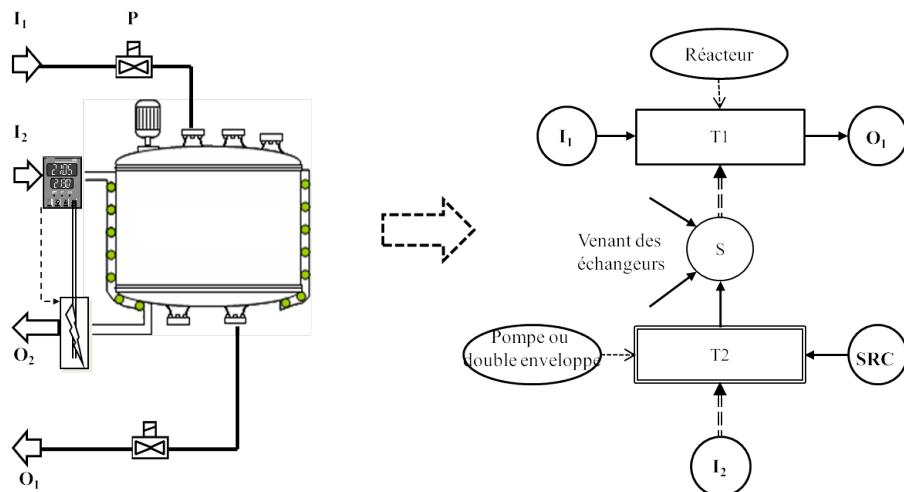


Figure 3.3 – Modélisation ERTN d'un appareil consommateur d'énergie

d'électricité et en produisant soit de la matière sous forme d'effluents, de GES<sup>2</sup>, soit des utilités sous forme d'électricité et de vapeur à différentes pressions. Finalement, au niveau du réseau d'échangeur de chaleur, les tâches assurent le transfert énergétique entre les différentes opérations de l'atelier en consommant éventuellement, lors des stockages d'énergie, des utilités. Notons également, qu'au niveau de l'atelier de production, la variable  $b$  peut représenter soit une quantité de matière (lot) soit un débit de matière, autrement dit, l'atelier de production est un procédé semi-continu mais est majoritairement le siège de tâches discontinues. Le mode de fonctionnement prépondérant est donc le fonctionnement discontinu (même si des opérations continues peuvent exister). Tandis qu'au niveau de la centrale d'utilité et du réseau d'échangeurs de chaleur,  $b$  représente des quantités par unité de temps, autrement dit, des débits matière ou énergétique. De ce fait, les sous-systèmes associés au réseau d'échangeur de chaleur et à la centrale de cogénération sont des portions du procédé dominés par un mode de fonctionnement continu. Ainsi, le procédé dans son intégralité fonctionne en mode semi-continu et comprend à la fois des tâches continues et des tâches discontinues.

## 3.2 Intégration énergétique directe

Dans cette section, nous discuterons de la modélisation des tâches consommatrices et productrices d'énergie au niveau de l'atelier de production et de la centrale de cogénération. Nous y présentons également la démarche pour la modélisation des tâches de transfert d'énergie au niveau du réseau d'échangeurs de chaleur lorsque le mode d'intégration énergétique directe est pris en compte.

### 3.2.1 Modélisation des tâches au niveau l'atelier de production

En fonction du type de tâche rencontré, nous décrirons, dans la suite, les spécificités permettant la prise en compte de l'intégration énergétique directe dans le modèle d'ordonnancement. La représentation ERTN sert de support de modélisation pour la traduction des contraintes au niveau du modèle d'ordonnancement.

2. Gaz à Effets de Serre

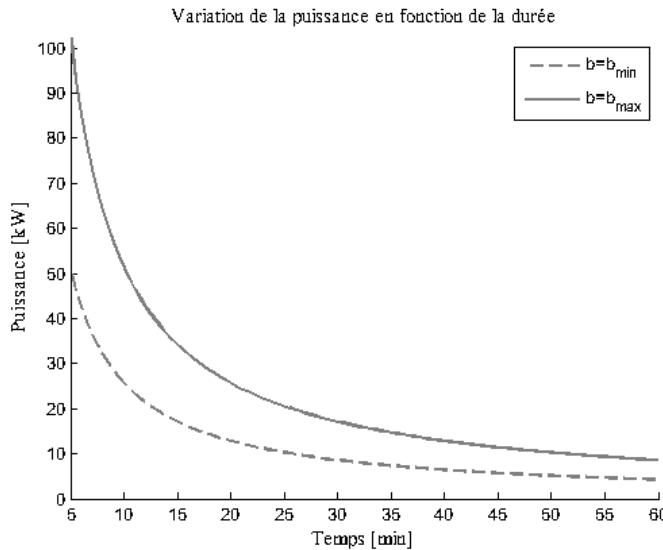


Figure 3.4 – Variation de la puissance en fonction de la durée d'une opération

### 3.2.1.1 Modélisation des tâches discontinues

Afin de permettre la consommation d'énergie, provenant de différentes sources, la modélisation d'une tâche consommatrice d'énergie au niveau du formalisme ERTN est représentée par la figure 3.3. Sur cette figure, nous assimilons un appareil comme l'association d'une cuve et d'un élément de transfert d'énergie. La représentation retenue dissocie donc le traitement de la matière du traitement de l'énergie (ou de l'utilité). La tâche  $T_1$  associée à la cuve fonctionne en mode discontinu tandis que la tâche  $T_2$  véhiculant une certaine quantité d'énergie, fonctionne en mode continu. Ce choix est justifié par le fait que le flux traversant la tâche  $T_2$  est un flux continu (débit d'utilité) contrairement à celui traversant  $T_1$  où la matière est en rétention dans le réacteur. Les arcs reliés à l'état  $S$  de la figure 3.3, mis à part celui relié à  $T_1$ , correspondent aux apports d'énergie provenant d'une part, des différentes opérations d'échange énergétique au sein de l'atelier de production et d'autre part, des utilités (à travers la tâche  $T_2$ ). L'état en question représente donc le nœud de bilan de puissance et achemine l'énergie provenant de l'état source (SRC) ou des échangeurs (non représentés) vers la tâche consommatrice, en l'occurrence  $T_1$ . La modélisation d'une tâche produisant de l'énergie est similaire au cas de la figure 3.3, à l'exception près que, le sens des arcs au niveau du nœud de bilan est inversé. La logique reste donc la même que dans le cas précédent.

Dans la section 2.1.2.4.3 page 55, nous avons formulé l'expression de l'utilité consommée ou produite par une tâche, comme étant une quantité par unité de temps, c'est-à-dire un débit énergétique. Le choix de représenter explicitement la puissance découle du fait que la prise en compte de la centrale d'utilité dans l'ordonnancement engendre la nécessité d'évaluer instantanément la puissance utilisée par les tâches de l'atelier de production. Cette puissance devra alors être contrainte à ne pas dépasser la capacité de la centrale.

Dans le cas général, la variation de la puissance moyenne fournie par une tâche discontinue, en fonction de la durée de la tâche et pour une valeur donnée de sa taille de lot, est représentée par la figure 3.4. On remarque alors qu'il existe un tracé spécifique pour chaque valeur du lot. Les profils associés aux valeurs extrémiales sont donnés sur la figure, les profils correspondant aux valeurs intermédiaires se trouvent donc dans cette bande.

La puissance requise par une tâche est donc fonction d'une part, de la durée de la tâche, et d'autre part, de la quantité de matière traitée par l'appareil. Cette dépendance engendre un pro-

blème avec une infinité de solutions car les trois entités à savoir la taille de lot ( $b$ ), la puissance ( $P$ ) et la durée de l'opération ( $pt$ ) sont toutes des inconnues du problème d'ordonnancement. Plusieurs situations peuvent alors se présenter :

- Si la durée ( $pf$ ) de l'opération est connue, alors le problème consiste à déterminer la valeur de la taille de lot et celle de la puissance requise par chaque tâche du procédé. Dans ce cas précis, l'expression de la puissance se fait directement en fonction de la taille de lot. Effectivement, sachant que l'énergie produite par une tâche discontinue est directement proportionnelle à sa taille de lot  $b$ , la puissance consommée par la tâche est alors donnée par l'expression :

$$P = ui = \frac{E}{pf} = \frac{b \times C_p \times \Delta T}{pf} = uvi \times b \quad (3.1)$$

on obtient alors une relation linéaire en fonction de la taille de lot avec  $\Delta T$  et  $C_p$ , respectivement la différence de température et la capacité calorifique de la matière à chauffer ou à refroidir. On retrouve alors la valeur du paramètre  $uvi$  défini au niveau de la contrainte (2.21) (cas de la consommation d'énergie) ;

- Si la puissance utile  $uf$  est connue, alors le problème consiste à déterminer la taille de lot et la durée de chaque tâche du procédé. Dans ce cas précis, l'expression de la durée est donnée par la relation suivante :

$$pt = \frac{E}{uf} = \frac{b \times C_p \times \Delta T}{uf} = pv \times b \quad (3.2)$$

on constate alors que la durée est proportionnelle à la taille de lot de la tâche considérée et l'on retrouve la valeur du paramètre  $pv$  de la contrainte (2.57).

- Si la puissance et la durée sont des inconnues mais une relation linéaire, empirique<sup>3</sup> en fonction de la taille de lot est disponible, alors l'expression de la puissance consommée ainsi que celle de la durée des tâches sont données par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} P &= ui = ufi + uvi \times b \\ pt &= pf + pv \times b \end{aligned}$$

Ces expressions sont les même que ceux de la contrainte (2.21) et de la contrainte (2.57).

- Finalement, si une expression  $pt$  de la durée en fonction de la taille de lot est disponible, alors la puissance requise par la tâche est obtenue par la relation suivante :

$$P = \frac{E}{pt} = \frac{b \times C_p \times \Delta T}{pf + pv \times b}$$

Où  $E$  représente l'énergie (en Joule) demandée par la tâche et  $pt$  la durée de cette dernière. On constate alors que la puissance est fonction de la taille de lot  $b$  traitée par la tâche. L'évolution de cette puissance en fonction de la taille de lot correspond au profil de la figure 3.5, profil qu'il faudra ensuite linéariser afin d'être exploité au niveau du modèle d'ordonnancement.

Les situations citées précédemment admettent l'existence d'au moins une expression reliant deux des inconnues du triplet ( $b, pt, P$ ) ou alors émettent l'hypothèse d'une valeur donnée correspondant à au moins une des variables du triplet précédent. Cependant, lorsque ces hypothèses deviennent trop limitatives lors de la représentation du problème, alors on retombe sur le cas

3. La grande majorité des travaux retrouvés dans la littérature, s'appuient sur cette hypothèse. Ces expressions sont donc disponibles pour des cas d'études issus de la littérature et résultent principalement d'analyses statistiques (distribution) réalisées sur des valeurs expérimentales et/ou empiriques. Ces cas d'études servent généralement à valider la performance des modèles d'ordonnancement.

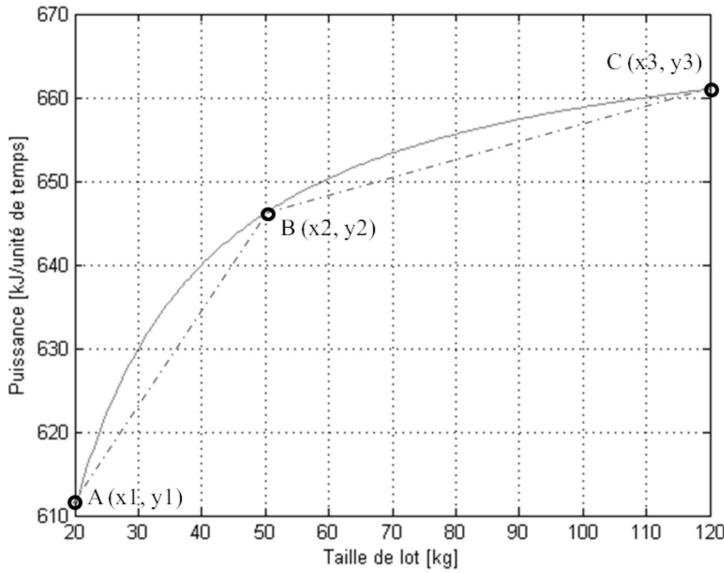


Figure 3.5 – Variation de la puissance en fonction de la taille de lot

général, mais également le plus complet qui admet que la puissance et la durée des tâches sont des inconnues au lancement de l'optimisation. Même si des limites inférieures et supérieures sont utilisées pour réduire l'espace des points de fonctionnement, la complexité du problème reste complète. Dans ce cas, il est nécessaire de revenir sur la figure 3.4.

#### Hypothèse 3.1 (Estimation des productions/consommations d'énergie)

Pour une tâche donnée dont la taille de lot (ou le débit) peut varier entre  $[b_{min}, b_{max}]$ , la consommation d'énergie correspond à celle associée à la borne maximale de la plage de taille de lot (ou de débit), c'est à dire à  $b_{max}$ . Dans le cas où la tâche produit de l'énergie, la production d'énergie correspond à celle associée à la borne minimale de la taille de lot (ou de débit), soit  $b_{min}$ .

La démarche suivie est alors composée d'une série de décompositions et d'estimations réalisées sur le triplet précédent. Cette procédure est la suivante :

**Phase a - Décomposition des tailles de lot :** Tout d'abord, et en sachant qu'il existe autant de tracé possible que de taille de lot, il est nécessaire de sélectionner une valeur admissible de la taille de lot. Pour ce faire, nous émettons l'hypothèse 3.1 qui s'interprète de la manière suivante lorsqu'elle est appliquée à la situation de la figure 3.4. Si cette figure s'applique à une tâche qui consomme de l'énergie, alors le tracé retenu est la courbe en trait continu. Si cette figure s'applique à une tâche productrice d'énergie, alors la courbe retenue est le tracé en trait discontinu. Ce choix permet d'une part de s'assurer que la consommation d'énergie d'une tâche ne dépassera pas sa valeur maximale et d'autre part, que la production d'énergie par une tâche ne sera pas inférieure à sa valeur minimale. Ainsi, lors d'un éventuel échange énergétique, la quantité échangée sera une approximation, par défaut (ou par excès selon le point de vue retenu), de la quantité réelle échangée. La consommation externe d'utilité de chauffe, se fera alors sur la base de la consommation maximale (taille de lot maximale) et la consommation externe d'utilité de refroidissement se fera sur la base de la consommation minimale (taille de lot minimale). De plus, si un suivi plus précis de la consommation / production d'énergie est nécessaire, alors il est possible d'affiner le modèle en réduisant la distance entre  $b_{min}^k$  et  $b_{max}^k$  où  $k$  représente une copie de la tâche dont la plage de lot est réduite. La figure 3.6 illustre cette décomposition sur laquelle

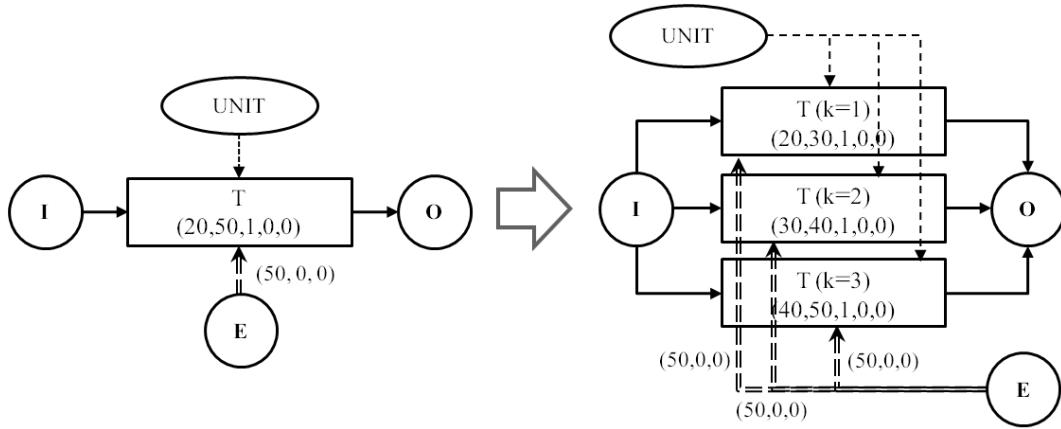


Figure 3.6 – Décomposition d'une tâche sur la base de la taille de lot

on peut constater que la tâche d'origine, dont la plage de lot est [20,50], est décomposée en trois tâches (trois instances avec  $k=1,..,3$ ), dont les plages de lots sont respectivement [20,30], [30,40] et [40,50]. Du choix du niveau de granularité dépend alors la précision du résultat fourni par le modèle d'ordonnancement ;

**Phase b - Décomposition des durées :** Une fois le tracé retenu à travers la phase précédente, nous obtenons un profil non linéaire identique à l'un de ceux de la figure 3.4. Afin de linéariser ce profil, nous sélectionnons une certaine plage de durée  $[x_{min}, x_{max}]$  dans laquelle le profil de la courbe peut être linéarisé sans trop de pertes de précision. La linéarisation du profil de la figure 3.4 sera alors équivalente à la figure 3.7. Cette linéarisation engendrera la création de nouvelles instances de la tâche de base. Dans le cas de la figure 3.7, elle engendrera précisément la création de trois tâches, matérialisées par les droites AB, BC et CD. La première instance sera définie pour une durée variant dans la plage  $[x_1, x_2]$ , la seconde dans  $[x_2, x_3]$  et la dernière dans  $[x_3, x_4]$ . La variation de la puissance pour la plage de durée comprise entre  $[x_1, x_2]$  est alors représentée par la droite AB, la variation pour la plage  $[x_2, x_3]$  est représentée par la droite BC et ainsi de suite. A chacune de ces droites, une tâche dont la durée est comprise entre  $[x_{min}, x_{max}]$  et dont la puissance est définie par la droite correspondante est créée au niveau de la représentation ERTN. L'obtention des caractéristiques de la droite, autrement dit, des coefficients de puissance se fera alors en exploitant le tracé de la figure 3.7. Ainsi, pour le cas de droite AB, les coefficients associés à l'expression de la puissance consommée par la tâche est :

$$uvi = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$ufi = y|_{x=0}$$

Au final, une tâche de base est décomposée sur la valeur de la taille lot puis pour chacune des tâches obtenues, une seconde décomposition sur la valeur de la durée est réalisée.

**Phase c - Estimation des paramètres :** A partir des étapes précédentes, il est possible d'extraire les paramètres ufi et uwi (ou ufo et uwo) traduisant les consommations (productions) d'énergie. Ces paramètres sont associés à la contrainte (2.21) ainsi qu'à la contrainte (2.22) du modèle d'ordonnancement, dont la forme générale est rappelée ci-dessous :

$$ui_{sin} = ufi_{is} \cdot w_{in} + uv_{is} \cdot b_{in} + uw_{is} \cdot d_{in}$$

$$uo_{sin} = ufo_{is} \cdot w_{in} + uvo_{is} \cdot b_{in} + uwo_{is} \cdot d_{in}$$

Les paramètres  $ufi$  ( $ufo$ ) représentent la puissance maximale consommée (produite) par chaque tâche, autrement dit, la valeur de ces paramètres correspond aux interceptions de

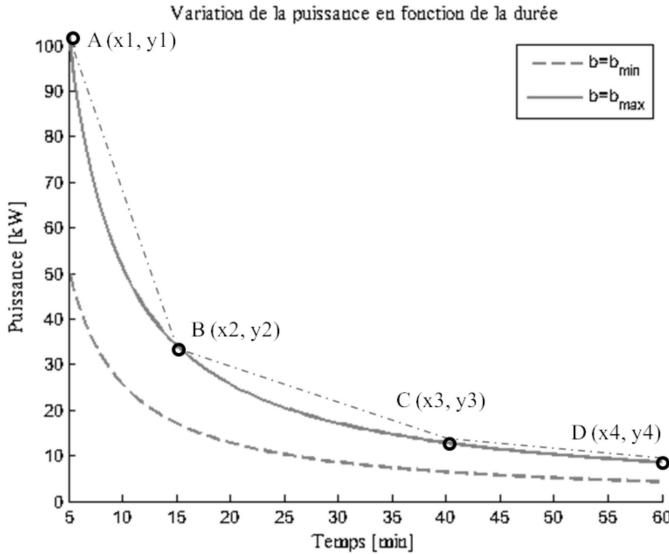


Figure 3.7 – Variation de la puissance en fonction de la durée d'une opération

chaque droite avec l'axe des ordonnées. Tandis que les paramètres  $uwi$  et  $uwo$  représentent les pentes des droites pour chaque zone. Puisque à chaque courbe correspond une valeur donnée de la taille de lot, les paramètres  $uvi$  et  $uvo$  sont égalisés à zéro. Finalement, la détermination de la durée se fait en attribuant la valeur du paramètre  $pf$ , l'abscisse de la droite correspondant à la consommation maximale d'énergie, autrement dit, les abscisses  $x_{min}$  de chacune des droites de la figure 3.7. Ce paramètre  $pf$  définit alors la durée minimale de fonctionnement de la tâche.

$$pt_{in} = pf_i \cdot ws_{in} + pv_i \cdot bs_{in} + pu_i \cdot d_{in}$$

Cette durée minimale est dépendante de la valeur de  $ufi$  (ou  $ufo$ ), pour être plus précis, elle correspond à la durée associée à une consommation équivalente à la puissance maximale. Les paramètres  $pu$  sont généralement des paramètres binaires, autorisant ou non la variation de la durée de la tâche concernée. Finalement, afin de borner l'augmentation de la durée d'une tâche, la longueur  $|x_{max} - x_{min}|$  de chaque zone est associée aux paramètres  $d_{max}^i$  du modèle d'ordonnancement (2.78).

### 3.2.1.2 Modélisation des tâches continues

La modélisation du besoin d'énergie d'une tâche continue, suit, au niveau du formalisme ERTN, la même démarche que celle proposée pour les tâches discontinues. La différence réside dans le fait que les tâches continues de l'atelier de production reçoivent comme paramètres d'entrée des plages de débit. Afin de simplifier l'approche proposée, nous émettons l'hypothèse suivante :

#### Hypothèse 3.2 (Consommations des tâches continues)

Au niveau du procédé, les tâches continues consommant ou produisant de l'énergie fonctionnent à débit fixe. De ce fait, la puissance produite ou consommée par ces tâches est fixe, constante et proportionnelle au débit de la tâche continue. Ces tâches continues correspondent alors, soit à des transferts de matière entre opérations, soit à des transferts vers (à partir) des cuves de stockage.

En se basant sur l'hypothèse précédente, les paramètres  $uvi$  et  $uwi$  ( $uvo$  et  $woo$ ) des contraintes (2.21) et (2.22) sont annulés. L'unique variation observée au niveau de ces tâches continues correspond alors à leurs durées, durées directement liées à la quantité de matière transférée par la tâche.

### 3.2.2 Modélisation des tâches au niveau du réseau d'échangeur

Le réseau d'échangeur regroupe les tâches assurant le transfert énergétique entre les opérations du procédé. Ce réseau englobe les tâches d'échanges entre opérations mais également les éléments de transfert au niveau des appareils assurant l'échange avec la centrale d'utilité (figure 3.3). D'un point de vue fonctionnel les tâches au niveau du réseau d'échangeur assurent le transfert énergétique entre les opérations nécessitant une chauffe et celles nécessitant un refroidissement. On remarquera donc qu'il existe deux types de consommations énergétique lors d'un échange thermique : une consommation interne issue d'une récupération énergétique (entre opérations) et une consommation externe résultant d'une fourniture d'énergie de la part de la centrale de cogénération (figure 3.8).

A travers l'Hypothèse 3.3, nous émettons le fait que les pertes lors des transferts d'énergie ne sont pas explicitement prises en compte dans la modélisation. Cette affirmation idéaliste, peut limiter l'étude du procédé. Ainsi, lorsqu'une investigation plus poussée est nécessaire, il est possible d'intégrer les coefficients de rendement soit au niveau des paramètres de pondération des arcs représentant les flux d'énergie, soit directement au niveau des tâches de transfert en modifiant les proportions produites par les tâches.

#### Hypothèse 3.3 (Rendement des échanges d'énergie)

Dans le cadre de ce travail, nous supposerons que l'efficacité des éléments de transferts est égal à l'unité, autrement dit, la quantité d'énergie produite par une opération est intégralement transmise soit à la tâche consommatrice, soit aux utilités lors d'un échange de chaleur. De plus, nous assumerons qu'un transfert énergétique existe uniquement entre un flux froid nécessitant une chauffe et un flux chaud nécessitant un refroidissement. Les transferts d'énergie entre flux froids ou entre flux chauds sont donc interdits.

#### 3.2.2.1 Modélisation des consommations externes d'énergie

Précédemment, nous avons discuté de la représentation des tâches consommant ou produisant de l'énergie. Nous avons mis en évidence le fait que l'élément de transfert au niveau de l'appareil était représenté par une tâche continue, tâche  $T_2$  de la figure 3.3. Ces éléments de transfert sont associés au réseau d'échangeur de chaleur et transfèrent l'énergie contenue dans les utilités aux tâches de l'atelier de production. Sachant que l'utilité circule en flux continu au niveau de ces tâches, la quantité  $b$  au niveau de ces tâches d'échange représente des débits d'énergie et traduit la demande énergétique devant être satisfaite par la centrale de cogénération. La modélisation de ces opérations de transfert se fait alors en réalisant une configuration identique à celle de la figure 3.3. L'estimation de la consommation énergétique et l'expression de la durée de ces tâches sont données ci-dessous :

1. L'estimation de la consommation d'utilité externe est obtenue en résolvant le système d'équations suivant :

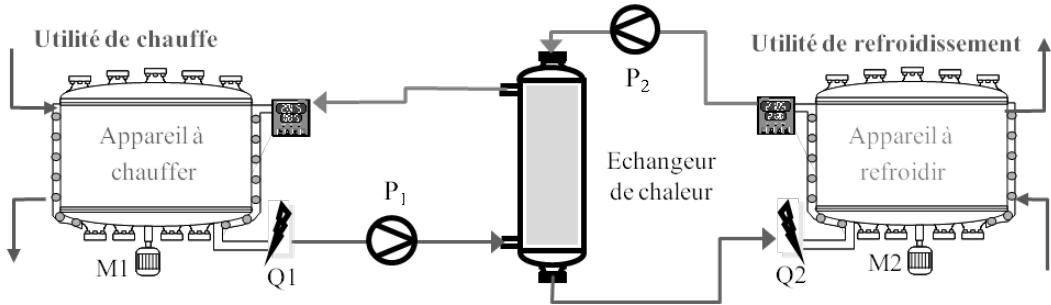


Figure 3.8 – Schéma d'un échange thermique avec échangeur externe

$$Q_{cons} = \frac{b_1 \times Cp_1 \times (T_o^1 - T_i^1)}{pt_1} + Q_{pertes} \quad (3.3)$$

$$Q_{utilite} = b_2 = \dot{m}_{vap} \times h_{vap} \quad (3.4)$$

$$Q_{cons} = Q_{échange} + Q_{utilite} \quad (3.5)$$

$$Q_{pertes} = 0 \quad Q_{échange} = 0 \quad (3.6)$$

Les variables du système d'équation précédent sont  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $Q_{cons}$  et  $Q_{utilite}$ , et représentent respectivement la taille de lot traitée par la tâche  $T_1$ , le débit d'énergie traversant la tâche  $T_2$ , le débit d'énergie consommé par  $T_1$  et la quantité d'énergie fournie par l'utilité. Le bilan d'énergie sous l'hypothèse que les pertes sont négligeables et que la récupération énergétique est inexistante est donnée par la relation (3.5). Quant aux paramètres  $Cp_1$  et  $h_{vap}$ , elles représentent respectivement la capacité calorifique de la matière traitée par  $T_1$  et l'enthalpie massique de la vapeur consommée par  $T_2$ . Les températures d'entrée et de sortie de la tâche  $T_1$  sont données par les paramètres  $T_i^1$  et  $T_o^1$  que l'on supposera préalablement connues.

2. L'expression de la durée de la tâche  $T_2$  est alors obtenue en annulant tous les paramètres de la contrainte (2.59) excepté  $ru_i$  qui est fixée à 1, rendant la durée de la tâche  $T_2$  libre de varier et laissant au modèle d'optimisation le choix de la détermination de la durée appropriée.

### 3.2.2.2 Modélisation des consommations internes d'énergie

De façon similaire aux tâches en mode de consommation externe d'énergie, les tâches d'échange assurent le transfert énergétique d'un point à l'autre du procédé. Ces transferts utilisent généralement des médiums de transfert qui sont soit, des fluides caloporteurs circulant entre les opérations en échange, soit directement la matière à chauffer ou à refroidir.

Afin de réaliser une représentation fidèle d'un échange d'énergie, il est donc nécessaire de fixer la technologie à utiliser. Cependant, il existe un large panel de montage technologique possible qui peut s'exprimer soit par le type d'élément de transfert utilisé (échangeur à plaque, tubulaires, simple fluide, multi-fluide etc.), soit par le type de montage (échangeur externe, serpentin immergé, double enveloppe etc.), soit par la configuration retenue (simple circuit fluidique, double circuit, recirculation de matière etc.) ce qui complexifie largement la mise en œuvre d'une représentation générique d'un échange thermique. De ce fait, et afin de maintenir le caractère générique du modèle, nous représentons un échange énergétique entre deux opérations, par une tâche continue de durée variable (figure 3.9). Cette tâche ne représentant pas obligatoirement un (appareil) échangeur de chaleur, mais plutôt la possibilité d'échange

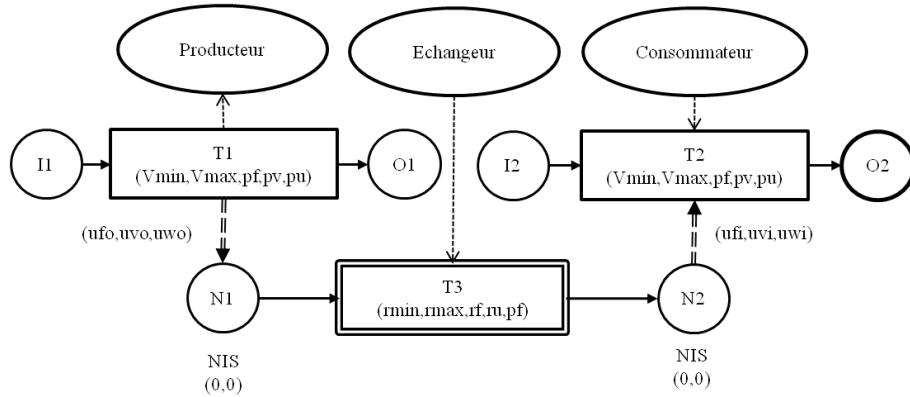


Figure 3.9 – Représentation ERTN d'un échange d'énergie

énergétique entre deux ou plusieurs appareils. Cette distinction permet de détecter les échanges fructueuses de celles qui ne le sont pas et permet d'étendre la représentation à la conception de réseaux d'échangeurs.

Cette représentation explicite des tâches d'échange permet donc de manipuler :

- la structure du graphe de flux associé au réseau de transfert en spécifiant quels appareils / tâches sont autorisés à échanger de l'énergie ;
- la date d'occurrence d'un échange en agissant sur les variables représentant les dates de début ou de fin des tâches d'échange ;
- la durée d'un échange énergétique en spécifiant explicitement la durée de l'échange ou en laissant au modèle la détermination de la durée optimale ;
- la quantité maximale pouvant être échangée en altérant la taille de lot associée à chaque tâche ;
- la disponibilité de la ressource assurant le transfert d'énergie qui se fait généralement en associant plusieurs tâches d'échange à chaque ressource ;
- le rendement d'un transfert d'énergie en modifiant le rapport entre la quantité produite et la quantité consommée par la tâche.

Pour résumer, ce choix permet de manipuler explicitement le flux énergétique transitant dans le système, et cela en s'appuyant sur le formalisme ERTN et en profitant de la richesse de représentation qu'offre ce dernier. Les tâches d'échange sont donc des tâches continues de durées variables, tout comme les tâches  $T_2$  de la figure 3.3. La représentation d'un échange est alors donnée par la figure 3.9 sur laquelle les tâches  $T_1$  et  $T_2$  représentent respectivement la tâche produisant de l'énergie et celle consommant cette énergie, et la tâche  $T_3$ , celle assurant le transfert énergétique. Les noeuds  $N_1$  et  $N_2$  représentent les noeuds de bilan d'énergie qui permettent la connexion avec d'autres tâches d'échange lors d'une récupération énergétique avec d'autres opérations du procédé (échanges multiples). Mais ils permettent également la connexion avec les tâches représentant les consommations externes lors d'une fourniture d'énergie venant de la centrale de cogénération.

### 3.2.3 Modélisation des tâches au niveau de la centrale d'utilité

La centrale d'utilité est en charge de la réalisation du contrat d'approvisionnement en énergie pour les besoins de l'atelier de production. Cette énergie se manifeste généralement soit sous la forme de chaleur, par l'intermédiaire de la vapeur ou de l'eau chaude, soit sous la forme d'énergie électrique, produite par la détente de la vapeur dans une turbine. Cette dernière pourra alors être utilisée pour satisfaire aux besoins en électricité de l'atelier de production ou pour une

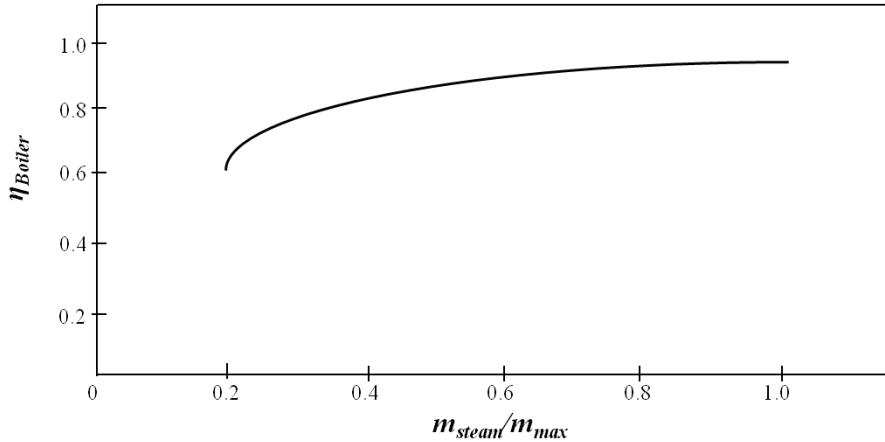


Figure 3.10 – Performance d'une chaudière en fonction de sa charge

injection éventuelle dans le réseau électrique.

De manière générale, les équipements disponibles au niveau de la centrale d'utilité sont les suivants :

- les équipements de génération de vapeur dont la composante principale est la chaudière à vapeur ;
- les équipements de transfert qui servent généralement à détendre la vapeur d'un niveau de pression supérieur vers un niveau inférieur. Parmi ces équipements, on retrouve les vannes de détente et les machines tournantes (turbines) ;
- les équipements additionnels qui regroupent les appareils auxiliaires tels que les échangeurs de récupération, les préchauffeurs, les pompes etc.

Cependant, dans le cadre de ce travail, nous nous intéresserons à la modélisation de deux éléments essentiels de la centrale de cogénération, à savoir, la chaudière à vapeur en charge de la génération de vapeur et la turbine à vapeur en charge de la production d'énergie électrique. Les autres équipements de transfert, ainsi que les équipements additionnels seront modélisés de manière minimalistre.

### 3.2.3.1 Modélisation de la chaudière à vapeur

Globalement, une chaudière à vapeur transforme de l'eau, en vapeur à haute pression. Cette transformation engendre généralement une consommation d'un ou de plusieurs carburants et/ou de l'électricité et produit un dégagement d'effluents sous forme de gaz à effets de serre. Ainsi, on pourra rencontrer au niveau des centrales de cogénération, différents types de chaudière dont les plus communes sont les suivantes :

- les chaudières *mono-combustible* ;
- les chaudières *bi-combustibles* ;
- les chaudières *électriques*.

Au niveau de la centrale d'utilité et plus spécifiquement au niveau de la chaudière, notre problématique consiste alors à estimer la quantité de carburants (ou d'électricité) pouvant être consommée par la chaudière. Cette estimation s'exprime, pour le cas d'une chaudière à combustible, à travers l'exploitation du rendement de la chaudière dont l'expression est donnée ci-dessous :

$$\eta_{boiler} = \frac{Q_{steam}}{Q_{fuel}} \quad (3.7)$$

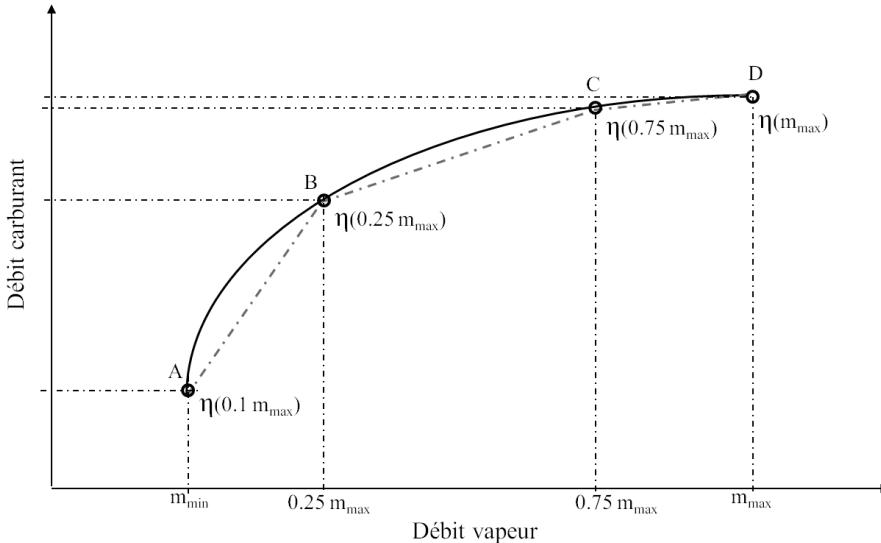


Figure 3.11 – Consommation en carburant en fonction de la charge d'une chaudière

Avec  $Q_{steam}$  et  $Q_{fuel}$  représentant respectivement la puissance véhiculée par la vapeur et l'énergie fournie par la combustion du carburant. Les expressions associées à ces deux quantités d'énergie sont données ci-dessous :

$$Q_{steam} = \dot{m}_{steam} \times (H_s - H_e) \quad (3.8)$$

$$Q_{fuel} = \dot{m}_{fuel} \times PCI_{fuel} \quad (3.9)$$

Où  $\dot{m}_{steam}$  représente le débit de vapeur produit par la chaudière et  $\dot{m}_{fuel}$ , le débit de carburant consommé par la chaudière. En supposant fixées les conditions de sortie<sup>4</sup> de la chaudière, on obtient la variation d'enthalpie  $\Delta H = H_s - H_e$  aux frontières du système, où  $H_s$  correspond à l'enthalpie du fluide sortant et  $H_e$ , l'enthalpie de l'eau entrant dans la chaudière. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du carburant étant fixe, le débit de carburant consommé s'exprime alors en fonction du rendement et en fonction de la charge de la chaudière et s'obtient par l'expression suivante :

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{m}_{steam} \times \Delta H}{\eta_{boiler} \times PCI_{fuel}} \quad (3.10)$$

La relation précédente s'applique à une chaudière mono-combustible. Dans le cas d'une chaudière bi-combustible, les consommations par type de carburants, sont données par les expressions suivantes :

$$\dot{m}_{fuel1} = \frac{\dot{m}_{steam} \times \Delta H}{\eta_{boiler} \times PCI_{fuel1} \times \text{ratio}} \quad (3.11)$$

$$\dot{m}_{fuel2} = \frac{\dot{m}_{steam} \times \Delta H}{\eta_{boiler} \times PCI_{fuel2} \times (1 - \text{ratio})} \quad (3.12)$$

Le paramètre *ratio*, des expressions (3.11) et (3.12) détermine le rapport de consommation de combustible.

Et finalement, pour le cas d'une chaudière électrique, la puissance électrique consommée s'exprime par une relation linéaire en fonction du débit de vapeur généré par la chaudière. L'équation ci-dessous, représente la consommation d'électricité d'une chaudière électrique à rendement fixe.

$$P_{elec} = \frac{\dot{m}_{steam} \times \Delta H}{\eta_{boiler}} \quad (3.13)$$

4. En réalité, ces conditions de sortie dépendent d'une part, de la quantité de vapeur devant être produite et d'autre part de la quantité d'électricité devant être produite par le turbo-alternateur.

A partir des expressions précédentes, on peut observer que le débit de carburant (ou la puissance électrique) consommé est proportionnel au débit de vapeur produit par la chaudière. On constate également qu'une amélioration du rendement de la chaudière entraîne une diminution de la quantité de carburant (ou d'électricité) consommée. Or, dans le cas des chaudières à combustible, la variation du rendement est souvent donnée en fonction de la charge de la chaudière, c'est à dire en fonction de la quantité de vapeur devant être produite par la chaudière. Dans SMITH [140], cette variation est approximée par la formule suivante :

$$\eta_{boiler} = \frac{1}{a + b \times \frac{\dot{m}_{max}}{\dot{m}_{steam}}} \quad (3.14)$$

Où,  $\dot{m}_{max}$  représente le débit maximal de la chaudière et  $\dot{m}_{steam}$  la quantité de vapeur produite par la chaudière. Les paramètres  $a$  et  $b$  sont des coefficients de corrélation dépendant de la forme de la chaudière ou de la vétusté de l'appareil.

La variation de la performance de la chaudière en fonction de sa charge peut alors être représentée par la figure 3.10. En s'appuyant sur cette figure et sur la relation (3.10), il est possible de récupérer la quantité de carburant consommée pour des valeurs précises du rapport  $\dot{m}_{steam}/\dot{m}_{max}$ . A partir de ces valeurs, on obtient le tracé de la figure 3.11 que l'on pourra ensuite exploiter au niveau du modèle d'ordonnancement. Pour ce faire, une décomposition est effectuée pour une certaine plage de débit qui se verra attribuée une tâche au niveau de la représentation ERTN de la chaudière. A titre d'illustration, la décomposition de la figure 3.11, engendre la création de trois tâches  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ . Ces tâches seront introduites au niveau du formalisme ERTN de manière identique à la représentation de la figure 3.12, sur laquelle les plages de débit sont affectés aux paramètres  $[b_{min}, b_{max}]$  de chaque tâche correspondant à chaque tronçon de courbe. Les paramètres  $uf_i, uv_i$  associés aux consommations de la tâche  $T_i$  (figure 3.12) représentent respectivement l'intersection avec l'axe des  $y$  de chaque portion de droite et la pente de la droite associée à chaque tronçon (figure 3.11). Quant aux paramètres  $uw_i$ , ils représentent l'effet de la durée de fonctionnement de la chaudière sur la consommation en carburant. En effet, sachant qu'au niveau de la centrale de cogénération, les variables  $b$  représentent des débits d'utilités, le modèle est incapable de différencier une chaudière consommant 10 kg/h de carburant et fonctionnant pendant 2h, d'une chaudière consommant la même quantité de carburant mais fonctionnant pendant 3h. Il devient alors clair qu'il est nécessaire de doter le modèle de la capacité d'arbitrer ces situations en introduisant l'effet de la durée dans l'expression de la consommation d'énergie de ces tâches. Pour cela, nous appliquons l'hypothèse 3.1 au cas de la chaudière et définissons la consommation de carburant correspondant à un débit équivalent à  $b_{max}$  comme consommation horaire de la chaudière. Nous nous assurons ainsi d'une estimation par excès de la consommation en carburant fossile et l'expression de la consommation en carburant d'une chaudière sera alors donnée par la contrainte (2.21).

### 3.2.3.2 Modélisation de la turbine à vapeur :

La turbine à vapeur est un organe fonctionnel de la centrale en charge de la conversion de l'énergie cinétique contenue par la vapeur en énergie électrique, ou plus spécifiquement en travail mécanique qui sera ensuite transformé en électricité par le biais d'une machine électrique fonctionnant en génératrice.

On observe habituellement trois catégories de turbine au sein des centrales de cogénération, à savoir :

- les turbines à vapeur *classiques* regroupant les turbines à contre-pression, les turbines à soutirage et les turbines à condensation ;
- les turbines à *combustibles* qui peuvent fonctionner avec ou sans chaudière de récupération et post-combustion ;

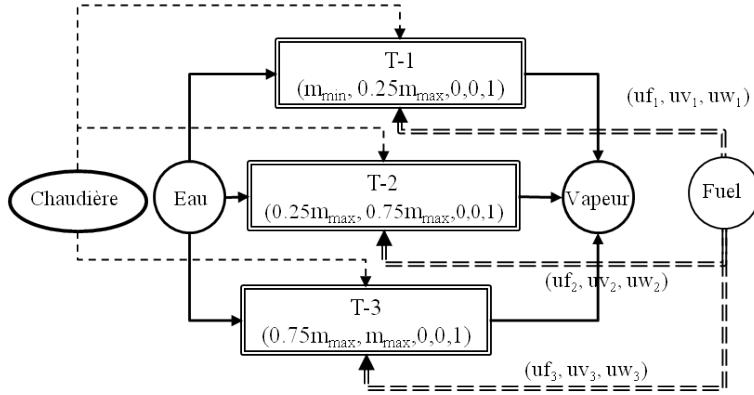


Figure 3.12 – Représentation ERTN d'une chaudière à vapeur

- les turbines *commutables* qui sont généralement des turbines à vapeur fonctionnant en parallèle avec des moteurs électriques.

Nous nous limiterons à l'étude de la première catégorie et plus précisément au cas des turbines à contre pression, c'est à dire, à ceux pour lequel la pression de sortie de la vapeur est supérieure à la pression atmosphérique.

Notre problématique consiste alors à déterminer la puissance mécanique pouvant être fournie par la turbine. Pour le cas d'une turbine à contre pression, la relation entre le travail fourni et le débit de vapeur peut être approximée linéairement à travers *la droite de Willan* (figure 3.13). En effet, cette droite a été utilisée dans plusieurs travaux traitant de l'optimisation des centrales d'utilités [105, 150]. Ces auteurs ont appliqués le même modèle mais utilisent des coefficients de régression différents. Nous retiendrons la même approche dans ce travail et utiliserons la forme générale suivante :

$$W = n \times \dot{m}_{steam} - W_{INT} \quad (3.15)$$

Avec  $n$  la pente de la droite et  $W_{INT}$  l'intersection avec l'axe des y (figure 3.13). En se basant sur une interprétation thermodynamique, la pente  $n$  correspond à la variation d'enthalpie aux frontières du système et  $W_{INT}$  représente la perte d'énergie au niveau de la turbine. Les équations respectives de ces quantités sont données ci-dessous.

$$n = \frac{L + 1}{b} \times (\Delta H_{is} - \frac{a}{\dot{m}_{max}}) \quad (3.16)$$

$$W_{INT} = \frac{L}{b} \times (\Delta H_{is} \times \dot{m}_{max} - a) \quad (3.17)$$

Les paramètres  $L$ ,  $\dot{m}_{max}$  et  $\Delta H_{is}$  représentent respectivement un paramètre relatif aux caractéristiques physiques de la turbine, le débit maximal de vapeur et la variation d'enthalpie entre l'entrée et la sortie de la turbine dans des conditions isentropiques. Concernant les coefficients de régression,  $a$  et  $b$ , elles sont supposées connues dans la suite de l'ouvrage et s'obtiennent à travers des données empiriques issues de la littérature [150].

Sur la figure 3.13, nous donnons la représentation d'une turbine à vapeur dans le formalisme ERTN, nous y effectuons une décomposition similaire à celle réalisée pour le cas de la chaudière à vapeur. L'expression de la production d'électricité par une tâche, au respect de la figure 3.13a, est alors donnée par la relation suivante :

$$uo = ufo \times w + uvo \times b + uwo \times d$$

Cette expression est identique à celle formulée dans le modèle d'ordonnancement (2.22),

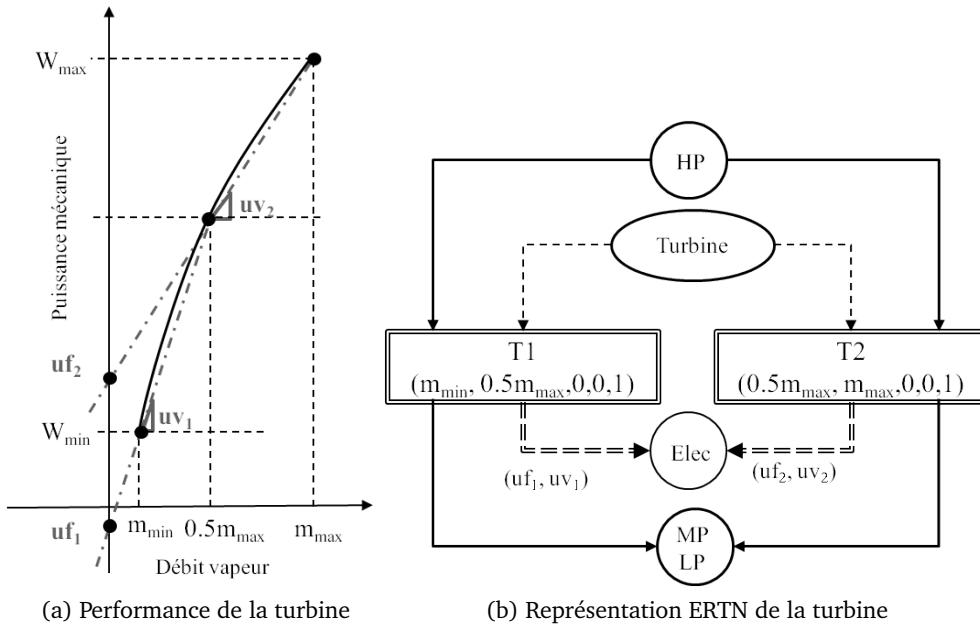


Figure 3.13 – Modélisation ERTN d'une turbine à vapeur

à l'exception du fait que la composante associée à la durée de la tâche ( $uwo$ ), est annulée car la quantité d'électricité (puissance) générée par le groupe ne dépend pas de la durée de fonctionnement du groupe. Notons également que l'état relatif à l'électricité de la figure 3.13b est un état avec importation et/ou exportation de ressource. L'importation d'électricité traduit un déficit (manque) de production au niveau de la turbine. Cette situation est observée lorsque la demande en électricité est supérieure à ce que peut produire la turbine. L'exportation de ressource, quant à elle, représente la situation inverse où la turbine produit plus que ce qui est requis. Dans ce dernier cas, cette quantité d'électricité est revendue par injection dans le réseau de distribution.

### 3.3 Intégration énergétique indirecte

L'intégration énergétique indirecte est une approche consistant à récupérer l'énergie dégagée par une opération afin de l'utiliser à une date ultérieure. Ainsi donc, l'intégration indirecte est associée à la notion de stockage énergétique et autorise un déphasage, ou plutôt un transfert de charge, allant du moment de la production de l'énergie vers celle de sa consommation. En effet, cette approche permet d'introduire plus de flexibilité au modèle d'ordonnancement et permet d'engendrer une diminution notable des consommations d'utilités externes lorsque le système est bien conçu. On notera de plus que le stockage thermique n'a pas comme unique vocation celui de réduire la consommation énergétique, mais il permet également de lisser la charge en transférant les pics de consommation vers des périodes où la centrale d'énergie est moins sollicitée. Ce dernier point permet de diminuer la capacité des centrales d'énergie en phase de conception, ou alors d'économiser l'utilisation d'appareils additionnels tels que les chaudières de pics, engendrant ainsi une économie supplémentaire au niveau des coûts d'exploitation.

La littérature fait référence à un grand nombre de type de stockage thermique [36], mais on remarquera qu'il existe deux catégories de stockage en fonction de la nature de l'énergie stockée. En effet, lorsque l'énergie stockée est destinée à éléver ou à diminuer la température d'une substance, on parle de *stockage de chaleur sensible*. D'un autre côté, si l'énergie stockée est destinée à provoquer un changement de phase d'une substance, on fait référence à du *stockage de*

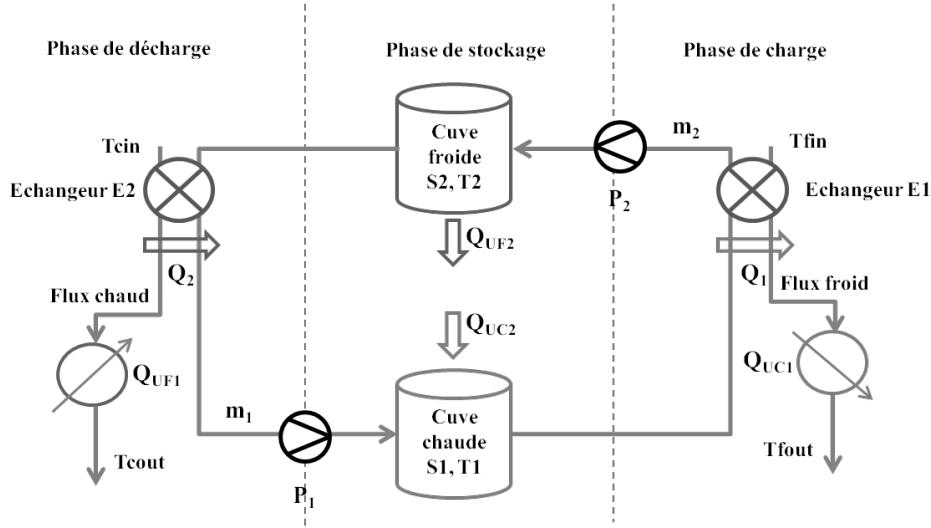


Figure 3.14 – Schéma du dispositif de stockage thermique

chaleur latente. Nous nous limiterons dans cette thèse à la première catégorie de stockage, c'est à dire à celle traitant du stockage de chaleur sensible.

Une opération de stockage thermique peut alors être décomposée en trois phases élémentaires constituées d'une charge, d'un maintien (ou stockage) et d'une décharge. Cette décomposition est relative à chaque cuve de stockage thermique. En prenant pour référence la cuve chaude, la phase de charge traduit la récupération de chaleur provenant d'une opération du procédé et la phase de décharge représente l'évacuation de la quantité de chaleur stockée vers une ou plusieurs opérations du procédé.

#### Hypothèse 3.4 (Fonctionnement des cuves de stockage thermique)

Nous supposerons, au niveau du modèle d'ordonnancement, que les cuves de stockage sont chacune maintenues à des températures fixes. De ce fait, la quantité de chaleur extraite ou cédée par le système de stockage est exprimée en fonction des débits de charge et de décharge des fluides caloporteurs entrant et sortant d'une cuve.

Durant la phase de charge, la chaleur est véhiculée à travers un fluide caloporteur, vers le premier élément de stockage,  $S_1$ . Cet élément  $S_1$  est destiné à maintenir le liquide à une température donnée  $T_1$ . Lors de la phase de décharge, le processus est inversé. C'est à dire que la quantité de matière contenue dans  $S_1$ , échange son énergie avec l'opération nécessitant une chauffe et le flux venant de  $S_1$  est alors déchargé dans une seconde cuve  $S_2$  où la matière est stockée à une température  $T_2$  ( $T_2 < T_1$ ). Il est à noter que lors des phases de maintien, l'existence d'une perte proportionnelle à la quantité de matière stockée est enregistrée au niveau de la cuve chaude. Afin de combler ces pertes, une consommation en utilité externe est possible au niveau du système de stockage. De même, si la quantité d'énergie libérée par le stockage est insuffisante pour satisfaire la demande, l'utilisation d'utilités d'appoints (utilités externes) est également rendue possible. De plus, une chute de température au niveau des cuves de stockage est enregistrée lors des phases de charge. Ces situations sont cependant supposées négligeables au niveau du modèle d'ordonnancement et seront prises en compte au niveau du module de simulation.

Les quantités de chaleur mises en jeu au niveau du stockage thermique sont donc :

$$Q_1 = \dot{m}_1 \times H_1 \quad (3.18)$$

$$Q_2 = \dot{m}_2 \times H_2 \quad (3.19)$$

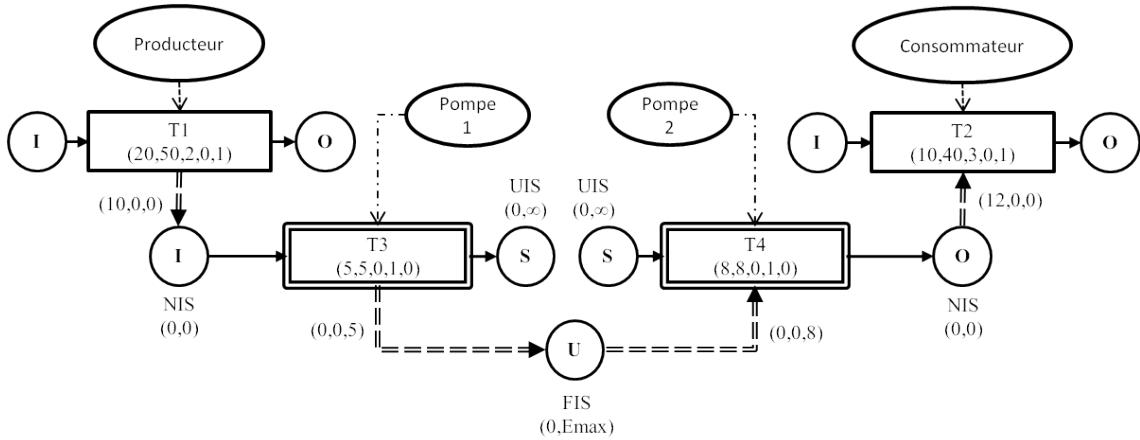


Figure 3.15 – Représentation ERTN d'un échange thermique indirect

Où  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $\dot{m}_1$  et  $\dot{m}_2$  représentent respectivement la quantité de chaleur extraite du système de stockage, la quantité de chaleur entrant dans le système, le débit de charge de  $S_1$  et le débit de charge de  $S_2$ . Les paramètres  $H_1$  et  $H_2$  représentent les enthalpies massiques de la matière au sein des cuves de stockage  $S_1$  et  $S_2$ . Le bilan énergétique du côté du flux froid est alors donné ci-dessous :

$$Q_p = Q_{uc1} + Q_1 \quad (3.20)$$

$$Q_p = \frac{b_p \times Cp_p \times \Delta T_p}{pt_p} \quad (3.21)$$

$$Q_{uc1} = \dot{m}_u \times \Delta H_u \quad (3.22)$$

Avec  $Q_p$ ,  $b_p$ ,  $Cp_p$ ,  $pt_p$  et  $\Delta T_p$  respectivement la puissance, la taille de lot, la capacité calorifique, la durée ainsi que la différence de température de l'opération devant être chauffée. Et  $Q_{uc1}$ ,  $\dot{m}_u$ ,  $\Delta H_u$  la puissance fournie par l'utilité, le débit massique ainsi que l'enthalpie de l'utilité servant à chauffer le flux froid. La représentation d'un stockage thermique au niveau du formalisme ERTN s'effectue donc suivant la figure 3.15 sur laquelle les différentes phases — charge, stockage et décharge — sont matérialisées respectivement par la tâche  $T_3$ , l'état  $U$  (qui représente ici la cuve chaude) et par la tâche  $T_4$ . Nous tenons à faire remarquer que sur la représentation ERTN de la figure 3.15 qui illustre le système de stockage, l'état  $U$ , représente la cuve  $S_1$ , nous ne représentons cependant pas la cuve  $S_2$  car son stock est totalement défini à partir du stock de  $S_1$  (symétrie). Notons également que les tâches  $T_3$  et  $T_4$  représentent les pompes assurant le transfert vers les cuves de stockage, elles représentent donc les éléments  $P_1$  et  $P_2$  de la figure 3.14 et permettent de fixer le débit des fluides chauds et froids du système de stockage. Remarquons cependant, qu'il est possible de représenter ces pompes par le même appareil. Ce choix de modélisation permet de s'assurer que la charge et la décharge se font à des périodes disjointes, bloquant ainsi tout fonctionnement simultanée des pompes et donc empêchant la décharge lors de la phase de charge (ou inversement). En effet, si une telle situation existait, alors le fonctionnement du système de stockage serait équivalent à un échange direct d'énergie. Notons finalement le choix volontaire de fixer le débit des pompes, en effet même si ces éléments peuvent varier dans une certaine plage et sont contrôlés par le modèle d'ordonnancement, la non-linéarité causée par la transformation du débit en quantité de matière n'est gérée, au sein du modèle, que pour des valeurs fixées des débits des pompes.

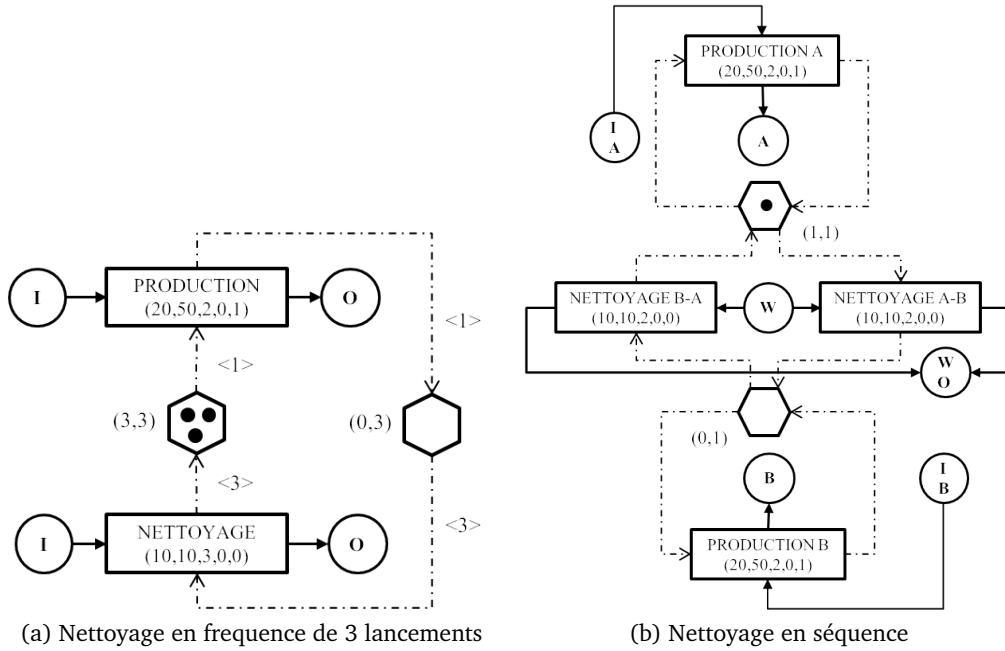


Figure 3.16 – Modélisation ERTN d'un nettoyage

### 3.4 Modélisation des opérations multi-modales

Les opérations multi-modales, comme leur nom l'indique, sont des opérations possédant plusieurs modes de fonctionnement. Nous avons évoqué, très brièvement, la notion de mode de fonctionnement au niveau de la section 2.1.2.6 et nous l'avons définie comme ayant un sens similaire aux notions d'états définis dans un réseau de Pétri ou tout autre formalisme d'état/transitions. Ramené au formalisme ERTN, la représentation de l'état d'une opération se fait par le biais des états ressources [146]. Ainsi donc, un état ressource peut être assimilé à une place d'un graphe d'état et une tâche de production, assimilée à une transition dont l'événement associé est le lancement de la tâche.

Dans le cadre de ce travail, nous appliquerons l'utilisation des contraintes multi-modales pour les situations suivantes :

- la modélisation des opérations de nettoyage ;
- la modélisation des phases de démarrage et d'arrêt ;
- la modélisation des phases de maintien en conditions.

Néanmoins, l'utilisation des états-ressources ne se limite pas uniquement à ces situations et peuvent se généraliser à toutes opérations dont une nécessité de représentation des différents états de fonctionnement se manifeste. A titre d'exemple, elles ont déjà été utilisées pour représenter le fonctionnement d'une colonne de distillation, modélisant simultanément l'alimentation continue et les phases de démarrage/arrêt [43].

#### 3.4.1 Modélisation des opérations de nettoyage

Les opérations de nettoyage représentent des opérations indispensables au sein des procédures discontinues. En effet, sachant que plusieurs types de produits sont réalisés simultanément durant une campagne de production et que les appareils sont généralement des unités multifonctionnelles, il n'est pas rare de devoir nettoyer un appareil suite au traitement d'un lot (A) avant de pouvoir traiter un lot (B). Ces genres de nettoyage sont plus communément appelés des *nettoyages en séquence*. D'un autre côté, lorsque le taux d'encrassement d'un appareil atteint

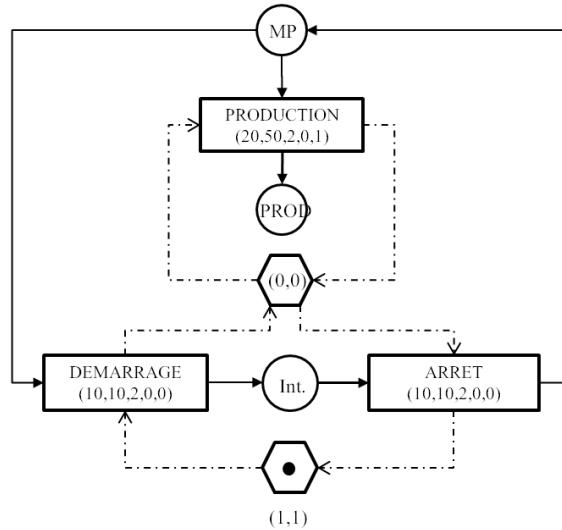


Figure 3.17 – Modélisation ERTN du démarrage et de l'arrêt d'une chaudière

un certain seuil suite à une série d'utilisation de la ressource, il devient obligatoire de procéder à un nettoyage. Ce dernier cas fait référence au *nettoyage en fréquence*. Mais de manière générale, durant les phases de nettoyage, l'appareil est incapable de réaliser la fonction qui lui est assignée, en l'occurrence la production. Les opérations de nettoyage provoquent donc un arrêt de production et se traduisent souvent par une consommation additionnelle de ressource (eau, main d'œuvre etc.).

La représentation ERTN d'un nettoyage en fréquence ainsi que d'un nettoyage en séquence est alors donnée par la figure 3.16. La figure 3.16a représente alors la prise en compte d'un nettoyage en fréquence pour un cycle de trois (03) lancements, autrement dit, lorsque la tâche de production se lance trois fois, alors un nettoyage devra être effectué. La valeur de la fréquence est arbitraire et peut être modifiée à volonté par l'utilisateur en spécifiant le nombre de jeton et la pondération adéquate des arcs. La figure 3.16b quant à elle représente la modélisation d'un nettoyage en séquence. Cette représentation stipule que la possibilité de lancement d'une tâche produisant (B) après un (ou plusieurs) lancement d'une tâche produisant (A), n'est autorisée qu'après le lancement d'une tâche de nettoyage (A-B). Cette règle est également valide dans la situation inverse (cas de B vers A).

### 3.4.2 Modélisation des tâches de démarrage et d'arrêt

Les tâches de démarrage sont nécessaires lorsqu'un appareil nécessite une mise en régime avant de pouvoir fonctionner efficacement, c'est généralement le cas au sein des centrales de production d'énergie où les appareils ne sont pas directement opérationnels mais nécessitent souvent une phase transitoire de démarrage. Les phases d'arrêt quant à elles représentent le besoin d'éteindre un appareil afin de minimiser les consommations fixes d'utilités engendrées par le maintien de la ressource en activité. En effet, même si un appareil n'est pas en phase de production, il consomme une certaine quantité de ressource qui peut être des utilités, de l'électricité ou de la matière. Durant ces situations, il peut s'avérer plus économique d'éteindre l'appareil pour le redémarrer ultérieurement lorsque le besoin se manifeste. Il s'agit donc ici d'un compromis entre le coût engendré par la mise en veille de l'appareil pendant une certaine durée et le coût de démarrage de l'appareil. La modélisation des contraintes de démarrage et d'arrêt d'une ressource se fait en établissant un réseau d'état ressource au niveau de la représentation ERTN. Le cas particulier du démarrage et de l'arrêt d'une chaudière à vapeur est

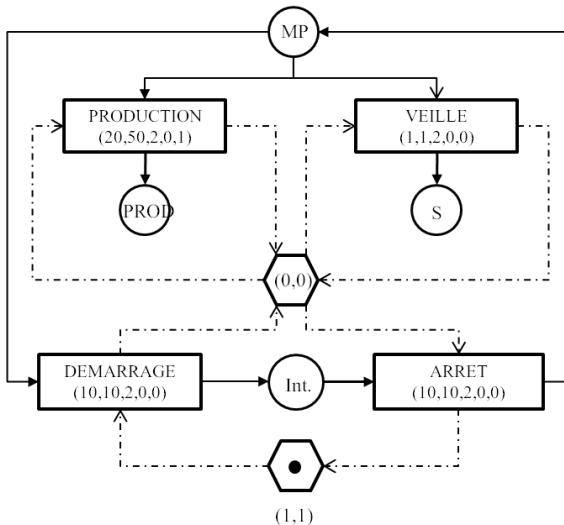


Figure 3.18 – Modélisation ERTN d'une chaudière avec prise en compte du mode bouillotte

donnée par la figure 3.17.

### 3.4.3 Modélisation des phases de maintien en conditions

Les opérations de maintien en conditions et plus spécifiquement celles de maintien en température traduisent le fonctionnement d'un appareil lorsque celui-ci ne produit pas mais consomme néanmoins une certaine quantité d'énergie. Un cas concret est celui du mode bouillotte d'une chaudière à vapeur. En effet, pendant ce mode, la chaudière ne produit pas de vapeur mais consomme une certaine quantité d'électricité ou de carburant exprimée comme une proportion de la charge maximale de la chaudière ou comme une quantité préalablement fixée. La modélisation au sein du formalisme ERTN de ce cas de figure est représentée par la figure 3.18. Notons que pour la commodité de la représentation, la figure n'illustre pas les consommations d'énergie par les tâches mais de manière générale, les tâches de démarrage, de production et de veille sont le siège de consommations d'énergie soit, sous la forme de carburant soit sous la forme d'électricité. Concernant, la tâche de veille, la durée de son fonctionnement est généralement inconnue et dépend principalement des instants auxquels les autres tâches (démarrage, production ou arrêt) commencent et se terminent.

## 3.5 Exemples d'applications

L'exemple que nous traiterons est un exemple représentant un procédé de réaction - distillation comprenant trois étapes principales (figure 3.19) :

1. Une réaction exothermique produisant une mixture IAB composée de 50% de A et de 50% de B. L'opération dans le réacteur s'effectue pendant une durée moyenne de 2 h pendant laquelle le réacteur nécessite un refroidissement ;
2. Une filtration du produit IAB de la réaction pendant 1 h et produisant, à proportion égale (50%), deux mixtures intermédiaire AB1 et AB2 ;
3. Une opération de distillation dans deux colonnes montées en parallèle. La première colonne est destinée à produire le produit P2 en consommant l'état AB2 et la deuxième colonne permet l'obtention du produit P1 en consommant AB1. Durant cette dernière étape,

un besoin en chauffe se manifeste au niveau des deux appareils. Cette énergie est fournie par la centrale d'utilité sous forme de vapeur à moyenne pression.

Ainsi, quatre appareils sont disponibles au niveau de l'atelier de fabrication, à savoir : un réacteur, un filtre et deux colonnes de distillation. L'atelier transforme donc les deux matières premières (A et B) en produits intermédiaires (IAB, AB1 et AB2) et en produits finis (P1 et P2). Au niveau de la centrale d'utilité, la production de vapeur à haute pression est réalisée au sein d'une chaudière à vapeur et l'obtention de la vapeur à moyenne pression est réalisée à travers une vanne de détente. Finalement, au niveau du réseau d'échangeur de chaleur, on admettra l'existence d'un échangeur couplant la réaction exothermique et la première colonne de distillation. Notons que la représentation de la figure 3.19 met à profit l'utilisation de *macro-tâches* pour représenter les appareils consommant / produisant de l'énergie. C'est actuellement le cas du réacteur et des deux colonnes de distillation dont les sous-systèmes sont représentés par la figure 3.19b et mettent en évidence les moyens de transfert (échangeurs) au niveau de ces différents appareils. Les caractéristiques de chacune des opérations, ainsi que celles des états sont données en Annexe-B.

L'horizon d'ordonnancement est fixé à 48 h et la demande en produit P1 de même que celle en produit P2 est fixée à 120 kg. L'objectif consiste alors à déterminer la configuration satisfaisant les demandes en produits finis et consommant le minimum d'énergie (vapeur HP, fluide, eau froide etc.).

### 3.5.1 Intégration énergétique directe (Exemple 1)

Pour le cas de l'exemple considéré, que nous appellerons « Exemple 1 », une possibilité d'échange se présente entre le réacteur exothermique et la première colonne de distillation. On autorise donc une récupération d'énergie entre ces deux opérations en créant un flux énergétique issu de l'opération exothermique (réaction) vers l'opération endothermique (distillation). Ce flux caractérisé par la tâche  $T4$  de la figure 3.19a, permet ainsi de borner ou de fixer la quantité d'énergie transférée.

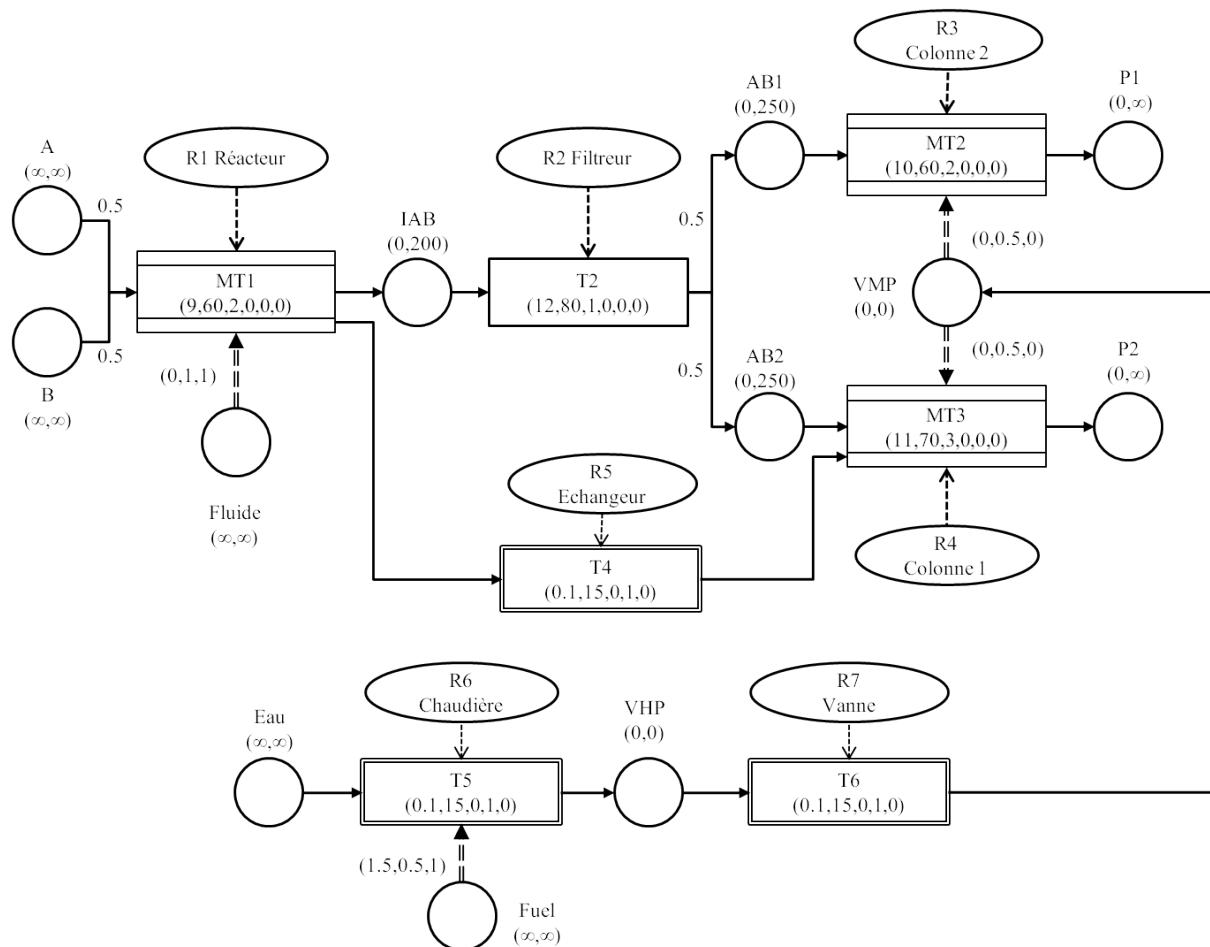
On peut remarquer d'après la figure 3.19b que les tâches  $T1$  à  $T3$  et  $T9$  sont des tâches discontinues, les valeurs de  $b_{min}$  et  $b_{max}$  associées à ces tâches correspondent donc à des quantités de matière en kilogramme, contrairement aux autres tâches régies par un mode de fonctionnement continu où les paramètres précédents représentent des débits en  $\frac{kg}{h}$ .

#### 3.5.1.1 Estimation des consommations énergétiques

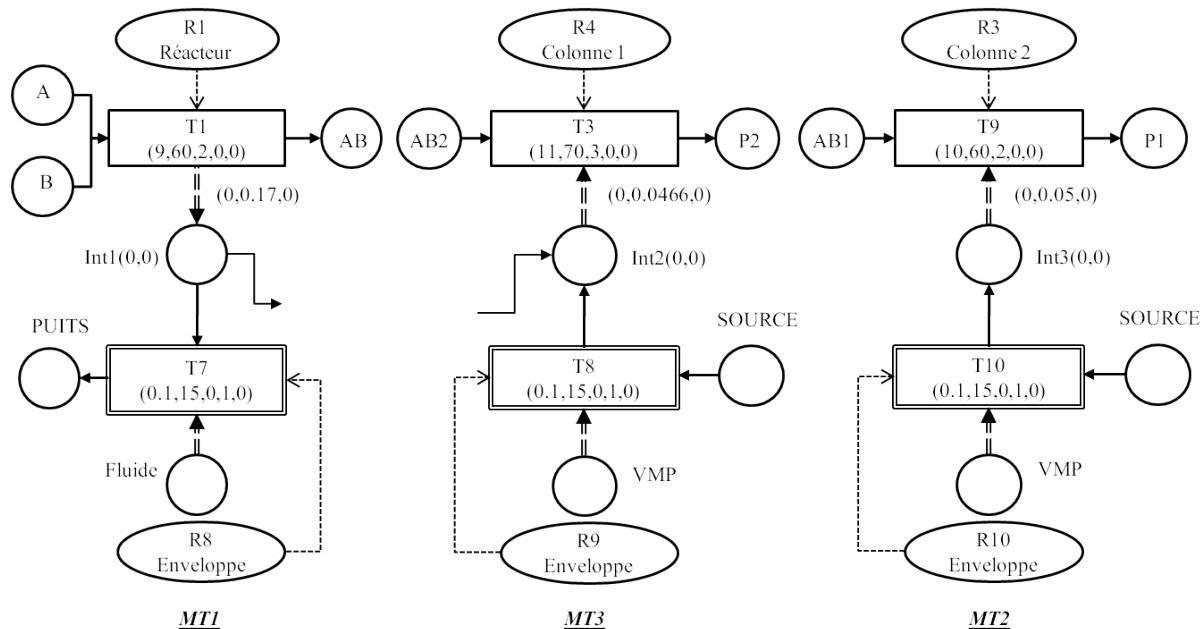
Sachant que les caractéristiques des tâches discontinues sont préalablement données (voir tableau B.1 en annexe), l'expression de la consommation ou de la production d'énergie pour chacune des tâches s'exprime en fonction de la taille de lot et est donnée par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} uot_{T1,Int1} &= \frac{\Delta H_{T1} \times b_{T1}}{pf_{T1}} = 0.17 \times b_{T1} \\ uit_{T3,Int2} &= \frac{\Delta H_{T3} \times b_{T3}}{pf_{T3}} = 0.046 \times b_{T3} \\ uit_{T9,Int3} &= \frac{\Delta H_{T9} \times b_{T9}}{pf_{T9}} = 0.05 \times b_{T9} \end{aligned}$$

Ces expressions définissent les productions / consommations d'énergie par unité de temps, elles correspondent donc à des débits énergétiques ou des puissances. Les consommations en utilités primaires (fuel, fluide de refroidissement) sont alors déterminées à partir des tailles de



(a) Recette de l'exemple 1



#### (b) Macrotâches de l'exemple 1

Figure 3.19 – Modélisation ERTN de l’Exemple 1

lot des tâches utilités ainsi que des apports thermiques de la vapeur et du fluide de refroidissement. La valeur de l'enthalpie massique de la vapeur à moyenne pression donnée dans le tableau B.2 en annexe, permet de déduire les consommations (débits massiques) de vapeur suivantes :

$$ui_{T8,VMP} = \frac{b_{T8}}{\Delta H_{VMP}} = 0.5 \times b_{T8}$$

$$ui_{T10,VMP} = \frac{b_{T10}}{\Delta H_{VMP}} = 0.5 \times b_{T10}$$

Où  $b_{T8}$  (resp.  $b_{T10}$ ) représente la puissance véhiculée par la tâche  $T_8$  (resp.  $T_{10}$ ). Pour le cas des utilités provenant de la centrale, nous supposerons afin de faciliter le raisonnement, que les consommations en fluide suivent l'expression suivante :

$$ui_{T7,Fluide} = b_{T7} + d_{T7}$$

Autrement dit, la consommation en fluide de refroidissement, à chaque lancement de la tâche  $T_7$ , est dépendante de la quantité d'énergie devant être évacuée ( $b_{T7}$ ) mais est également dépendante de la durée pendant laquelle le refroidissement aura lieu ( $d_{T7}$ ). Cette quantité  $ui_{T7,Fluide}$  correspondra alors à la masse d'eau (en kg) consommée par la tâche  $T_7$ .

Pour le cas du carburant consommé par la chaudière, nous supposerons l'expression de la consommation équivalente à :

$$ui_{T5,Fuel} = 1.5 + 0.5 \times b_{T5} + d_{T5}$$

La quantité  $ui_{T5,Fuel}$  sera alors équivalente à la quantité de carburant (en kg) consommée par la chaudière à vapeur.

### 3.5.1.2 Fonction objectif

La fonction objectif consiste à produire exactement ce qui est demandé tout en minimisant les coûts engendrés par les utilités. Nous reprenons ici une expression de la fonction objectif similaire à celle définie dans la section 2.1.4. Les différents coefficients de coûts associés à l'exemple sont donnés dans le tableau B.3 en annexe.

Pour notre exemple, on considérera que les coûts liés aux utilités sont définis par la consommation en carburants fossiles et en fluide de refroidissement, les quantités  $\Delta s_{fuel}$  et  $\Delta s_{fluid}$  représentent alors les variations entre le stockage initial et le stockage final de l'utilité concernée. Quant à l'objectif lié à la fabrication des produits finis, il minimise l'excédent de production, les coûts de stockage des produits intermédiaires et les coûts de lancement. Une minimisation de la durée de fabrication est également exprimée au niveau de la fonction objectif. L'expression de cette dernière est alors donnée comme suit :

$$\min z = \sum_{s \in S^{fp}} 5 \cdot sf_s + \sum_{s \in S^{int}} 2 \cdot sf_s + \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} ws_{in} + plan + 200 \cdot \Delta s_{fuel} + 4 \cdot \Delta s_{fluid}$$

### 3.5.1.3 Résolution

Pour le cas de l'Exemple 1, nous fixerons  $c_{max}$  à trois (03) itérations et  $tlim$  à 1800 secondes (30 minutes) lors de la résolution d'une itération correspond à une valeur donnée du nombre de points d'évènements. Dans le cas du modèle hybride, les paramètres  $c_{max}$  et  $tlim$  prendront respectivement la valeur de 1 itération et de 600 secondes (10 minutes). La raison pour laquelle une différence existe entre la conduite des deux modèles, réside dans le fait que l'exploration de l'espace des solutions se fait de manière différente pour les deux approches.

Dans le cas du modèle de PLVM, la première solution, satisfaisant toutes les contraintes,

est rarement la solution optimale. L'algorithme commence donc par une solution de pauvre qualité et essaye d'améliorer cette solution jusqu'à l'obtention de la solution optimale. Dans le cas du modèle hybride, la tendance est inversée. En effet, sachant que le modèle [MP] est une relaxation du modèle de [P], la solution fournie par le modèle associé à [MP] est un minorant (en minimisation) de la fonction objectif du problème [P]. La première solution fournie par [MP] est la solution optimale si il s'avère que celle-ci est faisable au niveau de [SP]. Le modèle hybride commence donc par la meilleure estimation et dégrade cette solution si [SP] est infaisable, sinon la solution courante est la solution optimale.

Quant à  $N_{min}$ , la résolution du modèle n'est possible qu'à partir de 7 points d'événements pour le modèle de PLVM. Dans le cas du modèle hybride, cette valeur de  $N_{min}$  est égale à 6.

- **Modèle de PLVM :** Les résultats obtenus par la résolution du modèle avec le solveur CPLEX d'Ilog sont résumés dans le tableau 3.1. Ce tableau montre l'effet des contraintes résultant de l'analyse de la recette sur l'efficacité du modèle.

On observe d'emblée sur le tableau 3.1a que 11 itérations (8 pour l'exploration et 3 pour la preuve d'optimalité) sont nécessaires pour établir l'optimalité de la solution lorsque les coupes additionnelles ne sont pas prises en compte. En effet, la meilleure solution est obtenue à l'itération 8 avec une valeur de la fonction objectif équivalente à 3801.06. Sachant que la valeur de 3 est affectée au paramètre  $c_{max}$ , cette solution est remise en cause pendant trois itérations. Puisqu'aucune solution de meilleure qualité n'est enregistrée pour les itérations 9 à 11, la solution à l'itération 8 du tableau 3.1a est considérée comme optimale.

D'un autre point de vue, nous pouvons remarquer qu'à partir de l'itération 3 du même tableau, le modèle s'exécute pendant la durée maximale  $tlim$  allouée à chaque itération. Ce comportement absent pendant les deux premières itérations est dû au fait que l'augmentation de N (ensemble des points d'événements) engendre une augmentation de l'espace des solutions, donc du temps de calcul pour parcourir cet espace. Cette observation est confirmée par la dernière colonne du tableau 3.1a, relatif à la qualité de la solution ou plutôt à la distance par rapport à meilleure estimation de la solution optimale. En effet, on observe une augmentation de la valeur de la tolérance en fonction du nombre d'événement. Si cette tolérance est nulle pour les deux premières itérations, elle est aux alentours de 43% pour la solution de l'itération 8.

Lorsque les contraintes du § 2.1.3 sont ajoutées au modèle, les résultats de l'optimisation sont donnés dans le tableau 3.1b. On peut alors observer que moins d'itérations sont nécessaires pour obtenir la solution optimale du problème et que la tolérance d'optimalité est réduite par rapport à celui du tableau 3.1a. L'application de ces contraintes additionnelles permet donc de faire converger plus rapidement le modèle d'ordonnancement.

Les diagrammes de Gantt des solutions optimales pour les scénarios avec et sans coupes additionnelles sont donnés sur la figure B.1 (voir en annexe). Nous pouvons observer assez clairement que les deux solutions sont équivalentes et que la différence de valeur entre les fonctions objectifs des deux formulations (itération 8 du tableau 3.1a et itération 5 du tableau 3.1b) est due au terme de la fonction objectif minimisant le nombre de lancement.

- **Modèle hybride :** Dans le cas du modèle hybride, nous faisons coopérer deux solveurs à savoir CPLEX pour la résolution de [MP] et CP Optimizer [69] pour la résolution de [SP]. Le langage OplScript [99] est quant à lui utilisé pour implémenter l'algorithme faisant communiquer ces deux types de solveurs. L'observation du tableau 3.2, pour une valeur de NC égale à 5, permet de constater que 13 itérations sont nécessaires pour la résolution du modèle hybride. On constatera également que les valeurs des fonctions objectifs diffèrent de celles fournies par le modèle de PLVM. Cela est dû au fait que les coûts unitaires relatifs à la consommation en fluide de refroidissement (eau froide), sont modifiés par rapport à la formulation du modèle de PLVM. Cette modification du coût unitaire de l'eau permet

It.	N	Obj. (\$)	Time(s)	Tol.(%)
1	07	4712.76	56.0	0.0
2	08	4130.28	1468.5	0.0
3	09	3932.98	>1800	6.5
4	10	3873.32	>1800	15.5
5	11	3853.55	>1800	39.2
6	12	3804.16	>1800	29.0
7	13	3828.68	>1800	41.1
8	14	3801.06	>1800	42.7

(a) Sans coupes

It.	N	Obj.(\$)	Time(s)	Tol.(%)
1	08	4570.08	23.47	0.0
2	09	3980.87	111.94	0.0
3	10	3833.67	513.63	0.0
4	11	3833.67	>1800	2.4
5	12	3807.65	>1800	2.3

(b) Avec coupes

Tableau 3.1 – Résultats du modèle de PLVM

It.	N	Obj. (\$)	#Cuts	Time(s)
01	06	12155.00	27	14.94
02	07	12113.00	7	5.62
03	08	11813.00	14	11.34
04	09	11697.00	0	0.50
05	10	11651.00	4	3.45
06	11	11466.00	7	5.53
07	12	11351.00	25	20.17
08	13	11308.00	2	1.64
09	14	11237.00	11	7.25
10	15	11123.00	4	2.97
11	16	11008.00	51	41.19
12	18	10900.75	41	30.09
Moy.			16.08	12.06
Tot.			193	144.72

Tableau 3.2 – Résultats du modèle hybride (NC=05)

Nº	Slice		Heating		Cooling	
	Start(h)	End(h)	Q[MJ]	P[MJ/h]	Q[MJ]	P[MJ/h]
01	0	2	0	0	20.40	10.20
02	2	4	0	0	18.66	9.33
03	4	5	0	0	0	0
04	5	7	4	2	16.31	8.15
05	7	8	0	0	0.01	0.01
06	8	9	2	2	0.01	0.01
07	9	10	2	2	6.97	6.97
08	10	11	0	0	6.97	6.97
09	11	12	0	0	1.53	1.53
10	12	13	2	2	0.01	0.01
11	13	14	2	2	0.01	0.01
12	14	15	0	0	0.01	0.01
Tot.			12		70.89	

Tableau 3.3 – Résultats de l'analyse TSM sur l'Exemple 1 (approche PLVM)

au problème-maître de minimiser les évacuations d'énergie vers les utilités froides. Ainsi donc, pour le modèle hybride, l'eau de refroidissement et le carburant consommé par la chaudière possèdent la même importance (même apport dans la fonction objectif), ce qui n'était pas le cas dans le modèle de PLVM. On observe alors que la durée de simulation par itération est relativement faible (12 secondes en moyenne). L'exploration des solutions se fait alors en imposant un bornage de la valeur de la fonction objectif à chaque itération. La valeur de cette borne dépend de la valeur obtenue à l'itération précédente. Ainsi, pour la dernière solution (itération 12) du tableau 3.2, la fonction objectif est bornée par la solution fournie par la solution à l'itération 11 et ainsi de suite. Cette approche permet de faire converger le modèle vers la solution optimale et permet d'exploiter les résultats obtenus par les itérations précédentes.

Afin de vérifier l'optimalité de la solution à l'itération 12, une dernière itération est ajoutée à la procédure pour valider si une solution avec un coût inférieur est disponible. Lors de cette dernière itération, aucune solution de meilleure qualité n'a été obtenue pour la durée maximale de simulation d'une itération, nous assumons donc que la solution à l'itération 12 est optimale pour l'instance avec les valeurs données des paramètres de l'algorithme.

#### 3.5.1.4 Interprétations :

L'interprétation des résultats de l'optimisation s'effectue par l'établissement d'une analyse Time Slice Model permettant d'estimer de façon plus précise les quantités d'énergie échangées et consommées par chaque tâche du procédé. Nous définissons la valeur de 10 [°C] pour le paramètre  $\Delta T_{min}$  correspondant à la différence de température minimale entre les flux devant échanger de l'énergie.

**3.5.1.4.1 Modèle de PLVM :** L'application d'une analyse Time Slice Model sur les résultats de l'ordonnancement nous permet d'obtenir une meilleure estimation des consommations d'utilités pour chaque cascade individuelle. Ainsi, l'analyse est réalisée pour la configuration d'ordonnancement obtenue suite à l'application des coupes additionnelles, les consommations énergétiques en utilités froides et chaudes sont données dans le tableau 3.3. Ces résultats nous permettent de constater que les consommations sont identiques à ceux fournis par le modèle d'ordonnancement pour le cas des utilités chaudes mais qu'il existe une infime variation des consommations pour le cas des utilités froides. Néanmoins, celles-ci rentrent dans les tolérances liées aux débits minimums des tâches  $T_7$ ,  $T_8$  et  $T_{10}$ , toutes valeurs inférieures à ce débit minimum sont donc considérées comme nulles au niveau du modèle d'ordonnancement.

La consommation globale de la configuration optimale correspond donc à une fourniture de 12[MJ] de froid et 70.89[MJ] de chaleur. On peut alors conclure<sup>5</sup> que les consommations fournies par le modèle sont une estimation fidèle de la consommation réelle du procédé pour la configuration d'ordonnancement fournie. De plus, les résultats fournis par les itérations non-optimales, coïncident également avec les résultats de l'analyse Time Slice Model réalisée sur la configuration prise en compte. De manière générale, on observe sur le diagramme de Gantt de la figure B.1b, que le modèle favorise le lancement de la tâche  $T_1$  au détriment de la production de produits intermédiaires IAB. Cette décision est motivée par le fait que le coût lié à la production de IAB à la fin de l'horizon est largement inférieur au coût engendré par la consommation en carburant. Néanmoins, le modèle minimise la production de IAB en lançant des lots de taille minimal pour les derniers lancements de  $T_1$ . En effet, l'augmentation du nombre de lancement de  $T_1$  permet d'autoriser une récupération énergétique avec la tâche  $T_3$ , de telle sorte que, dans

5. Dans la suite de l'ouvrage, nous utiliserons les courbes de ressource fournies par le modèle d'ordonnancement pour estimer le potentiel de récupération d'énergie d'une configuration.

Nº	Slice		Heating		Cooling	
	Start(h)	End(h)	Q[MJ]	P[MJ/h]	Q[MJ]	P[MJ/h]
01	0	2	0	0	16.76	08.38
02	2	4	0	0	20.40	10.20
03	4	6	0	0	20.40	10.20
04	6	8	0	0	0	0
05	8	10	0	0	13.86	06.93
06	10	11	3.26	3.26	0	0
07	11	13	6.05	3.02	0	0
08	13	14	1.84	1.84	0	0
09	14	16	6.98	3.49	0	0
10	16	17	0.49	0.49	0	0
Tot.			18.62		71.42	

Tableau 3.4 – Résultats de l'analyse TSM sur l'Exemple 1 (approche hybride)

la solution optimale du problème, seule la consommation de  $T_9$  est satisfaite par la centrale d'utilité. Cette dernière étant obligatoire car aucun moyen d'échange n'a été mis en place entre la tâche  $T_1$  et la tâche  $T_9$ . De plus, le modèle fait en sorte d'ajuster la taille de lot de chaque tâche en échange afin de maximiser la récupération énergétique (taille de lot de  $T_4$ ).

Le modèle se comporte donc comme prévu et permet d'obtenir un ordonnancement minimisant la consommation en utilités externes. Cependant, l'obtention d'une solution optimale relative aux conditions de convergence citées dans la section 2.1.5 page 72, se fait au détriment d'un temps de simulation prohibitif. Ceci est généralement dû aux contraintes dites de *big-M* représentant les contraintes de séquence, et de ce fait produisent un modèle possédant une faible valeur de la relaxation continue obligeant le solveur à dépenser un temps important pour vérifier l'optimalité d'une solution. Néanmoins, lorsque l'on compare les résultats de l'optimisation avec et sans les coupes topologiques, on remarque que l'application de ces coupes permet de réduire la tolérance d'optimalité de la solution optimale. Cette situation s'explique par le fait que les coupes réduisent l'espace du polyèdre des solutions, réduisant ainsi le temps pour explorer cet espace. Les solutions optimales avec et sans les coupes étant équivalentes (voir figure B.1a et figure B.1b en Annexe-B), ces coupes en question n'excluent donc pas la solution optimale.

**3.5.1.4.2 Modèle hybride :** On remarquera au niveau de la colonne correspondant à la fonction objectif du tableau 3.2 que les valeurs diffèrent de celles obtenues dans le cas du modèle de PLVM. Cette différence est due au fait que le modèle hybride est bien adapté pour la représentation des notions de puissances (quantités par unité de temps), cependant, il éprouve une difficulté pour considérer les notions d'énergie (puissance  $\times$  durée). En effet, sachant que les durées des tâches de la centrale d'utilité sont uniquement déterminées par le sous-modèle, car ces durées dépendent bel et bien du séquencement des différentes tâches du procédé, les consommations dépendantes de la durée de fonctionnement ne sont obtenues qu'à posteriori de l'obtention d'une solution faisable (solution fournie par [SP]). De ce fait, le problème-maître ne peut pas évaluer la consommation en kilogramme de fuel ou en litre de fluide de refroidissement, mais s'occupe uniquement de minimiser les pics de consommations (débits).

De plus, nous remarquerons au niveau du diagramme de Gantt de la solution optimale (figure B.1c) proposée par le modèle hybride que celle-ci autorise un échange uniquement lorsque la tâche productrice d'énergie débute avec la tâche consommatrice d'énergie. Cette situation bien que limitative, car aucun échange en cours de tâche n'est possible, reflète néanmoins plutôt bien la réalité, car les potentiels énergétiques (ici les températures) lors des lancements des tâches améliorent l'efficacité de l'échange d'énergie. En effet, si un échange avait lieu en milieu de tâches, les valeurs des températures risqueraient de se chevaucher, rendant ainsi l'échange ther-

mique impossible. Pour éviter ce cas, il faudrait alors que les deux tâches en échange possèdent des différences de potentiels importants permettant d'éviter un chevauchement des trajectoires jusqu'à la fin d'une des deux opérations.

Lorsque l'analyse Time Slice Model est effectuée sur la solution optimale proposée par le modèle hybride, elle permet de constater, à travers le tableau 3.4, que les besoins énergétiques ne sont pas éloignés de ceux fournis par le modèle de PLVM. Le modèle hybride se comporte donc comme une heuristique et offre une solution proche de celle fournie par le modèle exact en un temps de calcul relativement faible.

	Sans récup.		Avec récup.		Gain (%)	
	PLVM	PLVM	Hybride	PLVM	Hybride	
Chaleur	28.8 MJ	12.00 MJ	18.62 MJ	58.33	35.34	
Froid	81.6 MJ	70.89 MJ	71.42 MJ	13.12	12.47	

Tableau 3.5 – Comparaison des résultats des analyses TSM

Le tableau 3.5 résume les résultats des analyses TSM sur les solutions optimales des deux approches. Ces solutions sont comparées avec l'ordonnancement sans récupération d'énergie et permettent d'évaluer le potentiel de récupération de chacun des deux approches. La différence majeure donnant l'avantage au modèle de PLVM ( $\sim 58\%$  de gain en chaleur) par rapport au modèle hybride ( $\sim 35\%$  de gain) réside dans la possibilité de récupération d'énergie en cours d'exécution d'une tâche dont dispose le modèle de PLVM.

On conclura donc que les deux approches proposées ici permettent d'intégrer efficacement la récupération d'énergie dans les modèles d'ordonnancement. Plus spécifiquement, le modèle de PLVM permet d'obtenir des solutions de meilleures qualités mais souffre d'un inconvénient majeur en ce qui concerne le temps de calcul. Le modèle hybride, d'un autre côté, propose des solutions sous-optimales (voire optimales lorsque la durée des tâches est faible comparée à la durée du plan) mais possède l'avantage de fournir une solution réalisable et proche de l'optimal en un temps relativement plus abordable. De plus, l'algorithme de conduite du modèle hybride peut être interrompu en cours d'exécution, permettant ainsi d'obtenir rapidement des solutions faisables. Ces solutions sont utiles comme point de départ lorsque l'on désire appliquer des heuristiques de recherche locale ou des métahéuristiques pour résoudre des problèmes de grande taille<sup>6</sup>.

### 3.5.2 Intégration énergétique indirecte (Exemple 2)

Pour illustrer le cas du stockage d'énergie, nous utiliserons le même procédé que dans la section précédente, néanmoins, quelques modifications y ont été apportées et nous le nommerons dorénavant « Exemple 2 ». Ainsi, la représentation de l'Exemple 2 dans le formalisme ERTN est donnée par la figure 3.20. Les modifications apportées à l'exemple concernent les paramètres liés à la durée et à la quantité d'énergie des tâches échangeant de l'énergie. Les modifications concernent également la structure du réseau d'échange et l'addition d'étages supplémentaires à la centrale d'utilité. Les tableaux B.4 et B.5 de l'annexe B résument les principales caractéristiques du procédé.

#### 3.5.2.1 Estimation des consommations énergétiques

L'obtention des coefficients de consommation / production d'énergie est réalisée de la même manière que dans l'exemple précédent. Sachant que les durées des tâches en échange sont

6. Nombre de tâche supérieur à 20, nombre d'état supérieur à 20 et nombre d'évènement supérieur à 15 pour les modèles à temps continu.

connues, l'obtention de la puissance dégagée ou absorbée est réalisée en fonction de la taille de lot traitée par l'appareil, les relations décrivant ces consommations sont données ci-dessous :

$$u_{OT2,Int1} = \frac{\Delta H_{T2} \times b_{T2}}{pf_{T2}} = 0.28 \times b_{T2}$$

$$ui_{T4,Int2} = \frac{\Delta H_{T4} \times b_{T4}}{pf_{T4}} = 0.11 \times b_{T4}$$

$$ui_{T5,Int3} = \frac{\Delta H_{T5} \times b_{T5}}{pf_{T5}} = 0.10 \times b_{T5}$$

Ces consommations sont translatées au niveau de la recette et définissent les puissances des tâches en échange d'énergie, les consommations en utilités primaires sont ensuite déduites de ces valeurs au respect des enthalpies massique de la vapeur à chaque niveau de pression (tableau B.5). Nous assumerons, à des fins de simplification, que la chaudière fonctionne avec un rendement de 89% et la quantité de carburant consommée (par heure) est exprimée en fonction du débit moyen de vapeur à haute pression. Ainsi, et en se basant sur la relation (3.10), on peut estimer le débit de carburant consommé par la chaudière à vapeur. Ce débit est associé au paramètre  $uw_i$  et est donné par la relation ci-après :

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{b_{T12}^{moy} \times (H_{HP} - H_{Eau})}{\eta_{boiler} \times PCI_{fuel}} = 0.56 \times b_{T12}^{moy} = 4.2 \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

Pour le cas de la consommation en utilité de refroidissement, nous supposerons, arbitrairement, que la tâche  $T_7$  consomme le fluide à un débit de  $7.5 \left[ \frac{kg}{h} \right]$ .

### 3.5.2.2 Fonction objectif

L'expression de la fonction objectif est identique à celle du cas de l'intégration directe, excepté le critère lié à la minimisation du stock des produits intermédiaires en fin d'horizon. La nouvelle expression de la fonction objectif est donc la suivante :

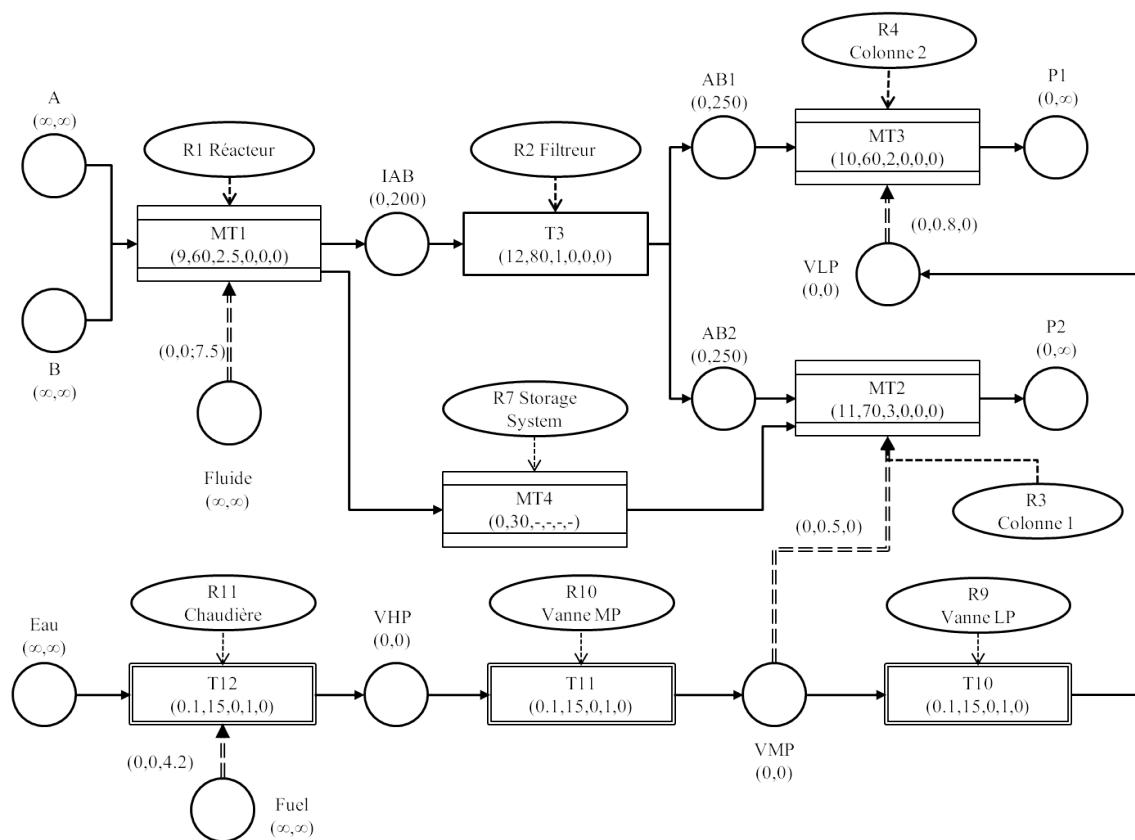
$$\min z = \sum_{s \in S^{fp}} 5 \cdot sf_s + \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} ws_{in} + plan + 80 \cdot \Delta s_{fuel} + 10 \cdot \Delta s_{fluid}$$

### 3.5.2.3 Scénario d'ordonnancement

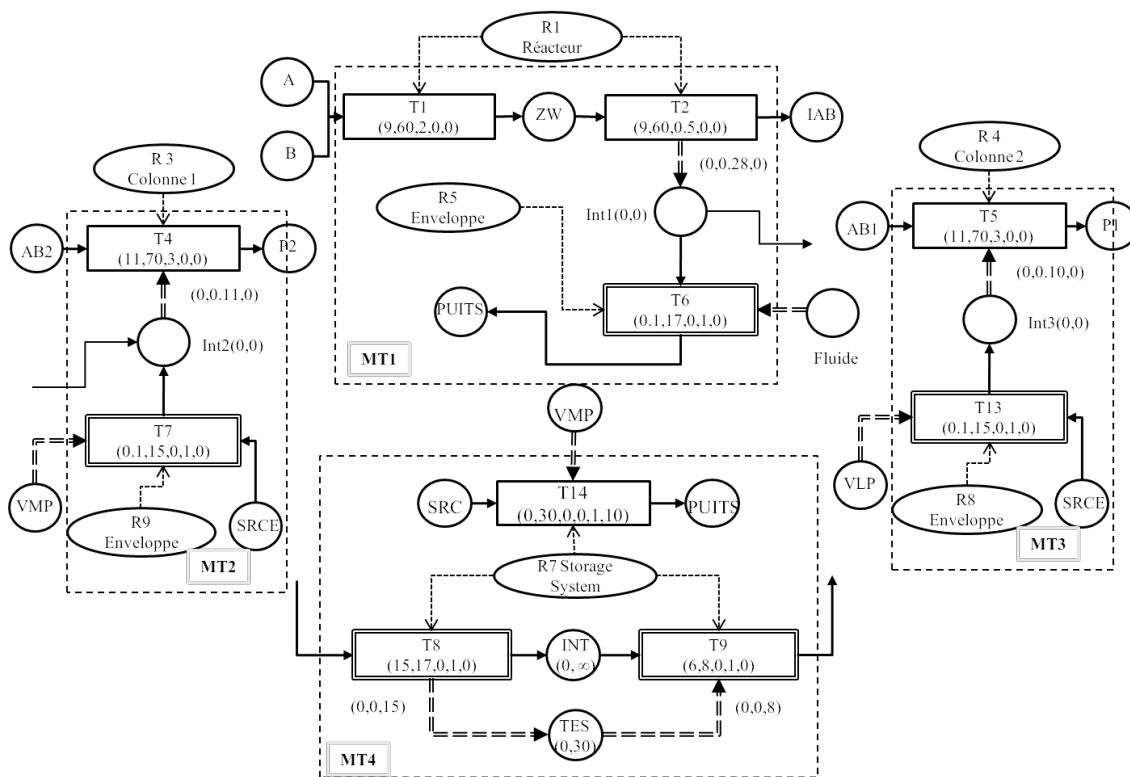
Deux scénarios sont traités dans le cas du stockage d'énergie, à savoir : un scénario de stockage idéal (sans pertes) et un scénario de stockage avec pertes. Le premier scénario est utile pour estimer le potentiel de récupération maximal lorsque qu'aucune dégradation thermique n'est enregistrée. Le deuxième scénario, plus réaliste, considère une perte proportionnelle à la quantité de matière stockée. En effet, sachant que le stockage, au niveau de chaque cuve, se fait à température constante, les pertes sont exprimées par la différence de température entre l'intérieur de la cuve et l'environnement. Cette expression est globalement formulée comme suit :

$$Q_{pertes} = U \times A_{st} \times (T_{st} - T_{env})$$

où  $T_{st}$  représente la température de stockage au sein de la cuve,  $T_{env}$ , la température de l'environnement,  $U$  le coefficient d'échange global et  $A_{st}$ , l'aire d'échange thermique. Il devient alors clair que la quantité  $Q_{pertes}$  est exprimée en fonction de la quantité d'énergie stockée car toutes les expressions sont constantes dans le temps excepté l'aire d'échange  $A_{st}$  qui est directement liée à la géométrie de la cuve de stockage, ainsi qu'au niveau de matière stockée.



(a) Recette de l'exemple 2



#### (b) Macrotâches de l'exemple 2

Figure 3.20 – Modélisation ERTN de l’Exemple 2

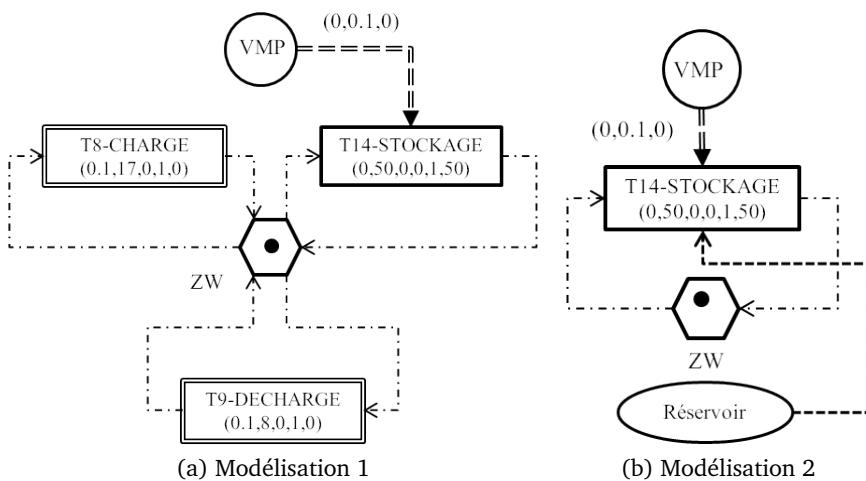


Figure 3.21 – Représentation ERTN du stockage d'énergie de l'Exemple 2

### **Remarque 3.1**

Afin d'intégrer les pertes dans la formulation du problème, nous supposerons qu'aucune dégradation énergétique n'a lieu dans la cuve de stockage mais que la cuve consomme une quantité de chaleur équivalente aux pertes.

La quantité de chaleur discutée dans la remarque 3.1 est fournie par la centrale de cogénération (sous forme de vapeur moyenne pression) et représente le débit d'énergie devant être acheminé vers le stockage pendant toute la durée du stockage. De plus, la représentation du stockage d'énergie incorpore la représentation d'une ressource multimodale identique à celle de la figure 3.21a. En effet, une cuve chaude a généralement 3 états de fonctionnement :

- un état de charge, où la matière est introduite en flux continu dans la cuve pendant une certaine durée. Cet état représente un régime de fonctionnement transitoire ;
  - un état de stockage, où la matière réside dans la cuve pendant une certaine durée. C'est généralement un état en régime stationnaire (permanent) ;
  - un état de décharge modélisé par un régime transitoire où la matière est extraite du stock pendant une durée définie.

Dans un souci de clarté, nous supposerons qu'aucune superposition d'état n'est possible. Cette hypothèse implique le fait qu'une charge et une décharge ne peut se produire au même moment. De ce fait, les consommations d'énergie de la cuve de stockage n'existent pas lors des phases transitoires mais uniquement lors des régimes stationnaires. La modélisation du stockage dans le formalisme ERTN est alors donnée par la figure 3.20b.

Sur cette figure, nous pouvons constater que la macro-tâche  $MT_4$  représente l'élément de stockage. La charge dans la cuve s'effectue entre 15 et 17 [ $\text{kJ h}^{-1}$ ] contre 6 à 8 [ $\text{kJ h}^{-1}$ ] pour la décharge. Ces données sont obtenues à partir de l'énergie nécessaire aux tâches  $T_2$  et  $T_5$  d'une part, et d'autre part, selon un compromis sur la quantité d'énergie pouvant être récupérée. Néanmoins, il est toujours possible de représenter la plage entière de débit en discrétilisant l'opération de charge et de décharge. De plus, afin d'obtenir un ordonnancement faisable, nous appliquons l'hypothèse 3.1 sur les tâches de charge et de décharge  $T_8$  et  $T_9$ . Autrement la charge de la cuve s'effectue avec un débit de 15 [ $\frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ ] tandis que la décharge de la cuve s'effectue à un débit de 8 [ $\frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ ]. L'ordonnancement ainsi obtenu, restera valide pour les conditions opératoires choisies.

### 3.5.2.4 Analyse et interprétations des résultats

Pour le cas de l'exemple 2, nous nous limiterons à l'exploitation du modèle de PLVM. Le nombre d'itération maximal  $c_{max}$  pour la remise en cause de la valeur de la fonction objectif

est fixé à trois (03) et le temps limite de simulation  $tlim$  est fixé à 900 secondes (15 minutes). Quant à  $N_{min}$ , la résolution du modèle n'est possible qu'à partir de 7 points d'événements, nous affecterons donc cette valeur à  $N_{min}$ . Les résultats de l'ordonnancement dans le cas du stockage idéal sont résumés dans le tableau 3.6. L'obtention de la solution optimale du problème se fait au bout de 5 itérations.

**Analyse de l'ordonnancement avec stockage idéal :** Nous pouvons observer sur la figure B.2a, l'ordonnancement correspondant à la meilleure solution dans le cas du stockage idéal. Le profil de la figure 3.22a montre les quantités d'énergies produites, consommées et stockées correspondant au diagramme de Gantt précédent. On constate directement que la quantité produite ne suffit pas à répondre intégralement à la demande, ceci est dû au fait que la majorité de la demande concentrée entre 6h et 8h correspond principalement à la demande de  $T_5$ . Or, aucun élément de stockage n'est disponible entre le réacteur et la colonne 2, de ce fait, aucune récupération énergétique n'est disponible entre ces deux tâches ( $T_5$  et  $T_2$ ). On constate également que l'échange s'effectue au delà de 8h et cela pendant 1h, la raison pour laquelle cela ne s'est fait plus tôt réside dans le fait que la production de  $T_2$  ne suffit pas pour répondre à la demande de  $T_4$  d'une part, et d'autre part, le nombre d'événements disponible et donc le nombre de périodes disponibles ne permet pas d'autoriser des lancements additionnels de la centrale d'utilité représentée par les tâches  $T_{10}$  à  $T_{12}$ . Afin de lever cette limitation, il est possible d'augmenter le nombre de points d'événements mais cela a pour conséquence directe l'augmentation du temps de simulation et donc l'éloignement de la solution obtenue par rapport à la solution optimale. Cela peut être observé sur le tableau 3.6 pour les itérations 3 à 5. D'un autre côté, il est possible de modifier le rapport débit de charge / débit de décharge en augmentant la plage de débit de décharge du stockage, cela se fait généralement en créant une tâche additionnelle en parallèle à  $T_9$ . En d'autres termes, on autorise le modèle à utiliser plusieurs autres conditions opératoires, mais cela entraîne généralement l'augmentation de l'instance (taille du problème) et donc de la complexité du problème qui aura comme conséquence inévitable l'augmentation du temps de simulation.

It.	N	Fuel(\$)	Fluide(\$)	MS(h)	Obj.(\$)	Time(s)	Tol.(%)
1	07	1500	0	11	2133	1.43	0.00
2	08	600	0	9	1230	4.73	0.00
3	09	600	0	9	1231	9.70	0.00
4	10	600	0	9	1232	25.14	0.00
5	11	600	0	9	1233	166.16	0.00

Tableau 3.6 – Résultats de l'optimisation avec stockage idéal

ment que l'échange s'effectue au delà de 8h et cela pendant 1h, la raison pour laquelle cela ne s'est fait plus tôt réside dans le fait que la production de  $T_2$  ne suffit pas pour répondre à la demande de  $T_4$  d'une part, et d'autre part, le nombre d'événements disponible et donc le nombre de périodes disponibles ne permet pas d'autoriser des lancements additionnels de la centrale d'utilité représentée par les tâches  $T_{10}$  à  $T_{12}$ . Afin de lever cette limitation, il est possible d'augmenter le nombre de points d'événements mais cela a pour conséquence directe l'augmentation du temps de simulation et donc l'éloignement de la solution obtenue par rapport à la solution optimale. Cela peut être observé sur le tableau 3.6 pour les itérations 3 à 5. D'un autre côté, il est possible de modifier le rapport débit de charge / débit de décharge en augmentant la plage de débit de décharge du stockage, cela se fait généralement en créant une tâche additionnelle en parallèle à  $T_9$ . En d'autres termes, on autorise le modèle à utiliser plusieurs autres conditions opératoires, mais cela entraîne généralement l'augmentation de l'instance (taille du problème) et donc de la complexité du problème qui aura comme conséquence inévitable l'augmentation du temps de simulation.

**Analyse de l'ordonnancement avec stockage non-idéal :** Lorsque les pertes sont introduites dans le modèle, le diagramme de Gantt de la figure B.2b représente la solution optimale du problème. Cette solution s'obtient dans les mêmes conditions opératoires que le cas idéal mais avec une perte équivalente à 10% de l'énergie stockée par heure. Rappelons que nous ne dégradons pas l'énergie stockée mais plutôt, nous la maintenons avec l'apport d'utilités externes (vapeur à moyenne pression). Cette situation aura pour conséquence directe le lancement de la centrale d'utilité à chaque période de stockage et c'est exactement la situation illustrée par le diagramme de Gantt de la figure B.2b. De plus, on observe que le modèle tend à minimiser la consommation engendrée par le stockage de l'énergie. Pour ce faire, il cède aux utilités, l'énergie dégagée par la tâche  $T_2$  lors de son premier lancement et se contente uniquement de récupérer l'énergie dégagée lors du deuxième lancement du réacteur. Cette décision minimise le temps de stockage et l'énergie stockée en rapprochant l'instant de la production de l'énergie de celui

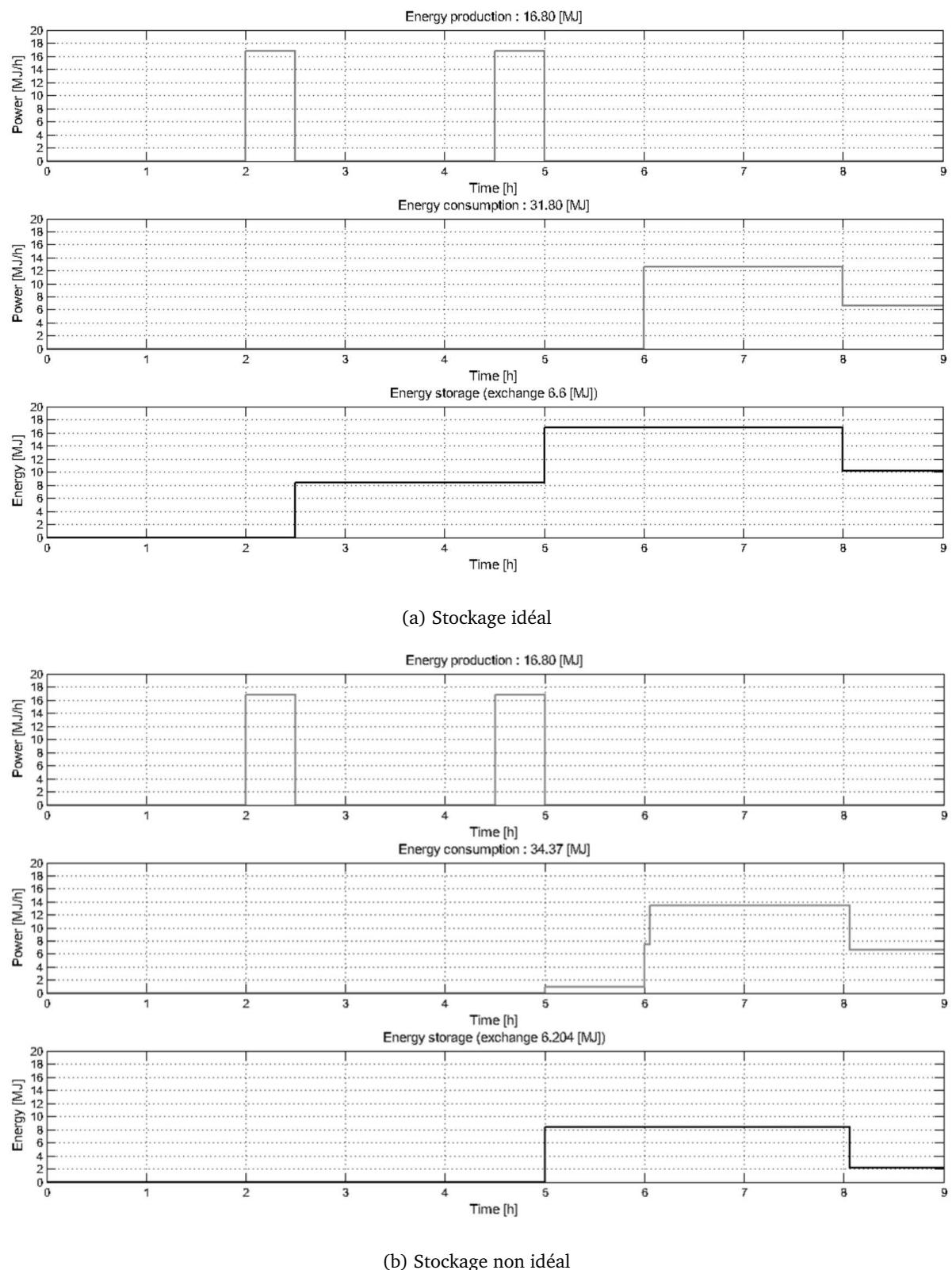


Figure 3.22 – Profil d'utilisation des ressources de l'exemple 2

It.	N	Fuel(\$)	Fluide(\$)	MS(h)	Obj.(\$)	Time(s)	Tol. (%)
1	07	1500.0	80	11	2215.00	2.17	0.00
2	08	900.00	80	9	1615.00	7.91	0.00
3	09	900.00	80	9	1616.00	65.3	0.00
4	10	918.75	40	9	1596.74	282.9	0.00
5	11	918.75	40	9	1597.74	>900	20.41
6	12	918.75	40	9	1598.74	>900	22.74
7	13	918.75	40	9	1599.74	>900	23.02

Tableau 3.7 – Résultats de l'optimisation avec stockage non-idéal

de sa consommation et minimise par la même occasion l'énergie consommée par le stockage, situation absente dans le cas idéal. Le profil de charge pour la solution optimale du cas non-idéal est donné par la figure 3.22b, on observe que la quantité d'énergie échangée est du même ordre de grandeur que celle du cas idéal et que cette récupération se déroule sur la dernière tranche temporelle de l'ordonnancement comme dans le cas précédent.

Le modèle traduit donc fidèlement le comportement voulu mais présente tout comme dans le cas de l'intégration énergétique directe, un sérieux inconvénient concernant le temps de simulation et principalement lorsqu'il s'agit de prouver l'optimalité de la solution obtenue (voir le tableau 3.7). Néanmoins, lorsque l'on observe le diagramme de Gantt du stockage non idéal (figure B.2b), on constate que les consommations dues au stockage ne sont pas enregistrées lors des phases de charge et de décharge. Cela est du au fait que la modélisation par état-ressource retenue (figure 3.21a) empêche l'enregistrement d'un stockage lors des phases de charge et de décharge. Si l'on désire donc réaliser que le stockage soit représenté en parallèle avec les phases de charge et de décharge, on adoptera la modélisation de la figure 3.21b et l'on ajoutera les contraintes suivantes au modèle :

$$\begin{aligned} \forall n \in N \quad st_{T14,n} : & \begin{cases} sts_{TES,n} \quad siwst_{14,n} = 1 \\ \geq 0 \quad sinon \end{cases} \\ \forall n \in N \quad ft_{T14,n} : & \begin{cases} fts_{TES,n} \quad siwf_{T14,n} = 1 \\ \geq 0 \quad sinon \end{cases} \\ \forall n \in N \quad bst_{T14,n} : & \begin{cases} bst_{TES,n} \quad siws_{T14,n} = 1 \\ \geq 0 \quad sinon \end{cases} \end{aligned}$$

A partir de ces nouvelles contraintes, on enregistrera alors une consommation d'utilité lors des phases de stockage ayant lieu simultanément avec les phases de charge et de décharge. Néanmoins, les résultats enregistrés pour le cas de la modélisation de la figure 3.21b sont identiques, à l'optimal, avec celui donné par le cas de la modélisation de la figure 3.21a traité dans cet exemple. Cette situation s'explique par le fait que lorsque la cuve de stockage se décharge, le stock de matière dans la cuve est totalement consommé lors de la récupération. De plus, lors de la charge de la cuve, la livraison de la matière se fait à la terminaison de l'opération de charge, aucun enregistrement de consommation énergétique n'est donc enregistrée pendant la charge ou la décharge de la cuve. Une modélisation plus fine, en réduisant la durée de charge et en ajoutant plus de points d'évènements devrait permettre d'éviter ces genres de situations.

### 3.5.3 Prise en compte des opérations multi-modales (Exemples 3 à 5)

L'incorporation des opérations multi-modales s'effectue au sein du modèle à travers les états-ressource. Ces contraintes ont déjà été utilisées dans le cas du stockage d'énergie (figure 3.21), elles seront utilisés dans cette section pour illustrer :

- le démarrage et l'arrêt de la chaudière ;
- l'insertion d'un mode veille (maintien en conditions) au niveau de la chaudière ;
- la prise en compte des nettoyages (en fréquence et en séquence) au niveau du procédé.

Toutes les expérimentations réalisées dans cette section se font avec le modèle de programmation linéaire en variables mixtes. En effet, les résultats obtenus permettent, comme nous le verrons ci-dessous, l'obtention de la solution optimale en un temps de simulation relativement faible.

### Remarque 3.2 (Réinitialisation des marquages initiaux)

Une remarque sur le cas des nettoyage que ce soit en fréquence ou en séquence concerne le fait que les contraintes (2.31) doivent être relaxées lors de ces situations. Si ces contraintes restent valides, le modèle cherchera à réinitialiser le marquage des états ressources afin de satisfaire la contrainte.

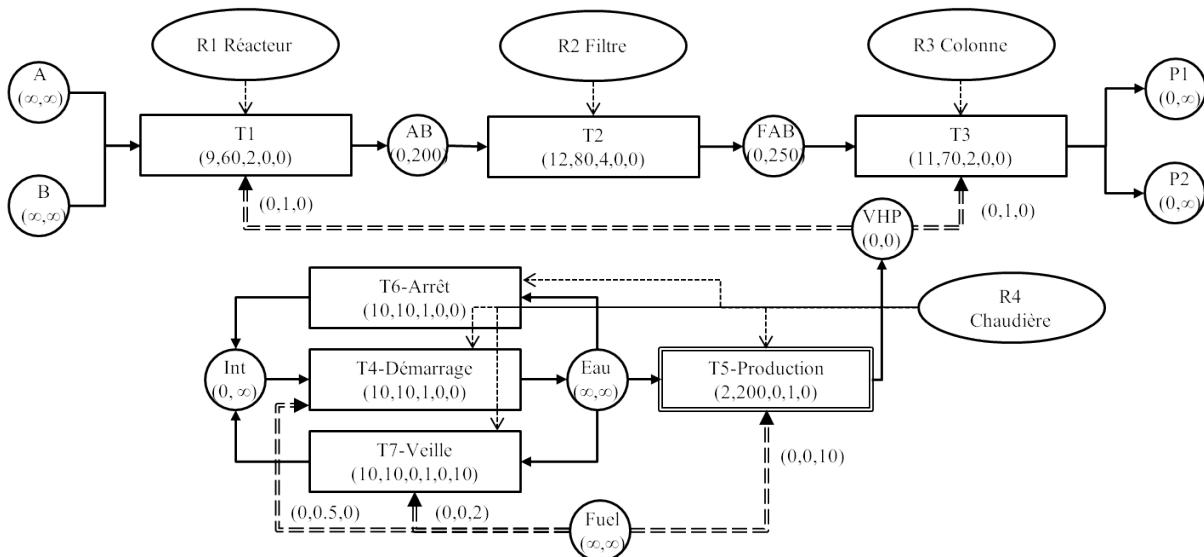
#### 3.5.3.1 Démarrage, arrêt et veille d'une chaudière (Exemple 3)

Pour illustrer le cas de la prise en compte des différents modes d'une opération, nous choisirons d'illustrer l'exemple avec le cas de la chaudière à vapeur. En effet, la chaudière peut posséder trois états de fonctionnement : la production, la veille et le repos. Le passage d'un état à l'autre s'effectue par le franchissement de transitions correspondant à des tâches précises de la recette. Ainsi, pour passer de l'état de repos à l'état de production, la chaudière devra subir un démarrage (T4). Le passage du mode « production » au mode « repos » se fait par le passage à travers la tâche d'arrêt T6. Et ainsi de suite, les transitions menant à ces états sont donc représentés par les tâches  $T_4$  à  $T_7$  au niveau de l'ERTN de l'exemple 3 (figure 3.23a).

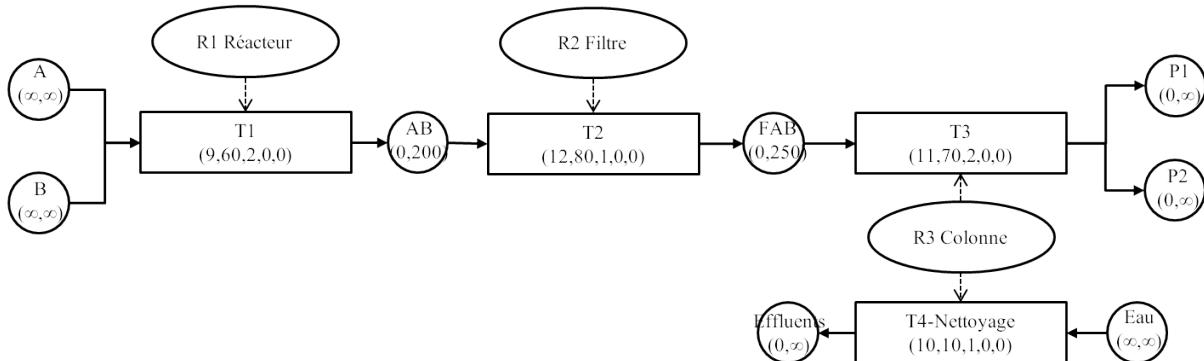
Nous utiliserons une version modifiée de l'exemple 1 que nous nommerons « Exemple 3 » pour illustrer les différents modes de fonctionnement de la chaudière. Le maillage des états ressources et des tâches correspond à celui illustré par la représentation de la figure 3.18. Les caractéristiques des tâches et des états sont directement donnés sur la recette du procédé (figure 3.23a). La fonction objectif consiste ici à minimiser les critères liés aux coûts de fabrication, en l'occurrence la réalisation de 120 tonnes chacun de produit  $P_1$  et  $P_2$ , la minimisation de la durée globale de l'ordonnancement et la minimisation des coûts de lancements. Cette fonction objectif se formule alors comme suit :

$$\min \quad z = \sum_{s \in S^{fp}} 5 \cdot sf_s + \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} ws_{in} + plan + 80 \cdot \Delta s_{fuel}$$

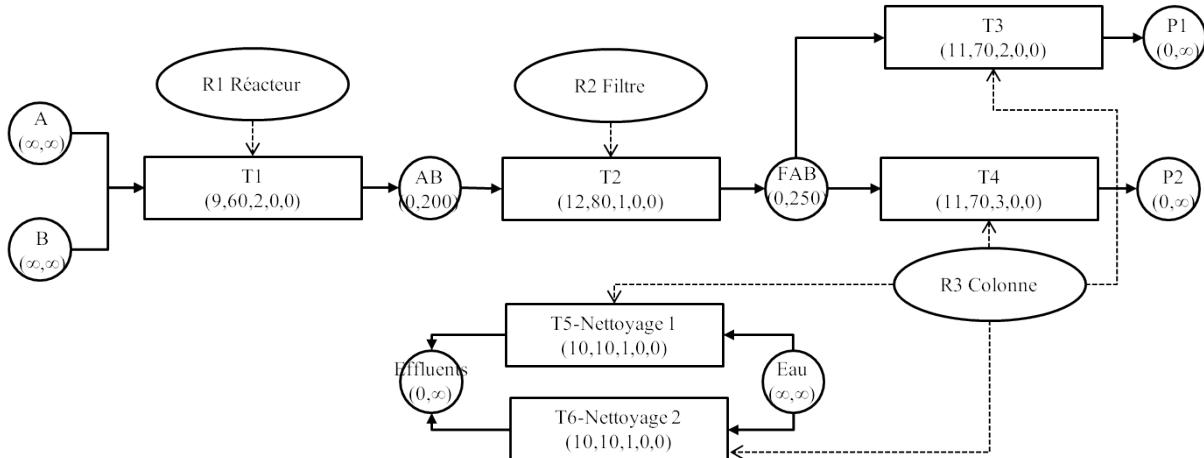
Le lancement du modèle de PLVM permet d'obtenir le résultat, sous forme d'un diagramme de Gantt, de l'ordonnancement de l'Exemple 3 (figure B.3a) pour 11 points d'événements et permet d'apprécier la qualité de la solution et la validité des contraintes formulées. Les résultats de l'optimisation à chaque itération qui sont résumés dans le tableau 3.8 montrent que la valeur optimale de la fonction objectif est obtenue à l'itération 2, sachant que nous gardons les mêmes critères de convergence que dans les cas précédents, 3 itérations supplémentaires sont nécessaires pour valider la solution. On pourra observer sur le diagramme de Gantt (figure B.3a) que le modèle lance la tâche de démarrage  $T_4$  en début d'horizon, ce qui a pour effet de décaler le diagramme entier de la durée du démarrage qui est ici égale à 1h. Mais également et de façon symétrique, la tâche d'arrêt  $T_6$  est lancée à la fin de l'horizon et augmente le *makespan* d'une unité de temps correspondant à la durée de l'arrêt de la chaudière. De même, on observe qu'une augmentation du *makespan* pour la solution optimale est enregistrée. Ceci est dû au fait que le modèle minimise la consommation de la chaudière en phase de production. Sachant que cette consommation est directement proportionnelle à la durée de fonctionnement de la phase de production de la chaudière, le modèle s'efforce d'associer un lancement de  $T_5$  de durée minimum avec le maximum de lancement de  $T_1$  ou de  $T_3$ . Autrement dit, le modèle regroupe les demandes d'énergie ce qui minimise le nombre de demande et la durée de celles-ci.



(a) Représentation ERTN de l'exemple 3



(b) Représentation ERTN de l'exemple 4



(c) Représentation ERTN de l'exemple 5

Figure 3.23 – Représentation ERTN des exemples 3 à 5

It.	N	Fuel	MS	Obj.	time	Tol.
		\$	h	\$	s	%
1	10	10640	22	11880	3.9	0.0
2	11	9680	28	10931	11.3	0.0
3	12	9680	28	10931	22.7	0.0
4	13	9680	28	10931	32.6	0.0
5	14	9680	28	10931	77.7	0.0

Tableau 3.8 – Résultats de l'optimisation de l'Exemple 3

### 3.5.3.2 Nettoyage en fréquence (Exemple 4)

Le procédé étudié est limité ici à l'atelier de production (figure 3.23b). Nous le nommerons « Exemple 4 ». Ce procédé fait intervenir les mêmes tâches que précédemment et introduit une nouvelle tâche  $T_4$  représentant le nettoyage. Le cycle de nettoyage est alors égalisé à 2. C'est à dire qu'une tâche de nettoyage, en l'occurrence la tâche  $T_4$ , sera lancée lorsque la tâche de production ( $T_3$ ) de la colonne aura effectué un cycle de 2 lancements. L'objectif reste le même que celui dans le cas de l'Exemple 3 excepté le fait qu'aucune consommation d'utilités n'est formulée dans la recette. Le résultat de l'ordonnancement pour 10 points d'événements et pour un cycle de 2 lancements est présenté sur la figure B.3b, ces résultats sont obtenus au bout de 2.1 [sec]. On observe d'après les résultats obtenus que le lancement du nettoyage d'après le cycle imposé est bien respecté.

### 3.5.3.3 Nettoyage en séquence (Exemple 5)

L'application du cas du nettoyage en séquence est abordée à travers la recette de l'exemple 5 donnée sur la figure 3.23c. Les modifications apportées à l'exemple concernent l'introduction d'une nouvelle tâche représentant l'opération de distillation au niveau de la colonne. Dorénavant, la réalisation des produits  $P_1$  et  $P_2$  s'effectuera à travers des tâches (opérations) différentes mais aura lieu sur le même appareil, en l'occurrence la colonne de distillation  $R_3$ . Ensuite, deux nouvelles tâches  $T_5$  et  $T_6$  sont ajoutées à la recette pour représenter les nettoyages. Le but du nettoyage en séquence est de lancer une tâche de nettoyage à chaque fois qu'il existe un changement de lot traduisant la production de produits différents sur un même appareil. De ce fait, on s'attend à ce que la tâche  $T_5$  se lance lorsque la séquence  $T_3 \rightarrow T_4$  se présente au niveau de la colonne. De même, la tâche  $T_6$  devra se lancer lorsque la séquence  $T_4 \rightarrow T_3$  se présentera sur l'appareil. Aucune contrainte de consommation d'énergie n'est formulée dans la recette, donc, l'objectif de l'ordonnancement consistera à produire la quantité, de produits finis, commandée (140 kg pour chaque  $P_i$ ) tout en minimisant le coût de lancement des tâches ainsi que la durée du plan d'ordonnancement. L'expression de ce critère est identique au cas de l'Exemple 3. Le résultat présenté sous forme de diagramme de Gantt (figure B.3c) montre que le modèle cherche à minimiser le lancement des tâches de nettoyage, pour ce faire, il regroupe les opérations similaires au sein de la colonne et autorise un lancement minimum, obligatoire, de la tâche  $T_5$  ou  $T_6$  sensés représenter les nettoyages. Cette solution optimale<sup>7</sup> est obtenue en une itération avec 10 points d'événements et pour un temps de simulation de 3.4 [sec].

7. L'introduction de points d'événements supplémentaires ne modifie pas la solution car l'objectif consiste à minimiser le nombre de lancement des tâches

### 3.6 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons eu la possibilité de présenter la démarche retenue pour la réalisation du couplage ordonnancement / intégration énergétique. Nous avons éprouvé, pour cela, les modèles d'ordonnancement au cas de l'intégration énergétique directe et indirecte. Les résultats des simulations exécutées sur une série d'exemples, nous permettent de conclure que les modèles traduisent fidèlement les prises de décision favorisant la récupération énergétique et ces résultats correspondent à ceux fournis par une analyse Time Slice Model. A travers ces expérimentations, nous avons pu remarquer que l'augmentation du nombre d'événement améliore considérablement la consommation énergétique du procédé étudié. Néanmoins, on observe une dégradation importante de la durée de simulation en fonction de l'augmentation du nombre d'événement associé au modèle de PLVM. La détermination de la solution optimale se fait donc suivant un compromis entre le temps de simulation et la qualité de la solution recherchée. Dans un souci d'obtention de solutions de meilleures qualités lors de la résolution d'instances de tailles importantes, il est nécessaire de diminuer ce temps de simulation, c'est ce à quoi nous avons procédé dans la section 2.2 en proposant un modèle combinant la programmation linéaire avec la programmation par contraintes. Les résultats fournis à travers cette démarche ont alors permis de conclure que la décomposition du problème en sous problème et l'exploitation de la spécificité du modèle d'ordonnancement dans des formalismes de modélisation différents permet de réduire considérablement ce temps de simulation. Finalement, les contraintes relatives au fonctionnement des opérations multi-modales ont été éprouvées au sein de ce chapitre, les résultats obtenus nous permettent de conclure que le modèle de PLVM intègre parfaitement la représentation de ces opérations. Nous pouvons donc conclure que les contraintes formulées dans le modèle présenté dans la section 2.1 ainsi que la méthodologie définie dans le présent chapitre donne une représentation acceptable des phénomènes rencontrés au sein des procédés discontinus soumis à des contraintes de récupération d'énergie.

# CHAPITRE 4

---

## SIMULATION ORIENTÉ ORDONNANCEMENT D'UN PROCÉDÉ DISCONTINU

---

### Plan du chapitre

4.1	Le procédé étudié . . . . .	124
4.2	Modélisation du procédé . . . . .	125
4.2.1	Modélisation du réacteur discontinu . . . . .	126
4.2.2	Modélisation des cuves de stockage . . . . .	132
4.2.3	Modélisation de l'échangeur de chaleur . . . . .	134
4.2.4	Modélisation du système de stockage thermique . . . . .	137
4.2.5	Modélisation de la chaudière à vapeur . . . . .	142
4.2.6	Modélisation de l'ensemble turbine-alternateur . . . . .	143
4.3	Modélisation de la supervision du procédé . . . . .	146
4.4	Couplage optimisation-simulation : Études de cas . . . . .	149
4.4.1	Cas d'application I : Cogénération . . . . .	150
4.4.2	Cas d'application II : Récupération directe d'énergie . . . . .	161
4.4.3	Cas d'application III : Récupération indirecte d'énergie . . . . .	169
4.5	Conclusion . . . . .	173

---

**L**a simulation des procédés discontinus ainsi que la mise en œuvre du couplage entre l'optimisation et la simulation sont les objectifs de ce chapitre. La simulation d'un procédé discontinu est illustrée dans ce chapitre à travers un procédé de fabrication de PVC. Après une brève présentation du procédé et des différentes opérations qui y sont retrouvés, nous présentons le développement des modèles de simulation des opérations unitaires. Ces modèles comprennent d'une part, la modélisation de la dynamique discrète et d'autre part, la modélisation de la dynamique continue de chaque opération. De plus, nous discuterons de la modélisation de la supervision du procédé en créant le pont entre le module d'optimisation et le module de simulation.

Afin de permettre la communication entre l'ordonnancement et la simulation, nous présentons la démarche pour traiter les résultats de l'ordonnancement au niveau du module de simulation. Ensuite, la méthodologie de couplage dans laquelle la phase d'ordonnancement est exécutée afin de conduire la phase de simulation, est proposée. Cette méthodologie est appliquée au cas du procédé de fabrication de PVC et, est illustrée à travers le cas de l'intégration énergétique directe et indirecte ainsi que du cas de la production simultanée d'électricité et de chaleur.

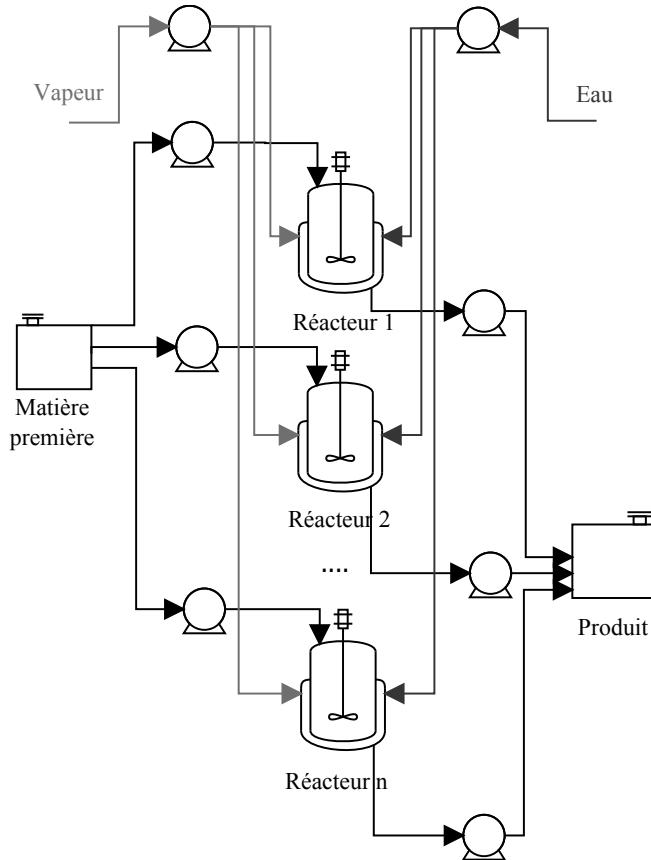


Figure 4.1 – Topologie de l'atelier de production de PVC (partie discontinue)

## 4.1 Le procédé étudié

Dans le cadre de cette thèse, nous considérerons un procédé dont la structure topologique est inspirée du procédé de fabrication du chlorure de polyvinyle (PVC). Le procédé que nous considérons ici, est composé d'une étape de réacteurs montés en parallèle et d'une ligne d'opérations continues destinée à sécher et à séparer les produits de la réaction. La topologie de la partie discontinue du procédé est donnée par la figure 4.1 sur lequel on peut observer l'existence de deux modes de fonctionnement prépondérant. A savoir, un fonctionnement discontinu au niveau de l'étage des réacteurs et un fonctionnement purement continu dès la sortie des réacteurs.

Au niveau de l'atelier de production, nous nous intéresserons plus particulièrement au cas de la partie discontinue du procédé. Autrement dit, au niveau de l'atelier de production, notre étude se limitera à la conduite des réacteurs qui consommeront dans une cuve de stockage de matières premières et produiront dans une cuve de produits intermédiaires. Les réacteurs en question sont montés en parallèle et regroupés en lignes (4 lignes d'une vingtaine de réacteur chacune) de caractéristiques différentes. Ces caractéristiques concernent les dimensions des appareils, les conditions opératoires ainsi que les besoins énergétiques. On constate alors que le procédé étudié, lorsqu'il est uniquement limité à la partie discontinue, est de taille imposante, de ce fait, nous nous limiterons dans ce chapitre à la simulation de deux réacteurs sur une même ligne. Cette situation nous semble suffisante pour représenter les comportements majeurs du procédé.

Le réseau de récupération d'énergie, quant à lui, englobe les échangeurs de chaleur et les

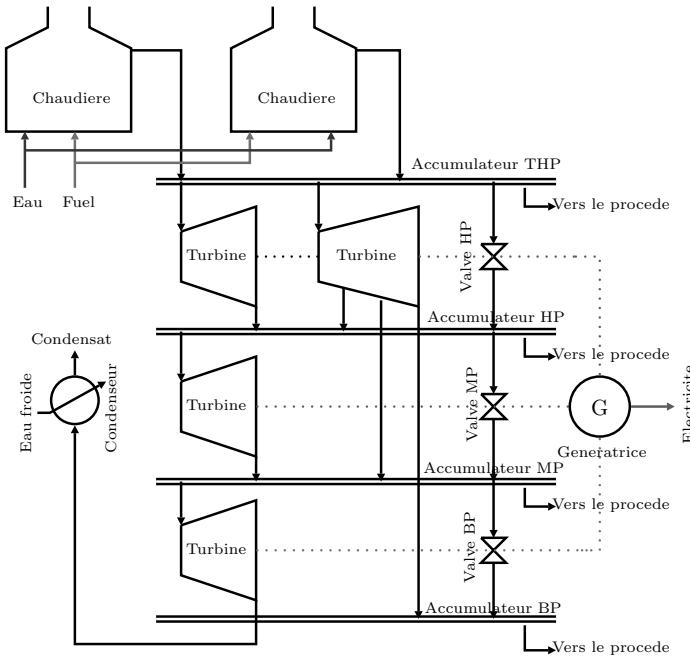


Figure 4.2 – Topologie de la centrale de cogénération

cubes de stockage thermique. Afin de permettre la prise en compte de la récupération d'énergie dans la simulation, un échangeur de chaleur ainsi qu'un dispositif de stockage thermique est associé à chaque couple de réacteur. Nous supposerons de plus que le procédé dispose déjà de son réseau d'échangeur et que le maillage entre les réacteurs devant fournir de la chaleur et ceux devant en consommer, est fixé. Notre étude consiste alors à simuler la potentialité de récupération d'énergie entre deux réacteurs conformément au plan de production transmis par la phase d'ordonnancement.

Au niveau de la centrale d'énergie, les principaux appareils participant à la fourniture de l'énergie vers les réacteurs correspondent aux appareils de génération de vapeur, autrement dit, la chaudière mono-combustible. Aux appareils en charge du transport de la vapeur tels que les valves de détente, et aux appareils servant à fournir la demande en électricité de l'atelier. Nous parlons dans ce dernier cas du groupe turbo-alternateur comprenant une turbine à vapeur et une génératrice synchrone. La manière dont est agencée ces différents appareils est représentée par la figure 4.2. Le modèle de simulation de la centrale de cogénération que nous développons dans ce chapitre, ne prend pas en compte le flux de retour allant du condenseur vers la chaudière. Autrement dit, nous ne modélisons pas l'opération de condensation au niveau de ce chapitre.

## 4.2 Modélisation du procédé

La présente section s'attèle à la modélisation des différents appareils précédemment cités. La modélisation de la partie discrète de ces différents appareils se fait alors suivant le formalisme des *Statecharts* conçu par HAREL en 1987 [54, 55]. Le formalisme des Statecharts qui a pour objectif la représentation des systèmes complexes, est une extension du formalisme des machines à états [49] et des diagrammes d'états auquel des particularités telles que la prise en compte de la concurrence, la possibilité de gérer des événements conditionnés, les machines à états hybrides ou l'encapsulation d'état ont été rendu possible. La boîte à outils Stateflow de Matlab est le candidat idéal pour l'exploitation de ce formalisme, d'où notre choix pour cet

outil. Quant à la description de la dynamique continue des opérations, l'utilisation d'équations algébro-différentielles est requise ce qui nous conduit à exploiter, logiquement, le couplage entre Stateflow et le simulateur graphique Simulink de « The MathWorks, Inc. ».

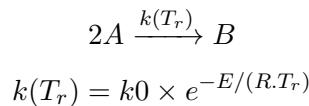
#### Remarque 4.1

L'approche de modélisation hybride retenue dans cette thèse dissocie la modélisation de la partie discrète de la modélisation de la partie continue. Le comportement hybride du procédé est donc obtenu suite à l'interaction entre la partie discrète, utilisant le formalisme des Statecharts, et la partie continue, formulée à travers des équations différentielles et modélisées graphiquement sous Simulink.

### 4.2.1 Modélisation du réacteur discontinu

#### 4.2.1.1 Dynamique discrète du réacteur

Le réacteur que nous présentons ici est un réacteur batch, c'est-à-dire que son fonctionnement est régit par une succession d'étapes élémentaires fondamentalement disjointes dans le temps. La réaction, que nous supposerons à des fins de simplifications, est une réaction du deuxième ordre transformant un réactif A en produit B à une vitesse  $k(T_r)$ , relatif à la loi d'Arrhenius et, dépendante de la température de réaction.



Ainsi, chaque réacteur continu suit fondamentalement une séquence de cinq phases prédéfinies dans le temps. Ces cinq phases sont les suivantes :

1. Une phase de charge pendant laquelle une certaine quantité de matière est extraite de la cuve de matière première afin d'être introduite dans le réacteur. L'état associé à cette phase sera l'état « CHAR » ;
2. Une phase de chauffe pendant laquelle la matière en rétention dans le réacteur est chauffée en partant de sa température de charge jusqu'à une certaine température à laquelle la réaction est réalisée. L'état associé à cette phase sera l'état « HEAT » ;
3. Une phase de conversion pendant laquelle la concentration des réactifs et des produits évoluent dans le temps jusqu'à une valeur cible notifiant la fin de la réaction. L'état associé à cette phase sera l'état « REACT » ;
4. Une phase de refroidissement servant à abaisser la température de la matière pour qu'elle puisse être traitée par l'opération en aval du réacteur. L'état associé à cette phase sera l'état « COOL » ;
5. Une phase de décharge servant à extraire la masse réactionnelle du réacteur afin d'être transférée vers la cuve de stockage. L'état associé à cette phase sera l'état « DSCH » .
6. Une phase additionnelle d'attente pendant laquelle le réacteur n'est pas utilisé, cette phase est nommée « WT » .

Ces différentes phases représentent les différents états du réacteur et à chacun de ces états correspondra un modèle représentant la dynamique discrète du réacteur et un modèle correspondant à la dynamique continue du réacteur.

#### Remarque 4.2

Dans la suite de cet ouvrage, nous définirons la représentation du modèle hybride avec la notation suivante :

$$\mathcal{M} = \{\mathcal{L}, \mathcal{T}, \mathcal{X}, \mathcal{U}, \mathcal{A}, \mathcal{J}, \mathcal{G}\}$$

Où :

- $\mathcal{L}$  représente l'ensemble des états discrets du modèle,
- $\mathcal{T}$  représente l'ensemble des transitions du modèle ( $T \subseteq L \times L$ ),
- $\mathcal{X}$  représente l'ensemble des variables d'état continus ( $X \in \mathbb{R}^n$ ),
- $\mathcal{U}$  représente l'ensemble des variables d'entrée du modèle ( $U \in \mathbb{R}^m$ ),
- $\mathcal{A} = \{A_1, \dots, A_n\}$  représente l'ensemble des équations algébro-différentielles  $\dot{x} = f_i(x, u)$ ,  $x \in X, u \in U$  avec  $f_i : X \times U \rightarrow \mathbb{R}^n$  associées à chaque variable d'état du système.
- $\mathcal{J} = \{J_{ij} : X \rightarrow X, i, j \in L\}$  représente la matrice de sauts de valeurs des variables d'états lors des franchissements des transitions entre les différents états, ici la valeur de la variable d'état à la sortie de l'état « i » résulte de l'exécution des équations algébro-différentielles. Cette valeur est ensuite réinitialisée conformément à  $J_{ij}$  lors du franchissement de la transition menant vers l'état « j » et devient la valeur initiale de la variable d'état au niveau de cet état. Et finalement :
- $\mathcal{G} = \{G_{ij} : X \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}, (i, j) \in T\}$  représente l'ensemble des conditions de garde à vérifier pour que la transition menant d'un état « i » vers un état « j » soit validée.

Nous pouvons dès lors définir l'ensemble des états discrets pour le cas du réacteur discontinu.

$$\mathcal{L} = \{\text{WT, CHAR, HEAT, REACT, COOL, DSCH}\}$$

Nous définirons également les variables d'états du système comme étant la température  $T_r$  du réacteur, le volume  $V_r$  de matière contenu dans le réacteur et la concentration  $C_a$  du réactif. On aura donc :

$$\mathcal{X} = \{T_r, V_r, C_a\}$$

Quant aux variables externes, elles concernent les caractéristiques des utilités de chauffe et de refroidissement (débits volumétrique, température), mais également les débits de charge et de décharge de la matière au sein du réacteur. On aura donc :

$$\mathcal{U} = \{T_{hu}, F_{hu}, T_{cu}, F_{cu}, F_c, F_d\}$$

Avec :  $T_{hu}, F_{hu}$  la température et le débit volumétrique de l'utilité de chauffe,  $T_{cu}, F_{cu}$ , la température et le débit volumétrique de l'utilité de refroidissement et  $F_c, F_d$ , les débits volumétriques de charge et de décharge du réacteur.

La matrice de saut  $\mathcal{J}$  est une matrice  $\mathcal{L} \times \mathcal{L} \times \mathcal{X}$ . Lorsque la valeur de l'élément est égal à 1, il y a continuité des valeurs des différentes variables d'états lors du franchissement des transition. Dans le cas contraire où la valeur d'un élément est nulle, aucune transition ne relie les états correspondants. Pour chaque variable d'état  $\mathcal{X}$  de notre système, les matrices  $\mathcal{J}$  sont les suivantes :

$$\mathcal{J}_{T_r} = \begin{matrix} & \text{WT} & \text{CHAR} & \text{HEAT} & \text{REACT} & \text{COOL} & \text{DSCH} \\ \text{WT} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \text{CHAR} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \text{HEAT} & 0 & 0 & 0 & T_r \rightarrow T^f & 0 & 0 \\ \text{REACT} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \text{COOL} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_r \rightarrow T^i \\ \text{DSCH} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

$$\mathcal{J}_{V_r} = \begin{matrix} & \text{WT} & \text{CHAR} & \text{HEAT} & \text{REACT} & \text{COOL} & \text{DSCH} \\ \text{WT} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \text{CHAR} & 0 & 0 & V_r \rightarrow V^f & 0 & 0 & 0 \\ \text{HEAT} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \text{REACT} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \text{COOL} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \text{DSCH} & V_r \rightarrow V^i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

$$\mathcal{J}_{C_a} = \begin{array}{ccccccc} & WT & CHAR & HEAT & REACT & COOL & DSCH \\ \begin{matrix} WT \\ CHAR \\ HEAT \\ REACT \\ COOL \\ DSCH \end{matrix} & \left( \begin{array}{cccccc} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_a \rightarrow C_a^i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \end{array}$$

La matrice des conditions de garde,  $\mathcal{G}$ , est une matrice  $\mathcal{L} \times \mathcal{L}$  dont la structure est donnée ci-dessous :

$$\mathcal{G} = \begin{array}{ccccccc} & WT & CHAR & HEAT & REACT & COOL & DSCH \\ \begin{matrix} WT \\ CHAR \\ HEAT \\ REACT \\ COOL \\ DSCH \end{matrix} & \left( \begin{array}{cccccc} 0 & R=1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_r \geq V^f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_r \geq T^f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_a \leq C_a^f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_r \leq T^i \\ V_r \leq V^i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \end{array}$$

Avec :  $V_r$  le volume de matière dans le réacteur,  $T_r$ , la température au sein du réacteur et  $C_a$ , la concentration en réactif A. Les valeurs cibles correspondent à  $V^i, V^f, T^f, C_a^f$ , et représentent respectivement le volume initial (initialement égal à 0) du réacteur, le volume final correspondant à la taille de lot simulée, la température finale à laquelle la phase de chauffe devra s'interrompre et la concentration finale du réactif A pour laquelle la réaction s'arrête.

Nous constatons que toutes les conditions de garde sont dépendantes des variables d'état du système excepté celle reliant l'état de repos du réacteur avec l'état de charge du réacteur. Cette condition résulte de la trajectoire de superviseur que nous verrons plus loin, mais de manière générale,  $R=1$  représente le moment au bout duquel le lancement du réacteur est autorisé par le superviseur. C'est donc un événement temporel.

La représentation dans le formalisme des Statecharts du réacteur est alors donnée par la figure 4.3 sur laquelle on peut observer l'existence de cinq phases successives lors du lancement du réacteur. Notons que les conditions relatives à la disponibilité de l'appareil et à la disponibilité de la matière, autrement dit les conditions relatives à l'utilisation de la ressource dans le premier cas et les conditions relatives au plan d'ordonnancement (date de livraison de la matière au niveau du réacteur) ne sont pas représentés sur la figure 4.3. Ces décisions sont du niveau de la supervision (niveau supérieur) comme nous le verrons dans la section 4.3 et n'affecte donc pas la trajectoire au niveau du réacteur. Notons également que la représentation de la figure 4.3 correspond au lancement de chaque lot de fabrication sur un seul réacteur, de ce fait lorsque plusieurs réacteurs doivent être exécutés, il existera autant d'états identique à celui représenté.

Le paragraphe qui suit présentera les différentes équations différentielles associées à chaque phase du réacteur, autrement dit, le système  $\mathcal{A}$  du septuple  $\mathcal{M}$  précédent.

#### 4.2.1.2 Dynamique continue du réacteur

Lors de la phase de chargement ou de déchargement, la matière est transférée à débit fixe. La valeur de ce débit est donnée par la phase d'optimisation et reste donc inchangée durant la simulation d'un lot au niveau du réacteur. Le jeu d'équations différentielles associé à la phase de

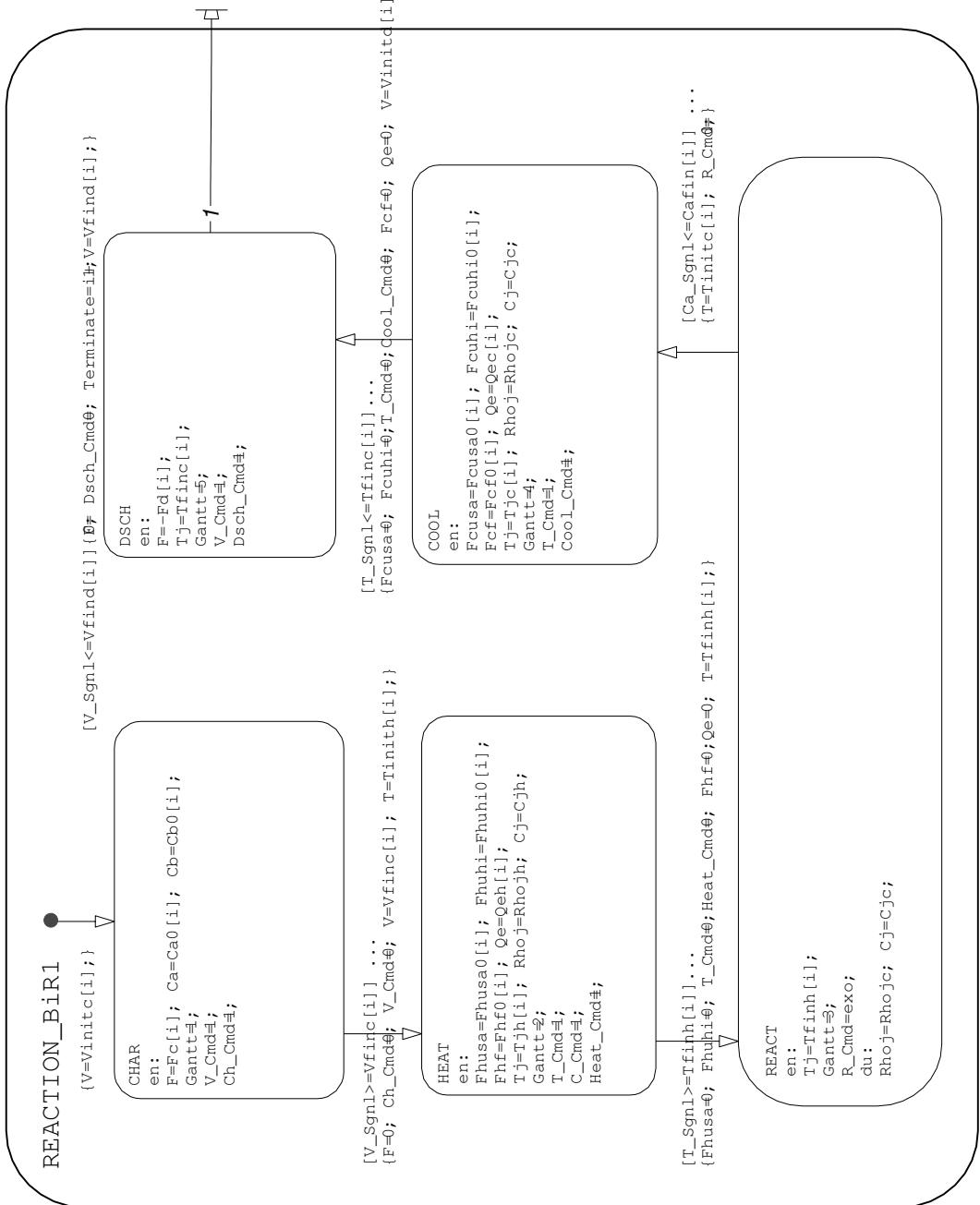


Figure 4.3 – Représentation Statechart des phases du réacteur

charge est celle donnée ci-dessous.

$$(\mathcal{A}_{CH}) \quad \begin{cases} \frac{dV_r}{dt} = F_c - F_d \\ \frac{dT_r}{dt} = 0 \\ \frac{dC_a}{dt} = 0 \\ \frac{dC_b}{dt} = 0 \end{cases}$$

Où  $F_c$  (resp.  $F_d$ ) représente le débit de charge (resp. décharge) en  $\frac{m^3}{h}$  du réacteur. Et où  $V_r$  représente le volume du réacteur. On remarque alors que ce volume augmente avec la charge et diminue avec la décharge. De plus, nous supposerons que lors des phases de charge, la réaction n'est pas initiée. La variation de la température  $T_r$  ainsi que de la concentration du réactif  $C_a$  et du produit  $C_b$  est donc nulle lors de ces phases.

Lors de la phase de chauffe (resp. refroidissement), le réacteur a recours aux utilités externes. Le système d'équations suivant représente alors la dynamique continue du réacteur en phase de chauffe (resp. refroidissement). On retrouve entre autre le bilan des composants A et B au cours du temps. Mais également la variation de la température de la double enveloppe et du réacteur nommés respectivement  $T_j$  et  $T_r$ .

$$(\mathcal{A}_{HEAT}) \quad \begin{cases} \frac{dV_r}{dt} = 0 \\ \frac{dC_a}{dt} = -2k(T_r)C_a^2 \\ \frac{dC_b}{dt} = k(T_r)C_a^2 \\ \frac{dT_j}{dt} = \frac{F_h(T_h - T_r)}{V_j} + \frac{F_c(T_c - T_r)}{V_j} + \frac{U_j A_j (T_r - T_j)}{V_j \rho_j C_j} \\ \frac{dT_r}{dt} = \frac{-\lambda k(T_r)C_a^2}{\rho_p C_p} - \frac{U_j A_j (T_r - T_j)}{V_r \rho_p C_p} + \frac{Q_e}{V_r \rho_p C_p} \\ k(T_r) = k_0 e^{-E/(R.T_r)} \end{cases}$$

On peut donc remarquer que ces variations sont dépendantes des débits volumétriques de chauffe et de refroidissement ( $F_h$  et  $F_c$ ) et des températures des utilités de chauffe et de refroidissement ( $T_h$  et  $T_c$ ). La variation de la température du réacteur dépend également des paramètres liés à l'appareil, à savoir l'aire d'échange  $A_j$ , le coefficient d'échange global  $U_j$  et le volume de la double enveloppe  $V_j$ . Du côté de la matière, l'évolution de la température du réacteur dépend de la densité du produit  $\rho_p$ , du volume  $V_r$  de matière contenue dans le réacteur et de la capacité calorifique  $C_p$  de la matière. L'évolution de la concentration des produits (vitesse de réaction) suit alors la loi d'Arrhénius dont l'expression générale est  $k(T_r) = k_0 \times e^{-E/(R.T_r)}$  avec  $k_0$ , le facteur pré-exponentiel,  $E$  l'énergie d'activation,  $R$  la constante des gaz parfaits et  $T_r$  la température au sein du réacteur. Lors d'une chauffe par consommation d'électricité, la quantité  $Q_e$  est responsable de l'élévation de température et représente la puissance électrique consommée par le réacteur.

La phase de conversion quant à elle s'effectue à une température constante donnée, cette température correspond à la température à la fin de la phase de chauffe, c'est à dire à  $T^f$ . Dans le cadre de cet exemple, nous distinguerons deux situations. Soit la réaction est adiabatique, soit la réaction est exothermique et une phase de régulation thermique devra alors être mise en œuvre pour maintenir la température constante et pour éviter l'emballement de la réaction.

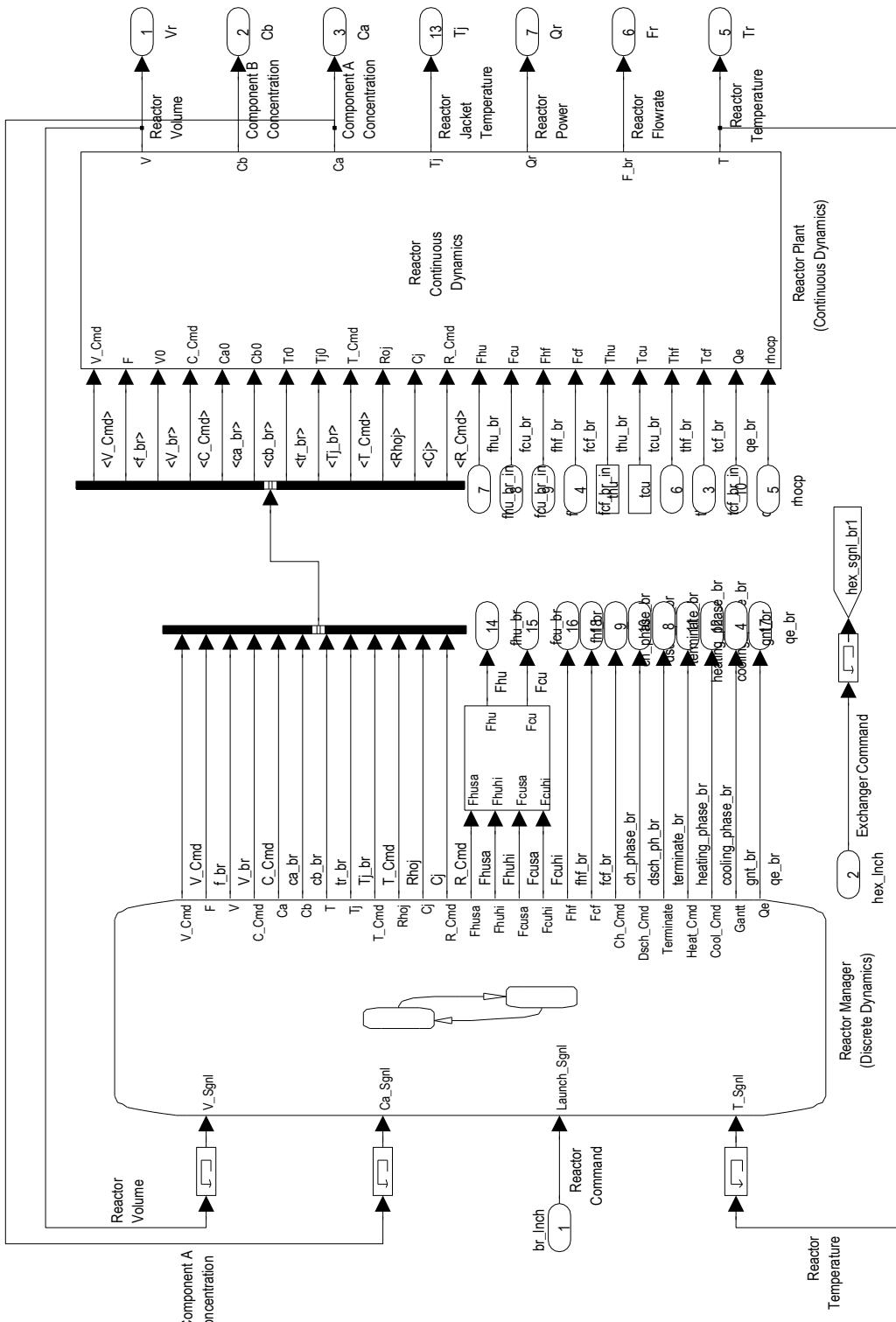


Figure 4.4 – Diagramme Stateflow-Simulink d'un réacteur

Dans le cas de la réaction adiabatique, le jeu d'équation décrivant la dynamique de la conversion est donnée par le système d'équations suivant :

$$(A_{REACT}) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_r}{dt} = 0; \\ \frac{dT_r}{dt} = 0; \\ \frac{dC_a}{dt} = -k(T_r)C_a^2; \\ \frac{dC_b}{dt} = k(T_r)C_b^2; \end{array} \right.$$

Dans le cas de la réaction exothermique, la variation de la température du réacteur devra être nulle. Autrement dit, les utilités froides devront compenser les dégagements de chaleur lors de la phase de conversion. Cela se fera alors en mesurant instantanément la température du réacteur et en fournissant à l'appareil de l'eau glacée. Cependant, dans nos travaux, nous étudierons uniquement le cas d'une réaction adiabatique<sup>1</sup>.

La représentation de la coopération entre la dynamique discrète et la dynamique continue au niveau du réacteur est alors donnée par la figure 4.4. On remarque donc que le pilotage de la dynamique continue du réacteur est réalisée par le bloc Stateflow qui s'occupe de la gestion du lancement des phases et des lots de fabrication associés au réacteur discontinu. Le bloc représentant la dynamique continue du réacteur englobe les modèles Simulink des différents systèmes d'équations présentés plus haut. Les détails relatifs à l'implémentation de ces équations différentielles dans Simulink sont donnés en annexe.

## 4.2.2 Modélisation des cuves de stockage

La modélisation des cuves de stockage comprend la modélisation du :

- stockage de matière première qui est consommée par les réacteurs de l'atelier de fabrication. Ces cuves sont uniquement le siège de consommations de matières ;
- stockage de produit fini. Relativement au schéma de la figure 4.1, le stockage des produits de la réaction correspond à la cuve en aval de l'étage des réacteur et est, uniquement, le siège de productions de matières.

Nous définirons dans ce qui suit, les modèles de simulations correspondant à ces dispositifs. Nous décomposerons, tout comme dans la section précédente, le modèle de la dynamique discrète du modèle de la dynamique continue.

### 4.2.2.1 Dynamique discrète de la cuve

Les différents états associés à la dynamique discrète des cuves de matière premières (ou de produits finis) sont :

- l'état de stockage que nous nommerons « STORE » ;
  - l'état de décharge que nous nommerons « DISCHARGE » dans le cas des cuves de matière première et « CHARGE » dans le cas des cuves de produit fini. Cet état est subdivisé en sous états représentant les situations possibles de charge ou de décharge ;
  - un état, terminal, représentant l'existence d'une anomalie au niveau du stockage. Cet état sera nommé « CAP » et représentera la situation où la cuve de matière première est vide.
- Dans le cas de la cuve de produit fini, l'état en question est activé si la cuve est pleine.

La représentation dans le formalisme des Statecharts de la cuve de stockage de matière première est donc donnée par la figure 4.5. On pourra remarquer que l'état de stockage correspond à un

1. Le cas d'une réaction exothermique fait, actuellement, l'objet d'une publication

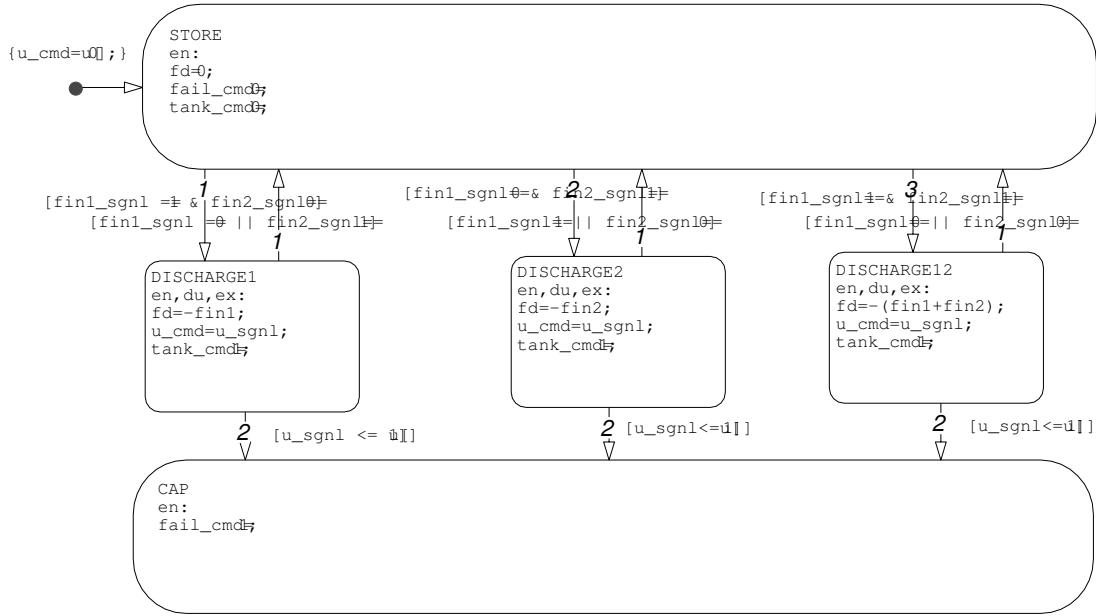


Figure 4.5 – Représentation Stateflow d'une cuve de matière première

état où aucune décharge/charge n'est enregistrée au niveau du réacteur, notons qu'une charge du réacteur correspond à une décharge de la cuve et vice versa. La transition allant de l'état de stockage vers l'état de décharge de la cuve est alors validée lorsqu'un signal de charge transmis par le réacteur, est reçu par le modèle Stateflow de la cuve de matière première. Lorsque ce signal s'annule, l'automate retourne instantanément à l'état de stockage. D'un autre côté, lorsque l'évolution des variables d'états, en l'occurrence la rétention de la cuve modélisée par la variable  $U_c$ , amène le modèle vers un état indésirable correspondant ici à l'état « CAP », l'automate déclenche une anomalie qui stoppe la simulation. Autrement dit, cet état « CAP » correspond à un état terminal permettant de diagnostiquer le fonctionnement du stockage.

Au niveau de la cuve de stockage de matière première on aura donc le système d'équations suivant :

$$\mathcal{L} = \{\text{STORE, DISCHARGE, CAP}\}$$

$$\mathcal{X} = \{U_c\}$$

$$\mathcal{U} = \{F_d\}$$

$$\mathcal{J} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{G} = \begin{bmatrix} 0 & d_{sg} & 0 \\ -d_{sg} & 0 & u_{sg} \leq u_{min} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Les entités  $d_{sg}$  de la matrice G représentent les signaux provenant des réacteurs et stipulent le besoin de décharge de la cuve de matière première, autrement dit la charge du réacteur. Les signaux  $u_{sg}$  correspondent quant à eux, à l'état instantané de la rétention au niveau de la cuve, ces valeurs sont transmises par le bloc Simulink, représentant la dynamique continue, au bloc Stateflow représentant la dynamique discrète de la cuve de stockage.

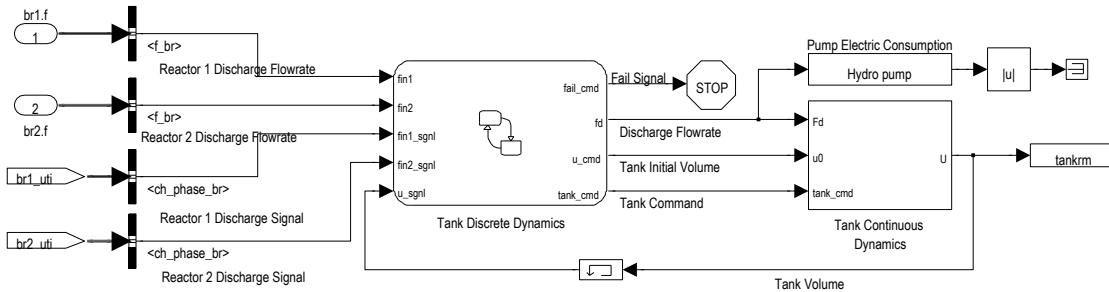


Figure 4.6 – Diagramme Stateflow-Simulink d'une cuve de stockage

#### 4.2.2.2 Dynamique continue de la cuve

La dynamique continue d'une cuve de stockage correspond à l'évolution de la rétention (volume) de matière au sein du réservoir. Cette situation est modélisée par l'équation différentielle suivante :

$$(\mathcal{A}_{cuve}) \quad \frac{dU_c}{dt} = F_c - F_d$$

La quantité  $F_d$  (resp.  $F_c$ ) est exprimée en  $[m^3/h]$  et la rétention  $U_c$  s'exprime en  $[m^3]$ . La représentation de la communication entre la dynamique continue et discrète du réservoir de stockage est alors donnée par la figure 4.6. On pourra observer sur cette figure que les signaux de décharge (ou de charge) proviennent des réacteurs discontinus. En effet, ce sont les réacteurs qui définissent, conformément à l'évolution des variables d'états associés à chaque réacteur, à quel moment les phases de charge et de décharge doivent se produire. Mais également à quel débit les charges ou décharges devront se faire. Dans ce dernier cas, ces valeurs résultent directement du plan d'ordonnancement fourni par la phase d'optimisation. On pourra donc considérer les cuves de stockage comme des appareils « esclaves » réagissant aux sollicitations des réacteurs. Nous pouvons également remarquer sur la figure 4.6 qu'une mesure de la consommation en électricité est estimée en fonction du débit des pompes, cette estimation se fait par le biais du bloc « Hydro Pump » de la même figure, ces consommations seront ensuite regroupées et envoyées pour être satisfaites au niveau de la centrale de cogénération.

#### 4.2.3 Modélisation de l'échangeur de chaleur

L'échangeur de chaleur est considéré dans ces travaux pour récupérer l'énergie dégagée par un réacteur afin d'être utilisée par un autre réacteur. L'échangeur de chaleur est essentiellement une opération continue, il ne nécessite à priori aucune dynamique discrète dans son fonctionnement. Cependant, afin de s'assurer que la récupération directe d'énergie se fasse de manière correcte entre les phases des deux réacteurs considérés, nous établirons un gestionnaire pour le fonctionnement de l'échangeur de chaleur.

##### 4.2.3.1 Dynamique discrète de l'échangeur

La dynamique discrète de l'échangeur de chaleur gère donc les moments auxquels un échange thermique pourra se faire entre les deux réacteurs. Ce superviseur, local à l'appareil, s'assurera également du respect de la différence de température minimale entre le flux chaud (phase de refroidissement du premier réacteur) et le flux froid (phase de chauffe du second réacteur). La structure générale du superviseur est alors donnée par la figure 4.7. L'échangeur de chaleur dispose alors de quatre états de fonctionnement, à savoir :

- un état de fonctionnement normal, nommé « on » ;
- un état de non-fonctionnement, nommé « off » ;
- un état de remise à zéro, nommé « reset » pour la gestion des échanges multiples entre le même couple de flux ;
- un état indésirable, nommé « dtlim », activé lors de la violation de la contrainte sur la différence de température minimale entre les flux en échange ;

On pourra alors définir le système suivant pour le cas de l'échangeur de chaleur :

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= \{\text{on}, \text{off}, \text{reset}, \text{dtlim}\} \\ \mathcal{X} &= \{T_{hf}^o, T_{cf}^o\} \\ \mathcal{U} &= \{F_{hf}, F_{cf}, T_{hf}^i, T_{cf}^i\} \\ \mathcal{J} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathcal{G} &= \begin{bmatrix} 0 & \neg h_{sg} \oplus \neg c_{sg} & 0 & th_{sg} - tc_{sg} < \Delta T_{min} \\ h_{sg} \otimes c_{sg} & 0 & \neg h_{sg} \oplus \neg c_{sg} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & h_{sg} \otimes c_{sg} & 0 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

On remarquera alors que pour le cas de l'échangeur de chaleur, les variables d'état correspondent aux températures de sortie des fluides chauds et froids. Les variables externes du modèle sont les débits des fluides ainsi que leurs températures d'entrée. Le modèle de l'échangeur devra alors déterminer les températures de sortie de chaque fluide conformément aux paramètres de l'échangeur de chaleur ainsi que conformément aux caractéristiques des fluides en échange. Les entités  $h_{sg}$  (reps.  $c_{sg}$ ) au niveau de la matrice  $\mathcal{G}$ , représentent les signaux provenant des réacteurs stipulant que ce dernier est en phase de chauffe (resp. en phase de refroidissement). Les signaux  $th_{sg}$  et  $tc_{sg}$  quant à eux, représentent respectivement la valeur de la température du fluide chaud et la température du fluide froid transmis par le bloc Simulink vers le bloc Stateflow de l'échangeur de chaleur.

#### 4.2.3.2 Dynamique continue de l'échangeur

La dynamique continue de l'échangeur de chaleur est régie par le jeu d'équations différentielles suivant :

$$(A_{HEX}) \quad \begin{cases} \frac{dT_h^o}{dt} = \frac{F_h(T_h^i - T_h^o)}{V_h} - \frac{U_h A (T_h^o - T_w)}{V_h \rho_h C p_h}; \\ \frac{dT_c^o}{dt} = \frac{F_c(T_c^i - T_c^o)}{V_c} + \frac{U_c A (T_w - T_c^o)}{V_c \rho_c C p_c}; \\ \frac{dT_w}{dt} = \frac{U_h A (T_h^o - T_w)}{V_w \rho_w C p_w} + \frac{U_c A (T_w - T_c^o)}{V_w \rho_w C p_w}; \end{cases}$$

Où  $F_h$  et  $F_c$  représentent respectivement les débit volumétriques des flux chauds et froids entrant dans l'échangeur.  $T_h^i$  et  $T_c^i$  les températures d'entrée des fluides chauds et froids,  $U_h$  et  $U_c$  les coefficients de transfert global et  $V_i$ ,  $\rho_i$  et  $Cp_i$  représentent respectivement le volume de chaque côté « i » de l'échangeur, la densité et la capacité calorifique des fluides et du mur de séparation. Notons que ces équations correspondent à une cellule de l'échangeur de chaleur. Ces équations ont été proposées par VARBANOV, KLEMES et FRIEDLER [149] pour modéliser la dynamique des échangeurs de chaleur en découplant l'échangeur en différentes cellules. Ainsi, si quatre cellules doivent être créées, le jeu d'équation précédent est répété quatre fois en veillant à ce que la

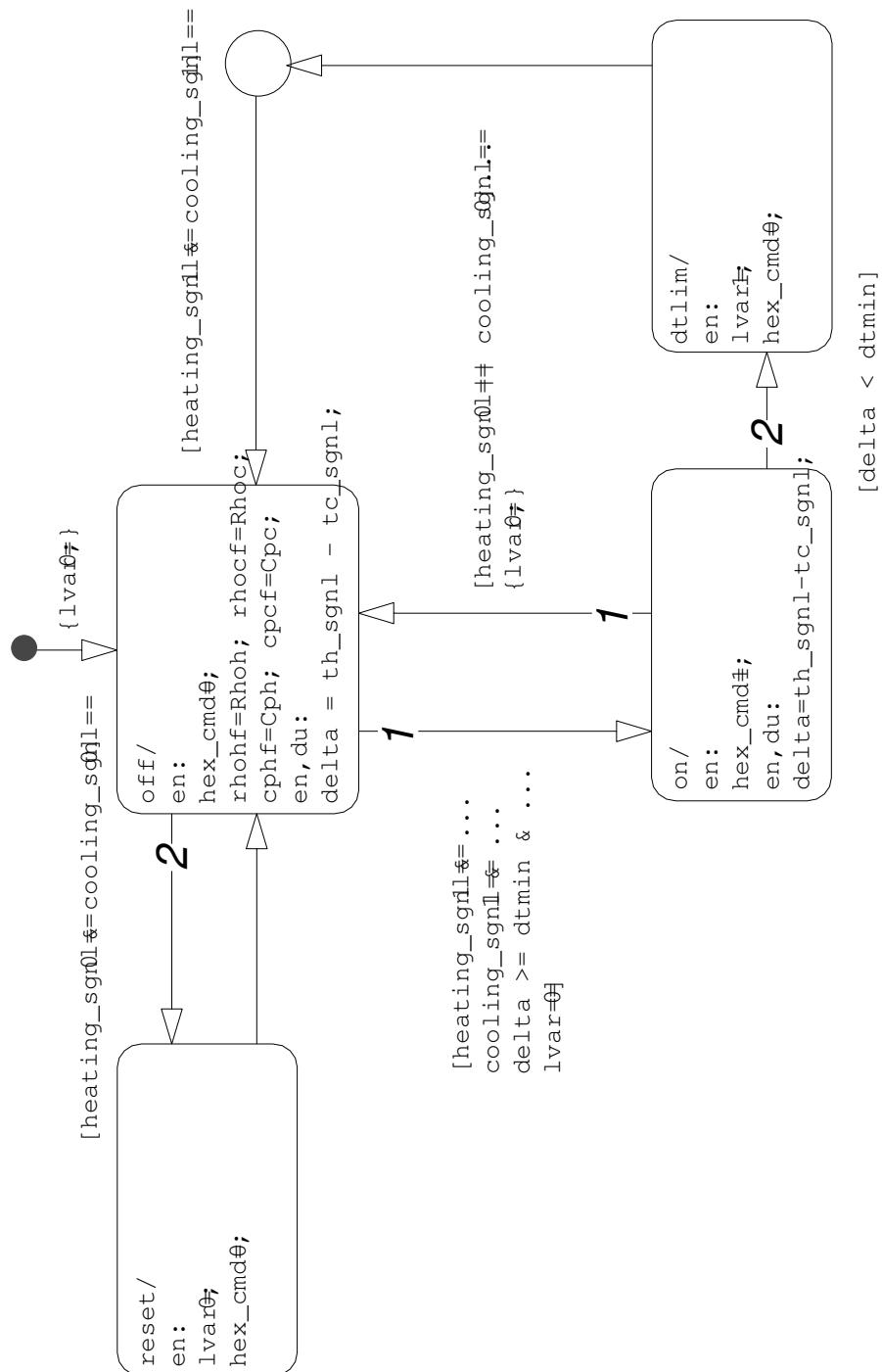


Figure 4.7 – Dynamique discrète de l'échangeur de chaleur

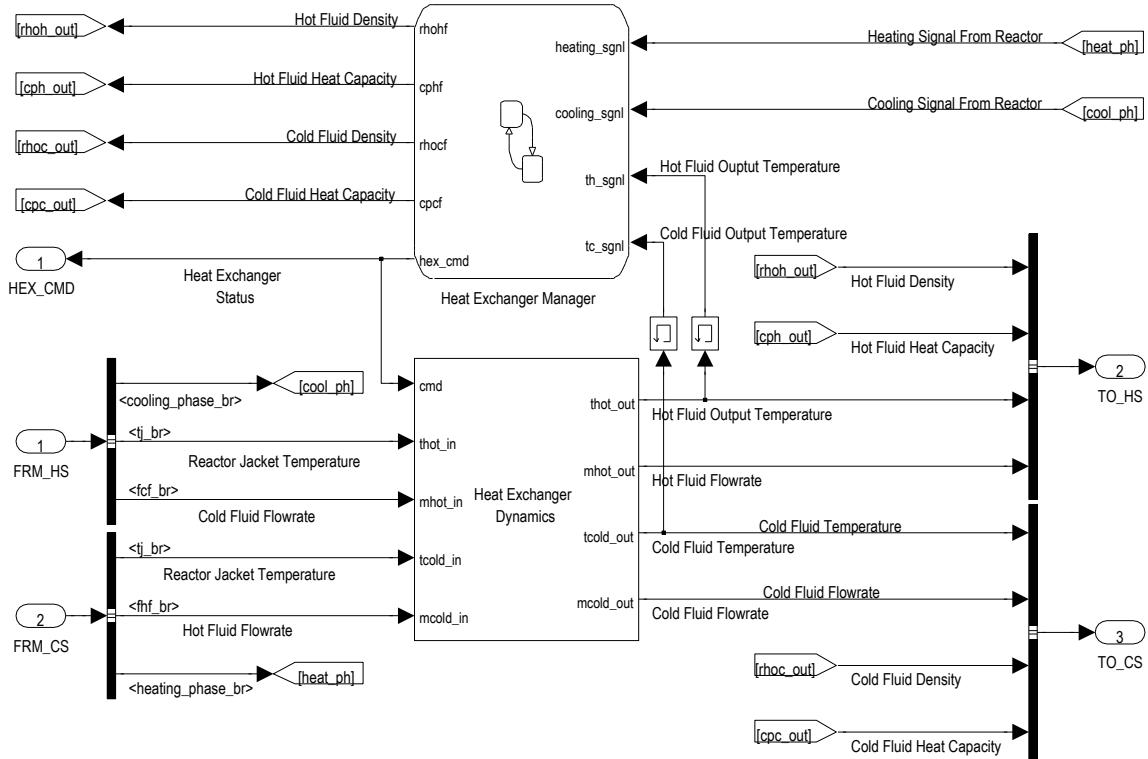


Figure 4.8 – Diagramme Stateflow-Simulink d'un échangeur de chaleur

longueur de chaque cellule soit définie convenablement, de telle sorte que la longueur totale de l'échangeur soit respectée.

La coopération entre Simulink et Stateflow pour la modélisation d'un échangeur de chaleur ainsi que de son superviseur est donnée par figure 4.8. Les détails relatifs à l'implémentation des équations différentielles dans Simulink sont donnés en annexe.

#### 4.2.4 Modélisation du système de stockage thermique

La modélisation du système de stockage thermique est proche de la modélisation d'un échangeur de chaleur et d'un stockage. De ce fait, même si le comportement du dispositif de stockage thermique est majoritairement régi par un fonctionnement continu. Nous introduirons un comportement discret au modèle afin de répondre aux transitions d'états des réacteurs. Lors du fonctionnement du système de stockage, deux approches de modélisation peuvent se présenter, à savoir :

- Une modélisation dans laquelle les cuves de stockage sont parfaitement isolées, dans cette situation les pertes d'énergies sont négligeables ;
- Un modélisation plus réaliste, dans laquelle les pertes sont prises en compte.

Nous modéliserons le premier cas de figure dans ce chapitre. Le schéma de la topologie de l'échange thermique avec stockage est alors donné par la figure 4.9

##### 4.2.4.1 Dynamique discrète du dispositif de stockage thermique

La modélisation de la dynamique discrète du stockage de chaleur se fera sur la base d'une seule cuve, en l'occurrence la cuve chaude. Le cas de la cuve froide sera exactement identique

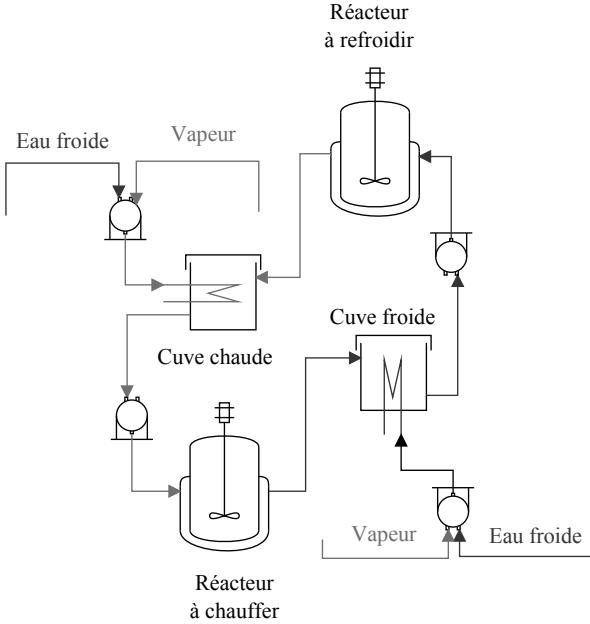


Figure 4.9 – Schéma de réalisation d'un échange indirect de chaleur

à ce dernier. Le modèle représentant la dynamique discrète du stockage thermique est alors composé des modes de fonctionnement suivants :

- un mode de charge où de la matière est introduite dans la cuve. Nous nommerons cette phase « CHARGE » ;
- un mode de décharge où de la matière est extraite de la cuve. Nous nommerons cette phase « DISCHARGE » ;
- une phase mixte comprenant une charge et une décharge que nous nommerons « CHDSCH » ;
- une phase de stockage où aucun mouvement de stock n'est enregistré. Nous la nommerons « STORE » ;
- un état indésirable « FULL » associé à la situation où la cuve est pleine ;
- un état indésirable « EMPTY » associé à la situation où la cuve de stockage est vide ;
- un état « OFF » pendant lequel la température de la cuve est comprise dans sa zone de fonctionnement normal ;
- un état « HEAT » correspondant à la chauffe de la cuve ;
- un état « COOL » correspondant au refroidissement de la cuve.

Le modèle définissant la dynamique discrète de la cuve chaude est donc la suivante :

$$\mathcal{L} = \{\text{CHARGE}, \text{DISCHARGE}, \text{CHDSCH}, \text{STORE}, \text{FULL}, \text{EMPTY}, \text{OFF}, \text{HEAT}, \text{COOL}\}$$

$$\mathcal{X} = \{V, T, F_{hu}, F_{cu}\}$$

$$\mathcal{U} = \{F\}$$

On remarque alors que les variables d'état au niveau du dispositif de stockage correspondent aux valeurs de la température de la cuve  $T$  mais également au volume de matière  $V$  en rétention dans la cuve. Les variables externes correspondent quant à eux au débit de charge et/ou de décharge  $F$  de la cuve. Sur la figure 4.9 nous pouvons observer que les deux cuves sont également le siège de consommations en utilités (vapeur ou eau). Les débits  $F_{hu}$  et  $F_{cu}$  de ces utilités sont

des variables d'états supplémentaires du système.

$$\mathcal{J} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La matrice de saut  $\mathcal{J}$  reste quant à elle une matrice bivalente, nous considérons donc que lorsqu'une transition existe entre deux états, l'évolution des variables d'état à l'entrée de l'état de destination est la valeur de la variable lors de la sortie de l'état source. La matrice des conditions de garde,  $\mathcal{G}$ , au niveau des transitions est donnée ci-dessous.

$$\mathcal{G} = [G_1, G_2]$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \neg c_{sg} \oplus d_{sg} & u_{sg} \geq C \\ 0 & 0 & 0 & c_{sg} \oplus \neg d_{sg} & u_{sg} \geq C \\ 0 & 0 & 0 & \neg c_{sg} \oplus \neg d_{sg} & u_{sg} \geq C \\ c_{sg} \otimes \neg d_{sg} & \neg c_{sg} \otimes d_{sg} & c_{sg} \otimes d_{sg} & 0 & u_{sg} \geq C \\ 0 & 0 & 0 & d_{sg} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{sg} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} u_{sg} \leq m_u & 0 & 0 & 0 \\ u_{sg} \leq v_0 & 0 & 0 & 0 \\ u_{sg} \leq v_0 & 0 & 0 & 0 \\ u_{sg} \leq v_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_{sg} < T \otimes \neg c_{sg} & t_{sg} > T \otimes \neg c_{sg} \\ 0 & t_{sg} \geq T & 0 & 0 \\ 0 & t_{sg} \geq T & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Où les expressions indéxées par  $sg$  représentent les signaux reçus par le superviseur en provenance de la dynamique continue du stockage ou provenant des instructions au niveau des réacteurs stipulant ou non le besoin d'une chauffe ou d'un refroidissement. Ainsi donc les signaux  $d_{sg}$  correspondent à des consignes venant des réacteurs stipulant qu'une décharge de la cuve de stockage devra être effectuée. Les signaux  $c_{sg}$  quant à eux correspondent aux signaux de charge de la cuve. De manière générale, la charge de la cuve chaude résulte de la décharge de la cuve froide. La charge au niveau de la cuve chaude correspond donc au fait que le réacteur devant être refroidi est en phase de refroidissement. La valeur  $T$  de la matrice  $G$  représente la température opératoire de la cuve, cette température peut être une valeur fixe ou alors peut varier entre deux extrêmaux. Quant aux paramètres  $C$  et  $v_0$ , elles représentent respectivement la capacité maximale de la cuve et le stock de sécurité (si celle-ci existe). La représentation de la figure 4.10 montre le super-état modélisant la gestion de la matière au niveau du stockage. Le super-état relatif au bilan énergétique (figure 4.11) gère les transitions entre les moments où la cuve doit être chauffée par les utilités et celles où elle doit être refroidie. Ces deux super-états représentent respectivement les phases relatives au traitement de la matière et des utilités au niveau du modèle. Ces deux états devront donc être activés simultanément lors de la simulation, d'où la concurrence entre les deux super-états. Les équations associées à ces fonctionnements sont présentés dans le paragraphe qui suit.

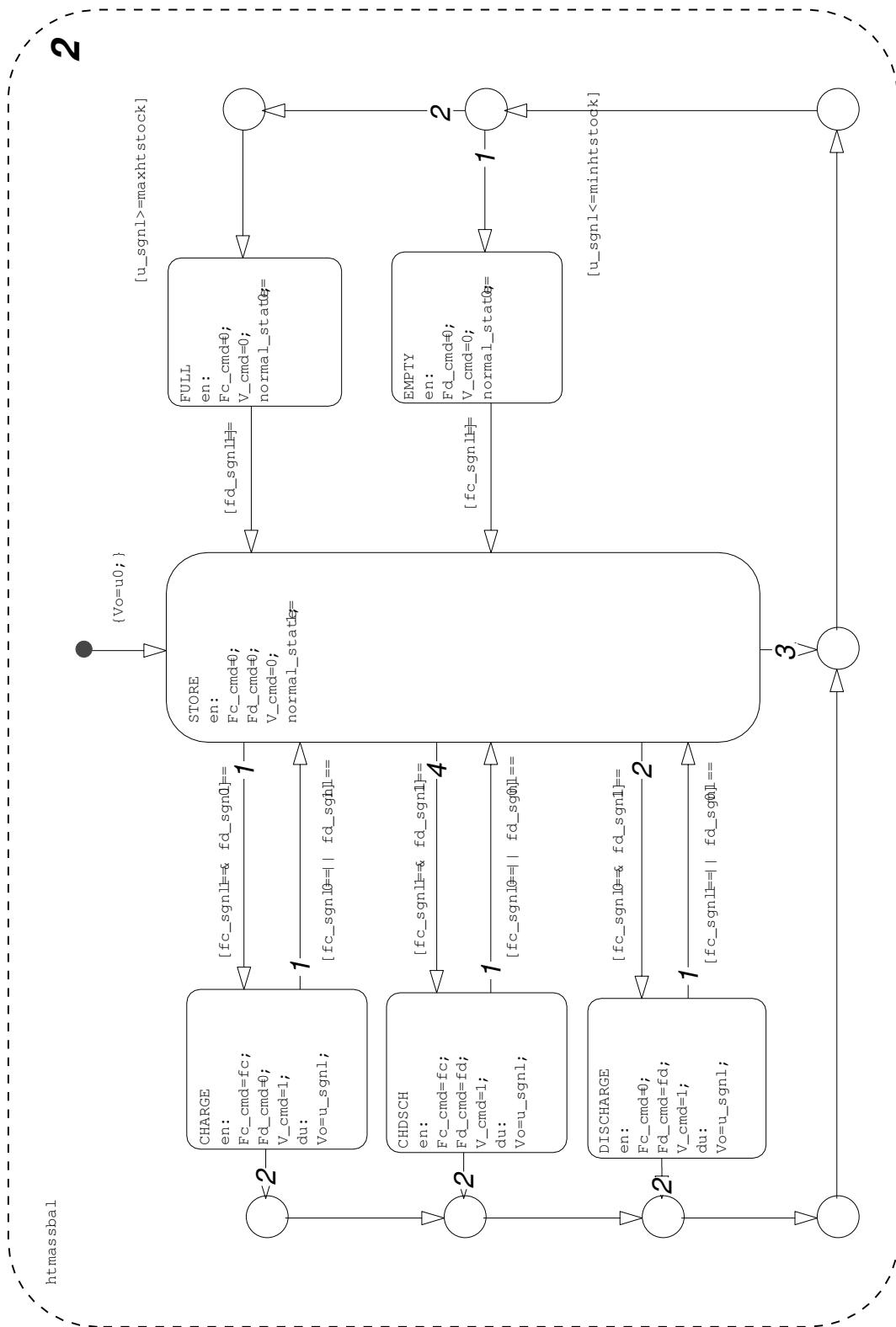


Figure 4.10 – Dynamique discrète du stockage thermique

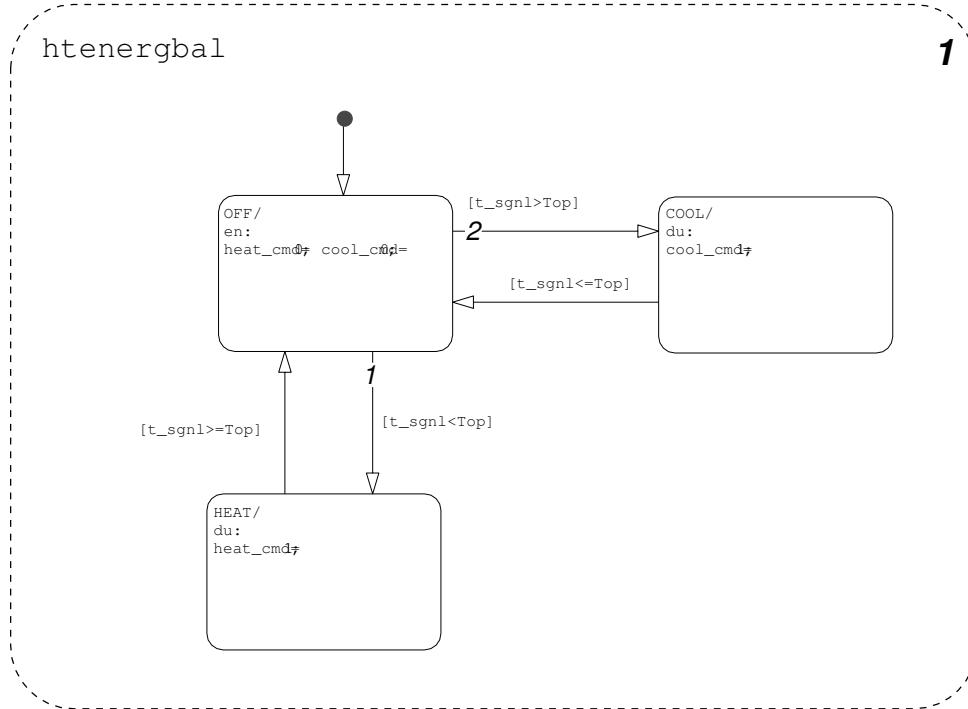


Figure 4.11 – Dynamique discrète du stockage thermique (suite)

#### 4.2.4.2 Dynamique continue du dispositif de stockage thermique

Au niveau de la dynamique continue du stockage de chaleur, nous retrouvons les équations standards pour la gestion du bilan massique et du bilan énergétique. En effet, on retrouve ici la situation d'un stockage de matière mais également celle de la chauffe (ou du refroidissement) d'une cuve de matière, fermée. La chauffe (resp. le refroidissement) en question se fait alors à travers la double enveloppe ou à travers un serpentin baignant dans le liquide. Dans les deux cas de figure, la surface d'échange est proportionnelle à la quantité de matière stockée dans la cuve. Les équations modélisant le comportement de la cuve chaude sont alors les suivantes :

$$(A_{TES}) \quad \begin{cases} \frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out} \\ \frac{dT}{dt} = \alpha \times \frac{F_{in}(T_{in} - T)}{V} - \frac{UA(T - T_j)}{V\rho Cp} - \frac{UA(T - T_{amb})}{V\rho Cp} \\ \frac{dT_j}{dt} = \frac{F_{hu}(T_{hu} - T_j)}{V_j} + \frac{F_{cu}(T_{cu} - T_j)}{V_j} + \frac{UA(T - T_j)}{V_j\rho_j Cp_j} \end{cases}$$

Avec :

- $V$  le volume de matière contenu dans la cuve ;
- $T$  la température de la cuve ;
- $T_j$  la température de la double enveloppe ;
- $F_{in}$  le débit volumétrique de charge ;
- $F_{out}$  le débit volumétrique de décharge ;
- $\alpha$  un coefficient traduisant l'altération de la température de la cuve ;
- $T_{in}$  la température du fluide entrant dans la cuve de stockage ;
- $U$  le coefficient global d'échange ;
- $A$  l'aire d'échange thermique ;
- $T_{amb}$  la température ambiante ;

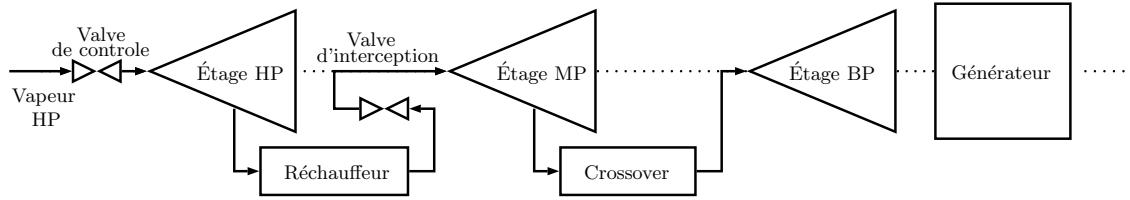


Figure 4.12 – Diagramme fonctionnel d'une turbine à vapeur

- $\rho$  la densité du liquide stocké ;
- $C_p$  la capacité calorifique du fluide ;
- $F_{hu}$ ,  $F_{cu}$  respectivement le débit de l'utilité de chauffe et de refroidissement ;
- $T_{hu}$ ,  $T_{cu}$  respectivement la température de l'utilité de chauffe et de refroidissement ;
- $V_j$  le volume de la double enveloppe ou du serpentin ;
- $\rho_j$  la densité de l'utilité traversant la double enveloppe ;
- $C_{pj}$  la capacité calorifique du fluide traversant la double enveloppe.

Ainsi donc, l'évolution de la rétention en [ $m^3$ ] dans le réacteur dépend des débits volumétrique de charge et de décharge de la cuve. L'évolution de la température  $T$  de la matière dépend d'une part de l'apport de matière dans la cuve, et d'autre part, des utilités ou des pertes. L'évolution de la température  $T_j$  de la double enveloppe quant à lui dépend du débit et des températures des utilités mais également des caractéristiques physiques de l'utilité et de la double enveloppe. La coopération entre Simulink et Stateflow pour représenter la cuve de stockage est alors donnée en détail en annexe.

#### 4.2.5 Modélisation de la chaudière à vapeur

La chaudière est un appareil servant à transformer de l'eau en vapeur. Afin de produire la quantité d'énergie nécessaire pour effectuer le changement de phase, la chaudière brûle une certaine quantité de carburants ou utilise de l'électricité. Nous nous limiterons ici, au cas des chaudières mono-combustible. La chaudière est une opération essentiellement continue, elle ne nécessite donc pas la définition d'une dynamique discrète. Dans le cadre de nos travaux, nous présentons la dynamique continue de la chaudière à travers le jeu d'équations différentielles ci-dessous. Ces équations sont présentées dans ASTROM et BELL [13] et sont établies sur la base de bilans massiques et énergétiques globaux. De ce fait, elles ne considèrent pas les différentes étapes de l'opération de génération de vapeur mais adoptent une vision d'ensemble des phénomènes retrouvés lors de la transformation de l'eau en vapeur à haute pression.

$$\begin{cases} e_{11} \frac{dV_{st}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = \dot{m}_{fw} - \dot{m}_s \\ e_{21} \frac{dV_{st}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + \dot{m}_{fw} h_{fw} - \dot{m}_s h_s \\ V_t = V_{st} + V_{wt} = C^{te} \end{cases}$$

Où :

- $V_t$  est le volume total du réservoir ;
- $V_{st}$  est le volume total de vapeur dans le réservoir ;
- $V_{wt}$  est le volume total d'eau dans le réservoir ;
- $p$  la pression dans le réservoir ;
- $\dot{m}_{fw}$  le débit massique d'eau consommé par la chaudière ;
- $\dot{m}_s$  le débit massique de vapeur produit par la chaudière ;
- $h_{fw}$  l'enthalpie spécifique de l'eau à l'entrée de la chaudière ;
- $h_s$  l'enthalpie spécifique de la vapeur saturée.

- $Q$  la puissance fournie par la carburant ;

Les coefficients  $e_{ij}$  s'obtiennent aisément à travers les tables de vapeur et la modélisation détaillée de la chaudière peut être retrouvée dans [104]. Selon ASTROM et BELL [13], ce modèle capture assez bien le comportement global de la chaudière à vapeur. Et il permet de décrire précisément, la réponse en pression du réservoir en fonction des perturbations au niveau de la puissance fournie par le carburant, en fonction de la température et du débit de l'eau et en fonction du débit de vapeur. En réarrangeant le jeu d'équation précédent, nous obtenons le système d'équation différentielle suivant :

$$(A_{boiler}) \quad \begin{cases} \frac{dV_{st}}{dt} = \frac{1}{(e_{11}e_{22} - e_{21}e_{12})}[-e_{12}Q + (e_{22} - e_{12}h_{fw})\dot{m}_{fw} - (e_{22} - e_{12}h_s)\dot{m}_{st}] \\ \frac{dT_{st}}{dt} = \frac{1}{(e_{12}e_{21} - e_{11}e_{22})}[-e_{11}Q + (e_{21} - e_{11}h_{fw})\dot{m}_{fw} - (e_{21} - e_{11}h_s)\dot{m}_{st}] \\ e_{11} = \rho_w - \rho_s \\ e_{12} = V_{st}\frac{\partial \rho_s}{\partial p} + V_{wt}\frac{\partial \rho_w}{\partial p} \\ e_{21} = \rho_w h_w - \rho_s h_s \\ e_{22} = V_{st}[h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p}] + V_{wt}[h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p}] - V_t + m_t C_p \frac{\partial t_m}{\partial p} \end{cases}$$

Avec :

- $\rho_w$  la densité spécifique de l'eau dans le réservoir ;
- $\rho_s$  la densité spécifique de la vapeur ;
- $T_{st}$  la température de la vapeur ;
- $h_w$  l'enthalpie spécifique de l'eau à la température du réservoir ;
- $m_t$  la masse totale du métal et des tubes composant le réservoir ;
- $C_p$  la chaleur spécifique du métal ;
- $t_m$  la température du métal.

De plus nous assumerons, afin de simplifier la simulation, que la variation du volume de vapeur dans le réservoir est négligeable. Le débit de vapeur devient alors une perturbation externe du modèle et la variable manipulée correspond au débit de carburant consommé par la chaudière. Le contrôle au niveau de la chaudière consiste alors à faire en sorte que la pression de sortie soit constante conformément à une consigne donnée correspondant à la pression opératoire de la chaudière. A pression constante, le contrôle du débit de vapeur en direction de l'atelier se fait alors en modifiant l'ouverture de la vanne de détente à la sortie de la chaudière.

#### 4.2.6 Modélisation de l'ensemble turbine-alternateur

Le groupe turbo-alternateur est destiné à convertir l'énergie apportée par la vapeur en électricité. Pour ce faire, la turbine à vapeur transforme l'énergie cinétique de la vapeur en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est ensuite transférée à la génératrice synchrone qui assure la production de puissance électrique. Dans le cadre de nos travaux, nous utilisons une turbine à vapeur à trois étages (une étage par niveau de pression). La modélisation de la turbine se fait à l'aide d'une série de fonctions de transfert. Ce modèle de turbine fait référence au modèle IEEG1 présenté dans [130] auquel quelques simplifications ont été apportées. La représentation schématique de la turbine à vapeur est alors donnée par la figure 4.12.

A travers le modèle IEEG1, on peut constater que la contribution de chaque niveau de pression à la fourniture de la puissance mécanique est représentée par les gains  $F_x$  où  $x$  correspond à un niveau de pression donné. La valeur de la puissance mécanique fournie par la turbine se fait alors en unité relative (p.u.), de ce fait, ces gains prennent leur valeur entre 0 et 1. De plus, des constantes de temps sont définies pour chaque étage de la turbine, ces constantes représentent

le fonctionnement en régime transitoire de chaque étage et représente la durée au bout duquel le régime permanent est atteint par l'étage considéré. Les valeurs standard de ces constantes peuvent alors être retrouvées dans [130], nous utiliserons des valeurs comprises dans ces grandeurs dans la suite de l'ouvrage. Les entrées de la turbine correspondent alors à la pression de sortie de la chaudière, ainsi qu'à la commande d'ouverture de la vanne de contrôle. Dans notre cas, la relation entre la position de la vanne de contrôle et la surface d'ouverture est linéaire, autrement dit, la pente de la droite définit le rapport entre la position d'ouverture de la vanne et le débit de vapeur transféré.

Concernant la génératrice, notre étude s'est portée sur la représentation d'une génératrice synchrone (alternateur). Les équations, temporelles, de tension de la machine synchrone font appel à un système d'équations différentielles dont la structure générale est la suivante :

$$\begin{cases} u_a = R_s i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ u_b = R_s i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ u_c = R_s i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \\ 0 = R_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \\ u_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \\ 0 = R_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} \end{cases}$$

Avec  $u_a, u_b, u_c$  (resp.  $i_a, i_b, i_c$ ), les tensions (resp. courants) induites au niveau de l'enroulement statorique,  $u_f$  la tension d'excitation, et  $i_D, i_Q$ , les courants au niveau des enroulements amortisseurs (direct et transversal). Les équations magnétiques quant à elles, s'expriment en fonction des inductances propres et mutuelles de la manière suivante :

$$\begin{cases} [\psi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [L_{sr}][iDfQ] \\ [\psi_{DfQ}] = [L_{sr}]_t[i_{abc}] + [L_r][iDfQ] \end{cases}$$

Avec :

$$\begin{aligned} [L_s] &= \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta) & L_{ab}(\theta) & L_{ac}(\theta) \\ L_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & L_{bc}(\theta) \\ L_{ca}(\theta) & L_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) \end{bmatrix} & [L_{sr}] &= \begin{bmatrix} L_{aD}(\theta) & L_{af}(\theta) & L_{aQ}(\theta) \\ L_{bD}(\theta) & L_{bf}(\theta) & L_{bQ}(\theta) \\ L_{cD}(\theta) & L_{cf}(\theta) & L_{cQ}(\theta) \end{bmatrix} \\ [L_{sr}]_t &= \begin{bmatrix} L_{Da}(\theta) & L_{Db}(\theta) & L_{Dc}(\theta) \\ L_{fa}(\theta) & L_{fb}(\theta) & L_{fc}(\theta) \\ L_{Qa}(\theta) & L_{Qb}(\theta) & L_{Qc}(\theta) \end{bmatrix} & [L_r] &= \begin{bmatrix} L_{DD}(\theta) & L_{Df}(\theta) & L_{DQ}(\theta) \\ L_{fD}(\theta) & L_{ff}(\theta) & L_{fQ}(\theta) \\ L_{QD}(\theta) & L_{Qf}(\theta) & L_{QQ}(\theta) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

L'équation mécanique de la machine est donnée par l'expression qui suit :

$$\frac{2J}{p} \frac{d\omega_r(t)}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp}$$

Avec  $T_{em}$  le couple électromagnétique développé par la machine (négatif en mode génératrice),  $T_{mech}$  le couple fourni par la turbine à la machine,  $T_{damp}$  le couple de friction,  $\omega_r$  la vitesse du rotor,  $J$  la constante d'inertie de la machine et  $p$ , le nombre de paires de pôles de la machine.

Le système d'équation précédent est non-linéaire du fait de la variation des inductances en fonction de l'angle  $\theta$ , de ce fait, la résolution de ce système peut devenir très compliquée. Afin de lever cette limitation et ainsi permettre de réduire le nombre d'équations et faciliter la résolution, la transformation de Park permet de construire une machine virtuelle diphasée fonctionnant exactement de la même manière que la machine réelle. Après transformation de Park,

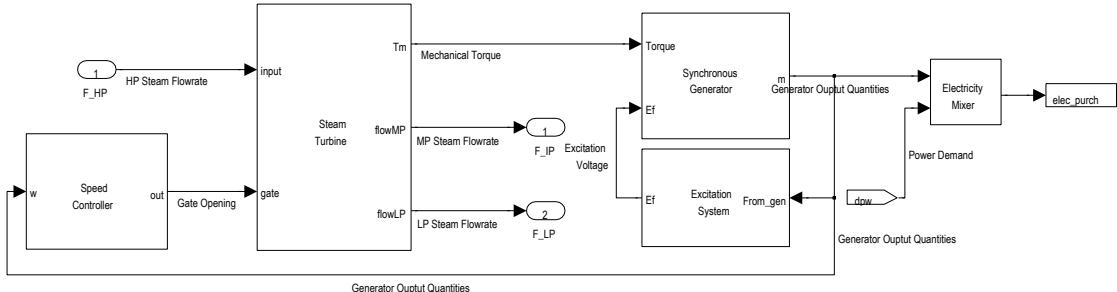


Figure 4.13 – Diagramme Simulink du turboalternateur

le stator réel polyphasé est alors remplacé par un stator virtuel diphasé qui pourra ensuite être ramené au référentiel du rotor en faisant tourner ce dernier à la même vitesse dans le sens direct de rotation du rotor. Pour notre cas, nous utiliserons le modèle de la machine synchrone telle qu'elle est présentée dans ONG [114]. La représentation Simulink de la génératrice est présentée en annexe.

Le modèle de la génératrice effectue une première transformation du système triphasé au niveau de l'induit dans le référentiel de Park. Dans un second temps, à partir de ce nouveau référentiel, le système d'équation est résolu et la réponse du modèle est reconvertis dans le référentiel triphasé à travers la transformation inverse. Notons que pour pouvoir fonctionner correctement (alimentation d'un réseau séparé), le groupe turboalternateur nécessite une régulation de vitesse de la turbine. Cette régulation permet de s'assurer que la fréquence de sortie de la génératrice reste constante face aux variations de charge aux bornes de la génératrice. La structure générale du groupe est alors celle présentée sur la figure 4.13 où le régulateur de vitesse est un régulateur PI standard qui agit sur l'ouverture de la vanne de contrôle afin de contrôler le débit de vapeur injecté dans la turbine.

Le principe de fonctionnement de la régulation de vitesse est le suivant. Le régulateur mesure instantanément la vitesse de rotation de la génératrice ainsi que le débit de vapeur injecté dans la turbine. Lorsque la vitesse de la génératrice dépasse la valeur de la référence, le flux de vapeur injecté à travers la vanne de contrôle est diminué par le régulateur, ce qui à pour conséquence de diminuer la valeur de la puissance mécanique transmise à la génératrice. Par ailleurs, lorsque la vitesse de la génératrice est inférieure à la vitesse de référence, alors la vanne de contrôle est ouverte pour augmenter la puissance mécanique transmise à l'arbre de la génératrice. Ce processus est alors réitéré de manière continue tant que l'erreur de vitesse ne s'est pas annulée (ou du moins atteint une certaine valeur seuil). Notons également que pour maintenir la tension de sortie à une amplitude constante, et ce quelque soit le facteur de puissance et le courant induit, la modélisation du circuit d'excitation doit être ajoutée au système. En effet, globalement, lorsque la charge aux bornes de la machine augmente, la tension de sortie diminue à cause de la réaction d'induit (ou réactance synchrone), pour compenser cette baisse, il est nécessaire d'agir sur le courant d'excitation de l'alternateur en augmentant ou en diminuant celle-ci conformément à l'évolution de la tension de sortie.

#### Remarque 4.3

Lors du fonctionnement du groupe, la charge aux bornes de la génératrice détermine la quantité de vapeur devant être produite par la chaudière, cette quantité de vapeur détermine alors la quantité de carburant et de comburant. Dans notre étude, puisque l'objectif est de vérifier l'effet de la cogénération, le raisonnement est inversé. Ainsi, le groupe débite sur une charge correspondant à la puissance maximale de la génératrice et la simulation détermine la quantité de puissance (active) pouvant être produite pour une valeur donnée du débit de vapeur produit par la chaudière et envoyée vers le turboalternateur. Le débit de vapeur injecté dans le groupe est obtenu à travers la phase d'optimisation et est donc une variable d'entrée du modèle de

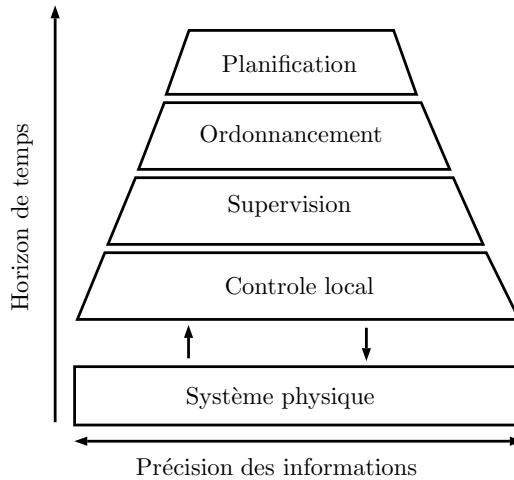


Figure 4.14 – Couches de contrôle d'un système de production

simulation du turboalternateur.

### 4.3 Modélisation de la supervision du procédé

Les systèmes de production incluent de manière générale plusieurs processus de prise de décision. Ces décisions sont de natures et de complexités différentes, généralement classées en horizons temporels et couvrant du niveau stratégique au niveau temps-réel. La décomposition hiérarchique des décisions conduit donc à la création d'une architecture multi-couche pour le contrôle des systèmes de production. Ainsi, chaque couche reçoit comme *input* les directives venant du niveau supérieur et définit comme *output*, une référence pour le niveau inférieur.

La représentation de la décomposition hiérarchique dans le cas des systèmes de production prend généralement la forme de la figure 4.14. La couche de contrôle local interagit directement avec le système physique à travers les actionneurs, les capteurs, les automates programmables et les régulateurs continus. La couche supervision agit au dessus du contrôle local dans le but d'exécuter un ensemble de tâches définis précédemment par la couche ordonnancement. Mais il permet également de superviser le système physique à des fins de détection, de diagnostic ou de correction. La couche ordonnancement agit sur le moyen terme et détermine les tâches du système ainsi que les ressources qui y seront affectées afin de satisfaire un certain critère. Finalement la couche planification prend des décisions stratégiques sur le long terme.

Nous nous intéressons donc ici à la réalisation des directives fournies par le niveau ordonnancement. Lorsque l'on cherche à modéliser le résultat d'un ordonnancement, la représentation la plus courante est le diagramme de Gantt. A partir de ce diagramme, nous pouvons déterminer de façon précise quand est ce qu'un lot de fabrication se lance, quelle est sa taille, combien de temps dure-t-il et sur quel appareil est il lancé. D'après le schéma représenté par la figure 4.14, la communication entre le système physique et le niveau supervision se fait à travers la couche de contrôle local. Cette dernière comprend, comme on l'a vu précédemment, des actionneurs (pompes, vannes etc.), des appareils de mesure (capteurs) et des appareils de contrôle. Dans notre modélisation, nous ne représentons pas explicitement les actionneurs et les capteurs, cependant, nous représentons implicitement leur présence à travers deux types de variables : les **signaux** et les **commandes**.

Ainsi donc, lorsque pendant une phase de la réaction, l'on désire mesurer l'état d'une variable du réacteur, un *signal* provenant du système physique est remonté vers le superviseur du réacteur. Ces situations correspondent aux effets des capteurs dans les processus réels. Par ailleurs, lorsqu'une directive de charge émane du réacteur vers les cuves de stockage, l'effet des

actionneurs est modélisé par une *commande* envoyée au système physique. On résumera donc en stipulant que lorsque les informations sont acheminées d'un bloc Stateflow (superviseur) vers un bloc Simulink (système physique), on est en présence d'informations de commande (actionneurs). A l'inverse, lorsque l'information émane d'un bloc Simulink en direction d'un bloc Stateflow, on assiste à la présence d'un signal (capteurs).

Notons également qu'il existe deux types d'événements pouvant faire évoluer le système :

- les **événements explicites** ou **globaux** résultant d'une directive (commande) venant de la supervision globale du procédé. On pourra citer par exemple le lancement d'un lot sur un réacteur, ces événements sont fournis par le plan de production transmis par le modèle d'ordonnancement. Ces décisions s'appliquent simultanément à tous les appareils du procédé (vision globale) ;
- les **événements implicites** ou **locaux** résultant de l'évolution en interne d'une variable d'état d'un des sous systèmes. Par exemple, lorsque la température finale du réacteur aura atteint une certaine valeur, le système associé au réacteur arrêtera automatiquement la chauffe et passera à l'étape suivante. Ces décisions sont réalisées localement au niveau de chaque appareil du procédé (vision locale).

L'architecture globale, de la supervision, étudié ici utilise donc ce que l'on nomme une **recette de contrôle** présentée par HETREUX, RAMAROSAN et LE LANN dans [60]. L'implémentation de cette recette de contrôle dans le cadre de nos travaux, utilise le formalisme des Statecharts, mais de manière générale elle est destinée à traiter les résultats de l'ordonnancement afin que ceux-ci soient manipulables par les modèles de simulation. Afin de formaliser la modélisation, nous créons trois structures de données correspondant aux trois entités représentées dans le diagramme de Gantt. Ces trois entités sont :

- les ressources (au sens appareil) qui possèdent comme propriétés : un nom et éventuellement une capacité dans le cas des appareils discontinus ;
- les lots qui représentent ceux décrit dans la recette de fabrication. Ces entités ont pour propriétés le nom, la date de début et la taille ;
- les opérations qui représentent une agrégation de phases opératoires. Autrement dit, une entité « operation » est composée d'un ou de plusieurs entités « phase ». Ces phases possèdent comme propriétés leur nom, l'état initial et l'état final des variables d'états ainsi que des variables d'entrée associées à l'opération englobant la phase.

La représentation de ces entités dans un diagramme de classe UML est donnée par la figure 4.15. Cette figure représente la structure statique de la supervision, cependant elle n'en permet pas de décrire la structure dynamique. L'évolution dans le temps de l'activation des différents états, pour la simulation d'un lot sur un réacteur, correspond à la figure 4.16. Si la recette de fabrication autorise le lancement de deux lots de fabrication, l'une à la suite de l'autre, alors la séquence de la figure 4.16 est répétée deux fois en veillant à ce que le message *batchComplete()* soit positif pour le premier lot avant de lancer le second. Si par ailleurs, la recette de fabrication présente une structure concurrente, alors la condition précédente n'est plus nécessaire. En effet, dans ce cas de figure, deux réacteurs doivent être utilisés. La séquence de la figure 4.16 est donc réalisée deux fois sur deux appareils différents.

La modélisation de ce comportement dans le formalisme des Statecharts est donnée par la figure 4.17. Cette modélisation correspond à la simulation d'un lot de fabrication. L'état “libre” du réacteur 1 de la figure 4.17 joue alors le rôle de file d'attente, c'est à dire que lorsque la contrainte (garde) sur la date de lancement n'est pas satisfaite alors la transition menant au lancement du lot correspondant à l'opération de réaction n'est pas validée. Cet état s'assure également de respecter la chronologie des opérations, ainsi le lancement du deuxième lot sur le réacteur ne pourra se faire que si le premier lot est terminé et ainsi de suite. Cette représentation peut alors être généralisée au cas de plusieurs ressources (appareils) du procédé lorsque le besoin se fait ressentir. Le schéma général de la recette de contrôle est alors directement conçu en

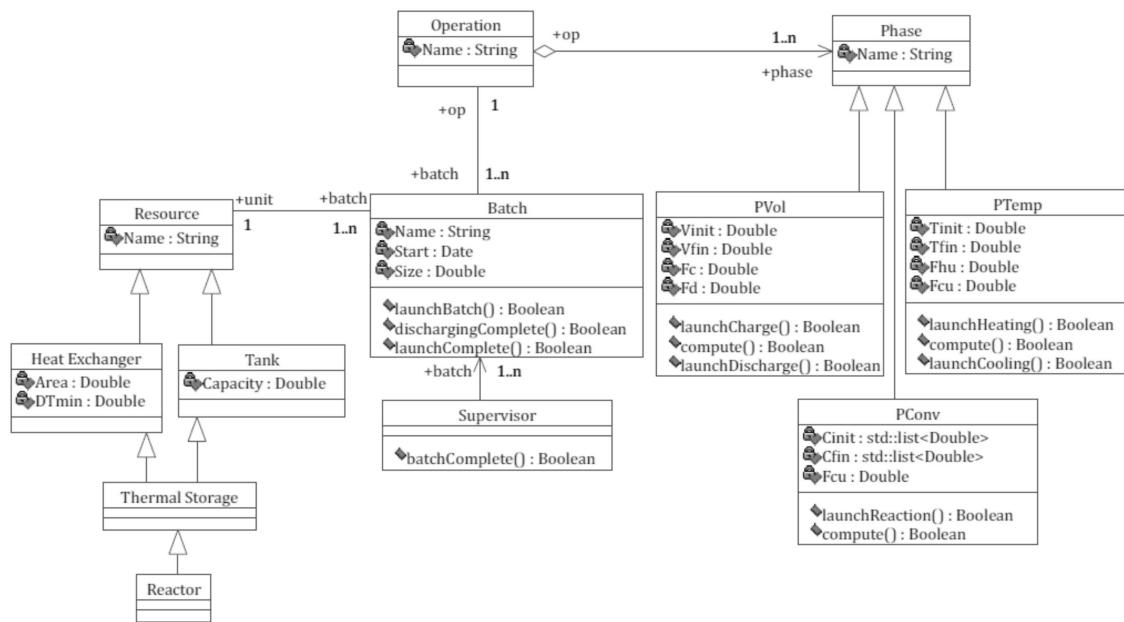


Figure 4.15 – Structure statique de la supervision des réacteurs

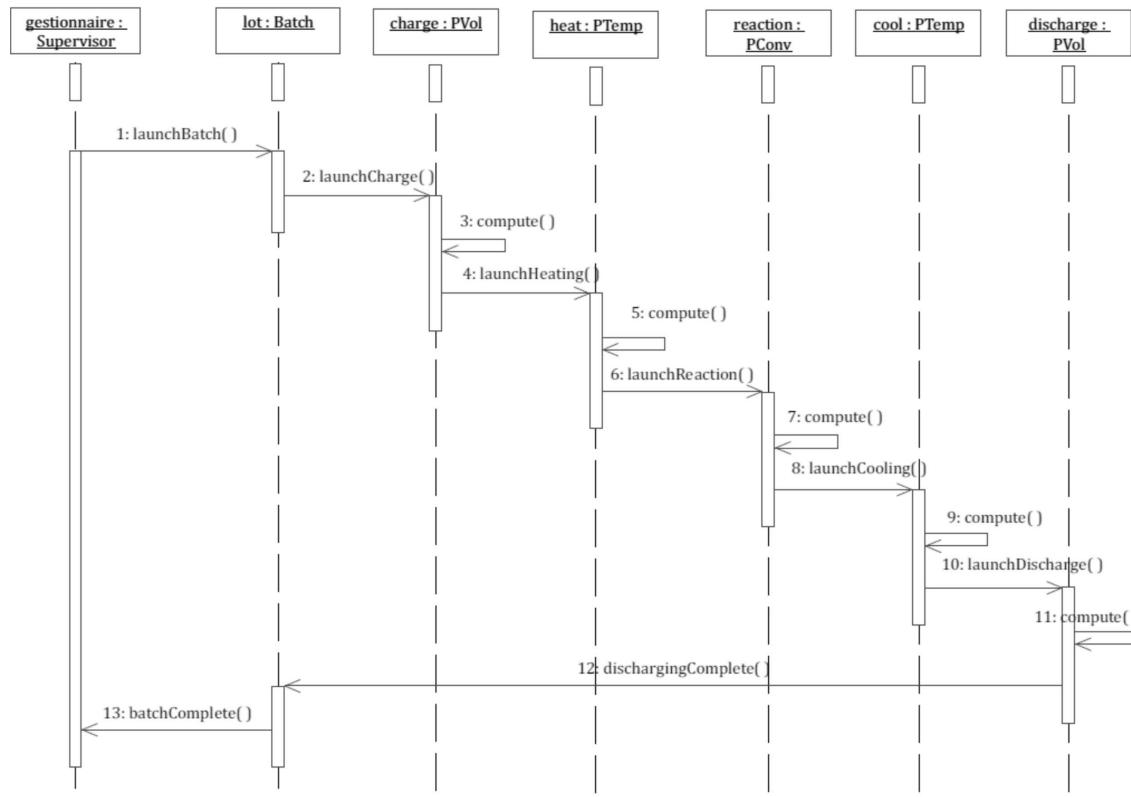


Figure 4.16 – Séquence de la simulation d'un lot de fabrication

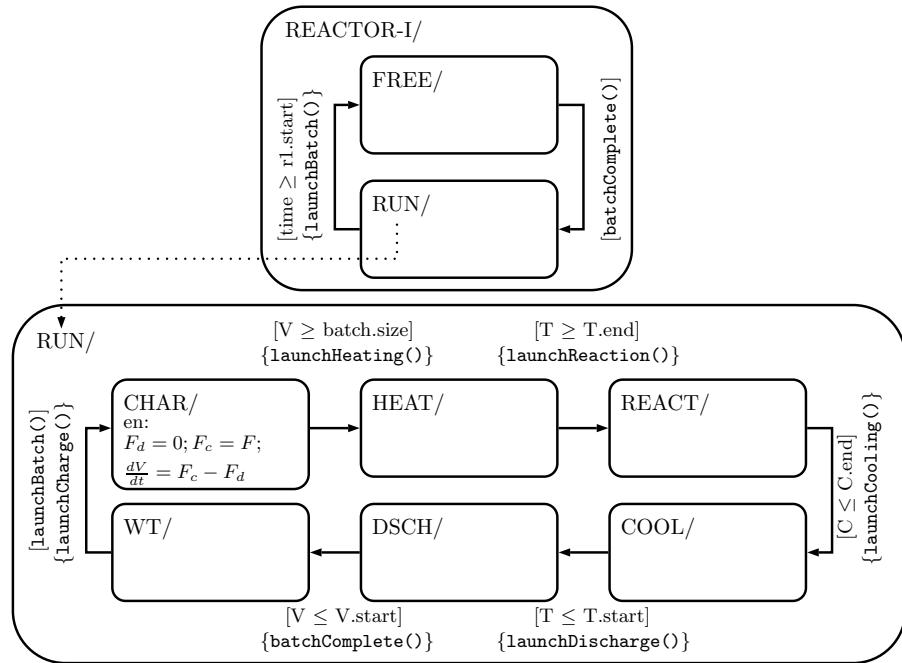


Figure 4.17 – Supervision d'un réacteur discontinu

utilisant les éléments de modélisation cités précédemment. Le cas d'une opération de réaction discontinue est représenté par la figure 4.17 sur laquelle une attention particulière a été fournie pour la représentation de la phase de charge.

## 4.4 Couplage optimisation-simulation : Études de cas

La démarche adoptée suit la logique de la figure 1.18 page 35. D'après cette figure, le début de la procédure nécessite la connaissance préalable des informations relatives au procédé (appareils disponibles, leurs capacités, leurs consommations en termes d'énergie etc.) ainsi que les informations générales de la campagne de production (quantités des produits à réaliser, durée maximale de la campagne etc.). Ces données sont donc supposées connues et initialement disponibles. A partir de ce point de départ, le modèle d'ordonnancement est exécuté et fourni les informations relatives au planning du procédé (tailles de lots, dates de lancement, affectation, consommations en utilités etc.) qui seront ensuite transmises aux modèles de simulation (modèle de l'ensemble atelier-récupérateurs et modèle de la centrale).

Si la simulation se termine sans incident, alors les résultats sont analysés et si elles sont jugées satisfaisantes par le décideur, alors la procédure se termine et le plan de production est validé. Dans le cas contraire, deux situations peuvent se présenter :

1. Soit la simulation est interrompue et se termine avant la durée prévue (horizon ou durée du plan d'ordonnancement). Dans ce cas précis, la cause en est que la trajectoire du système a évolué vers le marquage d'un état indésirable (rupture de stock, dépassement etc.) au niveau des dynamiques discrètes (blocs Stateflow) ;
2. Soit la simulation se termine sans incident mais le résultat enregistre une déviation importante comparée au résultat de la phase d'optimisation. Dans cette situation, les causes peuvent être très nombreuses et de natures diverses (technique, organisationnelle ou technologique). A ce stade, une analyse plus poussée avec une vision d'ensemble des modèles et des informations relatives au procédé étudié devra être réalisée.

Au vu de ces différentes situations, il serait utopique de prétendre lister exhaustivement toutes les solutions. Pour cette raison, nous nous sommes limités dans ces travaux, à la conduite de deux réacteurs au niveau de l'atelier. Nous assumons également que les consommations en termes d'énergie (électricité, vapeur, fluide de refroidissement) sont fixées pour chaque réacteur et que les échanges d'énergie sont unidirectionnelles (en l'occurrence du réacteur 1 vers le réacteur 2). Le procédé simplifié que nous traitons ici, a été choisi pour permettre l'illustration des différentes notions abordées dans cette thèse (échange directe, avec stockage, production simultanée d'électricité et de chaleur) et fait abstraction de certaines caractéristiques jugées non-primordiales pour la compréhension de la démarche.

Ainsi, trois cas d'application seront étudiés dans la suite :

- Un premier cas illustrant du pilotage intégré de l'atelier et de la centrale de cogénération (production de chaleur et d'électricité) ;
- Un deuxième cas traitant de la récupération directe d'énergie thermique ;
- Un dernier cas traitant du stockage d'énergie thermique.

Lors de ces deux derniers cas, l'atelier de production, le réseau de récupérateurs et la centrale de cogénération sont simultanément pilotés à l'exception près que les consommations de puissance électrique sont omises.

#### 4.4.1 Cas d'application I : Cogénération

Le premier cas d'application, illustre le cas de la cogénération d'électricité et de chaleur. Nous ne traitons pas ici des récupérations d'énergie et nous focalisons essentiellement sur la production d'électricité *in-situ* simultanément avec la production de vapeur à différentes pressions. La finalité est donc de vérifier si la démarche proposée permet d'extraire un plan d'ordonnancement permettant de minimiser l'achat d'électricité auprès des fournisseurs externes.

La démarche consiste donc à exécuter, dans un premier temps, le modèle d'ordonnancement en veillant à minimiser l'achat d'électricité et en favorisant la production d'électricité à travers le groupe turbine-alternateur. Lorsqu'un plan de production est obtenu à travers cette première phase, les caractéristiques de la solution sont transmises au module de simulation en vue de vérifier si l'énergie achetée et/ou produite sur site correspond bien à ceux transmis par le module d'optimisation. Si c'est le cas, la procédure converge sinon, des ajustements seront à prévoir.

##### 4.4.1.1 Recette du procédé

La recette du procédé est donnée par la figure 4.18. L'atelier de production est représenté par les réacteurs BR1 et BR2 dont chacun est décomposé en cinq phases (charge, chauffe, réaction, refroidissement et décharge). La phase de chauffe au niveau de BR2 consomme de la vapeur à moyenne pression (état « MPS » de la figure 4.18) au niveau de la centrale, tandis que la chauffe du réacteur BR1 consomme une puissance électrique qui est fournie soit par la centrale (état « ELEC » de la figure 4.18) soit par un apport en électricité externe (importation de ressource venant de l'extérieur). Les phases de refroidissement des deux réacteurs consomment de l'eau fournie par une cuve de stockage au niveau de la centrale. Les caractéristiques relatives à la campagne sont alors les suivantes :

- Une demande de 160 tonnes de produits se manifeste au niveau de l'état « FP » des produits finis. Cette demande est à livrer en une seule fois et le plus tôt possible ;
- La durée de l'ordonnancement ne doit pas dépasser 120 heures (soit 5 jours en  $3 \times 8$ ).

Les caractéristiques relatives au procédé sont énumérées dans le tableau 4.1. Celles relatives aux états sont directement lisibles sur la figure 4.18, on peut alors constater que l'atelier est intégralement composé de tâches discontinues tandis que la centrale est essentiellement le siège de tâches continues. L'interconnexion entre ces deux systèmes se fait alors à travers les arcs de

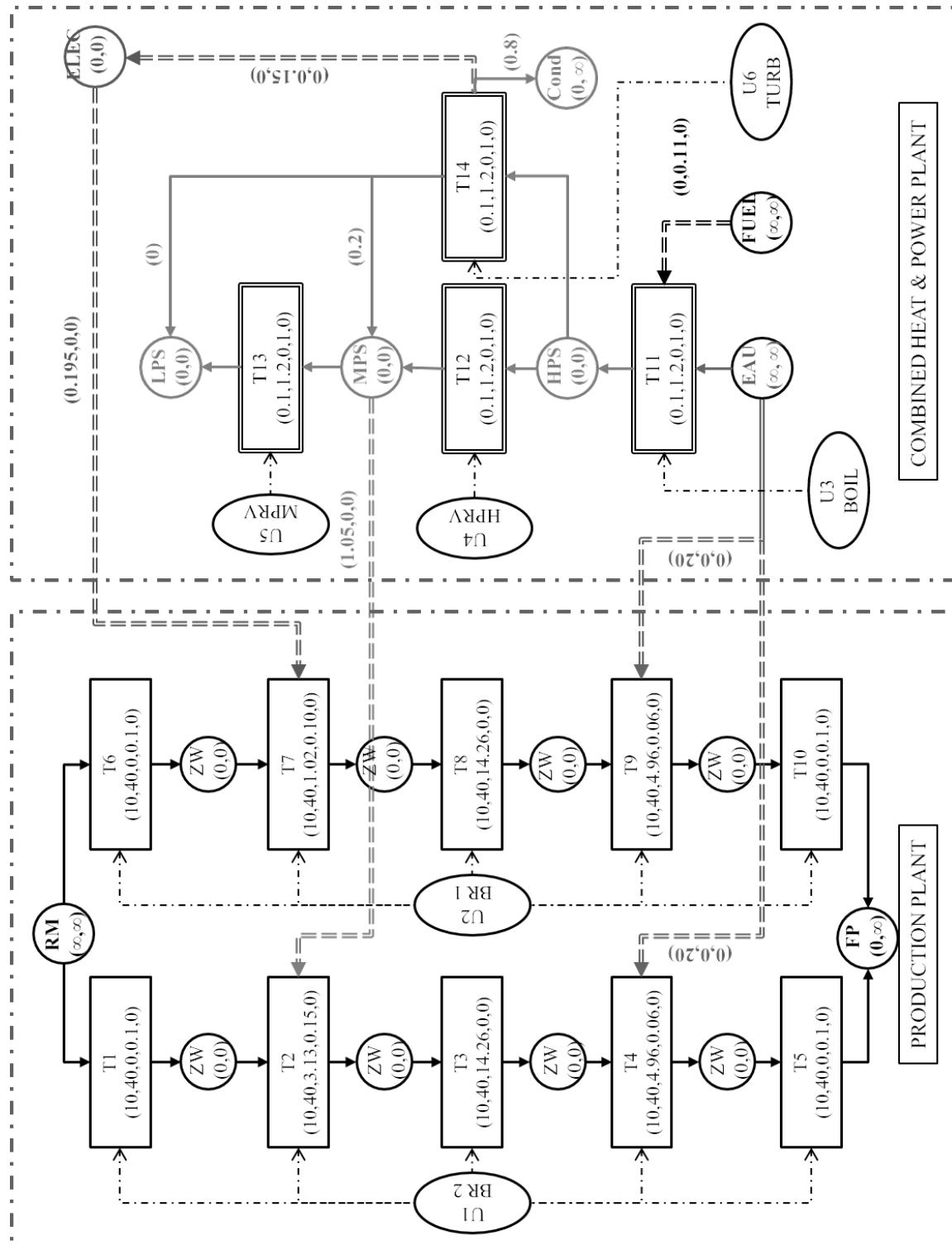


Figure 4.18 – Représentation ERTN de la recette du Cas d'Application I

Tâche	Opération	$b_{min}$	$b_{max}$	Appareil
T1	Charge	10	40	Réacteur 2 (U1)
T2	Chauffe			
T3	Réaction			
T4	Refroid.			
T5	Décharge			
T6	Charge	10	40	Réacteur 1 (U2)
T7	Chauffe			
T8	Réaction			
T9	Refroid.			
T10	Décharge			
T11	Production	0	4	Chaudière (U3)
T12	Détente	0	4	Vanne HP (U4)
T13	Détente	0	4	Vanne MP (U5)
T14	Détente	0	4	Turbine (U6)

Tableau 4.1 – Caractéristiques des tâches du Cas d'Application I

consommation en utilités dont les paramètres associés ( $ufi$ ,  $uvi$  et  $uwi$ ) sont supposés préalablement connus. Cette simplification sur les consommations d'utilités, bien qu'étant limitative, traduit assez fidèlement la situation d'une installation réelle et permet par la même occasion d'estimer plus fidèlement les paramètres liés à la durée des phases, minimisant ainsi les risques de dérive entre l'optimisation et la simulation. Nous nous limiterons, donc dans la suite de l'ouvrage, au cas où les consommations exprimées au niveau de la centrale de cogénération sont prédéfinies<sup>2</sup>.

#### 4.4.1.2 Estimation des paramètres pour l'ordonnancement

L'étape d'estimation de paramètres se focalise sur la détermination des durées des différentes phases de chaque réacteur. En gardant à l'esprit le fait que la consommation d'énergie de chaque phase, si elle existe, est prédéterminée, il est alors possible d'extraire une relation linéaire entre la taille de lot et la durée de fonctionnement (voir § 3.2.1 page 86). L'obtention des paramètres de durée pour chaque phase du réacteur se fait alors en exploitant le modèle de simulation du réacteur.

**4.4.1.2.1 Estimation des durées de charge (décharge)** La charge (et la décharge) des réacteurs se fait généralement à débit constant, autrement dit, lorsque le réacteur doit être rempli (ou vidé), les pompes d'alimentation (ou de soutirage) fonctionnent à débit fixe. Pour le cas de notre exemple, nous supposerons que les débits de charge (et de décharge) au niveau des deux réacteurs, sont fixés arbitrairement à la valeur de 10 [ $m^3/h$ ]. On peut alors aisément extraire l'allure générale de la durée de charge (ou de décharge) en fonction de la taille de lot traitée par le réacteur. Cette relation s'obtient en lançant la simulation d'un réacteur en faisant varier la taille de lot, le tracé obtenu peut être consulté sur la figure 4.19a. On observe alors une tendance linéaire entre la taille de lot et la durée, cette relation est donnée sur la même figure et permet d'extraire les paramètres  $pf$  et  $pv$  associés aux termes de durée. Pour ce cas précis,  $pf$  vaut -0.0078 et  $pv$ , 0.1. L'expression générale des durées de charge et de décharge du réacteur BR1 dans le modèle d'ordonnancement sont alors les suivantes :

$$pt_{T1,n} = -0.0078 \cdot W_{T1,n} + 0.1 \cdot B_{T1,n} + 0 \cdot d_{T1,n} \quad \forall n \in N$$

2. Des cas plus généraux, où les consommations de chaque tâche (phase) peuvent varier, pourront être envisagés comme perspectives de recherche.

$$pt_{T5,n} = -0.0078 \cdot W_{T5,n} + 0.1 \cdot B_{T5,n} + 0 \cdot d_{T5,n} \quad \forall n \in N$$

Le cas de BR2 est identique à celui de BR1 car les deux réacteurs appartiennent à la même ligne de production.

**4.4.1.2.2 Estimation des durées de chauffe (refroidissement)** La procédure pour la détermination des durées de chauffe (resp. refroidissement) suit la même logique que précédemment. Nous avons introduit auparavant que les consommations d'utilité des phases de chauffe (resp. refroidissement) sont prédéterminés, donc que la chauffe ou le refroidissement s'effectue à puissance constante.

Pour le cas de notre exemple, la phase de chauffe au sein du réacteur BR2 consomme de la vapeur à moyenne pression à un débit constant de 400 [m<sup>3</sup>/h] (1.05 [t/h]), cette même phase de chauffe dans le cas du réacteur BR1, consomme une puissance électrique constante de 195 [kW]. . Le refroidissement des deux réacteurs se fait quant à elle, à travers la consommation d'eau froide à débit de 20 [m<sup>3</sup>/h]. La variation de durée de chauffe des réacteurs BR1 et BR2 pour une chauffe allant de 300 [K] à 400 [K] est alors donnée par la figure 4.19c, l'allure de la durée de refroidissement en fonction de la taille de lot est donnée sur la figure 4.19d.

Les expressions correspondant aux durées des phases de chauffe et de refroidissement au sein du modèle d'ordonnancement pour les deux réacteurs sont alors les suivantes :

$$pt_{T2,n} = 3.1386 \cdot W_{T2,n} + 0.1547 \cdot B_{T2,n} + 0 \cdot d_{T1,n} \quad \forall n \in N$$

$$pt_{T4,n} = 4.9665 \cdot W_{T4,n} + 0.0686 \cdot B_{T4,n} + 0 \cdot d_{T5,n} \quad \forall n \in N$$

$$pt_{T7,n} = 1.0277 \cdot W_{T7,n} + 0.1058 \cdot B_{T7,n} + 0 \cdot d_{T7,n} \quad \forall n \in N$$

$$pt_{T9,n} = 4.9665 \cdot W_{T9,n} + 0.0686 \cdot B_{T9,n} + 0 \cdot d_{T5,n} \quad \forall n \in N$$

**4.4.1.2.3 Estimation des durées de conversion** L'estimation de la durée de la phase de conversion est réalisée en émettant l'hypothèse que la réaction est adiabatique, autrement dit, qu'aucun dégagement de chaleur ne se produit pendant la conversion. Lorsque la durée de la conversion est mesurée en variant la taille de lot au sein du réacteur, alors l'allure de la variation est donnée sur la figure 4.19b. Cette figure nous permet de constater que la durée de fonctionnement du réacteur lorsque celui-ci transforme les réactifs en produits, ne varie que très peu en fonction de la quantité de matière traitée par l'appareil. La raison de cette tendance réside dans le fait que la vitesse de réaction est constante et ne dépend pas de la taille de lot, on pourra cependant observer quelques variations sur la figure 4.19b. Ces variations sont principalement dues au fait que la réaction est initiée dès la phase de chauffe (activée à T < 400 [K]), autrement dit, que l'avancement de la réaction varie légèrement en fonction de la taille de lot lorsque la phase de chauffe se termine (température de réaction T=400 [K]). L'expression générale de la durée des phases de conversion au niveau des deux réacteurs est alors la suivante :

$$pt_{T3,n} = 14.266 \cdot W_{T3,n} + 0.001 \cdot B_{T3,n} + 0 \cdot d_{T3,n} \quad \forall n \in N$$

$$pt_{T8,n} = 14.266 \cdot W_{T8,n} + 0.001 \cdot B_{T8,n} + 0 \cdot d_{T8,n} \quad \forall n \in N$$

On pourra alors omettre des expressions précédentes, les composantes de la durée liées à la taille de lot et considérer que la réaction est réalisée à durée fixe<sup>3</sup>.

3. Au mieux elles augmenteront la durée de 0.04 h soit 2 min 24 sec. Comparée à la durée fixe de 14,266 h, cette quantité est négligeable

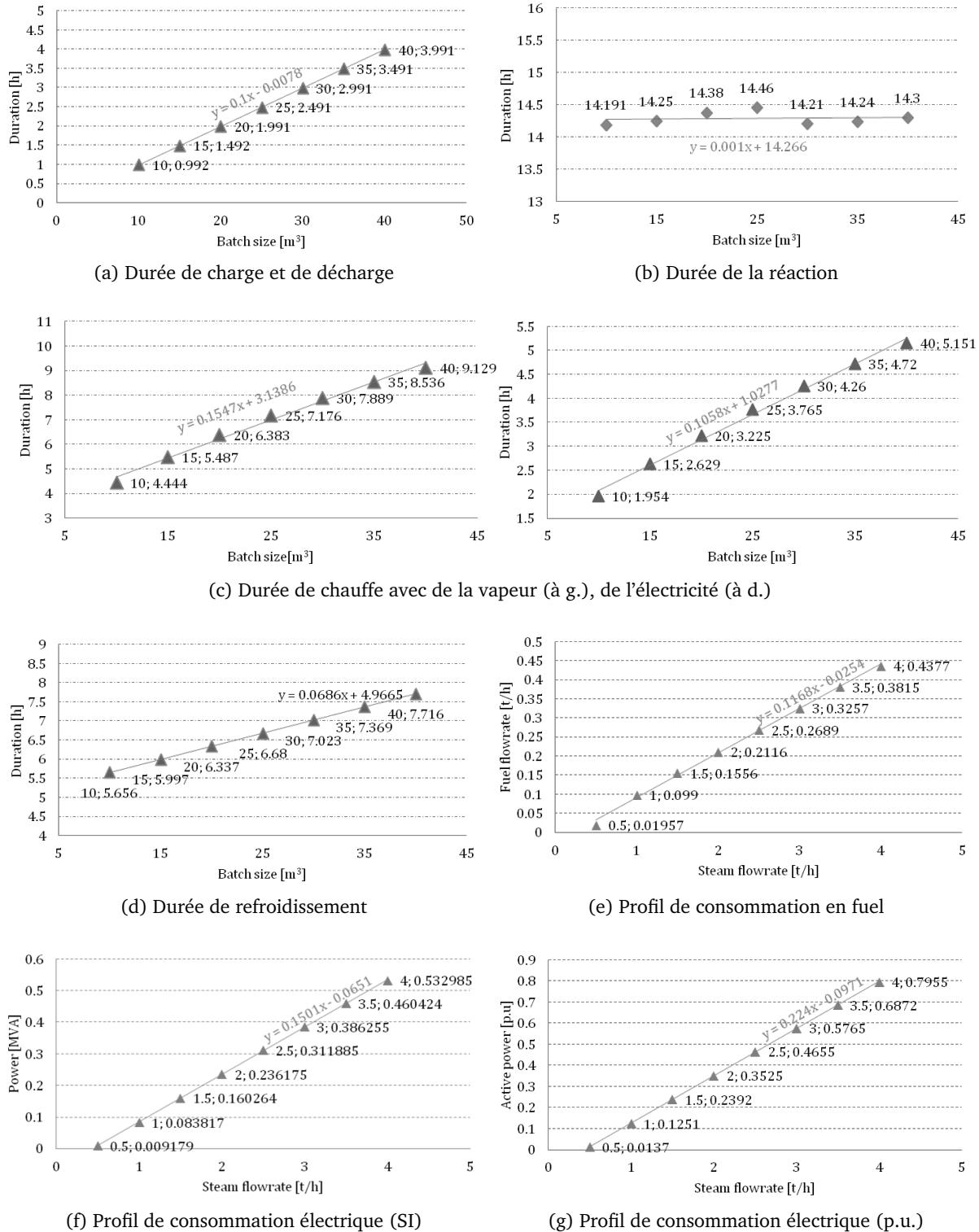


Figure 4.19 – Estimation des paramètres du Cas d'Application I

It.	PLVM (cmax=3)				PLVM/PPC (cmax=3)			
	N	Obj. (\$)	Time(s)	gap (%)	N	Obj.(\$)	Time(s)	#Cuts
1	12	3390.94	7.29	0	10	2778.68	0.28	0
2	13	2863.28	39.42	0	11	2778.68	0.26	0
3	14	2863.28	61.45	0	12	2778.68	0.37	0
4	15	2863.28	110.10	0	13	2778.68	0.39	0
5	16	2863.28	287.10	0	-	-	-	-

Tableau 4.2 – Résultats de l'ordonnancement du Cas d'Application I

**4.4.1.2.4 Estimation des consommations/productions d'utilités** Les profils de consommation en carburant au niveau de la chaudière et de production de puissance électrique au niveau de la turbine sont donnés respectivement sur la figure 4.19e et figure 4.19f. Les expressions de ces consommations sont les suivantes :

$$UI_{Fuel,T11,n} = -0.0254W_{T11,n} + 0.1168B_{T11,n} + 0d_{T11,n} \quad \forall n \in N$$

$$UO_{Elec,T14,n} = -0.0651W_{T14,n} + 0.1501B_{T14,n} + 0d_{T14,n} \quad \forall n \in N$$

Ces consommations s'expriment en [tonnes/heure] de carburant et en [MVA] d'électricité.

#### 4.4.1.3 Ordonnancement

La stratégie de couplage entre optimisation et simulation s'effectue conformément à la figure 1.18. La prochaine étape consiste donc à exécuter le modèle d'ordonnancement. Nous lançons dans un premier temps, le modèle de PLVM que nous comparerons avec le modèle hybride de PLVM/PPC. L'exécution des modèles fait appel aux solveurs ILOG CPLEX 12.2 et ILOG CP Optimizer d'IBM sur un processeur INTEL Core 2 Duo - 2.54 GHz - 3 Go de RAM.

La fonction objectif consiste à minimiser la durée du plan d'exécution tout en minimisant les coûts fixes (lancement des appareils) et les coûts variables (débits de consommation en eau, en carburant et puissance électrique achetée). L'expression de cette fonction est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} \min \quad z = & \quad 5 \cdot sf_{FP} + \sum_{i \in I, n \in N} ws_{in} + 20 \cdot plan + 4 \cdot (s0_{Eau} - sf_{Eau}) + \\ & 200 \cdot (s0_{Fuel} - sf_{Fuel}) + 300 \cdot \sum_{n \in N} import_{Elec,n} \end{aligned}$$

Les résultats de l'optimisation suite à l'exécution des deux modèles sont résumés dans le tableau 4.2. On notera que la condition d'arrêt de l'optimisation correspond à un *cmax* de 3 itérations, autrement dit, si au bout de trois itérations aucune meilleure solution n'est obtenue, alors l'optimal est atteint. Ainsi, le modèle de PLVM converge au bout de 5 itérations, tandis que le modèle hybride converge au bout de 4. La différence de valeurs entre les fonctions objectifs optimales des deux approches est due au fait que le modèle hybride fournit une relaxation du problème. Le problème maître fournit donc une estimation par défaut (borne inférieure) sur la valeur de la fonction objectif et le sous problème vérifie si la solution associée à ce coût est faisable au vu des contraintes de capacité de la centrale. Si c'est le cas, alors l'optimal est atteint. Sinon la solution est rejetée et une autre solution est recherchée.

Les profils des consommations en utilités fourni par le sous-problème du modèle hybride sont donnés par la figure 4.21b. On peut remarquer d'après cette figure que les consommations d'utilités cumulées sont bel et bien prises en compte au niveau du sous problème. Ainsi, la différence de valeur entre les fonctions objectifs des deux modèles d'ordonnancement est due aux coûts associés aux quantités d'utilités absentes de la solution du problème maître. On peut donc

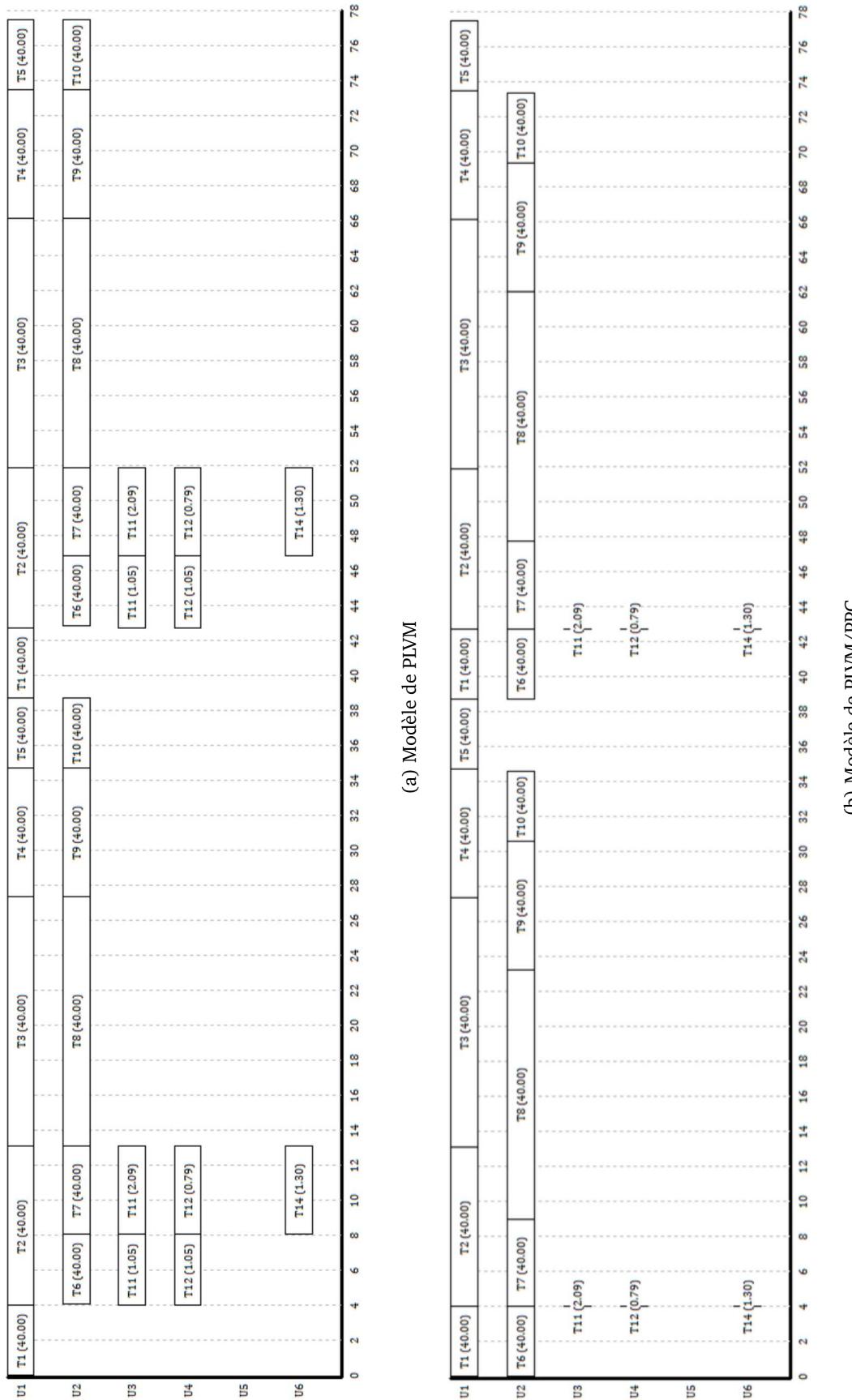
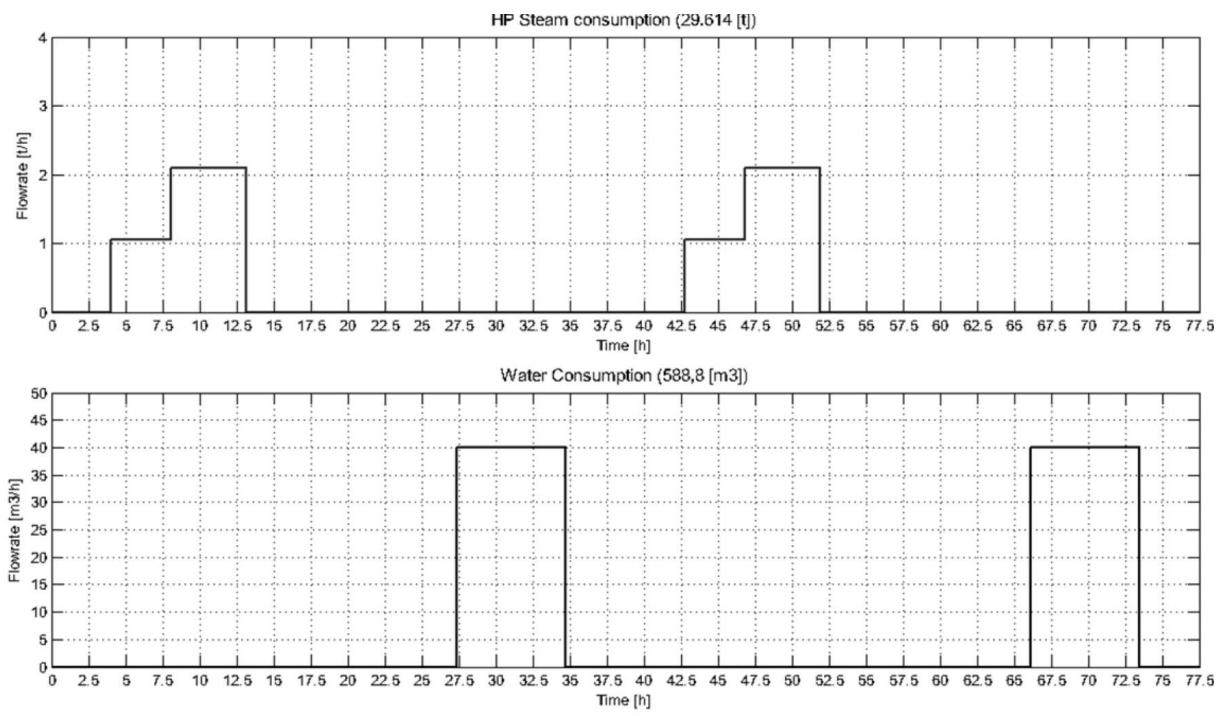
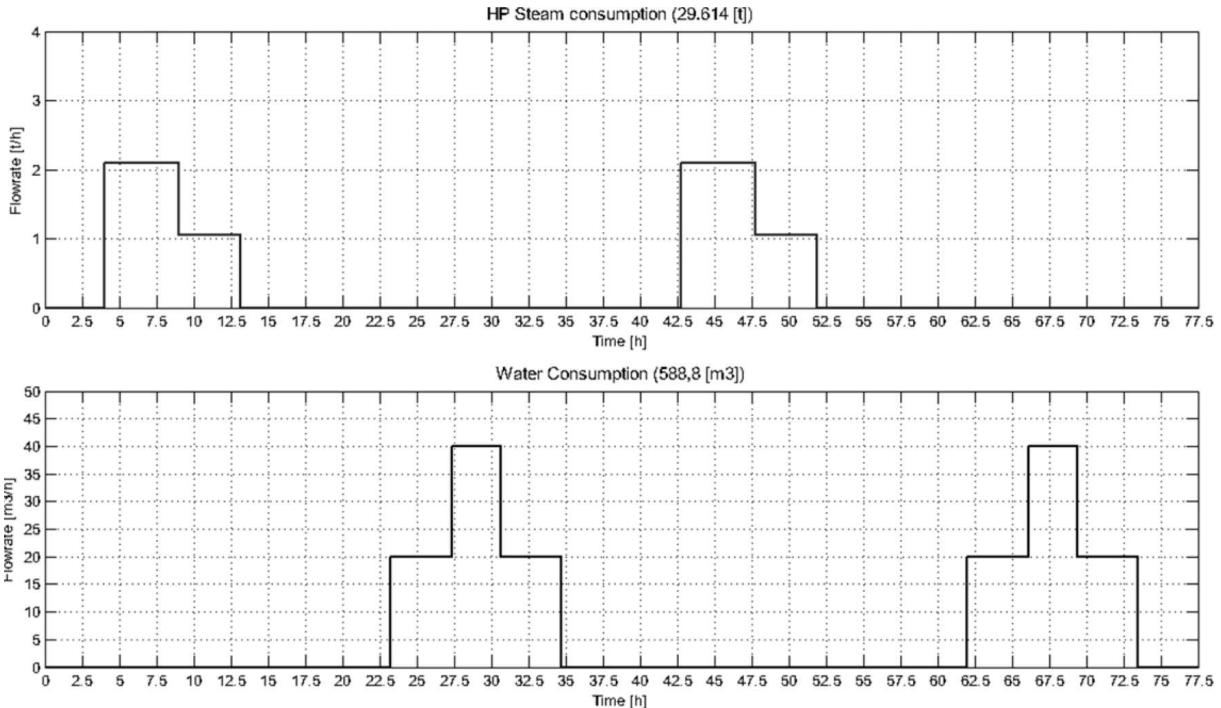


Figure 4.20 – Diagrammes de Gantt du Cas d'Application I



(a) Modèle de PLVM



(b) Modèle de PLVM/PPC

Figure 4.21 – Profils des utilités du Cas d’Application I

observer que les deux solutions fournies par le modèle hybride et par le modèle de PLVM sont identiques (voir figure 4.21a). L'unique différence réside dans le fait que le séquencement des tâches est différent (voir la figure 4.20).

#### 4.4.1.4 Simulation

L'étape de simulation est réalisée au niveau du simulateur graphique Simulink de Matlab où deux modèles correspondant respectivement à l'atelier et à la centrale de cogénération ont été développés. Nous ne présenterons dans cette section que les résultats de la simulation, cependant, une présentation plus complète de la bibliothèque des modèles ainsi que des caractéristiques des appareils est donnée en annexe D.

La phase d'ordonnancement nous a permis d'obtenir le planning optimal de l'atelier et de la centrale, la simulation s'attèlera alors à la validation ou non de ce planning. Pour ce faire, nous avons conçu des interfaces de communication au niveau des modèles de simulation afin de faciliter le traitement des informations fournies par la phase d'ordonnancement. Ces informations concernent généralement, les dates de début de chaque lot sur chaque appareil, les tailles de chacun de ces lots et leurs consommations respectives.

##### Remarque 4.4 (Fonctionnement de la simulation)

La procédure pour la conduite de la simulation se fait en deux temps. Dans un premier temps, à partir des informations fournies par l'ordonnancement, le modèle de simulation de l'atelier de production est lancé. Si cette étape se termine sans encombre, alors les informations relatives aux consommations en utilités (demandes) sont transmises au modèle de simulation de la centrale de cogénération sous forme de contraintes devant être satisfaites. Si aucune anomalie n'est détectée à ce stade, alors la procédure se termine et le décideur évalue la qualité de la solution.

Dans le cadre de cet exemple, nous assumerons l'existence d'une consommation fixe en puissance électrique au niveau de l'atelier. Par consommation fixe, nous entendons le fait qu'il existe une certaine quantité d'électricité demandée par l'atelier pendant toute la durée du plan de production et ceci indépendamment de l'activité de l'atelier. Cette consommation qui est estimée à 50 [ $kW$ ] vient compléter les besoins en électricité lors de la chauffe des réacteurs. A titre d'exemple, on peut assimiler ces besoins aux consommations en termes d'éclairage ou en termes de fonctionnement général des installations du site.

Ainsi, lorsque les résultats de l'optimisation du modèle hybride sont transmis au niveau du modèle de simulation de l'atelier de production, l'évolution de la rétention au niveau des réacteurs BR1 et BR2 sont représentés sur la figure 4.22. On peut observer sur cette figure que les quatre lots sur les deux réacteurs sont bien de taille de 40 [ $m^3$ ] et que leurs dispositions dans le temps sont conformes au diagramme de Gantt de la figure 4.20b avec une attente de 4.11 heures enregistrée entre les deux lots du réacteur BR2. La durée globale du plan est donc bien celle fourni par la phase d'optimisation. La séquence d'utilisation des réacteurs provoque alors la production de matière au niveau de la cuve de produit et la consommation de matière au niveau de la cuve de matière première, conformément aux profils de la figure 4.22. Les résultats relatifs à la température et à la concentration des produits et des réactifs sont également présentés sur la figure 4.22.

A ce stade, la simulation de l'atelier de production s'est terminée sans incident. Les demandes en utilités de l'atelier sont donc transmises à la centrale de cogénération, lequel se chargera de satisfaire la demande. Les résultats fournis par la centrale correspondent aux consommation en eau et en carburant au niveau de la chaudière, mais concernent également, la puissance obtenue à travers l'utilisation de la turbine et du générateur. Les quantités produites par la chaudière et par le turbo-alternateur sont représentés sur la figure 4.23 et illustrent bien les situations de production simultanée de vapeur et d'électricité. Conformément aux résultats fournis par la simulation, on peut constater que le procédé minimise bien l'achat d'électricité en lançant la

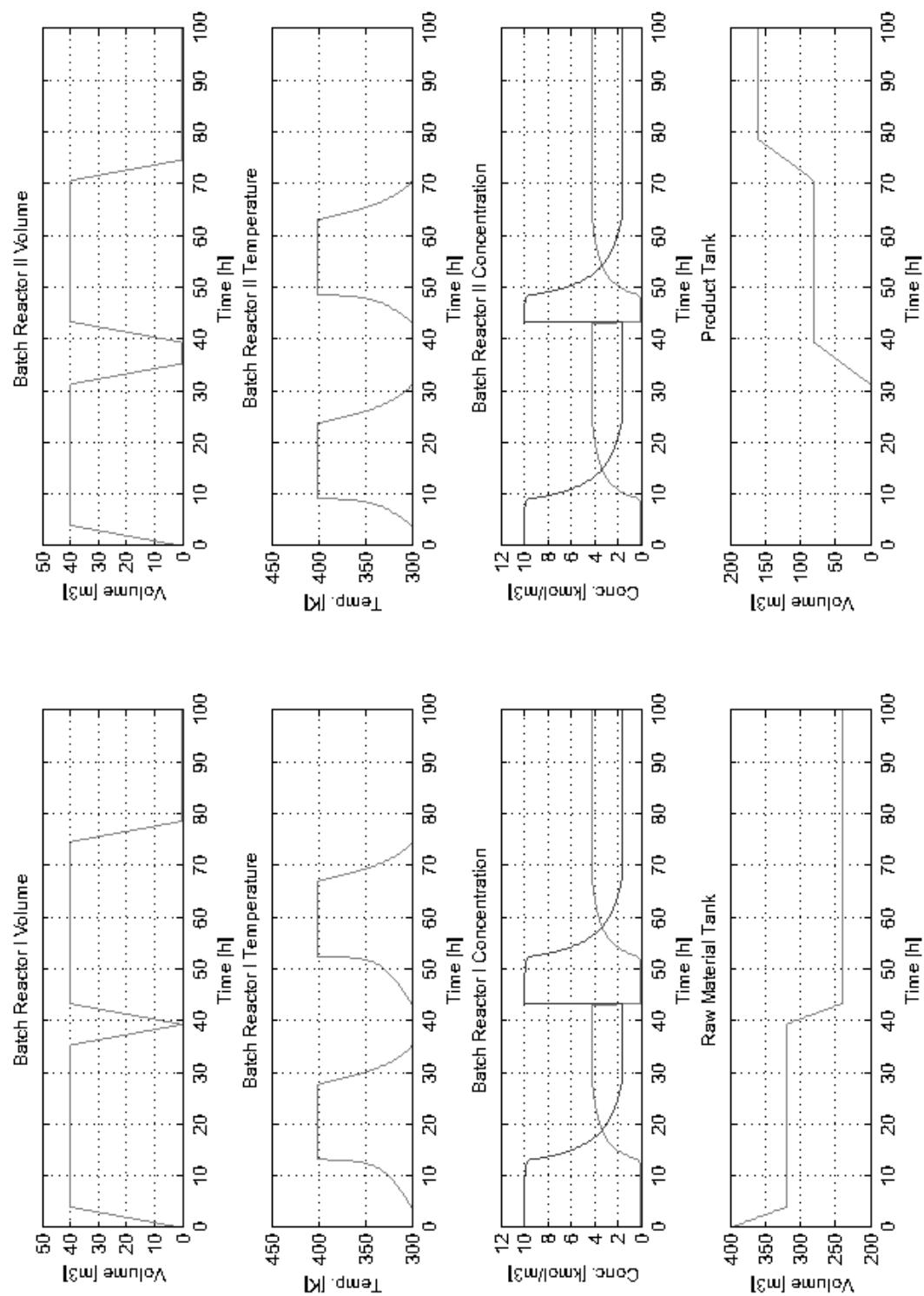


Figure 4.22 – Résultats de la simulation de l'atelier du Cas d'Application I

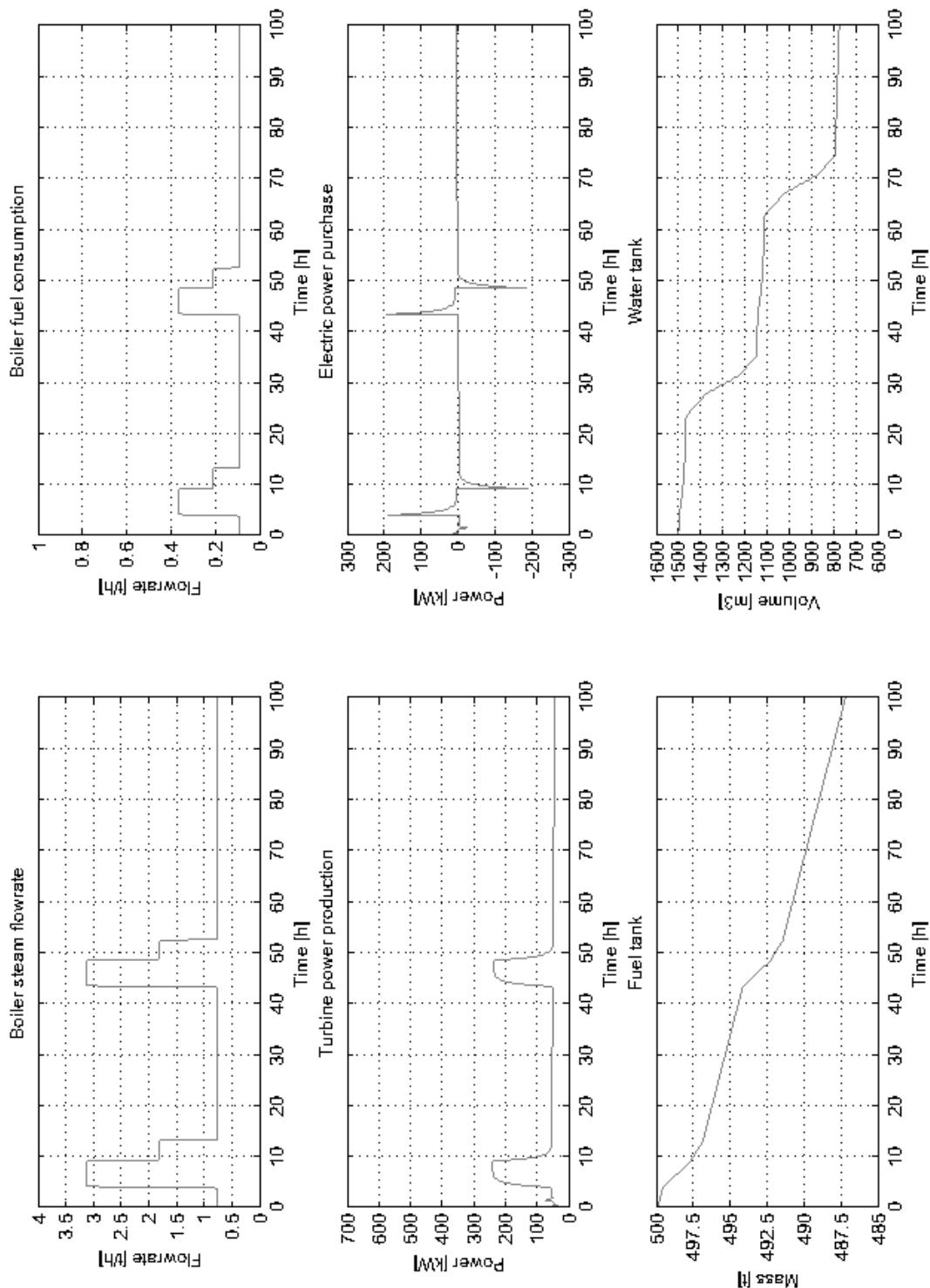


Figure 4.23 – Résultats de la simulation de la centrale du Cas d'Application I

turbine sur les mêmes périodes où une demande en chaleur et en électricité se manifeste. Les consommations d'eau et de carburant de tout le procédé, lors de la campagne de production, sont alors données sur la figure 4.23.

#### 4.4.1.5 Bilan

Les résultats précédent permettent de conclure sur la fidélité de la solution fournie par le modèle d'ordonnancement vis à vis de celle obtenue par simulation. Nous avons pu constater qu'une seule itération était suffisante entre l'optimisation et la simulation, ceci est largement dû au fait que le procédé étudié et l'ensemble des hypothèses émises simplifie considérablement la conduite de l'analyse. L'étape d'estimation de paramètres à travers une analyse de chaque opération unitaire joue donc un rôle prépondérant dans la convergence de l'approche proposée.

D'un autre coté, un procédé ayant une structure en *jobshop* et/ou une estimation des consommations d'énergie au niveau du modèle d'ordonnancement aurait très certainement conduit à des ajustements itératifs entre les deux phases de l'approche. Ceci est dû au fait que le modèle d'ordonnancement manipule des macro-entités (énergie, lots etc.) et se base sur une représentation linéaire du système étudié, il est donc très probable que plusieurs ajustements devront avoir lieu avant l'obtention d'une solution satisfaisante.

Il est donc recommandé d'établir une approche *bottom-up* en partant de chaque opération unitaire et en remontant vers la structure globale du procédé lors de l'application d'une telle stratégie de couplage optimisation-simulation. Cependant, notre objectif était de démontrer la situation de cogénération et donc de minimisation de l'achat d'électricité lorsque la simulation est dirigée par un module d'optimisation, sur ce point, les résultats confirment l'intérêt de cette approche dans la conduite des procédés sous contraintes d'énergie.

#### 4.4.2 Cas d'application II : Récupération directe d'énergie

Notre deuxième cas d'étude concerne la récupération directe d'énergie, autrement dit, le résultat final devra permettre l'obtention d'un plan d'ordonnancement maximisant les échanges directes d'énergie et par la même occasion, la minimisation des consommations en utilités primaires (eau et carburant). Nous ne traitons pas de la production d'électricité mais nous focalisons uniquement sur la production de chaleur.

##### 4.4.2.1 Recette du procédé

Le procédé étudié est le même que dans la section précédente, tout du moins au niveau de l'atelier de production. La nouvelle composante ajoutée dans cet exemple correspond au réseau d'échangeur de chaleur (récupérateur). Ainsi l'atelier de production comprend deux réacteurs « BR1 » et « BR2 » tout comme dans le cas précédent. Ces deux réacteurs utilisent de la vapeur à moyenne pression pour la phase de chauffe et de l'eau froide pendant la phase de refroidissement.

Une potentialité d'échange thermique existe entre les deux réacteurs de sorte que lorsque « BR2 » est en phase de refroidissement, un dispositif de récupération de chaleur est disponible pour acheminer cette énergie vers le réacteur « BR1 », ce dernier étant sensé être en phase de chauffe. Le courant chaud est donc le réacteur « BR2 » et le courant froid, le réacteur « BR1 ». La chauffe de « BR2 » est quant à elle uniquement satisfaite par la vapeur provenant de la centrale et le refroidissement de « BR1 » se fait uniquement avec de l'eau froide provenant de la même centrale.

La structure de la recette est alors donnée par la figure 4.24 en utilisant la représentation ERTN. Les connexions avec la centrale d'utilités se font au niveau des états « MPS » et « EAU » de la même figure, lesquels représentent respectivement la vapeur à moyenne pression et l'eau

froide. Les données relatives à la campagne sont les mêmes que dans le cas précédent, c'est à dire, 160 tonnes de produits sont à réaliser en un minimum de temps. Les consommations en utilités externes sont également les mêmes que dans le cas précédent. Ainsi, lorsque les réacteurs consomment de la vapeur, celle-ci est fournie à un débit de 1.05 [t/h] et lorsque les réacteurs consomment de l'eau pour le refroidissement, cet utilité est fournie à un débit constant de 20 [m<sup>3</sup>/h]. Concernant la consommation en carburant au niveau de la chaudière, elle est identique au cas précédent, les consommations en électricité, quant à elles, ne sont pas prises en compte dans cet exemple.

Les coefficients de durée sont identiques à ceux spécifiés dans le § 4.4.1.2 page 152. Les puissances fournies ou consommées par chaque phase sont alors déterminées en fonction de l'énergie nécessaire par chaque phase et par la durée de celle-ci. Des mesures ont été réalisées suite à l'exécution du modèle de simulation d'un réacteur en faisant varier la taille de lot et en calculant l'énergie et la durée requise par chaque phase. Sachant que les deux réacteurs sont équivalents, les énergies instantanées produites ou consommées par chaque phase sont présentées sur la figure 4.25. Ainsi lors des phases de chauffe, les deux réacteurs consomment une puissance équivalente à :

$$UI_{T2,n} = 0.4209 \cdot W_{T2,n} + 0.0177 \cdot B_{T2,n} + 0 \cdot d_{T2,n} \quad \forall n \in N$$

$$UI_{T7,n} = 0.4209 \cdot W_{T7,n} + 0.0177 \cdot B_{T7,n} + 0 \cdot d_{T7,n} \quad \forall n \in N$$

Lors des phases de refroidissement, ces consommations deviennent :

$$UI_{T4,n} = 0.1998 \cdot W_{T4,n} + 0.0285 \cdot B_{T4,n} + 0 \cdot d_{T4,n} \quad \forall n \in N$$

$$UI_{T9,n} = 0.1998 \cdot W_{T9,n} + 0.0285 \cdot B_{T9,n} + 0 \cdot d_{T9,n} \quad \forall n \in N$$

Ces valeurs des puissances ainsi que celles des durées obtenues dans le § 4.4.1.2 sont obtenues uniquement pour des fonctionnement en utilités externes. A notre avis, elles permettent d'avoir un bon point de départ pour lancer la phase d'optimisation. Évidemment, les durées des phases lors des échanges thermiques sont sujettes à des variations dépendant à la fois de la température des flux en échange, mais également des conditions de chevauchement des tâches. Nous débuterons donc la procédure en assumant des fonctionnements uniquement avec les utilités externes.

#### 4.4.2.2 Ordonnancement

L'optimisation utilise les deux modèles d'ordonnancement (PLVM et PLVM/PPC). L'expression de la fonction objectif minimise les coûts fixes liés aux lancements des tâches et maximise la récupération énergétique (durée et amplitude de l'échange). Cette fonction objectif a la forme suivante pour le cas du modèle de PLVM :

$$\min z = 5 \cdot sf_{FP} + \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} ws_{in} - (5 \cdot \sum_{i \in I^{hex}} \sum_{n \in N} bs_{in} + 5 \cdot \sum_{i \in I^{hex}} \sum_{n \in N} d_{in})$$

Cependant, pour le cas du modèle hybride, le critère associé à la maximisation de la durée des échanges est omis, car le problème maître ne gère pas le séquencement des tâches. Il existe donc une différence de valeur liée au dernier critère entre les valeurs des objectifs optimaux des deux modèles. Cette distinction vient s'ajouter à la différence de valeur liée à la perception différente des consommations d'énergie entre le problème maître du modèle hybride et le modèle de PLVM tel que discuté dans le cas d'application I.

Les résultats numériques de l'ordonnancement pour le cas d'application II sont alors résumés dans le tableau 4.3. On remarque d'après ce tableau que le modèle de PLVM nécessite

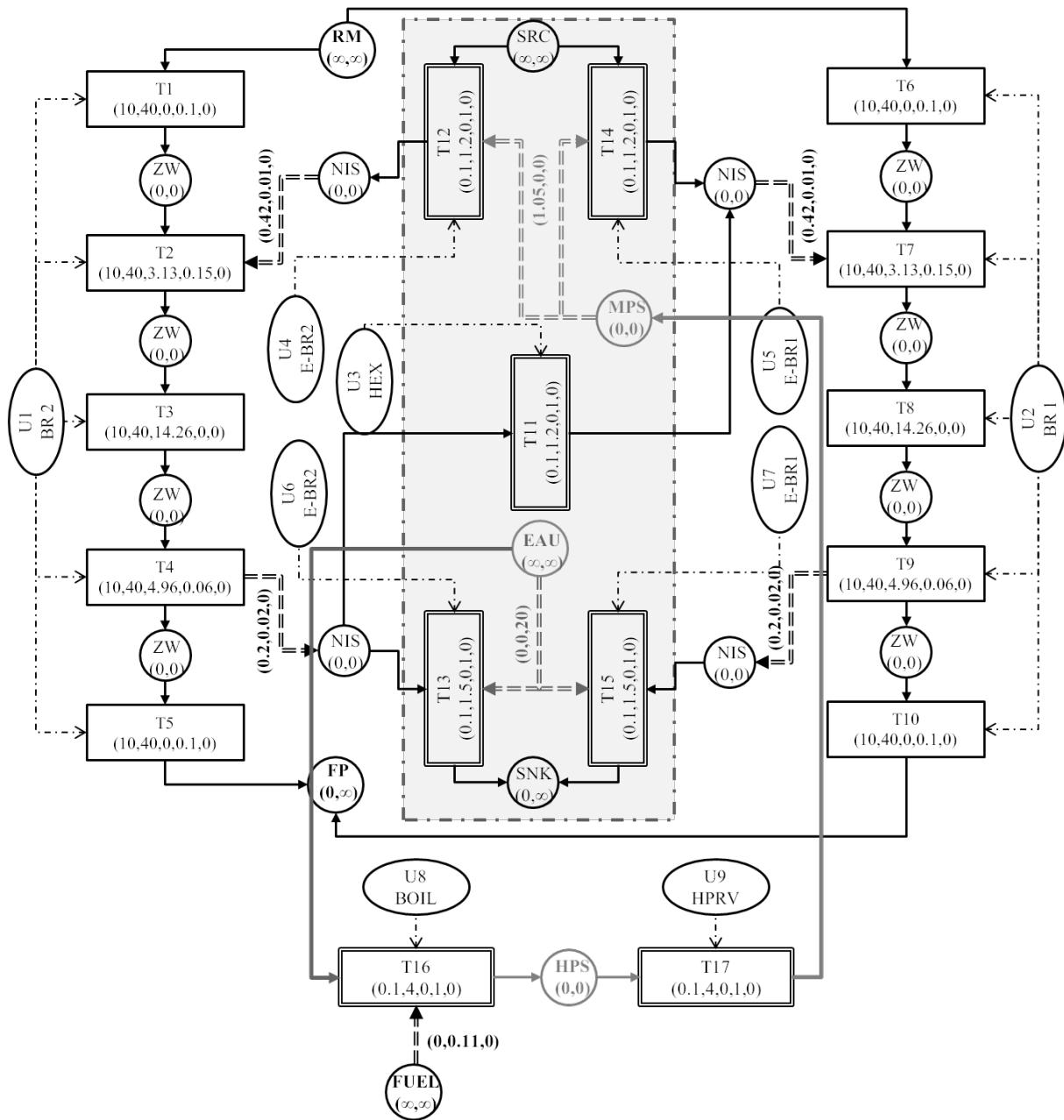


Figure 4.24 – Représentation ERTN de la recette du Cas d'Application II

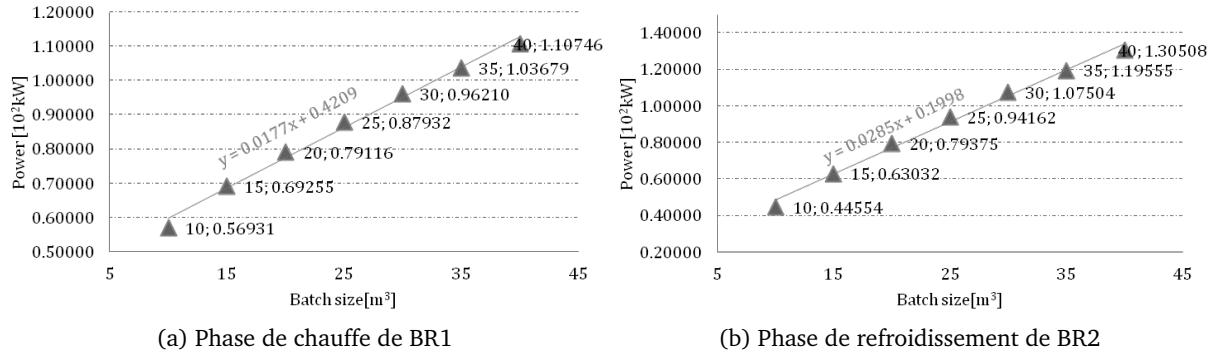


Figure 4.25 – Besoin en puissance des phases des réacteurs

13 itérations pour trouver l'optimum global au vu du critère d'optimalité énoncé ( $c_{max}=2$  et  $t_{max}=1200$  sec.), le deux itérations supplémentaires ne sont pas présentés dans le tableau. Tandis que le modèle hybride converge au bout de 8 itérations avec  $c_{max} = 3$ . On remarque également le temps mis par chaque instance permettant de conclure sur la rapidité du modèle hybride à fournir une solution optimale. La solution optimale du modèle de PLVM est donc obtenue à l'itération 11 avec une tolérance d'optimalité de 71.7 %, tandis que la solution optimale du modèle hybride est obtenue à l'itération 5.

Les diagrammes de Gantt des solutions optimales des deux approches sont donnés sur la figure 4.26a et 4.26b. La différence de valeur entre les deux solutions optimales correspond au critère lié à la durée des échange formulé dans la fonction objectif du modèle de PLVM et non formulé dans le modèle hybride. On remarque également sur ces figures que les durées des échanges sont équivalentes pour les deux approches mais que la durée du plan d'exécution est légèrement inférieur (meilleur) pour le modèle de PLVM. En effet pour le PLVM le makespan est de 99h contre 101h pour le modèle hybride, cette différence est due au fait que le modèle hybride nécessite la synchronisation au lancement des tâches devant échanger de l'énergie. Dans le cas du modèle de PLVM, cette contrainte n'est pas obligatoire et les échanges peuvent avoir lieu en cours d'exécution. Cette vision globale du problème donne une supériorité au modèle de PLVM face au modèle hybride. Concernant les consommations en termes d'énergie, le sous problème du modèle hybride permet d'obtenir le profil de la figure 4.26c, on remarquera à travers cette figure que les consommations en quantités d'utilités sont les mêmes que ceux fournies par le modèle de PLVM (valeurs des tailles de lot des tâches  $T_{16}$  et  $T_{17}$  directement lisibles sur le diagramme de Gantt de la figure 4.26a) et que seules les dates d'occurrence des besoins diffèrent

It.	PLVM ( $c_{max}=2$ , $t_{max}=1200$ s)				PLVM/PPC ( $c_{max}=3$ )			
	N	Obj.(\$)	Time(s)	gap (%)	N	Obj.(\$)	Time(s)	#Cuts
1	12	877.49	1.4	0.00	10	877.5	0.42	0
2	13	877.50	7.0	0.00	11	873.4	0.51	0
3	14	851.95	22.9	0.00	12	873.4	0.51	0
4	15	847.85	103.7	0.00	13	873.4	0.45	0
5	16	843.75	423.8	0.00	14	869.3	0.43	0
6	17	817.31	638.6	0.00	15	869.3	0.45	0
7	18	813.21	>1200	9.26	16	869.3	0.49	0
8	19	810.88	>1200	32.4	17	869.3	0.45	0
9	20	806.83	>1200	47.5	-	-	-	-
10	21	802.68	>1200	55.9	-	-	-	-
11	22	796.82	>1200	71.7	-	-	-	-

Tableau 4.3 – Résultats de l'ordonnancement du Cas d'Application II

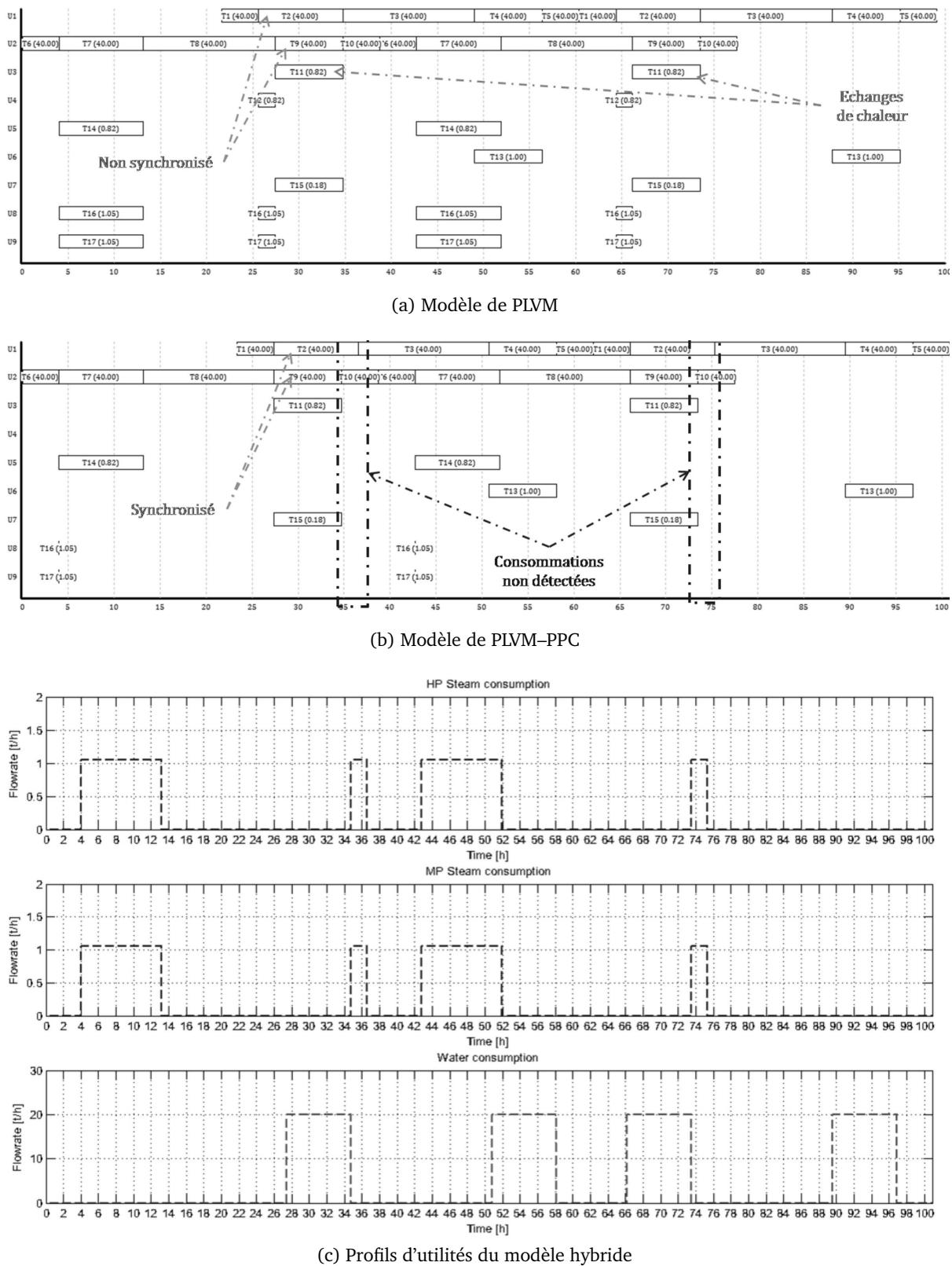


Figure 4.26 – Résultats de l'ordonnancement du Cas d'Application II

entre les deux modèles.

La différence entre les solutions optimales du modèle de PLVM et du modèle hybride réside donc sur la différence entre les délais d'exécution du plan (makespan). De ce fait, le modèle de PLVM est supérieur en qualité par rapport au modèle hybride mais l'effort de calcul développé par les deux modèles favorise l'utilisation du modèle hybride qui fournit une solution proche de l'optimal en un temps de calcul quasiment instantané.

#### 4.4.2.3 Simulation

La simulation du procédé comprenant la centrale d'utilité (cogénération), le réseau d'échangeur et l'atelier de production se fait en deux temps, de façon identique au cas d'application précédent. Dans un premier temps, l'atelier ainsi que le réseau d'échangeur est simulé jusqu'à l'obtention de la solution finale. Ensuite, les demandes en termes d'énergie sont transmises au modèle de simulation de la centrale pour être satisfaites<sup>4</sup>. Lorsque celles-ci sont transmises au modèle de simulation de l'atelier et du réseau d'échangeur, les résultats relatant des températures au niveau des réacteurs sont représentés sur la figure 4.27a. On pourra constater sur ces figures que les échanges de chaleur existent bien aux moments attendus entre les deux réacteurs (2 activations de l'échangeur de chaleur), mais que la durée des échange est différente de celles fournies par les résultats de la phase d'ordonnancement. Cette conséquence est due au fait que pendant le premier échange entre BR1 et BR2, la durée de la phase de chauffe de BR2 a diminué et la durée de la phase de refroidissement de BR1 a augmenté. Cette situation est clairement montrée par les courbes correspondantes à la température des deux réacteurs (figure 4.27a) en comparant les situations avec échange et celles sans. De ce fait, la durée globale de l'ordonnancement de même que les consommations d'utilités au niveau de la centrale de cogénération varient de celles fournies par la phase d'optimisation.

On assiste donc à une consommation plus importante en carburant et en eau, comparée à ce qui était prévue par l'ordonnancement au niveau de la centrale, justement à cause de cette variation. Cette affirmation est observable sur la figure 4.27b où la consommation en carburant atteint 3.5 [m<sup>3</sup>] pour la campagne.

Afin de minimiser cette consommation, il est possible d'affiner le modèle d'ordonnancement afin de prendre en compte les problèmes soulevés précédemment. Cependant, il est difficile d'intégrer la notion de température au niveau du modèle d'ordonnancement de telle sorte que modèle d'ordonnancement puisse anticiper les variations (positives ou négatives) de la durée des phases lors des échanges. Face à cette situation, une itération supplémentaire produirait au mieux une amélioration moindre et au pire une solution totalement éloignée de celle obtenue à ce stade. Afin d'intégrer une logique à la démarche, il est également possible de réaliser directement une correction au niveau de la simulation, dit autrement, il est aussi possible d'exploiter la flexibilité de la simulation. En effet, suite à l'observation des résultats fournis par la simulation et principalement ceux relatifs aux dates de lancement des réacteurs, il est possible de maximiser l'échange d'énergie au lancement des lots N°2 en décalant le lancement du deuxième lot sur le réacteur BR2. Autrement dit, nous créons un temps d'attente entre les deux lots du deuxième réacteur. La valeur précise de cet offset peut être obtenue en analysant les résultats précédents et correspond à un décalage de 5.91 [h] afin de permettre le lancement au même moment des phases devant échanger de l'énergie. Lorsque cette solution est soumise en simulation, le résultat obtenu est donné par la figure 4.28, sur laquelle on pourra observer l'amélioration nette des échanges d'énergie mais également la diminution de la consommation en carburants qui s'élève finalement à environ 3 [m<sup>3</sup>]. Notons de plus que les durées des échanges maximales ont été atteintes au vu des contraintes technologiques associées à l'échangeur de chaleur (différence de température minimale  $\Delta T_{min} = 10$  [K]).

4. Nous traitons au niveau de la simulation, les solutions fournies par le modèle hybride.

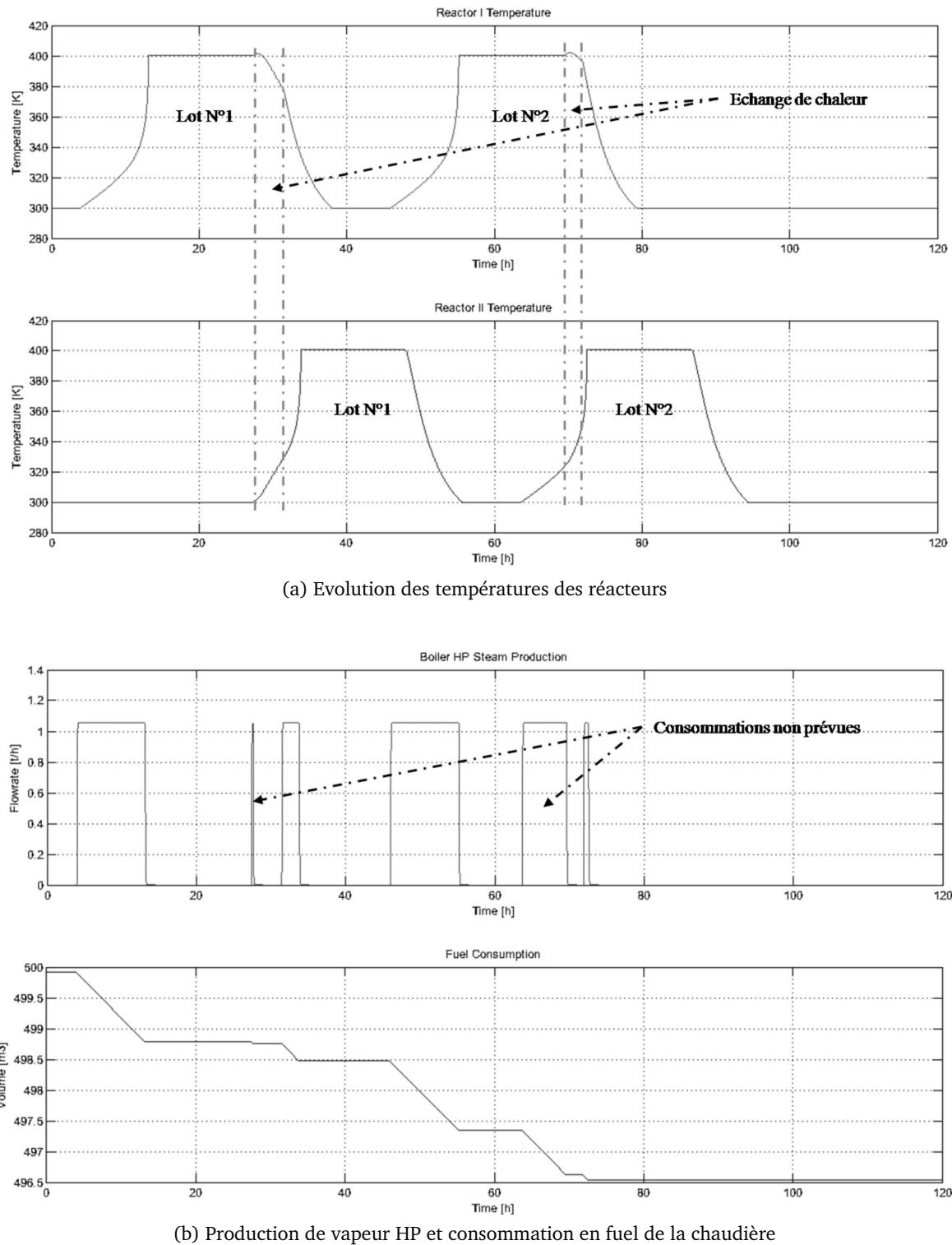


Figure 4.27 – Résultats initiaux de la simulation du Cas d’Application II

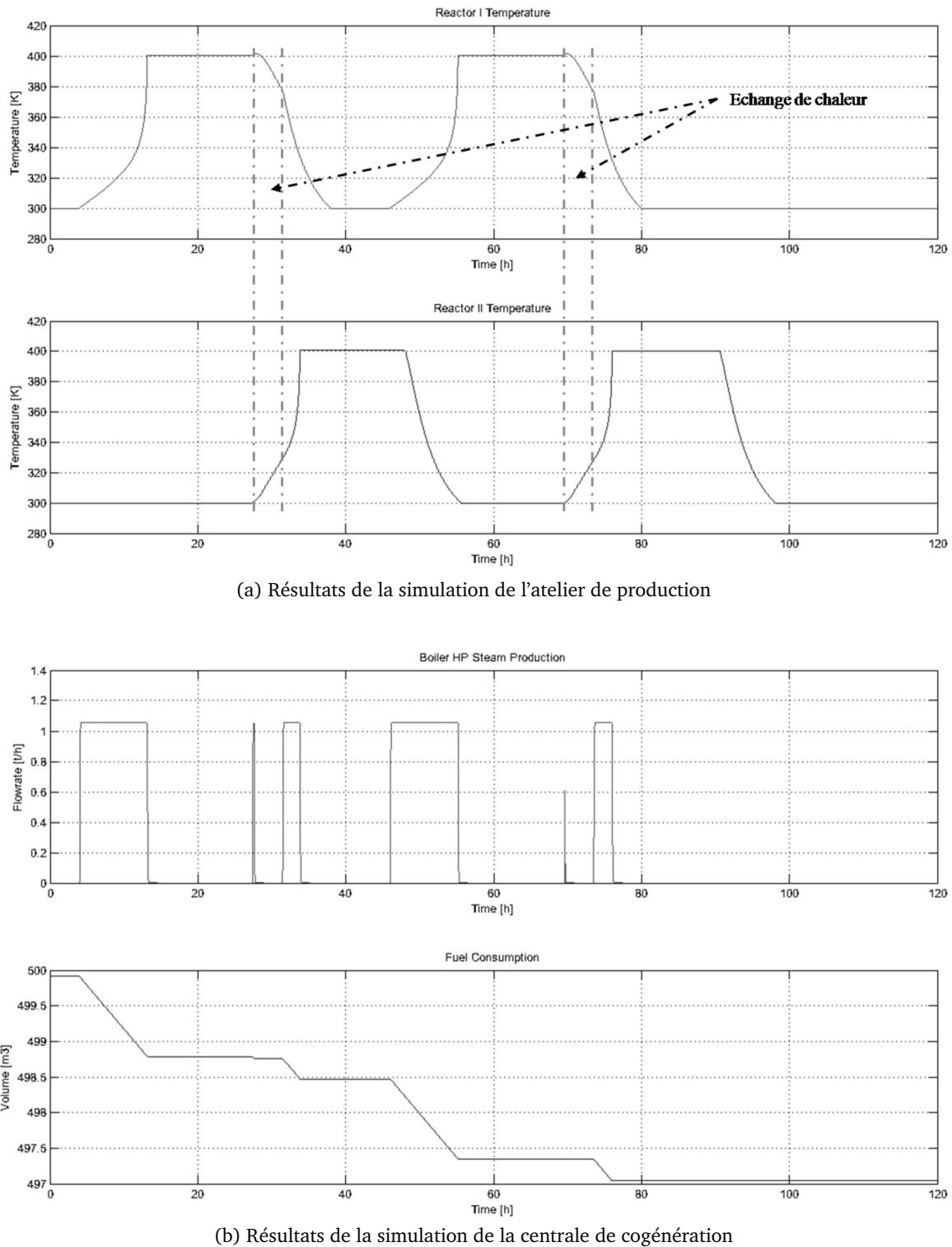


Figure 4.28 – Résultat final de la simulation du Cas d'Application II

PLVM/PPC (cmax=1, tmax=120s)				
It	N	Obj.(\$)	Time(s)	#Cuts
1	11	1092.70	4.8	4
2	12	1092.70	120.0	-

Tableau 4.4 – Résultats de l'ordonnancement du Cas d'Application III

#### 4.4.2.4 Bilan

L'application du couplage optimisation-simulation sur le cas de l'intégration énergétique directe a démontré que la démarche permettait de diriger la simulation vers l'obtention d'une solution minimisant les consommations en utilités externes. Même si, comme on a pu le voir, le besoin d'une analyse à posteriori s'est avéré nécessaire notamment pour l'ajustement des dates de lancement, le couplage a permis de réduire considérablement le nombre de configuration d'ordonnancement retenu en vue de la simulation. Il a également permis de détecter rapidement les causes d'inefficacité en terme de pilotage du procédé. On peut donc conclure que lorsque le couplage est mis en œuvre, de bonnes solutions sont obtenues rapidement, laissant ainsi au décideur, le temps d'évaluer les alternatives permettant d'améliorer la qualité du plan de production suivant l'objectif visé.

#### 4.4.3 Cas d'application III : Récupération indirecte d'énergie

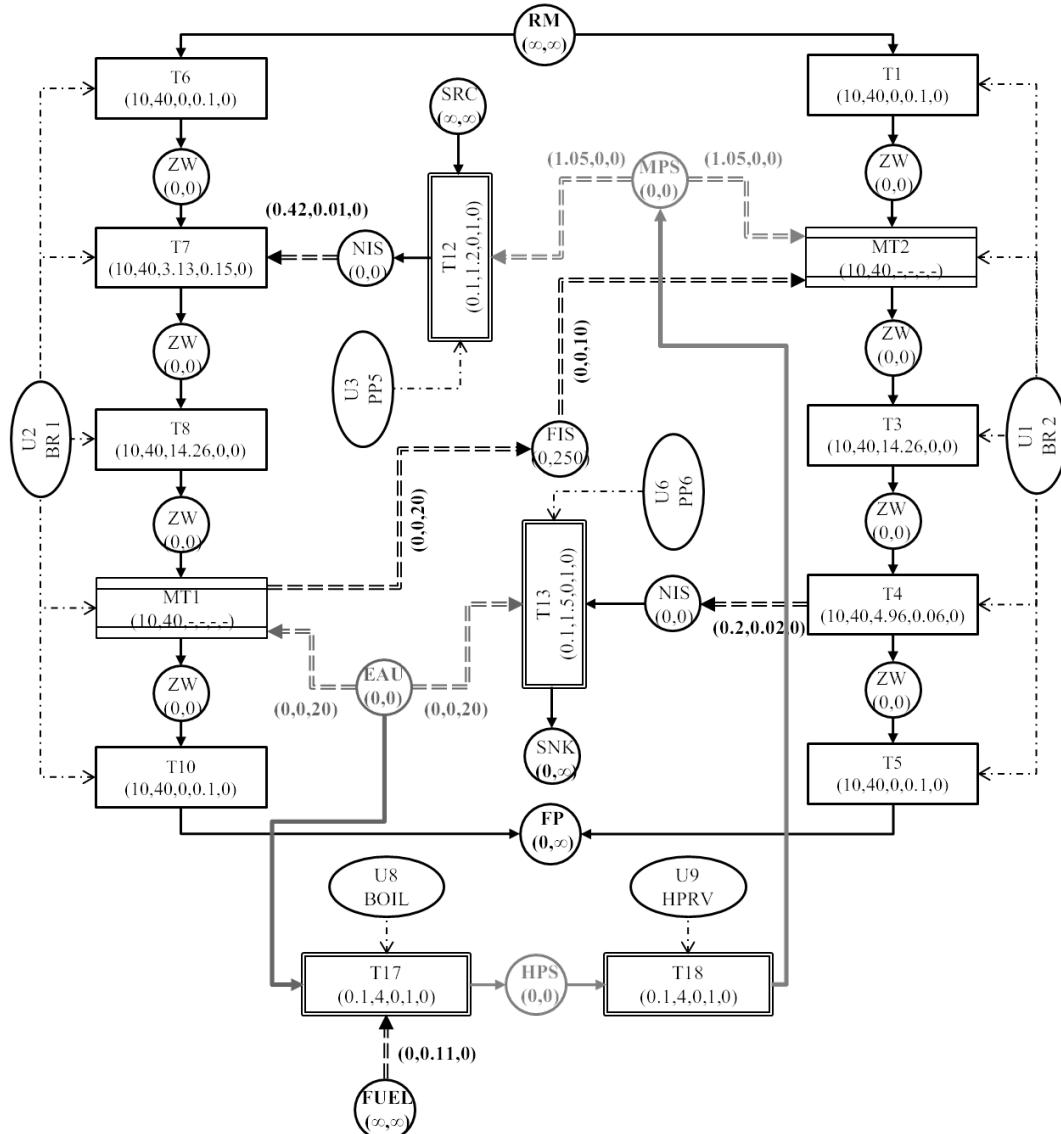
Notre dernier cas d'application concerne le stockage d'énergie. Le procédé étudié étant le même que précédemment, à l'exception du fait que le réseau d'échangeur est dorénavant composé de dispositifs de stockage thermique. Plus précisément, elle comporte deux cuves de stockage (chaud et froid) en communication avec les réacteurs. Les consommations en utilités lorsqu'aucune récupération n'est possible, sont fournies par la centrale de cogénération qui assure également la fourniture des utilités de chauffe et de refroidissement nécessaires au niveau du système de stockage.

##### 4.4.3.1 Recette du procédé

La recette du procédé au niveau de la centrale de cogénération étant la même que dans le cas d'application II, l'atelier de production est composé des deux réacteurs discontinus et des cuves de stockage thermique. La recette de fabrication dans le formalisme ERTN est alors représentée par la figure 4.29a sur laquelle on peut observer que lors de la phase de chauffe du réacteur « BR2 », cette dernière consomme la cuve chaude (état FIS de la même figure). Le réacteur « BR1 », quant à lui, débite dans la cuve chaude lors du refroidissement du dit réacteur. On peut donc conclure que le réacteur « BR1 » est le courant chaud (à refroidir) et le réacteur « BR2 » est le courant froid (à chauffer). On pourra également observer la présence de deux macro-tâches « MT1 » et « MT2 » représentant respectivement la phase de refroidissement du réacteur « BR1 » et la phase de chauffe du réacteur « BR2 ». Ces macro-tâches dont la structure est fournie par la figure 4.29b, modélisent les deux modes de fonctionnement des réacteurs, à savoir pour le cas de « MT1 » associé à « BR1 », le fonctionnement en utilité *externe* à travers les tâches  $T_9$  et  $T_{14}$  qui consomment l'eau de refroidissement provenant de la centrale d'utilité. Le cas du fonctionnement en utilité *interne* est illustré par le couple de tâches  $T_{20}$  et  $T_{16}$  qui représentent la production d'énergie dans la cuve de stockage thermique. Ce même raisonnement est réalisé pour le cas de « MT2 » représentant la phase de chauffe du réacteur « BR2 ».

Ce besoin de dissocier les modes de fonctionnement s'est fait ressentir à cause des caractéristiques (durées et puissances) différentes des tâches modélisant ces fonctionnements.

Les coefficients de durée, de consommation/production d'énergie pour les différentes phases



(a) Représentation du procédé

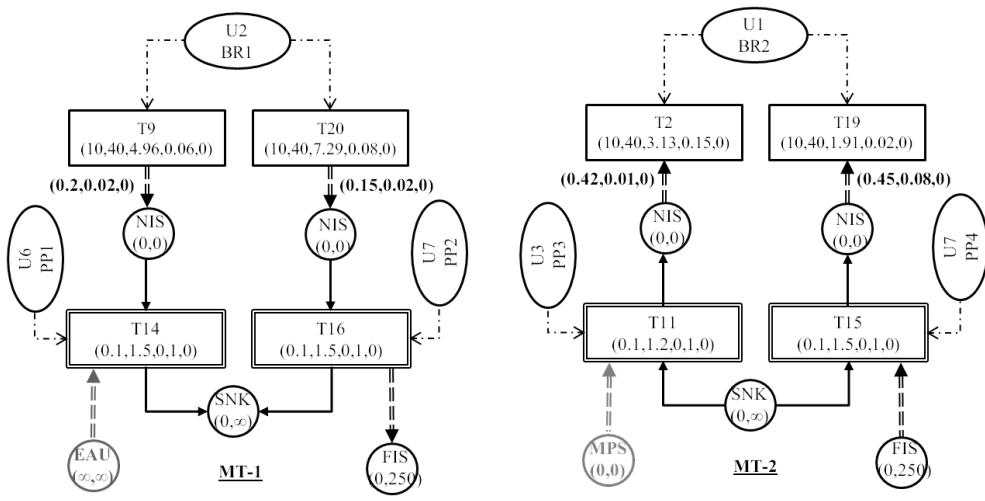


Figure 4.29 – Représentation ERTN de la recette du Cas d'Application III

des réacteurs sont les mêmes que dans le cas d'application I, nous n'y reviendrons donc plus. Cependant, lorsque les réacteurs sont en communication avec les cuves de stockage thermique, alors le réacteur « BR1 » produit la cuve chaude à un débit de  $20 [m^3/h]$ , ce débit étant le même que lors du refroidissement avec une utilité externe. Pour le cas de la phase de chauffe du réacteur « BR2 », cette consommation dans la cuve chaude est réalisée à un débit constant de  $10 [m^3/h]$ . Lorsque ces paramètres sont soumis au simulateur, les variations de la puissance et de la durée des tâches en échange avec les cuves de stockage sont données par la figure 4.30. Lorsque ces valeurs sont traduites au niveau du modèle d'ordonnancement, elles correspondent aux paramètres de durée et de puissance des tâches  $T_{19}$  et  $T_{20}$ . Les caractéristiques des autres tâches sont les mêmes que dans les cas d'applications précédents.

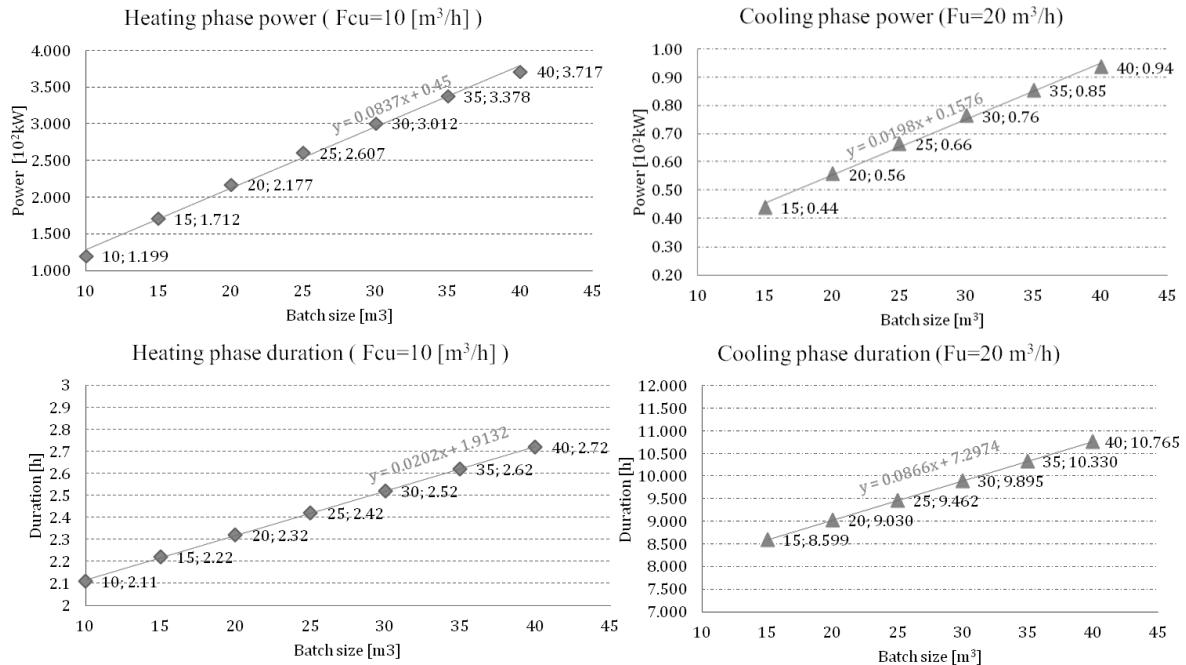


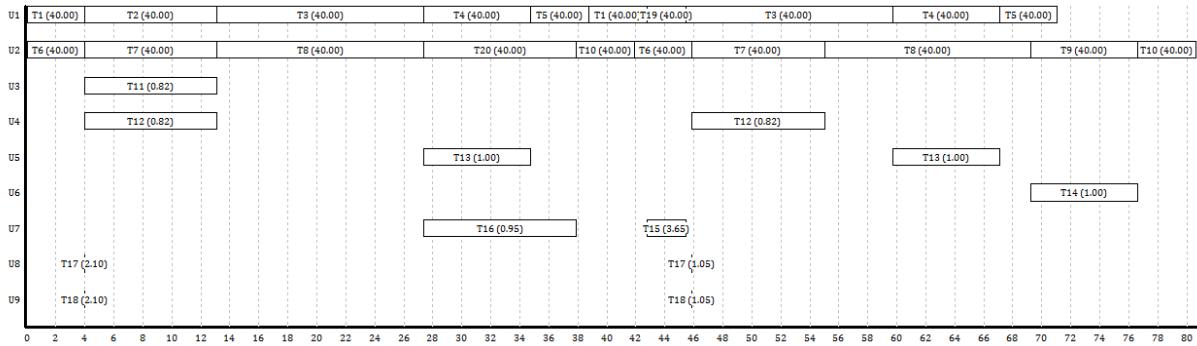
Figure 4.30 – Paramètres de durée et de puissance du Cas d'Application III

Les températures respectives de la cuve chaude et froide sont de  $410 [K]$  et  $295 [K]$ . Lors des charges de matière dans les cuves, ces températures sont maintenues à valeurs constantes (par régulation) à travers des utilités (vapeur à moyenne pression et eau glacée) fournies par la centrale. Néanmoins ces consommations ne sont pas prises en compte au niveau du modèle d'ordonnancement mais sont plutôt relégués au niveau de la simulation. De plus, nous assumons, dans cet exemple, que les stockages sont idéaux, autrement dit, nous ne considérerons pas les pertes d'énergie liées à l'environnement dans cet exemple.

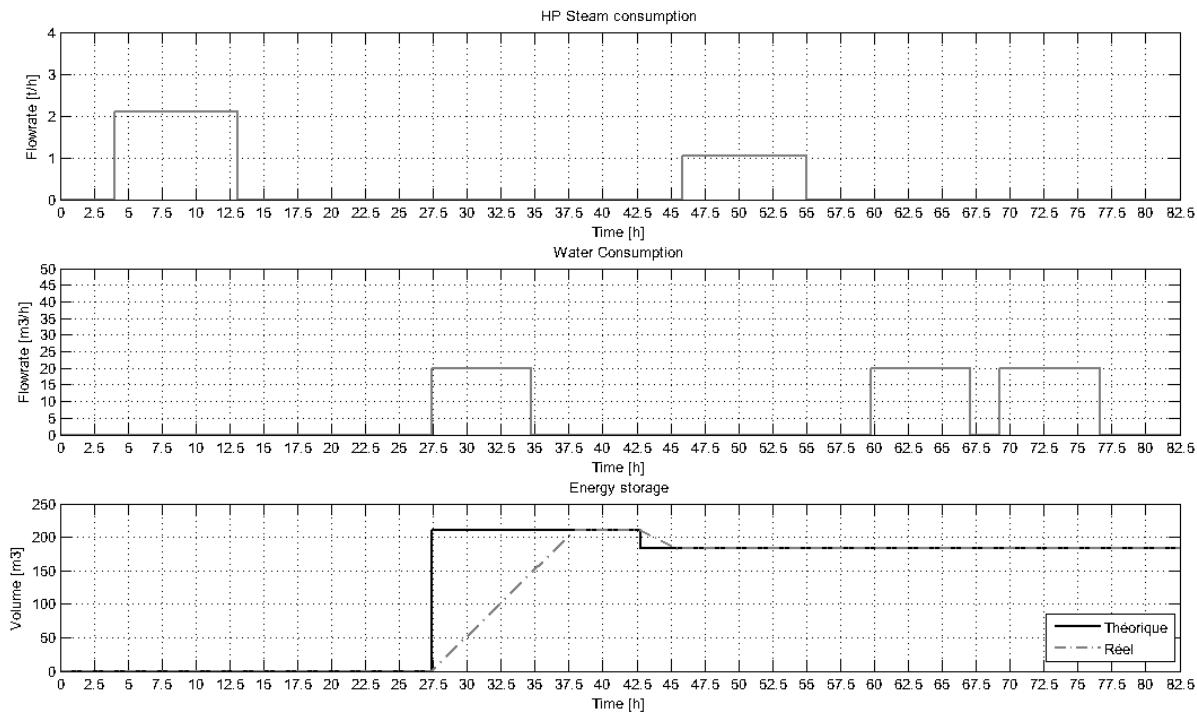
#### 4.4.3.2 Ordonnancement

L'ordonnancement du procédé s'effectue en lançant directement le modèle hybride de PLVM/PPC. La fonction objectif associée au problème d'intégration d'énergie indirecte consiste à minimiser la durée du plan de production tout en maximisant la récupération énergétique et en minimisant les consommations en eau et en carburant. L'expression générale de cette fonction objectif est la suivante :

$$\min \quad z = 5 \cdot sf_{FP} + plan - 5 \cdot \sum_{i \in I^{hex}} \sum_{n \in N} bs_{in} + 4 \cdot (s0_{Eau} - sf_{Eau}) + 200 \cdot (s0_{Fuel} - sf_{Fuel})$$



(a) Diagramme de Gantt



(b) Profils d'utilisation des ressources

Figure 4.31 – Résultats de l'optimisation du Cas d'Application III

Lorsque l'optimisation est lancée avec des paramètres de convergence équivalents à  $cmax$  égal à 1 itération et  $tmax$  égal à 120 secondes, les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4.4. On pourra observer d'après ce tableau que le modèle converge au bout de 2 itérations. La première itération fournit directement la solution optimale du problème. La seconde itération, quant à elle, sert à vérifier l'optimalité de la solution à l'itération précédente. Ainsi donc, lorsque la simulation est relancée pour la recherche d'une meilleure solution pendant la durée maximale  $tmax$ , aucune solution de meilleure qualité n'est obtenue. Cette solution est donc optimale pour le nombre de lancement (nombre de lots) de réacteurs donnés sur la figure 4.31a. On remarquera sur cette figure que le réacteur « BR1 » (ressource U2) décharge dans la cuve de stockage thermique lors du lancement du premier lot, cette énergie est ensuite récupérée par le lot numéro 2 du réacteur « BR2 » (ressource U1). Les consommations correspondant à la solution optimale du problème d'ordonnancement sont données sur la figure 4.31b. On peut le voir sur cette figure que la cuve de stockage est initialement vide, une récupération d'énergie dès le

lancement du premier lot sur le réacteur « BR2 » n'est donc pas possible. De même, le niveau de stock final dans la cuve chaude ne permet pas de récupérer l'énergie dégagée par le deuxième lot de « BR1 ». La configuration fournie par le diagramme de Gantt de la figure 4.31a est donc optimale pour cette instance.

#### 4.4.3.3 Simulation

Lorsque le diagramme de Gantt de la figure 4.31a est soumis au simulateur de l'atelier de production, les résultats fournis par celui-ci sont donnés sur la figure 4.32. Lorsque cette solution est transmise à la centrale de cogénération, les résultats de ce dernier sont donnés sur la figure 4.33.

Ces résultats permettent de conclure sur la fidélité de la solution fournie par le modèle d'ordonnancement. Il est donc possible d'estimer la quantité réelle de carburant consommée pendant la campagne de production. Dans le cadre de cet exemple, cette consommation s'élève à environ 3.75 [ $m^3$ ]. On constate de ce fait que la consommation est plus importante que dans le cas de récupération directe d'énergie, ceci est dû principalement à l'apport d'énergie nécessaire au maintien des cuves de stockage en conditions opératoires.

A ce sujet, les profils de volume, de température et de consommation en utilités au niveau des cuves de stockage sont donnés sur la figure 4.34, sur laquelle on pourra observer l'effet des régulations de température au niveau des cuves. Ces régulations utilisent des régulateurs PI classiques et injectent de la vapeur à moyenne pression lorsqu'un besoin d'augmenter la température se manifeste ou de l'eau glacée provenant de la centrale, lorsqu'il est nécessaire de refroidir la température de la cuve.

On remarque donc lors des charges de matière au niveau des cuves que la température de celles-ci varient. Cette situation est due au fait que la matière arrivant au niveau de la cuve n'est pas nécessairement à la température opératoire de la cuve entraînant de ce fait une hausse de température pour le cas de la cuve froide et une baisse pour le cas de la cuve chaude. Pour répondre à ces variations, les régulateurs évaluent instantanément la température de la cuve et corrigent les déviations quand celles-ci se présentent.

#### 4.4.3.4 Bilan

La mise en œuvre de la démarche proposée sur le cas de la récupération indirecte d'énergie a permis de mettre en évidence le fait que les consommations fournies par l'ordonnancement sont une estimation relativement précise des consommations réelles du procédé, cependant, certaines situations relatives à la prise en compte de la température sont difficilement intégrables dans le modèle d'ordonnancement. Un soin particulier devra donc être réalisé lors de la considération de ces notions de température et spécialement lorsque les quantités d'énergie doivent être estimées au niveau de l'optimisation.

## 4.5 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons eu la possibilité d'éprouver la démarche sur des cas d'applications de tailles relativement modestes. Cette analyse a permis de mettre en évidence l'obtention de solutions de bonnes qualités en un temps relativement faible. Et ceci autant, du point de vue de la conduite que de la réponse du procédé. Un fait important est cependant à noter, les solutions obtenues par la phase d'optimisation sont loin de suffire pour prouver l'optimalité du planning lorsque celui-ci est confronté au procédé réel. La validation par simulation semble donc être une bonne alternative pour minimiser l'écart entre la planification et le pilotage temps réel du procédé. Notons cependant que les informations partagées entre ces deux fonctions jouent

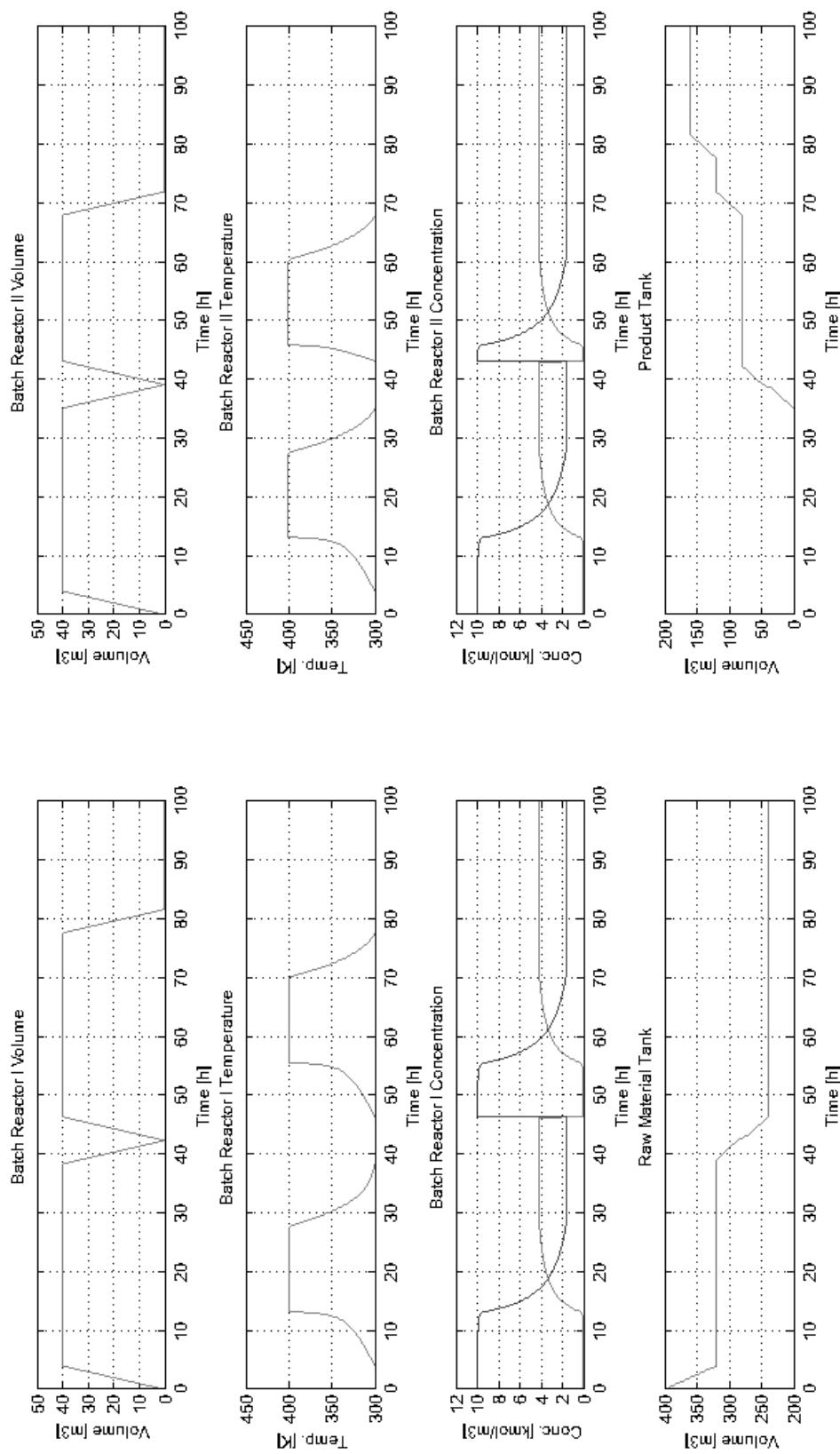


Figure 4.32 – Résultats de la simulation de l'atelier du cas d'application III

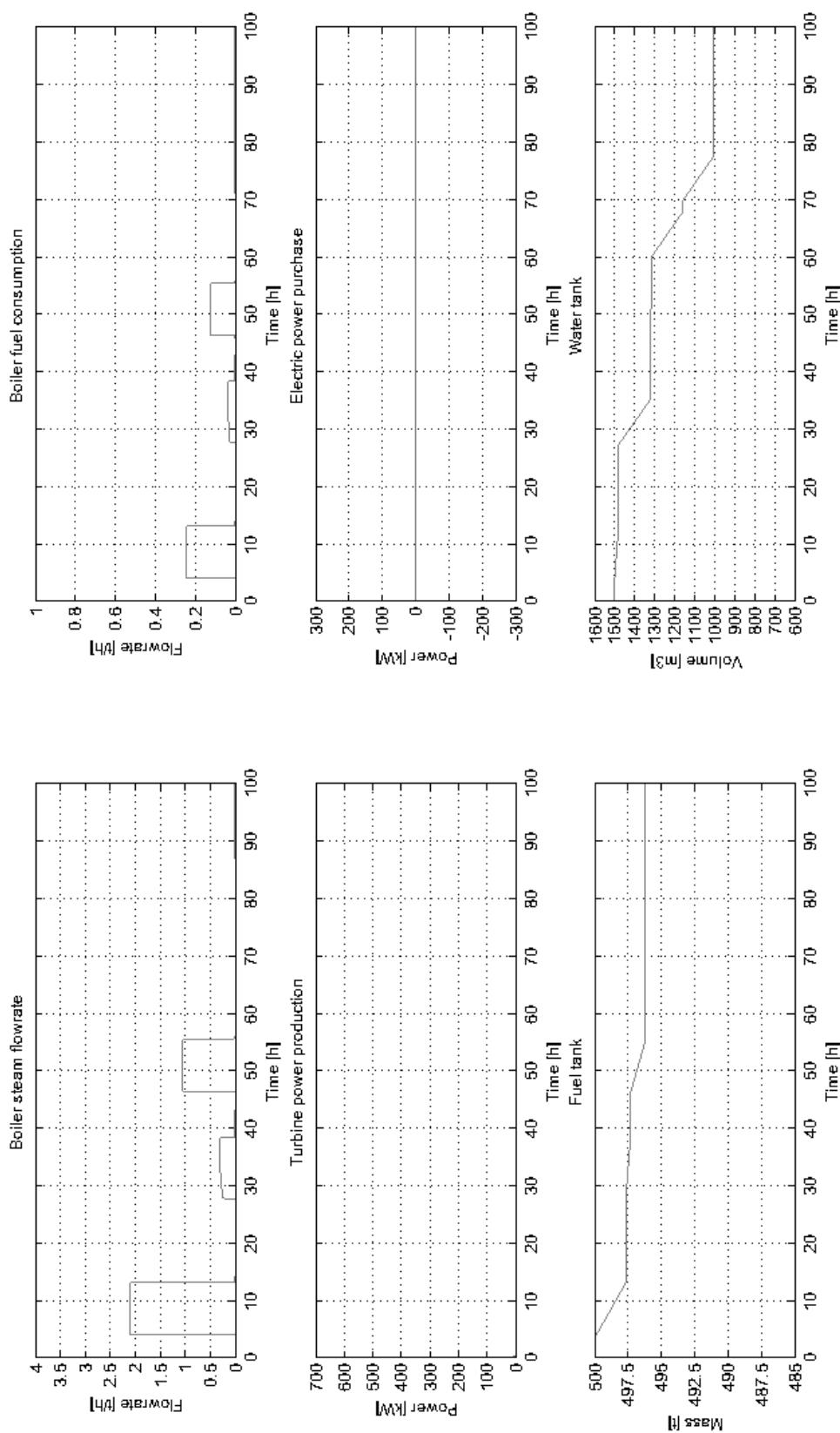
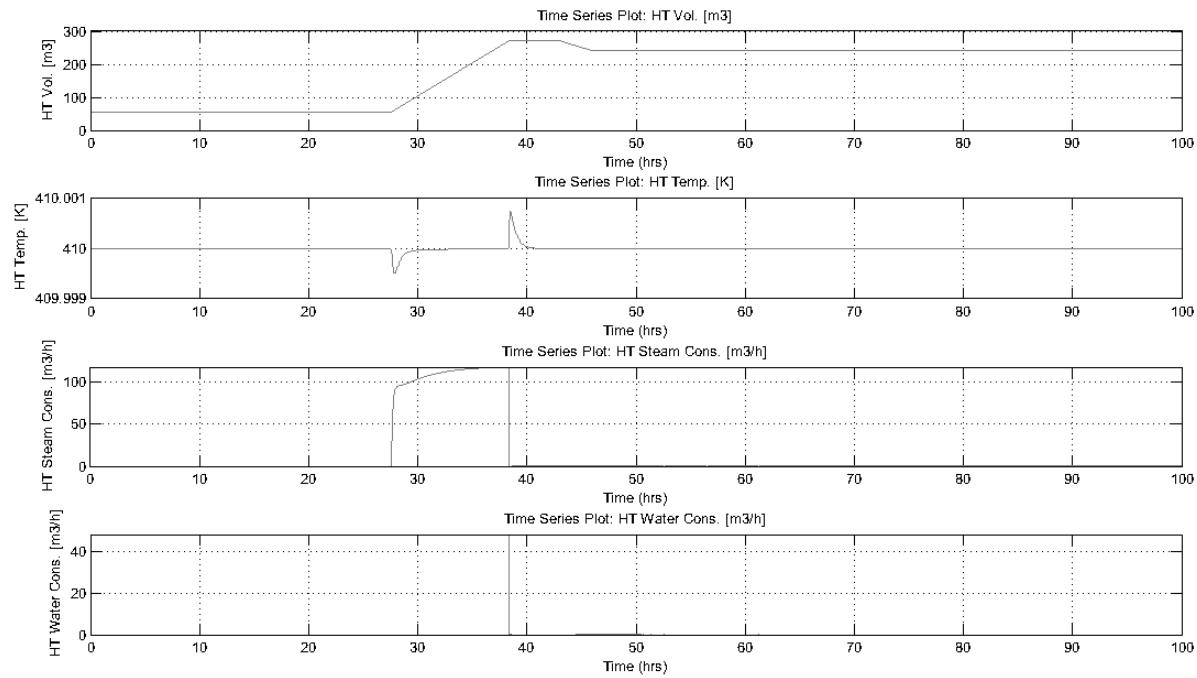
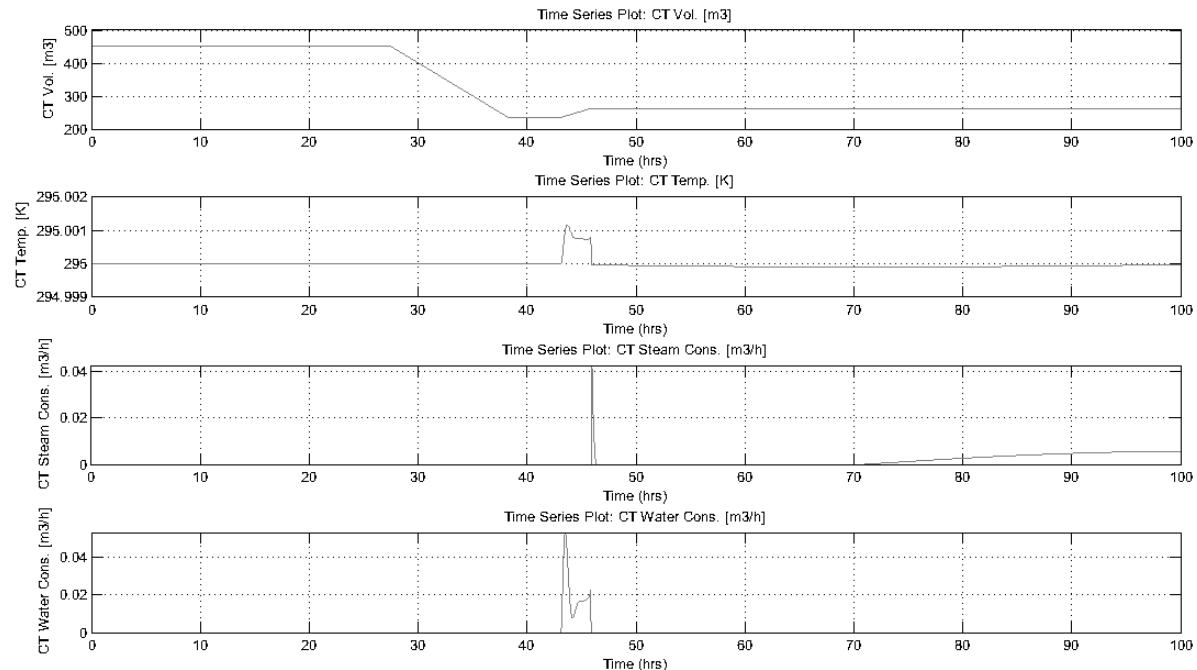


Figure 4.33 – Résultats de la simulation de la centrale du cas d’application III



(a) Résultats de la simulation de la cuve chaude



(b) Résultats de la simulation de la cuve froide

Figure 4.34 – Résultats de la simulation des cuves de stockage thermique

un rôle important dans l'efficacité de la démarche. En effet, les points de vue partagés par la planification et par le pilotage en temps réel coïncident rarement, en ce sens, l'introduction d'une étape de simulation mettant en accord les deux parties permet de créer un pont entre ces deux types de fonctions de l'entreprise et permet d'introduire plus délicatement, à travers la supervision, les notions utilisées en planification au plus bas niveau de la chaîne de production.

---

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

**N**OUS avons étudié dans le cadre de cette thèse, la conduite des procédés discontinus sous contraintes d'énergie. L'approche proposée adopte une solution basée sur une vision à court et à moyen terme du pilotage des unités de production discontinues lorsque l'énergie est considérée comme une ressource critique. La solution en question fait donc appel à l'adoption de bonnes pratiques lors du pilotage de la production. Parmi ces bonnes pratiques, l'application du recyclage énergétique, l'exploitation des centrales de cogénération et le pilotage intégré de la fabrication et du fonctionnement de la centrale d'énergie ont été retenus afin de rationaliser la consommation énergétique lors d'une campagne de production.

La méthodologie d'aide à la décision proposée couple un module d'optimisation avec un module de simulation. Le module d'optimisation s'attèle à déterminer un ordonnancement du procédé et de la centrale d'utilités (centrale de cogénération), de telle sorte que la solution finale maximise la récupération d'énergie thermique au sein du site et minimise les consommations en énergie externes (achats de carburants, d'électricité provenant d'un fournisseur externe etc.). Les modèles d'ordonnancement proposés dans nos travaux ont été conçus de façon générique afin de pouvoir s'adapter à n'importe quel secteur d'activité (biens ou services) et afin de représenter uniformément les contraintes liées aux ressources cumulatives.

Le premier modèle d'ordonnancement, utilisant la programmation linéaire en variables mixtes (PLVM), est basé sur la formulation à temps continu *Unit Specific Event* proposée par IERAPETRITOUE et FLOUDAS [72]. Cette formulation, basée sur la notion d'événement spécifique à chaque appareil, permet l'utilisation d'un nombre restreint d'événements — et donc d'un nombre restreint de variables binaires — pour la résolution des problèmes d'ordonnancement des procédés discontinus ayant une structure en réseau. Le formalisme de représentation ERTN proposé par THERY et al. [145, 146], a par ailleurs été utilisé dans nos travaux pour représenter le problème sous la forme d'un graphe. Cette représentation permet de représenter uniformément les différentes composantes du procédé (atelier, réseau d'échangeurs, centrale) ainsi que leurs interactions. Les résultats obtenus suite à l'exécution du modèle de PLVM ont permis d'obtenir les résultats escomptés, cependant, l'augmentation de la taille du problème causée en partie par la complexité des différents sous-systèmes et par le besoin d'affinement des opérations afin de représenter le comportement voulu, a conduit le modèle de PLVM à dépenser un temps important pour la résolution des instances considérées.

Afin de lever cette limitation, un second modèle a été développé dans nos travaux. Ce second modèle est un modèle hybride couplant la programmation linéaire en variables mixtes et la programmation par contraintes (PPC). Ce couplage a été retenu afin d'exploiter les avantages respectifs des deux formalismes sur les différents sous-problèmes rencontrés lors de résolution du problème d'ordonnancement. Ce second modèle utilise le même formalisme ERTN que précédemment, et adopte une structure maître-esclave pour faire communiquer les deux approches de modélisation. La procédure de décomposition présentée dans cette thèse est alors basée sur

la « décomposition de Benders hybride » telle qu'elle est présentée dans HOOKER et OTTOSSON [65]. Cette décomposition permet, de diviser le problème en sous-problèmes de tailles plus restreintes, moins gourmandes en temps, et d'exploiter efficacement la structure du modèle d'ordonnancement lorsque les sous-problèmes sont bien définis.

Le problème-maître qui est un problème d'optimisation est donc intégralement formulé en programme linéaire en variables mixtes. Il permet de déterminer les affectations optimales des tâches aux appareils, de déterminer les lancements minimisant les consommations d'énergie, de calculer le nombre et la taille de chaque lot et d'identifier les couplages optimaux entre les opérations échangeant de l'énergie. Le sous-problème, quant à lui, est formulé à l'aide de la programmation par contraintes. Ce dernier résout un problème de faisabilité et détermine le séquencement des différentes tâches transmises par le problème-maître sur chaque appareil du procédé. Le sous-problème vérifie également le respect des bilans massiques et énergétiques au niveau de chaque nœud de la représentation ERTN de l'exemple traité.

Les résultats des modèles d'ordonnancement sur des exemples illustrant de la conduite du procédé, de la centrale et de la récupération d'énergie, permettent de démontrer la supériorité, en termes de qualité de la solution, du modèle de PLVM face au modèle hybride. Cependant, l'avantage du modèle hybride réside dans le fait qu'il est capable de fournir une solution de bonne qualité, voire optimale, en un temps d'exécution relativement faible (entre 2 et 3 ordres de grandeurs en moins par rapport au modèle de PLVM). Le modèle hybride se comporte donc comme une heuristique pour le problème considéré.

Le deuxième volet du travail concerne la conduite de la simulation par un module d'ordonnancement. La validation par simulation, à travers des analyses de type « What-if », a été réalisée dans cette thèse afin d'adoindre une étape de supervision dans la conduite du procédé. En effet, le gap existant entre le pilotage temps réel et la planification peut être important et il est rare qu'un plan de charge fourni par la planification soit directement applicable. Les causes peuvent être nombreuses mais l'hétérogénéité et la précision des informations — modélisation simplifiée au niveau de la planification et modélisation détaillée au niveau de la simulation — y est pour beaucoup dans cet écart. Ainsi la création d'un couplage optimisation-simulation permet d'ajuster suffisamment le plan de production avant d'être envoyé au lancement.

Ce deuxième volet s'est donc consacré à développer, dans un premier temps, une bibliothèque de modèles de simulation des appareils d'une unité de production de PVC (chlorure de polyvinyle), de la centrale de cogénération et des dispositifs en charge de la récupération énergétique (échangeurs et dispositifs de stockage thermique). La modélisation est alors réalisée en modélisant séparément le comportement discret du comportement continu, puis en faisant en sorte de faire communiquer les deux modèles à travers des interfaces. Cette phase a été réalisée au sein de la plateforme numérique *Matlab*, en faisant communiquer le simulateur dynamique continu *Simulink* avec le simulateur discret *Stateflow* afin de représenter le comportement hybride des procédés discontinus.

Dans un second temps, une série de simulations unitaires a été réalisée afin d'estimer les paramètres du modèle d'ordonnancement. Cette estimation est effectuée en réalisant la simulation de chaque appareil du procédé (pris indépendamment et pris conjointement) tout en faisant varier les variables d'entrée des modèles de simulation. A partir des résultats obtenus, les paramètres linéarisés ont été transmis au modèle d'ordonnancement afin de permettre l'exécution de celui-ci.

Lorsqu'un résultat est obtenu au niveau du module d'optimisation, la communication entre la phase d'optimisation (ordonnancement) et la phase de simulation est alors réalisée en transférant les résultats du premier comme variables externes du second. Ce couplage permet d'une part, de valider les résultats fournis par l'optimisation et d'autre part, de réduire l'espace des solutions admissibles par optimisation. La procédure est alors réitérée, moyennant des ajuste-

ments tant au niveau de la simulation que de l'optimisation, jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante aux yeux du décideur.

Les résultats observés suite à l'application de la démarche sur un procédé de production de *Chlorure de Polyvinyle*, permettent de montrer les potentialités de l'approche tant au niveau de l'exploitation de la cogénération que de l'application de la récupération énergétique. Notons cependant que les hypothèses restrictives, telles que la connaissance des consommations énergétiques des différentes phases des réacteurs, ont favorisé la convergence de la procédure. Cependant, dans un contexte plus général, la convergence de la procédure dépend majoritairement des décisions prises par l'utilisateur au vu des résultats respectifs de la phase d'ordonnancement et de la phase de simulation. Ainsi, certaines situations peuvent se présenter où l'ajout d'une itération conduit à l'éloignement de la solution courante vis-à-vis de la configuration optimale fournie par la phase d'optimisation. Ces situations se présentent lorsque les ajustements sont réalisés au niveau de l'optimisation alors qu'ils devraient l'être au niveau de la simulation. D'autres situations nécessitent l'affinement de la représentation ERTN du problème en fonction du résultat de la phase de simulation et donc de l'ajout d'une itération supplémentaire entre optimisation et simulation. Finalement, la convergence de la procédure dépend donc de la complexité de l'instance traitée, des hypothèses sur les consommations d'utilités (données ou définies dans une certaine limite) et du degré de finesse des paramètres du modèle d'ordonnancement.

Ces travaux de recherche ouvrent alors les perspectives de recherche suivantes :

- Dans un futur proche, nos travaux seront orientés vers l'extension de la problématique abordée dans cette thèse sur des d'applications plus complètes levant les hypothèses restrictives formulées dans ces travaux. Ces améliorations devraient permettre d'intégrer d'une part l'estimation des consommations énergétiques dès la phase d'ordonnancement et d'autre part, de prendre en compte les aspects non couverts dans ce manuscrit (pertes thermiques, réactions exothermiques, topologie en réseau) ;
- Au niveau de l'optimisation, l'exploitation d'algorithmes hybrides tels que les matheuristiques [101], ou les métahéuristiques [20] devrait permettre de situer l'efficacité de l'approche proposée dans cette thèse lors du traitement de problèmes de tailles plus importantes. D'un autre côté, de récents travaux ont permis de conclure que l'application de la décomposition hybride lors du parcours de l'arbre de recherche, aussi connu sous le nom de Branch & Check [147] était plus efficace en temps de calcul que la décomposition de Benders hybride, il serait intéressant de vérifier si cette affirmation peut être généralisée au cas de l'ordonnancement des procédés discontinus sous contraintes de récupération d'énergie ;
- Au niveau de la simulation dynamique hybride, la conduite des systèmes assujettis à des variations d'états brusques peut également être envisagée. Parmi ces systèmes, nous nous intéressons plus particulièrement aux systèmes multi-énergie, autrement dit, ceux utilisant plusieurs sources d'énergies. A titre d'exemple on pourra citer les centrales hybrides couplant une source d'énergie traditionnelle avec une source d'énergie renouvelable, les véhicules hybrides ou tout autre système continu régit par une série de commutations ;
- Au niveau des applications possibles, l'exploitation de la récupération énergétique peut être généralisée à des applications non conventionnelles comme le pilotage des activités des structures collaboratives (chaines d'approvisionnement, internet-physique, collaboration inter-entreprises), la planification des parcs photovoltaïques, l'exploitation des réseaux intelligents ... et plus généralement toute structure en réseau pouvant être modélisée sous forme de graphe où les arcs peuvent véhiculer de la matière, de l'énergie, de l'information ou des services.

---

## GLOSSAIRE

---

**Cascade Analysis** Méthode d'analyse d'un procédé discontinu consistant à décomposer le procédé en intervalles de temps et à développer des cascades de chaleur dépendantes du temps. 36

**ERTN** Extended Resource Task Network. 40, 41, 83, 84, 86, 91, 94, 97, 98, 101–104, 112, 115, 119, 169, 178, 215

**FIS** Politique de stockage où un stockage intermédiaire à capacité finie est disponible. 66

**NIS** Politique de stockage où aucun stockage intermédiaire n'est disponible excepté dans l'appareil producteur de la matière. 66

**OplScript** Langage de script similaire à JavaScript utilisé avec ILOG OPL pour l'implémentation des structures algorithmiques. 73, 75, 108

**Permutation Method** Méthode heuristique pour l'identification des couplages optimaux entre les cuves de stockage thermique et les flux du procédé discontinu. 36

**PLVM** Programmation Linéaire en Variables Mixtes. 40, 73, 75, 81, 82, 107, 108, 111, 112, 115, 119, 121, 155

**PPC** Programmation Par Contraintes. 73, 82

**Problem Table Algorithm** Méthode d'analyse des flux d'un procédé en vue d'une récupération de chaleur par l'utilisation d'intervalles de température pour prédire la consommation minimale en utilités ainsi que la position du point de pincement et les cascades de chaleur. 36

**Recette** Ensemble des étapes que doivent subir les matières premières ou intermédiaires afin d'être transformés en produits finis. 9

**SDH** Systèmes Dynamiques Hybrides. 33, 43

**SED** Systèmes à Évènements Discrets. 33

**Simulink** Simulateur graphique pour la modélisation des systèmes à dynamique continue. 125, 132, 133, 135, 142, 144, 146, 158, 218, 220, 224, 228

**Statecharts** Formalisme graphique permettant la modélisation des systèmes complexes. 125, 147

**Stateflow** Simulateur graphique exploitant le formalisme des Statecharts pour la modélisation des systèmes à événements discrets. 125, 132, 133, 135, 142, 146, 149

**Time Average Model** Méthode d'estimation des consommations en utilités consistant à moyenner la quantité de chaleur produite lors de l'exécution d'un lot par la durée totale du temps de cycle. 36, 41

**Time Event Model** Représentation sous la forme d'un diagramme de Gantt des périodes temporelles pendant lesquelles les différents flux existent. 36

**Time Pinch Analysis** Procédure d'évaluation du potentiel de récupération énergétique d'un procédé consistant d'abord à réaliser un transfert énergétique entre les tranches temporelles avant de transférer l'énergie à travers les niveaux de température. 36

**Time Slice Model** Méthode d'estimation des consommations en utilités d'un procédé discontinu consistant à diviser un procédé en intervalles de temps et à trouver les objectifs de consommation pour chaque cascade individuelle sans utilisation du stockage de chaleur. 36, 41, 110, 111, 121

**UIS** Politique de stockage où un stockage intermédiaire à capacité infinie est disponible. 66

**ZW** Politique de stockage où aucun stockage intermédiaire n'est disponible et où la matière est en transfert direct. 66

---

## ANNEXE A - LISTE DES PUBLICATIONS

---

G. HETREUX, A. RAMAROSON et J. M. LE LANN. « Recipe-driven dynamic hybrid simulation of batch processes : a combined optimization/simulation approach ». Dans : *Proceeding in 21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering - ESCAPE 21* - ISBN : 978-0-444-53895-6 (2011), p. 1095–1099

G. HETREUX, A. RAMAROSON et P. DUQUESNE. « Scheduling of Heat Integrated Multipurpose Batch Processes ». Dans : *Récents Progrès en Génie des Procédés* 101 - ISBN : 2-910239-75-6 (2011), Axx1–Axx6

A. RAMAROSON et Y. ANDRIANAHAISON. « Ordonnancement des procédés discontinus sous contraintes d'énergie ». Dans : *Mada-ENELSA* 2 - ISSN : 2410-0331 (2014), p. 8–22

21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE 21  
E.N. Pistikopoulos, M.C. Georgiadis and A.C. Kokossis (Editors)  
© 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

## Recipe-driven dynamic hybrid simulation of batch processes: a combined optimization/simulation approach

Gilles Hétreux, Anthony Ramaroson, Jean-Marc Le Lann  
*Laboratoire de Génie Chimique, UMR-CNRS 5503 / INPT-ENSIACET, 4, allée Emile Monso, 31030 Toulouse Cedex 4, France*

### Abstract

*PrODHyS* is a dynamic hybrid simulation environment dedicated to the modeling of devices and operations found in chemical processes. Unlike continuous processes, the dynamic simulation of batch processes requires the execution of *control recipes* in order to achieve a set of production orders. In this framework, this simulator is coupled to a scheduling module (*ProSched*) in order to initialize various parameters and to ensure a proper completion of the simulation. This paper focuses on the building procedure of the simulation model corresponding to the realization of a particular scheduling.

**Keywords:** dynamic hybrid simulation, batch processes, scheduling, Petri nets

### 1. Introduction

Among the available *CAPE* tools, *dynamic simulation* arouses a growing interest for its ability to carry out various analyses (configurations, operating policies, etc) on a "virtual" plant, extremely useful to process engineers in their daily work to improve system performance (productivity, energy efficiency, waste reduction, etc). However, batch processes are generally classified as *dynamic hybrid systems*. This kind of system requires specific simulators able to handle rigorously both the continuous evolution of state variables (temperature, chemical kinetics, etc) and the discontinuous changes of configuration (due to activation/deactivation of actuators, etc.). In this context, we have developed since many years the *dynamic hybrid simulation environment PrODHyS* dedicated to chemical processes [3]. Based on *object concepts*, this environment offers extensible and reusable software components allowing a rigorous and systematic modeling of the topology and the behavior of processes. The hybrid feature is managed with the *Object Differential Petri Nets (ODPN)* formalism. It combines in the same structure, a set of differential and algebraic equations systems which describe the continuous evolution of the system (primarily based on the thermodynamic and physicochemical laws) and high level Petri nets which define the legal commutation sequences between states (i.e. one of the possible configurations of *DAE* systems).

Nevertheless, in opposite to continuous processes, studies on batch units often necessitate to take into account both the physicochemical phenomena that take place in each device (*local vision*) and the management of batches (nature, size, number and starting date) passing through the unit (*global vision*). Obviously, these two features have a significant impact on the performances and induce that the system has to be tackled as a whole to establish a consistent analysis. Nevertheless, the management of batches only by simulation does not always give satisfactory results and may even lead to abort an execution. So, in order to tackle rigorously each part of the problem, the strategy adopted in *PrODHyS* consists in driving the simulation by following a production scenario obtained from a scheduling module based on optimization

techniques. The rest of the paper focuses on the interface between this scheduling module and the simulation model and is organized as follow. Section 2 presents the principle of the approach. Section 3 describes briefly each module with an example.

## 2. Main steps of the recipe-driven dynamic hybrid simulation

Figure 1 summarizes the procedure implemented in *PrODHyS* to run a *recipe-driven dynamic simulation* of a complete process for a given production campaign.

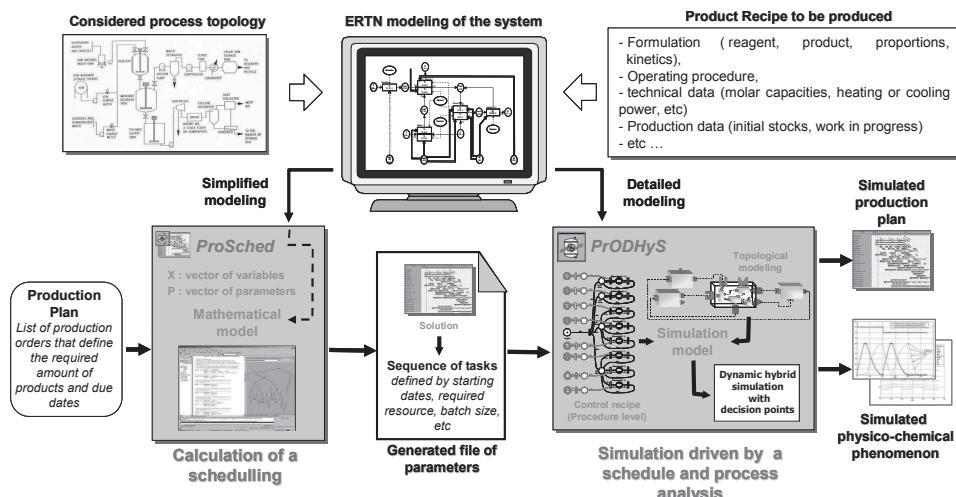


Fig. 1: general procedure of a dynamic simulation in *PrODHyS*

*Recipe* is an entity that describes the *formulation* (set of chemical substances and proportions), the *procedure* (set of physical steps required to make the product) and the required *equipment*. To tackle complex processes, the standard ISA/SP88 ([www.isa.org](http://www.isa.org)) has specified a hierarchical model including 4 levels (*generic*, *site*, *master* and *control recipe*), each one providing information in an appropriate granularity. Given the *generic recipe* of the manufactured products and the topology of the unit, the *procedure* of the *site recipe* is modeled in our tool using the *ERTN* (*Extended Resource Task Network*) graphical formalism. A “simplified” but structurally generic scheduling model based on a *MILP* formulation is set and instantiated with data provided through the *ERTN* view (set of estimated parameters for duration, capacity of devices according to the stored material, etc) to manage overall flows passing through the unit. Thus, given a *time horizon* and a *production plan* (obtained by a *MRP* procedure for example), the package *ProSched* calculates a scheduling by calling the commercial solver *XPRESS-MP*. The resulting list of tasks gives rise to the *master recipe* and can be depicted on a *Gantt chart*. Data characterizing each task are transmitted via a file to the dynamic simulator *PrODHyS* in order to parameterize the *command level* of the simulation model (i.e. the *control recipe*), previously constructed in accordance to the *ERTN* view by assembling predefined *operation objects*. The *process level* of the simulation model is built according to the topology of the unit with *device* or *composite device* objects. The simulation of this “detailed” model is then executed until the completion of the production plan. In summary, the main idea of this combined approach is to take advantage of the strengths of dynamic simulation and mathematical programming to achieve a consistent batch management in the workshop and thus, to enhance the achievement of the dynamic simulation.

### 3. Brief description of each module through an illustrative application

The typical *multi-purpose batch processes* addressed in these works are *general network processes* that correspond to the more general case in which material balances must be taken into account explicitly. Consequently, the simulation models have to incorporate several general characteristics such that disjunctive and cumulative resources constraints, various storage and transfer policies, fixed and/or dependent processing times (on batch size), mixing and splitting of batches, etc.

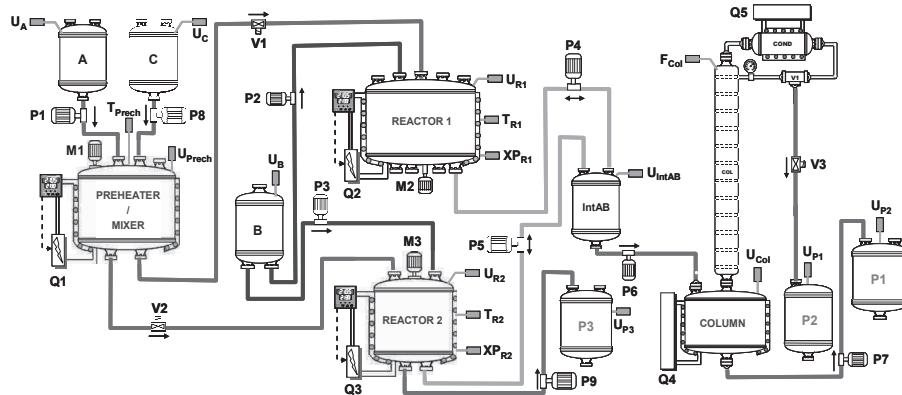


Fig 2: topology of the unit considered in the example

In this example, the topology of the unit is shown on figure 2. Regarding the energy point of view, reactors and preheater consume electricity to maintain the operating conditions and the column requires high pressure steam (**HP**) at boiler and a coolant (**CW**) at condenser. The synthesis of product **P1** necessitates the preheating of a reactant **A**, next a reaction (*reaction1*: **A** + **B**  $\rightarrow$  **IntAB**) and finally, a distillation to separate final product **P1** and residue **P2**. If we suppose that intermediate **IntAB** already exists, the *generic recipe* of the second final product **P3** requires the preheating of a reactant **C**, followed by a reaction (*reaction2*: **C** + **IntAB**  $\rightarrow$  **P3**). *Reaction1* can be performed indifferently in the two reactors while *Reaction2* can be performed only in *REACTOR 2*. Finally, a *zero-wait* transfer policy is chosen between preheater and reactors.

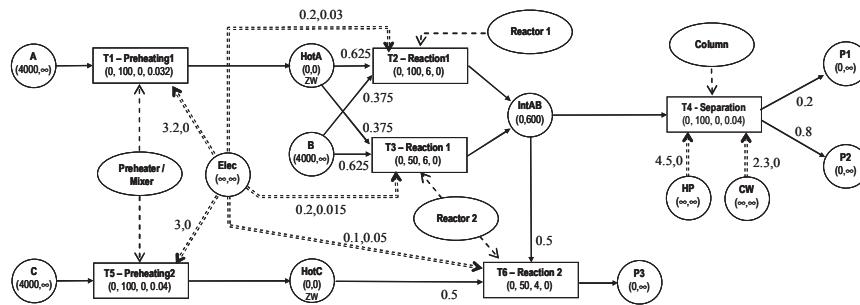


Fig. 3: ERTN view of the site recipe of the process

Commonly, the support of a graphical formalism allows non-expert users in simulation and optimization to describe problems in an unambiguous and intuitive way by adding specific construction rules while ignoring the mathematical support useful to its resolution. In this framework, the *Extended Resource Task Network* (ERTN) formalism

has been developed for the modeling of recipes. Based on the well-known *Resource Task Network (RTN)* formalism, new semantic elements have been introduced by [1], notably to handle explicitly cumulative resources (such as utilities) and multi-modal resources. For our example, the *ERTN* representing the procedure of the *site* recipe is shown on figure 3.

Several excellent reviews clearly point out that Mixed Integer Linear Programming (*MILP*) has been widely used for solving the batch process scheduling problem [2]. As the generic nature of the *ERTN* formalism offers a direct correspondence between the graphical elements and mathematical constraints, several *MILP* formulations have been implemented. Concerning the example, the scheduling of a single production order equal to 100 kg of **P1** is shown in figure 5. It determines the sequencing decisions on each processing unit (starting dates, etc) as well as the number and the size of batches.

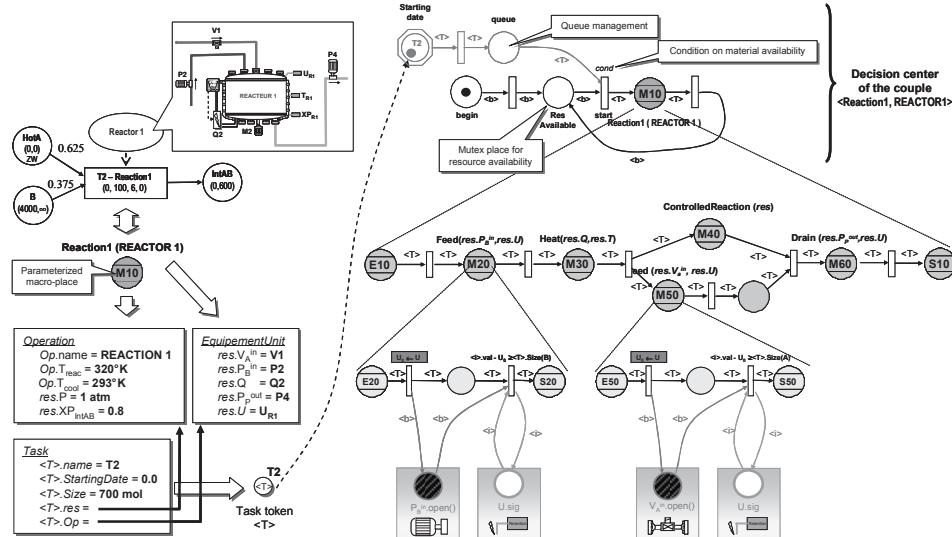


Fig. 4: macro-place and task token

Each operation of the *ERTN* is represented in the simulation model of *PrODHyS* by a *macro-place* parameterized by the equipment unit that performs the operation (figure 4). So this macro-place defines a couple *<Operation, EquipmentUnit>* and it is included in a specific *ODPN* structure called *decision center*. The *ODPN* of the control recipe is built by assembling a set of *decision center* (figure 5). Thus, operations carried out by several processing units must be duplicated as it is done in the *ERTN* formalism. This case concerns the operation **Reaction1** performed either in **REACTOR1** or **REACTOR2**. In addition, if the same resource *res* is used by several operations *op<sub>i</sub>* then each decision center associated with a couple *<op<sub>i</sub>,res>* shares the same *mutex* place (named **ResAvailable**) which models the availability of the resource *res*. This case concerns for example **REACTOR2** which performs both **Reaction1** and **Reaction2**. Each task (i.e. triplet *<Operation, EquipmentUnit, Batchsize>*) established by the scheduling is instantiated and associated with a *taskToken* object *<T>*. Figure 5 shows the *ODPN* of the *control* recipe at the *procedure* level corresponding to the *ERTN* of figure 3 instantiated with the aforementioned scheduling. The simulation is then performed by following the production plan so defined. In figure 5, the successive execution of two batches of identical size in the same device is shown. The curves show that the durations of each

batch are not equal in simulation (different feed rate due to a gravity transfer) while they are considered as identical and fixed at the scheduling level. This case highlights the modeling gap (models are different by nature) existing between the two modules and the need to provide decisional autonomy to the simulator for the launching of batches.

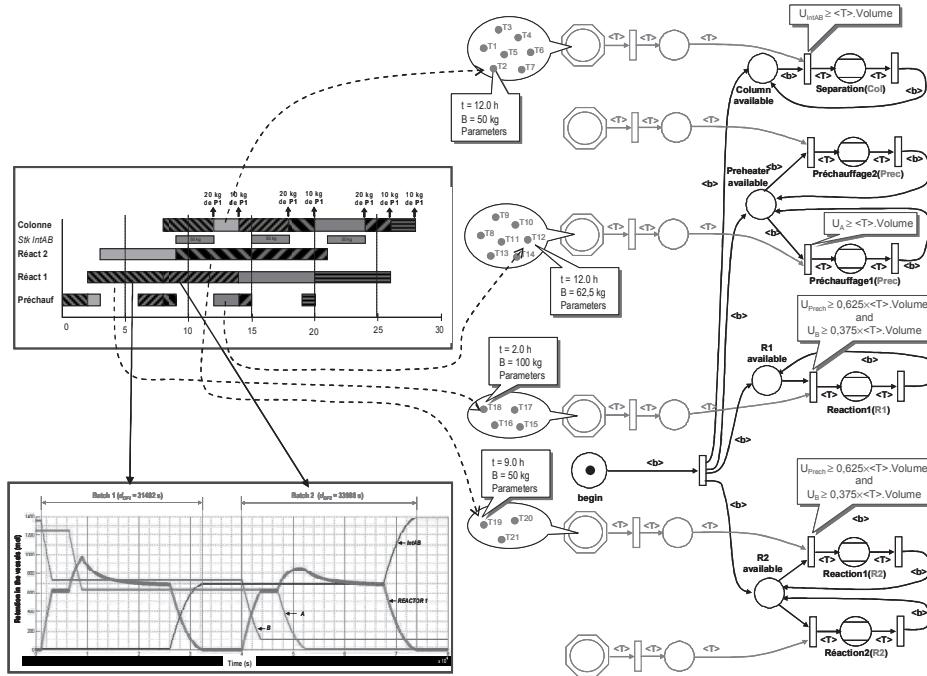


Fig. 5: ODPN of the control recipe (procedure level)

#### 4. Conclusion

A normally ended simulation indicates that the production plan is validated and the analysis of the operational and physicochemical properties can be made. If time constraints are violated, the user has to analyze the simulation results to undertake corrective actions (refinement of durations, shifting in margin, etc). According to the objective of the study, the simulation results above can be used to reset the data of the mathematical model and thus improve the production plans obtained through an iterative procedure. Another strategy is the simulation of each operation independently for a set of parameters in order to obtain accurate initial data for the scheduling module. Currently, the effectiveness of this framework has been proved and several studies on batch processes have been conducted with success.

#### References

- [1] Agha M., 2009. *Integrated management of energy and production : scheduling of batch processes and CHP plants*, Thèse de Doctorat, INP de Toulouse, France,
- [2] Méndez C.A., Cerdá J., Grossmann I.E., Harjunkoski I. et Fahl M., 2006, *State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes*, Computers and Chemical Engineering, vol. 30, Issues 6-7, Pages 913-946
- [3] Perret J., G. Hétreux, J.M. Le Lann, 2004, *Integration of an object formalism within a hybrid dynamic simulation environment*, Control Engineering Practice, Vol. 12/10, pp. 1211-1223

*Récents Progrès en Génie des Procédés, Numéro 101 - 2011  
ISSN 1775-335X - ISBN 2-910239-75-6, Ed. SFGP, Paris, France*

## **Ordonnancement des procédés discontinus avec récupération d'énergie Scheduling of Heat Integrated Multipurpose Batch Processes**

HETREUX Gilles\*, RAMAROSON Anthony, DUQUESNE Philippe

LGC (UMR CNRS 5503) – Dpt Procédés et Systèmes Industriels  
4, allée Emile Monso, 31030 TOULOUSE

### **Résumé**

Cette communication présente un cadre mathématique systématique pour l'ordonnancement des procédés discontinus impliquant des opérations intégrées du point de vue énergétique. L'approche proposée effectue un compromis entre la récupération énergétique potentielle et les contraintes de production classiques. Le transfert de chaleur s'effectue entre les fluides traités dans chaque appareil et nécessite d'assurer un chevauchement temporel des opérations concernées. La modélisation du problème s'appuie sur le formalisme *ERTN* et la programmation linéaire en variables mixtes (*PLM*).

**Mot-clefs :** Ordonnancement des procédés, intégration énergétique, modélisation *ERTN*, *PLM*

### **Abstract**

A systematic mathematical framework for scheduling the operation of multipurpose batch plants involving heat-integrated unit operations is presented. The approach advocated takes direct account of the trade-offs between maximal exploitation of heat-integration and others scheduling objectives and constraints. In this paper, heat transfer takes place directly between the fluids undergoing processing in the heat integrated unit operations, and therefore a degree of time overlap of these operations must be ensured. The modelling is based on the *ERTN* formalism and a discrete time *MILP* formulation.

**Key-words :** Scheduling of batch processes, heat integration, *ERTN* modeling, *MILP* formulation.

### **1. Introduction**

Recent works have highlighted the need for efficient utilization of energy in the operation of batch plants. However, in contrast to the extensive amount of work already published on energy integration in continuous plant (notably, based on the concept of *pinch* (Linnhoff *et al.*, 1988)), relatively little has been reported in the literature concerning the flexible multipurpose batch plants. Despite its clear importance, the minimization of the cost of external utilities consumed is not usually the primary objective in scheduling. This is the consequence partly of the paramount demand for timely satisfaction of the multiple production requirements imposed on these plants and partly of the often small proportion of energy costs compared to the high value of the raw material and products produced in many such plants (e.g., in the pharmaceutical industry). It could, therefore, be argued that optimizing the exploitation of any heat integration opportunities afforded by a fixed production schedule that already achieves all other plant objectives is indeed a reasonable approach. In general, even optimal production schedules tend to be quite degenerate, in the sense that there often exist a large number of different schedules, all of which can achieve a given set of production requirements. However, the potential for heat integration could vary significantly from one such schedule to another. Furthermore, in some industrial sectors (e.g. food, diary, brewing), energy costs do form a significant proportion of the total production cost, and thus have to be balanced properly against other costs (raw materials, manpower, value of products). On the basis of the above discussion, heat integration must be considered as an integral part of the problem of scheduling, with the cost of utilities incorporated within the overall economic objective.

In this context, this paper proposes a systematic mathematical framework for the exploitation of heat integration in batch plant operation. The rest of this paper is organized as follow. The next section introduces briefly the *ERTN* formalism and describes the modeling of direct heat integration mode. Then, after a brief review of the proposed formulation (section 3), an example of a heat-integrated process is used to illustrate the approach in section 4.

---

\* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : gilles.hetreux@ensiacet.fr

Récents Progrès en Génie des Procédés – Numéro 101 – 2011  
2-910239-75-6, Ed. SFGP, Paris, France

## 2. A graphical modelling framework : the *Extended Resource Task Network*

Among the available *CAPE* tools (*Computer Aided Process Engineering*), process engineers are showing a growing interest in scheduling methods based on *MILP* formulation in order to carry out various performance analyses such as system productivity, time cycle, production costs or energy efficiency of a unit. Nevertheless, the implementation and the tuning of a *MILP* model can become rather technical and complex in some cases. To facilitate the modelling phase by non-expert users in optimization, a way is to build mathematical models which are structurally generic and configurable with parameters entered through a well-defined graphical formalism. Provided that the semantic is sufficiently general, it allows the user to describe a problem in an intuitive way while ignoring the mathematical model useful to its resolution. Another advantage of such formalism is the ability to unambiguously model a problem by adding specific construction rules in order to reduce (but it does not avoid) potential modelling mistakes. In this framework, the *Extended Resource Task Network* (*ERTN*) formalism has been developed. Based on the well-known *Resource Task Network* (*RTN*) formalism proposed by (Pantelides, 1994), new semantic elements have been introduced by (Fabre *et al.*, 2011) and (Thery *et al.*, 2011) in order to handle explicitly cumulative resources (such as utilities for example) and multi-modal resources. *ERTNs* are directed graphs comprising two types of nodes. *State* nodes (denoted by circles) correspond to materials of different types (feeds, intermediate, final products), utilities, waste, device or operator, etc, while *task* nodes (denoted by rectangles) represent physical, chemical or biological transformations of these materials. Different kind of arcs unambiguously represent production procedure (precedence constraints), material and energy flows (ratio of inlet and outlet flows, free flows, mixing and splitting of individual batches, material recycles, shared intermediates) and resource constraints (topology of the unit, capacity of devices, fixed or dependent operating time, shared and multi-modal devices, etc.). Figure 1 summarizes the semantic elements of the *ERTN* formalism.

NOM	SYMBOLE	REPRESENTE
Batch task Node	Tk – Operation name ( $V_k^{\min}, V_k^{\max}, p_k, p_{V_k}, dd_{r,k}$ )	Discontinuous processing task $k$ the batch size $B_{k,t}$ is such that $V_k^{\min} \leq B_{k,t} \leq V_k^{\max}$ , the processing time is $p_k = p_{f_k} + p_{V_k} B_{k,t}$ and the delivery time of resource $r$ is $dd_{r,k}$ (by default, $dd_{r,k} = p_k$ )
Continuous task Node	Tk – Operation name ( $V_k^{\min}, V_k^{\max}, p_k, dd_{r,k}$ )	Continuous processing task $k$ the flow rate $B_{k,t}$ is such that $V_k^{\min} \leq B_{k,t} \leq V_k^{\max}$ , the processing time is $p_k = p_{f_k}$ and the delivery time of resource $r$ is $dd_{r,k}$ (by default, $dd_{r,k} = 0$ )
Cumulative resource Node	Sr – Name ( $S_0, C_r^{\max}$ Policy)	Cumulative resource $r$ the amount $S_{r,t}$ of stored resource $r$ is such that $S_{r,t} \leq C_r^{\max}$ , the initial amount is $S_0$ , the storage policy is <i>UIS</i> or <i>NIS</i> or <i>FIS</i> (by default, <i>FIS</i> ) and the transfer policy can be <i>ZW</i> (by default, <i>none</i> )
Disjunctive resource Node	Resource Name	Disjunctive resource $r$ resource which can be used by only one processing task at a given time
State resource Node	Sr – Name ( $S_0, C_r^{\max}$ Policy)	State resource $r$ the amount $S_{r,t}$ is an integer indicating the actual state of the disjunctive resource $r$ . It is such that $S_{r,t} \leq C_r^{\max}$ , the initial marking is $S_0$ , and the transfer policy can be <i>ZW</i> (by default, <i>none</i> )
Fixed flow Arc	Tk – Operation name $\xrightarrow{\rho_{k,r}^{\text{prod}}}$ Sr – Name Sr – Name $\xleftarrow{\rho_{k,r}^{\text{cons}}}$ Tk – Operation name	Fixed proportion flow of cumulative resource Cumulative resource flow governed by a conservative mass balance. $\rho_{k,r}^{\text{cons}}$ (resp. $\rho_{k,r}^{\text{prod}}$ ) is the fixed proportion of resource $r$ consumed (resp. produced) with respect of $B_{k,t}$ (by default, $\rho_{k,r}^{\text{cons}} = 1$ (resp. $\rho_{k,r}^{\text{prod}} = 1$ ))
Free flow Arc	Tk – Operation name $\xrightarrow{/}$ Sr – Name Sr – Name $\xleftarrow{/}$ Tk – Operation name	Free proportion flow of cumulative resource Cumulative resource flow governed by a conservative mass balance. The $/$ on arc indicates a free proportion of resource $r$ consumed (resp. produced) with respect of $B_{k,r}$ . $\mu_{k,r}^{\text{prod}}$ or $\mu_{k,r}^{\text{cons}}$ is equal to 1 if a free flow arc exists between cumulative resource $r$ and task $k$ , 0 otherwise.
Production / consumption Arc	Sr – State ( $S_0, C_r^{\max}$ Policy) $\xrightarrow{u_{k,r}^{\text{prod}}, u_{k,r}^{\text{cons}}}$ Tk – Operation Tk – Operation $\xrightarrow{u_{k,r}^{\text{prod}}, u_{k,r}^{\text{cons}}}$ Sr – State ( $S_0, C_r^{\max}$ Policy)	Production/consumption flow of cumulative resource Cumulative resource flow not governed by a conservative mass balance. The produced (resp. consumed) amount of cumulative resource $r$ by task $k$ is $u_{k,r}^{\text{prod}} = u_{k,r}^{\text{prod}} + u_{k,r}^{\text{cons}} B_{k,t}$ (resp. $u_{k,r}^{\text{cons}} = u_{k,r}^{\text{prod}} + u_{k,r}^{\text{cons}} B_{k,t}$ )
Use Arc	Resource Name $\xrightarrow{/}$ Tk – Operation	« Use » relationship between a processing task and a disjunctive resource Indicates that the disjunction resource $r$ has the capability to perform the processing task $k$ .
State transition Arc	Tk – Operation name $\xrightarrow{\alpha_{k,r}^{\text{out}}}$ Sr – Name Sr – Name $\xrightarrow{\alpha_{k,r}^{\text{in}}}$ Tk – Operation name	In/out flow of state resource Indicates an evolution of the actual state (modeled by state resources $r$ ) of the disjunctive resource which performs the processing task $k$ . The integer $\alpha_{k,r}^{\text{out}} \geq 1$ (resp. $\alpha_{k,r}^{\text{in}} \geq 1$ ) if a transition state arc exists between state resource $r$ and task $k$ , 0 otherwise. By default, $\alpha_{k,r}^{\text{out}} = 1$ (resp. $\alpha_{k,r}^{\text{in}} = 1$ ).

Figure 1. Semantic elements of the *ERTN* graphical formalism

Récents Progrès en Génie des Procédés, Numéro 101 - 2011  
ISSN 1775-335X - ISBN 2-910239-75-6, Ed. SFGP, Paris, France

Assuming that the processing equipment available in the plant includes at least one pair of units which are coupled to each other through a heat exchanger, then heat exchange can take place between two processing step that are performed simultaneously in these units. This mode of heat integration is classically denominated by *direct heat integration*. On the basis of the *ERTN* semantic, heat integrated operations are modelled as follow. As we suppose that an heat integrated operation is able to take place with or without heat integration, each of them are splitted into two tasks  $k$  and  $k'$ , one corresponding to the heat-integrated operation and one to the stand-alone operation, as shown in Figure 2. It should be noted that these two tasks involve the same transformation of material, but eventually with different duration and utility consumption. The second issue to be addressed is that of ensuring that a pair of heat-integrated tasks  $j$  and  $k$  always start at the same time  $t$ . For this, a virtual *cumulative resource* node has to be introduced to represent the medium. The *NIS* policy assigned to this state induces that this resource is produced by the task  $k$  and consumed immediately by the task  $j$ , thus ensuring the temporal synchronization of the tasks of this couple (see Figure 2). Finally, the ratio  $r$  of the batch sizes  $B_{j,t}$  and  $B_{k,t}$  of the heat-integrated tasks  $j$  and  $k$  usually has to be fixed in order for their combined operation to be feasible. To ensure this feature, the parameters of the previous production/consumption arcs have to be fixed as shown in Figure 2.

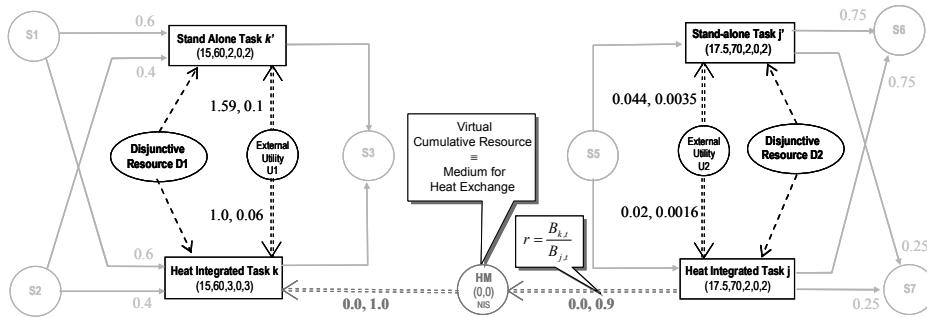


Figure 2. Modeling of Heat Integrated operations

### 3. Mathematical formulation

Several excellent reviews (Méndez *et al.*, 2006), (Floudas & Lin, 2004) clearly point out that mixed integer linear programming (*MILP*) has been widely used for solving the batch process scheduling problem. In this framework, various formulations of this problem are proposed in the literature. In this article, a general discrete time *MILP* formulation of the short term scheduling problem under utilities constraints is presented, based on an extension of the *Global time intervals* formulation. In this approach, the time horizon is discretized into a number of intervals of equal duration and system events (task starts and finishes, changes in resource availability, product demands, etc) are allowed to occur only at the boundaries of the time intervals. As stated in section 2, the generic nature of the *ERTN* formalism allows direct correspondence between the semantic structure of the graphical representation and a set of mathematical constraints. The key variables of this formulation are the equipment allocation variables  $W_{kt}$  ( $W_{k,t} = 1$  if the task  $k$  is launched at start of period  $t$  and  $W_{k,t} = 0$ , otherwise), the batch size variables  $B_{kt}$  (defined by the amount or flow rate  $I_{r,k,t}$  of resource  $r$  entering in task  $k$  and by the amount or flow rate  $O_{r,k,t}$  of resource  $r$  leaving task  $k$  in period  $t$ ), the amount  $R_{rt}$  of cumulative resource  $r$  stored in period  $t$ , the production  $UO_{r,t}$  or consumption  $UL_{rt}$  of cumulative resource  $r$  in period  $t$  and finally, the import  $In_{r,t}$  and export  $Out_{r,t}$  of cumulative resource  $r$  in period  $t$ .

The above variables are subject to a number of constraints. Processing equipment allocation constraints (1) express the fact that disjunctive resource  $r$  ( $r \in R^D$ ) can carry out at most one task  $k$  ( $k \in K_r$ ) over any given time interval  $t$ . Constraints (2) define storage capacity of cumulative resource  $r$  ( $r \in R^C$ ) while processing equipment capacity constraints (3) limits the batch size (resp. flow rate)  $B_{k,t}$  that can be undertaken by the batch task  $k \in K^B$  (resp. continuous task  $k \in K^C$ ) at time interval  $t$ . Constraints (4) and (5) are the generalized mass balance applicable for each cumulative resource over time. Note that

Récents Progrès en Génie des Procédés – Numéro 101 – 2011  
2-910239-75-6, Ed. SFGP, Paris, France

cumulative resource node can act simultaneously as utility resource and material resource. So, it not only provides the material for a transformation process (acting as material resource through the term  $O_{r,k,t}$  and  $I_{r,k,t}$ ) but can also fulfill the utility demands of a processing task (acting as utility resource through the terms  $UO_{r,k,t}$  and  $UI_{r,k,t}$ ). Moreover, each cumulative resource node can receive resource from external sources (term  $In_{r,t}$ ) and can provide resource to external consumers (term  $Out_{r,t}$ ). Constraints (6) and (7) fix the minimum and maximum bounds on the imports and exports of cumulative resource  $r$  in period  $t$ . Orders  $D_{r,t}$  of cumulative resource  $r$  are taken into account with constraints (8). Constraints (9) and (10) represent the generalized mass balance around the task nodes that transform cumulative resources in known or unknown proportions of batch size (constraints (11) and (12)). Finally, constraints (13) and (14) define production and consumption of cumulative resources. The objective function takes direct account of the trade-offs between energy savings on one hand, and satisfaction of scheduling constraints (such as timely delivery of orders) on the other. The precise description of these constraints is not important for the purpose of this paper, and the interested reader is referred to the (Agha, 2009) or (Thery *et al*, 2011) paper for more information.

$$\sum_{k \in K_r} \sum_{t'=l-p_k+1}^l W_{k,t'} \leq I \quad \forall r \in R^D, \forall t \in I, \dots, T \quad (1)$$

$$0 \leq R_{r,t} \leq C_r^{max} \quad \forall r \in R^C, \forall t \in I, \dots, T \quad (2)$$

$$W_{k,t} V_k^{min} \leq B_{k,t} \leq W_{k,t} V_k^{max} \quad \forall k \in K, \forall t \in I, \dots, T \quad (3)$$

$$R_{r,t} = R_{r,t-l} + \sum_{k \in K^C \cup K^B} O_{r,k,t-dd_{r,k}} - \sum_{k \in K^C \cup K^B} I_{r,k,t} + \sum_{k \in K^C \cup K^B} UO_{r,k,t-dd_{r,k}} - \sum_{k \in K^C \cup K^B} UI_{r,k,t} + In_{r,t} - Out_{r,t} \quad \forall r \in R^C, \forall t \in I, \dots, T \quad (4)$$

$$R_{r,0} = R_0 \quad \forall r \in R^C \cup R^S \quad (5)$$

$$Out_{r,t}^{min} \leq Out_{r,t} \leq Out_{r,t}^{max} \quad \forall r \in R^C \quad (6)$$

$$In_{r,t}^{min} \leq In_{r,t} \leq In_{r,t}^{max} \quad \forall r \in R^C \quad (7)$$

$$Out_{r,t}^{min} = Out_{r,t}^{max} = D_{r,t} \quad \forall r \in R^C \quad (8)$$

$$B_{k,t} = \sum_{r \in R_k^{cons}} I_{r,k,t} \quad k \in K, \forall t \in I, \dots, T \quad (9)$$

$$B_{k,t} = \sum_{r \in R_k^{prod}} O_{r,k,t} \quad k \in K, \forall t \in I, \dots, T \quad (10)$$

$$\rho_{k,r}^{prod} B_{k,t} \leq O_{r,k,t} \leq (\rho_{k,r}^{prod} + \mu_{k,r}^{prod}) B_{k,t} \quad \forall k \in K, \forall r \in R_k^{prod}, \forall t \in I, \dots, T \quad (11)$$

$$\rho_{k,r}^{cons} B_{k,t} \leq I_{r,k,t} \leq (\rho_{k,r}^{cons} + \mu_{k,r}^{cons}) B_{k,t} \quad \forall k \in K, \forall r \in R_k^{cons}, \forall t \in I, \dots, T \quad (12)$$

$$UI_{r,k,t} = \sum_{t'=l-p_k+1}^l (uf_{k,r}^{cons} W_{k,t'} + uv_{k,r}^{cons} B_{k,t'}) \quad \forall r \in R^C, \forall k \in K, \forall t \in I, \dots, T \quad (13)$$

$$UO_{r,k,t} = \sum_{t'=l-p_k+1}^l (uf_{k,r}^{prod} W_{k,t'} + uv_{k,r}^{prod} B_{k,t'}) \quad \forall r \in R^C, \forall k \in K, \forall t \in I, \dots, T \quad (14)$$

#### 4. Application

In order to demonstrate the applicability of the previous model, we consider a short-term scheduling problem that seeks to determine the optimal utilization of the available plant resources (processing equipment, storage capacity, utilities, etc) over a given time horizon. The multipurpose plant considered is an extension of a classical batch process example used by (Majozi, 2006) or (Chen *et al*, 2008). It consists of a plant manufacturing three products P1, P2 and P3 and production requirements are imposed on them at the end of the horizon. The *generic recipe* includes four operations (*Reaction 1*, *Filtration*, *Distillation* and *Reaction 2*) and the *site recipe* is described by the ERTN on figure 3. Proportions of each material, minimum and maximum batch size, duration of tasks and storage capacity and policy are indicated. Moreover, the processing equipment available in the plant includes two pairs of units which are coupled to each other through a heat exchanger (Reactor 1/Column reboiler and Reactor 1/Reactor 2). Assuming appropriate temperature levels, there is in principle the opportunity of exchanging heat between, on the one hand, the exothermic *Reaction 1* task which requires cooling and the *Distillation* task which requires heating and, on the other hand, the exothermic *Reaction 1* task which requires cooling and the endothermic *Reaction 2* task which requires heating. As mentioned in section 2, these operations have to

Récents Progrès en Génie des Procédés, Numéro 101 - 2011  
ISSN 1775-335X - ISBN 2-910239-75-6, Ed. SFGP, Paris, France

be splitted in two tasks (SA:stand-alone or HI:heat integrated). The precise operating mode and heat characteristics of two heat-integrated processing steps taking place in a given pair of equipment items are known. The equipment is also fitted with exchange facilities that allow the use of external utilities (e.g., steam, cooling water) to supplement the heating and cooling loads provided through heat integration. The existence of these additional facilities also makes possible the use of each of the equipment items in a pair for carrying out the corresponding processing step separately, if necessary, i.e. without the need for heat integration. In this context, the processing times of the individual steps when performed separately is different from those for the same steps when heat integration is employed. In any case, the instantaneous rates of consumption of external utilities over the duration of each step are given on the ERTN.

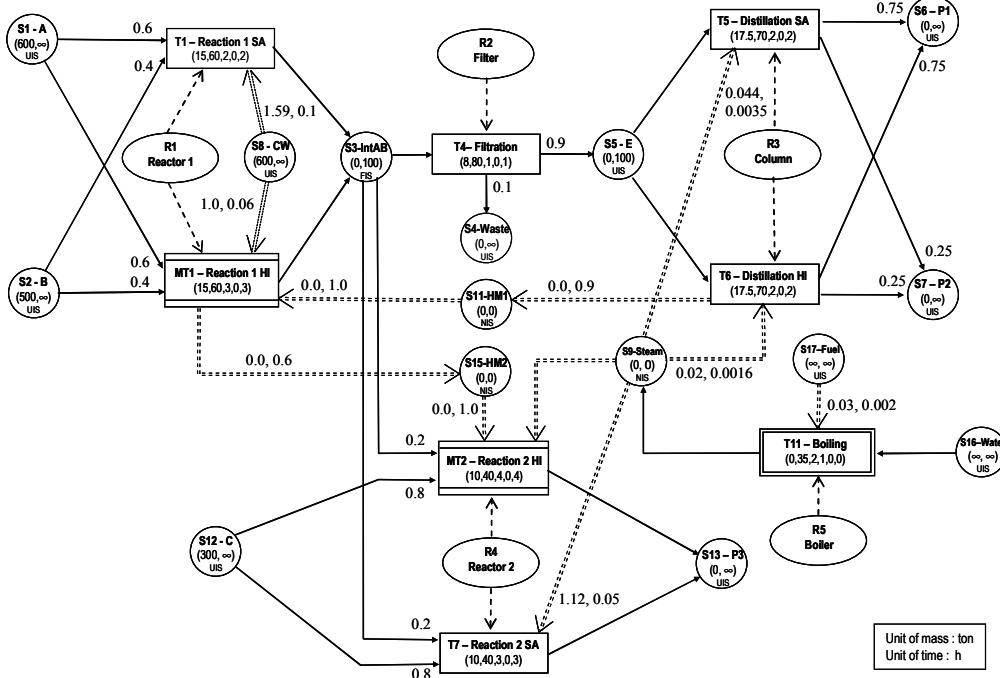


Figure 3. ERTN for example process

Concerning the pair *Reaction 1/Distillation*, the heat exchange match would involve task *Reaction 1* being performed in the Reactor 1 and the *Distillation* task in the Column with an offset of 1 h with respect to their starting times. Indeed, such an offset is necessary in order to maximise the potential for heat integration by allowing sufficient time for the *Reaction 1* to reach the operating temperature at which the heat consumed by the *Distillation* is to be generated. Due to the lower temperature differences, the duration of the *Reaction 1* when operated in heat-integrated mode is increased from 2 to 3 hr. As expected, the demands posed by these tasks on external utilities are also modified. So, the macro-task MT1 is decomposed as shown in figure 4.

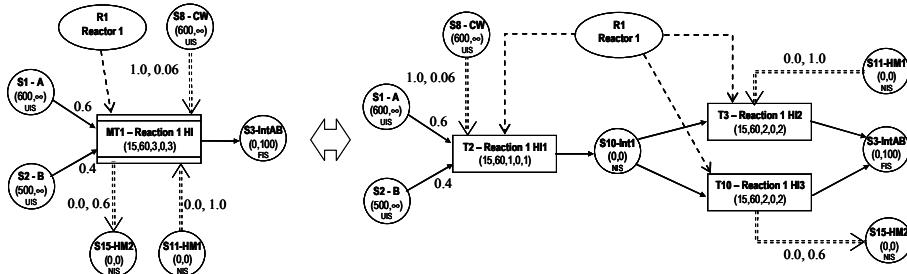


Figure 4. Decomposition of the macro-task MT1

Récents Progrès en Génie des Procédés – Numéro 101 – 2011  
2-910239-75-6, Ed. SFGP, Paris, France

Similar remarks can be made about the pair *Reaction 1/Reaction 2*. The heat-integrated *Reaction 1* task always requires a cooling water flow rate of  $1.0 + 0.06B \text{ t/h}$  during the first hour of its operation only ; thereafter all its needs are satisfied through heat exchange with the contents of the Reactor 2. On the other hand, the heat-integrated *Reaction 2* task requires a constant steam flow rate of  $0.9+0.031B \text{ t/h}$  during the first two hours (task T8) and a constant steam flow rate of  $0.3+0.006B \text{ t/h}$  thereafter (task T9), supplementing the energy received from the heat exchange with the Reactor 1 contents.

Finally, unlimited availability cooling water is assumed. In contrast, steam flow rate is limited and produced by a site utility system (boiling operation T11 that consumes fuel).

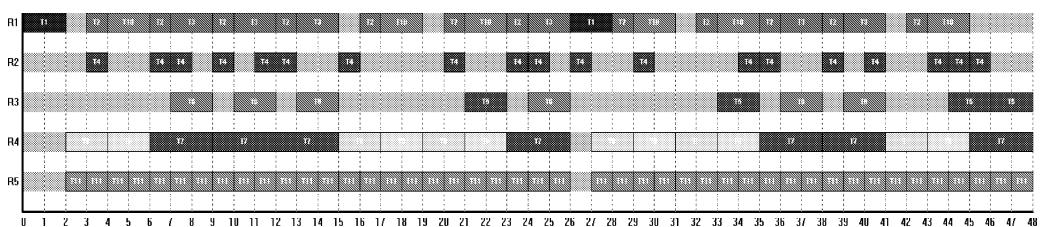


Figure 5. Scheduling corresponding to the manufacturing of 510 t of P1, 170 t of P2 and 300 t of P3

Figure 5 shows the optimal schedule obtained for this problem (solve on a 2.0 GHz Pentium with XPRESS-MP) on a time horizon of 48h. The number inside each rectangle in the Gantt chart denotes the task being carried out. It can be seen that this involves both stand-alone operations and integrated ones. Stand-alone tasks are performed sporadically throughout the horizon. This feature of the optimal solution is due to the complex trade-off between increased processing time and reduced utility consumption for the two reaction tasks. Moreover, as expected, heat integrated *Reaction 1* takes place as soon it is possible in order to reduce the consumption of steam of the other integrated operations. Finally, the costs of the utilities consumed are reduced to an even larger extent.

## 5. Conclusion

This paper has proposed a systematic mathematical framework for the exploitation of heat integration in multipurpose batch plant operation, taking detailed account of its interactions with production scheduling. The ERTN formalism has been used to model clearly and unambiguously both the material and utilities flows in the discontinuous process. Based on this representation, a general scheduling formulation including direct heat integration aspects was examined and an example illustrates the potential benefits of this approach. Currently, a *continuous time MILP* formulation and *indirect heat integration* are under consideration.

## Références

- Agha M., 2009. Integrated management of energy and production : scheduling of batch processes and CHP plants, Thèse de Doctorat, INP de Toulouse, France,
- Chen C.L., Chang C.Y., 2008, A resource-task network approach for optimal short-term /periodic scheduling and heat integration in multipurpose batch plants, Applied Thermal Engineering
- Fabre, F., Hétreux, G., Le Lann J.M., Zaratié, P., 2011, Dynamic hybrid simulation of batch processes driven by a scheduling module. Computers and Chemical Engineering, doi:10.1016/j.compchemeng.2011.04.007
- Floudas C.A. et Lin X., 2004, Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes : a review, Computers and Chemical Engineering, 28, 2109-2129
- Méndez C.A., Cerdá J., Grossmann I.E., Harjunkoski I. et Fahl M., 2006, State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes, Computers and Chemical Engineering, 30, 6-7, 913-946
- Linnhoff, B., Ashton, G.J., Obeng, E.D.A, 1988, Process Integration of Batch Processes, Inst. Chem. Eng. Symp. Serr., 109, 221-237
- Majozzi T., 2006, Heat integration of multipurpose batch plants using a continuous-time framework, Applied Thermal Engineering, 26, 1369-1377
- Pantelides C.C., 1994, Unified Framework For The Optimal Process Planning And Scheduling, CACHE Publications. Proceedings of the Second Conference on Foundations of Computer Aided Operations, p. 253-274.
- Thery R., Hétreux G., Agha M.H., Haït A., Le Lann J.M., 2011, The Extended Resource Task Network: a framework for the combined scheduling of batch processes and CHP plants, International Journal of Production Research

## Ordonnancement des procédés discontinus sous contraintes d'énergie

Anthony RAMAROSON<sup>1</sup>, Yvon ANDRIANAHARISON<sup>2</sup>

Laboratoire d'Électricité, Signaux et Automatique  
 École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo  
 Université d'Antananarivo

BP 1500, Ankatsosy – Antananarivo – Madagascar

<sup>1</sup> [anthony.ramaroson@hotmail.fr](mailto:anthony.ramaroson@hotmail.fr)      <sup>2</sup> [yvonkyo@gmail.com](mailto:yvonkyo@gmail.com)

*Résumé :* Face au contexte énergétique actuel, il est nécessaire de mettre en œuvre des pratiques permettant de rationaliser la consommation en énergie. Pour le secteur des procédés discontinus, la notion d'énergie fait référence aux utilités (vapeur, électricité, air comprimé etc.). Maîtriser l'énergie consiste donc à maîtriser les utilités. Dans cette optique, nous présentons dans cet article, un cadre mathématique pour l'ordonnancement des procédés discontinus et des opérations servant à produire les utilités. Le modèle d'ordonnancement proposé est un modèle de programmation linéaire en variables mixtes utilisant la représentation temporelle *Unit Specific Event* et s'appuyant sur le formalisme de représentation graphique *ERTN* pour la formulation des contraintes. Afin de valider l'efficacité de l'approche proposée, le modèle d'ordonnancement est appliqué sur deux exemples d'illustrations.

*Mots clés :* Ordonnancement, procédés discontinus, utilités, programmation linéaire en variables mixtes, ERTN

*Abstract:* According to the actual energy context, a need to rationalize the consumption of energy becomes necessary. In the case of batch processes, the term energy is often referred as utilities (steam, electricity, compressed air etc.). Managing energy means then managing utilities. From this point of view, we present in this paper, a mathematical framework for the combined scheduling of batch processes and utility systems. The proposed formulation is a mixed integer linear programming model using the *Unit Specific Event* continuous-time representation and applying the *ERTN* graphical formalism to express the constraints of the model. In order to verify the effectiveness of the proposed approach, the scheduling model is applied on two illustrative examples.

*Keywords:* Scheduling, batch processes, utilities, mixed integer linear programming, ERTN

### 1 Introduction

La maîtrise de la consommation énergétique est une préoccupation de plus en plus présente dans le monde industriel. L'augmentation du coût de l'énergie causée par la diminution des réserves en carburants fossiles et par l'enregistrement d'une demande sans cesse croissante impactent lourdement sur l'activité des systèmes de production.

En génie des procédés, et plus particulièrement, pour le cas des procédés discontinus, la consommation énergétique dépend de l'activité de production. L'intégration de l'aspect énergétique dans l'ordonnancement de la production est alors nécessaire. La complexité des problèmes rencontrés dans le domaine des procédés est un

des obstacles à l'intégration des contraintes énergétiques dans les modèles de gestion de production. C'est ainsi que de nombreux travaux se sont intéressés à la prise en compte de la ressource énergétique dans la formulation des modèles d'ordonnancement de ces procédés. Cependant, peu de recherches ont été menées pour l'ordonnancement simultané de la production et des opérations de génération d'utilités [4].

Parmi les travaux récents retrouvés dans la littérature, les travaux de Agha et al. [1] utilisent un modèle d'ordonnancement à temps discret pour aborder la problématique présentée précédemment. Ces travaux ont permis de conclure qu'un meilleur pilotage de l'activité de la production couplée avec la centrale d'utilités permet de réduire significativement les coûts liés à l'énergie. Cependant, les restrictions liées à

l'utilisation d'un modèle de PLVM à temps discret conduisent d'une part, à des approximations pouvant mener à des solutions sous-optimales, voire infaisables. D'autre part, on enregistre une augmentation considérable de la taille de l'instance considérée (nombre de variables d'allocation) à cause de la discréttisation de l'horizon d'ordonnancement en périodes de durées fixes.

L'objectif de cet article est donc de proposer un modèle à temps continu, manipulant moins de variables binaires que dans le cas précédent, pour l'ordonnancement des procédés discontinus et des unités de production d'énergie. Nous nous basons ici sur le formalisme ERTN présenté par Thery et al. [5] pour la représentation des contraintes du modèle.

Cet article est organisé de la manière suivante. Dans un premier temps, la formulation du modèle mathématique intégrant la prise en compte de la production d'énergie dans l'ordonnancement est présentée. Ensuite, nous présentons les résultats obtenus pour deux cas d'études caractéristiques des procédés discontinus. Finalement, des pistes d'évolutions sont proposées.

## 2 Méthodologie

### 2.1 Définition du problème

L'ordonnancement à court terme d'un procédé discontinu est défini comme suit. Sachant : (i) les données fournies par la recette de fabrication (durée de traitement, appareils disponibles, quantités de matière requises pour la réalisation d'un produit), (ii) celles fournies par la topologie du procédé (capacité de chaque appareil, disponibilité de chaque appareil pour chaque opération), (iii) les politiques de stockage, (iv) les consommations en utilités de chaque opération, la disponibilité de ces utilités, (v) les quantités de matières disponibles initialement, (vi) la séquence des phases opératoires pour chaque opération, (vii) les commandes en produits finis et (viii) l'horizon d'ordonnancement, l'objectif est de trouver un ordonnancement permettant de satisfaire un certain critère. Ce critère peut être la minimisation de la durée du plan d'ordonnancement ou la maximisation du profit.

### 2.2 Formulation mathématique

Mada-ENELSA Vol 2, 2014

Le modèle proposé nécessite la manipulation des indices, ensembles, paramètres et variables donnés dans la nomenclature (Annexe C). Les contraintes du modèle d'ordonnancement sont alors les suivantes :

#### 2.2.1 Contraintes d'allocation

Les contraintes d'allocation présentées ici sont les mêmes que celles formulées dans Janak et al. [2]. Ces contraintes permettent de définir l'état d'une tâche, par état nous entendons le lancement, la terminaison ou l'exécution de la tâche.

$$\sum_{i \in I_j} W_{in} \leq 1 \quad \forall j \in J, \forall n \in N \quad (1)$$

Les contraintes (1) stipulent que pour un appareil  $j$  donné, une seule tâche «  $i$  » peut être active à un moment donné «  $n$  ».

$$W_{in} = \sum_{n' \leq n} W_{sin'} - \sum_{n' < n} W_{fin'} \quad \forall i \in I, \forall n \in N \quad (2)$$

Les contraintes (2) définissent l'activité d'une tâche. Elles stipulent qu'une tâche «  $i$  » est active uniquement si elle s'est lancée avant ou à l'évènement courant et ne s'est pas encore terminée.

$$\sum_{n \in N} W_{sin} = \sum_{n \in N} W_{fin} \quad \forall i \in I \quad (3)$$

Les contraintes (3) expriment le simple fait que toutes les tâches débutées doivent se terminer.

$$W_{sin} \leq 1 - \sum_{n' < n} W_{sin'} + \sum_{n' < n} W_{fin'} \quad \forall i \in I, \forall n \in N \quad (4)$$

Les contraintes (4) stipulent le fait qu'une tâche peut se lancer à l'évènement  $n$ , si le nombre de fois qu'elle s'est lancée dans le passé est égal au nombre de fois qu'elle s'est terminée.

$$W_{fin} \leq \sum_{n' \leq n} W_{sin'} - \sum_{n' < n} W_{fin'} \quad \forall i \in I, \forall n \in N \quad (5)$$

La réciproque des contraintes (4) traitant de la terminaison d'une tâche, est formulée par les contraintes (5).

#### 2.2.2 Contraintes de capacité

Les contraintes de capacité définissent la plage de valeurs que peut prendre la taille de lot

page 9

d'une tâche. Les paramètres  $V_{\min}$  et  $V_{\max}$  définissent respectivement la quantité minimale et maximale de matière que peut traiter un appareil.

$$V_{\min}^i W_{in} \leq B_{in} \leq V_{\max}^i W_{in} \quad \forall i \in I^b, \forall n \in N \quad (6)$$

Les contraintes (6) stipulent que la taille de lot des tâches discontinues et des tâches continues véhiculant les utilités, doit être supérieure à  $V_{\min}$  et ne peut dépasser  $V_{\max}$ .

$$V_{\min}^i p_{tin} \leq B_{in} \leq V_{\max}^i p_{tin} \quad \forall i \in I^p, \forall n \in N \quad (7)$$

Dans le cas des tâches continues véhiculant de la matière, les quantités  $V_{\min}$  et  $V_{\max}$  traduisent des débits massiques. Les contraintes (7) stipulent donc que le débit des tâches continues est borné par des extrêmes définis par la durée maximale de fonctionnement de la dite tâche.

$$B_{st_{sn}} \leq C_s \quad \forall s \in S^{fis}, \forall n \in N \quad (8)$$

Dans le cas des tâches fictives de stockage, les contraintes (8) permettent de borner la taille de lot de la tâche fictive à la capacité de la cuve associée.

### 2.2.3 Contraintes de conservation

Les contraintes de conservation permettent de s'assurer que lors de l'activité d'une tâche sur plusieurs points d'évènements, la quantité de matière traitée ne varie pas.

La modélisation de cette situation se fait au travers des contraintes (9). La quantité  $M_i$  correspond alors à  $V_{\max}^i$  pour les tâches batch et utilités et elle correspond à  $V_{\min}^i \times p_{tin}^i$  pour les tâches continues où  $p_{tin}^i$  est la durée maximale de fonctionnement de la tâche continue.

$$\begin{aligned} B_{in} &\leq B_{in-1} + M_i(1 - W_{in-1} + Wf_{in-1}) \\ B_{in} &\geq B_{in-1} - M_i(1 - W_{in-1} + Wf_{in-1}) \end{aligned} \quad (9)$$

De plus, la définition des tailles de lot au début et à la fin de l'exécution d'une tâche est réalisée en introduisant les contraintes (10) au modèle d'ordonnancement.

$$\begin{aligned} B_{s_{in}} &= B_{in} W_{s_{in}} \quad \forall i \in I, n \in N \\ B_{f_{in}} &= B_{in} W_{f_{in}} \quad \forall i \in I, n \in N \end{aligned} \quad (10)$$

Ces contraintes étant non linéaires, une linéarisation de ces contraintes est nécessaire avant de pouvoir les appliquer.

### 2.2.4 Consommation et production de matières et d'utilités

Les contraintes ci-dessous représentent les consommations de matière, d'énergie ou d'utilités par les tâches du procédé. Ces contraintes ont été formulées afin d'agrégier les propriétés des flux (matières, énergies et utilités) dans des variables intermédiaires.

$$\begin{aligned} I_{sin} &= RoI_{is} B_{sin} \quad \forall s \in S, \forall i \in I^b, \forall n \in N \\ I_{sin} &= RoI_{is} B_{in} \quad \forall s \in S, \forall i \in I^u, \forall n \in N \end{aligned} \quad (11)$$

Les contraintes (11) représentent les quantités de matière consommées par une tâche dans un état « s » donné.

$$\begin{aligned} O_{sin} &= RoO_{is} B_{fin} \quad \forall s \in S, \forall i \in I^b, \forall n \in N \\ O_{sin} &= RoO_{is} B_{in} \quad \forall s \in S, \forall i \in I^u, \forall n \in N \end{aligned} \quad (12)$$

Les contraintes (12) représentent, quant à elles, les quantités de matière produites par les tâches dans un état.

$$UI_{sin} = ufi_{is} W_{in} + uv_{is} B_{in} + uw_{is} d_{in} \quad \forall s \in S, \forall i \in I, \forall n \in N \quad (13)$$

Finalement, les contraintes (13) représentent la consommation d'utilité ou d'énergie d'une tâche dans un état. Nous remarquerons que ces quantités sont dépendantes de l'activité de la tâche, ( $W$ ), de la taille de lot traitée par la tâche ( $B$ ) et par une composante liée à la durée de la tâche ( $d$ ).

### 2.2.5 Contraintes de bilan

Les contraintes de bilan permettent de traduire l'évolution de la masse ou de l'énergie au niveau d'un noeud. Les bilans énergétiques sont réalisés de manière similaire aux bilans massiques et donc, les contraintes ci-après sont valides quelque soit le type de commodité considéré (énergie, utilité ou matière).

$$\begin{aligned} S_{sn} + \sum_{i \in I} I_{sin} + \sum_{i \in I} UI_{sin} + \\ B_{st_{sn}} + EXPORT_{sn} = \\ S_{sn-1} + \sum_{i \in I} I_{sin-1} + \sum_{i \in I} UI_{sin-1} + \end{aligned}$$

$$Bst_{sn-1} + IMPORT_{sn-1} \quad \forall s \in S, n \in \quad (14)$$

Les contraintes (14) stipulent que la quantité stockée dans l'état « s » à l'instant « n » est égale au total des productions dans l'état à l'instant « n-1 » diminué des consommations à l'instant courant. Les variables d'écart IMPORT et EXPORT représentent, quant à elles, les importations et exportations de ressources au niveau de l'état.

$$\begin{aligned} SF_s &\geq D_s \\ SF_s &= S_{sn} + \sum_{i \in I} O_{siN} + \sum_{i \in I} UO_{siN} + Bst_{sn} + .. \\ EXPORT_{sn} \quad \forall s \in S \end{aligned} \quad (15)$$

La satisfaction des commandes au niveau de chaque état est alors réalisée en formulant les contraintes (15) qui permettent de s'assurer que la quantité de matière dans l'état « s » à la fin de l'horizon d'ordonnancement est au moins égale à la demande.

## 2.2.6 Contraintes de séquence

Les contraintes de séquence constituent une composante essentielle des modèles d'ordonnancement. En effet, ces contraintes liées au temps, assurent la définition du positionnement relatif d'une tâche par rapport aux autres et s'expriment généralement à l'aide d'*inégalités de potentiels* qui imposent une distance minimale entre deux événements particuliers associés aux tâches. Ces événements peuvent être des dates de début ou des dates de fin des tâches concernées.

**Séquence d'une même tâche sur un même appareil**  
Lorsqu'une tâche unique est exécutée successivement sur un même appareil, le modèle d'ordonnancement devra s'assurer qu'il n'y a pas de chevauchement dans le résultat final.

$$\begin{aligned} Ts_{in} &\geq Tf_{in-1} \\ Ts_{in} &\leq Tf_{in-1} + H(1 - W_{in-1} + Wf_{in-1}) \\ \forall i \in I, \forall n \in N, n > 1 \end{aligned} \quad (16)$$

La contrainte (16) stipule donc que la date de début d'exécution de la tâche « i » à un instant « n » devra être supérieure ou égale à la date de fin de la même tâche à l'instant précédent.

## Séquence de tâches différentes sur un même appareil

Les contraintes (17) stipulent que tant que la tâche en amont, « i' », est active, alors la tâche en aval, « i », ne pourra se lancer qu'au delà de la date de fin du premier.

Néanmoins, lorsqu'aucun stockage n'est disponible entre les deux tâches, alors la date de fin du premier est équivalente à la date de début du second.

$$\begin{aligned} Ts_{in} &\geq Tf_{i'n-1} - H(1 - W_{i'n-1}) \\ \forall j \in J, \forall i, i' \in I_j, i \neq i', \forall n \in N, n > 1 \\ Ts_{in} &\leq Tf_{i'n-1} + H(2 - Ws_{in} - Wf_{i'n-1}) \\ \forall s \in (S^{zw} \cup S^{nis}), \forall j \in J, \forall i \in I_j^{cs}, \forall i' \in I_j^{ps}, \forall n \\ &\in N, n > 1 \end{aligned} \quad (17)$$

Les contraintes (17) sont valides pour toutes les tâches dont la livraison de la matière se fait à la fin de l'exécution de la dite tâche.

## Séquence de tâches différentes sur différents appareils

Lorsque le prédécesseur est une tâche discontinue et le successeur une tâche continue ou discontinue, ou bien, lorsque le prédécesseur est une tâche continue et le successeur une tâche discontinue, la livraison de la matière par la tâche en amont se fait à la fin de l'exécution de ce dernier. Les contraintes (18) permettent de stipuler ce fait et elles dictent que la tâche en aval « i » se lancera au plus tôt à la fin de la tâche en amont « i' ». De plus, si aucun stockage intermédiaire n'est disponible entre les deux appareils, alors la date de fin de « i' » est égale à la date de début de « i ».

$$\begin{aligned} Ts_{in} &\geq Tf_{i'n-1} - H(1 - Wf_{i'n-1}) \\ \forall s \in S, \forall i \in I^{cs}, \forall i' \in I^{ps}, \forall j \in J_i \\ &\forall j' \in J_{i'}, \forall n \in N, n > 1 \\ Ts_{in} &\leq Tf_{i'n-1} + H(2 - Ws_{in} - Wf_{i'n-1}) \\ \forall s \in (S^{nis} \cup S^{zw}), \forall i \in I^{cs}, \forall i' \in I^{ps}, \forall j \in J_i \\ &\forall j' \in J_{i'}, \forall n \in N, n > 1 \end{aligned} \quad (18)$$

Lorsque le prédécesseur et le successeur sont tous les deux des tâches continues, alors les deux tâches doivent débuter au même moment si aucun stockage n'est disponible. Ces situations représentent généralement les cas de transfert de matière entre opérations. Les contraintes (19) permettent alors de représenter ces situations.

$$\begin{aligned}
 Ts_{in} &\geq Ts_{i'n-1} - H(1 - Ws_{i'n-1}) \\
 &\quad \forall s \in S, \forall i \in I^{cs}, \forall i' \in I^{ps}, \forall j \in J_i \\
 &\quad \forall j' \in J_{i'}, \forall n \in N, n > 1 \\
 Ts_{in} &\leq Ts_{i'n-1} + H(2 - Ws_{in} - Ws_{i'n-1}) \\
 &\quad \forall s \in (S^{nis} \cup S^{zw}), \forall i \in I^{cs}, \forall i' \in I^{ps}, \forall j \in J_i \\
 &\quad \forall j' \in J_{i'}, \forall n \in N, n > 1 \quad (19)
 \end{aligned}$$

#### Séquence des tâches fictives de stockage

Les tâches *fictives* de stockage sont des entités créées afin de permettre une meilleure gestion des capacités de stockage. Du fait de la représentation temporelle par l'utilisation de points d'événements spécifiques à chaque appareil, les bilans massiques s'effectuent uniquement lors des lancements des tâches de production. Ce comportement du modèle engendre une perte d'information car la livraison de matière se fait généralement à la fin de l'exécution de la tâche (procédé batch). On s'expose alors à des risques de dépassement de capacité de stockage qui engendreront des ordonnancements infaisables si cette situation n'est pas prise en compte.

Afin de palier à cet inconvénient, le concept de tâches *fictives* de stockage à capacité finie a été proposé par Janak et al. [2]. Ces tâches *fictives* se créent et commencent à la fin de l'exécution de chaque tâche produisant un état de capacité finie (FIS) et se terminent au lancement de la tâche consommatrice du stockage FIS. Ces tâches fictives possèdent alors une taille de lot bornée par la capacité de l'unité de stockage (contraintes (8)) et ont une durée variable au cours de l'ordonnancement.

$$\begin{aligned}
 Ts_{in} &\geq Tstf_{sn-1} \\
 Ts_{in} &\leq Tstf_{sn-1} + H(1 - Ws_{in}) \\
 &\quad \forall s \in S^{fis}, \forall i \in I^{cs}, \forall n \in N, n > 1 \quad (20)
 \end{aligned}$$

Les contraintes (20) permettent de faire coïncider la date de début des tâches consommant le stockage à capacité finie, avec la date de fin de la tâche fictive de stockage associée à l'état consommé.

$$\begin{aligned}
 Tsts_{sn} &\geq Tf_{in-1} - H(1 - Wf_{in-1}) \\
 Tsts_{sn} &\leq Tf_{in-1} + H(1 - Wf_{in-1}) \\
 &\quad \forall s \in S^{fis}, \forall i \in I^{ps}, \forall n \in N, n > 1 \quad (21)
 \end{aligned}$$

Les contraintes (21) permettent de faire coïncider la date de fin des tâches produisant le stockage à capacité finie, avec la date de début de

la tâche fictive de stockage associée à l'état produit.

$$Tsts_{sn} = Tstf_{sn-1} \quad \forall s \in S^{fis}, \forall n \in N, n > 1 \quad (22)$$

Finalement, les contraintes (22) assurent l'activité sans interruption d'une tâche fictive associée à un stockage donné.

#### Séquence des tâches fictives utilités

Les contraintes (23) assurent la synchronisation des dates de fin et des dates de début des tâches fictives utilisés avec les tâches consommatrices d'utilité. Ces contraintes stipulent que tant que la tâche consommatrice est active alors les tâches fictives seront présentes sur les mêmes intervalles temporels.

$$\begin{aligned}
 Tfut_{sn} &\leq Tf_{in} + H(1 - W_{in}) \\
 Tfut_{sn} &\geq Tf_{in} - H(1 - W_{in}) \\
 Tsut_{sn} &\leq Ts_{in} + H(1 - W_{in}) \\
 Tsut_{sn} &\geq Ts_{in} - H(1 - W_{in}) \\
 &\quad \forall s \in S^u, \forall i \in I^{cs}, \forall n \in N \quad (23)
 \end{aligned}$$

La contrainte (24) quant à elle, ordonne les différentes tâches fictives utilisés dans le temps.

$$Tsut_{sn} \geq Tfut_{sn-1} \quad \forall s \in S^u, \forall n \in N, n > 1 \quad (24)$$

#### 2.2.7 Contraintes de durée

La durée d'une tâche représente la distance minimale entre deux lancements successifs sur un même ou sur différents appareils. L'expression de cette distance pour le cas où la tâche est active sur plusieurs points d'évènements est donnée par les contraintes (25).

$$\begin{aligned}
 Tf_{in'} &\geq Ts_{in} + pt_{in} - H[2 - Ws_{in} - Wf_{in'} \\
 &\quad + \sum_{n''=1}^{n'-1} Wf_{in''}] \\
 Tf_{in'} &\leq Ts_{in} + pt_{in} + H[2 - Ws_{in} - Wf_{in'} \\
 &\quad + \sum_{n''=1}^{n'-1} Wf_{in''}] \\
 &\quad \forall i \in I, \forall n, n' \in N, n \leq n' \quad (25)
 \end{aligned}$$

La durée d'exécution d'une tâche varie généralement en fonction de la quantité de matière traitée. Néanmoins, pour le cas des tâches produisant les utilités, la durée de la tâche est inconnue. On con-

page 12

fère alors au modèle la possibilité de déterminer ces durées en introduisant une composante variable  $d_{in}$  à l'expression de la durée. L'expression générale de la durée est alors donnée par la relation (26).

$$pt_{in} = pf_i W s_{in} + p v_i B s_{in} + p u_i d_{in} \quad \forall i \in I, \forall n \in N \quad (26)$$

### 2.2.8 Bornes sur les variables

Les contraintes de bornes sur les variables définissent l'activation des variables ainsi que les valeurs extrémales que peuvent prendre chaque variable du modèle.

$$\begin{aligned} S_{sn} &\leq 0 \quad \forall s \in (S^{nis} \cup S^{uis} \cup S^{zw}), \forall n \in N \\ Bst_{sn} &\leq 0 \quad \forall s \in (S^{nis} \cup S^{uis} \cup S^{zw}), \forall n \in N \\ S_{sn} &\leq C_s \quad \forall s \in S, \forall n \in N \\ IMPORT_{sn} &\leq IMPORT_{max}^s \quad \forall s \in S, \forall n \in N \\ EXPORT_{sn} &\leq EXPORT_{max}^s \quad \forall s \in S, \forall n \in N \\ Ts_{in} &\leq H \quad \forall i \in I, \forall n \in N \\ d_{in} &\leq d_{max}^i \quad \forall i \in I, \forall n \in N \\ Tsts_{sn} &= 0 \quad \forall s \in S^{fis} \end{aligned}$$

De plus, lorsque le critère relatif à la minimisation du plan d'ordonnancement est exprimé dans la fonction objectif, alors les contraintes (28) sont ajoutées au modèle d'ordonnancement. Ces contraintes bornent la date de fin de chaque tâche du procédé à ne pas dépasser la valeur de la variable MS. Cette variable est ensuite minimisée dans la fonction objectif.

$$Tf_{in} \leq MS \quad \forall i \in I, \forall n \in N \quad (28)$$

## 3 Résultats

Dans cette section, deux exemples sont présentés. La résolution des modèles se fait avec le solveur CPLEX sur un processeur Intel Core 2 Duo à 2.53 GHz et 3 GB de RAM. Les options du solveur sont ceux fournis par défaut. Afin de vérifier l'optimalité d'une solution, nous assumerons que si aucune solution de meilleure qualité n'est obtenue entre l'instance N et N+3, alors la solution obtenue avec N points d'événements est optimale. De plus, nous fixerons le temps maximal de simulation pour chaque N à 300 secondes.

### 3.1 Exemple 1 : Minimisation du makespan

Mada-ENELSA Vol 2, 2014

Le premier cas d'application a été tiré des travaux de Maravelias et Grossmann [3] et est représenté par l'ERTN de la figure Fig. 1 Cet exemple autorise la variation de la durée des tâches en fonction de la taille de lot, mais prend également en compte la consommation de ressources à capacités limitées. Les données relatives à l'exemple 1 sont données en Annexe A.

Cet exemple comprend deux types de réacteurs (type I et type II). Les réacteurs R1 et R2 sont du type I et le réacteur R3 du type II. Quatre réactions sont alors réalisées au sein de ce procédé dont, une réaction T1 (ou T5) et T2 (ou T6) nécessitant un réacteur de type I, et une réaction T3 et T4 nécessitant un réacteur de type II.

De plus, les réactions T1, T5 et T3 nécessitent une chauffe avec de la vapeur tandis que les réactions T2, T6 et T4, consomment de l'électricité. L'électricité est fournie au niveau de la centrale par l'opération T7 et la vapeur est produite par l'opération T8. Les consommations énergétiques respectives des différentes opérations de réaction sont données en Annexe A, de même que les caractéristiques des tâches devant produire les dites utilités. Afin de démontrer l'effet de la disponibilité des utilités, nous considérerons deux scénarios.

Scen.	N	Plan (h)	Tps (s)	gap (%)
1	07	8.5	0.779	0.00
	08	8.5	9.414	0.00
	09	8.5	70.47	0.00
	10	8.5	300.0	0.04
2	07	8.9	1.138	0.00
	08	8.9	16.26	0.00
	09	8.9	198.9	0.00
	10	8.9	300.0	0.04

Tableau 1 : Résultats de l'optimisation de l'exemple 1

Le premier scénario assume que l'électricité et la vapeur sont respectivement disponibles à une puissance de 40 [kW] et à un débit de 40 [kg/h]. Nous nommerons ce scénario « Scénario 1 ». Ensuite, nous assumerons une diminution de la capacité en puissance électrique à 30 [kW] et une diminution du débit de vapeur à 30 [kg/h], ce nouveau scénario s'appellera « Scénario 2 ».

Nous appliquerons alors le modèle d'ordonnancement sur ces deux scénarios en minimisant le second membre de la contrainte (28) et en définissant la production de 100 [kg] de P1 et de 80 [kg] de P2. Autrement dit, nous minimisons la

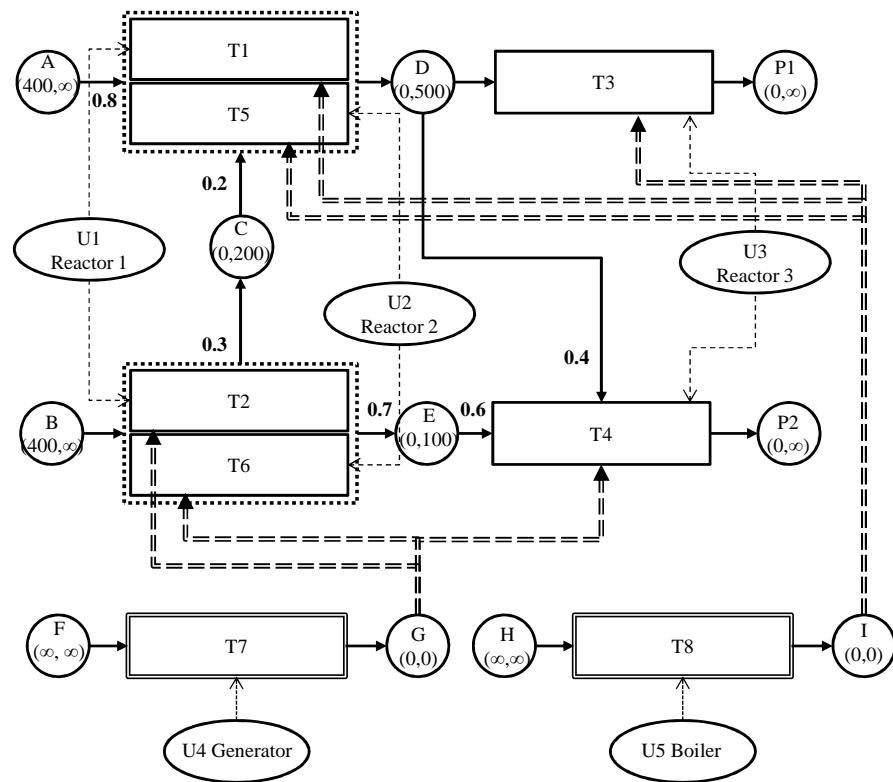


Fig. 1 : Représentation ERTN de la recette de l'exemple 1

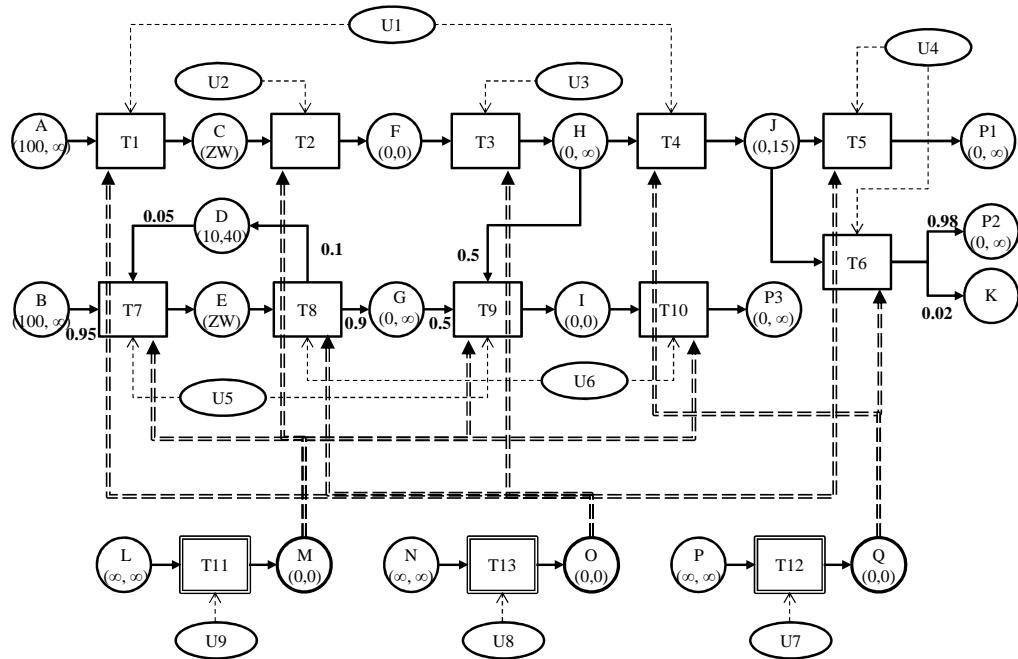


Fig. 2 : Représentation ERTN de la recette de l'exemple 2

## ANNEXE A - LISTE DES PUBLICATIONS

---

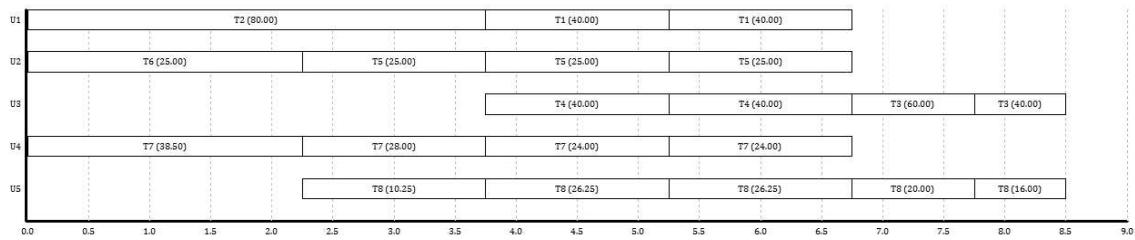


Fig. 3 : Diagramme de Gantt de l'exemple 1 (scénario 1)

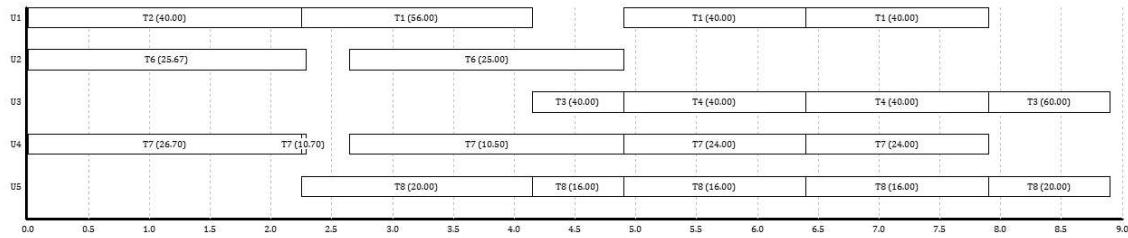


Fig. 4 : Diagramme de Gantt de l'exemple 1 (scénario 2)

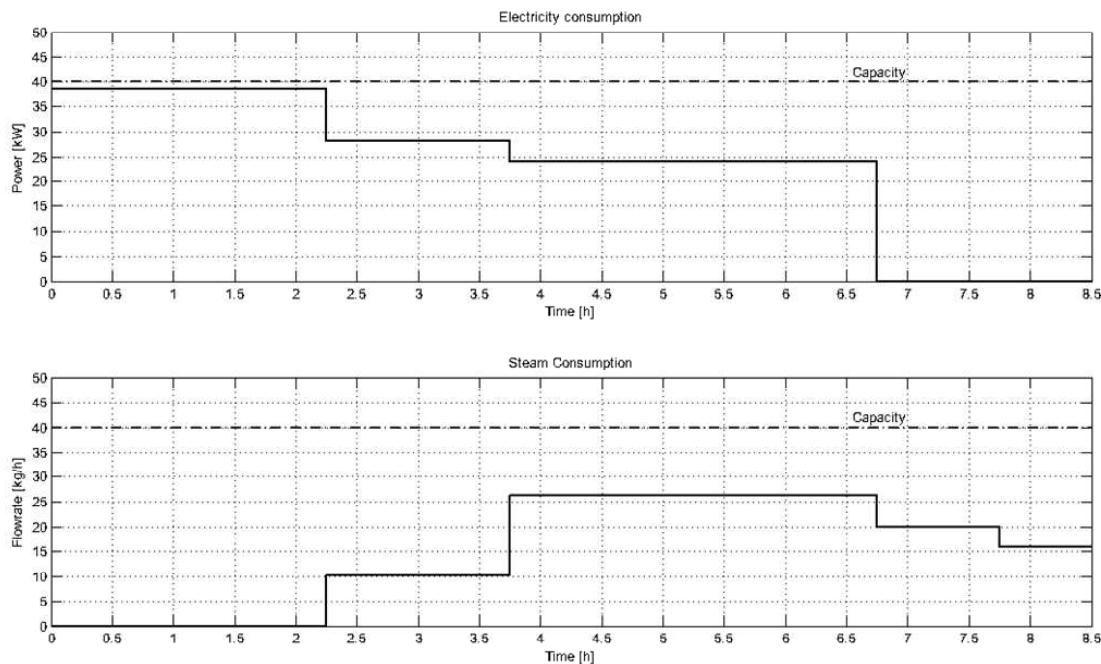


Fig. 5 : Profil d'utilisation des ressources de l'exemple 1 (scénario 1)

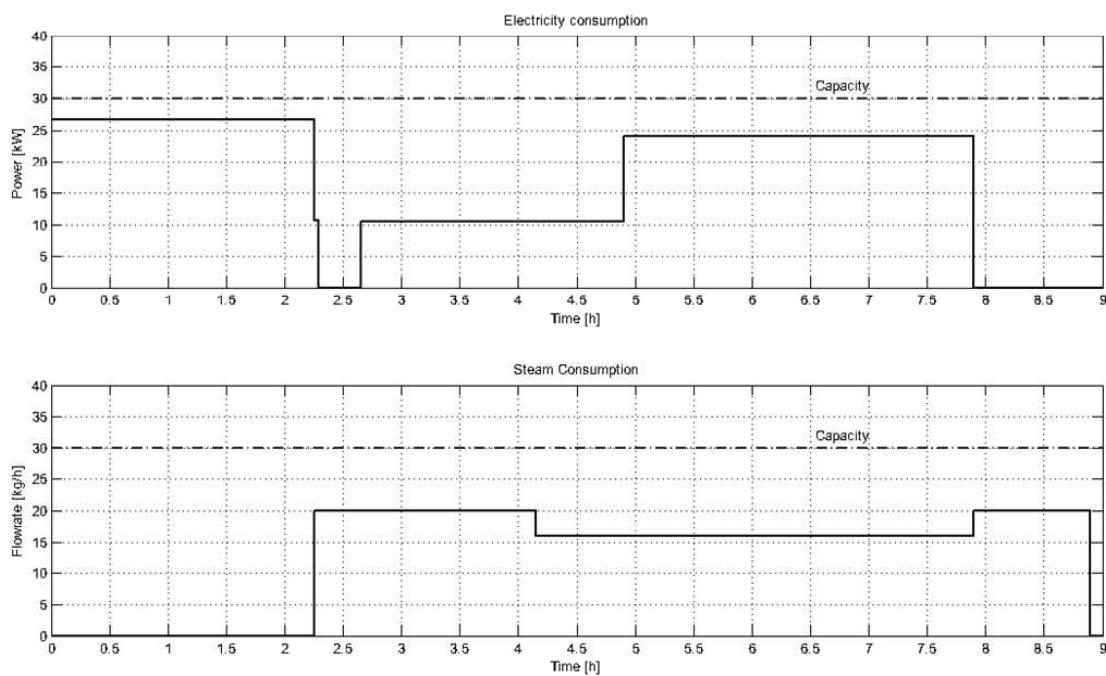


Fig. 6 : Profil d'utilisation des ressources de l'exemple 1 (scénario 2)

## ANNEXE A - LISTE DES PUBLICATIONS

---

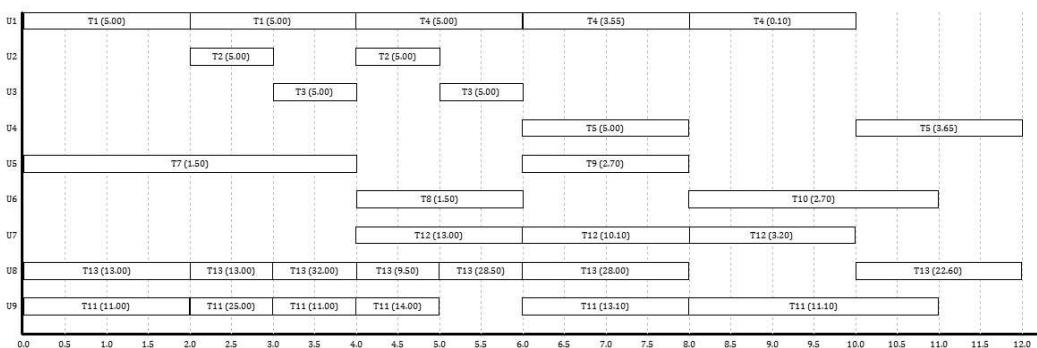


Fig. 7 : Diagramme de Gantt de l'exemple 2 (scénario 1)

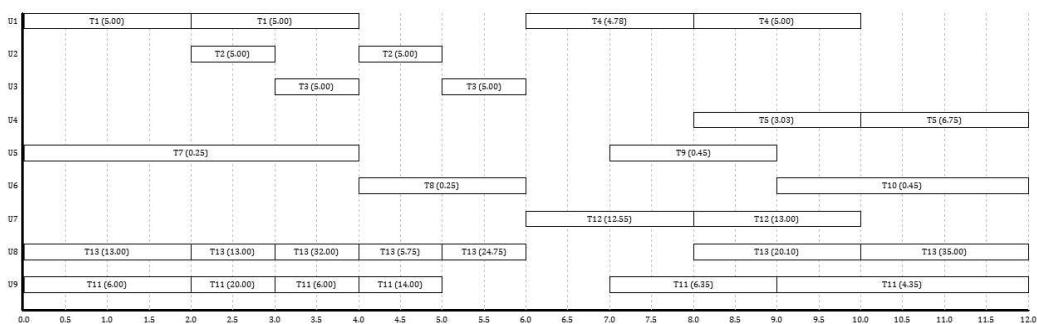


Fig. 8 : Diagramme de Gantt de l'exemple 2 (scénario 2)

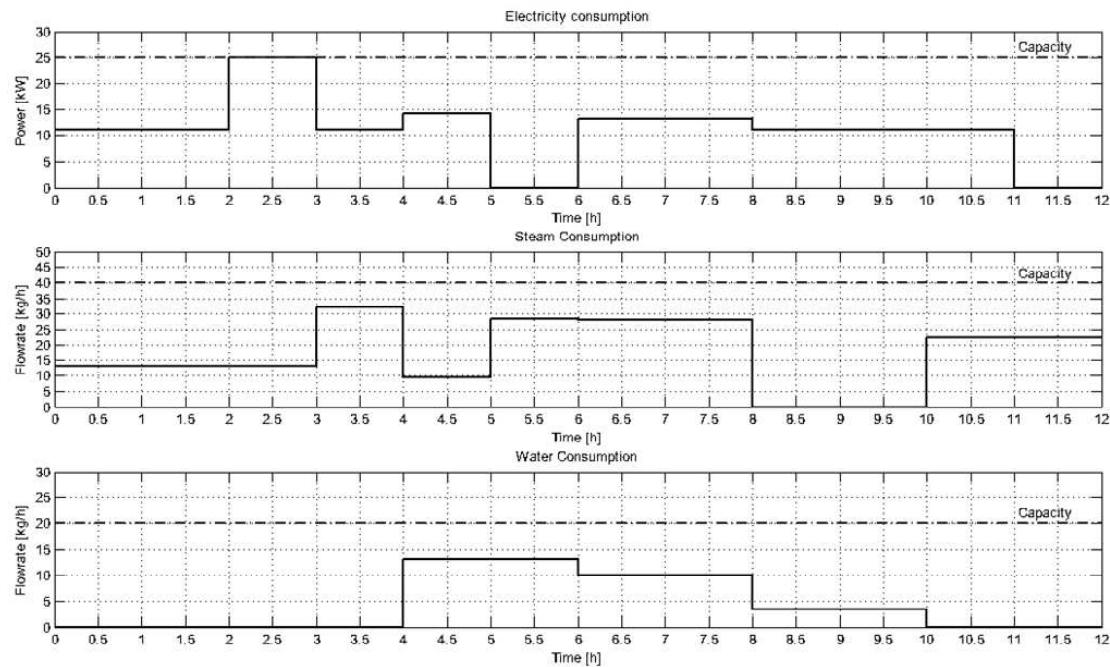


Fig. 9 : Profils d'utilisation des ressources de l'exemple 2 (scénario 1)

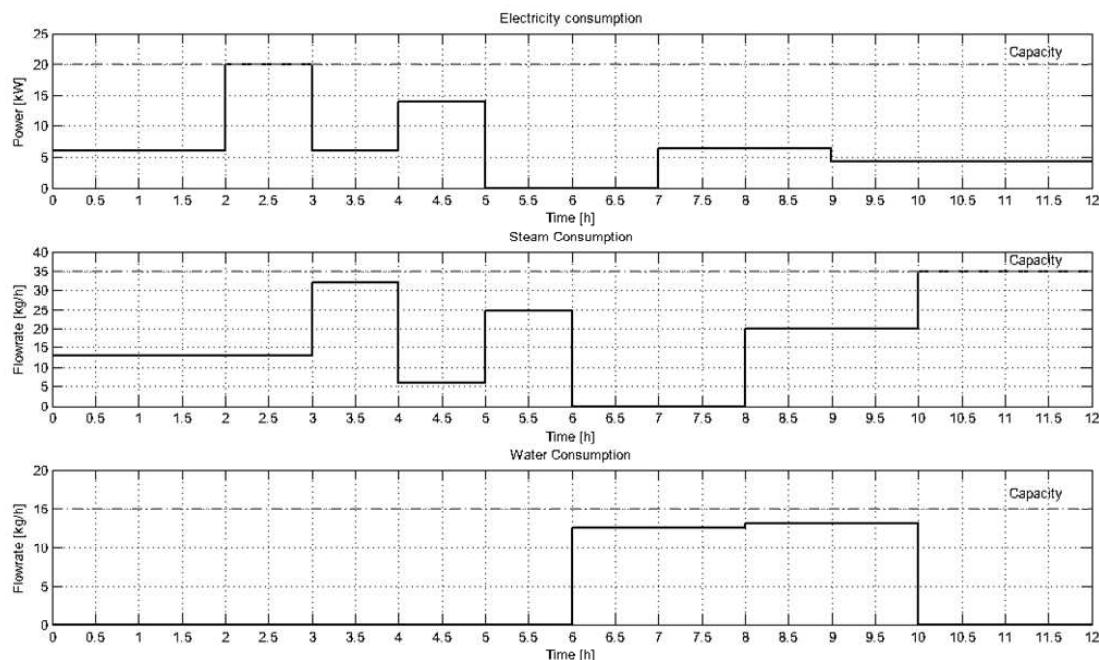


Fig. 10 : Profils d'utilisation des ressources de l'exemple 2 (scénario 2)

durée d'exécution pour la production d'une quantité donnée de produits finis en étudiant l'effet de la diminution de la capacité de la centrale d'énergie.

Lorsque les scénarios 1 et 2 sont résolus, les diagrammes de Gantt respectifs, des solutions optimales sont données sur la figure Fig. 3 et sur la figure Fig. 4. Concernant les profils de consommation en électricité et en vapeur (pour chaque scénario), elles sont données par les figures Fig. 5 et Fig. 6 respectivement. Les résultats numériques sont quant à eux, résumés dans le Tableau 1, elles représentent les différentes valeurs de la fonction objectif pour des valeurs successives du nombre de points d'évènements N.

### 3.2 Exemple 2 : Maximisation du profit

Le second exemple est également tiré des travaux de Maravelias et Grossmann [3], la représentation du procédé étudié est donnée par la recette de la figure Fig. 2. Ce procédé comprend six ressources, 10 tâches et 14 états au niveau de l'atelier de production. De plus, le procédé consomme trois types d'utilités, à savoir de l'électricité, de la vapeur et de l'eau. Les tâches T2, T7, T9 et T10 consomment de l'électricité, tandis que les tâches T1, T3, T5 et T8 consomment de la vapeur. Finalement, les tâches T4 et T6 consomment de l'eau de refroidissement.

Scen.	N	Plan (h)	Tps (s)	gap (%)
1	06	6500	0.227	0.00
	07	6500	4.032	0.00
	08	11350	45.18	0.00
	09	11350	300.0	36.8
	10	11350	300.0	57.6
	11	11350	300.0	67.0
2	06	6500	0.202	0.00
	07	6500	1.538	0.00
	08	10225	31.20	0.00
	09	10225	300.0	37.3
	10	10225	300.0	55.9
	11	10225	300.0	65.0

Tableau 2 : Résultats de l'optimisation de l'exemple 2

Deux scénarios d'ordonnancement sont alors étudiés pour cet exemple, le premier scénario assume la disponibilité en l'électricité, en vapeur et en eau respectivement à 25 [kW], 40 [kg/h] et de 20 [kg/h]. Le deuxième scénario, quant à lui, émet l'hypothèse d'une diminution de ces capacités aux valeurs respectives de 20 [kW], 35 [kg/h]

Mada-ENELSA Vol 2, 2014

et 15 [kg/h]. La fonction objectif consiste alors à maximiser la production des produits finis pendant un horizon de 12h. Les caractéristiques de chaque tâche et des consommations en utilités sont données en Annexe B.

Lorsque les scénarios 1 et 2 sont exécutés pour l'exemple 2, le diagramme de Gantt de la solution optimale du scénario 1 est donné par la figure Fig. 7. Tandis que le cas du scénario 2 est donné par la figure Fig. 8. A chacun de ces diagrammes de Gantt correspond alors les profils de la figure Fig. 9 pour le scénario 1, et les profils de la figure Fig. 10 pour le cas du scénario 2. Le Tableau 2 résume quant à lui les résultats numériques de l'optimisation de l'exemple 2.

## 4 Discussions

L'analyse des résultats fournis par le modèle d'ordonnancement lors de l'exécution de l'exemple 1 permet de conclure sur le fait que les solutions optimales sont obtenues dès les premières itérations (voir Tableau 1)

En effet, lorsque nous observons le cas du scénario 1, l'instance correspondant à N=7 permet d'obtenir la valeur optimale de la fonction objectif (ici 8.5h), cette valeur reste alors inchangée et les itérations restantes servent uniquement à prouver l'optimalité de la solution. Ce même constat s'observe pour le cas du scénario 2.

D'un autre coté, lorsque l'on dirige notre attention sur les diagrammes de Gantt des solutions optimales des deux instances (scénario 1 et 2), on constate que la diminution de la capacité des tâches produisant les utilités engendre une augmentation de la durée du plan d'ordonnancement à 8.9 h. Ceci est tout à fait fondé, car à énergie constante (même quantité de produits à réaliser pour les deux scénarios), la diminution de la puissance entraîne obligatoirement une augmentation de la durée (ici le plan d'ordonnancement). On pourra donc conclure sur le fait que la solution du scénario 1 (makespan de 8.5 h) n'est pas réalisable pour les capacités des utilités fournies dans le scénario 2 car le modèle d'ordonnancement transfère les charges des périodes de pic du scénario 1 vers l'aval afin de respecter la capacité des ressources consommées. Ce transfert de charge ou lissage en aval peut s'observer en comparant les profils d'électricité de la figure Fig. 5 et de la figure Fig. 6.

Dans le cas de l'exemple 2, l'objectif consiste à maximiser la production pendant une durée maximale donnée. Lorsque nous observons les résultats fournis par le Tableau 2, nous pouvons constater que l'optimal du scénario 1 de l'exemple 2 est obtenu à l'itération correspondant à N=8. La valeur de la fonction objectif correspondant à cet optimal est alors de 11350 et cette solution s'obtient au bout de 50 secondes. Dans le cas du scénario 2, l'optimal est également atteint pour une valeur de N égale à 8, cette fois-ci la solution est obtenue au bout de 33 secondes. Les autres itérations correspondant à des valeurs de N supérieures à 8 sont uniquement réalisées pour valider l'optimalité de la solution précédente et ce conformément aux critères de convergence formulés plus haut (temps de simulation maximal 300 secondes et 3 itérations sans améliorations).

Lorsque les valeurs des solutions optimales des deux scénarios sont comparées, on constate que la diminution de la capacité des opérations produisant les utilités, entraîne une diminution de la production au niveau de l'atelier, donc une diminution du profit dégagé. Cette baisse de performance est due en partie à la saturation de la capacité de la ressource produisant l'électricité dans les deux scénarios, mais on constate également que la diminution de la puissance électrique lors du scénario 2, entraîne la création d'une nouvelle ressource goulet à savoir l'opération T13 produisant la vapeur. Ces deux ressources provoquent alors la limitation de la production au niveau de l'atelier car les consommations en utilités sont directement liées aux tailles de lot des tâches.

## 5 Conclusion

A travers cet article, nous avons eu la possibilité d'éprouver le modèle d'ordonnancement présenté sur des exemples impliquant la prise en compte des ressources énergétiques à capacités limitées. Les résultats ont permis de montrer que le modèle permet d'obtenir des ordonnancements satisfaisant les contraintes liées aux ressources mais il permet également une analyse plus poussée de la réponse du procédé lorsqu'une diminution de la capacité énergétique se manifeste. D'un autre côté, le modèle pourra servir de dimensionnement des systèmes de production d'énergie lorsque les objectifs de production sont bien définis. Il existe cependant, une limitation à Mada-ENELSA Vol 2, 2014

l'approche proposée. Le temps nécessaire au modèle pour trouver une solution optimale, voire de bonne qualité, peut devenir très important quand la taille de l'instance traitée augmente, il est donc nécessaire de contenir cette augmentation. Ainsi, comme perspectives de recherche, nous envisageons d'exploiter la structure du modèle en mettant en œuvre une technique de décomposition. Cette décomposition devra permettre d'utiliser des approches mixtes ou hybrides alliant la programmation linéaire et la programmation par contraintes ou les métahéuristiques.

### Annexe A : Données de l'exemple 1

	$V_{min}$	$V_{max}$	$pf$	$pv$	$pu$
T1	40	80	0.5	0.025	0
T2	40	80	0.75	0.0375	0
T3	40	80	0.25	0.0125	0
T4	40	80	0.5	0.025	0
T5	25	50	0.5	0.04	0
T6	25	50	0.75	0.06	0
T7	0	40/30	0	0	1
T8	0	40/30	0	0	1

Tableau 3 : Données des tâches de l'exemple 1

	$ufi_{elec}$	$uvl_{elec}$	$ufi_{vap}$	$uvl_{vap}$
T1	-	-	6	0.25
T2	4	0.3	-	-
T3	-	-	8	0.2
T4	4	0.5	-	-
T5	-	-	4	0.25
T6	3	0.3	-	-

Tableau 4 : Consommations de l'exemple 1

### Annexe B : Données de l'exemple 2

	$V_{min}$	$V_{max}$	$pf$	$pu$
T1	0	5	2	0
T2	0	8	1	0
T3	0	6	1	0
T4	0	5	2	0
T5	0	8	2	0
T6	0	8	2	0
T7	0	3	4	0
T8	0	4	2	0
T9	0	3	2	0
T10	0	4	3	0
T11	0	25/20	0	1
T12	0	20/15	0	1
T13	0	40/35	0	1

Tableau 5 : Données des tâches de l'exemple 2

	$ufi_{elec}$	$uvi_{elec}$	$ufi_{vap}$	$uvi_{vap}$	$ufi_{eau}$	$uvi_{eau}$
T1	-	-	3	2	-	-
T2	4	2	-	-	-	-
T3	-	-	4	3	-	-
T4	-	-	-	-	3	2
T5	-	-	8	4	-	-
T6	-	-	-	-	4	3
T7	5	4	-	-	-	-
T8	-	-	5	3	-	-
T9	5	3	-	-	-	-
T10	3	3	-	-	-	-

Tableau 6 : Consommations de l'exemple 2

## Annexe C : Nomenclature

### • Indices

i : indice des tâches  
 j : indice des appareils  
 s : indice des états ou des états ressource  
 n : indice représentant l'événement courant

### • Ensembles

N : ensemble des points d'événements  
 I : ensemble des tâches  
 $I_j$  : ensemble des tâches associées à l'appareil j  
 $I^c$  : ensemble des tâches continues  
 $I^b$  : ensemble des tâches discontinues  
 $I^p$  : ensemble des tâches continues matière  
 $I^u$  : ensemble des tâches continues utilité  
 $I^{ps}$  : ensemble des tâches produisant l'état s  
 $I^{cs}$  : ensemble des tâches consommant l'état s

### • États

S : ensemble des états  
 $S^{zw}$  : ensemble des états en transfert direct  
 $S^{fis}$  : ensemble des états à capacité finie  
 $S^{nis}$  : ensemble des états sans stockage  
 $S^{uis}$  : ensemble des états à capacité infinie

### • Ressources unitaires

J : ensemble des appareils  
 $J_i$  : ensemble des appareils traitant la tâche i

### • Paramètres associés aux tâches

$V_{min}^i$  : taille de lot minimum d'une tâche  
 $V_{max}^i$  : taille de lot maximum d'une tâche  
 $p_{fi}^i$  : durée fixe d'une tâche discontinue  
 $p_{vi}^i$  : durée dépendant de la taille de lot  
 $p_{ui}^i$  : durée dépendant de l'utilité  
 $d_{max}^i$  : variation maximale de la durée d'une tâche

### • Paramètres associés aux états

$C_s$  : capacité d'un état  
 $D_s$  : demande d'un état  
 $\text{IMPORT}_{max}^s$  : importation dans un état  
 $\text{EXPORT}_{max}^s$  : exportation à partir un état

### • Paramètres associés aux couples tâches-états

$RoO_{is}$  : production d'une tâche vers un état  
 $RoI_{is}$  : consommation d'une tâche dans un état  
 $ufi_{is}$  : consommation fixe d'utilité d'une tâche  
 $uvi_{is}$  : consommation variable d'utilité d'une tâche

### • Variables associées aux tâches

$W_{in}$  : état d'une tâche  
 $W_{sin}$  : décision de lancement d'une tâche  
 $W_{fin}$  : décision de terminaison d'une tâche  
 $B_{in}$  : taille de lot d'une tâche pendant son exécution  
 $B_{sin}$  : taille de lot d'une tâche lors de son lancement  
 $B_{fin}$  : taille de lot d'une tâche lors de sa terminaison  
 $pt_{in}$  : durée de la tâche  
 $T_{sin}$  : date à laquelle la tâche commence  
 $T_{fin}$  : date à laquelle la tâche se termine  
 $d_{in}$  : composante libre de la durée de la tâche

### • Variables associées aux états

$S_{sn}$  : quantité stockée dans l'état s  
 $SF_s$  : quantité finale dans l'état s  
 $Tsut_{sn}$  : date de début de la tâche fictive utilité  
 $Tfut_{sn}$  : date de fin de la tâche fictive utilité  
 $Tsts_{sn}$  : date de début d'une tâche fictive de stockage  
 $Tstf_{sn}$  : date de fin d'une tâche fictive de stockage  
 $Bst_{sn}$  : taille de lot d'une tâche fictive de stockage  
 $\text{IMPORT}_{sn}$  : importation de ressource dans l'état s  
 $\text{EXPORT}_{sn}$  : exportation de ressource depuis l'état s

### • Variables associées aux couples tâches-états

$I_{sin}$  : consommation d'une tâche i dans l'état s  
 $O_{sin}$  : production d'une tâche i vers l'état s  
 $UI_{sin}$  : consommation d'utilité (ou d'énergie) de la tâche i dans l'état s

### • Variable associée au problème

MS: durée d'exécution de l'ordonnancement

*Références*

- [1] Mujtaba Hassan AGHA et al. « Integrated production and utility system approach for optimizing industrial unit operations ». Dans : Energy 35 (2009), p. 611–627.
- [2] Stacy L. JANAK, Xiaoxia LIN et Christodoulos A. FLOUDAS. « Enhanced Continuous-Time Unit-Specific Event-Based Formulation for Short-Term Scheduling of Multipurpose Batch Processes : Resource Constraints and Mixed Storage Policies ». Dans : Industrial & Chemical Engineering Resources 43 (mai 2004), p. 2516–2533.
- [3] Christos T. MARAVELIAS et Ignacio E. GROSSMANN.« New General Continuous-Time State-Task Network Formulation for Short-Term Scheduling of Multipurpose Batch Plants ». Dans : Industrial & Engineering Chemistry Research 42.13 (juin 2003), p. 3056–3074. ISSN : 0888-5885, 1520-5045.
- [4] C. A MÉNDEZ et al. « State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes ». Dans : Computers & Chemical Engineering 30 (2006), p. 913–946.
- [5] Raphaele THERY et al. « The Extended Resource Task Network : A Framework for the Combined Scheduling of Batch Processes and CHP Plants ». Dans : International Journal Of Production Research (2011).

---

## ANNEXE B - CARACTÉRISTIQUES DES EXEMPLES

---

Cette annexe présente les caractéristiques des différents exemples manipulés dans cette thèse. L'exemple 1 traduit la situation de récupération directe d'énergie, l'exemple 2 s'attèle à la résolution du problème d'intégration énergétique indirecte, autrement dit, du stockage d'énergie. Les exemples 3 à 5, quant à elles, traitent respectivement de la prise en compte des différents modes de fonctionnement d'une chaudière à vapeur, de la prise en compte du nettoyage en fréquence et du nettoyage en séquence.

Tâche	Appareil	$b_{min}$	$b_{max}$	$p_f$ [h]	$\Delta H$ [MJ/kg]	$T^i$ [ $^{\circ}$ C]	$T^o$ [ $^{\circ}$ C]	Type
T1	Réacteur	9	60	2	0.34	140	60	batch
T2	Filtreur	12	80	1	-	-	-	batch
T3	Colonne 1	11	70	3	0.14	40	110	batch
T4	Échangeur	0.1	15	-	-	-	-	continu
T5	Chaudière	0.1	15	-	-	-	-	continu
T6	Vanne	0.1	15	-	-	-	-	continu
T7	Env. React	0.1	15	-	-	-	-	continu
T8	Env. Col 1	0.1	15	-	-	-	-	continu
T9	Colonne 2	10	60	2	0.10	150	200	batch
T10	Env. Col 2	0.1	15	-	-	-	-	continu

Tableau B.1 – Caractéristiques des tâches de l'exemple 1

Etat	Stock I.	Cap/Dde	Coût	Politique	H (MJ/kg)
A	1000	1000		UIS	
B	1000	1000		UIS	
IAB	0	200		FIS	
AB1	0	250		FIS	
AB2	0	250		FIS	
P1	0	1000/120	5	UIS	
P2	0	1000/120	5	UIS	
Int1	0	0		NIS	
Int2	0	0		NIS	
Int3	0	0		NIS	
Eau	1000	1000		UIS	1
Fluide	1000	1000	4	UIS	1
Vap. HP	0	0		NIS	3
Vap. MP	0	0		NIS	2
Source	1000	1000		UIS	
Puits	0	1000		UIS	
Fuel	1000	1000	200	UIS	4

Tableau B.2 – Caractéristiques des états de l'exemple 1

Critère	Paramètre	Valeur
Produits finis	$C_{fp}$	5
Produits intermédiaires	$C_{int}$	2
Carburant fossiles	$C_{fu}$	200
Liquide de refroidissement	$C_w$	4
Durée du plan	$C_{ms}$	1
Lancement	$C_l$	1

Tableau B.3 – Coefficients de coût de la fonction objectif de l'exemple 1

Tâche	Appareil	$b_{min}$	$b_{max}$	$p_f$ (h)	$\Delta H$ (MJ/kg)	$T^i$ ( $^{\circ}$ C)	$T^o$ ( $^{\circ}$ C)	Type
T1	Réacteur	9	60	2	-	-	-	batch
T2	Réacteur	9	60	0.5	0.14	140	60	batch
T3	Filtre	12	80	1	-	-	-	batch
T4	Colonne 1	11	70	3	0.34	40	110	batch
T5	Colonne 2	10	60	2	0.20	150	200	batch
T6	Env. React	0.1	17	-	-	-	-	continu
T7	Env. Col 1	0.1	8	-	-	-	-	continu
T8	Pompe	0.1	17	-	-	-	-	continu
T9	Pompe	0.1	8	-	-	-	-	continu
T10	Vanne LP	0.1	15	-	-	-	-	continu
T11	Vanne MP	0.1	15	-	-	-	-	continu
T12	Chaudière	0.1	15	-	-	-	-	continu
T13	Env. Col 2	0.1	10	-	-	-	-	continu

Tableau B.4 – Caractéristiques des tâches de l'exemple 2

Etat	Stock I.	Capa/Dde	Coût	Politique	H (MJ/kg)
A	1000	1000	-	UIS	-
B	1000	1000	-	UIS	-
IAB	0	200	-	FIS	-
AB1	0	250	-	FIS	-
AB2	0	250	-	FIS	-
P1	0	1000/60	5	UIS	-
P2	0	1000/60	5	UIS	-
Int1	0	0	-	NIS	-
Int2	0	0	-	NIS	-
Int3	0	0	-	NIS	-
Eau	1000	1000	-	UIS	1
Fluide	1000	1000	10	UIS	1
Vap. HP	0	0	-	NIS	3
Vap. MP	0	0	-	NIS	2
Vap. LP	0	0	-	NIS	1.25
Source	1000	1000	-	UIS	-
Puits	0	1000	-	UIS	-
Fuel	1000	1000	80	UIS	4

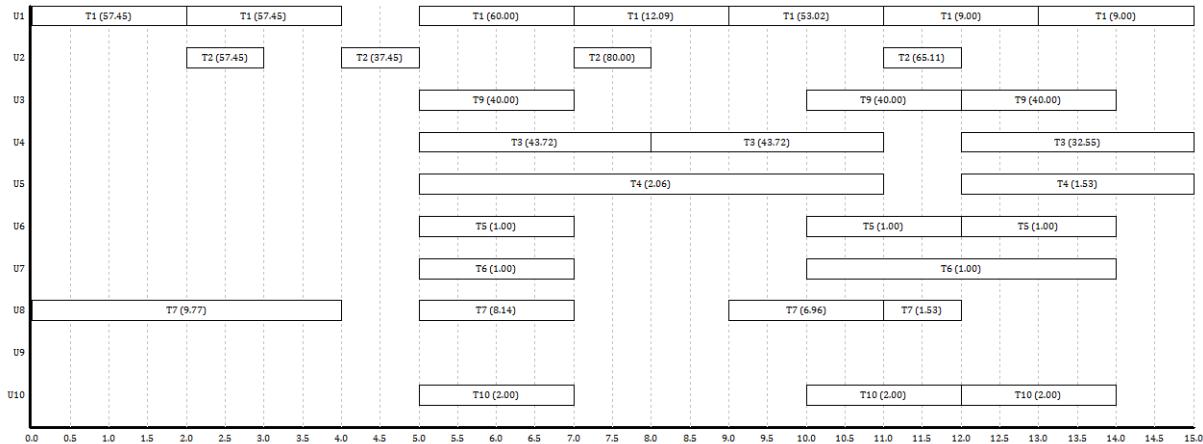
Tableau B.5 – Caractéristiques des états de l'exemple 2

Critère	Paramètre	Valeur
Produits finis	$C_{fp}$	5
Carburant fossiles	$C_{fu}$	80
Liquide de refroidissement	$C_w$	10
Durée du plan	$C_{ms}$	1
Lancement	$C_l$	1

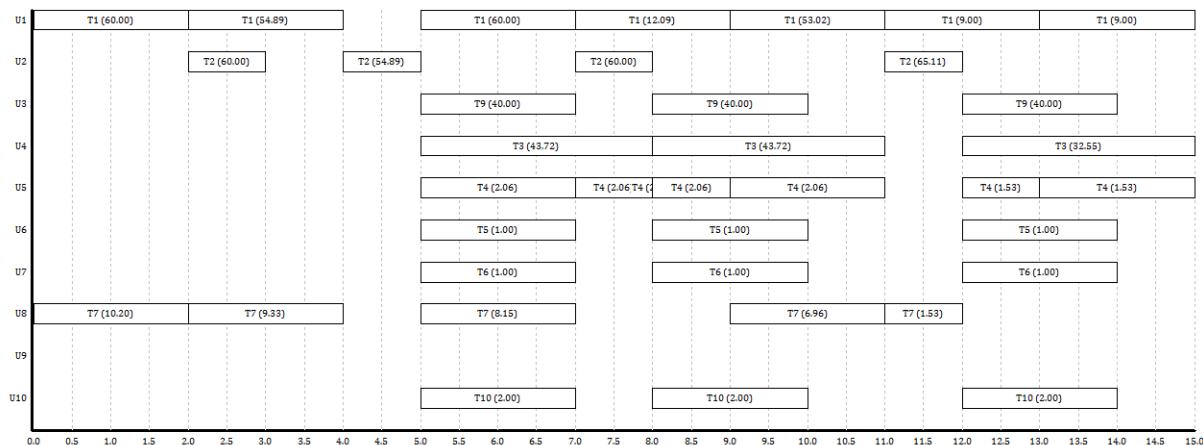
Tableau B.6 – Coefficients de coût de la fonction objectif de l'exemple 2

## ANNEXE B - CARACTÉRISTIQUES DES EXEMPLES

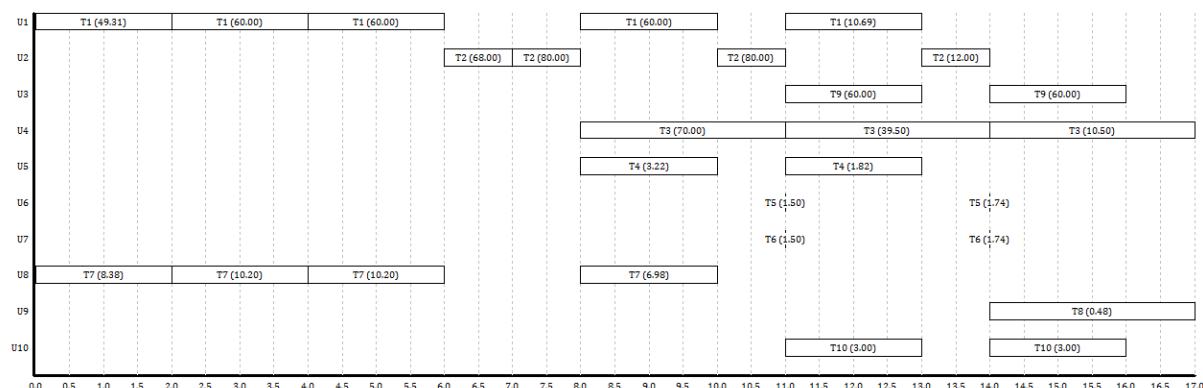
---



(a) Résultats du modèle de PLVM sans les coupes



(b) Résultats du modèle de PLVM avec les coupes



(c) Résultats du modèle hybride

Figure B.1 – Résultats de l'ordonnancement de l'exemple 1

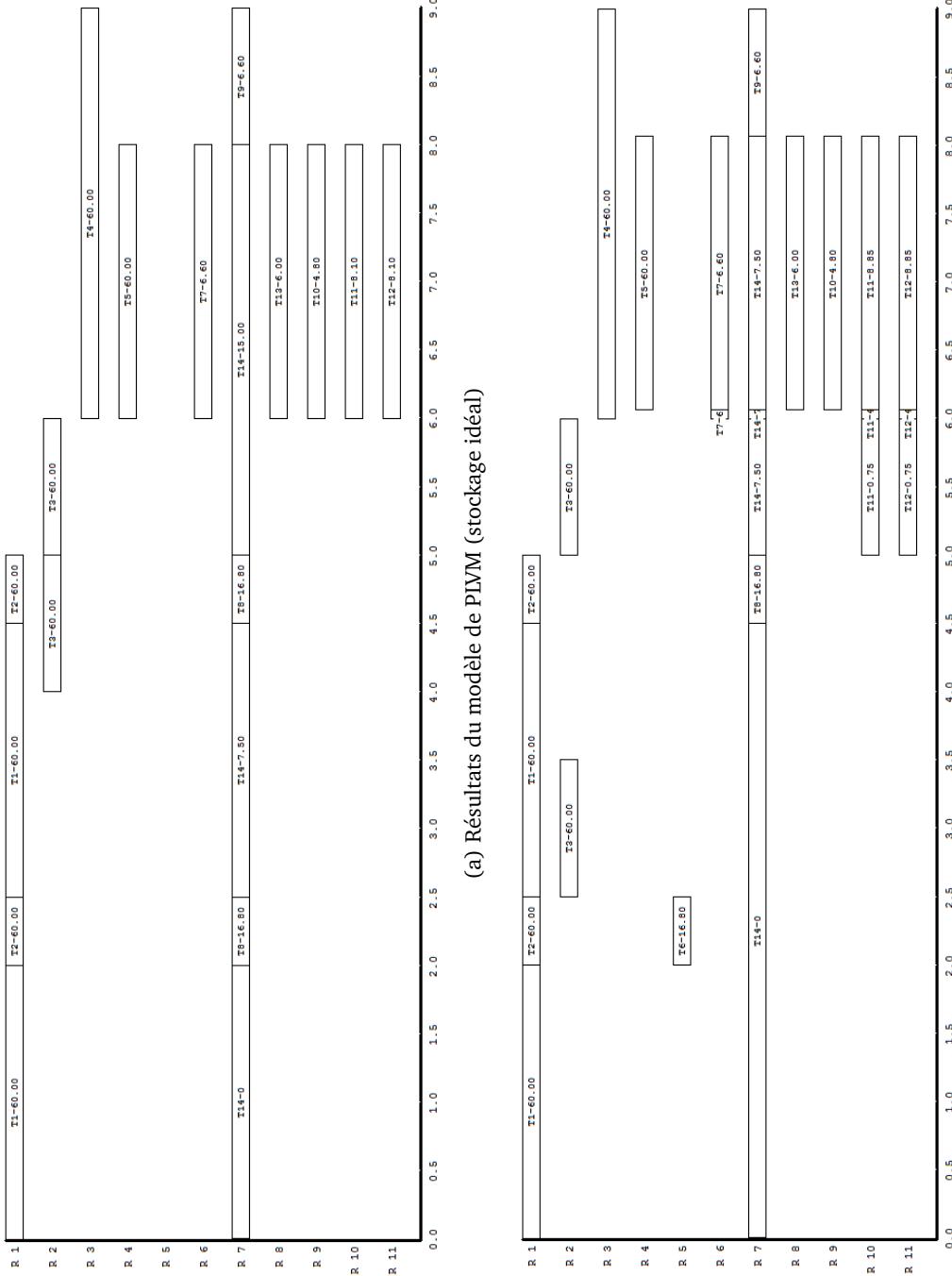


Figure B.2 – Résultats de l'ordonnancement de l'exemple 2

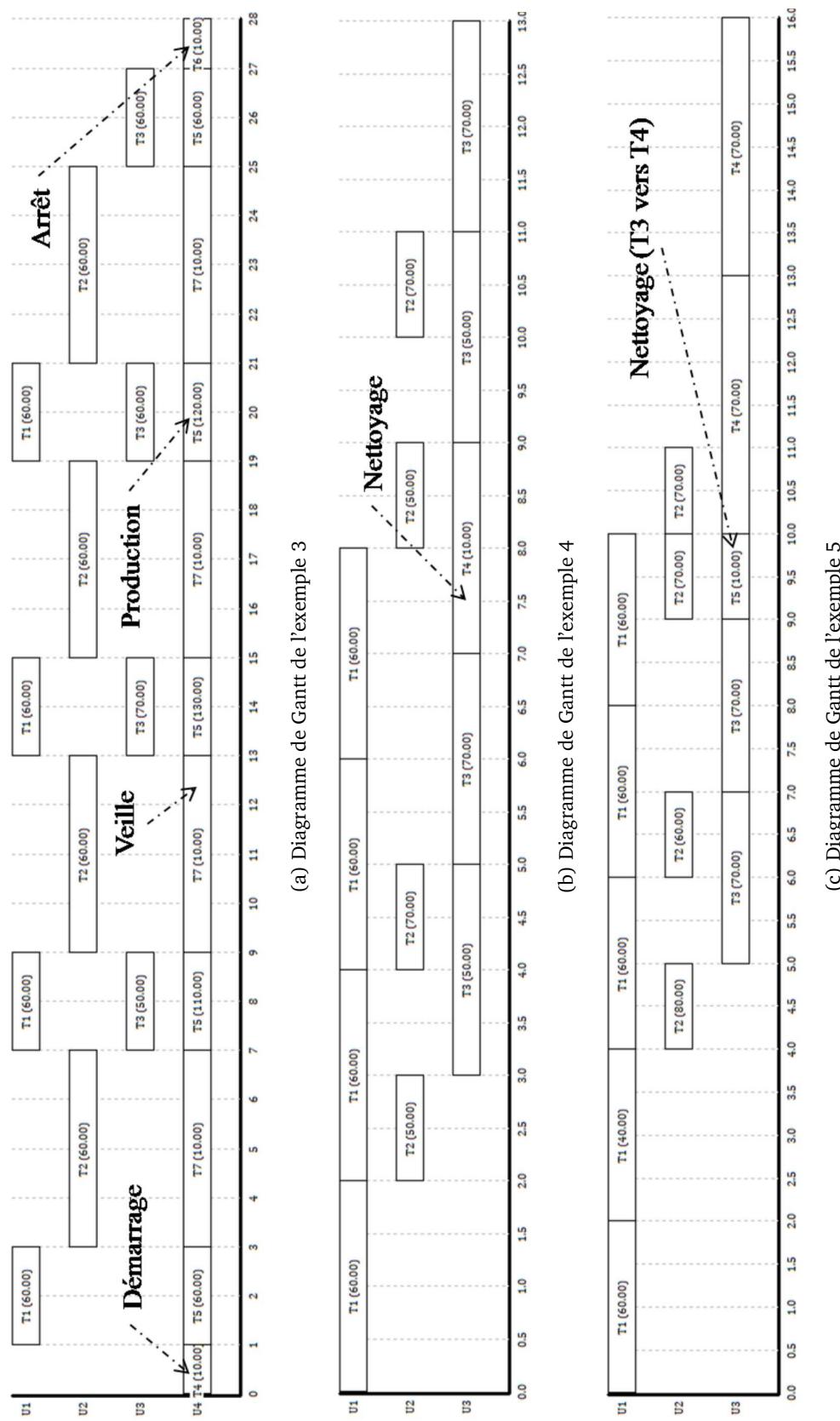
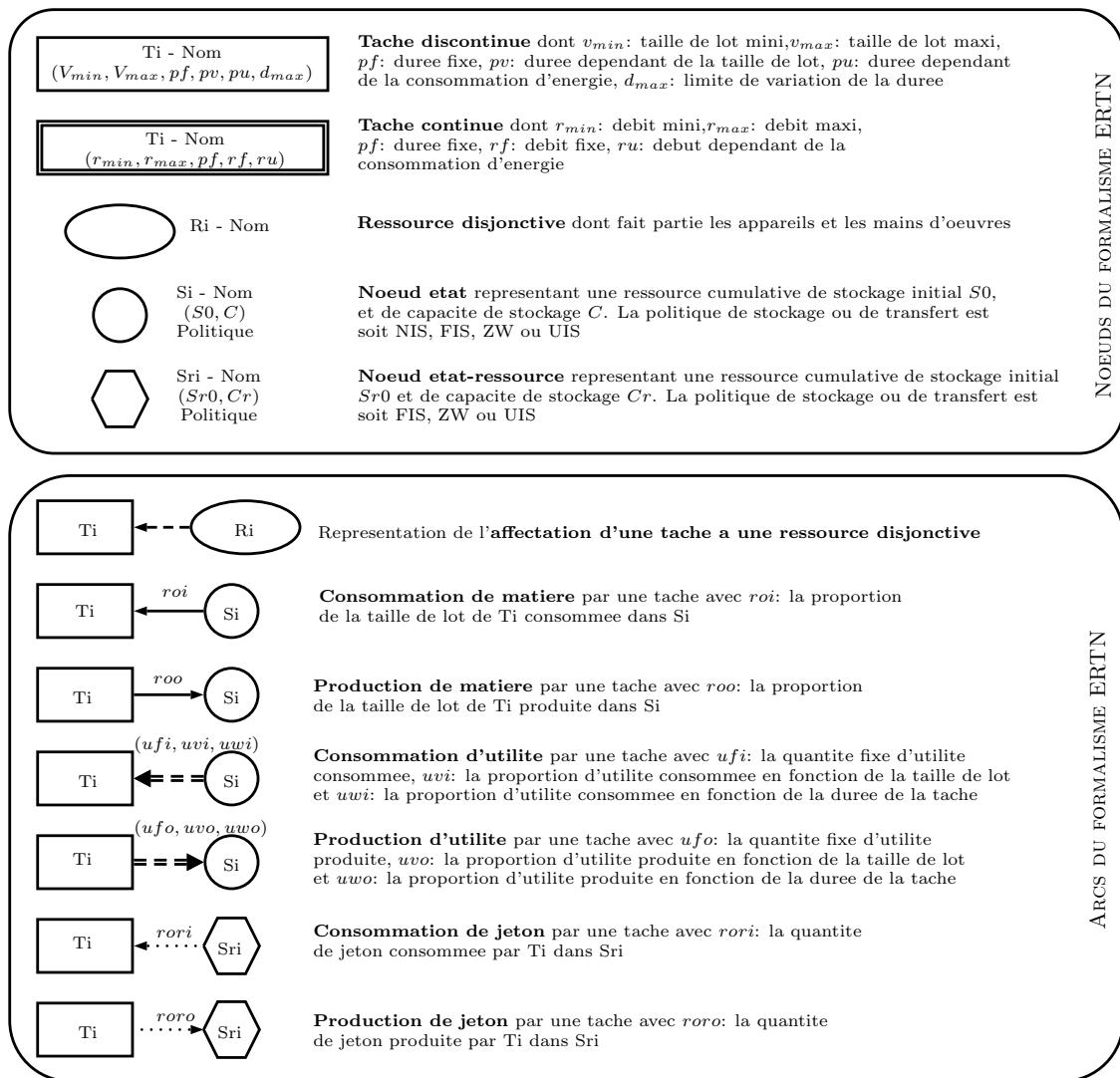


Figure B.3 – Résultats de l'ordonnancement des exemples 3 à 5

## ANNEXE C - SÉMANTIQUE DU FORMALISME ERTN

Cette annexe présente brièvement les éléments de modélisation nécessaires pour la représentation d'une recette de fabrication dans le formalisme ERTN. Ce formalisme utilise une représentation de la recette sous forme de noeuds et d'arcs interconnectés entre eux afin de permettre l'expression, schématique, des contraintes des modèles d'ordonnancement proposés dans cette thèse.



---

## ANNEXE D - SIMULATEUR DE PROCÉDÉ

---

### Simulateur de l'atelier de production

Le simulateur de l'atelier de production est représenté par la figure D.1. Il regroupe le modèle du superviseur, des réacteurs discontinus, des cuves de stockage et des éléments de récupération d'énergie. Le fonctionnement du simulateur est conditionné par les données relatives au plan d'ordonnancement transmis par la phase d'optimisation. Ces informations correspondent aux

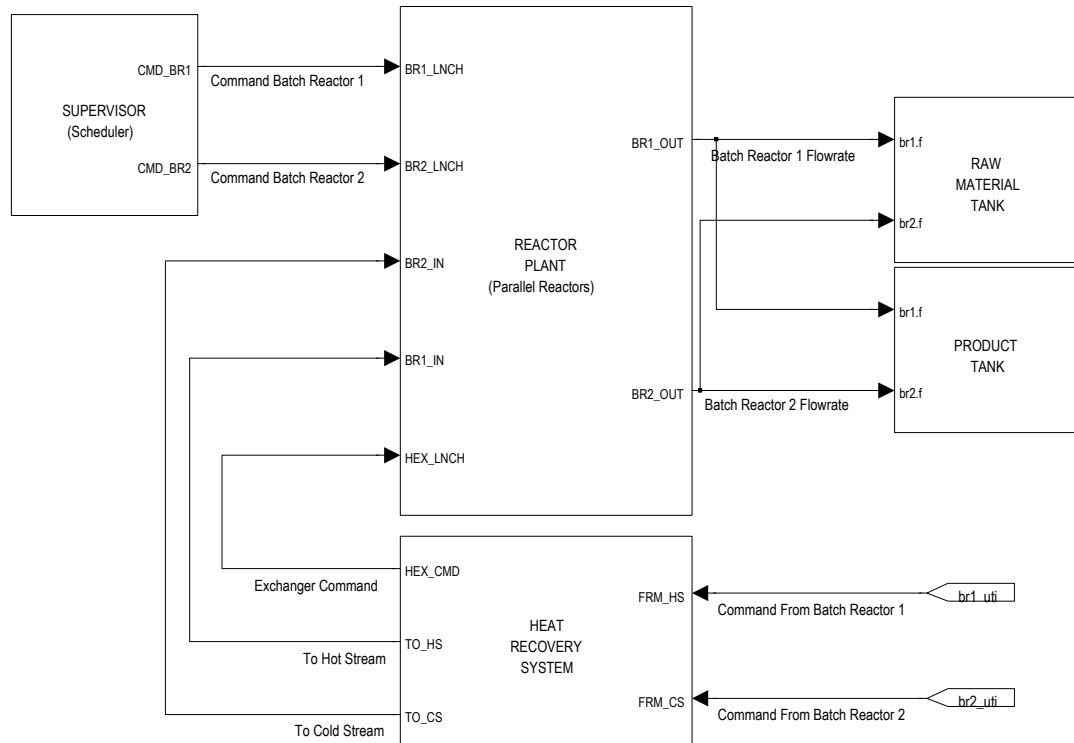


Figure D.1 – Structure du simulateur de l'atelier

dates de lancement des différents lots exécutés par les réacteurs. Mais elles comprennent également, la taille de chaque lot et les caractéristiques (débits de charge et de décharge, consommations énergétiques) de fonctionnement de chaque réacteur pour chaque lot. La transmission de ces informations au niveau du simulateur se fait par l'intermédiaire des interfaces de saisie au niveau du bloc « Supervisor » et du bloc « Reactor Plant ». Une capture d'écran de ces interfaces

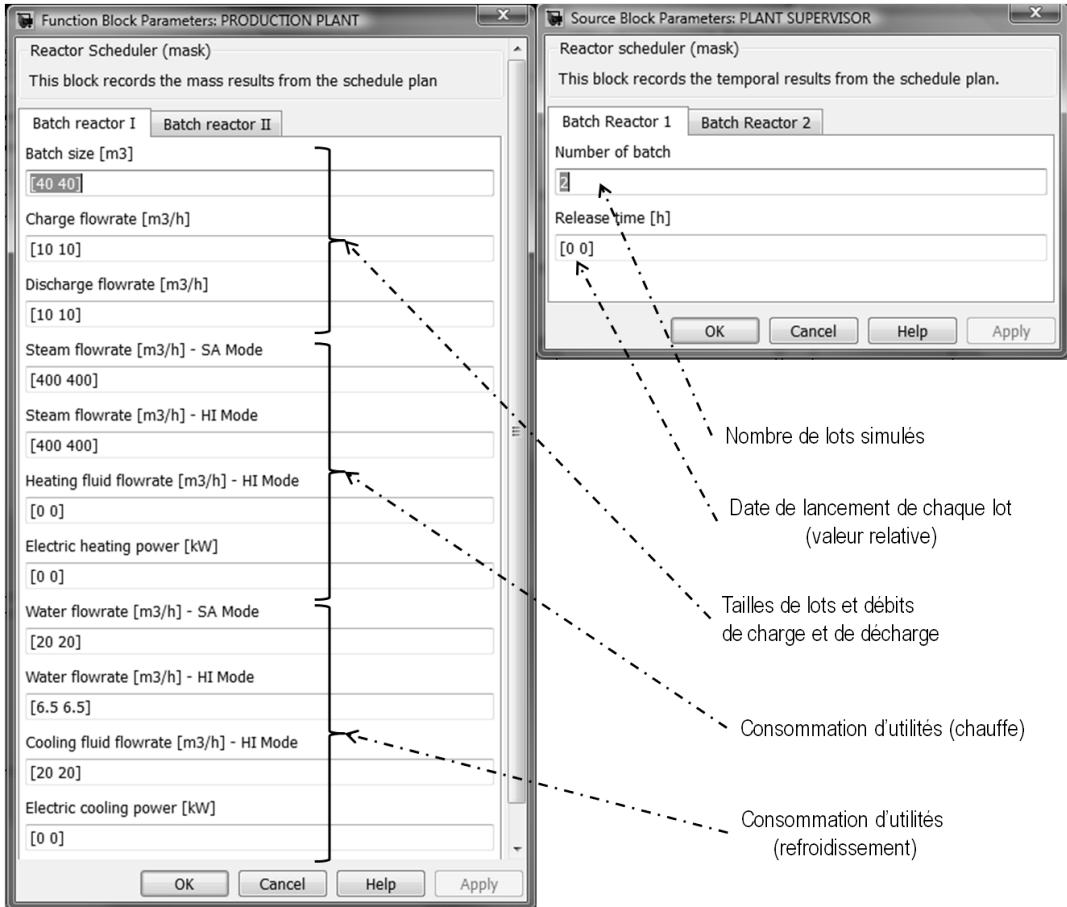


Figure D.2 – Interfaces de saisie des résultats de l'optimisation

est donnée par la figure D.2 sur laquelle on peut voir les différents paramètres transmis au simulateur afin de représenter le diagramme de Gantt résultant de la phase d'ordonnancement. Ainsi, les caractéristiques de chaque lot correspondent aux dates de lancement, aux tailles de lot, aux débits de charge (et de décharge) et aux consommations en utilités lors des phases de chauffe et de refroidissement. Ces derniers sont disponibles pour les trois modes de fonctionnement, à savoir, le fonctionnement en consommation pure d'utilité venant de la centrale (SA Mode), le fonctionnement en consommation pure d'utilité venant d'un échange (HI Mode) et le fonctionnement mixte (récupération et consommation d'utilités de la centrale). Il est également possible de définir les consommations en électricité lors des phases de chauffe et de refroidissement de chaque réacteur et pour chaque lot.

Le traitement réalisé au niveau du superviseur, qui notons le, est un bloc *Stateflow*, est donné par la figure D.3. Cette structure est équivalente à celle donnée par la figure 4.17 mais s'étend aux deux réacteurs. Le simulateur répond donc au plan d'ordonnancement qui lui est transmis en agissant directement au niveau des réacteurs. A partir des réponses de ces derniers, le simulateur détermine l'évolution de la rétention au niveau des cuves de l'atelier. Il calcule également l'évolution de la consommation globale, par type d'utilité (vapeur à différentes pressions, électricité et eau de refroidissement), en énergie de la campagne et transmet ces profils au simulateur de la centrale de cogénération. Notons de plus, que chaque appareil est muni d'une interface de saisie permettant de définir ou de modifier les caractéristiques de l'appareil.

La simulation au niveau de l'atelier de production utilise alors le solveur *Ode4* avec un pas de simulation fixe de  $10^{-3}$ . Le choix de ce solveur permet d'évaluer à intervalle fixe, l'évolution

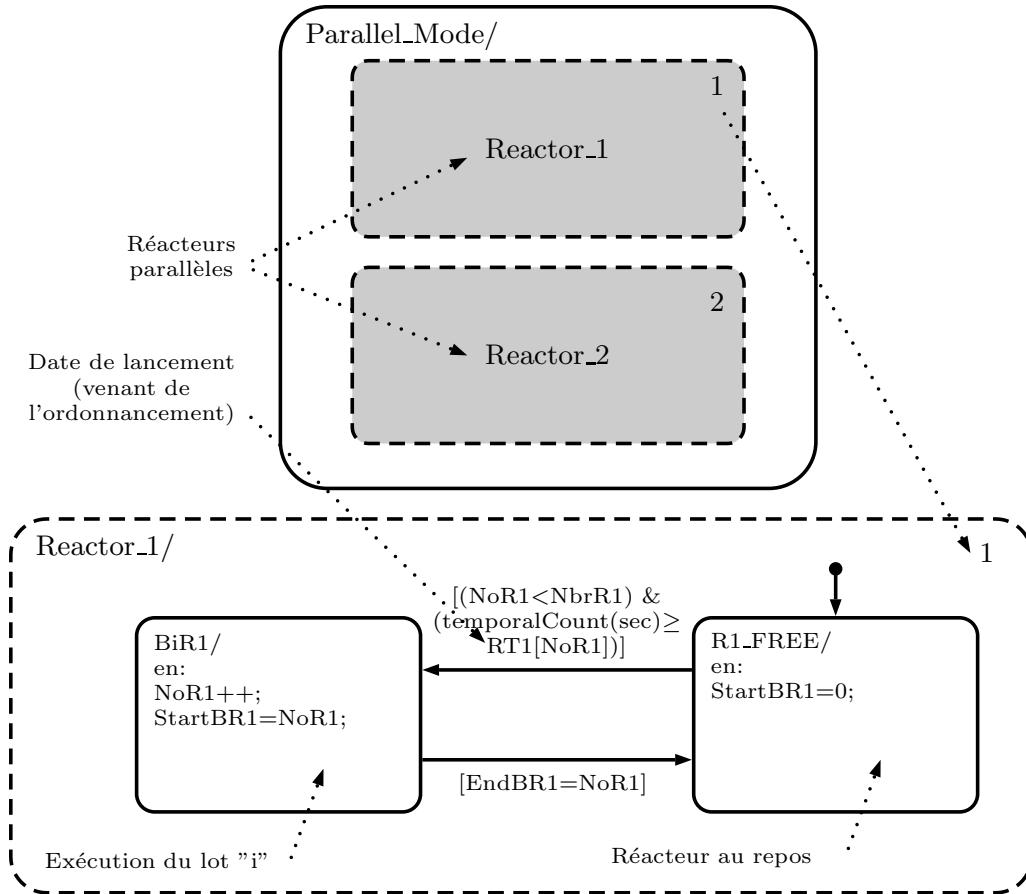


Figure D.3 – Représentation Statechart du superviseur

des différentes variables du système et permet également aux blocs *Stateflow* de vérifier les conditions et actions à réaliser.

## Simulateur de la centrale de cogénération

Le simulateur de la centrale de cogénération comprend les appareils tels que la chaudière, les vannes de détente, les cuves de stockage et le turboalternateur. La topologie générale du simulateur est donnée par la figure D.4.

Lorsque les demandes transmises par l'atelier de production sont reçues par la centrale, elles sont acheminées vers les appareils devant fournir ces demandes. Ainsi, lorsqu'une demande en vapeur à basse pression se manifeste, alors la chaudière et les vannes HPRV et MPRV reçoivent cette demande. Si de plus, une consommation en électricité se manifeste, alors le turboalternateur reçoit une consigne de production conformément aux rapports électricité/chaleur transmis par la phase d'optimisation.

Les caractéristiques des utilités fournies par la centrale sont données dans le tableau D.1. Ces données correspondent à des valeurs transmises par les tables de vapeur et sont choisies arbitrairement pour l'illustration de cette thèse. La conduite du simulateur de la centrale se fait alors avec le solveur à pas variable *ode45*. En effet, le modèle de la centrale est majoritairement dominé par un fonctionnement continu.

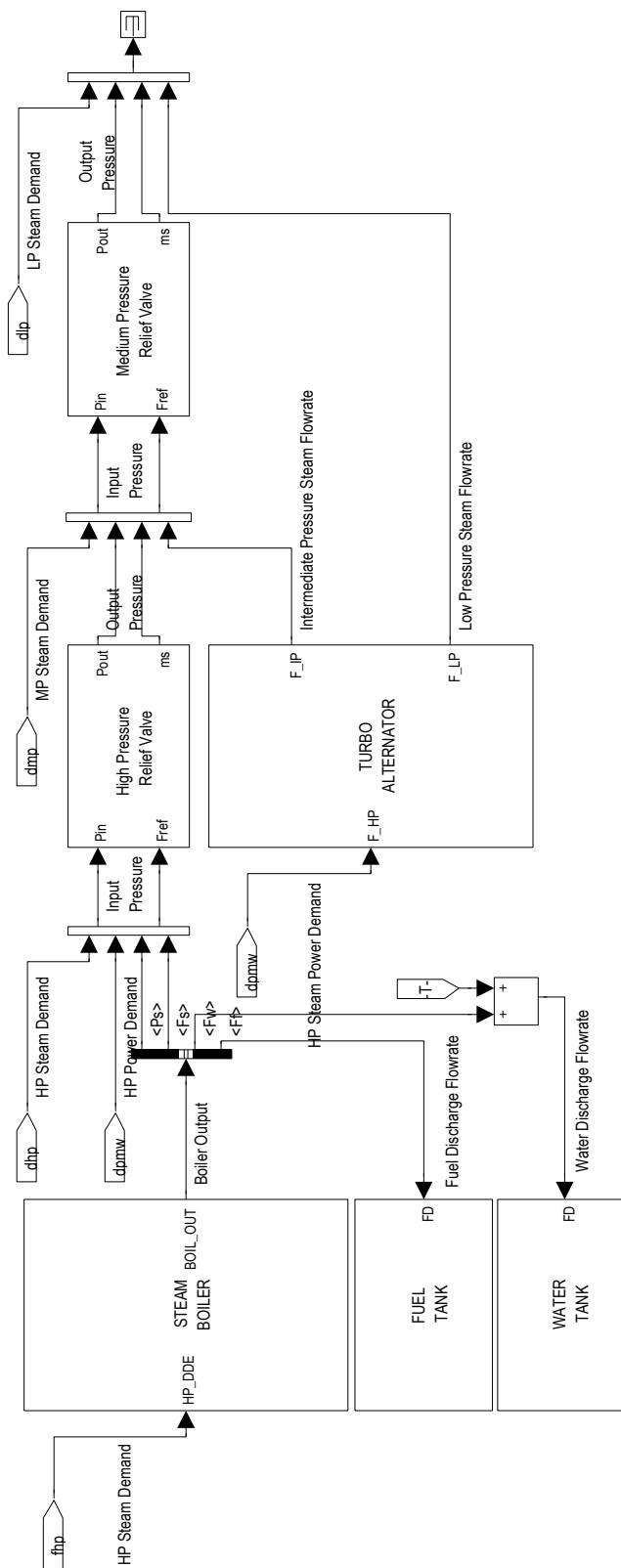


Figure D.4 – Simulateur de la centrale de cogénération

Propriétés	Vapeur HP	Vapeur MP	Vapeur BP	Eau
Température [°C]	186	151	137	12
Pression [kPa]	1171.0	500.0	330.0	1.0
Enthalpie massique [J/ kg]	2782.9	2748	2729.3	50.40
Capacité calorifique [kJ/ kg/ °C]	2.79	2.40	2.28	4.19
Densité [kg/ m <sup>3</sup> ]	5.98	2.64	1.81	999.4

Tableau D.1 – Caractéristiques des utilités de la centrale de cogénération

Propriétés du réacteur	Valeur
Volume minimal [m <sup>3</sup> ]	10
Volume maximal [m <sup>3</sup> ]	40
Hauteur [m]	5.2
Diamètre [m]	3.3
Aire d'échange [m <sup>2</sup> ]	52
Volume double enveloppe [m <sup>3</sup> ]	2. 65
Coefficient de transfert global [W/ m <sup>2</sup> / °C]	850
Caractéristiques de la réaction	Valeur
Concentration initiale du réactif [kmol/m <sup>3</sup> ]	10
Concentration initiale du produit [kmol/m <sup>3</sup> ]	0
Concentration finale du réactif [kmol/m <sup>3</sup> ]	1.7
Facteur pré-exponentiel [1/s]	20.70 ·10 <sup>6</sup>
Énergie d'activation [J/kmol]	69.71 ·10 <sup>6</sup>
Chaleur de réaction [J/kmol]	-69.71 ·10 <sup>6</sup>
Constante des gaz parfaits [J/kmol/ °C]	8314
Propriétés du produit	Valeur
Densité du produit [kg/ m <sup>3</sup> ]	801
Capacité calorifique [kJ/kg/ °C]	3.135

Tableau D.2 – Caractéristiques du réacteur, de la réaction et du produit

## Simulateur du réacteur discontinu

Le modèle de simulation du réacteur discontinu est composé d'un bloc *Stateflow* pour la définition du comportement discret et d'un bloc *Simulink* pour la dynamique continue du réacteur (figure 4.4). La définition de la dynamique discrète a déjà été réalisée dans le chapitre 4. Nous présentons ici la modélisation de la dynamique continue. Le bloc « Production Plant » de la figure D.1 regroupe les deux réacteurs « BR1 » et « BR2 » suivant l'agencement de la figure D.5. Cette configuration est celle retenue pour le cas de l'intégration énergétique directe, autrement dit, les entrées et sorties du système sont donc associées aux interfaces de communication du modèle de simulation de l'échangeur de chaleur. La représentation Simulink de la dynamique continue du réacteur est donnée par la figure D.6. Cette figure illustre les différents bilans réalisés au niveau du réacteur, à savoir le bilan de masse, de composant et d'énergie. Ce dernier étant effectué pour le contenu du réacteur aussi bien que pour la double enveloppe (figure D.7). De plus, lorsqu'une régulation de température doit être effectuée lors de la phase de conversion, alors le modèle est muni d'un régulateur de type proportionnel. Les paramètres relatifs au réacteur, à la réaction et au produit de la réaction sont alors résumés dans le tableau D.2.

## Simulateur de l'échangeur de chaleur

Le simulateur de l'échangeur de chaleur modélise un échangeur à contre courant avec comme caractéristiques les données fournies dans le tableau D.3

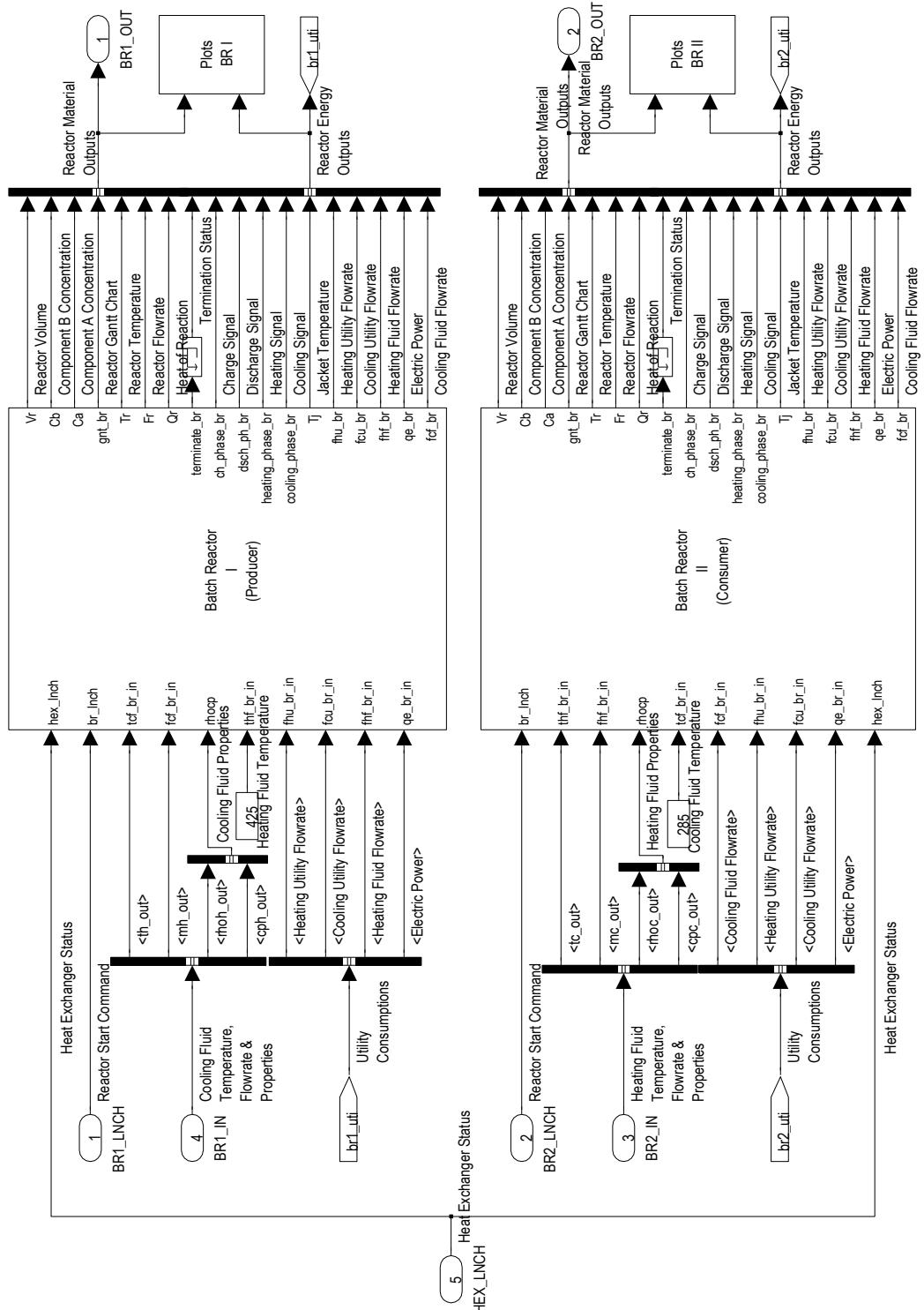


Figure D.5 – Configuration de montage des réacteurs discontinus

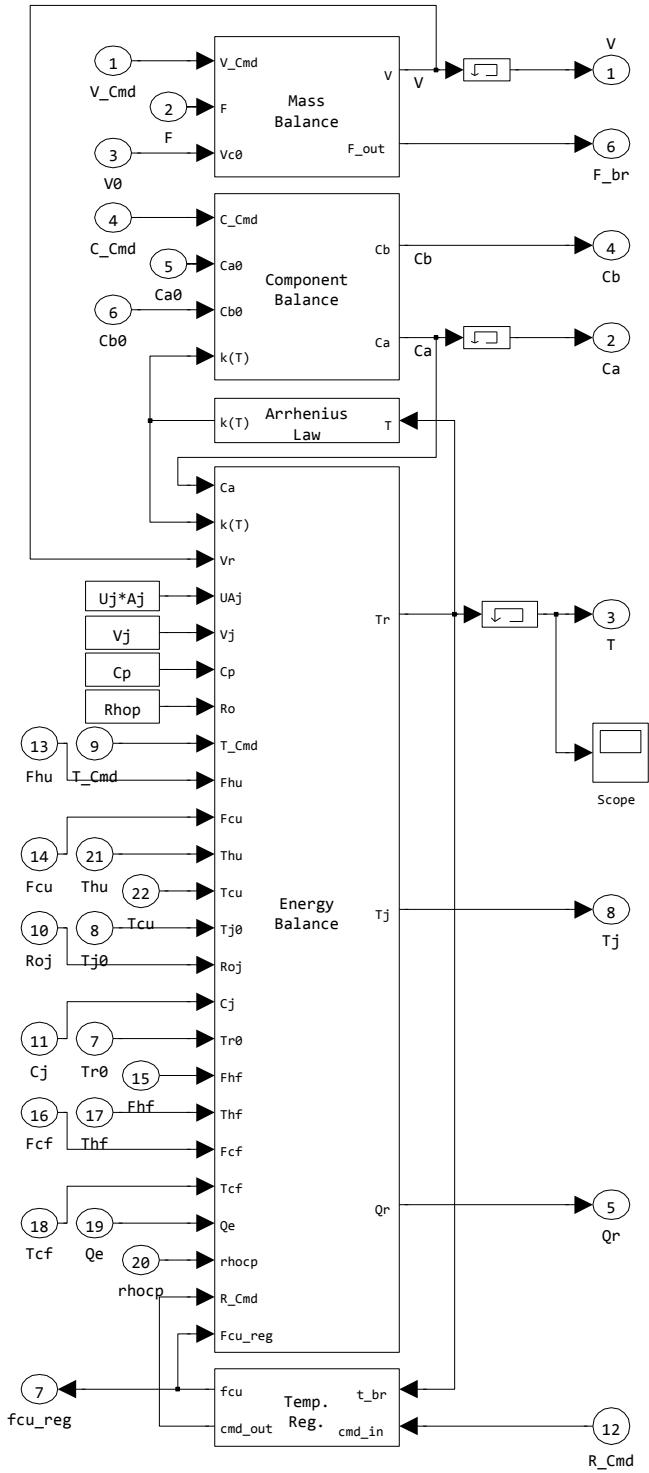


Figure D.6 – Modélisation Simulink d'un réacteur discontinu

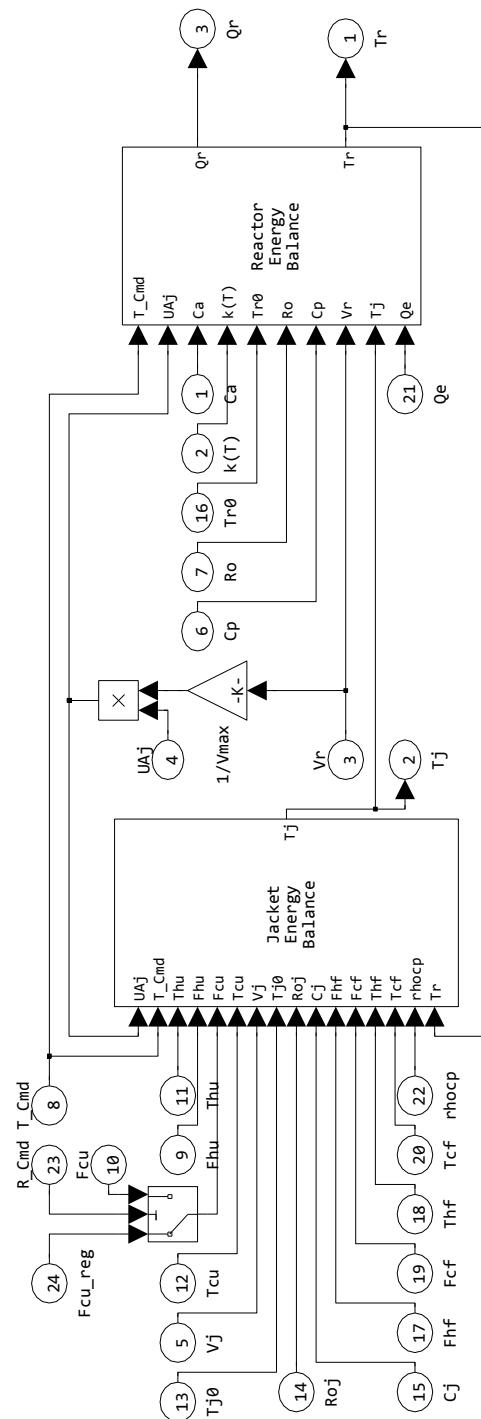


Figure D.7 – Modélisation Simulink du bilan énergétique du réacteur

Propriétés de l'échangeur	Valeur
Aire d'échange [m <sup>2</sup> ]	45
Volume du mur [m <sup>3</sup> ]	5
Densité du métal [kg/ m <sup>3</sup> ]	1100
Capacité calorifique du métal [kJ/kg/°C]	3.5
Volume du coté chaud [m <sup>3</sup> ]	5
Volume du coté froid [m <sup>3</sup> ]	5
Coefficient de transfert global [W/m <sup>2</sup> / °C]	850
Différence de température minimale [°C]	5
Caractéristiques des fluides	Valeur
Densité du fluide de chauffe [kg/ m <sup>3</sup> ]	999
Capacité calorifique du fluide de chauffe [kJ/kg/°C]	4.19
Densité du fluide de refroidissement [kg/ m <sup>3</sup> ]	999
Capacité calorifique du fluide de refroidissement [kJ/kg/°C]	4.19

Tableau D.3 – Caractéristiques de l'échangeur de chaleur

La modélisation de l'échangeur de chaleur utilise une décomposition de l'appareil en cellules. Chaque cellule représente alors un tronçon de l'échangeur avec une longueur fixe, autrement dit, l'échange s'effectue pour une longueur donnée et une aire d'échange donnée. Cette décomposition a été proposée dans VARBANOV, KLEMES et FRIEDLER [149]. Chaque cellule modélise alors la dynamique de transfert de chaleur du côté chaud vers le côté froid en passant par le mur. La représentation Simulink de la dynamique continue de l'échangeur de chaleur dans le cas d'une cellule est donnée par la figure D.8b. L'interconnexion, entre elles, des différentes cellules est donnée par la figure D.8a.

## Simulateur du stockage thermique

Le système de stockage thermique comprend deux cuves de stockage dont une cuve chaude contenant de la matière à une température  $T_1$  et une cuve froide contenant de la matière à une température  $T_2 < T_1$ . Les valeurs des températures de chaque cuve sont définies par l'utilisateur au niveau de l'interface du système de stockage thermique. Ces températures sont régulées par l'apport d'utilités venant de la centrale lors des déviations causées par la charge de matière dans la cuve et/ou par les pertes thermiques. Les caractéristiques de chaque cuve et de la matière stockée sont donnés dans le tableau D.4.

Quant à la modélisation du système de stockage dans Simulink, la figure D.9 donne un aperçu de la structure interne d'une des cuves de stockage (figure D.9a). Cette dynamique comprend l'évolution de la rétention dans la cuve mais également l'évolution de la température au sein de la cuve et au sein de la double enveloppe pendant les phases de chauffe et de refroidissement des réacteurs (figure D.9b).

Les valeurs des paramètres du stockage, donnés dans le tableau D.4, sont directement saisis au niveau de l'interface correspondant au système de stockage. Par ailleurs, les valeurs des débits des utilités sont déterminés lors des phases où les cuves reçoivent de la matière. En effet, pendant ces situations, la température de la matière stockée est altérée nécessitant de ce fait une chauffe ou un refroidissement qui se fera à travers la double enveloppe de la cuve concernée.

Notons de plus, qu'une possibilité de prise en compte des pertes thermiques est disponible dans le modèle, et ceci en définissant la température de l'environnement extérieur de la cuve<sup>5</sup>. Cependant, cette problématique a été laissée de coté dans les illustrations présentées dans cet ouvrage, nous supposerons donc que les cuves sont parfaitement isolées.

5. Cette situation fait actuellement l'objet d'un article

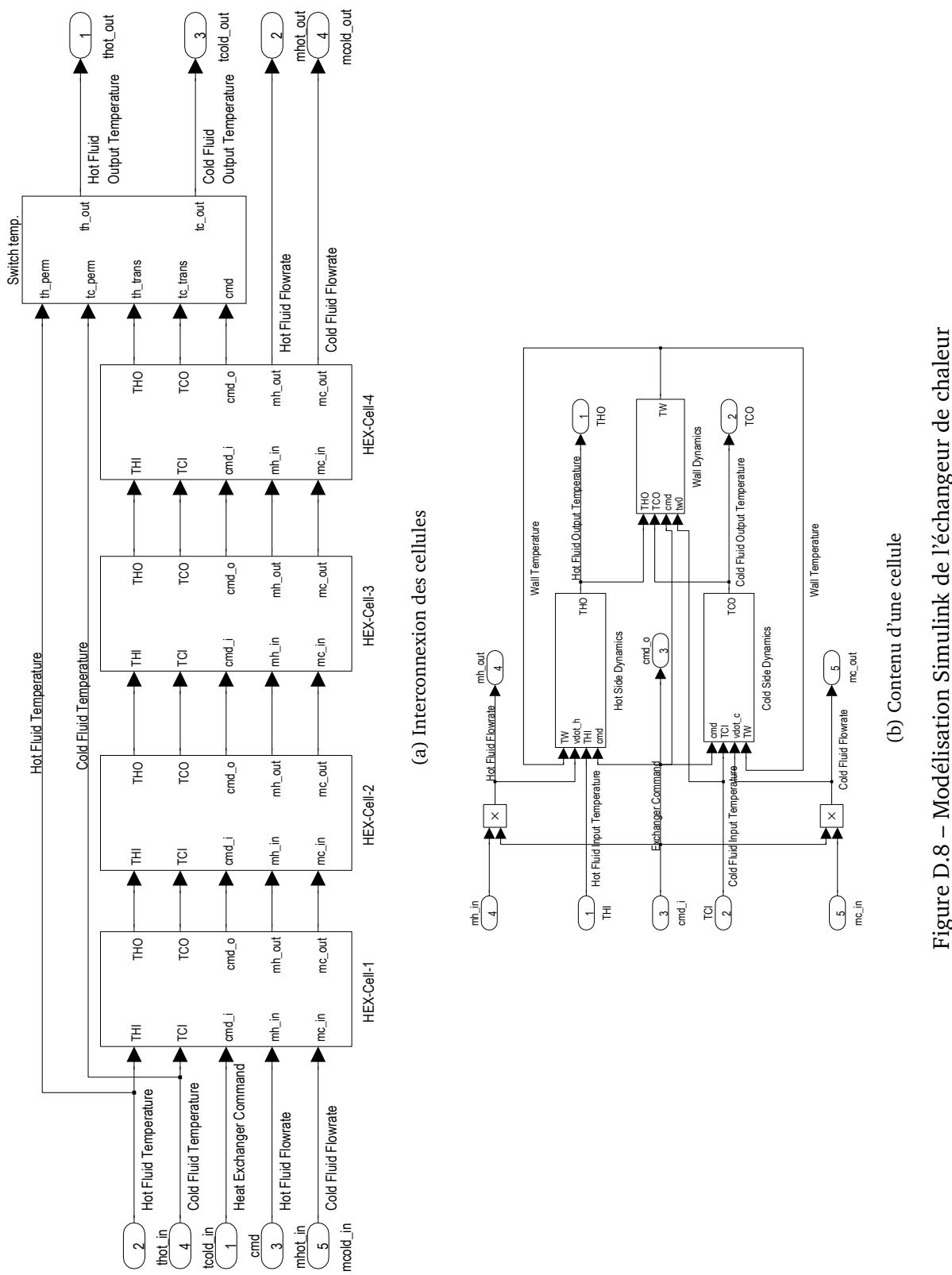
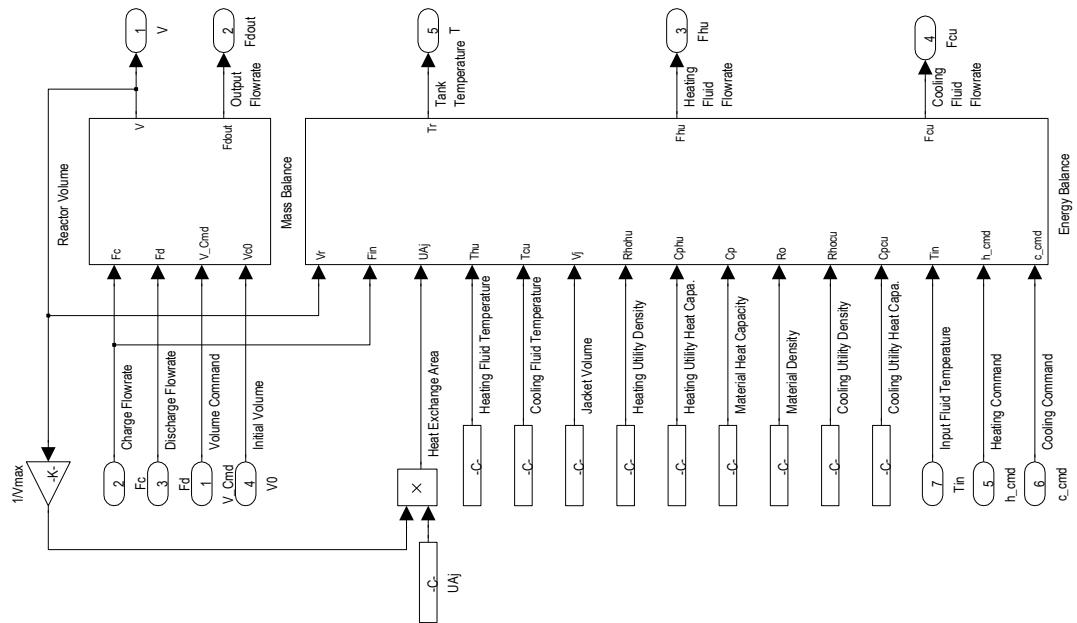
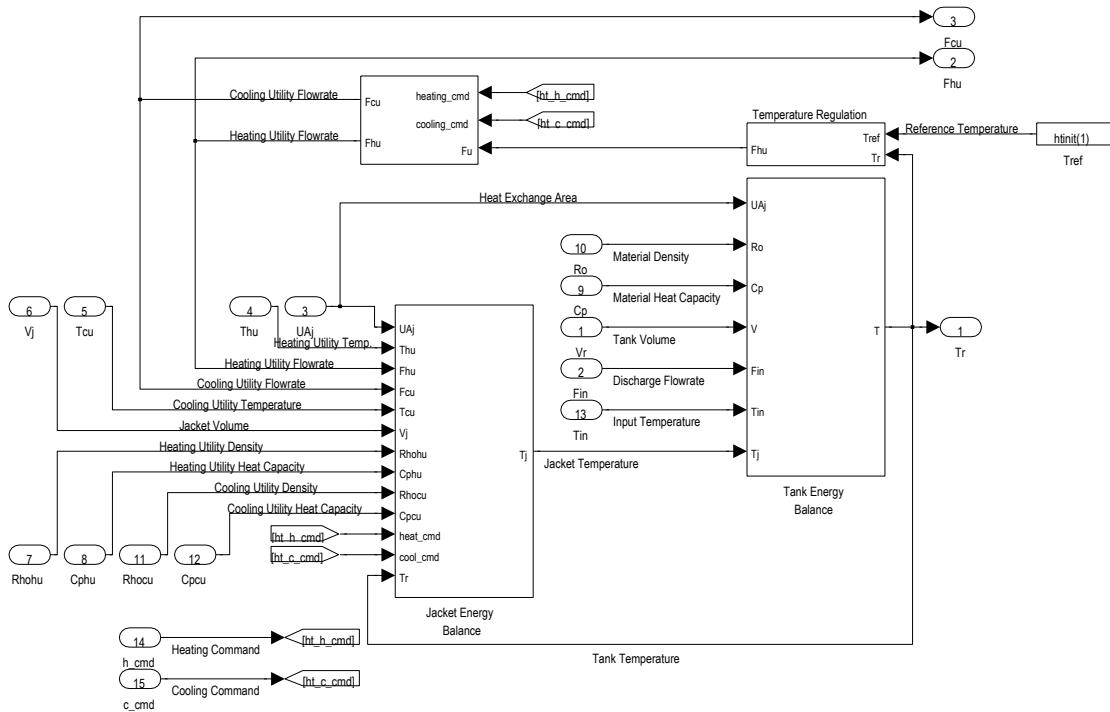


Figure D.8 – Modélisation Simulink de l'échangeur de chaleur



(a) Interaction entre le bilan massique et énergétique



(b) Contenu du bloc de bilan énergétique

Figure D.9 – Modélisation Simulink du stockage thermique

Propriétés de la cuve chaude	Valeur
Volume initial de la cuve [m <sup>3</sup> ]	55
Capacité de la cuve [m <sup>3</sup> ]	700
Volume minimal de la cuve [m <sup>3</sup> ]	50
Coefficient de transfert global [W/ m <sup>2</sup> / °C]	850
Aire d'échange [m <sup>2</sup> ]	60
Volume de la double enveloppe [m <sup>3</sup> ]	10
Température initiale de la cuve [°C]	137
Température initiale de la double enveloppe [°C]	137
Propriétés de la cuve froide	Valeur
Volume initial de la cuve [m <sup>3</sup> ]	640
Capacité de la cuve [m <sup>3</sup> ]	700
Volume minimal de la cuve [m <sup>3</sup> ]	50
Coefficient de transfert global [W/ m <sup>2</sup> / °C]	850
Aire d'échange [m <sup>2</sup> ]	60
Volume de la double enveloppe [m <sup>3</sup> ]	10
Température initiale de la cuve [°C]	23
Température initiale de la double enveloppe [°C]	23
Propriétés du fluide	Valeur
Densité du fluide [kg/ m <sup>3</sup> ]	999
Capacité calorifique du fluide [kJ/kg/°C]	4.19

Tableau D.4 – Caractéristiques du dispositif de stockage thermique

## Simulateur de la chaudière à vapeur

Les équations relatives au modèle de simulation de la chaudière à vapeur ont été tirées des travaux de ASTROM et BELL [13]. Ces équations, données dans le chapitre 4, permettent de modéliser le comportement général de la chaudière. Les paramètres caractéristiques de la chaudière sont donnés dans le tableau D.5, ci-dessous.

Propriétés	Valeur
Débit maximal de vapeur [t/h]	20
Capacité du réservoir [m <sup>3</sup> ]	20
Masse du métal et du réservoir [kg]	75
Capacité calorifique du métal [kJ/kg/°C]	2
Température de l'eau à l'entrée [°C]	27
Densité de l'eau [kg/m <sup>3</sup> ]	999.8
Pouvoir calorifique inférieur du carburant [kJ/kg]	23
Température initiale de la vapeur [°C]	200
Pression initiale de la vapeur [kPa]	1556
Pression de sortie de la vapeur [kPa]	1171
Volume initial de vapeur	30%

Tableau D.5 – Caractéristiques de la chaudière à vapeur

La représentation Simulink de la dynamique continue de la chaudière à vapeur est donnée par la figure D.10. On peut remarquer sur cette figure qu'une régulation de la pression dans le réservoir est réalisée. Cette régulation s'effectue avec un régulateur PI classique dont les caractéristiques ont été obtenus automatiquement en lançant l'outil de diagnostic de Simulink. La régulation de pression est nécessaire afin de s'assurer que la pression à la sortie, plus précisément la différence de pression au niveau de la vanne de sortie, de la chaudière corresponde aux valeurs désirées par le procédé. En effet, de cette pression dépendra la température de sortie de la vapeur mais également la densité de cette dernière.

Le lancement du modèle permet donc d'obtenir l'évolution de la pression au sein du réservoir, l'évolution de la consommation en carburant en fonction de la quantité de vapeur produite et l'évolution de la quantité d'eau consommée par la chaudière.

Un modèle plus riche pourra également calculer la quantité et la qualité en oxygène de l'air consommé par la chaudière pour réaliser la combustion du carburant. En effet, de cette quantité dépendra en partie l'efficacité de l'appareil, cependant, dans notre cas, la quantité de chaleur produite lors de la combustion est la variable manipulée pour la régulation de la pression de la chaudière. Nous savons également que la quantité d'eau nécessaire pour la transformation est une variable de contrôle (agit sur la pression au sein du réservoir), cependant, nous supposons dans un soucis de simplification, que cette quantité est définie par une relation linéaire de la demande en vapeur et que le niveau d'eau est parfaitement réglé, cette hypothèse permet de réduire le système à un processus SISO<sup>6</sup> dont l'unique sortie qui nous intéresse est la pression de la vapeur.

## Simulateur du turbo-alternateur

Le turboalternateur comprend d'une part, la turbine à vapeur, et d'autre part, la génératrice synchrone. La modélisation de la turbine à vapeur se fait au travers de fonctions de transfert du premier ordre. Ces fonctions dont les constantes de temps sont les paramètres du modèle, représentent respectivement, les inerties au niveau de chaque étage de la turbine. De plus, et conformément aux droites de *Willan* correspondant à chaque étage, les coefficients de conversion de débit massique en puissance mécanique sont les paramètres additionnels du modèle de la turbine.

Le modèle de la turbine comprend alors les paramètres cités précédemment, mais également les valves de contrôle<sup>7</sup> et d'interception<sup>8</sup> pour la définition de la quantité de vapeur (réchauffée) envoyée vers les étages inférieures de la turbine.

Concernant la génératrice synchrone, la modélisation est réalisée en transformant le système triphasé de l'induit en un système diphasé équivalent. Cette transformation, connue sous le nom de *transformation de Park*, permet de faciliter la résolution du système d'équation algébro-différentiel associé à la génératrice. En effet, la transformation de Park ramène au référentiel diphasé rotorique, les quantités statoriques. La résolution du modèle de la génératrice se fait donc par la résolution d'un système à deux dimensions (la composante homopolaire ne produisant pas de courant). Les entrées du modèle sont le couple mécanique, la tension d'excitation et les tensions de phase aux bornes de l'armature. Les sorties du modèle, quant à elles, correspondent à la vitesse du rotor, aux puissances, aux courants statoriques et aux amplitudes de ces derniers.

La représentation Simulink de la turbine à vapeur est donnée par la figure D.11a, quant à celle de l'alternateur, elle est présentée sur la figure D.11b.

Les paramètres caractéristiques respectives de ces appareils sont résumés dans le tableau D.6. Les unités non mentionnées dans le tableau sont exprimées en valeurs relatives (per unit). Les caractéristiques de l'alternateur sont tirées des modèles prédéfinis dans la bibliothèque *SimPowerSystem* de Matlab. Celles relatives à la turbine à vapeur sont disponibles dans [130].

---

6. Single Input Single Output

7. Ces vannes sont utilisées pour la régulation de la vitesse du rotor et donc de la fréquence de la génératrice synchrone

8. En réalité, ces vannes d'interception sont utilisées pour contrôler l'emballement du rotor

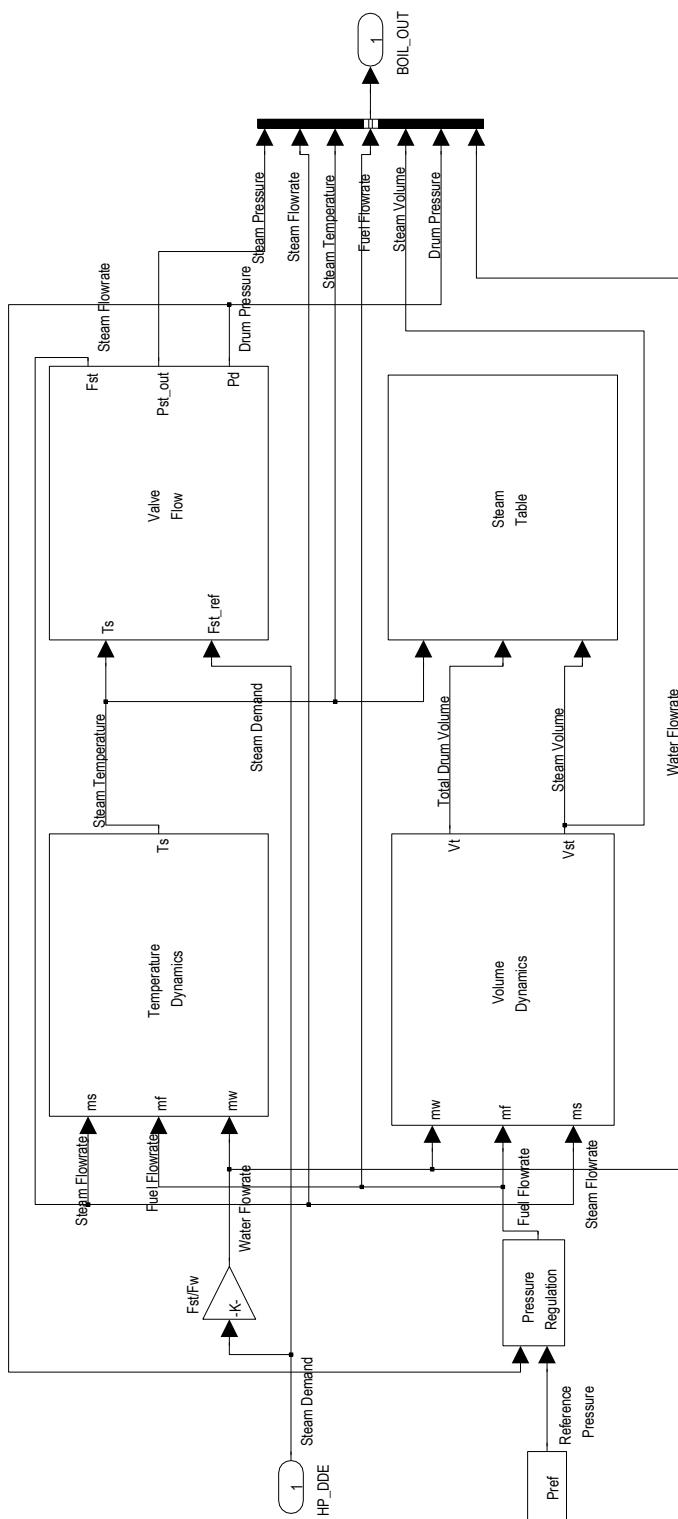


Figure D.10 – Modélisation Simulink de la chaudière à vapeur

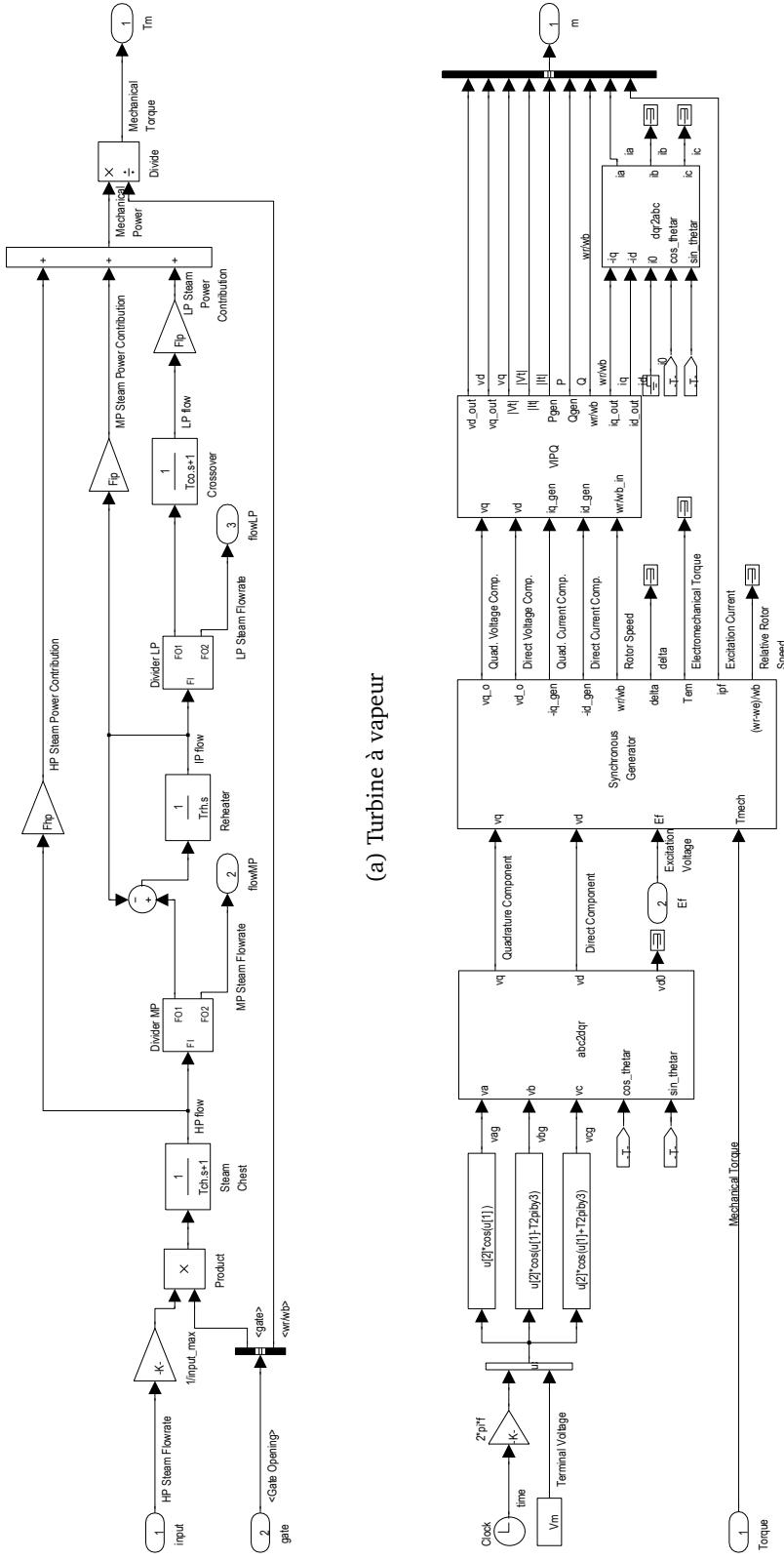


Figure D.11 – Modélisation Simulink du groupe turbine-alternateur

Propriétés de l'alternateur (rotor cylindrique)		Valeurs (p.u. sauf indication)
Puissance [kVA]	670	
Tension [V]	400	
Fréquence [Hz]	50	
Nombre de paires de pôles	2	
Vitesse [tr/min]	1500	
Réactances [ $x_d, x_d', x_d'', x_q, x_q', x_q'', x_l$ ]	[1.81, 0.3, 0.23, 1.76, 0.65, 0.25, 0.15]	
Constantes de temps (circuit ouvert) [ $T_{do}', T_{do}'', T_{qo}', T_{qo}''$ ]	[8, 0.03, 1, 0.07]	
Résistance statorique	0.01549375	
Coefficient d'inertie	0.1847	
Facteur de friction	0.01289	
Propriétés de la turbine		Valeurs (p.u. sauf indication)
Puissance [kW]	352	
Débit maximal [t/h]	4	
Constantes de temps [s] ( $T_{ch}, T_{rh}, T_{co}$ )	[0.5, 7.0, 0.5]	
Coefficients de puissance [ $F_{hp}, F_{mp}, F_{fp}$ ]	[0.5, 0.3, 0.2]	

Tableau D.6 – Caractéristiques de la turbine et de l'alternateur

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] R. ADONYI et al. « Incorporating heat integration in batch process scheduling ». Dans : *Applied Thermal Engineering* 23 (2003), p. 1743–1762.
- [2] International Energy AGENCY. *World Energy Outlook 2011*. English. Rap. tech. International Energy Agency, 2011.
- [3] Mujtaba Hassan AGHA. « Integrated management of energy and production : Scheduling of batch process and Combined Heat and Power ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009.
- [4] Mujtaba Hassan AGHA et al. « Integrated production and utility system approach for optimizing industrial unit operations ». Dans : *Energy* 35 (2009), p. 611–627.
- [5] R. ALLUR et D.L. DILL. « The theory of timed automata ». Dans : *Theoretical Computer Science* 126-2 (1994), p. 183–225.
- [6] D. ANDREU. « Commande et supervision des procédés discontinus : une approche hybride ». Thèse de doct. Toulouse : Paul Sabatier de Toulouse, 1996.
- [7] D. ANDREU, J. C. PASCAL et R. VALETTE. « Events as a key of a batch process control system ». Dans : *Proc. CESA'96, Symp. On Discrete Events and Manufacturing Systems*. 1996. (Visité le 25/12/2013).
- [8] D. ANDREU, J. C. PASCAL et R. VALETTE. *Interaction of Discrete and Continuous parts of a Batch Process Control System*. Rap. tech. 1995.
- [9] D. ANDREU et al. « Batch process modelling using Petri nets ». Dans : *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1994. Humans, Information and Technology*. T. 1. 1994, p. 314–319.
- [10] David ANDREU, Jean-Claude PASCAL et Robert VALETTE. « Supervision des systèmes de production discontinus ». Dans : *Journal Européen des Systèmes Automatisés, APII-JESA* (1998), p. 365–386. (Visité le 25/12/2013).
- [11] K. APT. *Principles of Constraint Programming*. English. USA : Cambridge University Press, 2003. ISBN : 978-0-511-06249-0.
- [12] Christian ARTIGUES, Sophie DEMASSEY et Emmanuel NERON. *Resource-constrained project scheduling : models, algorithms, extensions and applications*. English. Hoboken, NJ, ISTE. London : Wiley, 2008. ISBN : 9781848210349 1848210345.
- [13] K.J. ASTROM et R.D. BELL. « Drum-boiler dynamics ». Dans : *Automatica* 36 (2000), p. 363–378.

- [14] Fabio BALDUZZI, Alessandro GIUA et Carla SEATZU. « Modelling automated manufacturing systems with hybrid automata ». Dans : *Proc. 1999 Workshop on Formal Methods and Manufacturing, (Zaragoza, Spain)*. 1999, p. 33–48. (Visité le 24/12/2013).
- [15] M. BARKER et J. RAWTANI. *Practical Batch Process Management*. English. Elsevier, 2005. ISBN : 0 7506 6277 8.
- [16] B. BEHDANI, M. R PISHVAIE et D. RASHTCHIAN. « Optimal scheduling of mixed batch and continuous processes incorporating utility aspects ». Dans : *Chemical Engineering and Processing* 46.46 (2007), p. 271–281.
- [17] J.F. BENDERS. « Partitioning procedures for solving mixed variables programming problems ». Dans : *Numerische Mathematik* 4 (1962), p. 238–252.
- [18] Patric S. BIELER. « Analysis and modelling of the energy consumption of chemical batch plants ». Thèse de doct. Zurich : Swiss Federal Institute of Technology, 2004.
- [19] BLOMMBERG. *Bloomberg New Energy Finance 2013*. Rap. tech. Mai 2009.
- [20] C. BLUM et al., éds. *Hybrid Metaheuristics : An Emerging Approach to Optimization*. Studies in Computational Intelligence. T. 114. Springer, 2008. ISBN : 978-3-540-78294-0.
- [21] Centre de la Technologie de l'Energie de CANMET. *L'analyse Pinch : pour l'utilisation efficace de l'énergie, de l'eau et de l'hydrogène*. Français. Natural Resources Canada. 2003. ISBN : 0-662-89794-3.
- [22] L. CARLONI et al. « Languages and Tools for Hybrid Systems Design ». English. Dans : *Foundation and Trends* 1.1 (2005), p. 1–177.
- [23] P. CASTRO, A. P. F. D. BARBOSA-PÓVOA et H. MATOS. « An Improved RTN Continuous-Time Formulation for the Short-term Scheduling of Multipurpose Batch Plants ». Dans : (mai 2001), p. 2059–2068.
- [24] Pedro M. CASTRO, Ana P. BARBOSA-PÓVOA et Henrique A. MATOS. « Optimal Periodic Scheduling of Batch Plants Using RTN-Based Discrete and Continuous-Time Formulations : A Case Study Approach ». Dans : (juil. 2003), p. 3346–3360.
- [25] Pedro M. CASTRO et al. « Simple Continuous-Time Formulation for Short-Term Scheduling of Batch and Continuous Processes ». Dans : (jan. 2004), p. 105–118.
- [26] R. CHAMPAGNAT et al. « From scheduling to supervision in batch processes ». Dans : (1998). (Visité le 25/12/2013).
- [27] R. CHAMPAGNAT et al. « Modeling hybrid systems by means of high-level Petri nets ». Dans : *Proceeding of CIS 97* 1 (1997), p. 469–474.
- [28] D. K. CHATURVEDI. *Modelisation and Simulation of Systems Using Matlab and Simulink*. English. CRC Press Taylor & Francis Group, 2010. ISBN : 978-1-4398-0672-2.
- [29] European Federation of CHEMICAL ENGINEERING. *European roadmap for process intensification*. Rap. tech. 2008.
- [30] C CHEN et C CHANG. « A resource-task network approach for optimal short-term/periodic scheduling and heat integration in multipurpose batch plants ». Dans : *Applied Thermal Engineering* (2008), p. 1195–1208.
- [31] S. CHOWDHURY, S. P. CHOWDHURY et P. CROSSLEY. *Microgrids and Active distribution Networks*. English. London, UK : Institution of Engineering et Technology, 2009. ISBN : 978-1-84919-014-5.
- [32] RW CLAYTON. *Cost reductions on a production of synthetic resins by a process integration study at Cray Valley Products Ltd*. Rap. tech. 1986.

- [33] Yann COLETTE et Patrick SIARRY. *Optimisation multiobjectif*. French. Eyrolles, 2002. ISBN : 2212111681 9782212111682.
- [34] European COMISSION. *Energy Efficiency*. English. Rap. tech. European Comission, fév. 2009, p. 430.
- [35] R. DAVID et Hassane ALLA. *Discrete, Continuous and Hybrid Petri Nets*. English. Springer Berlin Heidelberg New York. Springer, 2005. ISBN : 3-540-22480-7.
- [36] I. DINCER et M. A ROSEN. *Thermal Energy Storage : systems and Applications*. English. John Wiley & Sons Ltd. United Kingdom : John Wiley & Sons, Ltd, 2011. ISBN : 978-0-470-74706-3.
- [37] J. M. DOUGLAS. *Conceptual design of chemical processes*. English. McGraw-Hill London, 1988. ISBN : 0-07- 017762-7.
- [38] J. DREO et al. *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*. Français. Paris - France : Eyrolles, 2011. ISBN : 978-2-212-11368-4.
- [39] EDITORIAL. « Heat integration , energy management , CO<sub>2</sub> capture and heat transfer enhancement ». English. Dans : *Applied Thermal Engineering* 27.27 (2007), p. 2627–2632.
- [40] Cadet Energy EFFICIENCY. *Industrial Symbiosis. Waste for one company is added value for another*. English. Rap. tech. I.E.A./O.E.C.D Brochure No. R363, 1999.
- [41] J. EKANAYAKE et al. *Smart Grid Technology and Applications*. English. John Wiley & Sons, Ltd, 2012. ISBN : 978-0-470-97409-4.
- [42] Eid EL UTAIRI. « Simultaneous design scheduling and operation through process integration ». Thèse de doct. Texas A&M, 2008.
- [43] Florian FABRE. « Conduite orientée ordonnancement d'un simulateur dynamique hybride : application aux procédés discontinus ». Thèse de doct. Toulouse - France : Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009.
- [44] Florian FABRE et al. « Dynamic Hybrid Simulation of Batch Processes driven by a Scheduling Module ». Dans : *Computers & Chemical Engineering* 35 (2011), p. 2098–2112.
- [45] F. A. FARRET et M. GODOY SIMOES. *Integration of Alternative Sources of Energy*. English. John Wiley & Sons. 2006. ISBN : 978-0-471-71232-9.
- [46] Nikolaos F. GIANNELOS et Michael C. GEORGIADIS. « A Simple New Continuous-Time Formulation for Short-Term Scheduling of Multipurpose Batch Processes ». Dans : (mai 2002), p. 2178–2184.
- [47] Vincent GIARD. *Gestion de la production et des flux*. French. 3ème Edition. Economica, 2003. ISBN : 978-2- 7178-4498-6.
- [48] D. GIBBS et P. DEUTZ. « Reflexion on implementing industrial ecology through eco-industrial park development ». Dans : *Journal of Cleaner Production* 15-No. 17 (2007), p. 1683–1695.
- [49] Arthur GILL. *Introduction to the theory of Finite-State Machines*. Mc-Graw-Hill, 1962.
- [50] Tianlong GU et Parisa A. BAHRI. « A survey of Petri net applications in batch processes ». Dans : *Computers in Industry* 47.1 (2002), p. 99–111.
- [51] Wei GU et al. « Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid : A review ». Dans : *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 54 (2014), p. 26–37. ISSN : 01420615.

- [52] G. GUTIN et A. P. PUNNEN. *The Traveling Salesman Problem and Its Variation*. English. Kluwer Academic Publishers. USA : Kluwer Academic Publishers, 2004. ISBN : 1-4020-0664-0.
- [53] Iskandar HALIM et Rajagopalan SRINIVASAN. « Sequential Methodology for Scheduling of Heat-Integrated Batch Plants ». Dans : *Ind. Eng. Chem. Res.* 48 (sept. 2009), p. 8551–8565.
- [54] D. HAREL. « Statecharts : A visual formalism for complex systems ». English. Dans : *Science of Computer Programming* 8 (1987), p. 231–274.
- [55] D. HAREL et M. POLITI. *Modeling reactive systems with Statecharts : The Statemate approach*. I-Logix Inc, 1999.
- [56] I. HARJUNKOSKI et I.E. GROSSMANN. « Decomposition techniques for multistage scheduling problems using mixed integer and constraint programming methods ». Dans : (2002), p. 1533–1552.
- [57] Xudong HE et Tadao MURATA. « High-Level Petri Nets - Extensions, Analysis, and Applications ». Dans : *The Electrical Engineering Handbook*. Academic Press, Burlington. Chen, Wai-Kai, 2005, p. 459–475. ISBN : 9780121709600.
- [58] T.A. HENZINGER. « The theory of hybrid automata ». Dans : *LICS IEEE Computer Society* (1996), p. 278–292.
- [59] G. HETREUX, A. RAMAROSON et P. DUQUESNE. « Scheduling of Heat Integrated Multi-purpose Batch Processes ». Dans : *Récents Progrès en Génie des Procédés* 101 - ISBN : 2-910239-75-6 (2011), Axx1–Axx6.
- [60] G. HETREUX, A. RAMAROSON et J. M. LE LANN. « Recipe-driven dynamic hybrid simulation of batch processes : a combined optimization/simulation approach ». Dans : *Proceeding in 21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering - ESCAPE 21* - ISBN : 978-0-444-53895-6 (2011), p. 1095–1099.
- [61] Wai Shin Ho et al. « Electric System Cascade Analysis (ESCA) : Solar PV system ». Dans : *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 54 (jan. 2014), p. 481–486. ISSN : 01420615. (Visité le 19/12/2013).
- [62] W.S. Ho et al. « Design of distributed energy system through Electric System Cascade Analysis (ESCA) ». Dans : *Applied Energy* 99 (nov. 2012), p. 309–315. ISSN : 03062619.
- [63] J.N. HOOKER. « A hybrid method for planning and scheduling ». Dans : (2004).
- [64] J.N. HOOKER. « Planning and Scheduling by Logic-Based Benders Decomposition ». Dans : *Operations Research* 55-3 (2007), p. 588–602.
- [65] J.N. HOOKER et G. OTTOSSON. « Logic-based Benders Decomposition ». Dans : (1995).
- [66] John N. HOOKER. « An integrated method for planning and scheduling to minimize tardiness ». Dans : *Constraints* 11.2-3 (2006), p. 139–157.
- [67] John N. HOOKER. « Hybrid modeling ». Dans : *Hybrid Optimization*. Springer, 2011, p. 11–62.
- [68] IBM. *IBM ILOG OPL V6.3 Language Reference Manual*. International Business Machines, 2009.
- [69] IBM. *IBM ILOG OPL V6.3 Language User's Manual*. International Business Machines, 2009.
- [70] ICHEME. *A Roadmap for 21st Chemical Engineering*. Technical and Strategy Roadmap. 2007.

- [71] IEC 61512-1 *Batch Control - Part 1 : Models and Terminology*. 1997.
- [72] M. G. IERAPETRITOU et C. A. FLOUDAS. « Effective Continuous-Time Formulation for Short-Term Scheduling. 1. Multipurpose Batch Processes ». Dans : *Industrial & Chemical Engineering Resources* (nov. 1998), p. 4341–4359.
- [73] ISA/SP 88 Standard. URL : [www.isa.org](http://www.isa.org).
- [74] V. JAIN et I.E. GROSSMANN. « Algorithms for hybrid MILP/CP models for a class of optimization problems ». Dans : (2001), p. 258–276.
- [75] Stacy L. JANAK et Christodoulos A. FLOUDAS. « Improving unit-specific event based continuous-time approaches for batch processes : Integrality gap and task splitting ». Dans : *Computers & Chemical Engineering* 32 (2008), p. 913–955.
- [76] Stacy L. JANAK, Xiaoxia LIN et Christodoulos A. FLOUDAS. « Enhanced Continuous-Time Unit-Specific Event-Based Formulation for Short-Term Scheduling of Multipurpose Batch Processes : Resource Constraints and Mixed Storage Policies ». Dans : *Industrial & Chemical Engineering Resources* 43 (mai 2004), p. 2516–2533.
- [77] Stephane JULIA et Robert VALETTE. « Real time scheduling of batch systems ». Dans : *Simulation Practice and Theory* 8 (2000), p. 307–319.
- [78] I. A KARIMI et C. M McDONALD. « Planning and scheduling of parallel semicontinuous processes. 2. Short-term scheduling ». Dans : (1997), p. 2701–2714.
- [79] I. C. KEMP. *Pinch Analysis and Process Integration A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. 2nd edition. Elsevier Science, 2007. ISBN : 978 0 75068 260 2.
- [80] I. C. KEMP et A. W. DEAKIN. « The cascade analysis for energy and process integration of batch processes Part 1 : Calculation of energy targets ». Dans : *Institution of Chemical Engineering* (1989), p. 495–509.
- [81] I. C. KEMP et A. W. DEAKIN. « The cascade analysis for energy and process integration of batch processes Part 2 : Network design and process scheduling ». Dans : *Institution of Chemical Engineering* (1989), p. 510–516.
- [82] I. C. KEMP et A. W. DEAKIN. « The cascade analysis for energy and process integration of batch processes Part 3 : A case study ». Dans : *Institution of Chemical Engineering* (1989), p. 517–525.
- [83] IC KEMP. « Applications of the time-dependent cascade analysis in process integration ». Dans : (1990), p. 423–435.
- [84] Y. KESTEN et A. PNUELI. « Timed and hybrid Statecharts and their textual representation ». Dans : *Lecture Note in Computer Science* 571 (1992).
- [85] Jiri J. KLEMES. *Handbook of Process Integration (PI) : Minimisation of energy and water use, waste and emissions*. Woodhead Publishing. 2013.
- [86] E. KONDILI, C. C. PANTELIDES et R. W. H. SARGENT. « A general algorithm for short-term scheduling of batch operations—I. MILP formulation ». Dans : *Comp. and Chem. Eng.* 17/2 (1993), p. 211–227.
- [87] E. KOROVESSI et A. A. LINNINGER. *Batch Processes*. English. Taylor & Francis. CRC Press, 2006. ISBN : 978-0-8247-2522-8.
- [88] P. KRUMMENACHER. « Contribution to the heat integration of batch processes (with or without heat storage) ». Thèse de doct. Suisse : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2002.

- [89] Nitin LAMBA et I. A. KARIMI. « Scheduling Parallel Production Lines with Resource Constraints. 1. Model Formulation ». Dans : (fév. 2002), p. 779–789.
- [90] Nitin LAMBA et I. A. KARIMI. « Scheduling Parallel Production Lines with Resource Constraints. 2. Decomposition Algorithm ». Dans : (fév. 2002), p. 790–800. (Visité le 21/06/2011).
- [91] B. LEE et G. V. REKLAITIS. « Optimal scheduling of cyclic batch processes for heat integration—I. Basic formulation ». Dans : *Computers & Chemical Engineering* 19.8 (1995), p. 883–905.
- [92] Kyu-Hwang LEE, Heung Il PARK et In-Beum LEE. « A Novel Nonuniform Discrete Time Formulation for Short-Term Scheduling of Batch and Continuous Processes ». Dans : (oct. 2001), p. 4902–4911.
- [93] May-Fong LIM et I. A. KARIMI. « Resource-Constrained Scheduling of Parallel Production Lines Using Asynchronous Slots ». Dans : (déc. 2003), p. 6832–6842. (Visité le 21/06/2011).
- [94] X. LIN et al. « Continuous time optimization approach for medium-range production scheduling of a multiproduct batch plant ». Dans : *Industrial and Engineering Chemistry Research* 41 (2002), p. 3884–3906.
- [95] B. LINHOFF, G.J. ASHTON et E.D.A. OBENG. « Process integration of batch processes ». Dans : *IChemE Symposium Series* 109 (1988), p. 221–237.
- [96] B. LINHOFF et J.R. FLOWER. « Synthesis of heat exchanger networks : I. Systematic generation of energy optimal networks ». Dans : (1978), p. 633–642.
- [97] Pierre LOPEZ et François ROUBELLAT. *Project scheduling*. English. London : John Wiley & Sons, Ltd, 2008. ISBN : 9781601199294 1601199295.
- [98] J. LUNZE et F. LAMNABHI-LAGARRIGUE. *Handbook of Hybrid Systems Control : Theory, Tools and Applications*. English. Cambridge University Press. USA : Cambridge University Press, 2009. ISBN : 978-0-521-76505-3.
- [99] M. MACMILLAN. *Data Structures & Algorithms with Javascript*. O'Reilly Media, Inc., 2014.
- [100] T. MAZOJI et (Frank) XX ZHU. « A novel continuous-time MILP formulation for multi-purpose batch plants. 1. Short-term scheduling ». Dans : (2001), p. 5935–5949.
- [101] V. MANIEZZO, T. STUTZLE et S. VOB, éds. *Matheuristics : Hybridizing Metaheuristics and Mathematical Programming*. Springer, 2009. ISBN : 978-1-4419-1305-0.
- [102] C. T MARAVELIAS et I. E GROSSMANN. « A hybrid MILP/CP decomposition approach for the continuous time scheduling of multipurpose batch plants ». Dans : (2004), p. 1921–1949.
- [103] Christos T. MARAVELIAS et Ignacio E. GROSSMANN. « New General Continuous-Time State-Task Network Formulation for Short-Term Scheduling of Multipurpose Batch Plants ». Dans : *Industrial & Engineering Chemistry Research* 42.13 (juin 2003), p. 3056–3074. ISSN : 0888-5885, 1520-5045.
- [104] MATHWORKS. *Matlab Help Documentation*. Rap. tech. 2012.
- [105] SP MAVROMATIS et AC KOKOSSIS. « Conceptual optimisation of utility networks for operational variations—I. targets and level optimisation ». Dans : *Chemical Engineering Science* 53 (1998), p. 1585–1608.
- [106] C. A MÉNDEZ et al. « State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes ». Dans : *Computers & Chemical Engineering* 30 (2006), p. 913–946.

- [107] E. E. MICHAELIDES. *Alternative Energy Sources*. English. Springer. 2012. ISBN : 978-3-642-20950-5.
- [108] J.B. MIKKELSEN. « Thermal energy storage systems in batch processing ». Thèse de doct. Denmark : Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark, 1998.
- [109] Debra A. MILLER et M. E. MANN. *Energy Production and Alternative Energy*. English. Greenhaven Press. USA, 2011. ISBN : 978-0-7377-5106-2.
- [110] M. MINOUX. *Programmation mathématique : Théorie et algorithmes*. Français. TEC & DOC. France : Lavoisier, 2008. ISBN : 978-2-7430-1000-3.
- [111] L. MOCKUS et G. V. REKLAITIS. « Mathematical programming formulation for scheduling of batch operations based on nonuniform time discretization ». Dans : (1997), p. 1147–1156.
- [112] E.D.A. OBENG et G.J. ASHTON. « On pinch technology based procedures for the design of batch processes ». Dans : *Chem. Eng. Res and Des*. 66 (1988), p. 255–259.
- [113] OECD et IEA. *Chemical and Petrochemical Sector IEA Paper*. English. Rap. tech. Sept. 2009, p. 60.
- [114] CM ONG. *Dynamic simulation of electric machinery using Matlab-Simulink*. Prentice Hall PTR, 1998.
- [115] M. PAN, X. LI et Y. QIAN. « Continuous-time approaches for short-term scheduling of network batch processes : Small-scale and medium-scale problems ». Dans : (2009), p. 1037–1058.
- [116] C.C. PANTELIDES. « Unified frameworks for optimal process planning and scheduling ». Dans : (1994), p. 253–274.
- [117] C.C. PANTELIDES, M.J. REALFF et N. SHAH. « Short term scheduling of pipeless batch plants ». Dans : *AICHE National Meeting* (1992).
- [118] L. G PAPAGEORGIOU, N. SHAH et C. C PANTELIDES. « Optimal scheduling of heat-integrated multipurpose plants ». Dans : *Ind. Eng. Chem. Res*. 33 (1994), p. 3168–3186.
- [119] Jocelyne PERRET. « Intégration des réseaux de pétri différentiels à objets dans une plate-forme de simulation dynamique hybride : application aux procédés industriels ». Thèse de doct. Toulouse : Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [120] Jocelyne PERRET, Gilles HÉTREUX et Jean-Marc LE LANN. « Integration of an object formalism within a hybrid dynamic simulation environment ». Dans : *Control Engineering Practice* 12.10 (2004), p. 1211–1223. ISSN : 09670661.
- [121] S. PERRY, J. KLEMES et I. BULATOV. « Integrating waste and renewable energy to reduce the carbon footprint of locally integrated energy sectors ». Dans : *Energy* 33 (2008), p. 1489–1497.
- [122] V. PIEMONTE, M. DE FALCO et A. BASILE. *Sustainable Development in Chemical Engineering*. English. John Wiley & Sons. 2013. ISBN : 978-1-119-95352-4.
- [123] M. PILLET et al. *Gestion de Production : Les fondamentaux et les bonnes pratiques*. Français. Eyrolles Editions d'Organisation. France : Eyrolles, 2011. ISBN : 978-2-212-54977-5.
- [124] Michael PINEDO L. *Scheduling*. English. New York, NY : Springer New York, 2008. ISBN : 978-0-387-78934-7.
- [125] J. M PINTO et I. E GROSSMANN. « Assignment and sequencing models for the scheduling of process systems ». Dans : *Annals of Operations Research* 81 (1998), p. 433–466.

- [126] T. PINTO, A. Q NOVAIS et A. P.F.D BARBOSA-PÓVOA. « Optimal design of heat-integrated multipurpose batch facilities with economic savings in utilities : a mixed integer mathematical formulation ». Dans : *Annals of Operations Research* 120 (2003), p. 201–230.
- [127] M. POUX, P. COGNET et C. GOURDON. *Génie des procédés durables - Du concept à la concrétisation industrielle*. French. Environnement et sécurité. Dunod, 2010. ISBN : 9782100556014.
- [128] A. RAMAROSON et Y. ANDRIANAHAISON. « Ordonnancement des procédés discontinus sous contraintes d'énergie ». Dans : *Mada-ENELSA* 2 - ISSN : 2410-0331 (2014), p. 8–22.
- [129] David REAY, C. RAMSHAW et A. HARVEY. *Process Intensification : Engineering for efficiency, sustainability and flexibility*. English. Butterworth-Heinemann, 2011.
- [130] IEEE Comitee REPORT. « Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies ». Dans : *Transactions in Power Apparatus & Systems* 92-No. 6 (1973), p. 1904–1915.
- [131] Francesco RIZZI, Nees Jan van ECK et Marco FREY. « The production of scientific knowledge on renewable energies : Worldwide trends, dynamics and challenges and implications for management ». Dans : *Renewable Energy* 62 (fév. 2014), p. 657–671. ISSN : 09601481.
- [132] S. ROBINSON. *Simulation : The practice of Model Development and Use*. English. John Wiley & Sons Ltd. England : John Wiley & Sons Ltd, 2004. ISBN : 0-470-84772-7.
- [133] B. ROE, L. G PAPAGEORGIOU et N. SHAH. « A hybrid MILP/CLP algorithm for multipurpose batch process scheduling ». Dans : *Computers & Chemical Engineering* 29 (2005), p. 1277–1291.
- [134] J-C. SABONNADIÈRE. *Low Emission Power Generation Technologies and Energy Management*. English. John Wiley & Sons, Ltd, ISTE Ltd. John Wiley & Sons, Ltd, ISTE Ltd, 2009. ISBN : 978-1-84821-136-0.
- [135] Anis SAHBANI et Jean-Claude PASCAL. « Simulation of hybrid systems using stateflow ». Dans : *Proceedings of the 14th European Simulation Multiconference on Simulation and Modelling : Enablers for a Better Quality of Life*. 2000, p. 271–275.
- [136] N. SHAH, C.C. PANTELIDES et W.H. SARGENT. « A general algorithm for short term scheduling of batch operations -II. Computational issues ». Dans : *Computers and Chemical Engineering* 17 (1993), p. 229–244.
- [137] Munawar A. SHAIK et Christodoulos A. FLOUDAS. « Novel Unified Modeling Approach for Short-Term Scheduling ». Dans : (mar. 2009), p. 2947–2964. (Visité le 22/09/2011).
- [138] J. SIFAKIS. « Use of Petri nets for performance evaluation ». Dans : *Measuring, Modelling and Evaluating Computer Systems* (1977), p. 75–93.
- [139] I. SIMEONOVA. « Online periodic scheduling of hybrid chemical plants with parallel production lines and shared resources ». English. Thèse de doct. Belgique : Université Catholique de Louvain - Ecole Polytechnique, 2008.
- [140] R SMITH. *Chemical process design and integration*. England : John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [141] S. STOLTZE et al. « A simple technique for analysing waste-heat recovery with heat storage in batch processes ». Dans : *Proceeding Int. Conf. organised by CEC "Energy Efficiency in Process Technology", Athens* (1992), p. 1063–1072.
- [142] S. STOLTZE et al. « Waste heat recovery in batch processes using heat storage ». Dans : *J. of Energy Res. Tech. (Trans. of ASME)* 117 (1995), p. 142–149.

- [143] A. SUNDARAMOORTHY et I. A. KARIMI. « A simpler better slot-based continuous-time formulation for short-term scheduling in multipurpose batch plants ». Dans : (2005), p. 2679–2702.
- [144] Andrey SZIJJARTO. « Modeling and Optimization of the Energy Consumption of Chemical Batch Plants ». Thèse de doct. Suisse : ETH Zurich, 2008.
- [145] R. THERY et al. « A formalism for integrated production and site utility system scheduling ». Dans : *Proceeding of the 8th Internation Conference of Modeling and Simulation - MOSIM'10*. Mai 2010.
- [146] Raphaele THERY et al. « The Extended Resource Task Network : A Framework for the Combined Scheduling of Batch Processes and CHP Plants ». Dans : *International Journal Of Production Research* (2011).
- [147] E. S. THORSTEINSSON. « Branch-and-check : A hybrid framework integrating mixed integer programming and constraint logic programming ». Dans : *Proceedings of the International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, CP'01* 2239 (2001), p. 16–30.
- [148] R VALETTE et al. *Modélisation des systèmes de production hybrides*. Rap. tech. 1997.
- [149] P. VARBANOV, J. G KLEMES et F. FRIEDLER. « Cell-based dynamic heat exchanger models-Direct determination of the cell number and size ». Dans : *20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering - ESCAPE 20* (2010), p. 439–444.
- [150] P.S. VARBANOV, S. DOYLE et R SMITH. « Modelling and optimization of utility systems ». Dans : *Chemical Engineering Research and Design* 82 (2004), p. 561–578.
- [151] A. VONINIRINA et S. ANDRIAMBELOSOA. *Etude sur l'énergie à Madagascar*. French. Rap. tech. Centre de Recherches, d'Etudes et d'Appui à l'Analyse Economique à Madagascar (CREAM), 2014.
- [152] Ramsagar VOORADI et Munawar A. SHAIK. « Improved unit-pecific-event-ased model for short term scheduling of batch plants ». Dans : (2012), p. 148–172.
- [153] G. A. WAINER et P. J. MOSTERMAN. *Discrete-Event Modeling and Simulation : Theory and Applications*. English. CRC Press Taylor & Francis Group. USA : CRC Press Taylor & Francis Group, 2011. ISBN : 978-1-4200-7233-4.
- [154] L. WANG et A. Y. C. NEE. *Collaborative Design and Planning for Digital Manufacturing*. English. London, UK : Springer Verlag London Ltd, 2009. ISBN : 978-1-84882-287-0.
- [155] L. WANG et W. SHEN. *Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing*. English. Springer Series in Advanced Manufacturing. London : Springer Verlag London Ltd, 2007. ISBN : 978-1-84628-752-7.
- [156] Y.-P WANG et R SMITH. « Time Pinch Analysis ». Dans : *Trans. IChemE* 73 (1995), p. 905–914.
- [157] J. ZAYTOON. *Systèmes Dynamiques Hybrides*. HERMES Sciences. HERMES Sciences Publications, 2001.
- [158] X.G. ZHAO et al. « Heat integration for batch processes ». Dans : *Institution for Chemical Engineer* 76 (1998).

---

## FICHE DE RENSEIGNEMENT

---

### Auteur

**Nom :** RAMAROSON  
**Prénom :** Anthony  
**Adresse :** Lot II H 43<sup>ter</sup> KJ  
Soavimasoandro - Avarabohitra  
Antananarivo 101 - Madagascar  
**Téléphone :** +261 (0)3 36 46 87 83  
**E-mail :** anthony.ramaroson@hotmail.fr



### Thèse

#### Titre de la thèse :

CONDUITE DES PROCÉDÉS DISCONTINUS SOUS CONTRAINTES  
D'ÉNERGIE

**Nombre de pages :** 180

**Nombre de tableaux :** 24

**Nombre de figures :** 101

**Mots clés :** Ordonnancement, procédés discontinus, simulation dynamique hybride, intégration énergétique, cogénération, ERTN, programmation linéaire en variables mixtes, programmation par contraintes

### Directeur de thèse

**Nom :** ANDRIANAHAHARISON

**Prénom :** Yvon

**Téléphone :** +261 (0)3 31 51 56 27

**E-mail :** yvonkyo@gmail.com

---

## RÉSUMÉ

---

Ce manuscrit présente des travaux sur le pilotage des procédés discontinus sous contraintes d'énergie. La démarche d'aide à la décision proposée est une approche itérative, couplant un module d'optimisation et un module de simulation. Le module d'optimisation traite de l'ordonnancement du procédé continu couplé avec la centrale de production d'utilités et le réseau d'échangeur de chaleur. L'objectif au niveau de l'optimisation est de déterminer une configuration d'ordonnancement permettant de maximiser les échanges d'énergie au niveau du procédé et donc de minimiser les apports d'énergie venant de l'extérieur.

Deux modèles d'ordonnancement sont alors proposés dans nos travaux. Le premier modèle basé sur la représentation à temps continu « Unit Specific Event » est formulé avec la Programmation Linéaire en Variables Mixtes (PLVM). Ce modèle utilise la représentation graphique « Extended Resource Task Network » pour modéliser les interactions entre le procédé, la centrale d'utilité et le réseau d'échangeurs de chaleur. L'exécution de ce modèle d'ordonnancement sur des instances prenant en compte la récupération directe (sans stockage) et indirecte (avec stockage) d'énergie, ont permis d'obtenir les résultats attendus. Cependant, l'augmentation de la taille de l'instance a conduit le modèle à dépenser un temps important pour la simulation des exemples considérés.

Afin de palier à cette limitation, un second modèle d'ordonnancement a été développé. Ce second modèle adopte une décomposition du problème en deux sous problèmes : un problème-maître et un sous-problème. Le problème-maître est formulé avec la PLVM tandis que le sous-problème utilise la Programmation Par Contraintes (PPC). La communication entre les deux sous-problèmes utilise alors la « décomposition de Benders Hybride ». Les résultats obtenus suite à l'exécution de ce modèle hybride ont alors permis d'enregistrer une accélération de la résolution du problème comparée au modèle formulé uniquement avec la PLVM, mais les solutions obtenues sont moins bonnes (sous-optimales) comparées à celles obtenues par le modèle formulé uniquement avec la PLVM.

L'objectif au niveau du module de simulation est de valider ou de rejeter la solution lorsqu'un planning d'ordonnancement est transmis au simulateur par le module d'optimisation. La modélisation du comportement hybride du procédé se fait en modélisant séparément le comportement discret, du comportement continu puis en faisant communiquer les deux modèles par le moyen d'interfaces. La simulation du procédé continu est quant à elle réalisée en couplant le simulateur discret STATEFLOW avec le simulateur continu SIMULINK . Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes intéressés à la simulation d'un procédé de fabrication de PVC (chlorure de polyvinyle). Une bibliothèque de modèles de simulation des différentes opérations rencontrées au niveau du procédé, de la centrale de cogénération et du réseau d'échangeurs de chaleur a donc été développée dans cette thèse.

Lorsque le couplage entre le module d'optimisation et le module de simulation est réalisé pour le procédé de fabrication de PVC, les résultats permettent de conclure sur l'efficacité de l'approche proposée. Cependant, la rétroaction entre optimisation et simulation n'est observée que lorsqu'il est nécessaire d'affiner le modèle d'ordonnancement. Autrement, l'exploitation de la flexibilité du procédé au niveau de la simulation est suffisante pour faire converger la procédure.

Mots clés : Ordonnancement, procédés batch, simulation dynamique hybride, intégration énergétique, cogénération, ERTN, programmation linéaire en variables mixtes, programmation par contraintes

---

## ABSTRACT

---

This thesis concerns with the control of batch processes under energy constraints. The proposed decision process is an iterative scheme coupling optimization and simulation. In other words, the proposed approach is an optimization based simulation of batch process. The optimization module is intended to solve a short term scheduling problem where the batch process, the CHP plant and the heat exchanger network are considered simultaneously. The goal of the optimization module is then to find a schedule with an optimal heat exchange possibility allowing to minimize the external consumption of energy.

Two different scheduling models are proposed in this work. The first model is a continuous time Mixed Integer Linear Programming (MILP) model using the *Unit Specific Event* formalism. This model uses the « Extended Resource Task Network » formalism to represent the interactions between the batch process, the site utility system and the heat exchanger network. The application of the scheduling model on several examples taking account of direct (no storage) and indirect (with storage) heat integration allows to record the expected results. However, a large amount of time was necessary to find the optimal solution.

To overcome this limitation, a second model was developed in this work. This second model decomposes the original problem into two sub-problems : a master problem and a sub problem. The master problem is a MILP model and is a relaxation of the original MILP model without all time dependent constraints. The sub problem is a constraint satisfaction problem and is formulated with Constraint Programming (CP). The communication between the master and the sub problem is then realized according to the « Logic Based Benders' Decomposition ». When the results of the hybrid model are compared with the results of the standalone MILP model, an improvement of the simulation time is achieved on each instance however, the quality of the solutions obtained from the hybrid model is lower compared to those obtained from the pure MILP model. The hybrid model is then retained when the size of the problem becomes intractable for the pure MILP model.

On the other side, the aim of the simulation module is to validate or to reject one solution according to the schedule transmitted by the optimization module. The modeling of the hybrid behavior of the process is achieved by separately modeling the event-based behavior and the time-based behavior. The communication between these two dynamics is then achieved by appropriate interfaces. The simulation of the hybrid system is realized by coupling the discrete event simulator STATEFLOW with the continuous time simulator SIMULINK . We put special interest here to the simulation of a PVC (polyvinyl chloride) plant, a library of simulation models relative to the operations encountered at the batch process, the site utility plant and the heat exchanger level was then developed in this thesis.

When the optimization-simulation procedure is applied on the PVC plant example, the results obtained allow to conclude on the effectiveness of the proposed approach. Additional iterations between optimization and simulation are then required when a refinement of the scheduling model is needed. Otherwise, the convergence of the procedure is achieved by exploiting the flexibility of the process at the simulation level.

Keywords : Scheduling, batch processes, dynamic hybrid simulation, heat integration, cogeneration, ERTN, mixed integer linear programming, constraint programming